The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	交流電圧下のエナメル線における部分放電特性
Author(s)	飯田, 隆弘; 榮永, 剛士; 上野, 秀樹 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2009, 18, p. 52-59
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76851
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

電気材料技術雑誌　第18巻第１号
J. Soc. Elect. Mat. Eng.　Vol.18,　No.1　２００９

交流電圧下のエナメル線における部分放電特性

飯田　隆弘、榮永　剛士、上野　秀樹、中山　博史

兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻
〒671-2280 姫路市書写 2167

インバータ駆動モータは電気自動車など産業応用が広く進んでいる。しかし，インバータサージと呼ばれる繰返し過電圧により部分放電(PD)が生じて，モータ巻線の劣化を引起す。耐部分放電性に優れた巻線の開発には，部分放電のメカニズムを十分に把握する必要がある。そこで，インバータサージによる部分放電特性を解明する基礎段階として，まずエナメル線における交流電圧印加時の部分放電開始電圧や部分放電電荷量の計測，部分放電挙動の光学的観測を行った。その結果，部分放電は交流電圧の立ち上がり領域で発生し，その進展挙動は特にエナメル線表面における電荷蓄積の影響が大きいことが示された。

キーワード：部分放電，エナメル線，交流電圧

Partial Discharge Characteristics on Enameled Wires upon Ac Voltage Application

Takahiro IIDA, Tsuyoshi EINAGA, Hideki UENO, Hiroshi NAKAYAMA
Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of Hyogo
2167 Shosha, Himeji 671-2280, Japan

The inverter-fed motor is widely utilized to industrial applications such as electric vehicle, but it is feared to be occurred partial discharge (PD) due to inversion of repetitive over-voltage surge from an inverter supply and which deteriorates motor windings. To develop PD-resistant winding materials it is needed to understand PD mechanism in detail. PD characteristics for enameled wire were investigated under AC voltage, as the basic stage for PD study under inverter surge application. PD characterized quantities such as PD inception voltage and PD charge were measured, and PD behavior was optically observed. As those results PD basically caused at rising range of applied AC voltage. And PD charge decreased with time passage. Such PD behaviors are attributed to charge accumulation effect on specimen surface which suppresses PD development.

KEYWORDS：Partial discharge, Enameled wires, Ac voltage

1. はじめに

インバータ電源を用いたモータの高効率・可変速制御システムが普及している。その一方で，インバータ電源から繰り返し発生する過電圧・急峻サージ(インバータサージ)がモータ巻線に進入し，巻線絶縁を部分放電劣化させることが懸念されている[(1)]。インバータの多レベル化，ソフトスイッチング方式の採用，フィルタの設置などパワーエレクトロニクスシステムにおけるサージ低減対策が検討されているが，損失の増大，回路制御の困難，コストの増大等の理由からほとんど実用化には至っていない[(2)]。

他方，耐部分放電性の高いモータ巻線の開発が望まれており，絶縁材料に関する研究，部分放電の発生メカニズムに関する研究が盛んに行われ，巻線の部分放電劣化の進行様相，巻線絶縁膜厚の変化に対する部分放電開始電圧や巻線寿命に関する知見が得られている[(3)-(6)]。また，部分放電発生に伴う巻線表面の蓄積電荷効果などに着目した検討も行われているが，部分放電の進展メカニズムに対する知見は十分ではない[(7)(8)]。それゆえ，部分放電電荷量などの諸量と部分放電進展挙動との相関など，詳細な部分放電メカニズムの解明が望まれている。これまで詳細な議論がなされていない部分放電機構の詳細，特に部分放電発生に伴う電荷堆積が及ぼす影響について検討することは，今後の巻線の耐部分放電特性および絶縁性能の向上に重要である。

部分放電挙動は状況により多様に変化する。また，部分放電に及ぼす蓄積電荷の影響は非常に複雑であり[(9)]，両者の関連性はサージ電圧下ではもちろんのこと，商用周波数帯の交流電圧下においてさえも十分に解明されておらず，インバータサージによる部分放電特性研究の基礎的段階として，交流電圧印加時の部分放電特性を調べることは重要である。そこで，本研究では，交流電圧下における部分放電と蓄積電荷の影響についての知見を得ることを目的として，部分放電に関する諸量の計測，部分放電挙動の光学的観測を行い，蓄積電荷効果との相関について検討を行った。

2. 試料および実験方法

2·1 試料

モータ巻線における素線相互間の接触状態は一般に，IEC に規定されたツイストペア試料により模擬される。一方，上記試料において，部分放電発生可能な領域はツイストペア部分全体に拡がっているが，本実験では，その特定の断面部分における部分放電挙動を詳細に調べるため，Fig.1 に示すモデル試料により部分放電特性諸量の測定を行った。直径約 0.9mm，絶縁厚約 40μm (ポリアミドイミド樹脂)のエナメル線を内径約 15mm の円形状に加工(以下，円形エナメル線と記載)し，ツイストペアの断面形状を模擬し，これを二つ対峙させた試料(Fig.1(a))と一つの円形エナメル線を黄銅製対向平板電極(50×50mm)からギャップ長 g 離して配置した試料(Fig.1(b))を用いた。後者は，前者の電気鏡像モデルとなっている。円形エナメル線の曲率はツイストペア試料における撚りピッチをもとに模擬される曲率と対応させ，その内径を 15mm とした。ギャップ長 g の変化が部分放電挙動に与える影響等に着目して測定を行った。

2·2 実験方法

Fig.2 に実験回路図を示す。商用周波数 60Hz の交流電圧をトランスで昇圧し，ブロッキングコイル L_B を介して試料に電圧を印加した。このとき試料上で生じる部分放電の発光の様子を，イメージインテンシファイア付き CCD カメラ(C4346，㈱浜松ホトニクス)により観測した。また試料と直列に接続した検出抵抗 R_D，および商用周波数成分を遮断するフィルタ(遮断周波数約 10kHz)を介して部分放電電流パルスを検出した。印加電圧を零から順次増大(上昇速度：5~10 V/s)させて，最初に部分放電電流パルスが検出されたときの電圧値を交流電圧の正および負の各半周期に対して測定し，部分放電開始電圧とした。さらに試料と直列に同調式部分放電測定器(CD-5，㈱日本計測器製造所)を接続し，校正電荷量 100pC のもとで部分放電電荷量を計測した。なお，一般に絶縁被覆である高分子材料では表面堆積電荷は体積中へ流れ込むことで減衰するとされている[10]。誘電体の誘電率をε，体積抵抗率をρ とすれば，誘電体表面の堆積電荷減衰時定数$\tau=\varepsilon\rho$より，試料のエナメル被膜における電荷減衰時定数は約 8 分 30 秒であり，また表面電荷減衰過程における極性効果は無視できる。この時定数を考慮した時間間隔を設けて，部分放電開始電圧の測定を行った。それ以外の測定の結果には，いずれもエナメル被膜上の堆積電荷の影響が含まれている。測定はいずれも気温約 20℃，相対湿度 40~50%，気圧 0.1MPa の標準大気中(空調によりほぼ一定の環境に保持)で行った。また，一つの部分放電特性を得る際の一連の測定の間は，いずれも部分放電劣化の影響を受けない範囲内において同一試料を継続して使用した。

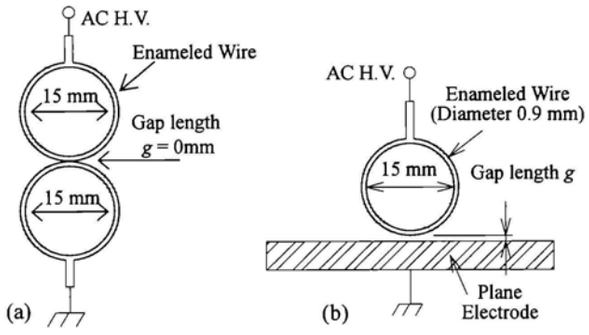


Fig. 1 Electrode configuration.

図 1 試験電極構成

3. 実験結果

3·1 部分放電開始電圧

Fig.1(b)の構成の円形エナメル線－平板試料における部分放電開始電圧(PDIV)のギャップ長依存性を Fig.3 に示す。部分放電電流パルスが最初に検出されたときの電圧の極性はギャップ長の変化などの測定条件によって変化したが，両者の電圧値は同程度の値を示した。ここでは交流印加電圧の正の半周期および負の半周期で最初に部分放電電流パルスが検出されたときの電圧値のうち，その平均値が低い方の極性における電圧値を部分放電開始電圧と定め，その平均値を標準偏差によるエラーバーと共に Fig.3 にプロットした。なお，正極性および負極性における PDIV のギャップ長依存性も Fig.3 とほぼ一致する結果を得ている。

Fig.3 において，円形エナメル線－平板電極間のギャップ長 g を 0~10μm に増加させても部分放電開始電圧はほとんど変化せず，その平均値は約 580V で一定となった。一方，ギャップ長を 10~20μm へ増大させると部分放電開始電圧はわずかに増大する傾向を示し，ギャップ長をさらに増大させると部分放電開始電圧の平均値はギャップ長が 10μm 増大するごとに約 60~70 V 増大した。このように，部分放電開始電圧の平均値はギャップ長が小さな領域(g=0~10μm)ではギャップ長の変化に対してほとんど変化しなかったが，ギャップ長が大きな領域(g≧20μm)ではギャップ長の増大に対してほぼ線形的に増大する結果となった。なお，部分放電開始電圧の標準偏差σ によるエラーバー下限値のギャップ長依存性も，平均値のそれと同様の傾向を示している。

一方，Fig1(a)の二つの円形エナメル線を対峙させた試料の放電開始電圧は，正極性(725~980V，平均値 901V)，負極性(835~980 V，平均値 925V)ともに同程度の値であった。また，この値は Fig1(b)の円形 - 平板試料(g=0μm)におけるそれ(約

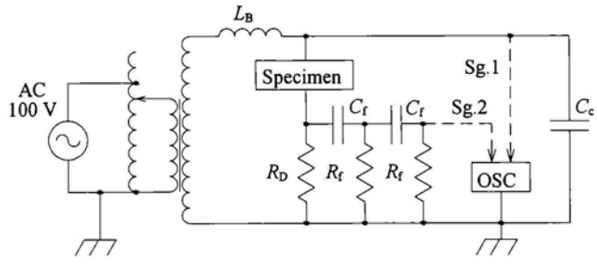


Fig. 2 Experimental circuit.

図 2 実験回路

580V)よりも 320V 程度高くなっており，電極間に挿入されたエナメル層数の増大による部分放電開始電圧の上昇に対応している。他方，ツイストペア試料における部分放電開始電圧(約 790V)よりも，110V 程度高い値となった。これは，ツイストペア試料では，今回の試料構成に比べて，さらに体積効果を考慮する必要があると考えられる。これらの結果をもとに，以下では主に Fig1(b)の円形－平板モデルを用いて検討を行う。

3･2　部分放電挙動

部分放電挙動と印加電圧波形との対応を得るため，イメージインテンシファイア付き CCD カメラにより交流電圧(周波数 60Hz, 周期約 16.7ms)をそれぞれ 1 周期(露光時間 16 ms)，正・負半周期(露光時間 8ms)，および正・負極性の各 8 分割(露光時間 1ms)での部分放電挙動の撮影を行った。ギャップ長 g=0μm および g=40μm における部分放電の時間分割挙動を Fig.4 および Fig.5 に示す。Fig.4(b)および Fig.5(b)は試料の断面形状を示す。Fig.4(a)および Fig.5(a)中に示すように時間 t およびその分割番号(②~⑤, ⑩~⑬)を定め, Fig.4(c)~(i)および Fig.5(c)~(m)の下側に対応する撮影時間もしくは瞬時電圧値を，Fig.4(d),(e),(h),(i)および Fig.5(e)~(h),(j)~(m)の左上に分割番号を記した。また Fig.4(c)~(i)中に主な部分放電発生箇所を下矢印(↓)で表示した。なお，今回使用した CCD カメラは連写できないため，Fig.4，Fig.5 に示した結果は単一周期における部分放電の時間分割とはなっていないが，同一条件で数回撮影し，最も多く観測された代表的な撮影結果を示している。また，部分放電は電圧印加の経過時間に対して減衰する挙動が見られたので，部分放電の規模が急激に変化する時間帯を避けるため，電圧印加後 2min 程度のインターバルを置いて撮影を行った。

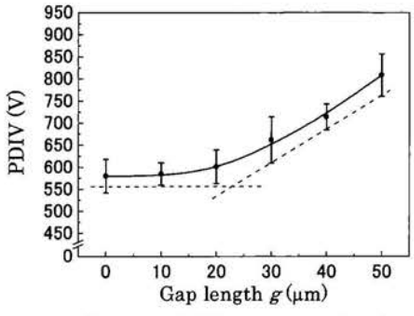
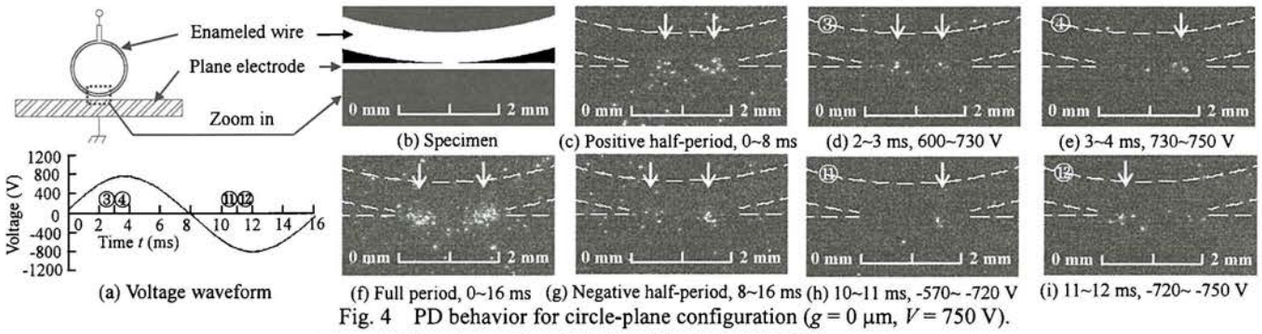


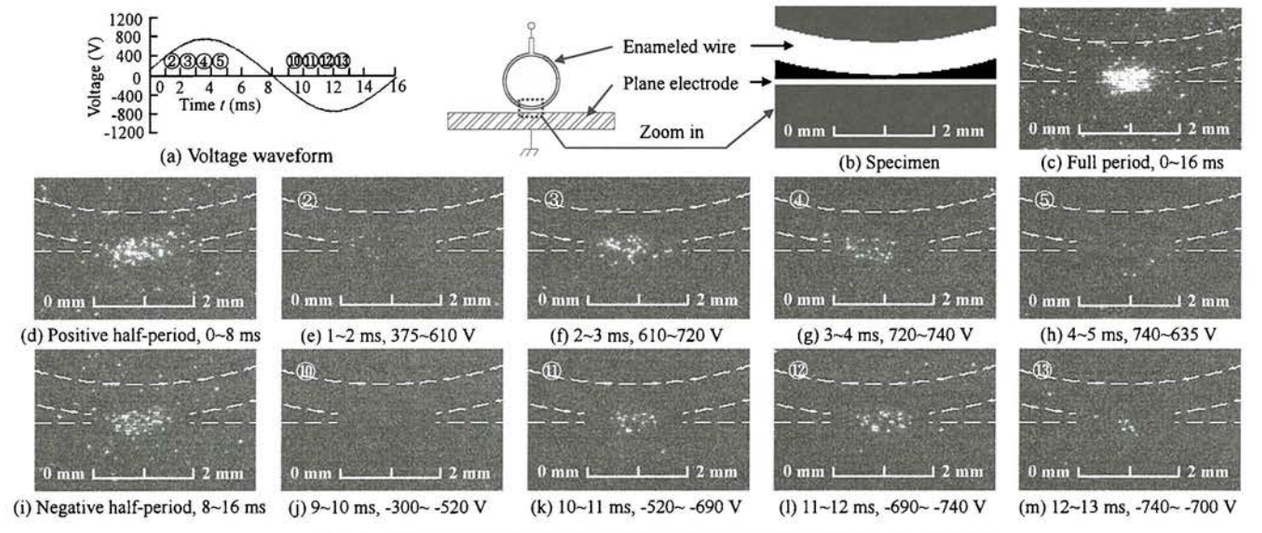
Fig. 3　Change in PDIV versus gap length g.
図 3　部分放電開始電圧のギャップ長依存性

Fig.4 に示すように，ギャップ長 g=0μm, 印加電圧 V=750V の場合，部分放電は正・負両極性ともに交流電圧の絶対値の傾き(以下，d|v|/dt と記載)が正の領域(正極性：2~4ms,



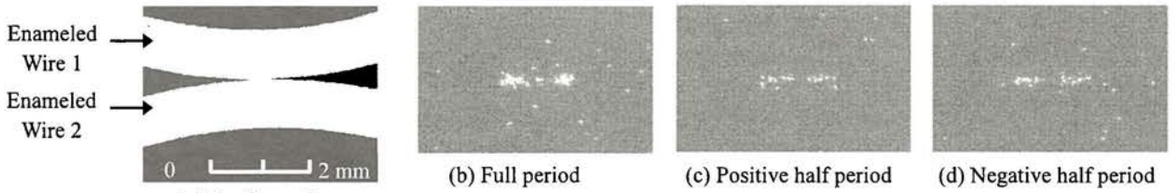
(a) Voltage waveform
(b) Specimen
(c) Positive half-period, 0~8 ms
(d) 2~3 ms, 600~730 V
(e) 3~4 ms, 730~750 V
(f) Full period, 0~16 ms
(g) Negative half-period, 8~16 ms
(h) 10~11 ms, -570~ -720 V
(i) 11~12 ms, -720~ -750 V

Fig. 4　PD behavior for circle-plane configuration (g = 0 μm, V = 750 V).
図 4　円形エナメル線－平板電極系の部分放電挙動(g = 0 μm, V = 750 V)



(a) Voltage waveform
(b) Specimen
(c) Full period, 0~16 ms
(d) Positive half-period, 0~8 ms
(e) 1~2 ms, 375~610 V
(f) 2~3 ms, 610~720 V
(g) 3~4 ms, 720~740 V
(h) 4~5 ms, 740~635 V
(i) Negative half-period, 8~16 ms
(j) 9~10 ms, -300~ -520 V
(k) 10~11 ms, -520~ -690 V
(l) 11~12 ms, -690~ -740 V
(m) 12~13 ms, -740~ -700 V

Fig. 5　PD behavior for circle-plane configuration (g = 40 μm, V = 740 V).
図 5　円形エナメル線－平板電極系の部分放電挙動(g = 40 μm, V = 740 V)



(a) Configuration (b) Full period (c) Positive half period (d) Negative half period

Fig. 6 PD behavior for circle –circle configuration (g = 0 μm, V = 1020 V).

図 6 円形エナメル線－円形エナメル線の部分放電挙動(g = 0 μm, V = 1020 V)

600~750V，負極性：10~12ms，-570~-750V)においてのみ発生した。部分放電の発光は主にエナメル線と平板電極との接触点から水平方向に 400μm~1mm 程度離れた領域において観測された。

ギャップ長 g=40μm，印加電圧 V=740V の条件では，Fig.5 に示すように，部分放電の発光は主にエナメル線下端部－平板間の間隙部で観測された。また部分放電の発光は，正極性で 1~5ms($d|v|/dt \geqq 0$ の領域：375~740V，$d|v|/dt \leqq 0$ の領域：740~635V)，負極性で 10~13ms($d|v|/dt \geqq 0$ の領域：-520~-740V，$d|v|/dt \leqq 0$ の領域：-740~-700V)において観測された。交流電圧の傾き $d|v|/dt \geqq 0$ の部分において部分放電の発生した瞬時電圧領域は g=0μm, V=750V の場合と同程度であるが，$d|v|/dt \leqq 0$ の領域において部分放電が発生したことは g=0μm の場合と異なる。なお，Fig.4 および Fig.5 において，正極性放電と負極性放電の挙動に明確な相違点は見られなかった。

また，Fig.6 に円形エナメル線を対峙させた試料構成における部分放電の挙動を示したが，円形－平板試料の結果をほぼ同じ結果が得られている。

以上は静止写真による部分放電観測の結果であるが，動的な部分放電挙動の目視観測(数 s の時間スケール)の結果，部分放電の発生箇所は時間的に，円形エナメル線－平板間の気中ギャップ領域を水平方向に移動(数 100μm 程度)することがわかった。これは部分放電発生に伴う蓄積電荷の電界緩和作用を受けて当該部分放電の発生が抑制され，より進展の容易な気中間隙部へと部分放電が移動することによると考えられる。

3·3 部分放電電荷量

部分放電の発生規模を定量的に評価するため，部分放電電荷量の計測を行った。交流電圧の正の半周期，および負の半周期それぞれについて部分放電電荷量を測定した結果，両者は共に同程度の値を示した。以下，両極性のうち大きい方の値を部分放電電荷量として採用した。得られた特性は，正・負各極性における結果とほぼ合致することを確認している。

部分放電電荷量の電圧印加継続時間特性を Fig.7 に示す。Fig.7(a)に示すように，g=0μm の場合において，印加電圧 V=625V のとき電圧印加直後の部分放電電荷量は約 200pC となったが，その後部分放電電荷量は時間経過に伴って急激に減衰し，約 15s 間電圧印加の状態が継続されると本実験における部分放電検出限界以下のレベルまで減衰し，検出不能となった。また V=715V および V=1025V の場合の初期電荷量はそれぞれ約 300pC および約 700pC となり，各々電圧印加後約 1min および約 5min で部分放電電荷量は検出不能となった。ギャップ長を g=40μm まで増大させても上記の傾向は変わらず，Fig.7(b)に示すように，V=760V のとき電圧印加直後の部分放電電荷量は約 450pC となったが，その後部分放電電荷量は約 30 s で定常値(約 100pC)へと減衰した。V=1090V の場合には初期電荷量は約 1000pC, 定常値(約 200pC)に減衰するまでの時間は約 1min となった。上記のような部分放電電荷量の時間的減衰は，主に部分放電の継続に伴って試料表面上の蓄積電荷密度が増大し，電界緩和作用により部分放電が抑制されることに起因すると予想される。

ギャップ長 g=0μm の場合，今回測定した印加電圧下($V \leqq$ 1025V)で部分放電電荷量は，いずれも時間経過に伴って単調減少し，やがて検出不能となった。これに対し，g=40μm の場合における減衰後(t=5min)の部分放電電荷量は，V=760 V のとき約 100pC，V=1090V で約 200pC となった。すなわち，g=40μm の場合における時間経過後の部分放電電荷量は g=0μm の場合よりも大きく，基本的にギャップ長が大きい場合には，電圧印加直後に加えて時間経過後においても部分放電電荷量の値が増大する傾向となった。なお，校正電荷量 100pC とした部分放電発生頻度(1s 当たりの平均発生数(pps))の計測結果においても，その経時変化は部分放電電荷量の経時変化と同様，電圧印加継続時間とともに減衰する結果が得られている。さらに，Fig. 1(a)に示した円形－円形試料においてもほぼ同じ傾向が得られた。すなわち，放電電荷量は印加時間とともに減少しており，同じ現象が起こっているものと考えられる。

3·4 部分放電発生位相

前節の結果より，部分放電電荷量が蓄積電荷効果により時間的に減衰することが示唆された。これに伴う部分放電の発生位相範囲の時間的変化が想定されるため，印加交流電圧に対する部分放電発生位相範囲の時間依存性を調べた。ギャップ長 g=0μm および g=40μm の各場合における部分放電発生位相範囲の時間経過特性をそれぞれ Fig.8 および Fig.9 に示す。部分放電電流パルスの発生位相範囲，およびこれに対応する瞬時電圧領域をそれぞれ Fig.8(a),Fig.9(a)および Fig8(b),Fig.9(b)中にバー(Ⅰ)で表示した。また，交流電圧の正・負各半周期中において単一部分放電電流パルスの

み観測された場合には，当該放電パルスの発生位相および瞬時電圧値を各図中に黒丸(●)でプロットした。

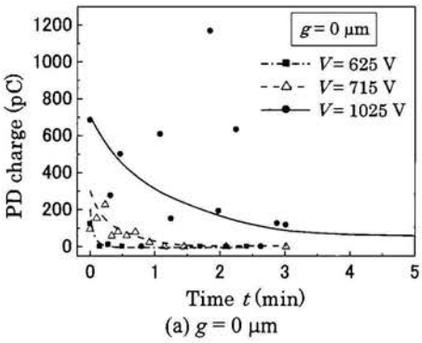
Fig.8 に示すように，ギャップ長 g=0μm，印加電圧 V=1000V の場合，電圧印加直後の部分放電発生電圧領域は約 400~1000V(ピーク値)となったが，時間経過に伴ってこの瞬時電圧領域の下限値はピーク電圧側へ推移した。当該瞬時電圧領域は時刻 t=2~4min で約 700~900V となり，その後 t>5 min で部分放電は検出不能となった。このような部分放電発生位相範囲の時間的変化は，Fig.7(a)で見られた部分放電電荷量の時間的変化と対応しており，部分放電発生に伴う蓄積電荷効果により部分放電の発生可能な電圧領域が限定されたものといえる[11]。

Fig.9 において，ギャップ長 g=40μm，印加電圧 V=1010V の場合，部分放電は g=0μm の場合と同様，基本的に特定の電圧値から印加電圧ピーク値までの瞬時電圧領域で発生した。一方，g=40μm の場合には部分放電発生位相範囲の時間的な変化はほとんど観測されなかった。また Fig.9 より，部分放電は正極性で 90deg，負極性で 270deg を超える位相範囲においても発生していることがわかる。ギャップ長 g=0 μm の場合には Fig.8 に示すように，基本的に部分放電発生位相 θは $\theta \leqq 90$deg (正極性)もしくは $\theta \leqq 270$deg (負極性)となったことから，ギャップ長を増大させると θ>90deg (正極性)もしくは θ>270deg (負極性)となる位相範囲，すなわち交流電圧の絶対値の傾きが負($d|v|/dt \leqq 0$)の領域においても，部分放電がギャップ長の短い場合に比べて生じやすい状況になっているものと思われる。このような傾向は，3.2 節に示した部分放電の時間分割挙動とも対応している。

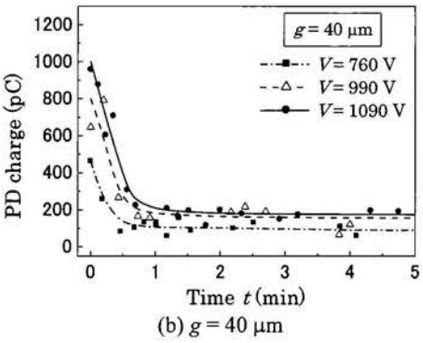
4. 検討

4·1 部分放電開始電圧および部分放電挙動

Fig.3 において，部分放電開始電圧はギャップ長が小さな領域(g=0~10μm)ではほぼ一定値を示したが，ギャップ長が大きな領域($g \geqq 20$μm)ではギャップ長の増大に対してほぼ線形的に増大した。一方，ギャップ長 g=0μm の場合における部分放電の主な発生箇所は，Fig.4 で見られたように，エナメル線と平板電極との接触点から水平方向に 400μm~1 mm 程度離れた領域となった。この場合，部分放電は主にパッシェン曲線の最小点に相当する気中間隙部分において発生することが知られている[12]。本実験で使用した電極系は平等電界配置ではないが，近似的に平等電界下でのパッシェン曲線を適用してみる。標準大気中(気圧 p=0.1MPa，気温 T=20℃)におけるパッシェンミニマムは，ギャップ長 $d_{min} \fallingdotseq$ 7.5μm に相当し，このギャップ長は Fig.10 に示すように，エナメル線と平板電極との接触点から水平方向に約 350 μm 離れた位置に相当する。Fig.4 で見られた部分放電発生領域のうち，エナメル線と平板電極との接触点に近い側の端点における水平距離(約 400μm)は，上記の計算値に近い値となっている。また，Fig.4 で見られる水平方向 600μm 程度の部分放電発光の拡がりは主に，印加電圧の過電圧 ΔV=170V (部分放電開始電圧：約 580V)に起因すると考えられる。すなわち，パッシェンミニマムの左側よりも右側の方が放電電圧の変化が緩やかであることから，主にパッシェンミニマムより

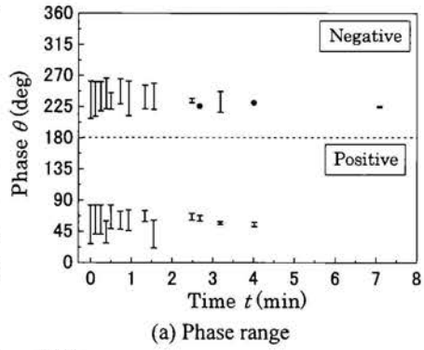


(a) g = 0 μm

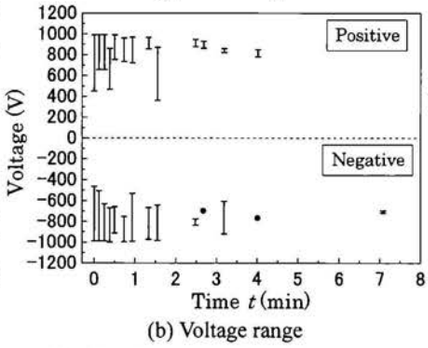


(b) g = 40 μm

Fig. 7　PD charge characteristics versus time.
図 7　部分放電電荷量の経時変化

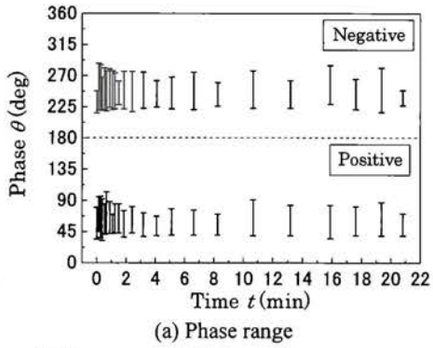


(a) Phase range

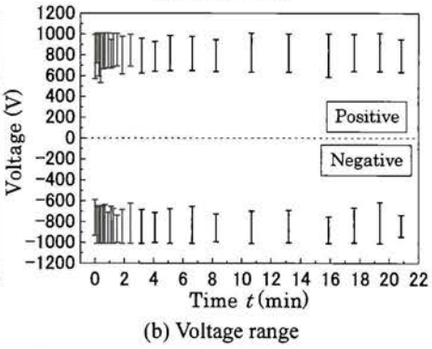


(b) Voltage range

Fig. 8　Phase range for PD occurrence (g = 0 μm, V = 1000 V).
図 8　部分放電発生位相の経時変化 (g = 0 μm, V = 1000 V)



(a) Phase range



(b) Voltage range

Fig. 9　Phase range for PD occurrence (g = 40 μm, V = 1010 V).
図 9　部分放電発生位相の経時変化 (g = 40 μm, V = 1010 V)

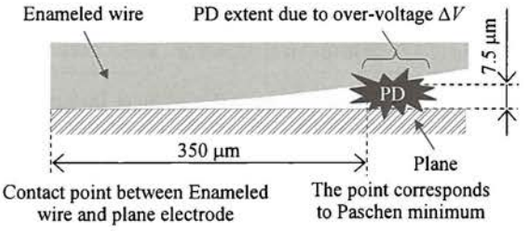


Fig. 10　PD location and Paschen minimum (g = 0 μm).

図 10　PD 発生部位とパッシェンミニマム(g = 0 μm)

ギャップ長の増大する方向に部分放電領域の拡がりが生じたものと考えられる。

ギャップ長 g を増大させると，Fig.5 に示すように，部分放電の主な発生箇所はエナメル線下端部－平板電極間の間隙部へと移動した。前記パッシェンミニマム d_{min}≒7.5μm の値より，このような部分放電発生領域の移動は g=0~10μm のギャップ領域で生じると推定される。このとき，部分放電発生箇所における気中間隙はパッシェンミニマムの状態が維持されたため，g=0~10μm の領域で部分放電開始電圧がほぼ一定になったといえる。また，ギャップ長 g≧10μm の領域では，部分放電開始電圧はパッシェンの法則に従って増大しているものと理解できる。

4·2　部分放電電荷量

Fig.7 より，部分放電電荷量が電圧印加後，時間経過に伴って単調減少することが示された。本電荷量測定において，電荷量が時間的に減衰した後課電を中止し，1~2 時間程度のインターバルをおくことで試料表面の堆積電荷を減衰させ(試料の電荷減衰時定数：約 8 分 30 秒)，再び電圧を印加した結果，Fig.7 に示した特性が再現された。これは上記部分放電電荷量の特性が試料表面の電荷堆積状態(蓄積電荷密度)に強く依存していることを示唆する。上記のような部分放電電荷量の時間的減衰は主に，部分放電の継続に伴って試料表面上の蓄積電荷密度が増大し，これの電界緩和作用により部分放電が抑制されたことに起因するといえる。ここで，交流電圧の極性が周期的に反転するにもかかわらず，時間経過に対して蓄積電荷密度が増大することは，主に絶縁材料表面における電荷のトラップなどが関係しているものと思われるが[13]，詳細についてはさらに検討を要する。

Fig.7 において，ギャップ長 g を増大させると電圧印加直後および時間経過後の部分放電電荷量は共に増大する傾向となった。電圧印加直後の放電電荷量は g=0μm の場合に比べて g=40μm の場合の方が大きく，試料表面の電荷蓄積は多くなり，これによる緩和作用も大きくなり，時間経過による放電電荷量も速く減衰すると予想されるが，実際には時間経過後も g=0μm より大きな放電電荷量が維持された。このとき部分放電は，特定の箇所で自身の形成する蓄積電荷により抑制されても，より進展の容易な別の箇所で発生することが可能となる。このような部分放電発生箇所の時間的な移動は Fig.4 および Fig.5 の比較において，ギャップ長 g が増大すると部分放電発生領域(体積空間)の増大が生じていることや既に述べた部分放電挙動の目視観測により確認されていることと対応する。また，一般に Whitehead モデルによる解析から，ギャップ長の増大に伴って放電エネルギーも増大することが知られている[14]。以上のことから，ギャップ長が増大したとき，試料表面での蓄積電荷による電界緩和作用よりも，ギャップ長増大による放電範囲の拡大および放電エネルギーの増大の影響が大きくなり，部分放電はより電界緩和の影響の弱い箇所での発生が維持され，上記のような結果が得られたものと理解できる。なお，Fig.7 において，印加電圧 V の上昇より部分放電電荷量も増大する傾向が見られたが，これも前記同様，印加電圧の上昇により放電範囲が拡大した結果であると理解できる。

4·3　部分放電発生位相

Fig.8 および Fig.9 において，ギャップ長 g=0μm の場合には部分放電発生電圧領域幅が時間経過に伴って次第に小さくなり，その下限値がピーク電圧側へ推移する傾向が現れたが，g=40μm の場合には部分放電発生位相範囲の時間的変化はほとんど見られなかった。これは前述のように，g=0μm の場合には比較的部分放電の発生領域(放電範囲)が小さく，部分放電が試料表面上の蓄積電荷の影響を受けやすいのに対し，g=40μm の場合には比較的放電範囲が大きくなり，部分放電が試料表面上の蓄積電荷の影響の小さい箇所において発生可能となることに対応すると思われる。一般に部分放電は，気中間隙部に加わる外部分担電圧から試料の表面電位を減じた値が，当該気中ギャップの放電開始電圧を超えたときに発生可能となる(Whitehead モデル)が[15]，前者の場合には部分放電の継続に伴う表面電位の上昇により，部分放電発生可能な瞬時電圧領域がピーク電圧側へ推移したものと考えられる[11]。また，Fig.8 および Fig.9，もしくは Fig.4 および Fig.5 において，ギャップ長を増大させると交流電圧の絶対値の傾きが負($d|v|/dt$≦0)の領域における部分放電の発生が容易となったことも，上記ギャップ長の増大に対する放電範囲の拡大により説明できる。

以上のように，ギャップ長 g=0μm の場合には，部分放電発生に伴う蓄積電荷の電界緩和作用により，時間経過に伴って部分放電電荷量は減少し，同時に部分放電発生位相範囲も交流電圧のピーク側へと推移する。一方で，部分放電発生可能な領域は印加電圧の過電圧に起因した拡がりを有する。部分放電はこの領域内で比較的蓄積電荷の影響の小さい箇所において発生するが，g=40μm の場合のように，この領域が比較的広範な場合には，部分放電の進展に及ぼす蓄積電荷の影響はより小さくなる。これにより，交流電圧の絶対値の傾きが負($d|v|/dt$≦0)の領域における部分放電発生が容易になると共に，部分放電発生位相範囲の時間的な変化も現れなくなるなど部分放電特性に変化が現れた。蓄積電荷による部分放電の抑制効果と，放電範囲の拡大による放電抑制効果の緩和との関係により実際の部分放電特性が決定されるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では，部分放電の発生メカニズムの解明を目的として，交流電圧下におけるエナメル線の部分放電特性について主に円形－平板試料を用いて調べた。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 部分放電開始電圧は，ギャップ長が小さな領域(g=0~10μm)ではほぼ一定値を示したが，ギャップ長が大きな領域(g≧20μm)ではギャップ長の増大に対してほぼ線形的に増大した。部分放電発生箇所の光学的観測結果およびパッシェン則より，前者のギャップ領域においてはパッシェンミニマムの状態を維持するように部分放電発生箇所の変化することが示唆された。

(2) ギャップ長が増大すると部分放電発生領域が拡大すると共に，交流電圧の絶対値の傾きが負($d|v|/dt \leq 0$)の領域における部分放電の発生が容易となった。また部分放電挙動の目視観測より，部分放電発生箇所はエナメル線－平板間の気中ギャップ領域を時間的に移動する(水平方向に数100μm 程度のオーダー)ことがわかった。

(3) 部分放電電荷量は時間経過と共に単調減少する傾向となった。1~2 時間程度のインターバルを置いて電荷量測定を行った結果，および部分放電発生位相範囲の時間依存性より，上記部分放電電荷量の時間経過特性は，主に部分放電発生に伴う蓄積電荷の電界緩和作用に起因することが示唆された。円形エナメル線を対峙した構成においても同様の結果が得られた。

(4) ギャップ長を増大させると電圧印加直後および時間経過後の部分放電電荷量は共に増大する傾向となった。他方，部分放電発生位相範囲は，ギャップ長 g=0μm の場合には時間経過に伴って交流電圧のピーク側へと推移したが，g=40μm の場合には時間に対してほとんど変化しなかった。

(5) 以上の測定により，部分放電は自身の形成する蓄積電荷効果により抑制されるが，同時にギャップ長の増大に伴う放電領域の拡大などにより，上記放電抑制効果が緩和されることがわかった。

参考文献

(1) インバータサージ絶縁調査専門委員会：「インバータサージの絶縁システムへの影響」，電気学会技術報告，No.739, pp.3-5 (1999)
(2) 工藤，宮崎：「パワエレシステムにおけるサージ低減対策」，電気学会誌，Vol.126, No.7, pp.435-438 (2006)
(3) M. Roy, J. K. Nelson, R. K. MacCrone, L. S. Schadler, C. W. Reed, R. Keefe, and W. Zenger : "Polymer Nanocomposite Dielectrics－The Role of the Interface", *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.*, Vol.12, No.4, pp.629-643 (2005)
(4) R. Bartnikas : "A Comment Concerning the Rise Times of Partial Discharge Pulses", *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.*, Vol.12, No.2, pp.196-202 (2005)
(5) N. Hayakawa and H. Okubo : "Lifetime Characteristics of Nanocomposite Enameled Wire Under Surge Voltage Application", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.24, No.2, pp.22-27 (2008)
(6) H. Okubo, N. Hayakawa, and G. C. Montanari : "Technical Development on Partial Discharge Measurement and Electrical Insulation Techniques for Low Voltage Motors Driven by Voltage Inverters", *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.*, Vol.14, No.6, pp.1516-1530 (2007)
(7) 中山，川内，大塚，匹田：「直流コロナ放電照射時の表面電位分布および空間電荷分布」，電気学会 基礎・材料・共通部門大会, XI-3 (2007)
(8) Peter H. F. Morshuis : "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now", *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.*, Vol.12, No.5, pp.905-913 (2005)
(9) 小野田，中山，上野：「高電圧・絶縁システム入門」，森北出版, pp.126-146 (2007)
(10) 家田，沢，篠原：「高分子表面電荷の減衰過程」，電気学会誌, Vol.88, No.957, pp.1107-1113 (1968)
(11) 堤，米倉，菊池：「群パルスによる部分放電の識別」，電学論 A, Vol.113, No.2, pp.103-112 (1993)
(12) 和田，辻，武藤，溝口：「高圧インバータケーブルのシース部分放電開始特性および V－t 特性」，電学論 A, Vol.127, No.2, pp.71-77 (2007)
(13) 岡田，内藤：「部分放電検出」，コロナ社, pp.10-11 (1968)
(14) 堀井：「絶縁物中におけるコロナ放電の理論」，電気学会誌, Vol.80, No.858, pp.357-360 (1960)
(15) 永田，中山，犬石：「複合誘電体における部分放電の過電圧依存性」，電学論 A, Vol.92, No.12, pp.545-552 (1972)

（平成 21 年 10 月 1 日受理）

飯　田　隆　弘

昭和 60 年生まれ。平成 19 年 3 月姫路工業大学電気工学科卒業。平成 21 年 3 月兵庫県立大学大学院工学研究科博士前期課程電気系工学専攻修了。同年 4 月(株)アマダ入社。平成 20 年度電気関係学会関西支部連合大会奨励賞。

榮　永　剛　士

昭和 61 年生まれ。平成 21 年 3 月兵庫県立大学工学部電子情報電気工学科卒業。平成 21 年 4 月兵庫県立大学大学院工学研究科博士前期課程電気系工学専攻入学。

上　野　秀　樹

昭和 35 年生まれ。昭和 60 年 3 月信州大学大学院工学研究科修士課程，昭和 63 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。平成 9 年 10 月姫路工業大学工学部助教授，兵庫県立大学大学院助教授（准教授）を経て，平成 21 年 10 月同大学大学院教授。平成 16～17 年ドイツ・アーヘン工科大学高電圧技術研究所研究員。主として，環境調和形絶縁，部分放電検出と劣化診断，沿面放電応用に関する研究に従事。工学博士。

中　山　博　史

昭和 18 年生まれ。昭和 40 年 3 月姫路工業大学電気工学科卒業。平成 3 年 10 月同大学電気工学科教授，平成 14 年 4 月同大学大学院教授，平成 10 年から 2 年間同大学学生部長兼任。平成 16 年 4 月兵庫県立大学大学院教授，平成 20 年 4 月同大学名誉教授，特任教授。主として，気体および固体誘電体の絶縁破壊に関する研究に従事。工学博士。