

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656193

研究課題名(和文)放電・材料相互作用統合モデリングによる革新的ナノコンポジット材料の創製

研究課題名(英文)Creation of advanced nano-composite materials by studying interaction between discharges and materials

研究代表者

永田 正義(Nagata, Masayoshi)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00192237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ナノコンポジット材料と放電との相互作用の解明により、極限環境下において優れた耐サージ絶縁特性をもつ次世代ナノコンポジットモータ巻線の創製を目的としている。本研究ではモータ巻線を模擬したツイストペアサンプルに対し、湿度、圧力などの環境因子が変化する条件下で繰り返しインパルス電圧を印加し、放電開始電圧の計測と分光法による電界強度計測を行い、部分放電現象の解明を行った。また、ナノコンポジット巻線の性能はナノ粒子の分散状態に依存している。今回の研究において、大型放射光施設(Spring-8)を利用してナノ粒子充填率に対する分散状態を精密構造解析をおこない、最適な充填率があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this reserach is that by studying interaction between discharge and materials, we will create the nanocomposite enameled wires with superior partial discharge resistance that come into practical use as next-generation magnet wires. In the experiments, we have investigated partial discharge phenomenon that occurs across the gap by measuring the electric field strength and also the partial discharge inception voltage (PDIV) determined by surrounding environment factors such as humidity and air pressure when an impulse voltage is applied to a twisted-pair sample imitating coil windings. The life of a nanocomposite enameled wire depends on a good dispersion state of nano-filler that provides effective surge resistance. We have investigated the dispersion state as a fuction of the filling rate by using the world's largest synchrotron radiation facility (Spring-8) and found the optimum filling rate.

研究分野：プラズマ放電

キーワード：ナノコンポジット材料 部分放電 インバータ駆動モータ 耐サージ線 大型放射光分析

1. 研究開始当初の背景

2011年3.11の福島原発事故によって、日本のエネルギー政策、経済社会政策を決める上で、歴史的な転換期が到来した。電力不足と危機が叫ばれる中、今の社会生活を維持し、経済成長を実現し、原子力依存を減らしながら、長期的なエネルギー政策の実現が求められている。国内の電力消費の50%がモータによる消費であり、1%の効率アップで原子力発電所1基分の電力削減が可能と言われている。一方、原発に依存しないスマートな低エネルギー電力社会の構築を可能にするパワーエレクトロニクス技術が近年急速に発展している。現在、パワーエレクトロニクス技術を使った省エネに優れたインバータ駆動モータが電気製品や産業機器用モータだけでなく、ハイブリッドカー(HEV)や電気自動車(EV)、航空機および風力発電等々の幅広い市場で開発・実用化され急速に生産が拡大している。しかしながら、インバータから発生する立ち上がりが急峻な高いサージ電圧によるモータの絶縁破壊のトラブルが頻繁に起きており、その対策が大きな課題となっている。その事故要因は様々な環境要因の変化で発生する部分放電がモータの絶縁劣化を引き起こすためである。インバータサージと放電現象に関する研究としては、インパルス電圧により発生する部分放電の高精度計測技術の開発が国内外で広く展開されている。研究代表者は、電気学会「繰り返しインパルスにおける部分放電計測」及び、「先端複合ポリマーナノコンポジット誘電体の応用技術」の調査専門委員会の委員(報告書記載時点では、その後設置された「インバータ駆動モータコイルの絶縁評価法の調査専門委員会」の委員長、および「進化するテララメイドコンポジット絶縁材料」の委員)であり、最新のナノテクノロジーを用いて開発されたナノコンポジットエナメル線の課電長寿命メカニズムの解明ならびに周囲環境(温度、湿度)に対する部分放電特性の依存性を詳細に研究して来た。印加電圧の周波数・波形によってもその依存性が変化することが明らかになりつつあり、原子・分子過程およびプラズマ・固体相互作用まで考慮した総合的なモデル化が重要となっている。一方、ナノコンポジットの材料物性に関して国内外で多くの報告があるが統一的な見解を得るには至っていないのが現状であり、特に放電物理および固体物性両面からの研究アプローチは未開拓の研究領域である。本研究はこのような背景により研究を遂行した。

2. 研究の目的

本研究では、原子・分子過程を含んだ複雑な非熱平衡プラズマ放電機構やスパッタリングや2次電子放出に代表される放電と固体材料との相互作用を統合モデル化し、高精度に未来予測できる放電・誘電体絶縁材料物理の体系化を行い(パラダイムシフト)、ロー

テク技術の学問分野からのイノベーションを図る。また、得られた知見は次世代パワーエレクトロニクス機器の開発に活用する。具体的には、様々な環境下での部分放電特性の解明、とSpring-8放射光によるナノレベル超高分解材料分析を行い、ナノコンポジットモータ巻線の分散特性の解明とそれによる極限環境下での超耐インバータ巻線の創製を目的とする。その成果を、今後益々注目される電気自動車等のインバータ駆動モータへ適応し、その高性能化を実現することを最終目標としている。

3. 研究の方法

(1) 繰り返しインパルス電圧印加での部分放電特性評価：モータ巻線を模擬したツイストペアサンプルに対し、様々な環境下でインパルス電圧を印加し、放電開始電圧の計測、V-t劣化試験、放電発光スペクトルの観測による電界強度計測、放電機構としての原子・分子過程の解明を行った。具体的には周囲環境因子としての湿度、圧力に対する部分放電開始電圧の依存性、およびナノ粒子の影響について調査した。

(2) ナノコンポジット材料の放射光分析：ナノ粒子の分散状態はナノコンポジット材料の誘電・表面特性を決定する上で重要な役割を果たしていると考えられている。ナノ粒子分散状態を高精度に測定するために、大型放射光Spring-8(兵庫県は専用ビームラインを保有)を利用を計画した。本研究では、放射光施設に隣接する地元企業、電線メーカーの協力を得ながら、ナノ粒子充填率および分散状態を放射光による精密構造解析により評価した。

4. 研究成果

モータ巻線で発生する部分放電は様々な環境因子でその特性が変化する。その全体像を図1に示す。本研究では、重要ないくつかの決定因子に対する部分放電開始電圧を計測することで、その特性を明らかにした。

1. 様々な環境下での部分放電特性の評価

A) 空気圧力と湿度に対する部分放電開始電圧(PDIV)の依存性

エナメル線をより合せたツイストペア試料に対して、単極性の繰り返しインパルス電源((株)電子制御国際社製)を用いて電圧印加を行い、部分放電開始電圧を電磁波センサーと光電子増倍管を用いて計測した。実験で用いた装置概要を図2に、結果を図3に示した。乾燥空気・バブリング空気共に、ガス圧が低くなるにつれてPDIVは低下していく。バブリング空気下ではPDIVが低下する理由としては、水分量の増加による空気の絶縁破壊強度の低下、エナメル線皮膜の吸湿による誘電率の上昇などが考えられる。ガス圧特性については、ガス圧の低下に伴い、空気分子の衝突間の平均自由行程が大きくなるためであると考えられる。この結果から、標高

3000m 以上級の高山では気圧が低下するため、電気自動車等の運転時にはモータの部分放電が発生し、絶縁破壊故障の可能性がでてくるといえる。

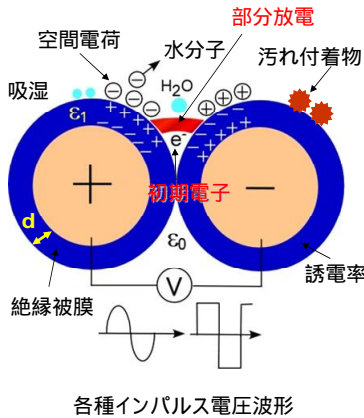


図 1 様々な環境要因が影響するツイストペア間の部分放電特性

B)インパルス印加電圧波形と湿度に対する部分放電開始電圧 (PDIV) の依存性

2本のエナメル線をより合わせたツイストペア試料を用いて、インパルス電圧波形のパルス幅を変化させて、電磁波センサーを用いて PDIV の計測を行った。インパルス電圧は同じ電圧値のパルスを 10 発出力した後、10V ずつ昇圧し、その後 2.5 kV から 10 V ずつ降圧する設定とした。ここで、電圧昇圧時に 10 発の印加電圧パルスのうち 5 発および 10 発の部分放電が発生する電圧を RPDIV、初めて部分放電が発生する電圧を PDIV と定義する。図 4 にその結果を示す。この時、相対湿度 40% (a) と 90% (b) で比較した。この結果から、

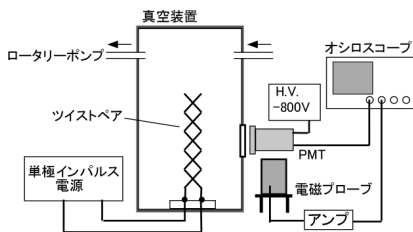


図 2 実験装置配置図

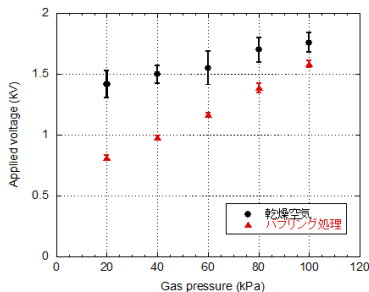


図 3 実験結果

パルス幅が増大するにつれて、RPDIV は減少するが、PDIV は大きく変化しないことがわかった。また、湿度の増大によって、RPDIV と PDIV は大幅に減少し、パルス幅に対する依存性が顕著でなくなった。雲の上の湿度の高い環境下で稼動する場合が多い風力発電機では、部分放電発生による絶縁破壊の劣化故障に注意しなければならない。

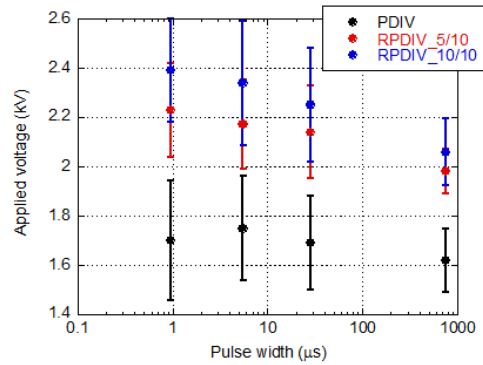


図 4 (a) PDIV と RPDIV のパルス幅特性 (湿度 40%)

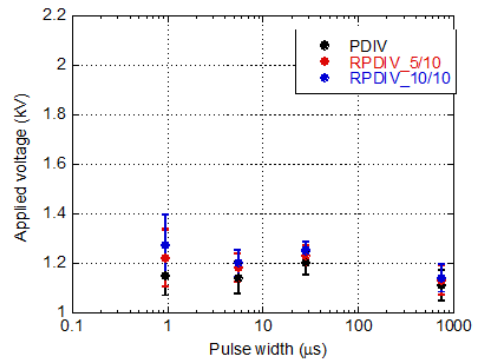


図 4 (b) PDIV と RPDIV のパルス幅特性 (湿度 90%)

C) ナノコンポジットエナメル線の耐サージ特性

これまでの実験において、モータ巻線を模擬した 2本のナノコンポジットエナメル線をより合わせたツイストペアを用いて V-t 課電寿命試験を行い、汎用線に比べて 100 倍以上長寿命であることを明らかにされている。ナノコンポジット線の優れた耐サージ特性の要因を明らかにするために、課電劣化過程における部分放電開始電圧 (PDIV) と分光法による PD 発生空間の電界強度の変化を調べ、表面に析出するナノ粒子との相互関係について調べた。試料は 2本の耐サージ線をより合わせたツイストペア試料を用いた。V-t 試験および分光計測装置の概要を図 5 に示す。V-t 試験では周波数 100kHz の正弦波の電圧 (1.4kV) を印加した。

図 6 に V-t 試験の課電時間に対する PDIV と RPDIV 特性を示す。課電 1 時間までの間に両者共に急速に減少し、それ以降 5 時間程度まではほぼ一定値を示している。なお、この

課電試験における耐サージ線の平均寿命は約 15 時間である

次に、ツイストペアの1ギャップ間の部分放電空間から発光している窒素イオンの第一負帯 (391.5nm) と窒素分子の第二正帯 (337.4nm) の各スペクトル線の強度比を分光測定し、換算電界強度に評価した結果を図7に示す。図6の結果と同様に PD 開始後約 1 時間までの間に換算電界強度は急速に減少し、それ以降約 400Td とほぼ一定の値をとることがわかった。課電約 1 時間後には、エナメル線表面に充填ナノ粒子である白い析出物が明瞭に確認されることから、ナノ粒子の析出が長寿命化の優れた耐劣化特性を示し、空隙間の実効的な電界強度にも影響していることがわかった(図8参照)。

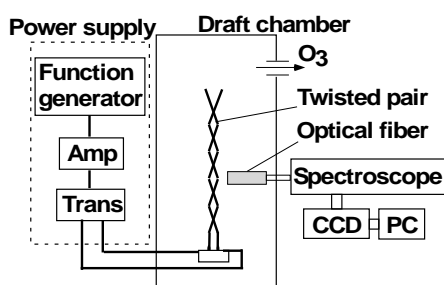


図5 実験装置図

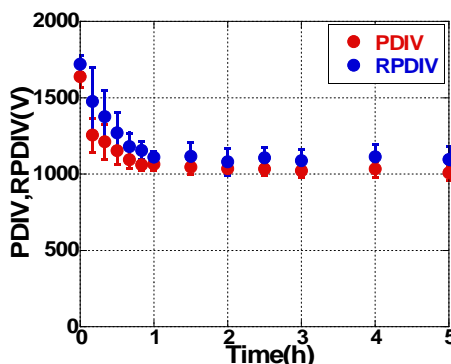


図6 V-t 課電劣化試験でのPDIV,RPDIの変化実験結果

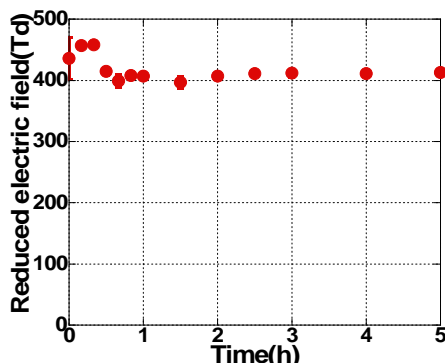


図7 V-t 課電劣化試験での分光計測による電界強度の変化

2. ナノ粒子の分散特性の評価

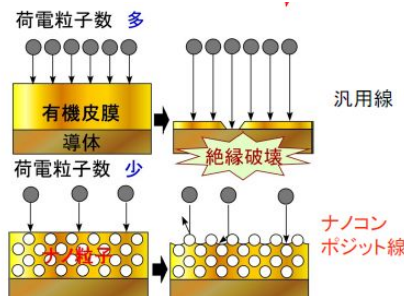
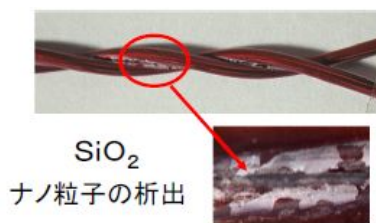


図8 部分放電によるナノ粒子の析出と巻線絶縁皮膜の放電劣化抑制効果

兵庫県立大学産学連携機構放射光ナノテクセンターが管理運営する Spring-8 大型放射光施設、兵庫県ビームライン BL08B2 の小角X線散乱(SAXS)測定により、ナノコンポジットエナメル巻線のエポキシポリマー材料に充填されるシリカナノ粒子のサイズや含有率を変化させたときの分散状態を分析評価した。試料として、充填なし以外に、充填率 0.5 phr、10 phr、25 phr、28 phr、30 phr、35 phr の6種類のフィルム状ナノコンポジット材料を使用した。図9は装置設置図であり、0.5 phr 充填率についての分析から粒子径が 16.9 nm であることがわかった。図10に示す構造因子 $S(q)$ の散乱曲線で一次ピークが明確に見られるのは 10 phr だけであり、それ以上の濃度では粒子同士の秩序性が低いことがわかった。28 phr 以上ではフィルラが詰まりすぎて散乱に寄与するコントラストが変化していることが予想される。

今回の計測により、最適な充填率を見出すことができたが、フィルラ充填率に対する分散状態の変化の詳細について明確な結論を得るまでには至らなかった。

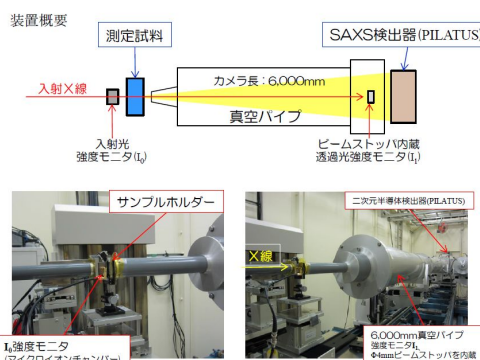


図9 Spring 8 放射光施設での小角X線散乱(SAXS)測定

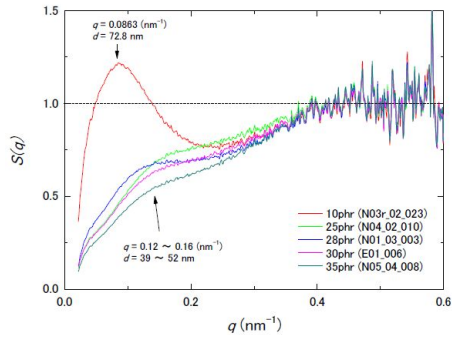


図 10 構造因子 $S(q)$ 曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) 菊池祐介、福田有貴、永田正義、池上知己、櫻井孝幸、吉満哲夫：繰り返しインパルス電圧における部分放電開始電圧の湿度特性と前課電効果、電気学会論文誌 A, Vol. 135, No. 3, pp. 168-174 (2015). (査読有)
- 2) 津田敏宏、山田慎一郎、筒井宏次、櫻井孝幸、池上知己、吉満哲夫、廣島聡、広瀬達也、宮前公準、菊池祐介、永田正義：低圧乱巻モータへの耐サージ線適用に関する検討、電気学会論文誌 A, Vol. 132, No. 12, pp. 1132-1139 (2012). (査読有)

〔学会発表〕(計 7 件)

- 1) 安本雄祐、永田正義、菊池祐介：耐サージエナメル巻線の課電寿命試験における部分放電劣化進行過程の分光電界強度測定、平成 27 年電気学会全国大会講演論文集、東京都市大学世田谷キャンパス、東京都世田谷区、平成 27 年 3 月 24 - 26 日、Vol. 1, p.158 (2015).
- 2) 山下尚史、菊池祐介、永田正義、宮崎光：繰り返しインパルス電圧下のモータコイル巻線における部分放電特性、平成 26 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演予稿集、信州大学、長野県長野市、平成 26 年 8 月 21 - 22 日、p.129 (2014).
- 3) 山下尚史、菊池祐介、福本直之、永田正義：繰り返しインパルス電圧下の部分放電開始電圧の電圧波形依存性、平成 26 年電気学会全国大会講演論文集、愛媛大学城北キャンパス、愛媛県松山市、平成 26 年 3 月 18 - 20 日 Vol. 2, p.56 (2014).
- 4) 山下尚史、菊池祐介、福本直之、永田正義：繰り返しインパルス電圧下の部分放電開始電圧の湿度特性、平成 25 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演予稿集、横浜国立大学、神奈川県横浜市保土ヶ谷区、平成 25 年 9 月 12 - 13 日、p.414 (2013).
- 5) 福田有貴、菊池祐介、福本直之、永田正義、池上知己、櫻井孝幸、吉満哲夫：エナメル線における繰り返しインパルス部分放電開始電圧と表面電位計測、平成 25 年電気学

会全国大会講演論文集、名古屋大学東山キャンパス、愛知県名古屋市千種区、平成 25 年 3 月 20-22 日、Vol.2, p.71 (2013).

6) 福田有貴、菊池祐介、福本直之、永田正義、吉満哲夫、小川宏之、櫻井孝幸：繰り返しインパルス電圧下の部分放電開始電圧に与える前課電効果、平成 24 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演予稿集、秋田大学手形キャンパス、秋田県秋田市、平成 24 年 9 月 20-21 日、p.274 (2012).

7) 宮前公準、福田有貴、菊池祐介、福本直之、永田正義、山田慎一郎、小川宏之、櫻井孝幸、吉満哲夫：ツイストペアの両極性繰り返しインパルス RPDIV に与える前課電の影響、平成 24 年電気学会全国大会講演論文集、広島工業大学五日市キャンパス、広島県五日市、平成 24 年 3 月 21-23 日、p.97 (2012).

〔図書〕(計 1 件)

- 1) 永田正義 分担執筆
ナノテク材料 (電気学会出版) 2.2 章、pp. 31-44 (2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 正義 (NAGATA MASAYOSHI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00192237

(2) 研究分担者

福本 直之 (FUKUMOTO NAUYUKI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90275305
菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00433326