

高繰返しインパルス電圧印加によるエナメル線ツイストペアからの 部分放電とオゾンの発生特性

正員 金澤 誠司* 正員 榎園 正人* 非会員 柴北 俊英**
正員 梅原 英嗣** 非会員 利光 淳** 非会員 二宮 信治***
非会員 谷口 秀樹*** 非会員 安部ゆかり***

Characteristics of Partial Discharge and Ozone Generation for Twisted-pair of Enameled Wires under High-repetitive Impulse Voltage Application

Seiji Kanazawa*, Member, Masato Enokizono*, Member, Toshihide Shibakita**, Non-member,
Eiji Umehara**, Member, Jun Toshimitsu**, Non-member, Shinji Ninomiya***, Non-member,
Hideki Taniguchi***, Non-member, Yukari Abe***, Non-member

(2011年8月24日受付, 2011年12月8日再受付)

In recent years, inverter drive machines such as a hybrid vehicle and an electric vehicle are operated under high voltage pulse with high repetition rate. In this case, inverter surge is generated and affected the machine operation. Especially, the enameled wire of a motor is deteriorated due to the partial discharge (PD) and finally breakdown of the wire will occur. In order to investigate a PD on a resistant enameled wire, characteristics of PD in the twisted pair sample under bipolar repetitive impulse voltages are investigated experimentally. The relationship between the applied voltage and discharge current was measured at PD inception and extinction, and we estimated the repetitive PD inception and extinction voltages experimentally. The corresponding optical emission of the discharge was also observed by using an ICCD camera. Furthermore, ozone concentration due to the discharge was measured during the life-time test of the resistant enameled wires from a working environmental point of view.

キーワード : 部分放電, インバータサージ, モータ, エナメル線, ツイストペア, ICCD イメージング

Keywords : partial discharge, inverter surge, motor, enameled wire, twisted pair, ICCD imaging

1. はじめに

近年, ハイブリッド車や電気自動車では, インバータによるモータの駆動が行われており, その駆動電圧が高電圧化する傾向にある。この場合, インバータ回路とモータ間のインピーダンスの不整合によるサージ電圧の発生が問題となっている⁽¹⁾。駆動電圧が高電圧化するとインバータサー

ジによりモータ巻線で部分放電が生じ, それが継続するとモータの故障に繋がる⁽²⁾。この現象を検証するために巻線に用いられるエナメル線のツイストペアに模擬インバータサージを印加して発生する部分放電の評価が進められている⁽³⁾。これまで放電の発生電圧や破壊までの寿命に着目した研究が精力的に行われてきた^{(4)~(9)}。とりわけ, 部分放電開始電圧の評価は, 印加できる電圧の上限を決定するために重要であることから, その試験方法の確立が慎重に行われている⁽¹¹⁾。

一方, 放電現象として見ると, 2本のエナメル線を撚り合わせて作られるツイストペアでの放電は, くさび状の特異なギャップを有するバリア放電である。エナメル線の直径は1mm前後であり, それを2本接触させて撚り合わせることで形成されるギャップは微細で複雑な構造となる。そのためそこの放電の進展や空間分布および発光などの知見は, この放電の理解を深める上で重要な要素となる。また,

* 大分大学工学部電気電子工学科
〒870-1192 大分市旦野原 700
Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita University
700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

** (株) 西日本電線
〒870-0011 大分市春日浦
Nishi Nippon Electric Wire & Cable Co., Ltd.
Kasugaura, Oita 870-0011, Japan

*** 大分県産業科学技術センター
〒870-1117 大分市高江西 1-4361-10
Oita Industrial Research Institute
1-4361-10, Takaenishi, Oita 870-1117, Japan

最近ではツイストペアのような撚糸状の1次元の電極や平網構造の2次元の電極はマイクロプラズマを集積化する新しい電極構造⁽¹²⁾として注目されており、その放電発生形態を明らかにすることは重要である。

本論文では、まずエナメル線ツイストペアにおける部分放電の特徴をこれまでの報告結果をもとにまとめて整理する。次に本実験の方法を説明し、高繰返しのインパルス電圧印加条件下でツイストペア上に分布する微弱発光の代表的な放電状況を開始時、それよりもわずかに電圧を高くした定常状態およびそこから消滅までの過程について分析し、放電現象を考察する。特に今回は通常の観測ではノイズに埋もれて検出が難しい高繰返しインパルス電圧印加中の1回の放電による超微弱発光を観測した。さらに寿命試験を行う環境下では放電によるオゾンの発生も問題となるためその発生量の評価も実施した。

2. ツイストペアにおける部分放電の特徴

耐インバータサージ用のエナメル線は銅線表面にポリエステルイミドとシリカをナノコンポジット化してコーティングし、その上層にさらにポリアミドイミドをコーティングしたものが主流となっている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。したがって通常の誘電体バリア放電とは、誘電体の種類が異なること、電極構造としては2本のエナメル線が接した状態である点が異なる。ツイストペアにおける放電は主として接触していないエナメル間の空気層の部分とエナメル表面で発生する⁽⁹⁾。これまでの研究により次のような放電の特徴が報告されている。

(1) ツイストペアに繰返し印加されるインパルス電圧を徐々に上げていき放電の開始電圧に達した後は、電圧の増加とともに放電回数は増え、放電発光強度は強くなる。また、十分に放電している状態から、印加電圧を下げていくと上昇時と同じ電圧では、放電の発光強度は弱くなるが、放電回数は多く、部分放電の消滅電圧(PDEV)は開始電圧(PDIV)より低くなる傾向にある(ヒステリシス特性を示す)⁽⁴⁾。

(2) 部分放電開始電圧に対する測定環境の影響として、繰返しインパルス電圧を印加したもとの場合は、温度や大気圧にはあまり影響されないが、湿度に大きく依存し、相対湿度の増加とともに開始電圧は低下することが報告されている⁽¹⁰⁾。電源周波数60Hzの交流電圧印加の条件下では、低温(30℃)においては湿度の増加とともに部分放電開始電圧は低下する。一方、高温(80℃)雰囲気では湿度の増加とともに部分放電開始電圧は若干増加する傾向にある。低温では水分がエナメル線表面に付着し、放電開始電圧の低下をもたらすが、高温下では、逆に、放電の種となる電子を水分が空間でトラップすることで、放電を抑制するためだと考えられている⁽⁸⁾。

(3) 測定上の問題点として、両極性の繰返しインパルス電圧による試験では、測定開始当初は部分放電開始電圧の変動が激しく、その後一定値に収束していく傾向にある。この原因としては、ツイストペアでは複数の放電発生箇所

が存在し、しかも放電が発生するとエナメル表面に電荷が残留し、この局所的な電荷が次の放電の発生を助長したり、抑制したりすることが、両極性の繰返しパルス電圧印加では起きやすいためと考えられている⁽⁵⁾。

(4) 部分放電の発光は微弱であるため光電子増倍管による放電光の検出やイメージインテンシファイアを接続したカメラで発光像の撮影が行われている。2本のエナメル線を1回撚った1ツイスト試料の放電1発分の発光像がPDIVの2倍以上の比較的強い放電に対して撮影されている⁽⁹⁾。印加電圧が上昇するとくさび状ギャップの外側の低電界領域まで放電が進展することが確認された。一方、放電開始後のPDIV付近での撮影では、放電初期にはツイストペアの全体で発光していたものが、繰返し試験回数とともに放電箇所の個数・場所ともランダムに変動し、最後には特定箇所に収束することが報告されている⁽⁴⁾。

このように、エナメル線のツイストペアにおける部分放電の特性には、印加する電圧の波形、繰返し周波数、またパルスの場合には立上り・立下り時間、単極性・両極性の別、同一極性パルス数などの印加電圧の条件と、温度・湿度の環境条件、ツイストペア試料のコンデショニングなどに影響を受け、多くの外部パラメータが存在する。特にツイストペア試料においては、部分放電は確率的要素を含み時間・空間的に変動するダイナミックな現象であることを考慮して、本研究では高繰返し放電を多数回積分するのではなく、1発の放電がどのような様相を示すかに焦点をあてて観測を行った。

3. 部分放電観測実験

〈3.1〉 実験装置 実験装置の概略図をFig.1に示す。試料となるエナメル線ツイストペアはJIS(C3003)で規定された方法で作製した。使用したエナメル線は市販の耐部分放電性を有するポリアミドイミドエナメル電線(銅線直径1.0mm, 被覆厚39μm)である。パルス高電圧発生器(パ

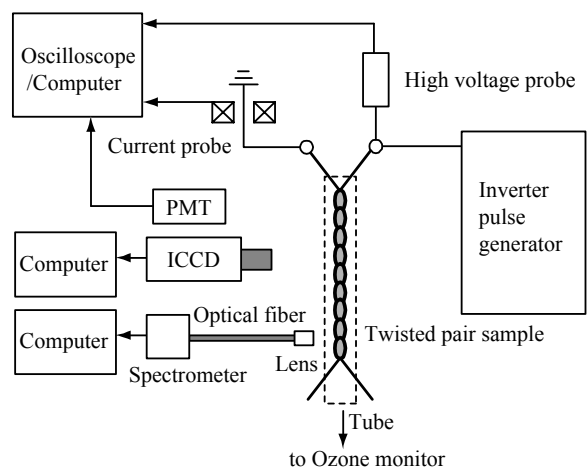


Fig. 1. Schematic of experimental setup for measuring partial discharge.

ルス電子技術 (株), PG-W05K-B) からの模擬サージ電圧を試料に印加し, そのときの部分放電発生特性を調べた。印加電圧は高電圧プローブ (Iwatsu, HV-P30) で, 電流は電流プローブ (CT, Pearson Electronics, 2877) で検出し, それぞれの波形はオシロスコープ (Iwatsu, DM-8000H, DM-900L) で測定した。装置は簡易暗室内に設置し, 放電による微弱な発光は, 光電子増倍管 (PMT, Hamamatsu, H5784-01) または ICCD カメラ (Hamamatsu, C10041-51, MCP2 段, 分光感度特性 185-850nm, UV レンズ A4869) で観測した。放電中のツイストペアから発生するオゾン量はオゾンモニター (Dylec, DY-1500) で測定した。

〈3・2〉 放電開始および消滅電圧の計測 部分放電の検出法には高周波 CT 法, 直列コンデンサを用いる残留電荷法, 光学的な方法, 電磁波測定法などがある⁽¹³⁾。なかでも高周波 CT 法は簡便な方法であり, モータなどにも取り付けられるため現場測定にも対応できる。ツイストペアにおける測定において, 急峻なサージ電圧の場合, 部分放電が開始する付近では放電電流に充電電流が大きく重畳するため, 部分放電の検出が難しくなることが報告されている⁽¹³⁾。この問題を解消するための手法として高周波 CT 差動法がある。通常はツイストペア試料とほぼ同じ容量をもつキャパ

シタを参照試料とするが, 本研究では Fig.2 に示すように 2 つのツイストペアを用いる高周波 CT 差動法を採用した⁽¹⁴⁾。2 つのツイストペアから接地へ流れる電流が逆向きになるよう CT に各エナメル線を通すことで部分放電だけを検出する。しかもどちらかの試料が確率的に放電開始する最小印加電圧での放電を検出することが可能となる。その測定精度を検証するためにシングルフォトンレベルの検出が可能である ICCD カメラを併用して, 繰返し部分放電開始電圧 (RPDIV) と消滅電圧 (RPDEV) を求めた。

〈3・3〉 くさび状放電領域の 3 次元観測 Fig.3 にツイストペアにおける放電の発生箇所と放電状態を観測するための配置を示す。2 枚の光学用ミラーを用いて, 試料の正面と左右の斜め後方からの状況を同時に観測することでツイストペア全領域からの放電を捉えることができる。さらに, 放電光をスペクトロメータ (Ocean Optics, USB2000) で分光して, 発光種の同定も行った。

4. 実験結果および考察

〈4・1〉 放電開始および消滅電圧 Fig.4 に模擬サージ電圧として正負交互に 1 発づつ発生する矩形波インパルス電圧 (電圧 1100V, 繰返し 10000pps (10kHz), パルス幅 10 μ s, 立上り・立下り 100ns, デューティファクタ 10%) を印加したときの印加電圧と通常の高周波電流 CT 法で観測した電流波形および放電光の PMT 信号を示す。この電圧 (放電開始電圧の約 1.1 倍) では正負パルス電圧の立上りでのみ放電が起きている。さらに電圧を増加させるとパルス電圧の立下りでも放電が発生する。本実験では Fig.4 に示す電圧波形と同じ条件で以後の実験も実施した。

次に, 部分放電開始時のツイストペアの放電について観測結果を示す。測定開始当初は部分放電開始電圧の変動が激しく, その後一定値に収束していく傾向にあるため⁽⁵⁾, バージン試料は十分なコンデショニングを行って観測を実施

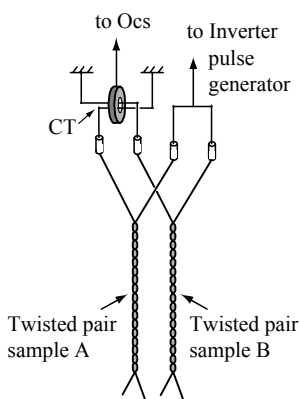


Fig. 2. Schematic of RPDIV/RPDEV measurement circuit using a high frequency CT differential method.

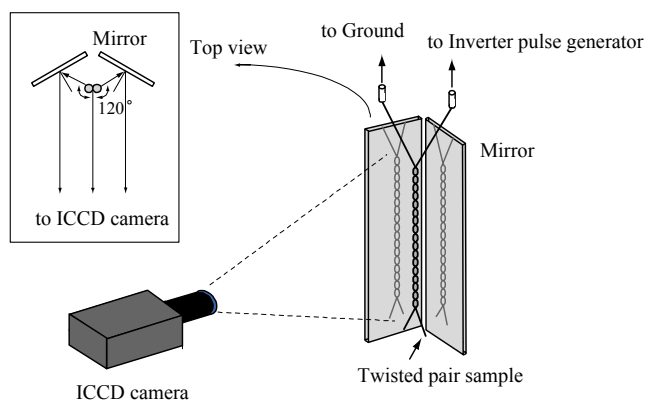


Fig. 3. PD observation system using the ICCD camera.

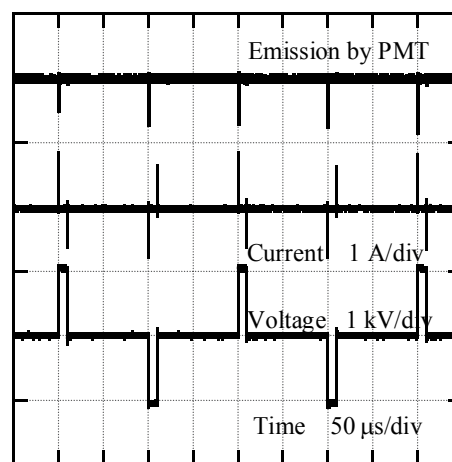


Fig. 4. Applied voltage and current waveforms with PMT signals under the partial discharge generating condition (26°C, 55%).

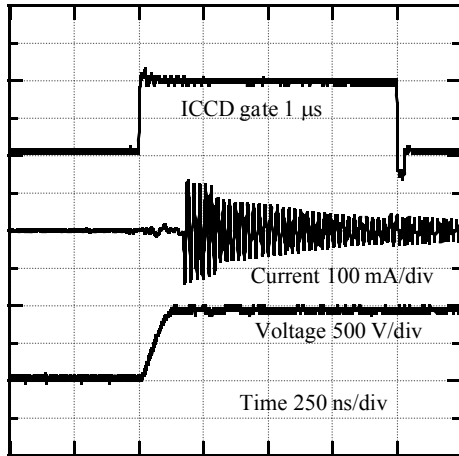
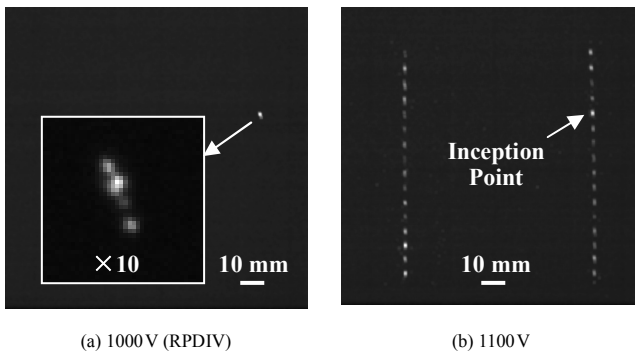


Fig. 5. Relationship between the applied voltage and partial discharge generating signal (26°C, 50%).



(a) 1000 V (RPDIV) (b) 1100 V
Fig. 6. Images of partial discharges for two twisted pair samples observed by the ICCD camera (26°C, 50%).

した。本実験の場合、印加するパルス電圧の繰返しが高いため数分間放電を行うことで安定な状態に落ち着いた。

Fig.5 は部分放電開始時の印加電圧と高周波 CT 差動法で検出した電流の波形である。電圧の立上りに現れる充電電流 (Fig.7 参照) が相殺されて観測されなくなり、部分放電が発生すると図のような電流波形が観測される。これに対応する放電発生の様子を Fig.6(a)に示す。ICCD カメラのゲートは 1 μ s に設定 (Fig.5) されており、シングルショットの撮影による一発の放電の発光である。このレベルの放電はマイクロチャンネルプレート (MCP) が 1 段の ICCD カメラでは検出が難しかった。また、10 倍に拡大したものを図中に示す。放電はくさび状のギャップに沿って放電している。Fig.6(b)は 2 つのツイストペアの位置関係を示すために放電開始電圧の約 1.1 倍の電圧を印加したときの放電状態である。このようにエナメル線ツイストペアの全領域を撮影した場合には、放電部分を見やすくするために実際の撮影画像に画像処理を施して放電を強調して示す。同図(b)で比較的強く発光している放電部が同図(a)の放電開始した箇所に相当する。

差動法では 2 つのツイストペアのうちどちらか一方の最

も放電しやすい箇所が生じる放電を検出するため放電発生箇所も Fig.6(a)のように 1 カ所であるが、パルス幅 10 μ s の電圧が印加されている間に他の場所で別の放電が発生することもあった。その場合には放電の電流波形が複数観測された。さらに仮に放電が同時に起きるような場合でも ICCD カメラによる観測と併用する本手法では、放電の場所とその強度を識別できるため、最も放電しやすい箇所 (弱点部分) を特定できる。

繰返しインパルス電圧による部分放電計測法を規定する IEC TS 61934⁽¹⁵⁾では、RPDIV とは部分放電発生回数が 50% 以上となる最小電圧として定義されている。本実験で使用した ICCD カメラのフレームレートは 28Hz であり、1 秒あたりに 10000 回電圧印加されて起きる放電からサンプリングして観測していることになる。ICCD カメラの画像を表示するコンピュータのディスプレイ上では通常のビデオカメラと同様に部分放電の開始・消滅の様子をリアルタイムで観測していることになり、その画像をモニターすることで放電箇所を特定しながら RPDIV や RPDEV の値を測定できる。本実験の条件下では、RPDIV に関しては放電発生回数が 0% から 100% へ、ほぼその間の放電確率を取ることなく変化した。気温 25°C、相対湿度 37% の環境下での、RPDIV は平均で 998 V (標準偏差 S.D. 22 V)、RPDEV は平均で 948 V (S.D. 23 V) であった。

〈4・2〉 部分放電の発生状況 前節では RPDIV や RPDEV を決定する上で有効な高周波 CT 差動法と ICCD カメラによる直接観測の併用による結果を紹介したが、部分放電の時間推移に対する変化や複雑な電極構造による放電発生部の変化を追跡するには Fig.3 の 3 次元観測手法を適用するのが有利である。Fig.7(a)は部分放電が開始した直後の印加電圧と電流波形の関係を示し、さらに放電光を PMT で検出した信号およびこの放電を撮影する ICCD カメラのゲート (1 μ s に設定) を示している。その時の放電の様子が Fig.7(b)であり、エナメル線ツイストペアからの発光の分布を示したものが Fig.7(c)である。放電は電流波形の二番目のピークで発生している (同図には部分放電開始前の電圧と電流である充電電流の波形も示す: 黒色の線)。試料のツイストペア線が形成する 17 カ所のくさび状のギャップのうち正面から観測した場合には 13 カ所で放電していることがわかる。また Fig.7(b)の左右の列からの発光はツイストペアの左右の斜め後方からの放電光を示す。正面で放電していない箇所において後ろ側では放電しているところがあることがわかる。このような画像をたくさん分析したところ、放電が開始や消滅する付近ではすべてのくさび状のギャップ部分で放電が起きることはなく、そのうちの数カ所で放電が発生する。さらに印加電圧を上げていき、RPDIV の 1.1 倍以上になると、くさび状のギャップ部分のほとんどすべてから放電が発生した。また、場所によって放電回数や放電の強度にバラツキがあり、長時間放電すると放電が強い所が破壊へ繋がると思われる。

ツイストペアの一つのくさび状部分での放電を拡大して

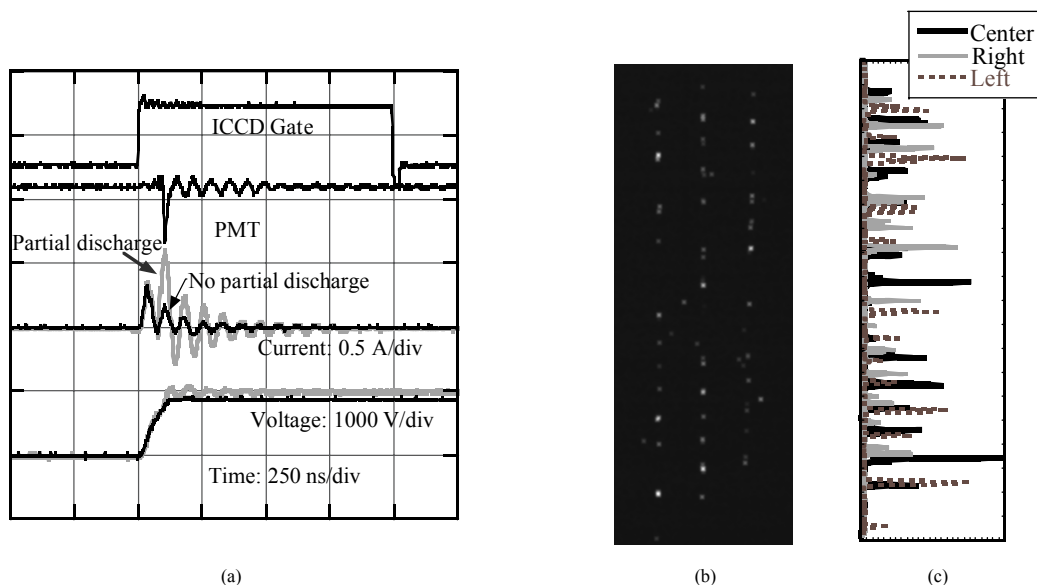


Fig. 7. Typical feature of the partial discharge: (a) applied voltage and current waveforms before inception at 906 V and after inception at 1031 V, (b) discharge luminescence corresponding to the figure (a) at 1031 V and those profiles along the twisted pair sample (23°C, 30%).

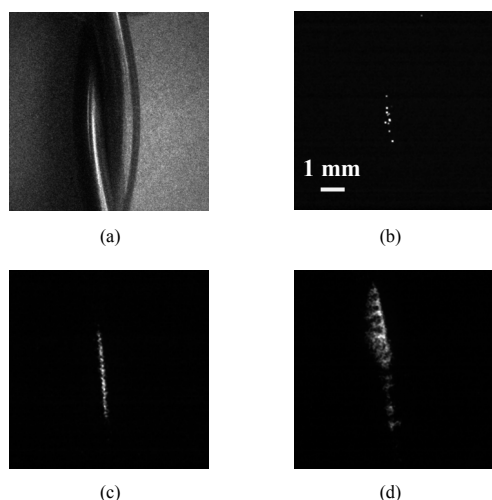


Fig. 8. ICCD images of (a) wedge-shape part of the twisted pair sample and discharge luminescence by a single discharge at (b) 1000 V (inception), (c) 1250 V, and (d) 2188 V (ICCD gate time = 200ns, single shot, 23°C, 30%).

観測した結果を Fig.8 に示す。Fig.8(b)は放電開始時であり、点状の光点 (大きさは約 40~60 μm) が分布しているのみである。電圧を上げると多数の点状の光点が膜状に分布 (Fig.8(c)) し、RPDIV の 2 倍以上になると接する 2 本のエナメル線の形成するギャップをフィラメント状に進展する気中放電が重畳している (Fig.8(d))。空気中のパッシェン曲線との関係で決定される開始電圧における放電ギャップ長は約 30 μm ⁽⁸⁾であり、個々の点状の光点の大きさは放電開始するギャップ長に対応しているようである。Fig.7 の電流波形からも放電はナノ秒オーダーの極めて高速な現象であるこ

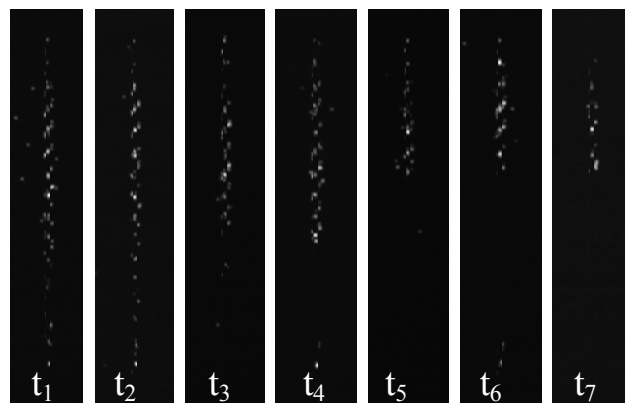
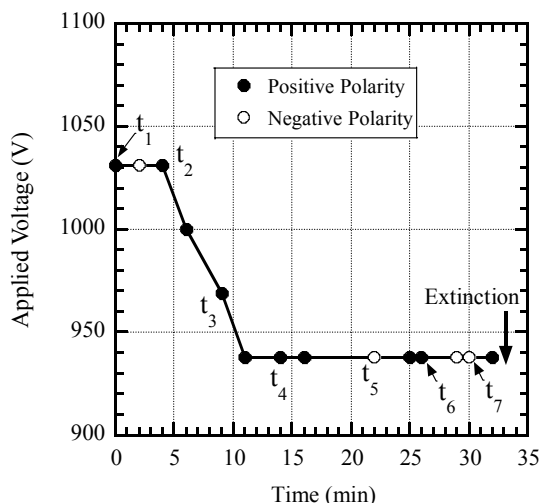
とがわかる。

さらに、放電開始後の定常状態から徐々に電圧を RPDEV (938 V) 付近まで下げて状況を観測した結果を Fig.9 に示す。Fig.9(a)は印加電圧の時間変化を、Fig.9(b)はその各観測時刻でのツイストペアにおける放電状況を Fig.7(b)で示したように 3 方向から取得し、その画像を合成してツイストペアを一周して見た状況を示している。放電しているところでは、螺旋状に繋がるくさび状の放電空間に沿って発光が現れている様子が見える。時間が経過するとランダムに分布していた放電箇所が下の方から次第に消えていく様子も伺える。消滅する前は上部の数か所で放電している状況にあった。時間経過により放電が消滅する現象はこれまで観測されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。放電の消滅の原因としてはエナメル線に蓄積する電荷により放電が抑制されたことが考えられる。また、放電の残留は局所的な絶縁抵抗の減少や弱点部分の形成さらには電源と試料が形成する回路的な要素も影響していると思われる。

部分放電の発生と消滅のこのような傾向は、再現性よく観測された。

〈4・3〉 寿命試験環境下での放電特性

開始電圧・消滅電圧近傍での放電は通常目視で観測することは難しい。暗室の下では印加電圧が RPDIV の約 1.3 倍以上になると放電しているのがわかるようになる。さらに電圧を増加させるとツイストペアのくさび状部分から青紫色の発光が観測できる。Fig.10 はその発光スペクトルを示す。分光に十分な光量を得るために印加電圧は RPDIV の約 2 倍の 2kV を印加した。発光は空気の主成分である窒素の 2nd Positive Band ($\text{C}^3\Pi_u \rightarrow \text{B}^2\Pi_g$) であり、青紫色に観測されるのは可視領域のスペクトルに起因する。放電雰囲気に含まれる酸素や水分にもとづく発光種は観測されなかった。



(a)

(b)

Fig. 9. Characteristics of partial discharge extinction: (a) applied voltage vs. operational time (b) spatial and temporal evolution of the discharge on the twisted pair sample (24°C, 35%, ICCD gate time = 1 μs, single shot).

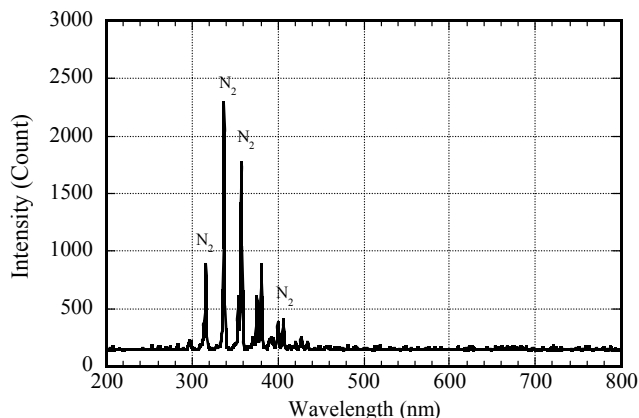


Fig. 10. Optical emission spectrum of the partial discharge in the twisted pair sample at 2kV (26°C, 43%).

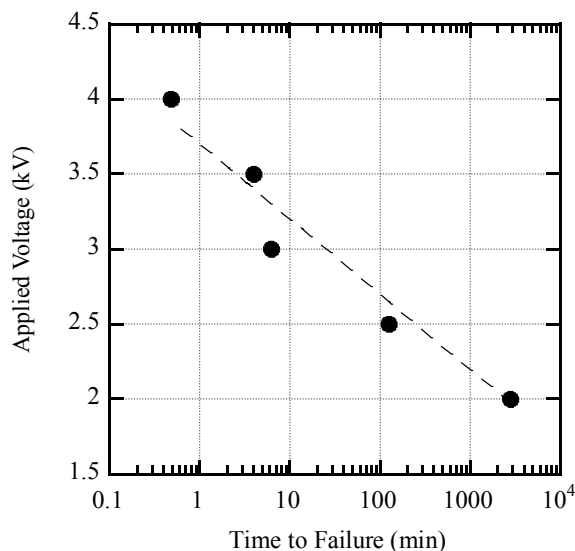


Fig. 11. Characteristics of the lifetime of enameled wires under impulse voltage application (25°C, 52%).

Fig.11 は今回使用したエナメル線の本実験条件 (両極性繰返しインパルス 10000pps) 下での破壊までの寿命特性 (V-t 試験) を示す。寿命は印加電圧が大きくなると急激に短くなる傾向にあるが、通常の従来品に比べて耐インバータサージ用のエナメル線の寿命は長い⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ことが確認された。

寿命特性試験では放電時間が数十時間以上にも及ぶことがある (Fig.11)。放電によりオゾン (O₃) が発生することはよく知られている。オゾンは有害なガスであるため、その発生特性を調べた。ツイストペアでは放電箇所が螺旋状に分布するため Fig.1 に示すようにツイストペアをチューブで覆い、オゾンモニターに発生したオゾンを引き込むようにして測定した。部分放電開始から印加電圧を増加させて測定したオゾン発生特性を Fig.12 に示す。各点でのオゾン濃度は、電圧設定後一定値に収束してから測定した値である。2.2kV 程度までは増加しているが、それ以上の電圧になると減少に転じ、3kV 以上では測定下限以下となった。オゾン生成反応 ($O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$, M は第 3 体で O₂ や N₂)

には温度が影響し、生成される領域のガス温度が増加すると反応が低下する⁽¹⁶⁾。この反応による生成経路以外でも温度が増加すると生成率は低下し、さらにオゾン分解反応も起きるため著しく減少することになる。エナメル線ツイストペアの一番外側の撚り合わせ部分近傍に光ファイバー式温度計 (Nortech, リフレックス 4) のセンサーを接触させてエナメル線の表面温度を測定したところ、印加電圧の増加とともに温度は上昇し、3kV では 100°C ほどもあった。放電部ではさらに気体温度が高くなっているものと予測される。このような機構により放電は印加電圧を上げるほど強くなるが、オゾン生成量は低下していくことがわかった。オゾンや活性酸素に長期暴露されることでエナメル線の劣化も懸念される。破壊した試料をエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) したところ破壊箇所以外でも絶縁耐力向上のた

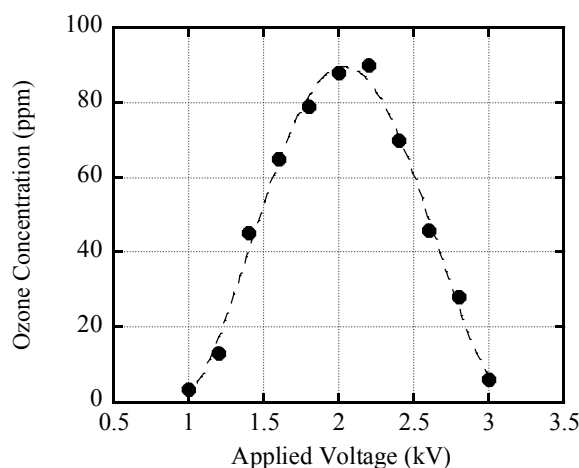


Fig. 12. Dependence of ozone generation on applied voltage (23°C, 38%).

めに分散されたシリカの露出が検出された。

一方、試験環境へのオゾンの影響としては、Fig.12に示した発生が最大となる2kVで試験を行っている簡易暗室内のオゾン量は1.7ppmの値が検出された。

5. おわりに

エナメル線ツイストペアに高繰り返しインパルス電圧を印加したときの放電特性について多角的な視点から観測を行った。部分放電の開始・消滅過程を測定するために新たに高周波CT差動法とICCDカメラを併用する方法を構築し、その有用性および信頼性について確認を行った。

ICCDカメラにより部分放電開始・消滅付近の放電発生状況を観測し、ツイストペア上の放電分布を調べた。放電開始直後および放電消滅直前におけるエナメル線ツイストペアの放電箇所は、螺旋状に展開するくさび状のギャップのすべてではなく、その一部であり、ツイストペアの中央、上部（電源側）およびその反対側の下部のいずれにも分布する様子が観測されたが、消滅前には主に電源に近い数か所に放電が偏在化する傾向にあった。さらに3次元画像としての再構築も行い、螺旋状に分布する放電領域の特徴を捉えた。本手法は耐インバータサージ用のエナメル線の開発において弱点部分の早期発見と解析および製品の品質管理に有効利用することが期待できる。

最後に寿命試験をする場合の放電状況について、エナメル線劣化への影響だけでなく試験環境にも影響を及ぼすオゾンの発生量について測定を行った。試験条件によっては環境基準(0.06ppm)を上回る場合があるので、効果的な排気やオゾン処理の必要性が認められた。

今後の課題としては、新たに開発する耐部分放電特性を有するエナメル線の寿命試験を含めた検討と実機に搭載した場合の検証を行うことである。

謝辞

本研究を始めるにあたり貴重なご助言をいただきました九州工業大学の匹田政幸教授に感謝いたします。

研究を遂行するにあたり埼玉大学名誉教授・大分大学客員教授の山田興治先生には機会あるごとに励ましを頂きました。大分県産業科学技術センターの柳明洋博士には有益なご討論を頂きました。大分大学大学院工学研究科の渡邊悟君には部分放電の測定にご協力頂きました。ここに記して、謝意を表します。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の大分県地域集約型研究開発プログラム「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」の補助により遂行されました。

文 献

- (1) 木村 健・匹田政幸:「インバータサージと国際規格」, 電学誌, Vol.126, No.7, pp.419-422 (2006-7)
- (2) 渋谷義一・武藤浩隆:「モータ内のサージ波形解析」, 電学誌, Vol.126, No.7, pp.423-426 (2006-7)
- (3) 「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」, 電気学会技術報告, No.1218, pp.29-38 (2011-4)
- (4) K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, Y. Iiyama, S. Ohtsuka, and M. Hikita: "Fluctuation of Partial Discharge Inception Voltage and Discharge Location of Twisted Pair Sample under Repetitive Impulse Voltage", Proc. of 2005 Inter. Symp. Elect. Insul. Materials, pp.176-179 (2005)
- (5) N. Hayakawa, M. Morikawa, and H. Okubo: "Partial Discharge Inception and Propagation Characteristics of Magnet Wire for Inverter-fed Motor under Surge Voltage Application", *IEEE Trans. Diele. & Elect. Insul.*, Vol.14, No.1, pp.39-45 (2007)
- (6) K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, and M. Hikita: "PDIV Characteristics of Twisted-Pair of Magnet Wires with Repetitive Impulse Voltage", *IEEE Trans. Diele. & Elect. Insul.*, Vol.14, No.3, pp.744-750 (2007)
- (7) K. Wada, Y. Awano, K. Tsuji, and H. Muto: "Characteristics of Partial Discharge Pulse Count Rate and Surge Voltage at Motor Terminal under Inverter Drive", *IEEJ Trans. FM*, Vol.127, No.10, pp.647-653 (2007-10) (in Japanese)
和田耕太郎・栗野悠平・辻 孝誠・武藤浩隆:「インバータ駆動下のモータ端子電圧と部分放電発生頻度特性」, 電学論A, Vol.127, No.10, pp.647-653 (2007-10)
- (8) K. Obata, R. Takeuchi, T. Shimozono, and H. Kikuchi: "Partial Discharge under Pulse Voltage with Narrow Pulse Width", *IEEJ Trans. FM*, Vol.128, No.4, pp.298-306 (2008-4) (in Japanese)
尾畑功治・武内良三・下藤忠弘・菊池英行:「幅の狭いパルス電圧下での部分放電特性」, 電学論A, Vol.128, No.4, pp.298-306 (2008-4)
- (9) Y. Kikuchi, T. Murata, Y. Uozumi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Wakimoto, and T. Yoshimitsu: "Effects of Ambient Humidity and Temperature on Partial Discharge Characteristics of Conventional and Nanocomposite Enameled Magnet Wires", *IEEE Trans. Diele. & Elect. Insul.*, Vol.15, No.6, pp.1617-1625 (2008)
- (10) N. Hayakawa, H. Inano, Y. Nakamura, and H. Okubo: "Time Variation of Partial Discharge Activity Leading to Breakdown of Magnet Wire under Repetitive Surge Voltage Application", *IEEE Trans. Diele. & Elect. Insul.*, Vol.15, No.6, pp.1701-1706 (2008)
- (11) Y. Murakami, K. Kimura, M. Hikita, N. Hayakawa, M. Nagata, and K. Kadowaki: "First Round-Robin Test for Measurement of Partial Discharge Inception Voltage under Repetitive Impulse Voltage", 2010 National Convention Record IEE Japan, Vol.1, pp.33-36 (2010) (in Japanese)
村上義信・木村 健・匹田政幸・早川直樹・永田正義・門脇一則:「繰返しインパルス電圧下における部分放電開始電圧測定の第1次共同実験」, 平成22年電気学会全国大会, Vol.1, pp.33-36 (2010)
- (12) O. Sakai and K. Tachibana: "Generations and applications of atmospheric pressure glow discharge by integration of microplasmas", *J. Phys., Conference Series*, Vol.86, 012015 (2007)
- (13) 菊池英行・鉄 芳之・糸永貞美:「省エネモータの信頼性向上に対応した耐インバータサージエナメル線」, 日立電線, No.21, pp.85-92 (2002-1)

- (14) 伊藤貴和・立松義伯：「インバータ用耐部分放電電線の開発」, 電学誌, Vol.126, No.7, pp.431-434 (2006-7)
- (15) 「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」, 電気学会技術報告, No.1218, pp.16-28 (2011-4)
- (16) E. Umehara, T. Shibakita, S. Kanazawa, and M. Enokizono : "Measurement of Partial Discharge Inception Voltage in Enameled Wires by using a High Frequency CT", Record of 2010 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, No.05-2P-06 (2010-9) (in Japanese)
梅原英嗣・柴北俊英・金澤誠司・榎園正人：「エナメル線ツイストペアの部分放電開始電圧の高周波 CT による測定」, 平成 22 年度電気関係学会九州支部連合大会, No.05-2P-06 (2010-9)
- (17) IEC TS 61934 : "Electrical insulating materials and systems – Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses" (2006-4)
- (18) U. Kogelschatz, B. Eliasson, and M. Hirth : "Ozone Generation from Oxygen and Air: Discharge Physics and Reaction", *Ozone Science & Engineering*, Vol.10, Issue 4, pp.367-377 (1988)

金澤誠司



(正員) 1961年12月7日生。1990年熊本大学大学院博士後期課程修了。大分大学工学部助手, 講師, 助教授を経て, 現在, 同大学准教授。学術博士。大気圧放電プラズマの生成とガス処理・水処理への応用, レーザ計測と機能性材料のプロセッシング, 静電気応用の研究に従事。静電気学会, 応用物理学会, 日本 AEM 学会, オゾン協会, IEEE, MRS 会員。

榎園正人



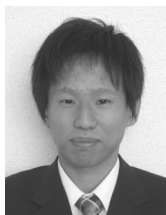
(正員) 1947年2月19日生。1979年1月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。1980年大分大学工学部助手, 1981年同講師, 1982年同助教授を経て, 1995年同教授。この間, 1988年9月~1989年11月アレクサンダー・フォン・フンボルト財団招聘研究員としてドイツ PTB (国立物理工学総合研究所) に滞在。工学博士。主として磁界解析, 磁気計測, 磁性材料, 磁性材料利用応用技術を中心とする磁気工学の研究に従事。

柴北俊英



(非会員) 1961年3月10日生。1984年3月九州大学工学部機械工学科卒業。1984年4月(株)リコー入社, ファクシミリの開発に従事。1992年1月西日本電線(株)入社, 2007年同研究開発部長。主として電線製造技術および新商品の研究開発に従事。2011年5月より吉野川電線(株)へ出向中。

梅原英嗣



(正員) 1982年5月20日生。2007年大分大学大学院工学研究科修士課程修了。同年西日本電線(株)入社, 研究開発部配属。現在, エナメル線, 手術用蛍光眼底造影装置の研究開発に従事。

利光淳



(非会員) 1972年10月21日生。1997年信州大学大学院工学系研究科物質工学研究科修士課程修了。同年西日本電線(株)入社。現在, 材料開発グループ所属。現在, 高分子材料の研究開発, 成形加工に従事。

二宮信治



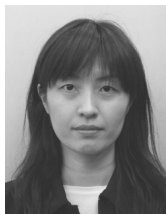
(非会員) 1958年7月27日生。1982年広島大学工学部第三類(化学系)卒業。大分県工業試験場技師, 主任研究員, 別府産業工芸試験所主幹研究員を経て, 現在, 大分県産業科学技術センター主幹研究員(総括)。県内企業を対象とした技術指導, 依頼試験, 共同研究などに従事。

谷口秀樹



(非会員) 1970年11月30日生。1996年九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。1998年大分県産業科学技術センター採用。現在, 工業化学担当主任研究員。イムノクロマト用金属コロイド開発, 高分子材料分析等に従事。

安部ゆかり



(非会員) 2002年九州大学大学院理学府凝縮系科学専攻修士課程修了。前職を経て, 2008年4月大分県産業科学技術センター研究員。現在, 有機化合物分析, 元素分析などに従事。