

界面空隙を有する固体絶縁物を介した針-平板電極系における部分放電現象

Partial Discharge Characteristics in Air Gap in Series with Fissure-like Interface between Needle-Plate Electrodes

竜 正城^{※1}
Masaki Ryu
甲斐 義信^{※1}
Yoshinobu Kai
長尾 雅行^{※2}
Masayuki Nagao
小崎 正光^{※2}
Masamitsu Kosaki

1 まえがき

近年、電力機器のコンパクト化、構造の簡素化などが進められるとともに、機器の運転中における絶縁系の高信頼性が強く望まれている。そのため、絶縁体と導体の一体化及び絶縁体の複合化が行われているが、高電圧の電力機器中の絶縁体-導体、絶縁体-絶縁体に界面剥離、クラックなどの欠陥が存在すると、電気的ストレスにより部分放電(Partial Discharge, 以下、PDという)が発生し、やがて絶縁破壊に至ることがある。

このような背景から、ポイド、剥離及び凹凸などの構造的要因による固体-固体絶縁体界面における電気現象が最近ますます注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。その中で、界面における放電現象に関しては電界方向と直交した界面における部分放電光の観測⁽³⁾や高分子固体絶縁材料内部界面における電気絶縁特性評価用試料の開発など多くの研究が行われている⁽⁴⁾。これまで発表された数々の研究結果より、界面の状態がそこでの放電開始、絶縁破壊、又は放電による劣化などに影響を及ぼしていることが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。大気中におかれた絶縁物表面の場合に比べ、微小ギャップを持つ界面における電荷の移動及び蓄積などの現象は異なる⁽⁶⁾と考えられ、狭い空間を伸展するPDは界面状態により影響を受け易いと予想される。

これまで我々は針-平板電極系を用いて、固体絶縁材料の界面に連なるギャップにおける交流PD特性に及ぼす界面圧力の影響を調査した。その結果、界面に加える荷重の増加に伴い、PDのパルス電荷量が小さくなることを観測した⁽⁷⁾。また、界面を形成する絶縁体の表面荒さ(以下、界面荒さという)及び、界面の空隙間隔(以下、界面空隙という)がPDに影響を及ぼすことを確認した⁽⁸⁾。

そこで今回は、空気ギャップ中に針電極を設置した試料を用い、この針先端付近で開始すると思われるPD現象が界面空隙及び界面荒さと印加電圧により、どのような影響を受けるか調査するとともに、空気ギャップから試料界面まで伸展する部分放電光を観測したので報告する。

※1 電力事業本部 変圧器事業部 技術部
※2 豊橋技術科学大学 電気電子工学系

2 試料及び実験方法

2.1 試料

今回の実験ではPD特性を測定する試料として、シリカ粉を充填材としたエポキシ樹脂で硬化したブロック(不透明)を試料Ⅰとし、界面まで伸展する部分放電光を観測するため、充填材を含まないエポキシ樹脂で硬化した透明なブロックを試料Ⅱとした。

各試料には同一の針-平板電極系を用い、また電極間の絶縁構造も同一とした。ここで試料Ⅰと電極系を図1に示す。電極間の固体絶縁体の中央に位置する界面は注型硬化した2つのエポキシ樹脂ブロックを対向に合わせることで形成した。針電極(先端:150 μ m/35°)と対向絶縁体間の空気ギャップを0.5mmに固定し、電界方向に沿う絶縁体の界面長さを18mmとした。界面空隙は図2に示すようにPETフィルム(厚み100 μ m, 1~4枚重ね)を用い、表1のように調整し、二つの樹脂ブロックに一定の荷重196Nを加えた。更に試料Ⅰは、界面を構成する絶縁体ブ

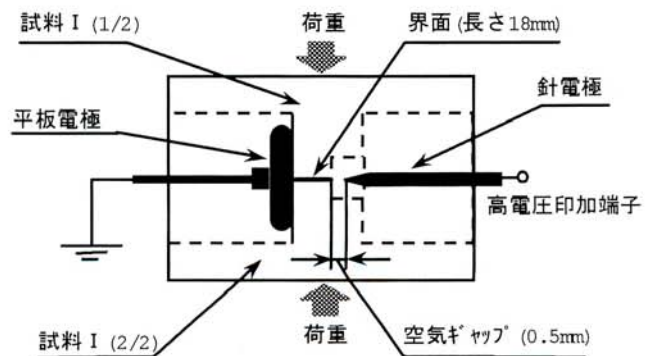


図1 固体絶縁体の界面空隙に連なるギャップを有する試料

Fig.1/Specimen having an air gap in series with the fissure-like interface between two insulating materials

ロックの対向表面をサンドペーパーにより荒らし、表面荒さの程度によって試料#A, #B, #Cとした。各試料の対向表面状態を表面荒さ測定装置により確認し、その測定結果を表2に示す。なお、試料IIの界面荒さは試料Iの試料#Aに相当するよう調整した。

2.2 実験方法

試料の平板電極側を接地し、60Hzの交流高電圧を針電極側に印加したときのPD特性を、図3に示すPD測定システムを用いて測定した。なおPDパルス信号は結合コンデンサを通して、PD計測器(日本計測器製CD-5)により検出した。交流印加電圧信号とPDパルス信号をデジタルオシロスコープ(Tektronix製 TDS524a)に取り込み、GPIBを介してパソコンに転送し、PD特性のデータ処理を行った。

PDの開始電圧(V_i)及び消滅電圧(V_e)の測定は、電圧上昇・下降速度を300V/secとし、60Hz交流高電圧を試料に印加し、そのPD信号をX-Yレコーダ(X:印加電圧信号, Y:PD計測器CD-5によるパルスピーク値の信号)に記録する。これを4回繰り返し、初期値である1回目のPD開始電圧及び消滅電圧は試料の初期状態によって以降のデータと比較し、大きく異なる場合が多いため、本稿では現在一般的な方法である2~4回目の測定値の平均値を試料のPD開始電圧及び消滅電圧とした。

試料のPD特性に及ぼす界面空隙及び界面荒さの影響と印加電圧の関係を調べる実験は、試料Iを用い、表1, 表2に示す条件で行った。AC60Hzの印加電圧は、試料のPD開始電圧及び消滅電圧を測定した試験で予め得られており、約3kVのPD開始電圧と約12kVの破壊電圧の間で

4kV, 6kV, 8kV, 10kVと2kVステップで変化させた。

部分放電光の観測は、試料IIを用い、界面空隙を表1に示すように変化させ、PDによる発光を目視確認しながら

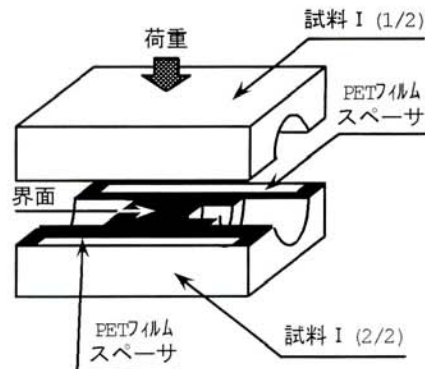


図2 / PETフィルムの挿入による界面空隙の調整

Fig.2/ Interfacial gap adjustment by using PET film spacers

表1 / 試料の界面空隙

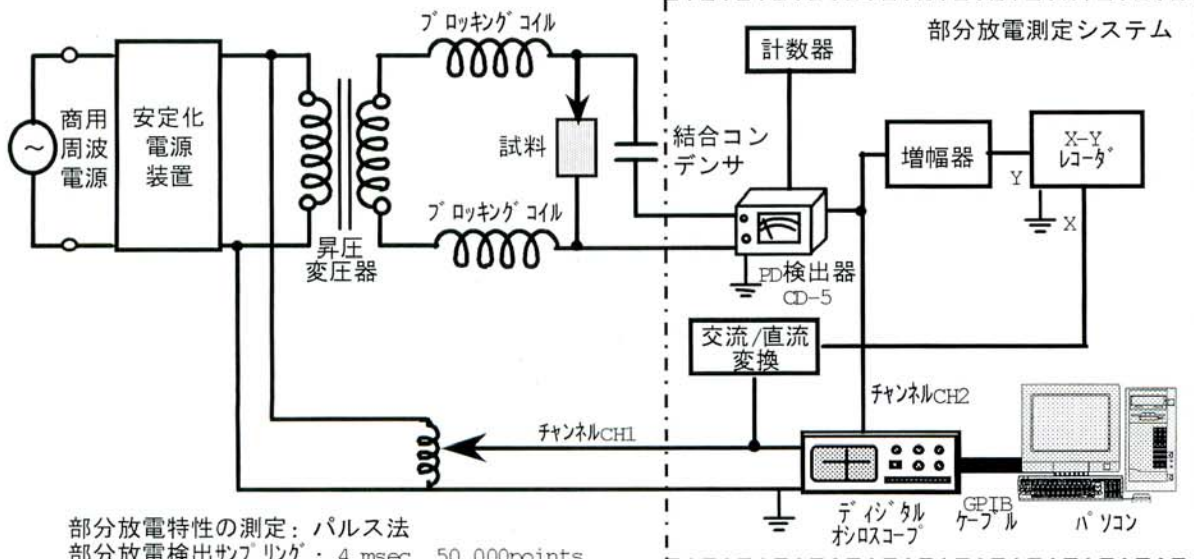
Tab.1/ Interfacial gap of specimens (μm)

PETフィルムスペーサ	無し	1枚	2枚	4枚
界面空隙	0	100	200	400

表2 / 試料の界面荒さ

Tab.2/ Interfacial surface roughness of specimens (μm)

界面荒さ	試料#A	試料#B	試料#C
平均値	1	3	8
最大値	2	4	12



部分放電特性の測定: パルス法
 部分放電検出サブリング: 4 msec, 50,000points
 バックアップ: 5pC以下
 印加周波数: AC 60Hz
 部分放電開始電圧及び消滅電圧の測定: 電圧上昇/降下速度: 300V/sec

図3 / PD測定システム

Fig.3/ Schematic diagram of PD measuring system

ら、図4に示す方法で静止カメラ(富士フィルムHP1600, f 2.5, 露光時間 2 min)により撮影した。

なお、上記のすべての実験は暗室を用い室温、大気中にて実施した。

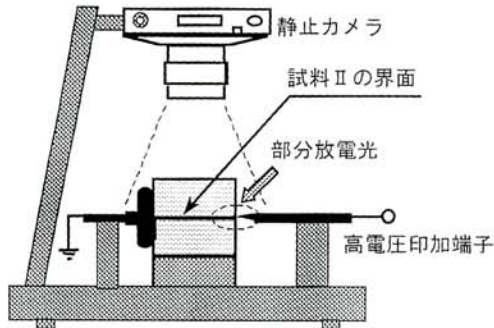


図4 / 部分放電光の観測

Fig.4/Schematic diagram of PD luminescence detection

3 実験結果

3.1 PD特性

界面空隙を0~400 μm まで変化させた試料I(試料#A, #B, #C)のPD開始電圧及び消滅電圧の測定結果を図5に示す。界面空隙への依存性は顕著ではないものの、界面が荒い試料#B, #CのPD開始電圧及び消滅電圧は界面が平滑である試料#Aのそれに比較し、約6%とわずかではあるが、高くなることが確認できた。なお、すべての試料のPDは開始直後、あるいは消滅直前にデジタルオシロスコープ上で間欠的な負のPDが確認されたが、現行のPD測定システムでは記憶容量の制約を受けデータ処理で

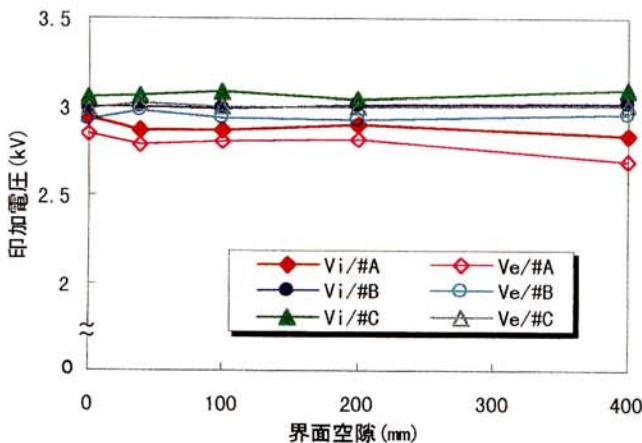


図5 / 各試料のPD開始電圧 (Vi) 及び消滅電圧 (Ve)

Fig.5/PD inception voltage (Vi) and extinction voltage (Ve) of the specimens

きなかった。

図6に印加電圧6kV, 界面空隙を0 μm とした試料#AのPD特性の例を示す。負のPDパルスは発生頻度が高くパルス電荷量が小さいのに対し, 正のPDパルスは発生頻度が低くパルス電荷量大きい結果となった。試料#Aの印加電圧と, PDパルス電荷量及び発生位相を図7(a)に示す。正及び負のPDパルス電荷量と印加電圧には相関性がないが, その発生位相は印加電圧のゼロクロス付近を中心として広がっていく傾向が確認された。

図7(b)に示す界面空隙400 μm の場合, PDパルス電荷量は印加電圧が低いレベルでは界面空隙0 μm の場合と変わらないものの, 印加電圧の上昇に従って正のパルス電荷量が顕著に増大する傾向が確認された。このような現象は図8(a), (b)に示す試料#Cでも同様の傾向であった。図7(a)と図8(a)を比較すると, 界面空隙0 μm の試料#Cでは正のPDパルス電荷量と印加電圧は相関性を示した。

このようにPDパルス電荷量及び印加電圧の上昇に従う前述の傾向から, これまで測定したすべての試料のPD特性の結果をもとに, PD特性を評価するパラメータの一つであるPD最大パルス電荷量を図9のように整理した。その結果, 印加電圧4kVの場合, 正のPDパルス電荷量は界面状態に影響されないが, 印加電圧を6~10kVに変化させると, PDパルス電荷量は電圧依存性を示し, 更に界面状態による有意差も確認された。6~10kVの電圧においては界面空隙0 μm の場合, 界面の荒い試料#B, #Cの正のPD最大パルス電荷量は試料#Aよりも比較的大きい, しかし, 界面空隙の拡大に伴うその増大は試料#Aほどにはならなかった。一方, 本稿でここまで示した結果から分かるように負のPDパルス電荷量は界面状態にほとんど影響されない。

3.2 部分放電光の観測

試料IIの交流部分放電光を撮影し, その写真の例を図

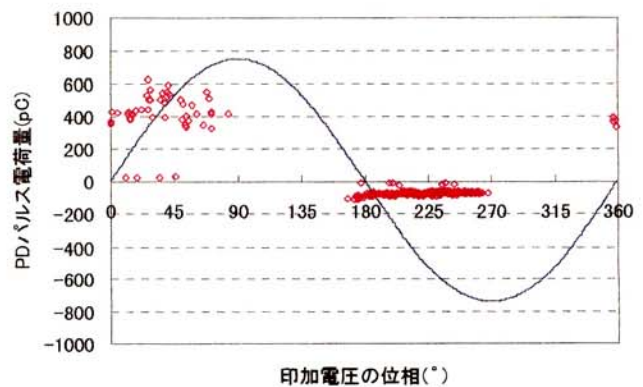


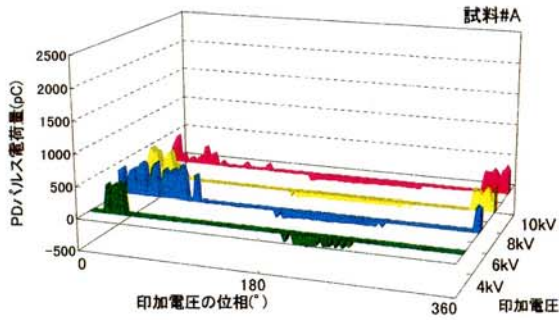
図6 / 試料#AのPD特性 (印加電圧: 6kV, 界面空隙: 0 μm)

Fig.6/PD characteristics of specimen #A (AC 6kVrms, Interfacial gap:0 μm)

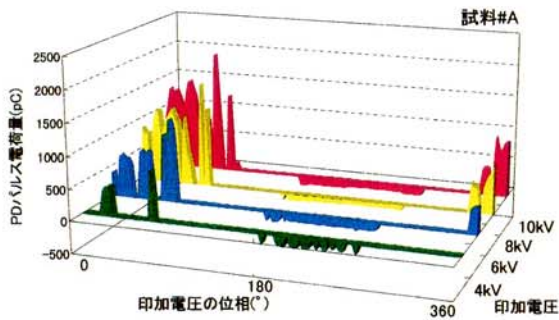
10に示す。異なる界面空隙における試料の交流部分放電光のパターンを比較するため、針電極の先端部分を拡大

し、図11に示す。

観測結果から、界面空隙が拡大するに伴って部分放電



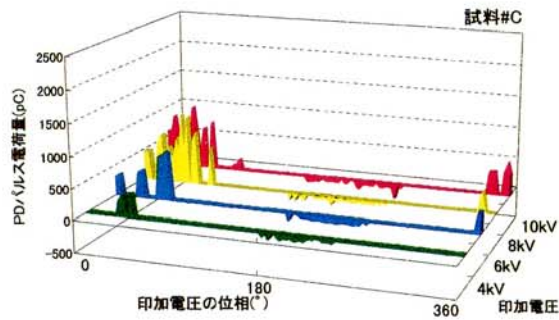
(a) 試料#A, 界面空隙: 0 μm



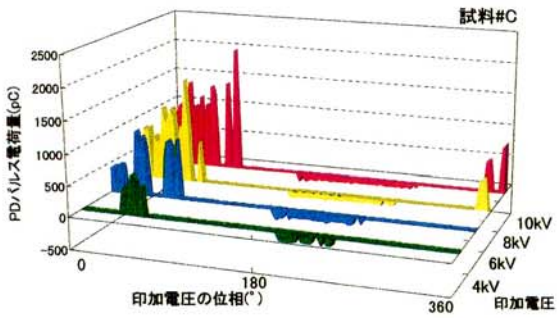
(b) 試料#A, 界面空隙: 400 μm

図7 / 印加電圧と試料#AのPDパルス電荷量

Fig.7/Relation between applied voltages and PD pulse charges of specimen #A



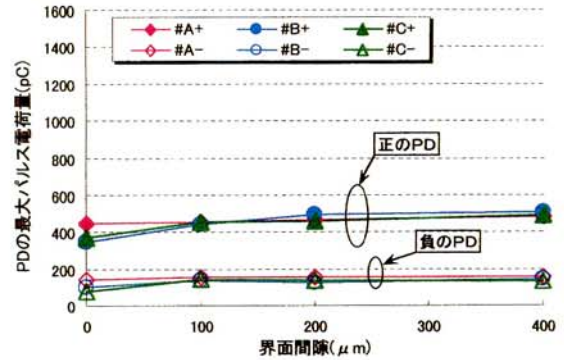
(a) 試料#C, 界面空隙: 0 μm



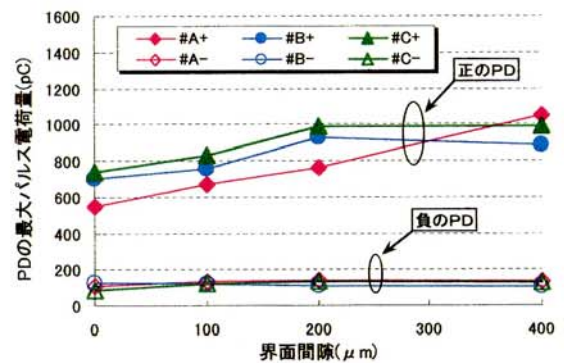
(b) 試料#C, 界面空隙: 400 μm

図8 / 印加電圧と試料#CのPDパルス電荷量

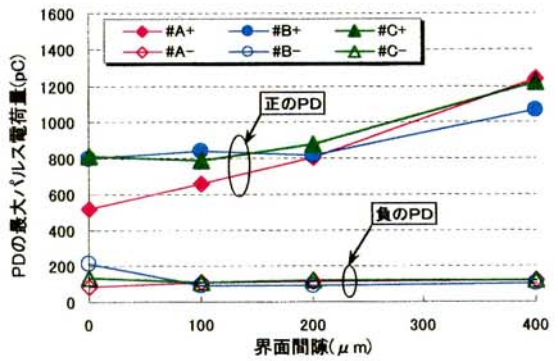
Fig.8/Relation between applied voltages and PD pulse charges of specimen #C



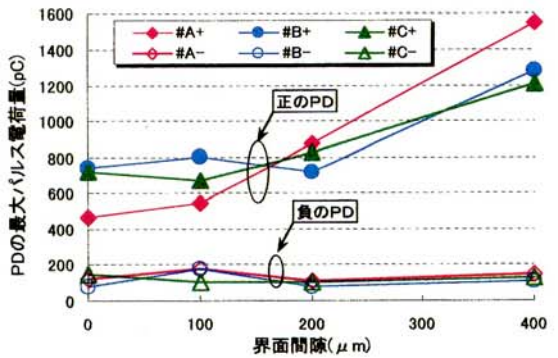
(a) 印加電圧: 4 kV



(b) 印加電圧: 6 kV



(c) 印加電圧: 8 kV



(d) 印加電圧: 10 kV

図9 / 印加電圧とPDの最大パルス電荷量

Fig.9/The maximum PD pulse charge of the specimens at different voltage applications.

光は強くなり、また界面に沿って徐々に伸展していくことが分かる。

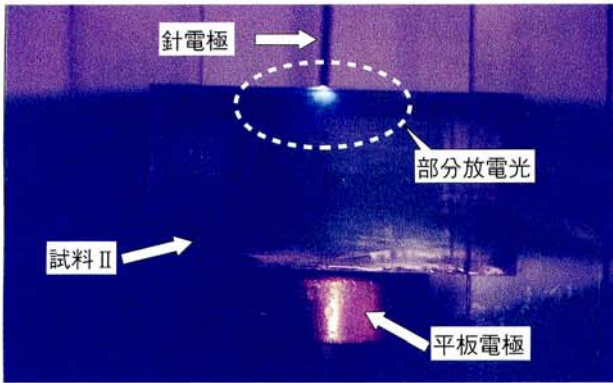


図10/試料IIの交流部分放電光の観測
Fig.10/PD luminescence of specimen II

表3 / 針-平板電極系の電界解析値及びPD開始電圧
Tab.3/ Analyzed values of electric field strength and PD inception voltages with needle-plate electrodes

	Case 1	Case 2
針電極先端付近の最大電界解析値 (kV/mm)	0.403	1.29
PD開始電圧 (kV)	5.2	約3.0 (試料#A,#B,#Cの平均値)

Case 1 : 針-平板電極間の空気ギャップの距離を18.5mmにした場合
Case 2 : 図1に示す針-平板電極間に試料Iを含んだ空気ギャップの場合

4 考察

4.1 PDについて

電極系の構造により針電極先端付近の電界強度が最も高く、試料のPDは針電極先端付近で発生し始めると考えられる。表3に針-平板電極系の電界解析値及びPD開始電圧を示す。Case1とCase2の電界解析値は針-平板電極間に1kV印加として算出した値である。Case2は針-平板電極間の空気ギャップに試料Iを挿入することによって針電極先端付近の電界強度はCase1に比べ、約3倍に増加する。この結果からCase2のPD開始電圧は理論上Case1の約1/3になるが、実験で得られたCase2のPD開始電圧はCase1の約60%であった。このようにPD開始電圧が電界強度の増加に対し、低下する割合が小さくなる現象はPDが発生する前に針電極先端より放出された電子が、それと対向する界面に蓄積し、針電極先端の空気ギャップ部の電界を緩和したのではないかと考えられる。このようにPD開始電圧が電界強度の増加に対し、低下する割合が小さくなる現象はPDが発生する前に針電極先端より放出された電子が、それと対向する界面に蓄積し、針電極先端の空気ギャップ部の電界を緩和したのではないかと考

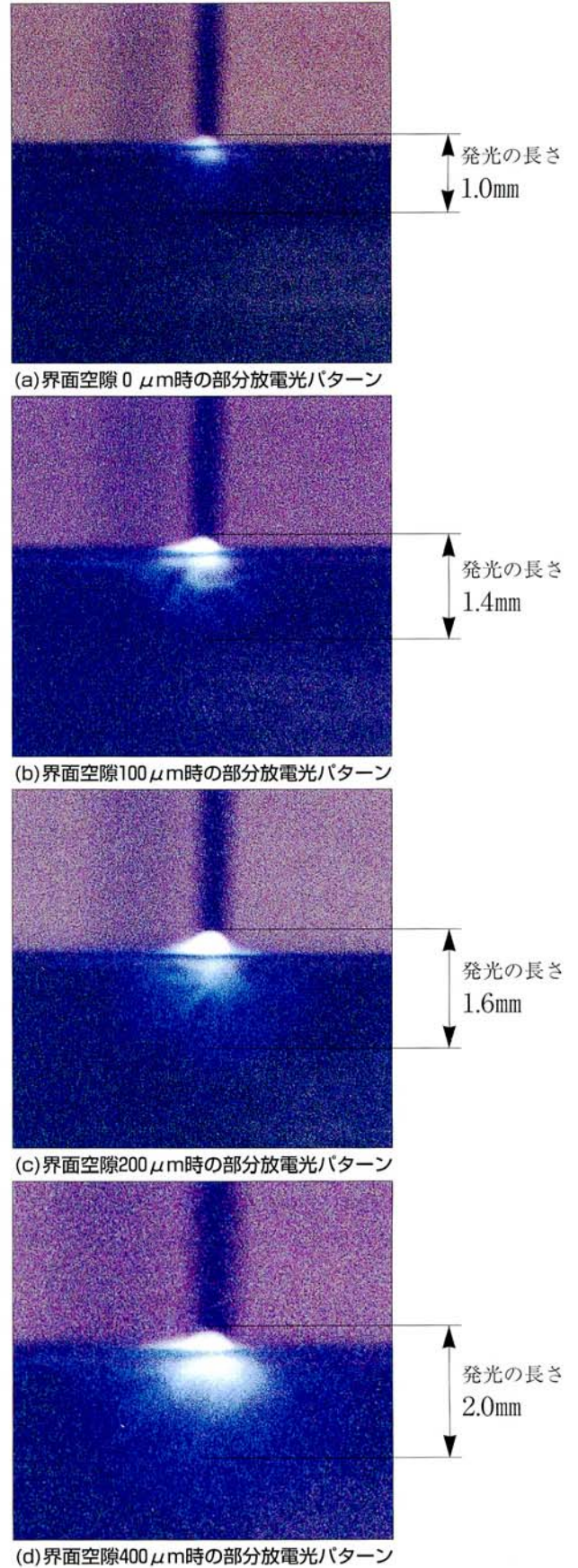


図11/試料IIの部分放電光パターン (印加電圧6.5kV, 界面空隙: 0,100,200,400 μm)
Fig.11/PD luminescence of specimen II (applied voltage:6500V, interfacial gap: 0.100.200.400 μm)

えられる。

界面の荒い試料#B, #Cが, 界面が平滑である試料#AよりPD開始電圧が高いのは, 前者の電界緩和効果がより顕著になったためと考えられる。今回の実験データだけで断定はできないが, 荒い界面における顕著な電界緩和は, 当該部に蓄積した電荷の平板電極までの実質移動距離が長く, かつ電荷の付着面積が多くなるためと推定される。

試料 I にPD開始電圧より高い電圧を印加した場合, 負のPDのパルスは電荷量が小さく, 発生頻度が高い。また, 正のPDのパルスは電荷量が大きく, 発生頻度が低い。更に印加電圧の上昇に従って, 負のPDより正のPDの方がパルス電荷量が大きくなり, 界面荒さ及び界面空隙に影響され易いことから, 負のPDは針電極の先端部分の空气中に発生し, 正のPDストリーマは界面に沿って伸展すると推定できる。

4.2 部分放電光及び正のPDに対する界面の影響

試料 II にPD開始電圧の約2倍の電圧を印加すると, 界面空隙の拡大に伴い試料 II の部分放電光が強くなり, 界面に沿って伸展していく傾向が確認できた。また, 部分放電光観測の実験条件と最も近い図9(b)に示す試料#Aの正のPDパルス電荷量を比較すると, 界面空隙の拡大に伴って正のPDパルス電荷量が大きくなることが分かった。これらの結果から, 今回観測された部分放電光は正のPDストリーマによる放電発光と考えられる。

正のPDに対する界面荒さと界面空隙の影響の要因は, そのストリーマが界面内部への伸展に必要な空間, 界面凹凸による沿面バリヤ効果及び界面に蓄積した電荷などと考えられる。図7(a)に示す試料#A, 界面空隙 $0\mu\text{m}$ 時の正のPDパルス電荷量は, 印加電圧を 10kV まで上昇させても, そのパルス電荷量は変化が少ないこと, 及び図11に示す試料 II は界面空隙の拡大に伴って正のPDストリーマが界面に伸展し易くなることから, 界面の空隙が極めて狭いと正のPDストリーマが伸びにくいことが分かった。また, 図8に示す試料#Cの場合は, 界面が荒いことから界面空隙 $0\mu\text{m}$ でも実質は若干の空間を有するので正のPDストリーマが伸展することができる。その結果, 印加電圧の上昇に伴う正のPDパルス電荷量の増大に寄与したと考えられる。

一方, 図9(d)に示すように試料 I に 10kV の高電圧を印加した場合, 界面空隙の拡大に伴い試料#Aの正のPDパルス電荷量の増大が試料#B, #Cのそれより顕著になる傾向が認められた。これは界面が荒いほど, 当該部の凹凸により伸展するPDストリーマに対する沿面バリヤ効果が増したためと考えられる。

5 あとがき

針-平板電極系における界面空隙を有する固体絶縁体を介した空気ギャップの部分放電, 特に正の部分放電パルスは, 界面の状態により変化することを確認し以下の結果を得た。

- ① 界面が平滑である試料の部分放電開始電圧は界面の荒い試料より低い。
- ② 部分放電特性に及ぼす界面空隙及び界面荒さの影響は試料に印加した電圧によって異なり, 印加電圧が低い場合影響は少なく, 印加電圧が高くなるとともに影響が顕著に現れる。
- ③ 部分放電光の観測では, 界面空隙の拡大に従って, 正のPDストリーマは界面に伸展し易くなり, これに伴って正のPDパルス電荷量が大きくなる傾向を示し, 界面が平滑なほど, その増加率が高いことが分かった。

今回の実験により, 界面に蓄積した電荷はPD開始時に針電極先端の電界を緩和し, PD開始電圧に影響を与えることが確認された。しかし, 同様にPD継続中に界面に蓄積した電荷は後続のPDに影響を与えると考えられるものの, 当実験では検証しておらず, 今後の課題としたい。また, 部分放電光の観測をより短時間で行えるように改良し, 界面荒さの差が, 界面におけるPDストリーマの伸展具合にどのような影響を与えるのかを調査する予定である。

参考文献

- (1) 「固体絶縁材料の界面効果」, 電気学会技術報告, No.488, (1994)
- (2) H.C. Kärner and M. Ieda: "Technical Aspects of Interfacial Phenomena in solid Insulating System". Proc.3rd ICPADM, P.592-597 (1991)
- (3) 御所, 遠藤, 福島, 角山: 「接触界面に生じる界面放電の特性」, 電気学会研究会資料, DEI-97-40, P.73-78 (1997)
- (4) 赤木, 長尾, 小崎, 田中: 「高分子固体内部界面における電気絶縁特性評価用試料の開発」, 電気学会研究会資料, DEI-97-43, P.91-96 (1997)
- (5) 久野, 鈴置, 水谷, 内田: 「固体絶縁体界面を模擬した電極系による部分放電劣化特性の検討」, 電気学会研究会資料, DEI-97-42, P.85-90 (1997)
- (6) Y. Yamano and T. Tsurumizu: "Effect of Charge Accumulation on ac Breakdown through a Crack between Two Insulating Walls". IEEE Trans. Dielectrics E.I., Vol.2, No.3, P.492-498 (1995)
- (7) 劉, 石田, 長尾, 小崎: 「エポキシ樹脂界面における部分放電特性に及ぼす界面圧力の影響」, 第28回電

気絶縁材料シンポジウム IV-1, P.95-98 (1996)

- (8) 劉, 甲斐, 長尾, 小崎: 「絶縁物界面に連なるボイドにおける部分放電特性」. 電気学会研究会資料, DEI-97-61, P.55-60 (1997)

筆者紹介



竜 正城

電力事業本部 変圧器事業部
技術部
モールド変圧器の基礎技術の研究・
開発に従事



甲斐 義信

電力事業本部 変圧器事業部
技術部
モールド変圧器の設計・開発に従事



長尾 雅行

豊橋技術科学大学 電気電子工学系
助教授
高分子の高電界電気物性・絶縁劣化
現象に関する研究に従事



小崎 正光

豊橋技術科学大学 電気電子工学系
教授
高分子の電気特性, 極低温電気絶縁
に関する研究に従事