油浸絶縁流動系における光学的電界測定と電荷挙動

学生員	羽 柴 靖 人*	(名古屋大学)
正員	加 藤 克 巳	(名古屋大学)
正員	仲 神 芳 武	(富士電機総合研究所)
正員	宮 本 昌 広	(富士電機総合研究所)
正員	大久保 仁	(名古屋大学)

Optical Measurement of Electric Field and Charge Behavior Induced by Flow Electrification in Oil Immersed Insulating System

Yasuhito Hashiba*, Student member, Katsumi Kato, Member,

#Yoshitake Nakagami, Member, #Masahiro Miyamoto, Member, Hitoshi Okubo, Member
(Nagoya University, #Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.)

Abstract

In this paper, we carried out an optical measurement of electric field in transformer oil by using Kerr effect to discuss electric field and charge behavior in transformer oil induced by flow electrification. We constructed a system which consisted of electro-optic field measurement part and an oil flowing part. By using this system, we measured electric field in charged transformer oil. When charged oil flew into the measurement system without voltage application, electric field appeared in the oil. Particularly, when a pressboard was placed in the field measurement system, electric field appeared strongly because of charge accumulation on the pressboard. We discussed experimental results from the viewpoints of leakage current and the time constant of electric field relaxation in equivalent circuit. Finally, we investigated charge behavior in flowing transformer oil, and proposed a model which could explain charge behavior associated with the flow electrification.

キーワード：カー効果，流動帯電，変圧器油，プレスボード

(Kerr effect, Flow electrification, Transformer oil, Pressboard)

1. まえがき

電力用変圧器の内部絶縁は，変圧器油とプレスボード等による複合絶縁系によって構成されている。変圧器油は，絶縁と同時に機器を冷却する冷媒としての機能も兼ねており，冷却効率を向上させるため変圧器内部を強制循環されている。このとき変圧器油がプレスボード上を流動することによって，液体と固体の界面において静電的な帯電，いわゆる流動帯電が発生する。このような帯電は機器内部の電界分布を変歪させたり，絶縁性能を低下させることが考えられ，以前から絶縁上の問題となっている。この流動帯電に対しては，油の流動装置からの漏れ電流を計測した研究^[1]が多数行われており，油温や課電の影響なども詳細に検討されている^[2]。しかし，油流動時の油中電界の測定に基づく電荷挙動に関する研究はほとんど行われていない。

変圧器油中の電界分布を直接測定する手法として，電気光学カー効果を用いた電界測定法^[3-4]が開発されている。

この電界測定法においては，カー効果を用いることにより，非接触かつ高精度に電界分布を測定することが可能となっており，これまでも様々な液体誘電体中における電界測定例が報告されている。今回我々は，カー効果による光学的電界測定法を用い，流動している変圧器油の油中電界を直接測定した。また，測定結果をもとに油流動時の油中電荷の挙動について考察したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 電気光学カー効果による電界測定法

電気光学カー効果による電界測定法においては，液体誘電体に光を透過させた場合の出射光の位相差が電界強度によって変化する現象を応用し，出射光強度を測定することによって電界強度を求める。図1にカー効果を用いた電界測定装置を示す。なお，変圧器油のカー定数は常温において $3.53 \times 10^{-15} [\text{m/V}^2]$ と非常に小さいため，本測定において

はカー効果に電界変調と入射円偏光を組み合わせることによって測定感度を向上させている。テストセルは、内部に平行平板電極（真鍮製、65mm×100mm、ギャップ長10mm）を配置した後密封し、水分や酸素による油の劣化を防ぐために真空ポンプで十分に脱気した後、油面上の空間に乾燥窒素を大気圧まで封入した。

電界測定においては、下部電極に電界変調のため振幅200V、周波数1kHzの交流電圧を重畳して行った。レーザーの光源は出力7mW、波長632.8nmのHeNeレーザーを用いた。レーザーは偏光子、4分の1波長板を通過することによって円偏光となり、この状態でテストセルに入射した。

テストセル内の変圧器油中の電界によってレーザーには位相差が生じる。この位相差を含んだ出射光は、検光子およ

びレンズを通過して、フォトダイオードにおいて検出した。出射光強度はロックインアンプにおいて変調周波数で同期検波し、これをもとに電界強度を求めた。なお、図1に示した電界測定系における測定感度は0.1kV/cmである。また、最短5秒間隔で電界の測定を連続して行うことができ、油中電界の時間変化を高時間分解能で測定することができる。

2. 2 変圧器油の流動装置

図2に上述の電界測定系を含めた油流動系の装置を示す。同図中のポンプによって変圧器油は流動し、装置内部を循環する。このポンプでは回転数を変化させることによって流量を調節できる。今回、変圧器油は流量3.5ℓ/minから14.0ℓ/minの範囲で流動させた。油の流量は、オーバル式の流量計を用いて測定した。油はいったん緩和タンクに送り込まれた後、帯電発生部内を流動する。帯電発生部の内部にはセルロース製のフィルタが配置してある。油がこのフィルタを通過するとき、セルロースの負電荷吸着性^[5]によって油中に帯電が発生する。この帯電した油をテストセルに導入した。なお油の流動は、帯電発生部内を流動させることによって油中に帯電が発生する場合と、帯電発生部をバイパスさせて油中に帯電が発生しない場合の二通り行うことができる。

それぞれの場合についてテストセル中の平行平板電極の中央における油中電界を2.1節で述べたカー効果による電界測定法を用いて測定した。変圧器油の流動および油中電界の測定は全て室温で行った。

また、図2の変圧器油の流動装置においては、水分計および温度計を接続した。さらに、変圧器油の体積抵抗率を測定するための電極も組み込んだ。これにより、油の抵抗率や水分率の測定と油中電界の測定の同時測定を可能としている。

図1 カー効果を用いた油中電界測定装置

Fig.1 Experimental setup for electric field measurement in transformer oil using Kerr effect.

図2 電界測定系を含めた油流動系の装置

Fig.2 Experimental setup for flow electrification and electric field measurement.

3. 実験結果および検討

3. 1 変圧器油を流動させた場合の油中電界測定

まず、テストセル中の平行平板電極の下部電極上に厚さ1mmのプレスボードを配置した。なお、平行平板電極には電圧を印加せず、接地とした。図2の流動装置において、帯電発生部を通して油を流動させることで油を帯電させた。変圧器油は10分間流動させ、その後流動を停止した。このときの流動中及び流動停止後の変圧器油の油中電界を上述の電極系においてカー効果を用いた手法により測定した。なお油中電界の測定点は、上部電極から4.5mm下方の箇所とした。測定結果を図3に示す。同図より、変圧器油が流動することによって帯電した場合、課電されていない変圧器油中に電界が発生することがわかる。この油中電界は流動開始と同時に発生し、時間の経過とともに増加して約0.8kV/cmで飽和する傾向があることがわかる。

また、変圧器油を流動させる場合の流量について、14.0 l/min, 10.6 l/min, 7.1 l/minおよび3.5 l/minと変化させて同様の電界測定を行ったが、流量が多いほど電界の増加および飽和に達する時間が早いことがわかる。ただし、流量3.5 l/minで変圧器油を流動させた場合については流量が小さいため、他の場合に比較して小さい油中電界となっている。一方、流動停止後の油中電界の変化については、流量3.5 l/minで変圧器油を流動させた場合を除いて、流動時の流量にかかわらず約0.8kV/cmあった電界が流動停止後約10分間で測定感度以下まで減衰している。なお、図3における電界減衰の半減期は135秒であった。

次に、比較のために、流動によって帯電した油中の電界をプレスボードを配置しない平行平板電極間において測定

図3 プレスボードを下部電極上に配置した場合の、帯電した変圧器油流動時の油中電界とその流量依存性

Fig.3 Flow rate dependence of electric field strength in transformer oil/PB composite system with charge generator.

図4 プレスボードを配置しない場合の、帯電した変圧器油流動時の油中電界とその流量依存性

Fig.4 Flow rate dependence of electric field strength in transformer oil with charge generator.

図5 プレスボードを下部電極上に配置した場合の、帯電しない変圧器油流動時の油中電界とその流量依存性

Fig.5 Flow rate dependence of electric field strength in transformer oil/PB composite system without charge generator.

図6 プレスボードを配置しない場合の、帯電しない変圧器油流動時の油中電界とその流量依存性

Fig.6 Flow rate dependence of electric field strength in transformer oil without charge generator.

した。この場合の油中電界の測定結果を図4に示す。同図より、図3と同様に、流動開始とともに油中に電界が発生していることがわかる。しかし、変圧器油の流動を続けても油中電界は増加せず、流量によらずほぼ 0.4kV/cm 一定の大きさを保っている。流動停止後については、約1分で測定感度以下まで急激に減衰した。

一方、帯電発生部をバイパスして変圧器油を流動させ油中に帯電が発生しない場合について油流動時の油中電界の測定を行った。測定結果を図5および図6に示す。図5がプレスボードを配置した電極系における油中電界測定結果で、図6がプレスボードを配置しない電極系における油中電界測定結果である。両図において、変圧器油の流量および電極上におけるプレスボードの有無にかかわらず、油中に帯電電荷がない場合は油中電界は発生せず、油の流動によってレーザ光が散乱されることに起因すると思われる信号および測定系の持つばらつきが測定されているのみである。図3と図5、および図4と図6を比較することにより、油流動時の油中電界の発生は、油中の帯電の有無によって決まり、油の流動そのものが油中電界に及ぼす影響は充分小さいことがわかった。

3. 2 油流動時における油中電荷挙動

図3および図4において示したように、帯電発生部内を通して変圧器油を流動させ油が帯電した場合、課電されていない変圧器油中に電界が発生した。この電界測定結果をもとに、油が帯電した場合における油中の電荷挙動について考察を行った。

本研究においては、変圧器油を帯電発生部内のセルロース製のフィルタを通過させて流動させることにより、油中に帯電を発生させた。セルロースの表面は正に分極した水素原子に覆われているため、変圧器油がこの表面上を流動すると油中の負電荷がセルロース表面に吸着され、油は正に帯電すると考えられる。そこで、油中の帯電の極性を確認するために、帯電発生部からの漏れ電流 A_G 、電界測定を行うテストセル中の電極およびテストセル本体からの漏れ電流 A_1 、 A_2 、 A_3 、その他の部位からの漏れ電流 A_4 の測定を行った。漏れ電流の測定系を図7に示し、図7に対する測定結果を表1に示した。同表より、変圧器油が流動した場合、帯電発生部からは負の漏れ電流が、電極、テストセルおよびその他の部位からは正の漏れ電流が測定され、その総和はほぼ零となり、この流動系における電流の収支が理解できる。この結果より、帯電発生部内のセルロース製フィルタに油中の負電荷が吸着され、残りの正電荷がテストセルまで流入したと考えられる。この正電荷の流入によって油中に電界が発生したと考えられる。その後、油中の正電荷は、他の配管や調整タンク部などから緩和してゆくものと考えられる。

図8には、プレスボードを下部電極上に配置した電極系

における油流動時の油中電荷挙動のモデル図を示し、これを用いて図3の油中電界測定結果に対する検討を行う。図8(a)において、油中の正電荷は下部電極上に配置されているプレスボード上に蓄積してゆき、この電荷の蓄積によって油中電界は増加する。このプレスボードへの電荷の蓄積はやがて飽和する。同図(b)のように、プレスボードへの電荷蓄積の飽和によって、油中電界の増加も飽和する。油中電界飽和時におけるプレスボード上の蓄積電荷密度は、 $\rho = \epsilon E$ より約 $1.5\mu\text{C/m}^2$ と求められた。流動停止後については、新たな電荷の供給が無くなるため、同図(c)のようにプレスボード上に蓄積していた電荷は油中へと緩和してゆく。この蓄積電荷の緩和現象に起因して、油中電界も緩やかに減衰していると考えられる。

図9には、プレスボードを配置しない電極系における油流動時の油中電荷挙動のモデル図を示し、これを用いて図4の油中電界測定結果に対する検討を行う。同図(a)において帯電した変圧器油が流入することによって、油中に電界が発生する。しかし、プレスボードが電極上に存在しないため、同図(b)のように流動を続けても電極間における油中の電荷密度は増加せず、油中電界はほぼ一定の値となる。流動停止とともに油中に電荷が供給されなくなり、同図(c)のように電極間の電荷密度は急激に減少する。このため、流動停止後の油中電界も急激に減衰していると考えられる。以上のように、図8および図9のような電荷挙動を考えることによって、油流動時の油中電界の変化を説明することができた。次節では、電界測定結果に対する定量的な検討を行う。

図7 流動装置からの漏れ電流測定系
Fig.7 Leakage current from experimental setup.

表1 図7における漏れ電流測定結果
Table 1 Leakage current at Fig.7.

Flow rate	$A_G(\text{nA})$	$A_1(\text{nA})$	$A_2(\text{nA})$	$A_3(\text{nA})$	$A_4(\text{nA})$
3.5ℓ/min	-49	3	3	14	23
7.1ℓ/min	-96	10	10	45	24
10.6ℓ/min	-126	10	10	33	43
14.0ℓ/min	-140	10	10	40	55

図8 図3の油中電界と電荷挙動

Fig.8 Schematic illustration of charge behavior and time dependence of electric field in oil /PB composite system in Fig.3.

図9 図4の油中電界と電荷挙動

Fig.9 Schematic illustration of charge behavior and time dependence of electric field in oil in Fig.4.

3. 3 電界減衰の時定数

今回電界測定において用いた電極系は、図10(a)に示すように電極および変圧器油、プレスボードによって構成される複合絶縁系である。これを誘電体のCR等価回路を用いると、図10(b)のような電気回路に置き換えて考えることができる。同図(b)において、変圧器油が流動しているときはスイッチが閉じ、ここからプレスボード上に電荷が供給される。一方、流動停止後については、スイッチが開放となり、プレスボード上に蓄積した電荷は緩和してゆくと考える。同図(b)より、今回の測定に用いた電極系における電荷の緩和の時定数 τ は

$$\tau = \frac{(C_{oil} + C_{PB})R_{oil}R_{PB}}{R_{oil} + R_{PB}} = \frac{\epsilon_{oil}d_{PB} + \epsilon_{PB}d_{oil}}{\sigma_{oil}d_{PB} + \sigma_{PB}d_{oil}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 σ_{oil} と σ_{PB} とはそれぞれ変圧器油とプレスボードの導電率を示し、 d_{oil} と d_{PB} とはギャップ長を示している。

ここで図3の測定結果において、流動停止後の電界減衰の時定数は135秒であった。これを(1)式に代入し、さらに、変圧器油とプレスボードの導電率の比について、 $\sigma_{PB}/\sigma_{oil}=100$ と仮定して¹⁶⁾計算を行った。その結果、変圧器油の導電率は $\sigma_{oil}=2.5 \times 10^{-14}$ S/cm となり、この逆数より、体積抵抗率は 4.0×10^{13} Ω cm と求められた。一方、変圧器油の体積抵抗率については直接測定も行った。流動装置に組み込んだ液体電極を用いて変圧器油に直流電圧100Vを印加し、電圧印加1分後の値を測定した結果、体積抵抗率は 3.6×10^{13} Ω cm と測定された。すなわち、誘電体のCR等価回路を用いて計算によって求めた変圧器油の体積抵抗率は、直接測定によって求めた値とほぼ一致し、両者とも変圧器油の体積抵抗率として妥当な値であった。このことより、今回測定した流動停止後の油中電界の減衰は、油中の電荷挙動に起因したものであると考えることができる。

図10 変圧器油／プレスボード複合絶縁系とCR等価回路
Fig.10 Equivalent circuit of transformer oil / pressboard composite system.

4. あとがき

今回、帯電した変圧器油流動時の油中電界を電気光学カー効果を用いて行う測定系を構築した。この測定系を用いて、油が流動帯電した場合の油中電界の時間変化を測定した。プレスボードを平行平板電極の下部電極上に配置した場合と配置しない場合を対象として、油中電界の流量依存性についても調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 帯電発生部内のセルロース製フィルタを通して変圧器油を流動させた場合、変圧器油中に帯電が生じる。この帯電に起因して油中電界が発生する。特に、油の流路にプレスボードが存在する場合、プレスボード上に電荷が蓄積し、油中電界がより顕著に発生する。
- (2) 変圧器油が帯電していない場合は、油が流動しても油中電界は発生しない。
- (3) 油中の電荷挙動モデルに基づいて油流動時の油中電界の発生および減衰が説明できた。
- (4) 誘電体のCR等価回路と流動停止後の電界減衰の時定数を用いて、変圧器油の体積抵抗率を算出した。この値は実測した変圧器油の体積抵抗率とほぼ一致した。

これらのことより、カー効果を用いた手法によって、変圧器油が流動によって帯電した場合の油中電界の測定を行うことが可能であることを示した。すなわち、油流動時の油中電荷の挙動を定量的に把握できることを示した。ここで得られた知見は、油流動時の電荷挙動や変圧器内部の絶縁設計を考えるうえで重要なものと考えられる。

(平成10年10月9日受付、平成11年1月25日再受付)

文献

- [1] 吉田, 山地, 畑野, 辻, 長谷川, 細川, 光庵: 「直流油浸絶縁における流動帯電現象」, 電気学会論文誌B, 117巻, 6号, pp.806-813, 1997.
- [2] 田中, 中越, 畑野, 宮尾, 小島, 古川, 小幡, 門脇: 「変圧器油の流動帯電特性に及ぼす直流電界と直流/交流重畳電界の影響」, 電気学会論文誌A, 118巻, 6号, pp.629-634, 1998.
- [3] T.Maeno and T. Takada: "Electric field Measurement in Liquid Dielectrics Using a Combination of ac Voltage Modulation and a Small Retardation Angle", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 22, No. 4, pp.503-509, 1987.
- [4] H.Okubo, R.Shimizu, A.Sawada, K.Kato, N.Hayakawa, and M.Hikita: "Kerr Electro-optic Field Measurement and Charge Dynamics in Transformer-oil/Solid Composite Insulation Systems", IEEE Trans. on Diele. and Elect. Insul., Vol. 4, No. 1, pp.64-70, 1997.
- [5] 安田, 後藤, 大久保, 月岡, 宮本: 「大容量変圧器に

おける流動帯電の一抑制法について」, 電気学会論文誌B, 105巻, 3号, pp.79-86, 1985.

- [6] 斉藤, 武: 「電気絶縁紙」, コロナ社, p.329, 1969.

羽柴 靖人

(学生員) 1975年10月7日生まれ。98年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程進学, 現在に至る。流動した変圧器油中の電界分布測定に関する研究に従事。

加藤 克巳

(正員) 1969年5月20日生まれ。97年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月同大学助手, 現在に至る。工学博士。主として、高電圧機器を対象とした電界解析技術および電界最適化に関する研究に従事。96年電気学会進歩賞受賞。

仲神 芳武

(正員) 1945年5月15日生まれ。64年3月松山工業高校電気科卒業。同年4月富士電機(株)入社。80年4月(株)富士電機総合研究所出向。主として電力用変圧器の研究開発に従事, 現在に至る。

宮本 昌広

(正員) 1956年7月21日生まれ。79年3月東北大学電気工学科卒業。同年4月富士電機(株)入社。80年4月(株)富士電機総合研究所出向。主として大電力変電機器の研究開発に従事, 現在に至る。

大久保 仁

(正員) 1948年10月29日生まれ。73年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。高電圧技術開発に従事。76年7月～78年2月ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所およびミュンヘン工科大学高電圧研究所客員研究員。89年7月名古屋大学工学部電気学科助教授, 91年4月同教授, 現在に至る。IEEE, VDE会員。