

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560276

 研究課題名（和文） 空間的電界ベクトル分布時系列測定装置を用いた絶縁液体の
絶縁回復特性に関する研究

 研究課題名（英文） Study of insulation recovery characteristics of a dielectric liquid
using time series measurements of electric field distribution.

研究代表者

井堀 春生（IHORI HARUO）

愛媛大学 大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70249861

研究成果の概要（和文）：液体誘電体中の電極空間の電界分布の時間変化を時系列で測定することによって、空間電荷分布の時間変化を求め、高電界下におかれた液体の電気伝導について観察をおこなった。さらに液体中の残留電荷によって形成される電界分布が異なることを実測によって示した。この結果と絶縁破壊させた液体で同様の測定を行った時の結果を比較することで絶縁回復について考察した。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the measurement of electric field vector distributions in liquid dielectrics using an original method. In this study, we improved the measurement system and the algorithm for the reconstruction of the electric field distribution. Then, we measured the electric field in the liquid containing space charges, and we examined the change in the electric field caused by the charges in the liquid. Moreover, we also studied the space charge distribution in the liquid.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電界計測、空間電荷分布、時間変化、液体誘電体

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止を始めとした環境問題に対処するため、電力設備において絶縁技術の見直しを含めた技術開発が重要な課題となっており、電力機器の一層の高電圧化、コンパクト化を目指す上で液体絶縁技術の一層の進展とともに{材料物性上の基礎的研究}が望まれており、電気伝導および破壊前駆現象については世界各国で研究がなされている。最近では環境問題が叫ばれている中から産

学双方で新液体絶縁材料ならびに絶縁設計技術の開発機運が高まっており、生分解性のよい合成油や植物性の絶縁液体が提案されつつあるが、{絶縁液体全般において、その基礎現象の研究は不足しており、定量的理解が欠如している。

液体中の高電界現象とそれに関連する電気伝導・絶縁破壊現象は、機器の絶縁信頼性に直接的につながるものであり、ひいては電力供給の信頼性に関わる重要事項である。し

かしながら、液体中の現象が極めて複雑であり、また影響因子が多岐にわたっていることなどの理由から、技術の体系化が気体や固体中などと比較して立ち遅れているのが現状である。また、液体絶縁材料は冷却効果が大きく、破壊しても自己回復能力をもつなどの特徴からその需要は高いが、絶縁回復機構については不明な点が多い。

2. 研究の目的

絶縁材料の高電界現象を理解するために絶縁体中の電界の状態を知ることが非常に有用であり、我々は世界に先駆けて液体中の任意の面の電界ベクトル分布を決定する方法を開発した。本測定法は電気光学カー効果とCT法の理論を応用した独自のものである。

一般的にCT法では、多方向からのデータを必要とし、我々は3方向から同時に光強度を測定し、そのデータを使って電界分布を再構成している。「3方向」は本手法による電界分布再構成に必要な最低方向数であることはすでにシミュレーションによって明らかにされているが、今後、高電界下での液体誘電体中の空間電荷と電界の時間変化や、さらに絶縁破壊前後の電界の時間変化をより詳細に調べていくためには、電界の変化に追従できるようなシステムに改良する必要があり、さらには空間分解能や時間分解能も向上させることが要求される。これを実現させるためには、システムの構築が現在よりもはるかに複雑になることが予想され、コストを度外視しても単純に方向数を増やすことが困難であり、3方向からの測定で、できるだけ精度を向上させておく必要がある。

そこで、本研究では、まず、電界を再構成するアルゴリズムを見直し、ソフト的に解決が可能な点についてその解決方法を検討し、シミュレーションをおこなった。さらに、実際の電界分布を測定したデータに、従来の再構成手法と今回の改良した再構成手法とを適用し、その有効性について検討した結果について述べる。

次に、測定系の改良することによって、電界強度の測定範囲を広げる方法について検討した結果について述べる。

さらに、この測定系を用いて液体中の電界分布の時系列変化を測定することで、液体中の空間電荷分布の時間変化を示すことが可能になったことを述べた上で、液体中の残留電荷が電界分布に与える影響を考察し、絶縁破壊させた液体での結果と比較した結果を述べる。

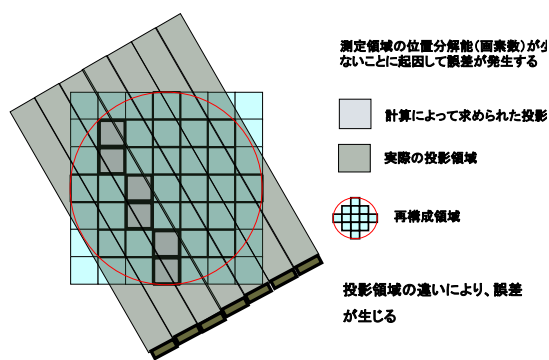


図1 投影領域の違い

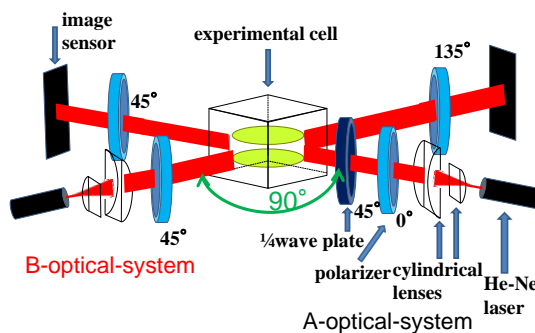


図2 ワイドレンジ測定系

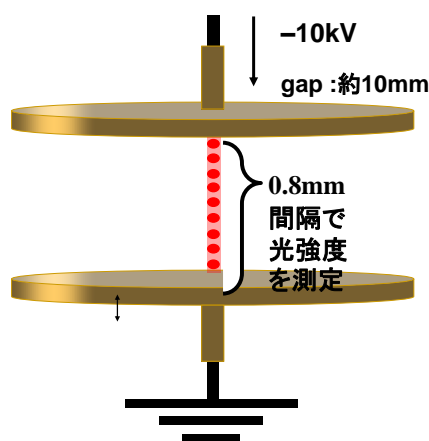


図3 電極系と測定位置

3. 研究の方法

(1) 電界分布再構成のアルゴリズムの改良による測定精度の向上

CT(Computed Tomography)法には対象物体に対して多方向からの投影データを得る過程と、それらのデータを用いてコンピュータ内で物質の断層像を再構成する過程とがある。電界測定では、被測定物に対してレーザー光を照射して多方向から光強度変化を測定し、これを投影データとしている。しかしながら、図1に示されるように、CT法のアルゴリズムによって求められた投影領域と実際の投影領域とは誤差が生じていることがわかる。さらに、一般的に、再構成される被測定物に対しては、その測定物を含む領域より広範囲を投影する必要があり、原理上、再構成領域外の画素値はすべて0として処理されなければ、投影データにそのデータ分の誤差が付加されてしまうのだが、測定装置などの制約によってこれらの誤差を許容してしまっている。

そこでこれらの問題を解決するために、投影領域の違いから発生する誤差に関しては、各格子の画素値を実際の投影領域である割合のみ算出し、それをもとに投影データ(これを実領域投影データと名付けた)を作成するようにプログラムを変更した。また、再構成領域外にデータが存在する場合に発生する誤差に関しては、拡大再構成領域なる概念を導入した。これらの有効性をシミュレーションによって検証した。シミュレーションには画素数(奇数×奇数)7×7から21×21までのサンプルデータを用い、逐次計算回数を20回とした。

(2) 測定系の改良

カー効果による電界測定は、電界によって変化する光学的位相差を光強度によって測定する手法であり、位相差と光強度の間には三角関数で表される関係式が成り立つ。それゆえ、位相差は電界強度の2乗で変化するにもかかわらず、光強度は位相差に対して周期的に変化する。したがって、電界の大きさによっては、光強度から電界強度が一意的に決定できない可能性がある。カー定数の小さな液体中で、測定される電界もさほど大きくない場合はこの問題はあまり気にならない。しかし、絶縁破壊直前のように、電界が急激に大きく変化した場合、現在の測定システムではその変化を測定することができない。そこで、新たな光学系を導入した高電界強度測定システムを開発し、その有効性について検討した。測定系の概略図を図2に示す。実験セルに液体誘電体としてプロピレンカーボネ

ートを満たし、平行平板電極を設置した。光源に He-Ne レーザを用い、円筒レンズによって垂直方向に帯状に広げられたレーザー光を偏光子、1/4 波長板、実験セル、検光子の順に透過させ、イメージセンサを用いて光強度を測定した。イメージセンサのフォトダイオードの間隔が 0.8mm であった。B 光学系と名付けられた光学系は補助的な役割をしており、A 光学系で測定されたデータから計算される電界強度値を最終的に決定する判別データとして使われるほか、液体の流動の有無の判別にも使用することが可能である。

本測定システムで測定された光強度変化比および電界強度を A,B 光学系の理論曲線と比較した。セル内の平行平板電極のギャップ長を 5mm,印加電圧を 1~12kV とし、A,B 光学系それぞれの電圧印加直後の光強度変化比を 1kV ごとに測定した。

(3) 空間電荷分布の時間変化測定

固体中と比較して、液体中での空間電荷分布の時間変化測定はその例が少ない。これは PEA 法という空間電荷を直接測定できる手法を持つ固体に対して、液体中の空間電荷分布を直接測定する方法がないため、液体中の空間電荷は電界分布を求めることによって、ポアソンの方程式から導かれることが一般的である。それ故、電界分布の時間変化が測定できなければ、液体中の空間電荷分布の時間変化も示すことができなかつたが、我々の研究の成果から、電界分布を連続的に時系列で測定が可能になったことで、液体中の空間電荷分布の時間変化を求めることが可能となった。

前述の測定装置を使用し、測定系の中央におかれた実験セル内に、図3に示すような真鍮製の平行平板電極を配置した。セル内は、

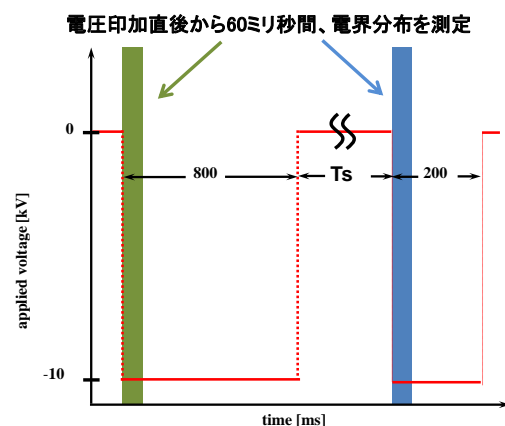


図4 空間電荷が存在する状態での電界分布の測定

液体試料として炭酸プロピレンで満たされた。下部電極を接地し、ギャップ長を約10mmとした。電極間に、波高値約10kV、パルス幅約800msの直流パルス電圧を印加し、光強度を1ms間隔で60ms後まで測定した。得られた光強度から電極間の電界分布を求め、さらに差分法によって空間電荷分布を計算した。

次に、図4に示すように、一度パルス電圧を印加してから、Ts分だけ放置した後に、再度パルス電圧を印加したときの電界分布を測定した。Tsは5, 20, 40, 60, 120分とした。2回目に印加した電圧のパルス幅は200msとした。

さらに、直流電圧を印加して一度破壊させた場合についても、同様に測定をおこなった。

4. 研究成果

(1) 電界分布再構成のアルゴリズムの改良による測定精度の向上

シミュレーションの結果を図5に示す。どの画素数においても実領域投影データを用いたプログラムで再構成をした方が誤差が低いため、これにより実領域投影データの有効性が示されたことになる。なお、どの画素数においても10%近い誤差が再構成結果として現れているが、これは測定方向数が少ないことが起因して発生している誤差であると考えられる。

さらに、拡大再構成領域の導入による有効性を検証した結果、改良前の誤差は69.57%であったのに対し、改良後は19.13%となった。

以上より、これらのアルゴリズムの改良が、電界分布の再構成の誤差を軽減する手段として有効であることがわかった。

(2) 測定系の改良の有効性

測定結果を図6及び図7に示す。測定値はそれぞれの理論曲線に沿った値をとり、本システムが有効に機能していることがわかる。光学素子やその設定の関係で、一般的にA光学系の方がB光学系より誤差が少ないことはよく知られているが、A光学系のみだと、例えば、光強度変化が0.4であるとき、電界値は約15kV/cmかあるいは23kV/cmとなり、一意的に決定することができない。しかしながら、B光学系を導入し、この値を見ることで、電界強度を一意的に決定することができるようになった。

(3) 空間電荷分布の時間変化測定

図8に電極間の空間電荷分布の時間変化を

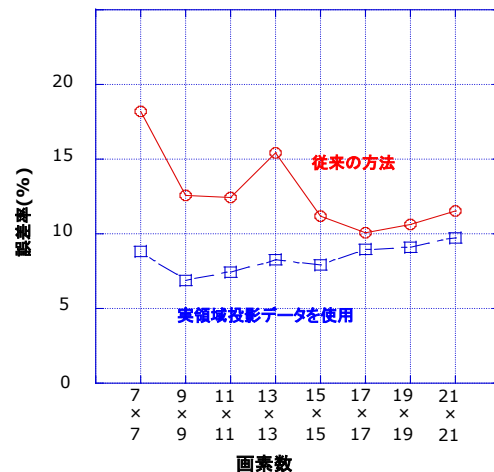


図5 実領域投影データの有効性

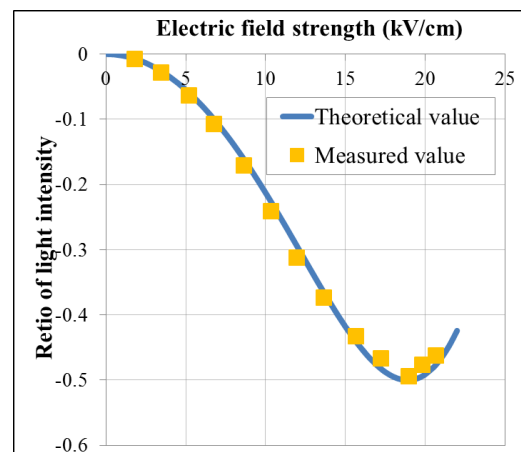


図6A-光学系

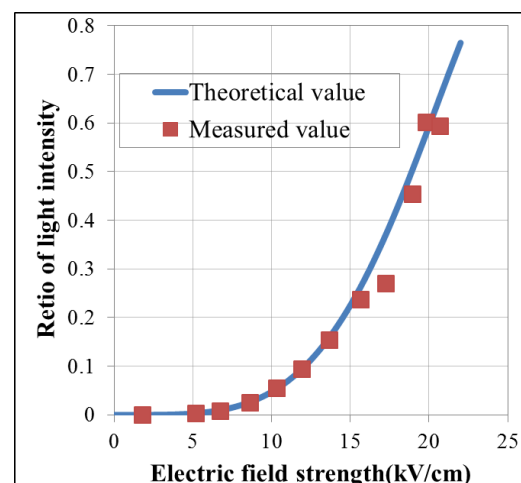


図7B-光学系

示す。赤系色は正電荷、青系色は負電荷が相対的に多いことを示している。上部電極側には負の電荷が、下部電極側には正の電荷が20ms後あたりから見え始めている。40ms後あたりから、上部電極側で、負-正の電荷の層が確認され、時間とともに下部電極側に移動しているように見えるが、実際は、負電荷が下部側へ移動し、正電荷が上部側に移動することによる相対的な変化の結果であると考えられる。

図中に引いた直線は電荷の動きの前端をあらわしており、これから移動度が計算できる。この場合、約 $4 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ (cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s)}$ であった。この値は、一般的な炭化水素系の液体中でのイオン性のキャリアの移動度に近い。このことから、本手法によって液体中の移動度が評価できることが示された。

図9は、一度電圧を印加した試料に再度、電圧を印加したときの電圧印加直後の電界分布を示したものである。first sequenceは1回目の電圧印加の際の、印加直後の電界分布である。Tsが5分の時、電界強度は、両電極に近い所で、静電界値より小さくなり、ギャップの中央付近では逆に、静電界値よりも大きな値となった。Tsが20分では、接地側の下部電極から上部電極に向かって電界が連続的に小さくなる傾向がみられ、Tsが40分になると、Tsが5分の時と似たような傾向を示し、さらに、Tsが120分になると、first sequence とほぼ同様の傾向を示した。このことは、800msのパルス電圧印加で、液体中に形成された空間電荷が、120でほぼ消滅し、元の状態にもどったことを意味していると考えられる。

図10は図9をもとに差分法により計算された電極間の空間電荷分布を示している。図8を見てもわかるように、電圧印加直後は通常、静電界を示し、空間電荷も形成されていない。しかしながら、図10では、電圧印加直後も空間電荷が見られる。このことは、1回目の電圧印加によって形成された空間電荷が、2回目の電圧印加時にもまだ残っていることを示している。したがって、2回目の測定の時間変化を詳細に追うことで、液体中にあらかじめ電荷が存在していた場合の電気伝導について考察することが可能となった。一度絶縁破壊させた液体でも、Tsは異なるが、同じような傾向が見られていることから、絶縁自己回復に液体中の空間電荷が関係していることは間違いない。更なる詳細については、電圧印加直後以外の実験データの解析をおこなうとともに、結果の再現性についても確認する必要がある。

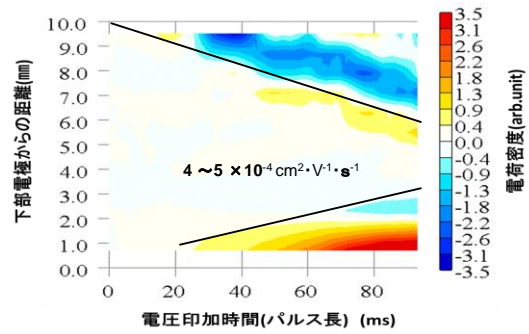


図8 空間電荷分布

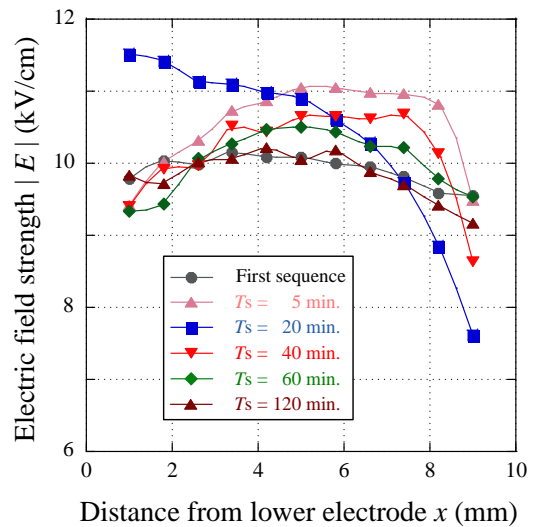


図9 2回目に電圧を印加したときの印加直後の電界分布

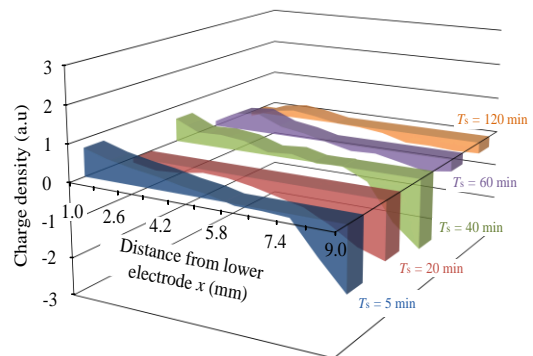


図10 Tsによる空間電荷分布の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Haruo Ihori, Hayato Nakao, and Masaharu Fujii : Time Series Measurement of Electric Field and Electrical Space Charge Distributions in a Dielectric Liquid, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, No.8, 査読有, 2012, pp. 08024-1 -- 08024-3
DOI:10.1143/JJAP.51.080204

- ② 升市 直哉, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 電気光学効果と CT 法を利用した電界分布測定法の精度向上手法, 電気学会論文誌 A, Vol.131, No. 6, 2011, pp. 472-477
DOI:10.1541/ieejfms.131.472

(他投稿中 2 件)

[学会発表] (計 13 件)

1. 井堀 春生, 岡 充, 竹村 昌記, 中尾 勇人, 藤井 雅治 : 光学的手法による液体誘電体中の空間電荷分布の時系列測定, 平成 25 年電気学会全国大会 2013. 3. 20 名古屋
2. Haruo Ihori, Hayato Nakao, Masaharu Fujii : Optical Measurement of Space Charge Distribution in a Dielectric Liquid, the 16th Asian Conference on Electrical Discharge (ACED2012), 2012. 12. 12 Johor Bahru, Malaysia
3. Hayato Nakao, Masaharu Fujii, Haruo Ihori : Optical Measurements of High Electric Field Strength in a Dielectric Liquid with Large Kerr Constant, the 16th ACED2012, 2012. 12. 10 Johor Bahru, Malaysia
4. 藤井 雅治, 赤松 翔太, 井堀 春生, 全現九, 交流電界下でのゲル中に発生するパールチェーン型トリーの進展モデル, 平成 24 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2012. 9. 29 高松
5. 中尾 勇人, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 電界強度のワイドレンジ測定法の検討, 平成 24 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2012. 9. 29 高松
6. 伊東 紗希, 中尾 勇人, 竹村 昌記, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 液体誘電体中の空間電荷分布の時間変化測定, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012. 3. 21 広島

7. 伊東 紗希, 中尾 勇人, 竹村 昌記, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 平行平板電極系における残留電荷を含んだ液体誘電体中の電界分布測定, 平成 23 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2011. 9. 23 阿南

8. Haruo IHORI, Masaki Takemura, Naoya Masuichi, Hayato NAKAO, Saki ITO and Masaharu FUJII : Optical measurement of electric field in a dielectric liquid containing space charges, 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2011. 9. 7 Kyoto

9. 赤松 翔太, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 交流電界下での固体/ゲル/液体中での放電現象, 電気学会パルスパワー・放電合同研究会, 2011. 8. 4 松山

10. Haruo Ihori, Masaki Takemura, Naoya Masuichi, Hideo Yoshihara, Masaharu Fujii : Electrooptical Measurement of Electric Field in a Dielectric Liquid containing Remanent Charges, 17th International Conference on Dielectric Liquid, 2011. 6. 27 Trondheim, Norway

11. 井堀 春生, 吉原 秀雄, 竹村 昌記, 藤井 雅治 : 残留電荷を含む液体誘電体中の光学的電界測定, 平成 23 年電気学会全国大会, 2011. 3. 16 大阪

12. 升市 直哉, 藤井 雅治, 井堀 春生 : CT 法を利用した電界分布再構成アルゴリズムの改良, 平成 22 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2010. 9. 25 松山

13. 升市 直哉, 藤井 雅治, 井堀 春生 : 測定領域と測定方向数を考慮した逐次近似再構成方法の検討, 平成 22 年 電気学会基礎・材料共通部門大会, 2010. 9. 13 沖縄

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井堀 春生 (IHORI HARUO)
愛媛大学・理工学研究科・准教授
研究者番号 : 70249861

(2) 連携研究者

藤井 雅治 (FUJII MASAHARU)
愛媛大学・理工学研究科・教授
研究者番号 : 00127911

(3) 連携研究者

門脇 一則 (KADOWAKI KAZUNORI)
愛媛大学・理工学研究科・教授
研究者番号 : 60291506