ピーク電流発生時刻に電極極性を反転した際の 電界誘因流動と電気伝導

正員 中野 光昭 (一関工業高等専門学校) 正員 杉田 慶一郎 (八戸工業大学)
非会員 松永 充史 (ジャパン・エナジー)

Electrical Conduction and EHD Motion Induced by Change of Electrode Polarity at Time for Peak Current

Mituaki Nakano, Member (Ichinoseki National College of Technology)
Keiichirou Sugita, Member (Hachinohe Institute of Technology)
Atusi Matunaga, Non-Member (Japan Energy Company)

This paper describes the results of investigation of the EHD motion induced in mineral oil by the reversal changes of electrode polarity. The phenomena to be observed are time dependence of current and schlieren images. The experiments are carried out following these conditions: (1) DC voltages (4.5kV) of constant amplitude are periodically applied in order of positive, negative and positive voltage. (2) The first and the third periods are respectively fixed at 60s and 20s. The second period is fixed at the time which is equal to the difference between the time for peak current and the time turning to the second period. The results obtained on the third period are as follows: (1) Time dependence of current in the region of decelerated flow decreases in proportion to the process time. The time required to change from peak current value to zero agrees with the time required until the flow stops. (2) The current in the region of accelerated flow increases in proportion to the process time. The current in the region of contractive flow decreases in proportion to the time. (3) A peaked behaviour in the current waveform is induced by both the accelerated flow and the contractive flow. The experimental results are well explained by established model.

キーワード：電極極性反転，電界誘因流動，電気伝導，ピーク電流，鉱油

1. まえがき

鉱油は体積抵抗率，誘電正接，絶縁破壊電圧などの優れた電気的特性を有し，かつ安定的に低価格で得られることから，古くから電力用変圧器に欠くことのできない電気絶縁材料である⁽¹⁾．一般に，変圧器の保守管理は鉱油の電気的特性とガス分析によって主に行われているが，最近，流動帯電現象が超高電圧電力用変圧器の事故原因になることが指摘され，新たに流動帯電度の追加が検討され始めている⁽²⁾．特に，超高電圧電力用変圧器が稼働を開始してから20年以上経過し始めている現在，その保守管理は厳しさを増している．

筆者らは体積抵抗率に関連する直流電導に注目し，鉱油を満たした平行平板ステンレス鋼製電極間に正・負・正の順に極性の変化する一定振幅の直流電圧を印加した際の電流波形の時間変化とシュリーレン影像を観測して，電流増

加現象が電極と鉱油の界面から誘起する流動によって発生することを明らかにした⁽³⁾．

本論文では，第2周期目のピーク電流発生時刻に第3周期目に切り換えて電流波形の時間変化とシュリーレン影像の観測を行い，電界誘因流動を伴う電気伝導現象を調べた．その結果，第3周期目の電流波形の時間変化にピーク電流現象が発生することを見い出した．これらの実験結果の検討からモデルを設定して現象の解析を試みた．

2. 実験装置と測定法

図1は周期的に電極極性を反転し，その際に発生する現象を観測する実験系の構成図である．この実験系は①充電電圧の周期長を制御する電圧周期長制御装置，②電極と試料の入った試験容器，③電流の時間変化の測定系，④シュリーレン影像の観測用光学系で構成されている．

電圧周期長制御装置は高電圧リレーとタイマーで構成さ

図1 実験装置の構成図

Fig.1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

れ、最大発生電圧は $\pm 5.0\text{ kV}$ 、立ち上がり時間と極性反転に要する時間はいずれも 2 ms 以下である。周期長は周期別に異なる時間を設定することができ、第1周期目と第3周期目の最小設定時間は 0.5 s 、第2周期目のそれは 0.1 s である。

使用した試験容器は、電極間に発生する流動現象を光学的に観測するための観測窓を有し、容器の中にはステンレス鋼製平行平板電極とテフロン製ブッシングが収められている。この容器は 30°C の一定温度に保持できる恒温箱の中に設置される。電極表面は鏡面状仕上げで、その寸法は $11\text{ cm} \times 19\text{ cm}$ 、有効面積は 123 cm^2 である。電極間隔と充電電圧は、それぞれ、 15 mm と $\pm 4.5\text{ kV}$ に固定した。

実験で使用する鉱油は株式会社ジャパンエナジー製のJOMO No.2 TRANS (JIS-1種2号、平均分子量285)である。この鉱油は試験容器直結の精製装置によって空気を窒素ガスで置き換え、 1 Torr で脱気処理し、公称孔径 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ と $5.0\text{ }\mu\text{m}$ のカートリッジフィルタで濾過処理した。

一般に、誘電体の導電率はその中に含まれる荷電粒子密度に比例して増大する。鉱油の場合、荷電粒子源は油中に含有する微量のレジン成分、水分、白土等で⁽⁴⁾、鉱油から除去できるこれらの成分量はフィルタの孔径差と脱気時間の長短によって変化する。筆者らは(1)孔径 $5.0\text{ }\mu\text{m}$ のフィルタの使用と脱気時間約10分間、(2)孔径 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のフィルタの使用と脱気時間約5時間の異なる条件で処理した。その結果、油温 30°C で、条件(1)の場合は、 $2.2 \times 10^{-13}\text{ S/m}$ (試料番号1)、条件(2)の場合は、 $3.4 \times 10^{-14}\text{ S/m}$ (試料番号2)を得ることができ、それらの試料を実験に供した。

なお、この鉱油の粘性係数 η 、比誘電率 ϵ_r 、密度 δ は、油温 30°C で、それぞれ、 $\eta = 8.2 \times 10^{-3}\text{ Ns/m}^2$ 、 $\epsilon_r = 2.28$ 、 $\delta = 0.863 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ である。

電流の時間変化はデジタル・エレクトロメータで計測し、その出力をサンプルレート 100 Hz でオシログラフィックレコーダに記録した。一方、シュリーレン影像の観測にはリ

ングエッジ法を使用した。屈折角の最小検出感度は 0.12 度である。

3. 実験結果

間隔 15 mm の電極間に試料番号1(導電率 $2.2 \times 10^{-13}\text{ S/m}$)の鉱油を満たし、周期長 60 s の正電圧 $+4.5\text{ kV}$ を印加した後(第1周期目)、ピーク電流発生時間に等しい周期長 3.7 s の負電圧 -4.5 kV に電極極性を反転し(第2周期目)、更に周期長 20 s の正電圧 $+4.5\text{ kV}$ に電極極性を反転させた時(第3周期目)の第2周期目と第3周期目の電流波形の時間変化とシュリーレン影像写真を図2(a)と(b)に示す。

第2周期目で設定した周期長は、本実験を行う前に上記で示した第1周期目と同一の周期長と電圧で電極間を充電した後、周期長 30 s の負電圧 -4.5 kV に電極極性を反転させて電流波形の時間変化を5回観測し、ピーク電流発生時刻と反転時刻の差から求めた平均時間である。試料1と試料2の平均時間は確率誤差を用いて示すと、それぞれ、 $(3.7 \pm 0.1)\text{ s}$ と $(5.8 \pm 0.2)\text{ s}$ である。

同図(a)に示す第2周期目の電流波形の時間変化は、時間の経過に従って(1)充電・吸収電流、(2)漏れ電流、(3)ピーク電流の順に現れる。第3周期目の電流波形の時間変化は、(1)第2周期目のピーク値から電流極性を反転する充電・吸収電流、(2)ピーク電流、(3)減少電流、(3)漏れ電流の順に現れる。

第2周期目の電流増加開始前に観測される電流波形は流動誘起に関与しない充電・吸収電流と漏れ電流成分で主に構成されている。一方、第3周期目においては、充電・吸収電流が観測される時間領域が流動の消滅と新たな流動誘起に伴う電流波形の時間領域と重複し、また、定常電流は流動消滅後の漏れ電流で構成されている。従って、観測電流波形から、これらの電流成分を除くことによって電界誘因流動に関与する電流波形の解析を容易にすることができる。そこで、電流密度の基準値を零から第2周期目と第3周期目の漏れ電流密度 J_A と J_D ($J_A \approx J_D$)に移動し、同時に充電・吸収電流成分を除去した形で観測電流波形の時間変化を表したのが同図の点線で示した波形である。

第2周期目のこの波形において、電流増加開始点と電流が直線的に増加する点およびピーク電流値を示す点を、それぞれ、時刻と電流の座標点 $A(T_A, J_A)$ 、 $B(T_B, J_B)$ 、 $P_2(T_{P2}, J_{P2})$ で示す。更に P_2 点から第3周期目の電流波形に接線を引き、基準電流 J_A と交わる点の座標を $C(T_C, 0)$ 、減少電流特性を直線とみなして、この直線と接線および基準電流 J_D と交わる点の座標を $R(T_R, J_R)$ 、 $D(T_D, 0)$ で示す。また、基準電流値を J_D に移動したピーク電流値の座標点を $P_3(T_{P3}, J_{P3})$ で示す。これらの時刻と電流密度の一覧を表1の試料番号1に示す。

同図(b)のシュリーレン影像写真に付した番号は同図(a)の電流波形に付した番号に対応する。番号①は流動誘起前の、②と③は進展中の、番号④はピーク電流発生時刻に、それぞれ、対応する影像写真である。番号⑤は第3周

図 2 電流の時間変化とシュリーレン映像写真、試料番号 1 [$T_2: 3.7$ s, $\sigma: 2.2 \times 10^{-13}$ S/m]
Fig.2. Time dependence of current and pictures of schlieren image. Test Oil No.1.

図 3 電流の時間変化、試料番号 2 [$T_2: 5.8$ s, $\sigma: 3.4 \times 10^{-14}$ S/m]
Fig.3. Time dependence of current. Test Oil No.2.

表1 座標点の時刻と電流密度
Table 1. Time and current density of the points of coordinates.

周 期		第2周期反転時刻(T_1)と漏れ電流密度(J_A)を基準					第3周期目反転時刻(T_2)と漏れ電流電流密度(J_E)を基準					
試料	導電率	A($T_A, 0$)	B(T_B, J_B)		P _{P2} (T_{P2}, J_{P2})		C($T_C, 0$)	R(T_R, J_R)		P _{P3} (T_{P3}, J_{P3})		D($T_D, 0$)
番号	σ [S/m]	T _A [s]	T _B [s]	J _B [A/m ²]	T _{P2} [s]	J _{P2} [A/m ²]	T _C [ms]	T _R [ms]	J _R [A/m ²]	T _{P3} [ms]	J _{P3} [A/m ²]	T _D [s]
1	2.2×10^{-13}	1.7	2.6	0.3×10^{-7}	3.7	2.1×10^{-7}	60	120	2.0×10^{-7}	460	1.3×10^{-7}	1.3
2	3.4×10^{-14}	2.4	4.2	0.6×10^{-8}	5.8	4.7×10^{-8}	89	213	4.6×10^{-8}	760	3.2×10^{-8}	2.6

試料1: $T_1=60$ s, $T_2=3.7$ s, $T_3=20$ s, $J_A \approx J_D \approx 5.9 \times 10^{-8}$ [A/m²], 試料2: $T_1=60$ s, $T_2=5.8$ s, $T_3=20$ s, $J_A \approx J_D \approx 1.3 \times 10^{-8}$ [A/m²]

期目のピーク電流発生時刻に対応する影像写真である。この影像は流動状態の急激な変化を示していないことから、流動静止後の加速・収縮流動は短時間に誘起することを示している。番号⑥は電極間の流動が静止状態に移行していく過程を示した影像写真である。

図3は試料番号2(導電率 3.4×10^{-14} S/m)の電流波形の時間変化を示す。第2周期目の周期長はピーク電流発生時間に等しい周期長5.8sである。第1周期目と第3周期目の周期長及び電極間隔と印加電圧は、それぞれ、試料番号1と同じ値である。同図に示す電流波形の時間変化は、図(2)の電流波形と同様の時間変化を示している。波形に印した座標点の時刻と電流密度の一覧を表1の試料番号2に示す。

表1から導電率の値によって、ピーク電流密度およびその発生時刻等の諸量に明確な差があることを確認できる。

4. 検討

本論文では、流動誘起を伴って電極間を走行する荷電粒子の先端が対向電極に到達する時刻に電極極性を反転して、その進展方向と反対方向のクーロン力を作用させた際の電気伝導現象をモデルを設定して検討する。

電極極性反転後に発生する電界誘因流動は正と負の蓄積荷電粒子によって誘起するが、それらの現象は対称的に取り扱うことができるので⁽³⁾、ここでは、図4(1)、(2)、(3)に示すモデル図を用いて正の荷電粒子によって誘起する流動現象を説明する。

同図(1)と(2)のモデル図は第2周期目と第3周期目に誘起する流動形態を、その発生時刻別に分けて示したものである。同図(1)は流動を伴って移動する荷電粒子速度の時間変化で、同図(2)はそれに対応する電流波形の時間変化を示している。

一般に、伝導電流密度は荷電粒子密度とその移動速度の積で示される。また、電荷密度の小さい荷電粒子が電極近傍から連続的に一定速度で対向電極に進展する場合、電流密度は時間経過に比例して増加する。同図(1)に示す荷電粒子速度のモデルは上記に示した伝導電流の時間特性を基に観測電流波形を解析して得たものである。

第2周期目の流動領域は、(1)加速領域[流動が誘起する時刻から、定速度に到達する時刻までの領域]と(2)定速度進展領域[流動が定速度で進展を開始する時刻から、流動先端が対向電極に到達する時刻までの領域]に分けて示している。また、第3周期目のそれらは、(1)減速領域[流速が電極極性反転時刻の値から、ゼロに達する時刻までの領域]と(2)加速領域[静止状態の鉱油が加速を開始する時刻から、流速が定速度に到達する時刻までの領域]と(3)定速度収縮領域[流速が定速度に到達した時刻から、この流動が消滅する時刻までの領域]に分けて示している。

同図(3)のモデルは正の荷電粒子によって誘起する流動形態の時間変化を示し、第2周期目では流動誘起後の進展および対向電極到達時の概略図、第3周期目では、流動の静止および収縮流動の誘起と消滅の概略図を示している。なお、図2(b)のシュリーレン影像は正と負の荷電粒子によって誘起し、電極間を走行する2つの重畳した流動影像を示している⁽³⁾。

[4.1] 第2周期目の電界誘因流動と電気伝導 一般に、液体誘電体内にクーロン力によって流動を発生させるためには単位体積当たり作用するクーロン力と平均粘性吸引力の比がある臨界定数 K_c を越えることが必要とされている⁽⁵⁾。また、電極間走行時間は電極間隔と荷電粒子の移動速度から求めることができる。ここで、上記の条件を用いて正の荷電粒子によって陽極近傍から流動が誘起する場合の流動誘起時間 $T_{s2}(+)$ と電極間走行時間 $T_{r2}(+)$ を求めると、それぞれ、次式が得られる⁽³⁾。

$$T_{s2}(+) \geq [K_c(+) \eta d / \{K_s(+) K_d(+) \mu(+) \times E_{r1}^2(+)\}]^{0.5} Q_{p2}^{-0.5} + T_b(+)-\text{---}(1)$$

$$T_{r2}(+) \geq [2 \delta d d_3^2(+) E_{r1}(+) / \{K_s(+) \times K_d(+) d_1(+) E_{r3}^2(+)\}]^{0.5} Q_{p2}^{-0.5}-\text{---}(2)$$

ここに、 $K_c(+)$: 臨界定数、 $K_s(+)=S_0/S_1(+)$ 、 S_0 : 電極面積、 $S_1(+)$: 正の荷電粒子が引き出される実効面積、 $K_d(+)=Q_{p2}(+)/Q_{p2}$ 、 $Q_{p2}(+)$: ピーク電流発生時

刻までに電極間を移動する正の荷電粒子量、 Q_{p2} ：ピーク電流発生時刻までに電極間を移動する正と負の荷電粒子量の和、 $\mu(+)$ ：移動度、 $E_{r1}(+)$ ：注入領域の電界強度、 $T_b(+)$ ：注入領域の電界の回復時間、 d_s ：定速度領域の厚さ、 $d_1(+)=\mu(+)\cdot E_{r1}(+)\cdot T_s(+)$ ：注入領域の厚さ、 $E_{rs}(+)$ ：定速度領域の電界強度

従って、加速時間を $\tau_2(+)$ とすると流動先端の対向電極到達時間 $T_{a2}(+)$ は、 $T_{a2}(+)=T_{s2}(+)+T_{r2}(+)+\tau_2(+)$ で示され、この時間がピーク電流発生時間に対応する⁽⁵⁾。

ピーク電流発生時刻における正の荷電粒子密度 $\rho(+)$ は、 $\rho(+)=Q_{p2}K_s(+)/2d$ で示されるので、ピーク電流

(1) 荷電粒子速度の時間変化

(2) 電流波形の時間変化

(3) 流動形態の時間変化

図4 荷電粒子の速度と電流波形と流動形態の時間変化

Fig. 4. Time dependences of the velocity of charge carrier and the form of liquid flow.

表 2 測定時間と計算時間
Table 2. Time measurements and time calculations.

周期	第2周期目(基準時刻: $T_1=60s$)				第3周期目 [基準時刻 A: 時刻 T_{P2}], [基準時刻 B: 時刻 T_C], [基準時刻 C: 時刻 T_A]									
試料	流動誘起時刻		ピーク電流発生時刻		流動静止時刻		ピーク電流発生時刻			ピーク電流密度			減少時間	
										基準電流密度: J_0			基準時刻: C	
	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値1	測定値2	計算値	測定値1	測定値2	計算値	測定値
番号	T_{s2} [s]	T_A [s]	T_{P2} [s]	T_{A2} [s]	T_{s1} [ms]	T_C [ms]	T_{PR} [ms]	T_{RC} [ms]	T_{P3} [ms]	J_{PR} [A/m ²]	J_R [A/m ²]	J_{P3} [A/m ²]	T_D [s]	T_{DR} [s]
1	1.6	1.7	3.5	3.7	66	60	66	60	400	2.1×10^{-7}	2.0×10^{-7}	1.3×10^{-7}	1.0	1.2
2	2.7	2.4	5.4	5.8	107	89	107	124	670	4.7×10^{-8}	4.6×10^{-8}	3.2×10^{-8}	1.6	2.4

密度は $J_{P20}(+) = Q_{P2}K_s(+) \mu_{h2}(+)E/2d$, $\mu_{h2}(+)$: 第2周期目のEHD移動度、となる。なお、本論文では負の荷電粒子による諸量と正のそれを等しいものとして扱うので、正と負の荷電粒子で構成されるピーク電流密度 J_{P20} は上式の2倍となる。また、ピーク電流密度の測定値 J_{P2m} は $J_{P2m} = Q_{P2} \mu_{h2}E/d$ [$J_{P2m}S_0 = J_{P20}S_1$, $K_s = K_s(\pm)$, $\mu_{h2} = \mu_{h2}(\pm)$] で示されるので、移動電荷量 Q_{P2} は次式で示される。

$$Q_{P2} = J_{P2m}d / \mu_{h2}E \quad \text{----- (3)}$$

上式に示す時間とピーク電流密度をモデル図および測定電流波形に対応させて検討する。 $T_{s2}(+)$ はモデル図の点 A_+ の時刻 T_{A+} 並びに測定電流波形の電流増加開始時刻 T_A に対応する。 J_{P2m} は同図の点 P_+ の電流密度 J_{P+} と測定電流波形のピーク電流密度 J_{P2} に対応する。また、 $T_{r2}(+)$ は同図の点 P_+ と点 B_+ の時刻差 ($T_{P+} - T_{B+}$) と測定波形の点 P_2 および点 B の時刻差 $T_F = T_{P2} - T_B$ に対応する。

ここで、試料1と2の T_F の測定値 1.1s と 1.6s と電極間隔 $d = 1.5$ cm、電界 $E = 3 \times 10^5$ V/m から EHD 移動度 μ_{h2} を求めると、それぞれ、 5.1×10^{-8} m²/Vs と 3.1×10^{-8} m²/Vs が得られる。この μ_{h2} と試料1と2の J_{P2} の測定値 2.1×10^{-7} と 4.7×10^{-8} A/m² から、 Q_{P2} を求めると 2.0×10^{-7} C/m² と 7.5×10^{-8} C/m² が得られる。これらの値は、電流波形の時間積分から得た試料1と2の値 1.4×10^{-7} C/m² と 6.0×10^{-8} C/m² にほぼ等しい。

Q_{P2} と鉱油の諸量 $\eta = 8.2 \times 10^{-3}$ Ns/m², $\delta = 0.863 \times 10^3$ kg/m³ を用い、 $K_s = 20$ ⁽⁶⁾、 $\mu(+) = 5 \times 10^{-10}$ m²/Vs ⁽⁷⁾ と測定が困難で資料の無い諸量 $K_s(+)$, $E_{r1}(+)$, $T_b(+)$ を、それぞれ、 $K_s(+)=200$, $E_{r1}(+)=E_{r3}(+)=E=3 \times 10^5$ V/m, $T_b(+)=0$ と仮定して試料1と2の $T_{s2}(+)$ と $T_{r2}(+)$ を算出すると、それぞれ、 $T_{s2}(+)$ は 1.6 s と 2.7 s, $T_{r2}(+)$ は 1.9s と 2.7s が得られる。また、加速時間を $\tau_2 = (\eta / \epsilon E^2)$ ⁽⁸⁾ から算出すると $\tau_2 = 5$ ms が得られる。ここで、 $T_{s2}(+) = T_{s2}$, $T_{A2}(+) = T_{A2}$ で表し、 T_{s2} と T_A , T_{A2} と T_{P2} を対比して表2に示す。これらの時刻はほぼ

一致している。

[4.2] 第3周期目の電界誘因流動と電気伝導 流動領域を減速、加速、収縮の3つの領域に分けて検討する。

[4.2.1] 減速領域 一定速度で進展する密度 δ [kg/m³] の鉱油中に含まれる正の荷電粒子を $\rho(+)$ [C/m³] とすると、これに働くクーロン力 $F(+)$ は $F(+)=\rho(+)E$ [N/m³] で示される。一方、電界誘因流動はクーロン力が粘性吸引力 $\{\eta \nabla^2 v(t)\}$ に比較して十分に大きい条件を満足するときに発生するので、運動方程式は $\delta \{\partial v(t)/\partial t\} = \rho(+)\eta \nabla^2 v(t) \equiv \rho(+)\eta E[v(t): \text{流速}]$ で示される。図4(3)に示すように電極間に発生する流動を循環流動とした場合、その流路長は電極間隔の2倍に、クーロン力の作用する流路長は電極間隔となる ⁽⁷⁾。従って、流速の時間変化 $v_{+3}(t)$ と流動の静止時間 $t_{s30}(+)$ は、流路長 $2d$ と電荷密度 $\rho(+)=Q_{P2}K_s(+)/2d$, $K_s(+)=S_0/S_1(+)$ から、 $v_{+3}(t)=\mu_{h2}(+)E - \{Q_{P2}K_s(+)\eta/4\delta d\}t$ と $t_{s30}(+)=4\mu_{h2}(+)\delta d/Q_{P2}K_s(+)$ で示される。

なお、 $t_{s30}(+)$ は断面積 $S_1(+)$ 、流路長 $2d$ の循環流動の運動エネルギー $W_1(+)=\delta \{\mu_{h2}(+)E\}^2 S_1(+)/2$ が、流動方向と反対方向のクーロン力 $F(+)=S_1(+)\eta \rho(+)$ による仕事 $W_c(+)=F(+)\eta v_m(+)\eta t(+)$ [$v_m(+)$: 平均流速, $v_m(+)=\mu_{h2}(+)E/2$] によって消滅する時間 $t(+)$ と一致する。

従って、流動を伴って移動する負の荷電粒子速度を正のそれと等しいとすると、減速領域で測定される電流の時間変化 $J_{s1}(t)$ は、 $J_{s1}(t)=J_{P2}-M_{s1}t$, $M_{s1}=Q^2_{P2}KE/4\delta d^2$ で示され、静止時間 T_{s1} は次式で示される。

$$T_{s1} = 4\delta d \mu_{h2} / Q_{P2}K_s \quad \text{----- (4)}$$

上式の T_{s1} をモデル図および測定電流波形と対応させると、 T_{s1} は同図の点 C_+ と点 P_+ の時刻差 ($T_{C+}-T_{P+}$) 並びに測定電流波形の点 C と点 P_2 の時刻差 (T_C-T_{P2}) に対応する。なお、モデル図に示した電流密度 J_{A+} の値は漏れ電流値に比較して十分に小さいので、同図の C_+ 点は測定電流波形の C 点に対応する。上記に示した鉱油の諸量を用いて、試料1と

2の T_{31} を求め、測定電流波形の時刻差($T_c - T_{P2}$)に対比させて表2に示す。これらの値はほぼ一致している。

また、試料1と2の測定電流波形における点P₂から点Cまでの接線の傾き M_{P2C} を算出すると、① $3.1 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $4.4 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ が得られる。これらの値は $J_{31}(t)$ の傾き M_{31} ① $3.5 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $5.3 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ にほぼ一致している。

[4.2.2]加速領域 クーロン力が粘性吸引力に比較して十分に大きい条件を満足している場合、流動誘起に必要な時間遅れを考慮する必要がない。従って、この領域における流速の時間変化 $v_{+32}(t)$ は $v_{+32}(t) = \{Q_{P2}K_s(+)/4\delta d\}t$ で示され、一定速度 $v_{+3c} = \mu_{h3}(+)E$ に到達する時間 $t_{3c}(+)$ は $t_{3c}(+) = 4\delta d\mu_{h3}(+)/Q_{P2}K_s(+)$ となる。ここで、流動を伴って移動する負の荷電粒子速度を正のそれと等しいとすると加速領域で測定される電流の時間変化 $J_{32}(t)$ は $J_{32}(t) = M_{32}t$ 、 $M_{32} = M_{31} = Q^2_{P2}KE/4\delta d^2$ で示される。また、電極間に存在する荷電粒子量は収縮流動の発生に伴って減少するので、定速度に到達し、収縮流動が開始する時刻とその電流値はピーク電流発生時刻 T_{PR} とピーク電流値 J_{PR} になり、次式で示される。

$$T_{PR} = 4\delta d\mu_{h3}/Q_{P2}K_s, J_{PR} = Q_{P2}\mu_{h3}E/d \quad \text{---(5)}$$

(5)式に示す T_{PR} と J_{PR} をモデル図および測定電流波形と対応させると、 T_{PR} は同図の点R₊と点C₊の時刻差($T_{R+} - T_{C+}$)並びに測定波形の点Rと点Cの時刻差 $T_{RC} = T_R - T_C$ に、 J_{PR} は同図の点Rの電流密度 J_{+R} 並びに測定波形の電流密度 J_R に対応する。

[4.2.3]収縮領域 収縮流動によって電極面に蓄積される正の荷電粒子量 $Q_{a3}(+)$ は $Q_{a3}(+) = v_{3c}(+)tS_1 \times \rho(+)$ 、 t : 定速度到達後の経過時間、で示されるので、電流の時間変化 $J_{33}(+)$ は $J_{33}(+) = \mu_{h3}(+)E\rho(+)\{d - \mu_{h3}(+)Et\}S_1(+)/S_0$ 、 $\mu_{h3}(+)$: 第3周期目のEHD移動度、で示され、この電流が零になる時刻(収縮流動消滅時間) $t_0(+)$ は $t_0(+) = d/\mu_{h3}(+)E$ で示される。

従って、この領域で測定される電流の時間変化 $J_{33}(t)$ $J_{33}(t) = Q_{P2}\mu_{h3}E/d - M_{33}t$ 、 $M_{33} = Q_{P2}(\mu_{h3}E/d)^2$ で、減少電流が零になる時刻 T_0 は次式で示される。

$$T_0 = d/\mu_{h3}E \quad \text{-----(6)}$$

なお、 T_0 はモデル図の点D₊と点R₊の時刻差($T_{D+} - T_{R+}$)並びに測定波形の点Dと点Rの時刻差 $T_{DR} = T_D - T_R$ に対応する。ここで、上記で使用した諸量と $\mu_{h3} = \mu_{h2}$ の条件で、試料1と2の T_{PR} と T_0 および J_{PR} を算出し、それらの値を表2に示す。なお、 T_{PR} は T_{RC} と点P₃の時刻 T_{P3} [基準時刻 T_c]に、 T_0 は T_{DR} に対比させ、 J_{PR} は点Rと点P₃の電流値 J_R と J_{P3} に対比させて示している。これらの値は、 T_{P3} と J_{P3} を除きほぼ一致している。

試料1と2の測定電流波形における点Cから点Rまでの接線

の傾き M_{CR} [① $3.3 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $3.7 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$]は $J_{32}(t)$ の傾き M_{32} [① $3.1 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $4.4 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$]にほぼ一致している。更に点Rから点Dまでの接線の傾き M_{RD} [① $1.7 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $2.0 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2 \text{ s}$]は、 $J_{33}(t)$ の傾き M_{33} [① $2.1 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ s}$ と② $2.9 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2 \text{ s}$]にほぼ一致している。従って、この接線は加速および収縮領域における電流波形の漸近線とみなすことができ、ピーク電流現象は加速流動と収縮流動によって発生するものと考えられる。試料1と2で測定したピーク電流値の発生時間 T_{P3} [① 400msと② 670ms]は、 T_{RC} [① 60msと② 124ms]に比較して長く、電流値 J_{P3} [① $1.3 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ と② $3.2 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$]は J_R の [① $2.0 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ と② $4.6 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$]に比較して小さい値を示している。この原因を明らかにする実験結果と解析は稿を改めて報告する予定である。

なお、移動電荷量 $Q_p(+)$ と導電率 σ の関係は試料の σ が $\sigma \leq 2\mu\epsilon|\pm V|/d = \sigma_c$ ($|\pm V|$: 充電電圧)の条件を満足するとき、 $Q_p(+)= (Ad/2\mu)\sigma$ 、 $A=d/\{D(+)\times K_s(+)\}+d/\{D(-)K_s(-)\}$ 、 $D(\pm)$: 正および負の荷電粒子の蓄積領域の厚さ、で示される⁽⁹⁾。試料1と2の導電率($3.4 \times 10^{-14} \text{ S/m}$ 、 $2.2 \times 10^{-13} \text{ S/m}$)は実験条件から算出した $\sigma_c = 4.0 \times 10^{-13} \text{ S/m}$ に比較していずれも小さく、 $Q_p(+)$ と σ は上記の関係を満足する。従って、実験結果を $Q_p(+)$ の代わりに σ を用いて解析できるが、筆者らはこれまで通り、移動電荷量で検討を行った。

5. まとめ

鉱油を満たしたステンレス鋼製電極間に、第2周期目の充電周期長をピーク電流発生時間に合わせて、+4.5kV(周期長: 60s)→-4.5kV→+4.5kV(周期長: 20s)の順に充電電圧を印加した。これらの実験結果の検討から、流動形態を発生時刻別に分けたモデルを設定して現象を解析した。その結果、第3周期目のピーク電流値を示す座標点の移動原因を除き電界誘因流動の諸特性は実験とかなり良い一致が見られた。以下に明らかになった点を示す。

①第2周期目

(a)電界誘因流動の誘起に伴ってピーク電流現象が発生する。

(b)この流動誘起に伴って電極間を移動する荷電粒子量はピーク電流値から求めることができる。

②第3周期目

(a)減速領域の電流は第2周期目のピーク電流値からゼロまで経過時間に比例して減少する特性を示し、この電流変化に要する時間は流動の静止時間に対応する。

(b)加速領域および収縮領域の電流は経過時間に比例して、それぞれ、増加特性と減少特性を示すことから、ピーク電流現象は加速流動と収縮流動の誘起に伴って発生する。

(c)ピーク電流の発生時刻と電流値は流速が一定速度に到達して、収縮流動が誘起する時刻とその電流

値に漸近し、減少時間は流動の消滅時間に対応する。

本研究から、電界誘因流動は電極極性反転によって ms オーダの短時間で消滅と発生を行うことが明らかになった。この点から、超高電圧電力用変圧器に使用されている鉱油中においても同様の現象が発生していることが十分に考えられる⁽¹⁰⁾。なお、送油風冷式負荷時タップ切換巻線変圧器(単相、周波数60Hz、定格容量：一次 1000/3MVA、二次 1000/3MVA、三次、300/3 MVA、定格電圧：一次 500/ $\sqrt{3}$ kV、二次 500/ $\sqrt{3}$ kV、三次 73.5kV、総油量 9000 リットル)の定格時における巻線内の流速として25cm/sの値が報告されている⁽¹¹⁾。この値は本研究で得られたEHD移動度 $5.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{Vs}$ の鉱油(試料番号1)を5MV/mの電界で使用した際の流速 25.5cm/s に対応する。従って、変圧器の保守管理に必要な流動帯電度と電気的特性に関する資料は冷却用の強制循環流動の他に電界誘因流動効果を考慮して求める必要がある。

本研究を遂行するに当たり、種々のご協力を頂いたジャパン・エナジー総合研究所 細沼邦彦 所長に感謝致します。また、実験に協力して頂いた一関工業高等専門学校電気工学科 三浦 文雄技官、和田 史明技官に感謝致します。

(平成10年 7月22日受付、平成10年12月 1日再受付)

文 献

- (1) 増永：日石レビュー，第20巻，第3号，pp16-60 (1978)
- (2) 小林：第18回絶縁油分科会研究発表会要旨集，pp24-33(1998)
- (3) 中野，杉田：電学論 A 115巻8号 平成7年，pp756-764
- (4) 電気協同研究作業会資料：三菱電機株式会社，pp1-20(1996)
- (5) 中野：電学論 A 113巻2号 平成5年，pp121-128
- (6) P. Atten et al：J. Electrostatics, Vol. 12, pp481-488(1982)
- (7) N. J. Felici：Direct Current, Vol. 2, NO.4, pp147-165(1971)
- (8) N. J. Felici et al：R. G. V. Vol. 11, pp861-873(1976)
- (9) 中野，杉田：電学論 B 115巻9号 平成7年，pp1076-1083
- (10) M. Nakano, J. D. Cross：IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. EI-20, No.2, April, pp381-383(1985)
- (11) 流動帯電メカニズムのレビュー：電力用変圧器保守管理専門委員会，平成8年，pp1-20

中野 光昭 (正員) 1942年5月6日生まれ、1966年3月岩手大学電気工学科卒業、同年4月一関工業高等専門学校助手、現在、同教授 1977年1月～1978年1月 カナダ・ワータール大学客員研究員、博士(工学)、IEEE、静電気学会員

杉田 慶一郎 (正員) 1928年1月15日生まれ、1953年3月東北大学大学院研究奨学生前期修了 同年4月同大学工学部助手、1961年3月同助教授、1965年11月～1967年11月ユーニヒ(ドイツ)プラズマ物理研究所客員研究員、岩手大学教授、現在、八戸工業大学教授、工学博士、日本物理学会員他。

松永 充史 (非会員) 1946年9月13日生まれ、1971年3月京都大学大学院燃料化学工学科卒業、同年4月日本鉱業(株)入社、現在、(株)ジャパンエナジー、主席技師長、絶縁油・潤滑油に関する研究に従事。工学博士、日本化学会、日本石油学会員