電界変調とだ円偏光を用いたカー効果による 絶縁油中の直流電界分布測定

正員 前野 恭 (武蔵工大)

正員 高田 達雄 (武蔵工大)

1. はじめに

液体絶縁体における電気伝導や、絶縁破壊の研究が数多く行われているが、液体には、ダスト微粒子、溶解ガス、水分、電解性物質などの不純物が含まれているため、その電気的な振る舞いは複雑である。そこで液体絶縁体に電圧を印加したときの電流のほかに、液体中の電位分布や電界分布を測定することが行われてきた。こうした測定の例として、古くは探針を挿入し電位分布を求める方法が行われた⁽¹⁾。しかしながら探針を挿入した場合の電界の乱れや、探針に用いる電極材料の影響など好ましくない問題が多い。そこで、電界を乱さない測定法として、音圧パルス法や、カー効果法による電界分布測定が行われた。音圧パルス法は、誘電体に幅の狭い音圧パルスを伝搬させ、誘電体の両側におかれた電極に誘起する電圧、電流を測定する方法である。この方法は、主に誘電体フィルム中の空間電荷分布の測定に用いられているが、Migliori 氏ら⁽²⁾は、これを絶縁油中の電界分布測定に適用し、18 mm の間隔をもつ平行平板中の電界分布を求めた。カー効果法は、カー効果と呼ばれる電気-光学効果を利用して、透過光量の変化から電界分布を求める方法で、いくつかの測定例がある⁽³⁾。カー効果は、10 ns 程度の応答を示し、光学的に非接触で電界強度を知ることができる。ところが、電力機器に広く用いられ実用上重要な変圧器油などの絶縁油は、非常にカー効果が小さく、従来行われてきたような写真撮影による明暗のしま模様から電界分布を求めることはできない。そ

こで、近年、Kelley 氏ら⁽⁴⁾により測定感度を向上させる試みがなされ、絶縁油中の電界測定が始められた。この測定法では、従来のカメラにかえて電気的な光検出器を用いることによって、測定範囲の拡大が図られた。一方、我々は、周波数 88.8 Hz の交流電圧を平行平板電極に印加し、透過光の交流成分を検出することで、更に低い電界強度、10 V/cm まで測定することができた⁽⁵⁾。また、入射光としてわずかにだ円偏光した光を用いることにより、低電界領域の測定が安定に行えることが明らかとなった。

本論文では、カー効果による絶縁油中の直流電界分布の測定に、電界変調とだ円偏光を適用した結果について述べる。試料として変圧器油を用い、直流電圧に 10 kHz の交流電圧を重畳して電極に印加し、6 cm の電極長で 10² V/cm までの電界測定ができた。更に、光源に含まれる雑音と、光検出器の雑音の比較から、だ円偏光のもつ光学的位相差の最適値を導いた。本測定法は、高感度低雑音なため、空間電荷による電界のわずかなひずみや、比較的变化の速い現象の観測が可能で、ステップ電圧を印加した直後のイオンの移動する様子など、興味深い結果が得られた。

2. カー効果を用いた電界測定法

図 1 に示すように、誘電体に直流電圧 V_0 を印加すると誘電体中に直流電界 E が発生する。この電界の方向に対し 45° 傾いた偏波面をもつ強度 $I_0(W)$ の直線偏光を誘電体に入射すると、出射光は位相差 $\Delta\theta$ をもつだ円偏光となる。これは、入射光の電界成分のうち、物質中の電界 E と平行な成分 $E_{\parallel}$ と、これに垂直な成分 $E_{\perp}$ の伝搬速度が異なるために生じた現象で、両者間の位相差 $\Delta\theta$ が直流電界 E の二乗に比例する場合をカー効果という。カー効果による位相差は(1)式で表される。

Measurement of Electric Field Distribution in Transformer Oil by Kerr Effect using an Electric Field Modulation and an Elliptically Polarized Light. By Takashi Maeno, Member & Tatsuo Takada, Member (Musashi Institute of Technology).

前野 恭: 正員, 武蔵工業大学工学部電気電子工学科
高田達雄: 正員, 武蔵工業大学工学部電気電子工学科

図1 カー効果による光学的位相差 $\Delta\theta$ の発生と入射光 I_0 と透過光 ΔI の関係

Fig. 1. The relation of the incident light intensity I_0 to the transmitted light intensity ΔI , where retardation $\Delta\theta$ arising from Kerr effect.

$$\Delta\theta = 2\pi B l E^2 \quad (1)$$

ここで、 B はカー定数と呼ばれる誘電体に固有の値であり、 l は電極長である。入射光が位相差 $\Delta\theta$ をもつ円偏光の場合、検光子を透過する光強度 ΔI は(2)式で示される。ただし、円偏光の長軸方向と検光子の透過光軸は直交しており、 I_0 は入射円偏光の強度である。

$$\Delta I / I_0 = \sin^2(\Delta\theta/2) \quad (2)$$

更に、(1)式を(2)式に代入すると

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \sin^2(\pi B l E^2) = \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{E}{E_m}\right)^2\right] \quad (3)$$

となる。 E_m は ΔI が最大になるために必要な最低電界で

$$E_m = 1/\sqrt{2Bl} \quad (4)$$

である。また、電界 E が大きくなるに従い、透過光は明暗を繰り返し(5)式の関係が成り立つ⁽⁶⁾。

$$\frac{E^2}{E_m^2} = n \quad (5)$$

ここで、 n は奇数のとき明るく、偶数のとき暗くなる。従って、透過光を写真に撮れば、(5)式の関係を満たす電界強度の分布が、しま模様となって得られる。しかし、絶縁油は、カー定数が非常に小さいため、しま模様を得るのは困難である。そこで、こうしたカー定数の小さな液体中の電界を測定するために、以下に述べるような方法が提案されている。

絶縁油に対する、各々の測定法の検出下限の電界値と電極長の関係を図2に示す。①は、ここで述べた写真撮影による方法である。(3)式より、信号 I は IE^2 に比例するため、直線の傾きは -2 となる。長さ 1 m の

図2 カー効果を用いた種々の測定法における絶縁油についての測定下限の電界強度の電極長の関係

Fig. 2. Relationship between the minima detectable electric field strength in transformer oil and electrodes length as used several techniques.

電極を用いても、 10^5 V/cm 以上の高電界領域しか測定できない。次に、②は透過光 ΔI を測定し、電界が E_m を越えない領域で、(3)式から電界を求める方法である。①と同様、直線の傾きは -2 となる。Kelley 氏らは光検出器として、Optical Multichannel Analyzer を用いて電界分布を求めた⁽⁴⁾。この場合、測定の下限界を決める要因は、検光子から漏れる光である。この漏れ光は、電界強度と無関係に一定の値をとるため漏れ光の強度より小さな透過光の変化を知るとは困難である。漏れ光の強度は、偏光子と検光子の消光比できまり、 $I_0 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$ である。しかし、実際には液体の対流によるゆらぎや、液体を入れたテストセルのガラス窓などがもつ機械的なひずみによる複屈折のため、 $I_0 \times 10^{-4}$ 程度であることが多い。従って、この方法では、写真撮影による方法の一けた下の電界測定ができるに過ぎず、実用的な電界の範囲を測定するには不十分である。

そこで、更に測定範囲を広げる方法として、我々は電界変調法を開発した⁽⁷⁾。これは、直流電界に交流電界を重畳し、透過光の交流成分を検出する方法であり、入射光を僅かな円偏光とすることで測定感度と安定度の大幅な改善を図っている。この場合、漏れ光成分は直流であるため、容易に交流信号成分と分離でき、測定範囲は低電界領域まで拡張される。これを④に示す。第3章で述べるように、信号は IE に比例するので、傾きは -1 となる。変調による測定範囲の拡大は著しく、 6 cm の電極長で 10^2 V/cm の電界強度の測定ができる。

ここで、本論文で述べる電界変調法と同様な方法が Torne 氏⁽⁸⁾、Carlsson 氏⁽⁹⁾らにより発表されている

ので我々の方法との比較のため、③に示しておく。これらの測定法では、入射光として直線偏光、または、位相変調した円偏光を用いている。この位相変調は測定の安定度を向上させるために行っている。しかし測定下限の電界強度は、我々の方法に較べけた大きい 10^3 V/cm 程度に止まっており、電界分布の動的な変化をとらえるには至っていない。

3. 電界変調とだ円偏光を用いた電界測定法

〈3.1〉 電界分布測定装置 図3に電界分布測定装置を示す。光源は波長 632.8 nm の He-Ne レーザである。レーザ（日本マイクロ光器製、MOC-SF）は、出力 0.5 mW で発振波長と出力が安定化されたものを用いている。偏光子と検光子はグラントムソンプリズム（Optical for Research 社製、PL-8）で、消光比は 10^6 である。これらは、1' まで読める回転ホルダーに入れてある。1/4 波長板（メスグリオ社製、02 WRQ 001）は水晶板で、位相差の誤差が $\lambda/500$ 以下の精密なものである。この 1/4 波長板は、入射光の電界成分の $E_{||}$ と、これに垂直な成分 $E_{\perp}$ に位相差 α を与えてだ円偏光とするために用いている。図2に示したように、1/4 波長板の軸を電極面と 45° をなすようにおき、これと ϕ ずれた角度 $45^\circ + \phi$ に偏光子をおくと、透過光は長軸が 45° で位相差 $\alpha = 2\phi$ をもつだ円偏光となる⁽¹⁰⁾。このだ円偏光が試料の入ったガラス製のテストセルに入射する。テストセルは X-Y ステージ上に置かれ、 $2\mu\text{m}$ の精度で移動できる。セル内の電極は、ステンレス製で、長さ 6 cm、幅 15 mm、厚さ 6 mm、電極間隔 5.5 mm の平行平板電極である。セルを通過しただ円偏光は、カー効果により更に位相差を増す。このだ円偏光の短軸成分のみが、1/4 波長板と直交する角度、 -45° に置かれた検光子を透過す

る。透過光は、フォトダイオードにより検出され演算増幅器により電流-電圧変換された後、ロックインアンプで変調周波数と同期検波される。直流電界は、これより十分小さい交流電界を重畳することにより変調される。電圧印加時の過渡状態を測定するため、変調周波数を 10 kHz と高くし、1 ms 程度の応答時間を得ている。

〈3.2〉 印加電界と透過光の関係 電界を変調すると、位相差 $\Delta\theta$ は(1)式に代えて次のようになる。

$$\Delta\theta = 2\pi Bl(E_{dc} + E_{ac}\sin\omega t)^2$$

$$= \gamma(E_{dc} + E_{ac}\sin\omega t)^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 γ はカー効果による二次の電気光学効果を表す定数で、 $\gamma = 2\pi Bl$ であり、 E_{dc} は直流電界、 $E_{ac}\sin\omega t$ は交流電界、 ω は変調角周波数である。本測定法は、光をだ円偏光させているので、入射光は位相差 α をもつ。そこで、(6)式に位相差 α を加えて(2)式に代入すると、透過光 ΔI は、

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \sin^2 \left[\frac{\alpha + \gamma(E_{dc} + E_{ac}\sin\omega t)^2}{2} \right] \dots\dots (7)$$

となる。我々が測定している電界の範囲では、カー効果により生じる位相差は非常に小さいため(7)式の括弧内の値は、多くとも数度にしかならず、次のように近似できる。

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \left[\frac{\alpha + \gamma(E_{dc} + E_{ac}\sin\omega t)^2}{2} \right]^2$$

$$= (\Delta I_{dc} + \Delta I_{1\omega}\sin\omega t + \Delta I_{2\omega}\cos 2\omega t + \Delta I_{3\omega}\sin 3\omega t + \Delta I_{4\omega}\cos 4\omega t)/I_0$$

$$\dots\dots\dots (8)$$

(8)式で示すように、透過光 ΔI は、直流成分 ΔI_{dc} と交流成分 $\Delta I_{1\omega}$ 、 $\Delta I_{2\omega}$ 、 $\Delta I_{3\omega}$ 、 $\Delta I_{4\omega}$ の和で表される。各々の周波数成分の振幅は、次のように表すことができる。

$$\frac{\Delta I_{dc}}{I_0} = \left(\frac{\alpha^2}{4} + \frac{\alpha\gamma E_{ac}^2}{4} + \frac{3\gamma^2 E_{ac}^4}{32} \right)$$

$$+ \left(\frac{\alpha\gamma}{2} + \frac{3\gamma^2 E_{ac}^2}{4} \right) E_{dc}^2 + \frac{\gamma^2 E_{dc}^4}{4}$$

$$\dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\Delta I_{1\omega}}{I_0} = \left(\alpha\gamma E_{ac} + \frac{3\gamma^2 E_{ac}^3}{4} \right) E_{dc}$$

$$+ \gamma^2 E_{ac} E_{dc}^3 \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\Delta I_{2\omega}}{I_0} = -\frac{\alpha\gamma E_{ac}^2}{4} - \frac{\gamma^2 E_{ac}^4}{8} - \frac{3\gamma^2 E_{ac}^2 E_{dc}^2}{4}$$

$$\dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\Delta I_{3\omega}}{I_0} = -\frac{\gamma^2 E_{ac}^3 E_{dc}}{4} \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\Delta I_{4\omega}}{I_0} = \frac{\gamma^2 E_{ac}^4}{32} \dots\dots\dots (13)$$

図3 電界変調とだ円偏光を用いた電界分布測定装置

Fig. 3. Block diagram of the measurement system of electric field distributions using an electric field modulation and an elliptically polarized light.

これらの成分のうち直流成分 ΔI_{dc} が最も大きい、第2章で述べたように、電界に無関係な漏れ光が存在し、 ΔI_{dc} の微小な変化を測定することは困難であるので、漏れ光と容易に分離できる交流成分を検出する。また、これらの交流成分のうちで基本波成分 $\Delta I_{1\omega}$ が他の成分より遙かに大きいので、これを同期検波することによって直流電界を求めている。

ここで、基本波の振幅 $\Delta I_{1\omega}$ と直流電界 E_{dc} の関係を明確にするため、(10)式の $\Delta I_{1\omega}$ を表す項を更に次のように書き直す。

$$\frac{\Delta I_{1\omega}}{I_0} = \alpha \gamma E_{ac} E_{dc} + \frac{3\gamma^2 E_{ac}^3 E_{dc}}{4} + \gamma^2 E_{ac} E_{dc}^3 \dots (14)$$

次に、(14)式と実測値との比較を行う。カー定数が大きく測定しやすいニトロベンゼンを試料として、 α を $0 \sim 32^\circ$ まで変化させ、直流電界 E_{dc} と基本波 $\Delta I_{1\omega}$ の関係を求めた結果を図4に示す。 $\Delta I_{1\omega}$ は入射光強度 I_0 で規格化した。直流電界は、印加電圧を電極間距離で割った平均電界とし、これに重畳する交流電圧は振幅 $50 \text{ V}_{\text{peak}}$ 、周波数 10 kHz であり、交流電界の振幅

は $90.9 \text{ V}_{\text{peak}}/\text{cm}$ となる。レーザ光は、電極間の中心を通るようにした。白丸は測定結果である。実線は、 $\gamma = 1.2 \times 10^{-12} \text{ rad m}^2/\text{V}^2$ として、(10)式の近似式ではなく、(7)式から直接求めた ΔI を、FET プログラムにより数値解析して得た $\Delta I_{1\omega}$ を示している。低電界領域で測定した値が計算値を $20 \sim 30\%$ 下回っているが、これは正負イオンが印加電界により移動した結果、中心部の電界が弱められたためである。このような場合には、直流電界は印加電圧を電極間距離で割った平均電界と異なるので、 γ を決定することができない。そこで、交流電圧のみを印加し、空間電荷の偏りが無い状態で γ を求めている⁽⁵⁾。この場合、(10)式で $E_{dc} = 0$ とすると $\Delta I_{1\omega} = 0$ となるので、最も大きい(11)式の $\Delta I_{2\omega}$ を検出することになる。なお、電極端での電界の強調を考慮すると、実効的な光路長は 6.2 cm となるので⁽¹¹⁾、この γ からカー定数 B を求めると、 $3.1 \times 10^{-12} \text{ m/V}^2$ となる。これは、従来知られている 546 nm の波長で測られた値、 $3.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}^2$ に近い⁽¹²⁾。

$\alpha = 0$ の場合、 $\Delta I_{1\omega}$ は広い範囲で E_{dc} の三乗に比例しており、(10)式の第二項は非常に小さいことがわかる。ところで、レーザ光がテストセルのガラス窓を通過するとき、材質の不均一さや機械的なひずみのため透過光に複屈折が生じ、長時間にわたって $\alpha = 0$ とすることは困難である。また、この複屈折の大きさはガラス窓の位置によって異なる。1/4 波長板と偏光子により複屈折を補償し、これらの軸のずれ角 ϕ から複屈折の大きさを求めたところ、 $\pm 0.05^\circ$ 程度のばらつきがあった。従って、電界分布を測定する場合、誤差の要因となる。そこで、これより十分大きな α をあらかじめ与えておけば、ガラス窓の複屈折の影響を避けることができ、測定の安定度、再現性が向上する。

α を与えた場合、 10^3 V/cm 以下の低電界領域では、(10)式の第一項が支配的となるため $\Delta I_{1\omega}$ は E_{dc} の一乗に比例しており、電界分布を求めるのに都合がよい。この関係は $E_{dc} < E_{ac}$ の領域においても成り立っている。また、 $\Delta I_{1\omega}$ は α に比例して増すため、 α を与えることで測定感度を大きく向上することができる。

〈3・3〉 位相差 α の最適値と測定下限 先に述べたように、 $\Delta I_{1\omega}$ の大きさは α に比例して増加する。しかし、この場合入射光は次第に円偏光に近づき、入射光の短軸成分も増加する。従って、透過光に含まれる光源の雑音も増加し、信号対雑音比、 S/N はかえって悪化するため、位相差 α には最適値が存在する。そこで、全ての雑音成分を評価するために、光強度を電圧で表し、検出系の電氣的な雑音と比較する。光強

図4 だ円偏光の位相差 α を変化させた場合の直流電界強度 E_{dc} と、透過光の変調周波数成分の振幅 $\Delta I_{1\omega}$ の関係

Fig. 4. The relation of the average electric field strength E_{dc} in nitrobenzene to the amplitude of $\Delta I_{1\omega}$, with variation of retardation α .

度 $I(W)$ と出力電圧 $V_I(V)$ は次の関係にある。

$$V_I = K \times I \times R \quad (15)$$

ただし、 K は放射感度で、ここで用いたシリコンフォトダイオード（浜松フォトニクス社製、S1226-5BK）では $0.38 A/W$ である。 R は電流-電圧変換用の抵抗で演算増幅器の帰還回路に入っており、光強度により $1k \sim 1M\Omega$ を切り替えている。 R は大きいほうが光検出器としての S/N は向上するが、 $10 kHz$ の周波数帯域が必要なため、 R を $1M\Omega$ 以上にはできない。光源の雑音を評価するために、レーザ光をフォトダイオードで検出し、直流成分 V_{Idc} と、 $\Delta I_{1\omega}$ と同じ周波数、 $10 kHz$ の交流雑音成分 V_{In} の比率を測定した。 V_{In} の測定は、ロックインアンプを用いて行い、帯域幅 $\Delta f = 1 Hz$ に換算した。測定した結果、光源の $S/N = V_{Idc}/V_{In}$ は 10^6 程度であった。また、テストセルに電圧を加えないときに検光子から漏れる光に含まれる雑音 V_{Inn} は(9)式より

$$\Delta I = (\alpha/2)^2 \times I_0 \quad (16)$$

$$\Delta I_{dc} = (\alpha/2)^2 \times V_{Idc} \quad (17)$$

であるから

$$V_{Inn} = \frac{\Delta V_{Idc}}{S/N} = \left(\frac{\alpha^2}{4}\right) \times \frac{V_{Idc}}{S/N} \quad (18)$$

となる。一方、フォトダイオードを含めた検出系の電気的な雑音 V_{En} は、 $R = 1M\Omega$ のとき、光検出器の出力換算値で、 $1 \mu V/\sqrt{Hz}$ であった。以下全て、光強度は $R = 1M\Omega$ のときの出力電圧 V_I に換算して計算を行う。また特に断らないかぎり、帯域幅 $\Delta f = 1 Hz$ とする。次に、全雑音電圧 V_n は次式となる。

$$V_n = \sqrt{V_{Inn}^2 + V_{En}^2} \quad (19)$$

従って、 $V_{Inn} > V_{En}$ の領域では α の二乗に比例して雑音は増加する。これに対し、信号である $\Delta I_{1\omega}$ は α の一乗に比例するため、 $V_{Inn} > V_{En}$ の場合には、 α が増加すると S/N は低下する。このため、 α を与えることによる感度の改善は $V_{Inn} < V_{En}$ となる範囲に止める必要があり、 $V_{Inn} = V_{En}$ となるとき α の値が最適値の目安となる。このときの α は(18)、(19)式より、

$$\alpha = \sqrt{\frac{V_{En} \times 4 \times S/N}{V_{Idc}}} \quad (20)$$

となる。この α は、 $0.145 rad$ 、すなわち 8.3° となる。測定下限の直流電界強度を、 S/N が1となる値とすると、(15)、(18)、(19)式より、次式が成り立つ。

$$K \times \Delta I_{1\omega} \times R = \sqrt{\left(\frac{\alpha^2}{4} \times \frac{V_{Idc}}{S/N}\right)^2 + V_{En}^2} \quad (21)$$

図 5 2号変圧器油における直流電界強度 E_{dc} と透過光の変調周波数成分の振幅 $\Delta I_{1\omega}$ の関係

Fig. 5. The relation of the electric field strength E_{dc} to the amplitude of $\Delta I_{1\omega}$ for transformer oil No. 2.

低電界領域では、(10)式の第一項が支配的となることを考慮して、(21)式を整理すると

$$E_{dc} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\alpha^2}{4} \times \frac{V_{Idc}}{S/N}\right)^2 + V_{En}^2}}{K \times I_0 \times R \times \alpha \gamma E_{ac}} \quad (22)$$

となる。従って、図4と同様に $50 V_{peak}$ の交流電圧を重畳し、絶縁油中の直流電界を測定した場合、 $40 V/cm$ まで測定ができる。

図5に、絶縁油中の直流電界 E_{dc} と $\Delta I_{1\omega}$ の大きさの関係を実測した結果を示す。白丸は測定結果を表す。 S/N を十分大きくするために、 $10 \sim 100$ 秒程度の時定数で測定した。 $\alpha = 8^\circ$ とし、電極間の中心部の直流電界を測定した。この結果から、先に計算した程度の直流電界の測定は可能であることがわかる。また、実線は $\gamma = 1.4 \times 10^{-15} rad \cdot m^2/V^2$ として、数値解析して得た $\Delta I_{1\omega}$ を示している。ニトロベンゼンと同様、低電界領域で電界が弱められている。ところで、図5のように低電界領域の測定を行った場合、交流電界 $E_{ac} = 90.9 V_{peak}/cm$ が、直流電界 E_{dc} より大きくなってしまふ。そこで、交流電界を直流電界より十分低い値、 $E_{ac} = E_{dc}/10$ とすると、測定下限の直流電界は、(22)式より、 $191 V/cm$ となる。雑音電圧 V_n はロックインアンプの帯域幅 Δf の $1/2$ 乗に比例するの

図 6 電界強度分布

Fig. 6. Electric field distribution between parallel electrodes for transformer oil.

で、時定数を大きくし、帯域幅を狭めれば 10^2 V/cm の電界測定が可能となる。

4. 測定結果

絶縁油（共同石油製、2号変圧器油）を試料として電界分布を求めた結果を図6、7に示す。図6(a)～(e)は、試料に250～1800 Vの直流電圧を印加し10分程度経った後に測定した電界分布である。セルをX-Yステージにより、0.4 mm 間隔で移動させ、電極間5.5 mmの電界強度の分布を測定した。縦軸は、印加電圧を電極間距離で割った平均電界を中心として、これに対するずれを百分率で表示した。白丸は、脱気処理のみを行った絶縁油の測定結果で、孔径1 μ mのメンブランフィルタを通して、真空中に放出したものを用いた。黒丸は脱気周処理に加えモレキュラーシーブスによる脱水処理を行った絶縁油についての測定結果である。テストセルは、洗浄後、200°Cに加熱した真空容器中で数時間乾燥させた。脱気処理のみの場

図 7 ステップ電圧印加時の電界強度分布の経時変化

Fig. 7. Time evolution of electric field distribution in transformer oil after step voltage applied.

合、正の空間電荷が形成され、負極側の電界が強調されている。また、印加電圧を変化させると、電圧の増加に伴い、電界のひずみは少なくなる。電界の傾きから、空間電荷密度を求めると、40～80 pC/cm³となり、電圧を増加させても、ほぼ一定の電荷密度であった。

次に、脱気処理に加え脱水処理を行った場合には、正負両極の近傍で、電界の強調がみられ、ヘテロチャージの存在が確認された。これは、Törne 氏、Carlsson 氏らの報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾と一致する。電圧を増加させると、電界のひずみは減少する傾向にある。

こうした電界のひずみは、交流電圧のみを印加した場合には全くみられず、500～6 kV_{rms}の電圧の範囲で完全に均一な電界分布を示した。

図7(a)～(c)は、水銀スイッチを用いて、ステッ

ポ電圧を印加した後の過渡状態を測定した例である。電極の中心部と、これから両電極に各々 1 mm, 2 mm 近づいた位置の計 5 点を選び、各位置での電界の経時変化を波形メモリーを用いてコンピュータに取り込んだ。ロックインアンプの待定数は 1 秒とした。各測定点を曲線補間し、三次元表示してある。試料は、図 6 と同じく、脱気処理と脱水処理を行った絶縁油である。図 7 (a) は、1 kV を印加したときの電界分布の変化である。電極間の電界強度は、電圧印加直後は一様であるが、時間の経過に従い中心部は電界が弱まり、電極近傍は強調され始める。これは絶縁油中のイオンが電界により移動した結果であり、このひずみは約 50 秒間増加し、一定となる。図 7 (b) は、4 kV のステップ電圧を印加したものである。電界のひずみは、約 100 秒間増加した後減少する。これは電極面に達したイオンの一部が中和されるためと考えられる。図 7 (c) は、8 kV のステップ電圧を印加した場合の電界分布を示す。4 kV を印加したときに比べ電界のひずみの増減の変化は速く、正電極側と負電極側で非対称なひずみがみられ、正電極側が強調されている。また、全般に電界強度が平均電界より低いことから、電極表面のイオン層のため、電極近傍の電界が著しく強調されていることが予想される。このような電界分布の経時変化から、液体中のイオンの挙動が明らかになるものと思われる。

5. おわりに

カー効果を用いて、絶縁油中の電界強度を極めて高感度に測定する方法を開発した。直流電界に交流電界を重ねし、透過光の交流成分を検出した。更に、入射光をだ円偏光にすることで、直流電界の強度と、透過光の変調周波数成分の大きさが、一次に比例するようになり、低電界領域で感度が大幅に改善された。だ円偏光を用いると、テストセルのガラス窓などのもつ材質の不均一さや機械的なひずみによる複屈折の影響を避けることができ、測定の再現性、安定度が向上した。光源に含まれる雑音と、光検出器の雑音を比較することにより、だ円偏光の位相差の最適値を求めた。この最適値は、光源により異なるが、我々の用いた

He-Ne レーザでは 8° であった。この場合、測定できる直流電界の下限は、 10^3 V/cm 程度である。長さ 6 cm、電極間隔 5.5 mm の、ステンレス製平行平板電極を用いて、絶縁油中の電界分布を測定した結果、 $40 \sim 80$ pC/cm³ の空間電荷の存在が確認された。また、ステップ電圧を印加した場合の電界分布の経時変化を測定し、イオンの移動による電界のひずみの変化を、動的に観察することができた。

本測定法は、液体誘電体中の電界分布を非接触で求めることができ、電気伝導や絶縁破壊の研究に役立つと思われる。

本研究の一部は、昭和 61 年度文部省科学研究費(一般研究 B)を受けて行われた。

(昭和 61 年 12 月 25 日受付)

文 献

- (1) 例えば、J.B. Whitehead & R.H. Marvin: "The Conductivity of Insulating Oils" *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs.* **49**, 647 (1930)
- (2) A. Migliori & J.D. Thompson: "A Nondestructive Acoustic Electric Field Probe" *J. Appl. Phys.* **51**, 479 (1980)
- (3) 例えば、M. Zahn & T. Takada: "High-Voltage Electric Field and Space Charge Distributions in Highly Purified Water" *J. Appl. Phys.* **54**, 4762 (1983)
- (4) E.F. Kelley & R.E. Hebner: "Electro-optic Measurement of the Electric Field and Space Charge Distribution in Transformer Oil" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* **PAS-102**, 2092 (1983)
- (5) T. Maeno & T. Takada: "Electric Field Measurement in Liquid Dielectrics using a Combination of AC Voltage Modulation and a Small Retardation Angle" *IEEE Trans. Elect. Insulation*, 掲載予定
- (6) M. Zahn, T. Takada & S. Voldman: "Kerr Electro-optic Field Mapping Measurements in Water Using Parallel Cylindrical Electrodes" *J. Appl. Phys.* **54**, 4749 (1983)
- (7) 前野・高田: 「電気光学効果を用いた絶縁油中の電界測定における電界変調法の適用」第19回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 113 (昭 61)
- (8) A. Törne & U. Gäfvert: "Measurement of the Electric Field in Transformer Oil Using Kerr Technique with Optical and Electrical Modulation" *Conf. Record of ICPADM* **61** (1985)
- (9) C. Carlsson, U. Gäfvert & J. Marinko: "Space Charge and Ionic Conduction in Transformer Oil" *Annual Report of IEEE CEIDP* **58** (1985)
- (10) 桑原, 他: 光学技術 p. 294 (昭 59) 共立出版
- (11) P.D. Tha Cher: "Optical Effects of Fringing Fields in Kerr Cells" *IEEE Trans. Elect. Insulation* **EI-11** **40** (1976)
- (12) 電気学会編: 放電ハンドブック p. 598 (昭 49)