

論 文

油中電荷密度測定用プローブの開発

田 中 俊 秀*, 山 田 直 也**

(1983年10月6日受付)

Development of Probe for Measurement of Charge Density in Oil

T. TANAKA* and N. YAMADA**

(Received October 6, 1983)

A new type of probe for the measurement of charge density in oil was developed to investigate streaming electrification phenomena in large power transformers. This probe consists of three circular metal plates arranged in parallel. Two outer electrodes are grounded and the center electrode is isolated electrically from the ground. The charge density in oil can be obtained by measuring the floating potential of the center electrode of the probe immersed in the oil. This probe enables us to measure the charge density in oil and its distribution in large power transformers continuously, without the process of sampling the oil. It is also possible to measure the charge density in oil without being influenced by the external electric field under energization condition of transformers, since the center electrode is shielded electrically by the grounded outer electrodes.

1. まえがき

石油など高絶縁性液体が流動する際、配管系の固体表面で流動帶電により静電気が発生する。この電荷が多量に蓄積すると石油タンクの爆発など、静電気障害が生じることはよく知られている^{1,2)}。

一方、大容量変圧器など大型の電気機器においても、絶縁油の精製技術や固体絶縁物の乾燥技術の向上などに伴い、流動帶電により発生した静電気が、機器の絶縁性能上大きな影響を与えるようになってきた³⁻⁸⁾。このような流動帶電量を把握するには、絶縁油中の電荷量を測定する必要がある。

従来、帶電油中の電荷量の測定にはファラデーケージが使用されてきた。しかし、ファラデーケージを用いてタンク中または変圧器中の油中電荷密度を測定するには、いくつかの難点がある。たとえば、試料油を採油するときに電荷の発生、緩和によって油中電荷が影響を受けたり、また油中電荷密度を連続的に測定できないなど実際には使用できない。

一方、原理的には油中の電位分布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。タンク中やパイプ中の電位分布は金属探査球を用いて測定されてきた⁹⁾が、実際には油中電荷密度を計算する際の境界条件を明らかにするのが困難である。

上記のような測定法における欠点を解消するため、著者等は新しい形の油中電荷密度測定用プローブを開発した。このプローブは接地された2枚の平行平板の間に測定電極を設けたものであり、この測定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。このプローブは、測定電極が2枚の接地電極でシールドされているので、変圧器など構造の複雑な容器内においても、さらに課電物体の近くでも外部電界の影響を受けることなく油中電荷密度を測定できる特長をもっている。

2. 測定原理

油中電荷密度測定用プローブは、図1に示すような一对の平行平板電極の中心に1枚の平板電極を置いたものである。このプローブを電荷密度が一様な帶電油中に浸すと、プローブの中心電極に浮動電位Vが生じる。この浮動電位を測定する場合の等価回路を図2に示す。

図2において電位測定器の入力抵抗をR_m、静電容量をC_m、プローブの漏洩抵抗をR_p、静電容量をC_pとする。測定を始める前にスイッチS_wを閉じ、浮動電位Vをゼロにする。その後、スイッチS_wを開けると油中電荷により中心電極の電位は上昇する。

* 三菱電機株式会社中央研究所 (661 尼崎市塚口本町 8-1-1)

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, 1-1, Tsukaguchi-Honmachi 8-chome, 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 Corporation, 651, Tenwa, Ako, 678-02 Japan

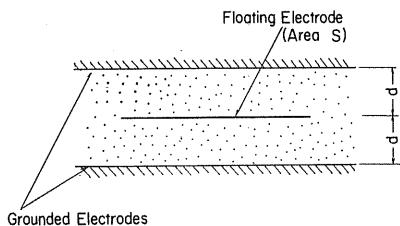


図1 平行平板形プローブの原理

Fig. 1 Principle of parallel plane probe.

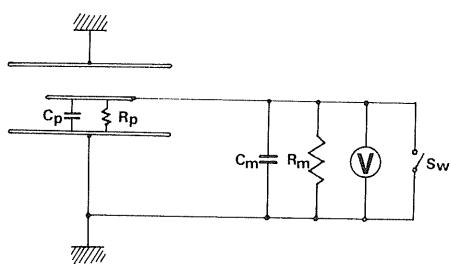


図2 平行平板形プローブによる測定の等価回路

Fig. 2 Equivalent measuring circuit with parallel plane probe.

図3の点線で囲まれた空間にガウスの法則を適用すると時間 t で中心電極から距離 x の点における電界 $E(x, t)$ は次式で表わされる。

$$E(x, t) = -\{q \cdot x + \sigma(t)\} / \epsilon_0 \epsilon_s \quad (1)$$

ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 ϵ_s は絶縁油の比誘電率、 q は油中電荷密度、 $\sigma(t)$ は中心電極の表面電荷密度である。(1)式を $x=d$ から $x=0$ まで積分すると、

$$V(t) = qd^2 / 2 \epsilon_0 \epsilon_s + (d / \epsilon_0 \epsilon_s) \sigma(t) \quad (2)$$

となる。中心電極の浮動電位は、最初接地されているから $\sigma(t)$ および $V(t)$ の初期値は、

$$\sigma(0) = -qd / 2, V(0) = 0 \quad (3)$$

となる。 $\sigma(t)$ は時間とともに減少する。電荷は中心電極表面の電界 $E = -\sigma(t) / \epsilon_0 \epsilon_s$ により油中の電気伝導の過程を経て供給され、その一部は電位測定回路の容量 C_m を充電するのに費やされ、また漏洩抵抗 R_m を通って流出する。 $\sigma(t)$ の減少は、次式のように $E(0, t)$ と油の導電率 κ (S/m) で決定される。

$$S \frac{d\sigma(t)}{dt} = -\frac{\kappa S}{\epsilon_0 \epsilon_s} \sigma(t) - C_m \frac{dV(t)}{dt} - \frac{V(t)}{R_m} \quad (4)$$

ここで S は中心電極両側の表面積である。

(2)式と(4)式を初期条件(3)で解くと、次式のようになる。

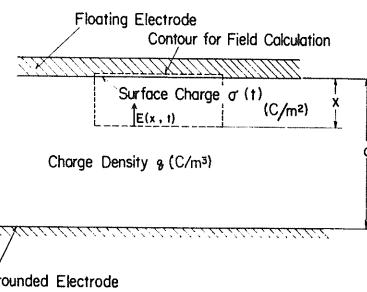


図3 油中電荷による電界

Fig. 3 Electric field caused by charge in oil.

$$V(t) = \frac{qd^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \frac{1}{1 + (1/R_m)(d/\kappa S)} \times \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{1/R_m + \kappa S/d}{C_m + \epsilon_0 \epsilon_s S/d} t \right) \right\} \quad (5)$$

(5)式は $t=\infty$ で

$$V(\infty) = \frac{qd^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \frac{1}{1 + (1/R_m)(d/\kappa S)} \quad (6)$$

に漸近する指数関数であり、時定数 τ は

$$\tau = \frac{C_m + \epsilon_0 \epsilon_s S/d}{1/R_m + \kappa S/d} \quad (7)$$

である。 $d/\kappa S$ は油中での漏洩抵抗 R_p 、 $\epsilon_0 \epsilon_s S/d$ はプローブの静電容量 C_p に等しい。

ここで、 $(1/R_m) \cdot (d/\kappa S) \ll 1$ 、 $\epsilon_0 \epsilon_s S/d \gg C_m$ の場合、浮動電位を V_∞ とすると、

$$V_\infty = qd^2 / 2 \epsilon_0 \epsilon_s \quad (8)$$

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_s / \kappa \quad (9)$$

となる。

3. 平行平板形プローブの構造

平行平板形プローブは、図4に示すように、2枚の外部電極および中心電極の3枚の金属板で構成されている。2枚の外部電極は金属棒により一定の間隔に保たれ、かつ取付金具により接地されている。

中心電極は外部電極より小さく、テフロン支持棒により外部電極間の中央に固定され接地から浮かされている。金属性支持パイプの端には、油密性のコネクタを取り付けた端子箱が設置されている。中心電極からの信号線には、耐熱、耐油性のテフロン同軸ケーブルを使用している。今回製作したプローブのおもな諸元は次のとおりである。

中心電極	直径 50 mm	厚さ 0.3 mm	黄銅製
外部電極	直径 100 mm	厚さ 1.0 mm	黄銅製
電極間距離		10 mm	
支持パイプ	直径 16 mm		銅製

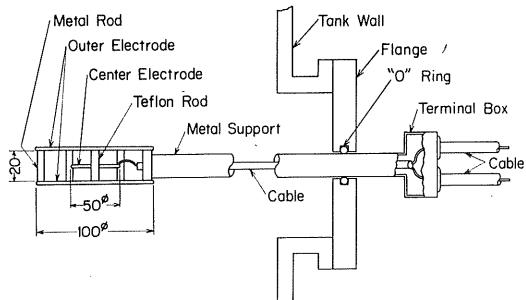


図4 平行平板形プローブの構造

Fig. 4 Construction of parallel plane probe.

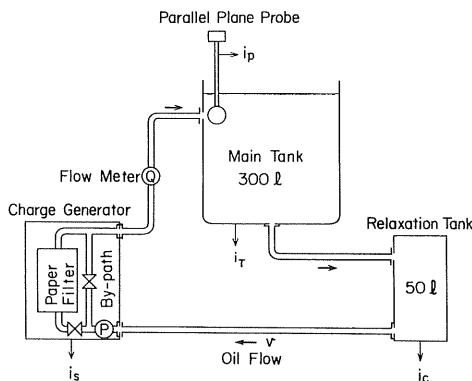


図5 較正装置

Fig. 5 Calibration system.

4. 油中電荷密度の測定

4.1 較正装置

平行平板形プローブを用いて実際に油中電荷密度の測定を行なう前に、プローブの較正を行なった。図5に較正装置の概略を示す。

紙フィルタとその配管によって構成される電荷発生装置で油中電荷を発生させ、測定タンクに送り込む。油中電荷密度は、紙フィルタの配管およびバイパスに設置されたゲートバルブの開閉により調節される。油を流すギヤーポンプの最大能力は $30 \text{ l}/\text{min}$ 、油路路の容量は測定タンク、除電タンク、配管あわせて約 400 l である。したがって油が較正装置を一巡するのに 13 分以上かかり、一方油の導電率を $\kappa = 1 \times 10^{-13} \text{ S/m}$ とすると、緩和時間は約 200 秒で、油が一巡するまでに油中電荷は十分除電される。較正装置の各構成部分間および全体は大地から電気的に絶縁されており、各部分から漏洩電流を測定することができる。ただし、各構成部分間を接続している配管は、どちらかの構成部分に電気的に接続されている。たとえば、電荷発生装置と測定タンク間に使用され

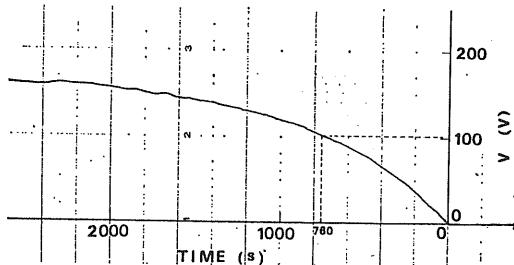


図6 平行平板形プローブによる電位波形

Fig. 6 Waveform of floating potential measured by parallel plane probe.

ている配管は電気的に電荷発生装置に接続され、測定タンクとは絶縁されているため、配管内での流动帶電による静電気は電荷発生装置で発生する電荷量に含まれる。

電荷発生装置において発生する油中電荷密度 $q (\text{C}/\text{m}^3)$ は、

$$q = -i_s/Q \quad (10)$$

で求めることができる。ここで、 i_s は電荷発生装置から漏洩する電流 (A)、 Q は油流量 (m^3/s) である。電荷発生装置において発生した油中電荷は測定タンクに流れ込み、この油にプローブを浸して油中電荷密度を測定することにより、プローブの較正を行なうことができる。

4.2 電位の測定

中心電極の電位の測定には、高入力抵抗をもった電位測定器を使用する必要がある。本実験では、振動容量型微小電流電位計（タケダ理研 TR-84 M）、回転セクタ電位計（小林理研）および集電式電位計（春日電機）を用いて電位の測定を行なった。振動容量型電位計の場合、入力抵抗は $10^{15} \Omega$ 以上あるが、最大 30 V までしか測定できないので、 30 V 以上の電位を測定するときは、抵抗分圧器を使用した。この抵抗分圧器には $10^{14} \Omega$ の高抵抗 (VICTREEN) を使用し入力抵抗を高く保っている。この方法でプローブを帶電油中に浸し、プローブ電位を測定した波形の一例を図6に示す。測定条件は油温 40°C 、油の導電率 $\kappa = 6.25 \times 10^{-13} \text{ S/m}$ 、比誘電率 $\epsilon_s = 2.2$ 、測定回路の入力抵抗 $R_m = 1 \times 10^{14} \Omega$ 、静電容量 $C_m = 180 \text{ pF}$ である。プローブ中心電極両面の面積は $S = 3.93 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、電極間隔は $d = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$ であるので、プローブの漏洩抵抗 R_p および静電容量 C_p は

$$R_p = d/\kappa S = 4.07 \times 10^{12} \Omega \quad (11)$$

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_s S/d = 7.66 \times 10^{-12} \text{ F} \quad (12)$$

電位が上昇する時定数 τ は(7)式より、

$$\tau = 734 \text{ s} (= 12.2 \text{ min}) \quad (13)$$

となる。一方、図6の測定波形は時定数 $\tau = 760 \text{ s}$ で上昇しており(13)式とほぼ一致している。また図6の測定

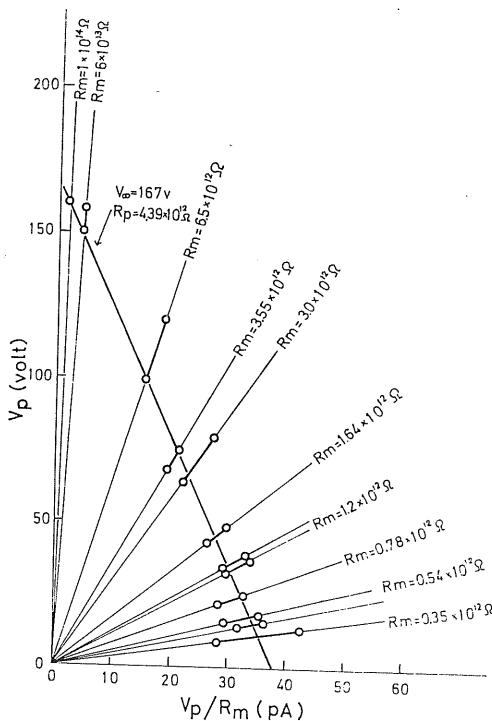


図7 プローブ電圧に及ぼす測定回路のインピーダンスの影響

Fig. 7 Dependence of floating potential on measuring circuit impedance.

例の場合 $V(\infty)=160$ V, 油中電荷密度は(6)式より, $q=64.9 \mu\text{C}/\text{m}^3$ となる。

一方、回転セクタ電位計および集電式電位計の場合、直接プローブ中心電極の電位を測定するのは不可能であるため、いったん金属板に中心電極の出力を接続し、その金属板の電位を非接触で測定する。この手法を用いれば kVオーダーの高電圧も測定可能であるが、金属板の支持、測定環境によって測定値が影響を受けやすい。

これらの測定回路の入力抵抗 R_m をパラメータとして、プローブを帶電油中に浸したときのプローブ電位飽和値 V_p を測定した。このプローブ電位 V_p を縦軸にとり、測定回路を流れる電流 V_p/R_m を横軸にとってプロットしたものが図7である。図中○—○印は測定値の振幅を示している。

いま(6)式を変形して

$$V_p = V_\infty - R_p(V_p/R_m) \quad (14)$$

とすると、(14)式は図7において各プロットを結ぶ右下りの直線で示される。図7の場合、 $V_\infty=167$ V, $R_p=4.39 \times 10^{12} \Omega$ となる。これは(11)式とほぼ一致する。

4.3 較正結果

較正装置を流れる油流量を変化させた場合に各部分か

表1 較正装置各部からの漏洩電流

Table 1 Leakage currents from calibration system.

Q (1/min)	\bar{v} (m/s)	i_s (nA)	i_t (nA)	i_r (nA)	i_p (nA)
2.4	0.127	-3.0	2.2	0.0	0.3
5.5	0.292	-16.0	15.0	0.1	0.7
7.3	0.387	-26.8	24.9	0.25	0.85
12.2	0.647	-59.5	50.5	0.0	6.0

$T=20^\circ\text{C}$

ら流出する漏洩電流を表1に示す。ここで、 \bar{v} は直径20 mmの配管中の平均流速である。油が紙フィルタを通過するとき、紙は負電荷を選択的に吸着し、正電荷は油とともにフィルタから流出する。紙フィルタに吸着した負電荷は紙フィルタから負の電流として大地に向かって流出する。一方、油とともにフィルタから流出した正電荷は、測定タンクおよび緩和タンクにおいて大地に向かって緩和していく。紙フィルタにおいて発生する負電荷量と正電荷量は等しく、較正装置全体は大地から電気的に絶縁されているため、平衡状態では装置各部から電流計を通して流出する電流の和はゼロになるはずである。表1においては、電荷発生装置から流出する漏洩電流 i_s と、測定タンク、緩和タンクおよびプローブの接地部から流出する漏洩電流 i_t , i_r , i_p の合計とは、符号が逆で絶対値は比較的よく一致している。

プローブは、油が配管から測定タンクに注入された直後に設置されるため、(10)式で与えられる油中電荷量がプローブ内に供給される。表2に、表1で示した油流量の場合の電荷発生装置からの漏洩電流 i_s 、プローブ電圧 V_p と、 i_s および V_p の値からそれぞれ(10)式および(8)式を用いて算出した油中電荷密度 q_1 および q_p を示す。また表2において求めた q_1 と q_p の関係を図8に示す。同図において、 q_p 値は q_1 の約 1/2 となっている。この原因としては次のようなことが考えられる。

この較正装置では直径20 mmの配管から測定タンクに帶電した油が供給される。プローブは油の流出口のすぐ近くに設置されるため、配管から流出する帶電油は、配管の径よりあまり広がっていない。プローブの中心電

表2 油中電荷密度の測定値

Table 2 Data measured by parallel plane probe.

\bar{v} (m/s)	i_s (nA)	q_1 ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)	V_p (V)	q_p ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)
0.127	-3.0	75	93	36.2
0.292	-16.0	175	202	78.7
0.387	-26.8	220	289	112.6
0.647	-59.5	292	370	144.1

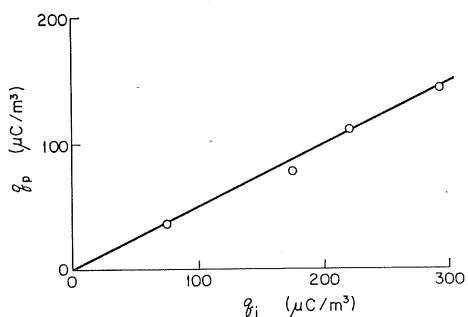
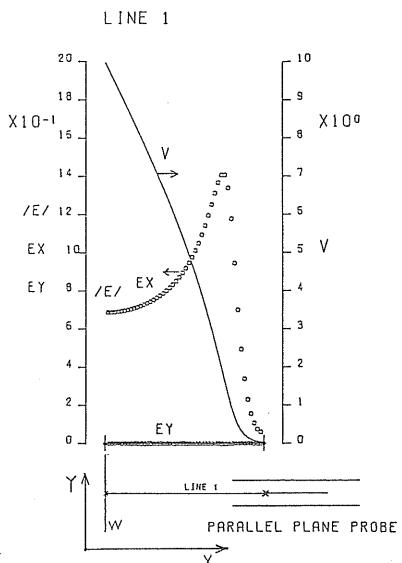
図8 q_i と q_p の関係Fig. 8 Relation between q_i and q_p .

図9 外部電界の影響

Fig. 9 Calculation result of influence by external electric field.

極は直径 50 mm であり、中心電極の約 1/2 の面積部分にしか油中電荷が存在しないため、電荷が存在しない電極間に負荷抵抗として作用し、測定回路の入力抵抗に並列に入る。この仮定のもとでの(4)式の定常解は、(6)式において $1/R_m$ を $(1/R_m + 1/2 R_p)$ と、 $d/\kappa S$ を $2 R_p$ と置き換えたものに等しくなる。すなわち、

$$V_p = V(\infty) = \frac{qd^2}{2\epsilon_0\epsilon_s} \frac{1}{1 + (1/R_m + 1/2R_p) \cdot 2R_p} \quad (15)$$

となるから、 $R_m \gg 2R_p$ のときの(15)式は、

$$\begin{aligned} V_p &\approx V_\infty \frac{1}{1 + (1/2R_p) \cdot 2R_p} \\ &\approx (1/2)V_\infty \end{aligned} \quad (16)$$

となり、真の値の約 1/2 になっているものと考えられる。

4.4 近接課電物体の影響

変圧器など実際の機器内には、あらゆる場所において交流電界がかかっているため、プローブ電圧が影響を受ける可能性がある。また流動帶電により発生した油中の電荷や、固体絶縁物に蓄積した電荷により発生する直流電界により、プローブ電圧が影響を受ける可能性がある。しかし、本プローブの場合、中心電極の直径が 50 mm で、両側を直径 100 mm の接地された外部電極によってはさまれているため、外部電界が中心電極に到達する割合は非常に小さい。図 9 に電界計算した結果を示す。プローブを比誘電率 2.2 の変圧器油に浸し、プローブの中心電極端 (x印) より 10 m 離れた壁 W に、D.C. 10 V を印加したときの LINE I 上の電位 V 、 X および Y 方向の電界 E_x 、 E_y と、電界の絶対値 $|E|$ を求めたものである。中心電極端での電界は 0.05 V/m で、平均電界 1 V/m に対し 5% にまで減衰している。すなわち、接地された外部電極が中心電極に対して、電気的によいシールドとなっていることがわかる。

また、実際に油中に浸されたプローブから水平、垂直両方向に 100 mm 離れた所にコイルを設置し、A.C. 15 kV を印加してもプローブ電圧はまったく変化しなかった。

5. 測定限界と問題点

5.1 高速油流中における電荷密度の測定

平行平板形プローブを用いて油中電荷密度を測定する場合、プローブ内の油中電荷が電極に緩和するため、それを補うのに十分な電荷量を油流によって補給する必要がある。しかし、流速があまり速くなるとプローブの電極と油による流動帶電を生じ、プローブ電圧に大きな誤差を与える原因となる。

いまプローブが高速油流に浸されたときのプローブ電位の変化を調べてみた。

図 5 の較正装置において電荷発生装置のバイパスを開き、紙フィルタのバルブを調節することにより、油中電荷密度ができるだけ一定の油流を作り出す。このようにして油流速を変化させたときの電荷発生装置からの漏洩電流 i_s およびプローブ電圧 V_p' の測定値を表 3 に示す。この表よりプローブ電圧は油流速が速くなると、正から負に変化していることがわかる。プローブ自身の流動帶電による測定誤差は、プローブ電圧 V_p' を油中電荷密度に換算した値 q_p' から、真の油中電荷密度 q_p を差し引いたもので求めることができる。一方 4.3 節で述べたように、図 5 の較正装置を用いて油中電荷密度を測定すると、

表3 プローブの油流による自己帶電量

Table 3 Streaming electrification at probe itself by oil flow.

Q (1/min)	\bar{v} (m/s)	i_s (nA)	q_p^i ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)	V_p' (V)	q_p' ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)
5.6	0.30	-0.4	4.29	1.0	0.40
7.6	0.40	-0.7	5.53	0.0	0.0
10.8	0.58	-0.8	4.54	-3.0	-1.20
15.4	0.82	-1.0	3.90	-7.5	-3.00
22.0	1.17	-1.6	4.36	-11.9	-4.75
30.0	1.59	-2.25	4.50	-17.7	-7.08

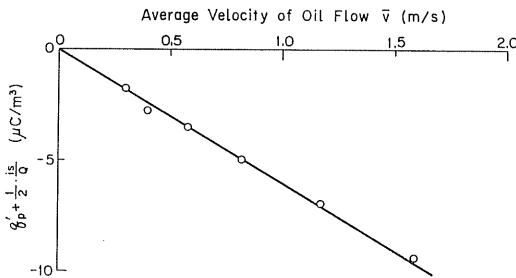
 $T=20^\circ\text{C}$ 

図 10 プローブの自己帶電量の油流速依存性

Fig. 10 Dependence of streaming electrification at probe itself on flow velocity.

$$q_p = -(1/2)(i_s/Q) \quad (17)$$

となっており、プローブの自己帶電による誤差は次の式で求めることができる。

$$q_p' - q_p = q_p + (1/2)(i_s/Q) \quad (18)$$

図 10 は(18)式を用いて求めたプローブの自己帶電量の油流速依存性を示したものである。プローブの自己帶電は、油と電極の界面で起こるが、油と紙の界面における流動帶電の場合と同じく、電極が負極性、油が正極性に帶電する。もともと被測定油の油中電荷密度が大きい場合には、プローブの自己帶電による誤差はそれほど問題にはならないが、微小電荷密度の測定において高速流に浸される場合は大きな誤差を生じる。

5.2 測定時間

プローブ電圧 V_p の立上り時定数 τ は、(7)式に示されるように測定回路の静電容量 C_m と、入力抵抗 R_m に大きく依存する。プローブ電圧の測定は、入力抵抗 R_m が大きいほど測定精度が上がり、静電容量 C_m が小さいほど測定時定数が短くてすむ。しかし、 R_m の上限、 C_m の下限から考えて、測定時定数を小さくすることは困難である。とくに大型の変圧器などに平行平板形プローブを実装して油中電荷密度を測定する場合、プローブから電位測定器までの距離が長くなり、ときには 10 m

にも達することがある。プローブから電位計までの信号線には、外部雑音や、ケーブル自身の振動による雑音を防止するため同軸ケーブルを使用するが、一般に同軸ケーブルの静電容量は大きく、低容量の同軸ケーブル (RG-114 U) を使用しても 20 pF/m である。したがって、プローブから電位計までの静電容量は 200 pF となり、このほかプローブの電極間および電極から端子ボックスまでの同軸ケーブルの静電容量が 100 pF 以上あるため、(7)式における $C_m + \epsilon_0 \epsilon_s S/d$ は約 300 pF となる。測定回路の入力抵抗 $R_m = 1 \times 10^{14} \Omega$ 、プローブの漏洩抵抗 $R_p = d/\kappa S = 4.07 \times 10^{12} \Omega$ とすると、測定時定数 $\tau = 1, 173.7 \text{ s}$ (19.56 min) となり、短時間に多くの情報を得ることができない。

6. 平行平板形プローブの改良

平行平板形プローブの場合、中心電極の端部に油流が当たることによる自己帶電がプローブ電圧に誤差を与える最も大きな要因であると考えられる。したがって、中心電極の周囲にガードリングを備え、油流が中心電極端部に衝突しないようにすればよい。改良型プローブは図 11 に示すように、中心電極の周囲にガードリングを、また外部電極の外側にシールド電極を備えた構造となっている。

ガードリングで発生した電荷を大地に流すためには接地する必要があるが、ガードリングを接地すると平行平板電極内の電位分布を乱すとともに、ガードリングと中心電極との間の絶縁抵抗が低くなり油中電荷密度を精度よく測定することが困難になる。この問題は測定回路に負帰還回路を用いることで解決できる。すなわち、中心電極と接地との間の電位差を検出し、その電位差がゼロになるように外部電極に電圧を印加する。この手法を用いれば中心電極がゼロとなるため、ガードリングと中心電極との間の絶縁抵抗もまったく問題とならないばかりでなく、測定時間が大幅に短くなる。

実際には、改良型プローブを用いた油中電荷密度の測定において、自己帶電量は約 $1/7$ に、また測定時定数は約 6 秒にまで減少させることができた。この改良型プローブを用いて、大型変圧器内の冷却ダクトを模擬したモデル⁶⁾の油流出口での油中電荷密度を測定した一例を図 12 に示す。この図は、ダクト出口での油中電荷密度の時間的な平均値は約 $160 \text{ } \mu\text{C}/\text{m}^3$ で、部分的にダクト内で発生した放電により油中電荷密度が急激に変化していることがよく測定できている。

7. あとがき

流動帶電によって発生した油中電荷密度を測定するた

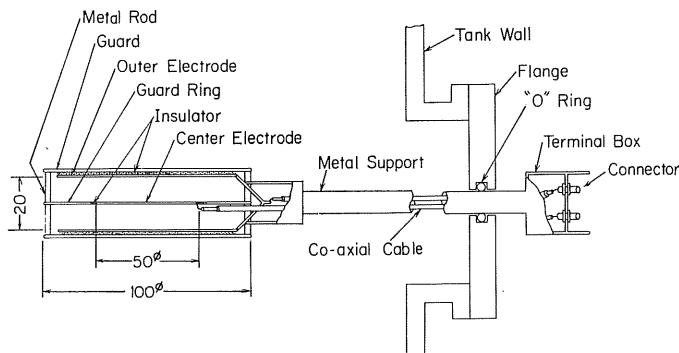


図 11 改良型プローブの構造

Fig. 11 Construction of improved probe.

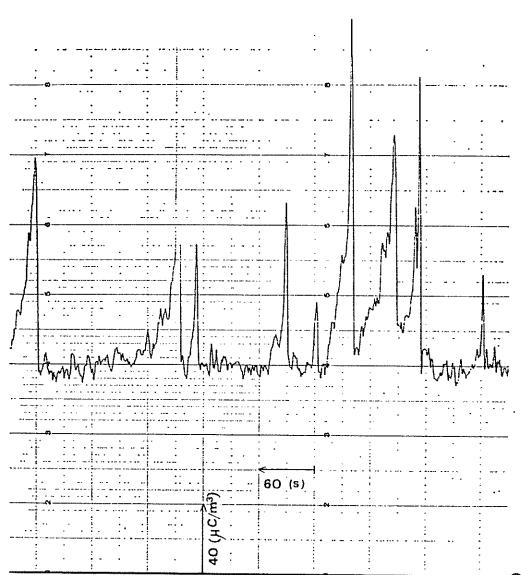


図 12 改良型プローブによって測定された油中電荷密度の過渡現象

Fig. 12 Transient phenomena of charge density in oil measured by improved probe.

めに、平行平板形のプローブを開発した。このプローブは採油することなく油中電荷密度を測定できるとともに、時間的にも連続して測定できるという特長をもっている。またプローブの外部電極が接地されているので、外部電界の影響もほとんど受けることがなく、変圧器など実際の機器内における油中電荷密度分布も十分に知ることができ、流動帶電現象の把握に対し大きく貢献している。

一方、このプローブは、外部電荷に直流電圧を印加し、中心電極に流れる電流を測定することにより、油の導電率を精度よく、しかも時間的に連続して測定できる

という特長も兼ね備えている¹⁰⁾。

なお、平行平板形プローブは油中電荷によって電極間に発生する電圧を測定する電圧形であるが、試料油を採油し油中電荷が緩和する量を測定することにより、油中電荷密度を測定する電流形のプローブも開発した¹¹⁾。

最後に、この研究にあたりご支援、ご助力をいただいた各電力会社をはじめ、三菱電機㈱の関係各位に厚くお礼申し上げます。とくに、平行平板形プローブの開発、改良に絶大なご指導とご協力を賜わった当社・新田東平氏、嘉本覚氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. Klinkenberg and J.L. Van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 2) 静電気学会編：静電気ハンドブック，pp. 732-777，オーム社（1981）
- 3) T. Takagi, T. Ishii, T. Okada, K. Kurita, R. Tamura and H. Murata : 1978 CIGRE SC-12 Committee Report, No. 12-02 (1978)
- 4) 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 (1978) 915
- 5) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii, N. Yamada and T. Nitta : IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-99 (1980) 335
- 6) T. Tanaka, Y. Yasojima, N. Yamada, A. Kishi and T. Nitta : IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-99 (1980) 1097
- 7) 田村良平, 渡邊次男, 宮本晃男, 山田直也: 静電気学会誌, 3 (1979) 266
- 8) 田中俊秀, 山田直也, 岸 章夫, 八十島義行: 静電気学会誌, 3 (1979) 274
- 9) 上田 実, 伊藤正一: 電気学会雑誌, 90 (1969) 1539
- 10) 田中俊秀, 嘉本 覚, 新田東平: 昭和52年電気学会関西支部連合大会予稿集, G-12 (1977)
- 11) S. Kamoto : International Workshop on Electric Charges in Dielectrics, No. 10 A-3, p. 32 (1978)