

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420297

研究課題名(和文) 高温における絶縁材料中の高分解能空間電荷分布測定装置の開発

研究課題名(英文) Development of Space Charge Measurement System with High Spatial Resolution at High Temperature

研究代表者

田中 康寛 (TANAKA, YASUHIRO)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：30227186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：モータの高効率化には巻線被覆材料の絶縁性向上が必要であり、絶縁性評価の手法を確立しなければならず、その評価方法として空間電荷分布測定法の適用を試みた。ただし、このような被覆層は通常数十ミクロンと非常に薄く、使用環境を考慮すると、高温での測定が必要である。一方、一般のパルス静電応力(PEA)法による高温での空間電荷分布測定では位置分解能が10ミクロン程度であり、高位置分解能化が必要なため、装置の改良を試みた。その結果、室温での測定では2.5ミクロン程度の高分解能化が達成され、25ミクロン厚さの試料の測定が可能となった。一方、高温下の測定でも、80℃において5ミクロン程度の位置分解能が得られた。

研究成果の概要(英文)：A spatial measurement resolution in a space charge distribution measurement system, using a pulsed electro-acoustic (PEA) method at high temperature was attempt to be improved. To increase an efficiency of an inverter-fed motor, it is necessary to improve a thin insulating layer of a winding wire, and a procedure for estimation of insulating properties of it should be established. We tried to apply a space charge accumulation characteristics to the estimation. Furthermore, the estimation must be carried out at high temperature which is close to actual working condition. However, it was hard to apply an ordinary PEA system to the estimation at high temperature because the spatial resolution was not enough to measure the thin layer. After giving some improvements to the ordinary system, we could have an enough spatial resolution at room temperature. Even at higher temperature, higher resolution was obtained than that of the ordinary system.

研究分野：誘電・絶縁材料

キーワード：高分子絶縁材料 空間電荷分布 パルス静電応力法 直流高電圧 高温 高位置分解能 絶縁破壊

## 1. 研究開始当初の背景

### (1)【電気機器の高電圧駆動による省エネルギー化】

東日本大震災以降、電気機器の省エネルギー化が大きな社会的命題となっている。製造業、一般家庭、運輸などのあらゆる局面で使用されているモータの消費電力は、日本で消費される総電力の 57%にもものぼるため、モータの高効率化は電力消費を削減する上で、もっとも効果的な方策の一つであると考えられる。

一方、モータを駆動するシステムとして使用されるインバータ技術は、その高い効率により、消費電力を抑え、省エネルギーに大きく寄与しているが、インバータ技術そのものの革新によるさらなるモータの効率化は、すでにインバータ技術自体が高度に発展した分野であるため、大きな効果を得ることが難しい。そこで注目されているのが、モータの駆動電圧の高電圧化である。例えば、2009年に発表されたトヨタのハイブリッド車“プリウス”では、モータと発電機の駆動電圧を 500V から 650V に引き上げることで、重量を 4 割削減することに成功した。一般にモータ自体の効率は 90%前後であり、その効率を 1~2%上昇させるために、モータや発電機の構造や駆動機構の改良が盛んに研究されているが、プリウスの例は、駆動電圧を高電圧化するだけで機器の発熱が抑制され、効率の飛躍的な向上が期待できるという一例である。

### (2)【高電圧化のためのキーテクノロジー】

電気機器の高電圧化に必要なキーテクノロジーは、優れた絶縁材料の開発である。インバータで駆動する電気機器の電圧を高電圧化すると、インバータサージと呼ばれる急峻な電圧がモータ内で発生し、部分放電と呼ばれる放電現象を引き起こし、絶縁破壊が発生する。この電圧は、インバータで使用する矩形の電圧の立ち上がり時間が短いほど高くなるため、インバータの制御性能を向上させるために駆動周波数を上昇させるほど、部分放電の発生確率が高くなる。つまり、部分放電の発生を抑制する絶縁材料の開発が必要である。

### (3)【絶縁材料の絶縁性能向上・高信頼化の問題点】

材料の絶縁性・信頼性は、材料に加わる電界に依存するため、絶縁材料の絶縁性能を高める最も簡単な手法は絶縁材料の厚さを増し、電界を低下させることであるが、電気機器の高電圧化を図るために、機器サイズや重量を大きくしては意味がない。よって、絶縁材料を従来の厚さのまま高電圧化を図るためには、高電界に耐えうる絶縁材料の開発が不可欠である。しかし、絶縁材料が高電界下にさらされることで、材料の劣化による寿命の低下は加速度的に促進されるが、高電界下における絶縁材料の劣化や絶縁破壊に至るメカニズムは材料によって大きく異なり、未

だ明らかになっていない場合が多い。

### (4)【絶縁破壊・劣化と空間電荷】

部分放電が発生しないと予想される電圧下でも、印加時間が長くなるにつれて徐々に部分放電が発生するようになり、最終的には絶縁破壊にいたるといった報告がある。これは、電圧印加初期には材料内に存在していなかった空間電荷が蓄積し、この電荷により絶縁材料に印加される正味の電圧が上昇することが原因であると考えられている。しかし実際に、巻線被覆絶縁材料中にどのような空間電荷がどのような過程により蓄積するのかは、実測されていない。

一方申請者らは、独自に開発したパルス静電応力 (Pulsed Electro-Acoustic: PEA) 法と呼ばれる空間電荷分布測定技術を開発し、空間電荷の蓄積と絶縁破壊の関係を調査してきた。その結果、巻線被覆などにも使用されるポリイミドに直流高電界を印加すると、空間電荷が蓄積した後に絶縁破壊が生じることを明らかにした。この際、陰極前面に正、陽極前面に負の電荷が蓄積し、絶縁破壊に至る様子を示しており、絶縁劣化にともない空間電荷が発生し絶縁破壊に至る過程を示していると考えられる。このように高電界下における空間電荷の蓄積挙動が、絶縁破壊・劣化現象のメカニズムを解明する鍵となっている。

## 2. 研究の目的

80℃程度の高温環境下で、モータ巻線の絶縁被覆材料として使用される 35μm 程度の薄い絶縁材料内に蓄積する空間電荷分布を計測するために、パルス静電応力 (PEA) 法による空間電荷分布測定装置を改良し、高温高分解能の測定装置を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

モータなどは高温で使用されるため、80℃程度での絶縁性能試験が課せられる。また巻線被覆などの絶縁材料の厚さは、通常 35μm 程度である。一方 PEA 測定装置では、結晶性圧電素子 (LiNbO<sub>3</sub>) をセンサとして、80℃の高温下で、厚さ 100μm 程度の空間電荷分布の測定が可能である。しかし実際の巻線被覆材料を評価するためには測定的位置分解能を向上させる必要があり、そのために圧電素子の厚さを薄くする必要があるが、結晶性圧電素子は加工が難しく、薄い材料を安価に入手することは困難である。一方、室温用測定装置の圧電素子として使用される PVDF (ポリフッ化ビニリデン) センサは、汎用性が高く安価であるが、70℃以上の高温では、圧電性が無く、高温測定は困難である。しかし近年になり 100℃でも圧電性を保つ新種の PVDF が開発された。ただし、厚さ 9μm 程度のフィルムしか市販されていない。そこで、本研究では、新種の PVDF をもとに、薄い新種の PVDF センサを自作することにより、高

温、高分解能の PEA 測定システムを開発する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高分解能化

本研究課題遂行にあたって、まず室温において、計測の高位置分解能を図った。PEA 法では、通常、数 ns の幅のパルス電圧を試料に印加することにより、試料内部や試料/電極界面に存在する電荷から、パルス状の圧力波を発生させ、その圧力波を数  $\mu\text{m}$  の圧電素子により計測することで、試料内部の空間電荷分布を計測する。すなわち、測定の位置分解能は、パルス電圧のパルス幅と圧電素子の厚さにより決まるため、高分解能化のためには、パルス幅の狭いパルス電圧発生器と薄い圧電素子を使用する必要があった。この課題を解決するために、まず、0.7 ns のパルス電圧を発生できる市販のパルス電圧発生器を購入した。さらに、圧電素子には、市販の圧電性のない、4.5  $\mu\text{m}$  程度の厚さの PVDF フィルムを延伸することにより配向させるとともに、厚さを 1  $\mu\text{m}$  程度に成形し、高電圧を印加することにより圧電性を持たせた。これらの改良に加え、パルス電圧を装置に印加するインピーダンスの不整合を極力小さくし、また、電極面積を小さくすることにより、感度を向上させるなどの改良を測定装置に加えることにより、2.5  $\mu\text{m}$  程度の位置分解能で空間電荷分布を測定できる装置を開発することに成功した[1]。

開発した装置の高位置分解能の性能を示すことを目的として、この装置を用いて、厚さ 25  $\mu\text{m}$  の市販のポリイミドフィルム (Kapton®H) および特殊な構造を有するポリイミドフィルム (Kapton®CR) の測定を試みた。このうち、上述した特殊構造のポリイミドフィルムは、ほぼ均等な厚さの 3 層構造になっており、直流高電圧を印加すると、これらの界面に電荷が蓄積することが明らかになった。図 1 は、これらの試料に直流高電圧を印加することにより得られた典型的な空間電荷分布の各印加電界における経時変化を示している[1]。この測定結果では、単層である Kapton®H には、顕著な空間電荷の蓄積は認められないものの、3 層構造を有する Kapton®CR では、高電界下において、試料と電極界面、および試料内に存在する 3 層構造の界面に電荷が蓄積する様子が明確に観測されている。現状では、このような高位置分解能での測定例はほとんど報告されておらず、本研究課題で遂行された位置分解能の改善は、大きな成果であると言える。さらに、Kapton®CR については、部分放電劣化を模擬した、コロナ放電処理を施し、この測定装置を使って、直流電界下で空間電荷分布を計測することにより、その劣化度合いを評価することを試みた[2, 3]。これにより、高分解能型 PEA 装置を用いて、試料の劣化状況を把握することが可能になった。

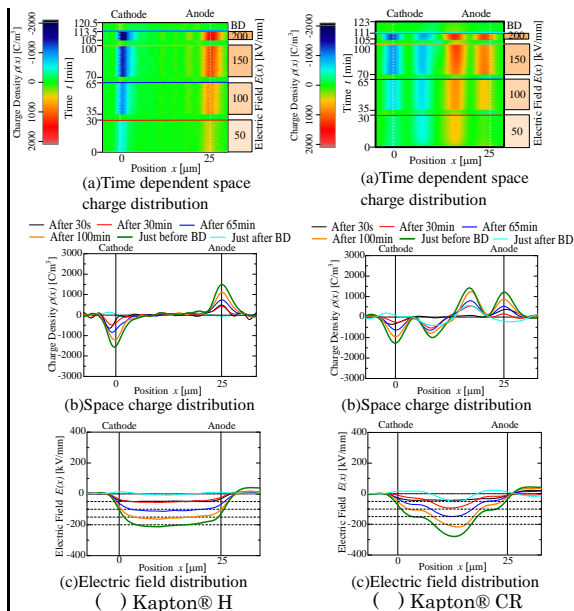


図 1 直流電界下で(I)Kapton®H および(II) Kapton®CR 中に蓄積する空間電荷分布の電界および電圧印加時間依存性[1]

##### (2) 高温化

従来も、高温で安定した信号を出力する  $\text{LiNbO}_3$  結晶をセンサとして使用することにより、100  $^{\circ}\text{C}$  程度の高温で、10  $\mu\text{m}$  程度の位置分解能により測定を行うことができた。しかし今回の研究課題では、高温で 2~3  $\mu\text{m}$  程度の位置分解能を有する測定装置の開発を目的とした。そのため、まず、高温でも圧電性を失わない特殊な市販の PVDF 系のセンサを使用することを検討したが、フィルムを供給する会社の都合で販売が中止されたため、今回の研究課題では、通常の PVDF フィルムを使用した高温、高分解能装置の開発を目的として研究を行った。

この装置では、センサ回りを循環式水冷装置により冷却することで、PVDF の圧電性を失うことなく、試料を高温にするように工夫した。ただし、試料を設置する接地電極と圧電素子とを断熱するために、ガラスなどの材料を両者間に挿入する必要があり、比較的薄い PVDF を使用しても、目標通りには位置分解能を向上させることは困難であった。しかし、4.5  $\mu\text{m}$  厚さの PVDF を使用し、従来よりも高い位置分解能 (5  $\mu\text{m}$  程度) で、80  $^{\circ}\text{C}$  での測定を可能にしたこと[4]は、本研究課題の大きな成果として挙げられる。

##### (3) 高温における電荷分布・伝導電流同時測定装置の開発

上記(2)の成果を受けて、当初の研究計画にはなかった、高温における電荷分布・伝導電流同時測定装置の開発に成功した。電荷分布と伝導電流を同試料で同時期に行うことにより、試料内部の伝導電流分布や消費電力分布が算出可能になる。これまでは、室温による同時測定装置を開発してきたが、高温下での同時測定は、高温下で使用できるセンサの入手が困難であったため、難しかった。し

かし、上述した冷却システムの採用により、高温でも同時測定が可能な装置が開発できた[5]。この装置を使用すると、試料内部の伝導電流分布や消費電力分布を算出することができるため、材料の絶縁評価がさらに容易になると考えられるため、この点に関しても、本研究課題の大きな成果として挙げる事ができる。

#### <引用文献>

- [1] 熊岡賢祐、三宅宏晃、田中康寛、高位置分解能型 PEA 装置の開発と空間電荷分布測定例、電学論 A、査読有、136 巻、2016、pp. 386-387
- [2] K. Kumaoka, A. Ozaki, H. Miyake, Y. Tanaka: "Observation of Space Charge Distribution in Thin Insulating Films Using Improved PEA system", Proc. 2015 ICPADM, pp.128-131 (2015)
- [3] 熊岡賢祐、太田弘一、才木崇史、三宅宏晃、田中康寛、コロナ放電処理したポリイミド内に直流電圧を印加した際に蓄積する空間電荷挙動の調査、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-15-078, pp. 1-6 (2015)
- [4] 平真和、小野、三宅、田中 ; 「高温高分解能型 PEA 装置を使用したエポキシ樹脂シート中の空間電荷分布測定」、H28 電気学会全国大会、p. (2)-42, (2016.3.16-18、仙台)
- [5] 藤富寿之、春日博希、三宅宏晃、田中康寛 ; 「高温直流高電界下におけるポリエチレンフィルム内の伝導電流特性の解析」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-15-079, pp. 7-12 (2015)

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計7件)

熊岡賢祐、三宅宏晃、田中康寛、高位置分解能型 PEA 装置の開発と空間電荷分布測定例、電学論 A、査読有、136 巻、2016、pp. 386-387  
鈴木均、安藤望、三宅宏晃、田中康寛、前野恭、クミルアルコールに浸漬した XLPE 中に形成される空間電荷の試料厚依存性、電学論 A、査読有、135 巻、2015、pp. 113-114  
阿部一貴、直海新、三宅宏晃、田中康寛、前野恭、エナメル線の被覆用絶縁材料中に蓄積する空間電荷の分布測定、電学論 A、査読有、135 巻、2015、pp. 94-99  
加藤剛、小ノ澤諒、三宅宏晃、田中康寛、高田達雄、直流高電界下における XLPE と LDPE の空間電荷分布と伝導電流特性、電学論 A、査読有、135 巻、2015、pp. 75-81  
高田達雄、森琢磨、加藤剛、三宅宏晃、田中康寛、量子化学計算による低密度ポリエチレンの直流熱破壊前駆の導電率増大の検討、電学論 A、査読有、134 巻、2014、pp. 258-265

高田達雄、森琢磨、加藤剛、三宅宏晃、田中康寛、低密度ポリエチレンの直流熱破壊特性とフィラメント状電力消費の検討、電学論 A、査読有、134 巻、2014、pp. 250-257

高田達雄、石井智之、小宮山洋、三宅宏晃、田中康寛、量子化学計算によるポリイミドフィルムのヘテロ空間電荷蓄積の水分効果の検討、電学論誌 A、査読有、133 巻、2013、pp. 313-321

##### [学会発表](計21件)

平、小野、三宅、田中 ; 「高温高分解能型 PEA 装置を使用したエポキシ樹脂シート中の空間電荷分布測定」、H28 電気学会全国大会 (2016.3.16-18、東北大学、宮城)  
熊岡、太田、才木、三宅、田中 ; 「コロナ放電処理したポリイミド内に直流電圧を印加した際に蓄積する空間電荷挙動の調査」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料 (2015.12.22、ルーテル市ヶ谷センター、東京)

藤富、春日、三宅、田中 ; 「高温直流高電界下におけるポリエチレンフィルム内の伝導電流特性の解析」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料 (2015.12.22、ルーテル市ヶ谷センター、東京)

小野、平、陳、三宅、田中 ; 「高温、直流高電界下でポリジシクロペンタジエン内部に蓄積する空間電荷分布の計測」、電気学会 誘電・絶縁材料 / 電線・ケーブル合同研究会資料、7-12 (2015.11.20、秋田大学、秋田)

T. Saiki, K. Abe, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Maeno: "Space Charge Distribution Measurements in Insulating Materials of Commercially Available Enamelled Wire", 2015 Annu. Rep. CEIDP (Ann Arbor, USA, Oct. 18-21, 2015)

熊岡、太田、三宅、田中 ; 「直流電圧および矩形波電圧印加によりフィラー添加ポリイミド内に蓄積する空間電荷計測」、第46回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集 (2015.9.3-5、九州工大、福岡)

K. Kumaoka, A. Ozaki, H. Miyake, Y. Tanaka: "Observation of Space Charge Distribution in Thin Insulating Films Using Improved PEA system", Proc. 2015 ICPADM (Sydney, Australia, July 19-22, 2015)

K. Takizawa, T. Suetsugu, T. Iwata, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Takada: "Study on Accumulation Mechanism of Space Charge in Covering Insulating Material for Motor Windings", 2014 Annu. Rep. CEIDP (Des Moines, USA, Oct. 19-22, 2014)

K. Abe, A. Naoumi, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Maeno: "Measurement of Space

Charge Distribution Accumulated in Insulating Material of Enameled Wire under Square Voltage Application”, Proc. CMD 2014 (Jeju, Korea, Sept. 21-25, 2014)

K. Abe, A. Naoumi, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Maeno: “Space Charge Distribution Measurement in Insulating Material of Enameled Wire” Proc. 2014 ISEIM (朱鷺メッセ、新潟, June 1-5, 2014)

K. Takizawa, T. Suetsugu, H. Moiyake, Y. Tanaka: “Space Charge Behavior in Covering Insulating Material for Motor Windings under Applied Voltage of Square Wave”, Proc. 2014 ISEIM (朱鷺メッセ、新潟, June 1-5, 2014)

K. Kumaoka, T. Kato, H. Miyake, Y. Tanaka: “Development of Space Charge Measurement System with High Positional Resolution using Pulsed Electro acoustic Method”, Proc. 2014 ISEIM (朱鷺メッセ、新潟, June 1-5, 2014)

熊岡、加藤、三宅、田中 ; 「空間電荷分布測定の高位置分解能化のための改良」、H26 電気学会全国大会 (2014.3.18-20, 愛媛大学、愛媛)

松原、川野、三宅、田中 ; 「高温・直流高電界下における積層ポリイミドフィルム中の絶縁破壊時の空間電荷挙動」、H26 電気学会全国大会 (2014.3.18-20, 愛媛大学、愛媛)

菅、水口、三宅、田中、前野 ; 「コロナ放電によりポリイミドフィルム内に形成する空間電荷に関する研究」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料 (2013.12.11, ルーテル市ヶ谷センター、東京)

阿部、直海、三宅、田中、前野 ; 「エナメル線の絶縁材料中に蓄積する空間電荷分布の測定」、第44回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集 219-221 (2013.11.25-27 穂の国とよはし芸術劇場 PLAT、愛知)

瀧沢、末次、前田、三宅、田中 ; 「モータ巻線被覆材料中に蓄積する空間電荷とコロナ放電の関係」、第44回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集 207-209 (2013.11.25-27 穂の国とよはし芸術劇場 PLAT、愛知)

T. Kato, T. Mori, H. Miyake, Y. Tanaka: “Investigation of the Breakdown Characteristic of LDPE including Cumylalcohol under DC High Electric Field”, 2013 Annu. Rep. CEIDP (Shenzhen, China, Oct. 20-23, 2013)

T. Kan, K. Abe, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Maeno: “The Influence of Corona Discharge on Space Charge Accumulation in Polyimide Film”, 2013 Annu. Rep. CEIDP (Shenzhen, China, Oct. 20-23,

2013 )  
瀧沢、末次、三宅、田中 ; 「繰り返し電圧印加時におけるモータ巻線被覆材料中の空間電荷挙動」、H25 電気学会 A 部門大会予稿集 477 (2013.9.12-13 横浜国大、神奈川)

- ② S. Kawano, K. Ishikawa, H. Miyake, Y. Tanaka: “Space Charge Accumulation Characteristics in Multilayered Polyimide Films under DC High Stress”, Proc. 11th ICSD, 393-396 (Bologna, Italy, June 30 - July 4, 2013)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 康寛 (TANAKA Yasuhiro)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号 : 3 0 2 2 7 1 8 6