

## 論 文

## 絶縁油の流動帶電特性に及ぼす交流、直流電界の影響

檜 垣 勝\*, 宮 尾 博\*

(1983年12月23日受理)

Influence of AC or DC Field upon Streaming Electrification  
of Insulating Oil

M. HIGAKI\* and H. MIYAO\*

(Received December 23, 1983)

Making transformer oil flow through oil gap in uniform field electrode systems, we studied the streaming electrification phenomena in oil gap under AC voltage and also DC voltage application. It is found that the static charges in transformer oil increases positively with the increase of applied AC voltage. When AC field strength is lower than 1 kV/mm, the increment of the streaming current from oil gap under AC voltage application against that without AC voltage becomes large at higher oil temperature and hardly depends on oil flow velocity. It is considered that the increase of streaming current at low AC field is caused by the vibration of positive ions separated into oil at the interface between oil and electrode. When AC field strength is higher than 1 kV/mm, streaming current from oil gap becomes to increase largely with AC field strength. In case of DC voltage application, it is found that transformer oil is charged slightly positively at lower DC field strength, negatively at higher DC field strength than 0.5 kV/mm, and finally increases in negative polarity with the increase of DC field strength. It is considered that transformer oil flowing through oil gap under DC field may be charged because of the difference of positive and negative ion mobilities.

## 1. まえがき

絶縁性の液体が固体と接して流れるとときに静電気が発生する。この現象は流動帶電現象として従来からよく知られているものであり、とくに石油工業における原油などのパイプ内輸送時の問題としてよく調べられてきている<sup>1)</sup>。近年において大容量変圧器でもこの流動帶電現象がクローズアップされるようになったが、各所で変圧器内の流動帶電現象を解明する研究が進められた結果、その現象の特徴がかなり明らかになり、その対策もほぼ確立されてきている<sup>2-5)</sup>。

ところで変圧器内の流動帶電現象のうち従来にない特徴の一つに交流励磁されている間隙中を絶縁油が流れている場合の現象解明が挙げられる。交流電圧がかかっている間隙中を絶縁性の液体が流動するとどのような帶電現象が起きるのかという点について従来まったく調べられてはいなかった。実際の変圧器を用いての交流励磁

時の帶電現象が最近実験的に調べられたのみである<sup>2,4)</sup>。その際、変圧器巻線を励磁すると流動帶電により生ずる巻線の対地漏れ電流が増大し、交流励磁の影響を大きく受けすることが明らかにされた。しかし、巻線の対地漏れ電流は静電荷の発生だけでなく、静電荷の緩和との総和により決まるものであり、交流課電により静電荷の発生がどのように影響を受けるかは明らかではなかった。

本論文は絶縁油が電圧印加されている間隙中を流動したときの絶縁油の帶電特性を基本的に明らかにしようとするものであり、交流電圧のみならず直流電圧印加の影響について調べた結果を報告する。直流電圧印加時の絶縁油の帶電現象については、大橋ら<sup>8)</sup>がシリコン油を用いて微小間隙(50 μm)で実測している。本論文は変圧器油を用いて、とくに低電界領域での帶電特性について調べたものである。

## 2. 実験方法

## 2.1 油流回路および電極構造

図1は交流あるいは直流電圧がかかっている間隙中を絶縁油が流動したときの絶縁油の帶電特性とその電極間での電気伝導特性を調べるために用いた実験装置であ

\* 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

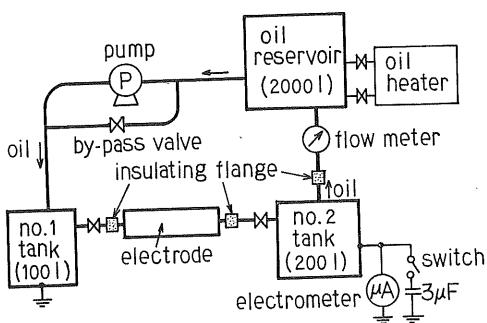


図1 実験回路  
Fig. 1 Test circuit.

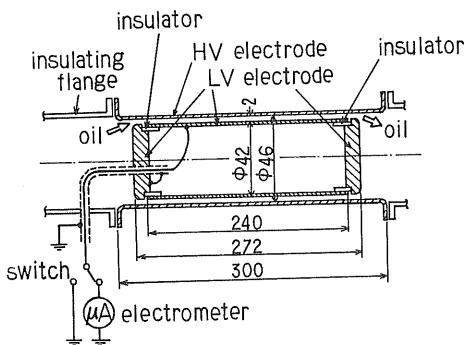


図2 電極構造  
Fig. 2 Electrode constitution.

る。図1において、リザーブタンク(2,000 l)の絶縁油はギヤポンプによりいったんNo.1タンクに送り込まれたのち、電圧が印加されている供試電極間に流し込まれる。供試電極は図2のような構造であり、同軸円筒状の電極間に形成された細い間隙中を絶縁油が流れるようになっており、ここで流動帶電が起こるようにした。供試電極はその両端にとりつけた絶縁フランジにより配管類や大地から絶縁されている。この供試電極間を通り抜けた絶縁油は下流側のNo.2タンクに入り、供試電極間で帶電した絶縁油中の帶電電荷がここで緩和するようにした。No.2タンクは絶縁フランジにより大地から絶縁されており、タンクから大地に向けて流れる電流を微小電流計を用いて測定することによりタンクに入ってくる油中電荷の量を求めることができる。実験に用いた絶縁油は油加熱装置により適当な温度に調整され、また油流量はバイパス弁により調節された。

供試電極の内部構造を図2に示す。外径42 mmの内側電極と内径46 mmの外側円筒電極とから成り、その間隙2 mm中を絶縁油が流れる。交流電圧の場合でも直流電圧の場合でも常に外側電極に高電圧を印加し、内側電極を接地側低圧電極としている。電極はいずれも黄銅

製であり、外側電極の両端はアクリル製の絶縁フランジにより対地から絶縁されている。内側電極は3分割されており、両端の電極はガード電極として常に接地されている。

実験に使用した絶縁油は、市販の変圧器油である。油中水分10 ppm以下であり、十分脱気されている。また本論文で使用する電界の強さあるいは油流速とは電極間隙2 mm中の電界の強さ、油流速のことである。

## 2.2 交流電圧印加

交流電圧印加時には外側円筒電極に高電圧を印加し、内側低圧電極をすべて接地した。この電極間隙中で流動帶電させ、No.2タンクに流れ込む流動電流を測定した。その際No.2タンクへの流動電流のうちの交流分をフィルタするために微小電流計と並列に3 μFのコンデンサを接続した。電流計の入力抵抗は最大10 MΩであり、時定数は最大30秒となる。したがって、交流電圧印加時の流動電流は電圧印加後1分以上実測し、その電流値が一定になったときの値を用いている。なお、絶縁油を流さない状態でのNo.2タンクから対地への漏洩電流は交流電圧印加80 kVrmsでも $1 \times 10^{-5} \mu\text{A}$ 以下であり、油流時の流動電流に比べて十分小さくなっている。

## 2.3 直流電圧印加

直流電圧印加時には外側円筒電極に正極性あるいは負極性の高電圧を印加し、内側低圧電極のうち両端の電極を接地し、真中の電極を微小電流計を介して接地した。この電極間に直流電圧を印加し、電極間隙での伝導電流とNo.2タンクに流れ込む流動電流とを測定した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 交流電圧課電の影響

まず電極間に交流電圧を印加しない状態で電極間で流動帶電させ、油流速と流動電流 $I_0$ との関係を実測した結果が図3である。流動電流 $I_0$ は油流速の0.6~0.9乗に比例して増大している。油流速2.5 m/s、油の温度50°Cでの電極間隙のレイノルズ数は1,400であり、これらより本実験条件ではいずれも層流になっていると考えて良いといえる。

次に、電極間に交流電圧を印加した状態で絶縁油を強制的に流動させ、そのときに生ずる流動電流 $I_s$ と電極間の交流電界の強さとの関係を実測した。その結果が図4である。油温10°Cと50°Cの二つの場合について油流速を0.5, 1.0, 2.5 m/sと変えて実測した例である。図4によれば、間隙中に交流電圧が印加されると流動電流は増大し、絶縁油中の帶電電荷が増加することがわかる。

交流課電することにより流動帶電による電荷の発生が

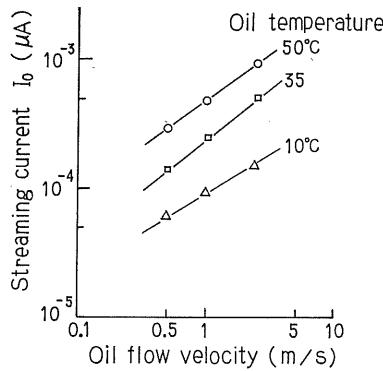


図3 無課電時の油流速と流動電流との関係

Fig. 3 Relationship between oil flow velocity and streaming current without AC voltage application.

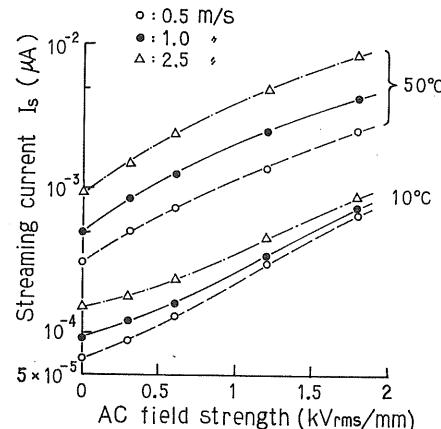


図4 交流電界の強さと流動電流との関係

Fig. 4 Relationship between AC field strength and streaming current.

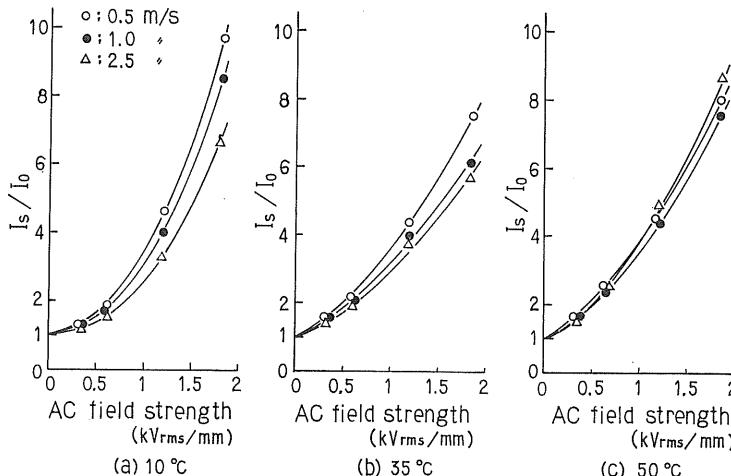
図5 交流電界の強さと  $I_s/I_0$  との関係

Fig. 5 Relationship between AC field strength and  $I_s/I_0$ .

どのように増大するかを示すために、課電時の流動電流と無課電時の流動電流との比 ( $I_s/I_0$ ) を求め、交流電界の強さとの関係を示したのが図5である。これらより次のようなことがわかる。

(1) 交流電界の強さが低い領域では油温が高いほうが交流電圧印加による流動電流の増加が大きくなり、また油流速の違いの影響はほとんどない。

(2) 交流電界の強さが高くなり、1 kV/mm を越えるようになると、油温が低い場合の交流電圧印加による流動電流の増加が急に大きくなり、 $I_s/I_0$  に及ぼす油温の影響が小さくなる。また、油温が高いと油流速の違いの影響はほとんどないが、油温が低いと油流速の違いの影響

が現われるようになる。

このように交流電圧を印加すると流動電流が大きくなることは実変圧器においても確認されているが、その原因はまだ明らかではない。一つの考え方として、固体と絶縁油との界面で電荷分離が起きている状態で交流電圧がかからると油中に分離された電荷の見かけのデバイ長が大きくなり、油中に広がって分布するようになるためではないかという考えがあるが<sup>5)</sup>、まだ実証されてはいない。そこで、ここでは、油流により固体と絶縁油との界面で電荷分離が起きており、交流課電されるとそのように分離された油中過剰電荷が交流電界に応じて油中を振動するという単純な仮説のもとに交流課電の効果が説明でき

ないかを検討してみる。

まず、交流電圧なしの状態で油流により電荷分離が起き、油中側に生じた過剰電荷密度  $q$  が次式で与えられるとする。

$$q = (q_0/\delta) \exp(-x/\delta) \quad (1)$$

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

ここで  $D$  は油中イオンの拡散係数、 $\varepsilon$  と  $\kappa$  は絶縁油の誘電率と導電率であり、 $q_0$  は固体表面の過剰電荷密度である。 $x$  は固体表面から油中側にとった距離であり、油中に過剰に分離される電荷は図 3 に示したごとく正イオンである。今回の実験で使用した変圧器油の導電率は  $4 \sim 6 \times 10^{-13}$  S/m (常温) であり、イオン拡散係数  $D = 4 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s として、(2)式で与えられるデバイ長  $\delta$  は  $0.03 \sim 0.04$  mm となる。この値は電極間距離 (2 mm) に比べて十分小さい。このようにデバイ長  $\delta$  が電極間距離  $d$  に比べて十分小さいと、発生する流動電流  $I_0$  は

$$I_0 = 2l \cdot \int_0^{d/2} q \cdot v(x) dx \quad (3)$$

となる。 $l$  は電極の周長であり、 $v(x)$  は  $x$  方向の流速分布である。層流の場合、電極近傍では

$$v(x) = Ax \quad (A: \text{定数}) \quad (4)$$

で近似できる。したがって、流動電流  $I_0$  は

$$I_0 = (2l \cdot A \cdot q_0 / \delta) \int_0^{d/2} x \cdot \exp(-x/\delta) dx \quad (5)$$

となり、これを  $d/2 \gg \delta$  として解くと

$$I_0 = 2l \cdot A \cdot q_0 \delta \quad (6)$$

となる。

次に、このように流動帶電している状態で交流電圧が印加されたときに、油中に過剰に分離した正イオンのみが交流電界の強さに応じて油中を振動する場合を考える。その際流動電流が最大になる条件として、振動の振幅  $\delta_e$  は油中イオンの移動度  $\mu$  と交流電界の強さ  $E$  により、

$$\delta_e = \mu \cdot \sqrt{2} E / \omega \quad (\omega = 2\pi f) \quad (7)$$

となるとする。なお、直流の場合には  $\omega = 0$  であり、(7)式の  $\delta_e$  は無限大となり(7)式は適用できない。また、油中電荷分布は(1)式で与えられる電荷分布が時間とともに壁面に対して平行移動しながら振動するとする。すなわち、ある時間  $t$  における電荷密度  $q(t)$  は

$$\delta' = \delta_e (1 - \cos \omega t) \quad (8)$$

として、

$$\left. \begin{array}{l} x \geq \delta'; q(t) = (q_0/\delta) \exp(-(x-\delta')/\delta) \\ x < \delta'; q(t) = 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

となるものと考える。このときの流動電流  $I_s$  は、

$$I_s = 2l \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi/\omega} \int_{\delta'}^{d/2} q(t) \cdot v(x) dx dt \quad (10)$$

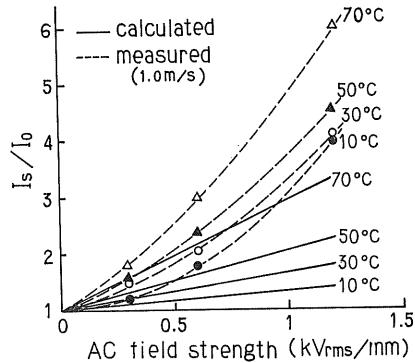


図 6  $I_s/I_0$  の計算値と実測値との比較

Fig. 6 Comparison between calculated and measured  $I_s/I_0$ .

で与えられる。(10)式を  $\delta, \delta_e \ll d/2$  として解くと、

$$I_s = 2l \cdot A \cdot q_0 (\delta + \delta_e) \quad (11)$$

となる。

したがって、交流課電による流動電流の増加割合  $I_s/I_0$  は、

$$\begin{aligned} I_s/I_0 &= 1 + \delta_e/\delta \\ &= 1 + \sqrt{2} \mu E / \omega \sqrt{D\varepsilon/\kappa} \end{aligned} \quad (12)$$

で与えられることになる。(12)式を見ると、交流電界の強さに比例して  $I_s/I_0$  が増大すること、温度が高いほど  $\mu$  が大きく、 $\sqrt{D\varepsilon/\kappa}$  が小さくなるために油温が高いほど  $I_s/I_0$  が大きくなること、油流速の影響がないことなどがわかる。このような特徴は交流電界の強さが低い場合の実測結果と良く一致している。

本実験に使用した絶縁油の導電率を用いて(12)式により  $I_s/I_0$  を計算し、1.2 kV/mm 以下の低い交流電界下での実測結果と比較したものが図 6 である。計算に際しては、絶縁油の導電率は次節での実測値(図 14 の実線)を用い、イオン移動度  $\mu$  と拡散係数  $D$  は通常の変圧器油で実測されている  $3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/V·s,  $4 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s とし<sup>6</sup>、第 1 近似として  $\mu$ ,  $D$  は油の温度に依らないとしている。周波数  $f$  は 50 Hz である。実測値は代表として油流速 1.0 m/s のときの値を示し、70°C での実測結果も追加している。また、図 7 は他の絶縁油 (18°C における導電率  $3.8 \times 10^{-13}$  S/m) を用いて同様に  $I_s/I_0$  を実測した結果とその導電率を用いて計算した結果とを比較したものである。0.5 kV/mm 以下の低い交流電界下では計算値は実測値に近い値となっているが、1 kV/mm 以上の高い電界の強さになると実測値は計算値より大幅に大きくなることがわかった。したがって、低い交流電界の強さの場合には、油中に過剰に分離された正イオンが交流電界により振動し、見かけ上油中側に多く分

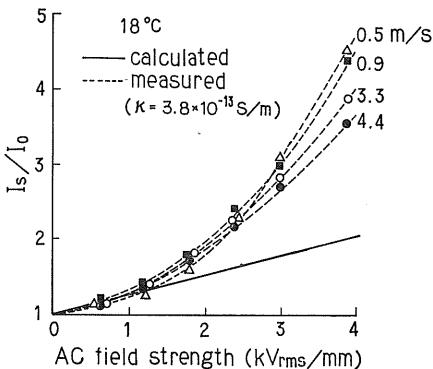
図 7  $I_s/I_0$  の計算値と実測値との比較 (他の絶縁油)

Fig. 7 Comparison between calculated and measured  $I_s/I_0$  (different insulating oil).

布することで交流電界による流動電流の増大を説明することができるといえる。交流電界の強さが大きくなると  $I_s/I_0$  の実測値が計算値よりも大幅に大きくなるのは、交流電界が界面での電荷分離に影響を与え、電荷発生を促進する働きがあるためではないかと考えられる。このように交流電界による界面での電荷発生の増大があると考えると、低い油温ほど無課電時の流動電流  $I_0$  が小さく、したがって見かけ上  $I_s/I_0$  が大きくなること、また油流速が遅いほど  $I_s/I_0$  が大きくなる傾向があることなどの説明をすることができる。

### 3.2 直流電圧課電の影響

まず、電極間の絶縁油が静止している場合と強制的に流動されている場合について電極間の伝導電流を測定した。なお、油流時の伝導電流には油流による電荷発生分が重畳されている。その伝導電流の時間特性の実測結果の一例を示したのが図 8 である。絶縁油が静止している場合には、従来良く知られているごとく課電時間の経過とともに電極間伝導電流はしだいに減少していく特性を示す。一方、絶縁油が油流速 0.6 m/s で流れていると、電極間伝導電流は時間に依らず一定のままである。このような特性は印加電圧や油流速を変えてても同じであった。電極間を絶縁油が流れている場合には、もともと絶縁油中に存在する正、負イオンが油とともに電極間に連続して流入してくるためにこのように時間的に一定の電極間伝導電流となるものと考えられる。

この電極間伝導電流と油流速、直流電界の強さ、その極性の違い、絶縁油の温度などとの関係について調べた結果が図 9 と図 10 とである。なお、静止油の電流値は電圧印加 1 分後の値を採用している。静止油では従来良く知られているように直流電界の強さが大きくなるにつれて電極間伝導電流はいったん飽和する傾向を示したの

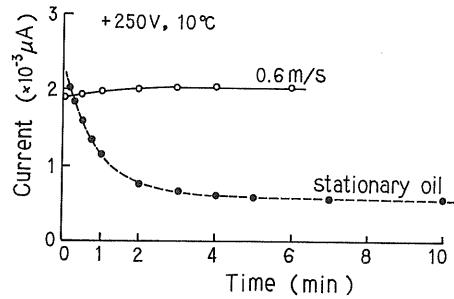


図 8 伝導電流の時間特性

Fig. 8 Time dependence of conducting current.

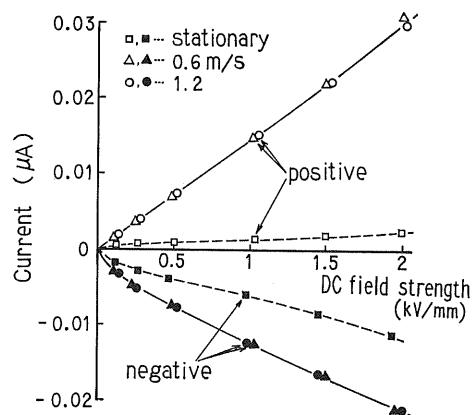


図 9 直流電界の強さと伝導電流との関係 (10°C)

Fig. 9 Relationship between DC field strength and conducting current (10°C).

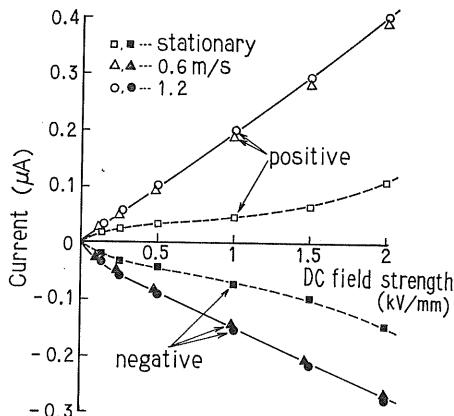


図 10 直流電界の強さと伝導電流との関係 (50°C)

Fig. 10 Relationship between DC field strength and conducting current (50°C).

ち、増大する特性を示す。その際、負極性のほうが正極性の場合よりも大きい伝導電流を示す傾向がある。一

方、絶縁油が電極間を流れているときの電極間伝導電流は、正極性の場合には直流電界の強さに直線的に比例して増大し、油流速の影響はほとんどないことがわかる。また、負極性の場合には、油流速の影響がほとんどないのは同様であるが、直流電界の強さが増大するにつれて電極間伝導電流は少し飽和するような特性を示すことがわかる。その際、直流電界が低い場合には負極性の伝導電流のほうが正極性の値よりも少し大きめであるのに対し、直流電界が高いときには正極性の伝導電流のほうが負極性の値よりも逆に大きくなる傾向があることがわかる。このような特性は油の温度を変えてもまったく同じであった。

このような油流時の電極間伝導電流の電界依存性について以下考察してみる。電極間に流れ込む前の絶縁油には正、負イオンが平衡して存在し、そのイオン密度を  $n$  とする。それらイオンが流量  $Q$  で直流電界がかかっている電極間に入り、正イオンは負極に、負イオンは正極のほうに駆動され、その一部が電極に吸着されるとする。正極性印加時に低圧電極側から検出される伝導電流を  $\Delta i_+$ 、負極性印加時の伝導電流を  $\Delta i_-$  とすると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_+ &= nQ\mu_+ E \Delta t / d \\ \Delta i_- &= nQ\mu_- E \Delta t / d \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。ここで  $\mu_+$ 、 $\mu_-$  は正、負イオンの移動度、 $E$  は電極間電界の強さ、 $d$  は電極間隙長であり、 $\Delta t$  は絶縁油が電極間を通り抜けるに要する時間である。電極間の直流電界の強さはその間隙中で一定と仮定している。

(13)式で、流量を変えても  $Q \cdot \Delta t$  は一定であるので、イオン移動度  $\mu$  が直流電界の強さ  $E$  に依らなければ伝導電流  $\Delta i_+$ 、 $\Delta i_-$  は直流電界の強さ  $E$  に直線的に比例して変化することになる。実測結果では  $\Delta i_+$  は直流電界の強さ  $E$  に直線的に比例して増大しており、(13)式に良く一致している。一方  $\Delta i_-$  は直流電界の強さ  $E$  に直線的に比例しておらず、負イオン移動度  $\mu_-$  は直流電界の強さ  $E$  に依り変化している可能性があることを示している。また、(13)式より

$$\Delta i_+ / \Delta i_- = \mu_+ / \mu_- \quad (14)$$

となる。絶縁油においては通常  $\mu_- > \mu_+$  となっているといわれており、また変圧器油について 0.4 kV/mm で  $\mu_- > \mu_+$  であると報告されている<sup>1)</sup>。したがって、低い直流電界では  $\Delta i_+ < \Delta i_-$  となり、実測結果を良く説明することができる。一方、高い直流電界下では、実測では  $\Delta i_+ > \Delta i_-$  となっていることから、逆に  $\mu_- < \mu_+$  となっているのではないかと予想される。しかし、高い直流電界下での変圧器油のイオン移動度の極性効果について実測した例はなく、今後の検討課題である。

このように正、負電極に吸着される正、負イオン量が

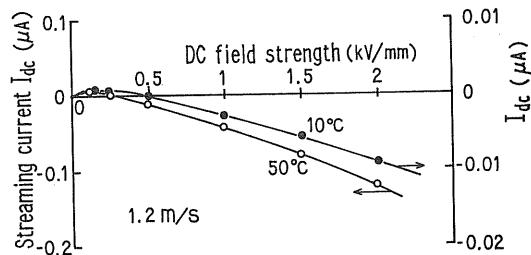


図 11 伝導電流から求めた直流電界下での流動電流  $I_{dc}$

Fig. 11 Streaming current  $I_{dc}$  estimated from the measured conducting currents under DC field.

異なると、直流電界がかかっている空間では絶縁油中に一方のイオンがその差だけ残留することになる。その残留したイオンが油とともに流れ出ると流動電流として検出されるはずである。このように考えたときの流動電流  $I_{dc}$  は次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} I_{dc} &= (nQ - \Delta i_+) - (nQ - \Delta i_-) \\ &= \Delta i_- - \Delta i_+ \end{aligned} \quad (15)$$

$\Delta i_-$ 、 $\Delta i_+$  は図 9、図 10 で実測された値を用い油流速 1.2 m/s、油温度 10°C と 50°C の二つのケースについて(15)式により流動電流  $I_{dc}$  を予測した結果が図 11 である。直流電界の強さを増大していくと、流動電流はまず正極性になり、極大値を示したのち、負極性に逆転しだいに増大していくという複雑な帶電特性を示すことになる。実際に No. 2 タンクに流れ込む流動電流を実測した結果が図 12 である。負極性印加の場合には流動電流はまず正極性側に増大し、極大値を示したのち負極性に変わり、増大していくという特性を示し、これらは油温や油流速を変えてもまったく同じであった。この特性は(15)式を用いて予測された図 11 の流動電流  $I_{dc}$  とまったく同じであり、その値も良く一致している。正極性の場合には流動電流はすぐに負極性となり、直流電界の強さに比例して増大していく。この特性は図 11 の流動電流  $I_{dc}$  の予想値とはかなり違うものとなっている。正極性印加の場合には中心側の接地電極が負極性となっており、供試電極の下流部で細い間隙から急に広い空間に流れが変化し、ここで流れの乱れがあることが重畳されて負極側電極からの電子放出が促進されるためにこのような大きめの負極性流動電流になったのではないかと考えられる。

電極間伝導電流から絶縁油の導電率を求めた結果が図 13 と 14 である。図 13 は正極性の場合について油流時と静止時の絶縁油の導電率を比較したものであり、2 kV/mm 以下の低い電界では油が流れているときの導電率は直流電界の強さにあまり関係なくほぼ一定であり、静止

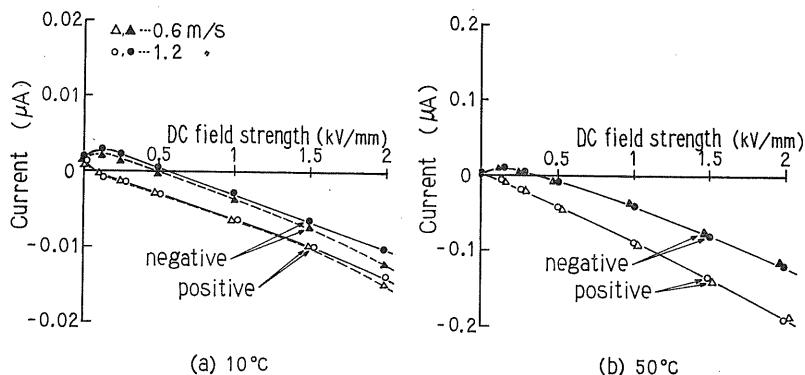


図 12 直流電界下での流動電流の実測値

Fig. 12 Measured streaming current under DC field.

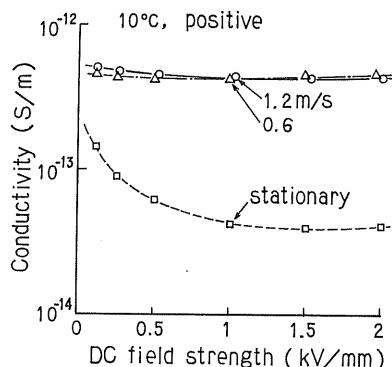


図 13 静止油と流動油の導電率の比較

Fig. 13 Comparison between the conductivities of stationary oil and flowing oil.

油の導電率の3~10倍になっていることがわかる。図14は直流電界の強さ0.5 kV/mmのときの絶縁油の導電率の温度特性を正極性、負極性の両者について求めた結果である。

#### 4. 結 言

交流あるいは直流電圧が印加されている間隙内で絶縁油を流動させたときの絶縁油の帶電特性と伝導特性について調べた。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 交流課電により流動電流は増大する。低い交流電界下では、無課電時の流動電流に対する課電時の流動電流の増加割合は油温度が高いほど大きく、油流速の影響は小さい。低電界下での流動電流の増加は、油中に分離された正イオンが交流電界により振動し、見かけ上油中に広く分布したことになることによって説明づけられる。

(2) 交流電界の強さが1 kV/mmと高くなると、流動

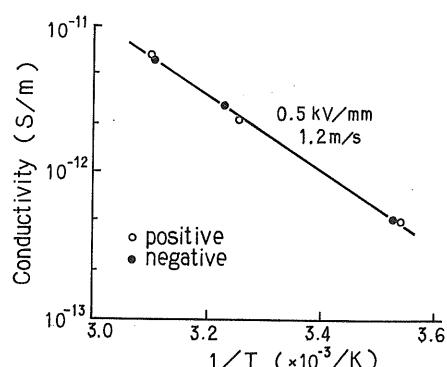


図 14 流動油の導電率の温度特性

Fig. 14 Temperature dependence of conductivity of flowing oil.

電流の増大が大きくなり、とくに低い油温度でその増大が大きい。高い交流電界下では交流電界が絶縁油と電極との界面での電荷発生を助長するようになるためではないかと考えられる。

(3) 直流電圧印加の場合、油流時の電極間伝導電流には極性効果があり、正極性印加では直流電界の強さに比例し、負極性印加では直流電界の強さに対して若干飽和する傾向がある。低い直流電界下では負極性伝導電流が正極性よりもわずかに大きく、直流電界の強さが大きくなると正極性伝導電流が負極性よりかなり大きくなる。これは正、負イオンの移動度の違いに起因するのではないかと考えられる。

(4) 直流電界下での電極間伝導電流の極性効果の存在により、直流電界がかかっている間隙中を絶縁油が流動すると絶縁油は帶電し、低直流電界では正極性側にわずかに帶電し、高直流電界下では負極性側に帶電しやすい傾向がある。

## 参考文献

- 1) A. Klinkenberg and J. Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1958)
- 2) M. Higaki, Y. Kako, M. Moriyama, M. Hirano, K. Hiraishi and K. Kurita : IEEE Trans. Power Appar. Syst., **PAS-98** (1979) 1259
- 3) S. Shimizu, H. Murata and M. Honda : IEEE Trans. Power Appar. Syst., **PAS-98** (1979) 1244
- 4) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii, Y. Yamada and T. Nitta : IEEE PES Summer Meeting, F79640-4 (1979)
- 5) 田村良平, 栗田健太郎, 村田久夫 : 電気学会雑誌, **99** (1979) 913
- 6) 宮本晃男, 土江基夫 : 電気学会論文誌 A, **100** (1980) 149
- 7) 石田昭司, 坂本三郎 : 電気学会論文誌 A, **93** (1973) 63
- 8) 大橋朝夫, 下川博文, 家田正之 : 電気学会研究会資料, ED-83-67, p. 37 (1983)