

微小空隙における部分放電現象の研究

平成二十四年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程

電気電子工学専攻

越智 潤

目次

第1章 序論

- 1-1 研究背景
- 1-2 気中放電現象
- 1-3 本論文の構成

第1章参考文献

第2章 球平板電極を用いた試験による PDIV、PDEV の研究

- 2-1 目的
- 2-2 実験条件
- 2-3 実験結果
- 2-4 まとめ

第2章参考文献

第3章 X線照射による励起がMG I、IG I ツイストペアの部分放電に与える影響

- 3-1 目的
- 3-2 実験条件
- 3-3 実験結果
- 3-4 まとめ

第3章参考文献

謝辞

業績リスト

第1章 序論

1-1 研究背景

現在、電力需要の増加に伴って送配電設備、特に変圧器の需要が高まっている。特に、モールド変圧器は、油入り変圧器やガス絶縁変圧器などの他の変圧器に比べて耐環境性、難燃性と言う観点から、近年配電分野における適用が拡大しつつある。モールド変圧器に使用される絶縁物（エポキシ樹脂）は、その製造プロセスの注型処理・キュア一行程において、完成したモールドコイルの内部にボイドなどの製造欠陥の生じる可能性が否定できない。電気機器は、通常の定格電氣的ストレスに加えて、機器稼働に伴って発生する熱的、機械的なストレス、設置環境条件下（気温、湿度、日光等によるもの）における様々なストレスが加わっている。これらのストレスにより、新たにボイドや剥離が経年的に発生する可能性が有り、また前述した製造絶縁欠陥が拡大する可能性もあり得る。

これらの絶縁物内部の微小な欠陥部では、局所的な放電（部分放電）が発生して絶縁物であるエポキシ樹脂やポリマー絶縁シートなどを劣化させ、これらの劣化の進展によって絶縁破壊に至る可能性があることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。従って、微小空隙における部分放電の研究は、モールド変圧器の信頼性を向上すること並びに製造プロセスにおける品質検証手段の革新において、重要な意味を持つ。

1-2 気中放電現象

衝突電離係数 α の値が 0 を越える程度に電界を大きくすると、陽極に到達する電子の数は急増する。これを継続して放電開始に移行させるためには、電離増倍の元になる電子を何らかの過程で再び作り出す機構（二次電子放出機構）が必要になる。この二次電子放出機構として考えられる要因は以下の 5 つである。

- (1)電離増倍によって生じた正イオンが陰極に衝突して電子を放出する。
- (2)電離と同時に起こっている衝突励起や再結合によって発生した光が陰極にあたって光電子を放出する
- (3)同じく衝突励起によって生じた準安定励起粒子が陰極衝突して電子を放出する。
- (4)(2)で発生した光が周囲の気体原子・分子に吸収され光電離を起こして電子を放出する。
- (5)空間の負イオンから離脱によって電子を放出する

(1)~(3)は陰極からの二次電子放出 (γ 作用) されるタウンゼント理論である。また(4)、(5)は気体空間内での二次電子放出であり、ストリーマ理論とされている。

・タウンゼント理論

タウンゼント理論とは、 n_0 個初期電子は陰極から出発し、陽極へ向かう途中 α 作用によって電子と正イオンを多数発生させる。この電子なだれの中では、電子の移動度が正イオンの移動度より非常に大きいので電子は進行方向の最先端部に集中し、それに対し正イオンは発生した場所にとどまるような分布になっている。

電子なだれの先端にある電子は $n_0 e^{\alpha d}$ 個となって陽極に流入する。すなわち、電子は n_0 個から $n_0 e^{\alpha d}$ 個となり、その差 $n_0(e^{\alpha d}-1)$ 個だけ増加したことになる。この増加した電子数と同じ数の正イオンが同時に発生している。

空間に存在する正イオンは、電界ドリフトで陰極方向へ移動する。正イオンは最終的に陰極と衝突し、陰極から電子をもらって中性の原子・分子に戻る。その衝突の際、正イオンの運動エネルギーが大きいと、そのエネルギーによって陰極から自由電子を放出させる場合がある。これが正イオンによる γ 作用である。 γ 作用で電子放出が起こる確率を γ 係数という。 γ 係数は陰極の材料や気体の種類によっても異なるが、 $10^{-3}\sim 10^{-6}$ 程度という小さな値である。つまり、1千~100万個の正イオンが陰極に衝突して、ようやく1個の電子が放出される。いずれにしても、 γ 作用で放出される電子を二次電子と呼び、その数は正イオン数が $n_0(e^{\alpha d}-1)$ 個であることから $\gamma n_0(e^{\alpha d}-1)$ 個で表される。

十分な正イオンが陰極に衝突し、 γ 作用によって n_0 個の二次電子が放出されるならば、最初と同じような電子なだれが再度進展することになる。そこで、最初と同じ数の正イオンが作られ、それが陰極に衝突し、再び n_0 個の二次電子が放出される。

これ以降も同じ過程が繰り返され、電離現象が継続することになる。つまり二次電子の数が n_0 個以上であれば、電離現象が維持ないしは増大されることとなる。これをもって放電開始といえることができる。つまり、

$$\gamma(e^{\alpha d}-1)=1 \quad (1)$$

と書くことができる。

・ストリーマ理論

図 1-1⁽³⁾にストリーマ理論で考えられる放電過程を示す。まず、陰極からスタートした初期電子は、衝突電離を繰り返して、電子なだれとして成長する (a)。その先端にある電子群が陽極に到達して陽極に吸収されると、空間に正イオンが残される。その状態で、正イオン群付近から放出される光が周辺の空間にある中性の原子・分子に吸収され、光電離を発生させる (b)。光電離で生じた電子 (二次電子) は、陽極及び正イオンが作る電界によって加速され、衝突電離を伴う新たな電子なだれを形成する (c)。この電子なだれは子なだれと呼ばれる。

また、Meek、Raether、L.B.Leobによってストリーマの発生条件は「最初に陰極からスタートした電子なだれ先端の電子数が 10^8 個程度になるとストリーマになる」と提唱している。

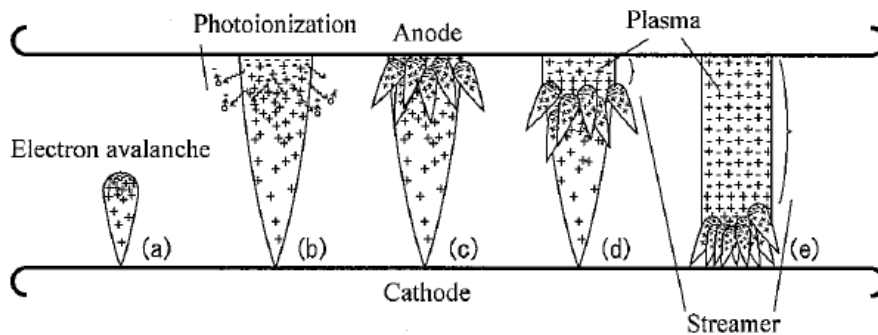


図 1-5 電子なだれからストリーマへの転換

・グロー放電

図 1-2 グロー放電の気体圧力、放電の様子、電流の大小、電離や電子放出の機構の略図を示す。図 1-2 より、陰極ではタウンゼント理論の持続放電開始条件が成立しており、それに必要な二次の供給は正イオンの陰極衝突による γ 作用で行われていることがわかる。

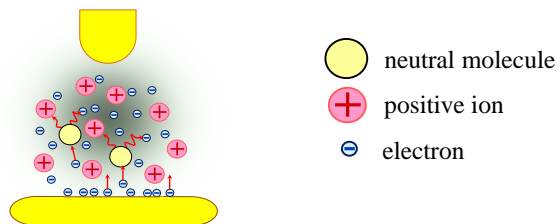


図 1-2 グロー放電メカニズム

また、図 1-3⁽⁴⁾に放電間に可変抵抗を通じて直流電圧を加えた時の電流と電圧の変化を示す。図 1-3 の中央には、電流が変化しても電圧が一定になる領域が存在している。これを正規グローと呼ぶ。

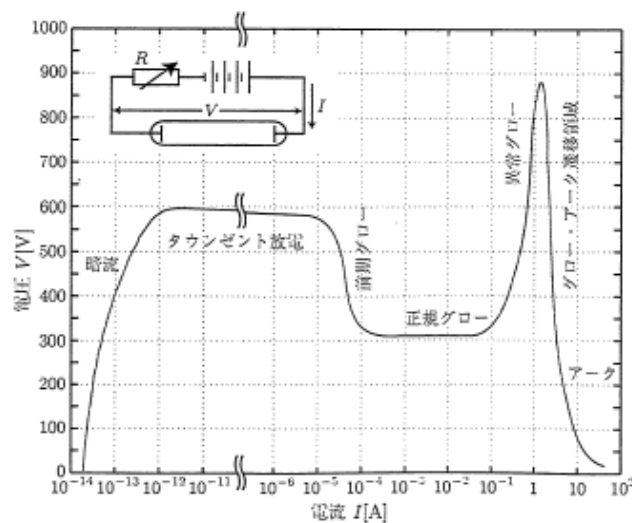


図 1-7 グロー放電の電圧電流特性

1-3 本論文の構成

本論文は、3章構成となっている。

第1章では、研究背景、研究目的と気中における放電現象についての報告をまとめたものについて述べる。

第2章では、球平板電極における PDIV-PDEV に関する研究を行った。球平板電極系における PDIV と PDEV 特性を研究することにより、微小空隙における部分放電現象の初期電子供給機構についての検討を行った。

第3章では、X線照射を行い、励起したツイストペアサンプルの部分放電特性に関する研究を行った。ツイストペアサンプルを用いることにより、球平板電極系とは異なる微小空隙の形に対して部分放電現象の解明を行った。また、X線照射による励起が部分放電特性に与える影響を比較することにより、部分放電時の初期電子供給機構について検討を行った。

第 1 章参考文献

- (1) J. H. Mason: “Discharges”, IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-13, No.4, pp.211-238 (1978)
- (2) Hepburn, D.M. Kemp, I.J. Shields, A.J. Cooper, J : “Degradation of epoxy resin by partial discharges”, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings vol. 147, pp. 97 - 104 (2000)
- (3) 武藤三郎 : “電力用機器”, 森北出版, 第 1 刷, p 110 (1973)
- (4) 日高邦彦 : “高電圧工学”, 数理工学社, (2009)

第2章 球平板電極を用いた試験による PDIV、PDEV の研究

2-1 目的

本章は球平板電極を用いた試験による PDIV、PDEV の試験結果を報告する。モールド機器の絶縁システムは、空気の絶縁破壊電圧、すなわち火花電圧に関する Paschen 則^(1,2)と深い関係が有り、機器の設計や製造において Paschen 則は重要視されている。従って、様々な観点から Paschen 則の圧力 (p) とギャップ長 (d) に対する火花電圧は考えられている。図 2-1 は、これまでに報告されている数多くの文献⁽¹⁻⁹⁾のデータを検討・整理して、モールド絶縁システムに重要と考えられる代表的なデータを整理してまとめた。文献のデータは、Hackam ら⁽⁷⁾ と Schreier⁽³⁾が交流 (ac-peak)、そのほかは直流 (dc) である。ここでは、横軸を Paschen 則の圧力とギャップ長との積 $p \cdot d$ [Pa·m] で整理した。これらの測定結果は全て PDIV 値によるものである。

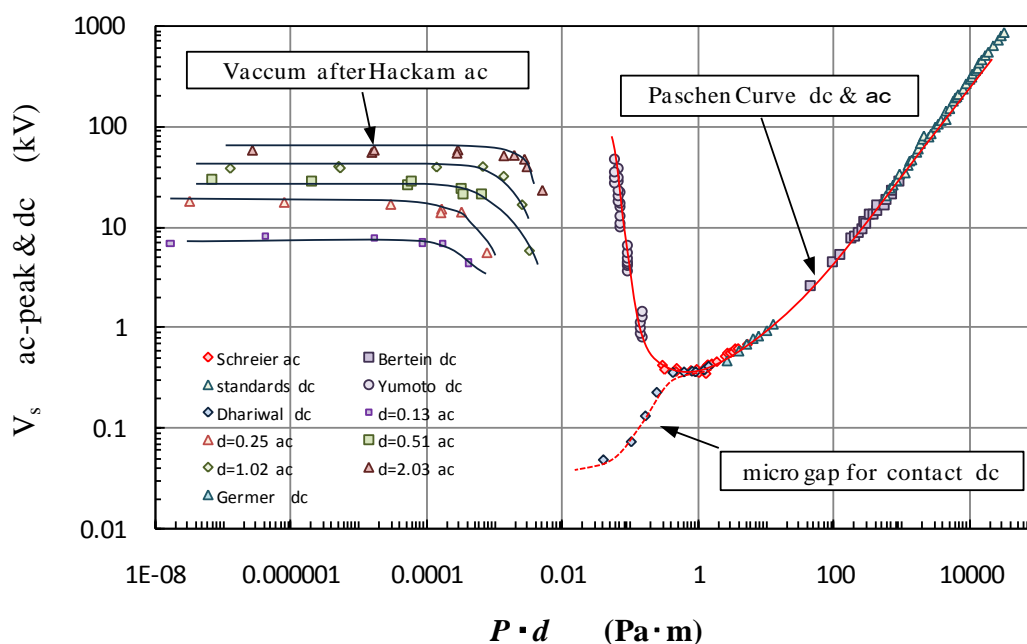


図 2-1 Paschen 則レビュー

ボイドサイズに対する PDIV、PDEV の関係⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾や、磁場の有無に対する PDIV、PDEV の関係⁽¹²⁾は報告されているが、圧力とギャップ長の積に対する PDIV、PDEV の関係については報告されていない。放電消滅時の初期電子供給機構は、放電開始時と比べると異なることが予想されるので、PDIV-PDEV の特性を研究することにより、部分放電時の初期電子供給機構についての検討を行うことを目的としている。

また、絶縁体内部の部分放電現象に特有な問題として Self Extinction 現象(電圧印加下の持続放電中に急に部分放電が消えてしまう現象)が指摘されている⁽¹³⁾。ボイド壁における導電化、内圧の上昇による放電の消滅等の様々な理由が考えられているが、明確な証拠は得ら

れていない。PDEVについての研究は、電圧降下中におけるExtinction 現象と言えるので、Self Extinction 現象の解明に繋がることも期待される。

2-2 実験条件

本項目では使用した実験回路を図 2-2 に示す。また表 2-1 に本章で用いた機器をまとめて示す。LeCroy Oscillo(WAVE SURFER 454:LeCroy Co.)(以降、オシロスコープ)内に内蔵されたプログラムによって Test electrodes (以降、電極系) に印加する電圧を制御した。

まず、オシロスコープ内のプログラムの指示により Signal generator (WF1973:NF ELECTRONIC INSTRUMENTS) から 0~1.1[V]、60[Hz]の正弦波交流が出力される。次に AC Amplifier(4520 PRECTION POWER AMPLIFILTER:NF ELECTRONIC INSTRUMENT)により 100 倍に昇圧される。次に、変圧器 (VE-6CP:東芝産業機器(株)) により 60 倍に昇圧される。以上より、昇圧された電圧が、電極系へ印加される。

電極系は 47[k Ω]の制限抵抗を通して、1000[pF]のコンデンサと 10[mH]のブロッキングコイルからなる Coupling condenser(DAC-LCC-30:総研電気(株))(以降、カップリングコンデンサ)と並列に接続されている。

放電開始電圧の測定は、電極系と並列に接続された Detection impedance(DI-21: (株)日本計測器製造所社)(以降、検出インピーダンス)により行っている。検出インピーダンスはカップリングコンデンサと並列に接続され、CD-6(同調式部分放電検出器 CD-6: (株)日本計測機器製造)に接続されている。

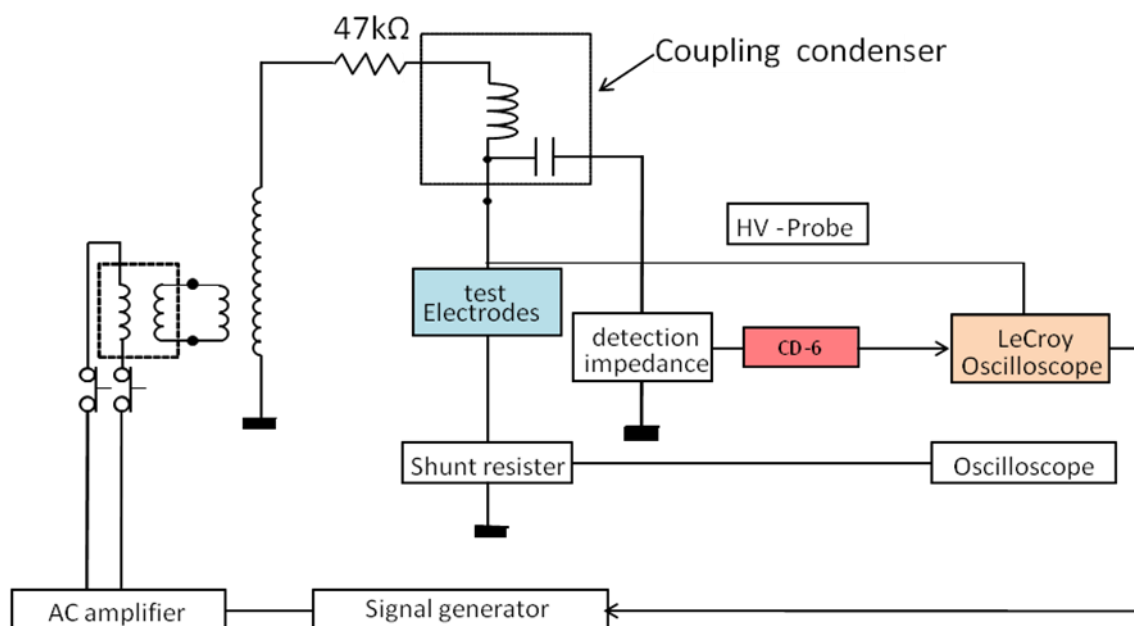


図 2-2 実験回路図

表 2-1 使用機器表

機器名	型番	製造会社	備考
Signal generator	WF1973	NF	
AC amplifier	4502	NF	
Test Electrodes		自作	
LeCroy Oscillo.	WAVESURFER 454	LeCroy	周波数帯域：500[MHz]
Detection impedance	DI-21	(株)日本計測器製造所	
同調式部分放電測定器	CD-6	(株)日本計測器製造所	同調中心周波数： 400[kHz]
変圧器	VE-3CP VE-6CP	(株)東芝産業機器 (株)東芝産業機器	
Coupling condenser	DAC-LCC-30	総研電気(株)	静電容量：1000[pF] 誘導係数：10[mH]
Current transformer		CTL-28-S90-05Z-1R1	周波数帯域 2[kHz]-100[MHz] 電流測定域 10[mArms]-10[arms]
Probe	PPE 20[kV]	LeCroy	耐圧 20[kV]

・電極系を設置するフランジ

本研究では、減圧下で実験を行っていることから、電極系はアクリル製のフランジ容器の中に設置している。図 2-3 に本研究で用いたフランジの外観を示す。使用するフランジは、内径約 360[mm]、高さ約 340[mm]、体積約 0.0346[m³]のものを使用している。本研究におけるフランジ内圧力は次の手順で調整を行なっている。電極系をフランジ内に設置後、真空ポンプにてフランジ内の空気を 100[Pa]以下になるまで脱気する次に側面のニードルバルブから、乾燥空気を流入させる。所定の測定圧力に達するように調節を行う。

測定は全て 25[°C]に保った環境で行ない、タンク内は遮光のためシールドルーム内に設置し、光による初期電子の発生を極力防止している。

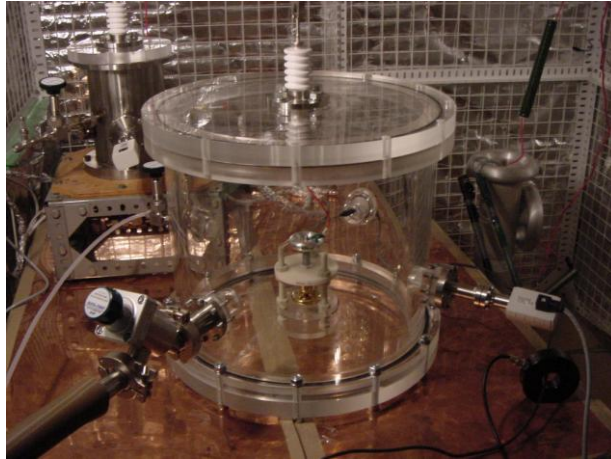


図 2-3 フランジ全体図

・電極構成

図 2-4 に本研究で用いた電極系のモデル図を示す。図に示すように、上部電極を半球電極、下部電極を平板電極とした構成からなる電極系である。電極間における空隙距離の調整は、上部板に固定したマイクロメータの先端部にアタッチメントを介して電極を取り付ける事により行えるようになっている。また、この電極系に用いた治具は、高電圧下での測定を考慮し、上段板は MC ナイロン製、中、下段板はアクリル製、支柱となるネジ及びナットはレニー（ポリアミド MXD6 系複合成形材料）としている。

用いた電極は上部電極、下部電極共に真鍮製である。上部電極は、半球部の半径が 12.5[mm]、(直径 25[mm])、円筒部が半径 12.5[mm]、(直径 25[mm])、長さ 12.5[mm]である。下部電極は、全体の直径が 50[mm]、厚みは 5[mm]である。

電極は、フランジ内に設置する前に洗浄を行っている。トルエンに電極を浸け、5 分間超音波洗浄を行った後に、アルコールで表面をよく拭いたものとした。

・電極間距離調整方法

電極間距離は球電極と平板電極に図 2-4 のモデル図上部に示すテスト(2G-3665-0 PERMISSIBLE MULTIMETER、FLUKE)のプロブを当てた状態で球電極を徐々に平板電極に近づけていき、両電極間が導通した点で止め、マイクロメータのメモリを読みゼロ点とした。その後球電極をマイクロメータ(Mitutoyo、MHA1-13)を回転させながら平板電極から遠ざけていくことで調整を行った。マイクロメータの最小目盛りは 10[μ m]であり、本測定の精度は 50[μ m]である。

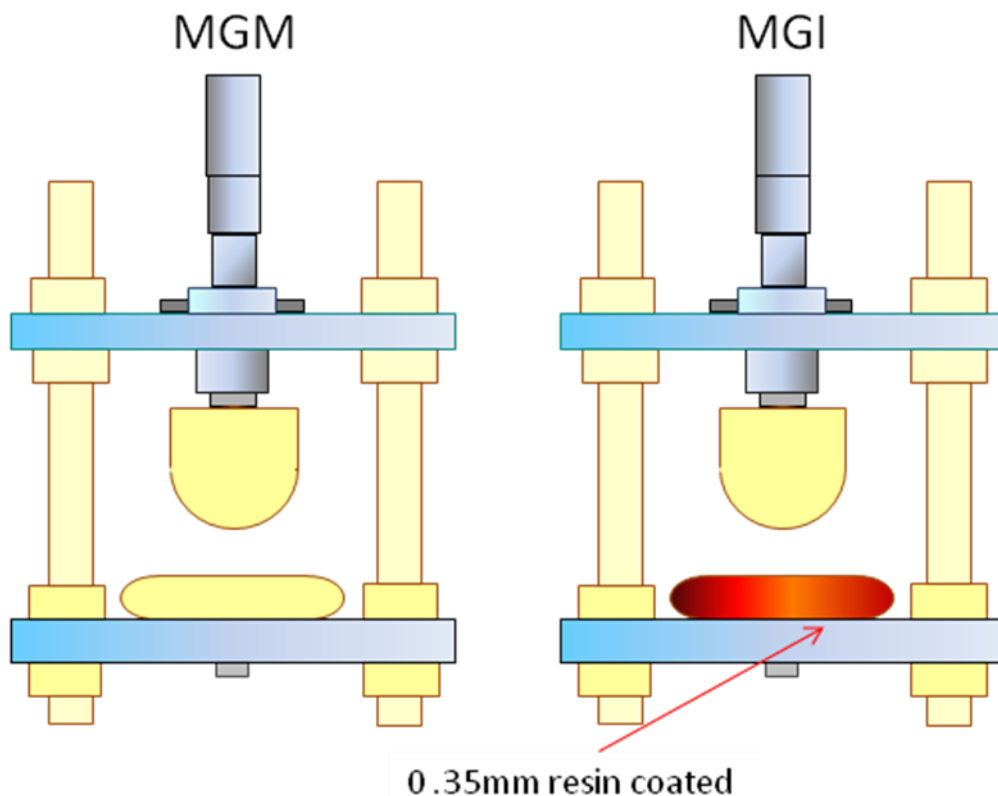


図 2-4 各電極系のモデル図

・注型によるコーティング平板電極系の作製方法

注型による作製は、電極に望んだ厚さの膜が均一にできるように設計した鋳型に電極を固定し、気泡が生じないように真空条件下でエポキシ樹脂を注入し、電気炉にて硬化させた。その後鋳型を分解し、電極を鋳型から取り出してコーティング電極とした。以下に作製手順を示す。

・手順

[1]注入容器作成

1. ビニールカップ(小)の底に 9φ の穴を開け、ここにガラス管を通す。このときなるべくカップの内側の底からガラス管の頭が出ないようにする。

2. ガラス管とビニールカップ(小)の間を室温硬化型接着剤で接着する。図 2-5 に作製した注入容器を示す。



図 2-5 作成した注入容器

[2]型の準備

1. 図 2-6 にコーティング金型を示す。離型剤(KS-707、信越シリコーン)をコーティング金型表面全体および側面、裏、ネジ穴に薄く塗り、20 秒以内に拭き取る。表面に離型剤の膜が凹凸にならない様、また塗りむらができないように電極の放電面に接する部分は丁寧に塗る。金型を組み立てるネジは、ネジ用離型剤(QZ13、ナガセケムテックス)を塗っておく。



図 2-6 コーティング金型

2. 電極表面に傷や油がつかないようにゴム手袋を装着し、電極を M4 のネジで型に固定する。固定したら、電極表面に当たらないように慎重に型を重ね合わせる。
3. 重ね合わせた型をネジで固定する。ネジ頭側にスプリングワッシャと平ワッシャ、ナット側にスプリングワッシャをかませてナットで閉める。図 2-7 に組み立てた型を示す。

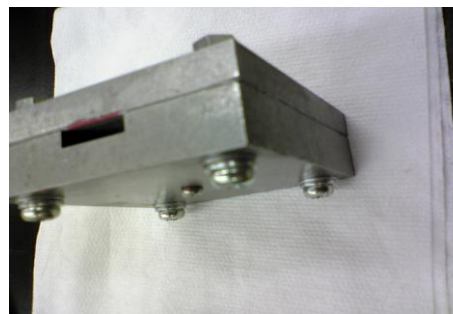
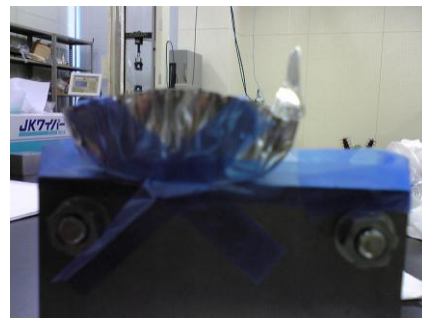


図 2-7 組み立てた型

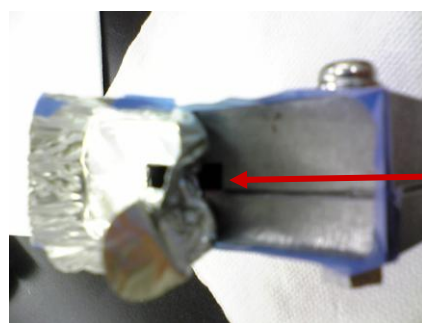
4. アルミカップを用いて、レジンを注入する導入口を作る。型の注入口の半分から樹脂を入れ、半分から空気が抜けるようにするため、注入口の半分程度の大きさの穴をアルミカップに開け、ポリイミドテープで金型の注入口の上に固定する。樹脂が型の側面に流れ出さないようにするため、型にも側面に土手を作っておく。図 2-8 にアルミカップ固定後の型を示す。



(a)上面図



(a)側面図



空気が抜ける穴

(c)空気抜き穴

図 2-8 アルミカップ固定後の型

5. 注型作業時に金型の温度が急速に下がらないようにするために、保温治具として熱容量のある金属板を用意し、恒温層に入れ 115[°C]に余熱しておく。

[3]エポキシレジン^①の準備

1. 天秤を用いて主材 (XNR4153、ナガセケムテックス) と硬化剤 (XNH4153、ナガセケムテックス) を 1 : 1 の割合で混合し、大きめのビニールカップの中でスプーンを用いて丁寧に混合する。
2. 混合した樹脂を 80[°C]に予熱した真空乾燥機(AVO-310N、アズワン)に入れ、真空ポンプ (TSW-300、SATO VAC INC)で 10 分間脱泡する。

[4]型にレジンを注入

1. 三脚に注入容器をビニールカップが落ちないようにしっかり固定し、ガラス管に適当な長さに切ったゴムチューブを取り付け、中間部分をピンチコック(ホフマン式)で閉じる。

2. カップに、混合し脱泡しておいたエポキシ樹脂を 20[ml]程度流し込む。図 2-9 に固定後の注入容器の概略図を示す。

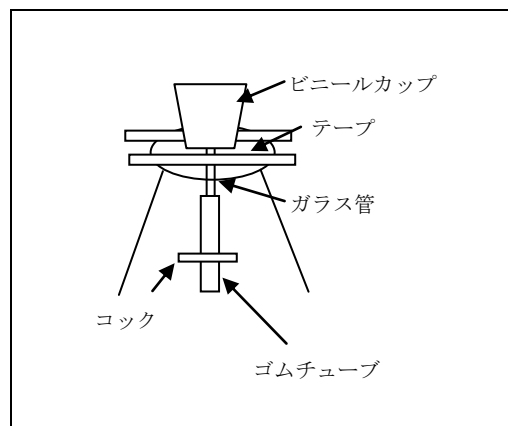


図 2-9 固定後の注入容器

3. 真空乾燥機にて約 10 分間脱泡する。

4. 115[°C]に予熱しておいた型と金属板を取り出し、真空デシケータの中に置く。1 の脱泡した注入容器を三脚から外し、ビニールカップをスタンドにテープで固定した後、デシケータの上部に取り付けたゴム栓を貫通しているガラス管につなぐ。

5. 真空デシケータ内を脱気し、ピンチコックをゆっくり開いて糸状に流れ落ちるような状態でアルミカップの上に樹脂をゆっくりと垂らす。図 2-10 に注入時の概略図を示す。

6. 空気抜き穴から樹脂が溢れてきたら、コックを閉め、真空ポンプを止めデシケータから型を取り出して、真空乾燥機にて約 1 時間脱泡する。

7. 型を恒温槽(DRX 4200A、Toyo Seisakusho Kaisha,Ltd)の中に入れて 100[°C]で 3 時間一次硬化する。

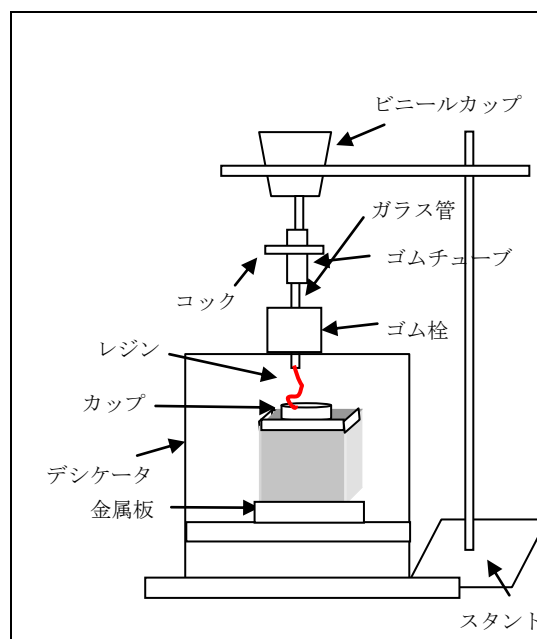


図 2-10 注入時の概略図

[5]取り出し、二次硬化

1. 一次硬化した金型を炉から取り出し、アルミカップを取り、注入口付近についている樹脂をカッターナイフでそぎ落とし固定用ナットを外す。

2. 型の中にマイナスドライバーをあて、上からプラスチックハンマーでたたいて型を外す。

3. コーティング表面に油や傷がつかないように電極を取り外し、120[°C]で 12 時間二次硬化する。

・MGM、MGIの比較方法

まずMGI電極系は図2-11に示す金属-空気層-絶縁層の平行平板構造に近似する。図2-12に示すように、空気中の誘電率、空隙距離と電位差をそれぞれ ϵ_g 、 d_g 、 V_g 絶縁層の誘電率と空隙距離をそれぞれ ϵ_i 、 d_i 、金属間の距離と電位差をそれぞれ d_{m-m} 、 V_{m-m} 、とすると、各層における静電容量は等しいと考えられることから、

$$C_g V_g = C_i V_i \quad (4-1)$$

となる。 C_g 、 C_i は空気層と絶縁層の静電容量を示す。そして、電荷 C は面積 S 、誘電率 ϵ 、ギャップ長 d を用いて

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (4-2)$$

となること、面積は絶縁層と金属表面で等しいことを考慮し、 $\epsilon_g=1$ とすると、空隙分担電圧 V_g は

$$V_g = \frac{V_{m-m}}{1 + \frac{d_i}{\epsilon_i d_g}} \quad (4-3)$$

となることから、観測値 V_{m-m} を用いて導出される。

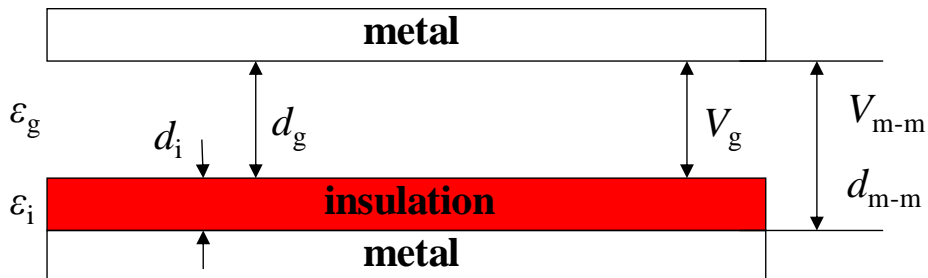


図2-11 仮定した試料構成

・電圧印加手順

図2-12に印加電圧手順を示す。印加電圧はオシロスコープ内のプログラムから、60[Hz]の正弦波交流を60[V/s]で印加していき、CD-6の示す放電電荷量が5[pC]となったところを放電開始として、その時の印加電圧を放電開始電圧として記録する。次に、最初の放電開始を検知したら、同様の昇圧速度でその値の1.2倍まで印加電圧を増加させる。その後、1.2倍に達すると60[V/s]の速度で印加電圧を減少させていき0[V]まで下げる。この過程で、最後に5[pC]以上の放電を観測した瞬間を部分放電消滅電圧と定義し記録する。このサイクルを測定回数だけ繰り返す。

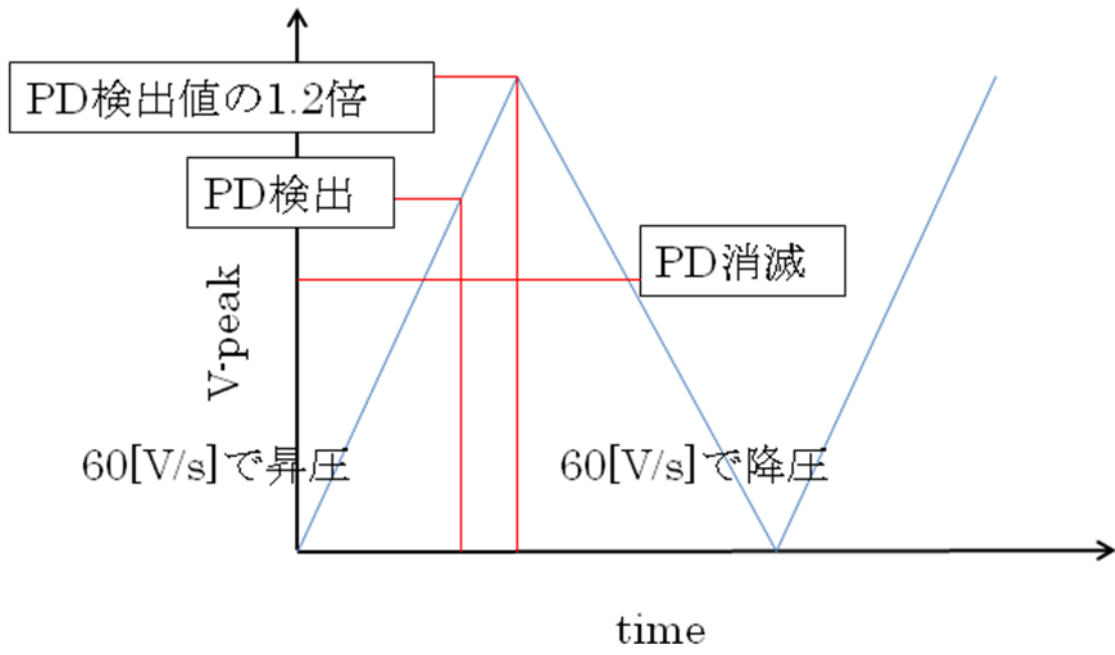


図 2-12 電圧印加手順

2-3 実験結果

図 2-13 に MGM、MGI 型球平板電極を用いた PDIV-PDEV 測定の結果を示す。横軸が測定圧力と空隙距離の積 $[Pa \cdot m]$ 、縦軸が PDIV、PDEV $[V_{peak}]$ を示す。緑色と紫色のマーカーが、MGM 電極を用いた際の PDIV、PDEV を示す。赤色と青色のマーカーが MGI 電極を用いた際の PDIV、PDEV を示す。この結果は、12 回の測定による結果である。

測定圧力と空隙距離によらず、PDIV、PDEV はともに $MGM > MGI$ の傾向を示した。また MGM、MGI 電極系ともに、 $PDIV > PDEV$ の傾向を示した。

PDIV、PDEV ともに、 $MGM > MGI$ の傾向を示した原因は、部分放電発生の原因となる初期電子数の違いにあると考えられる。MGI 電極は絶縁層があることから、MGM 電極に比べ放電後に電荷が残りやすいことが原因であると予想している。

PDIV $>$ PDEV の傾向を示す原因についても同様に、初期電子数の差に原因があると考えられる。放電消滅の瞬間まで断続的に放電は継続しているため、部分放電消滅時に初期電子が豊富に存在しているからだ予想している。

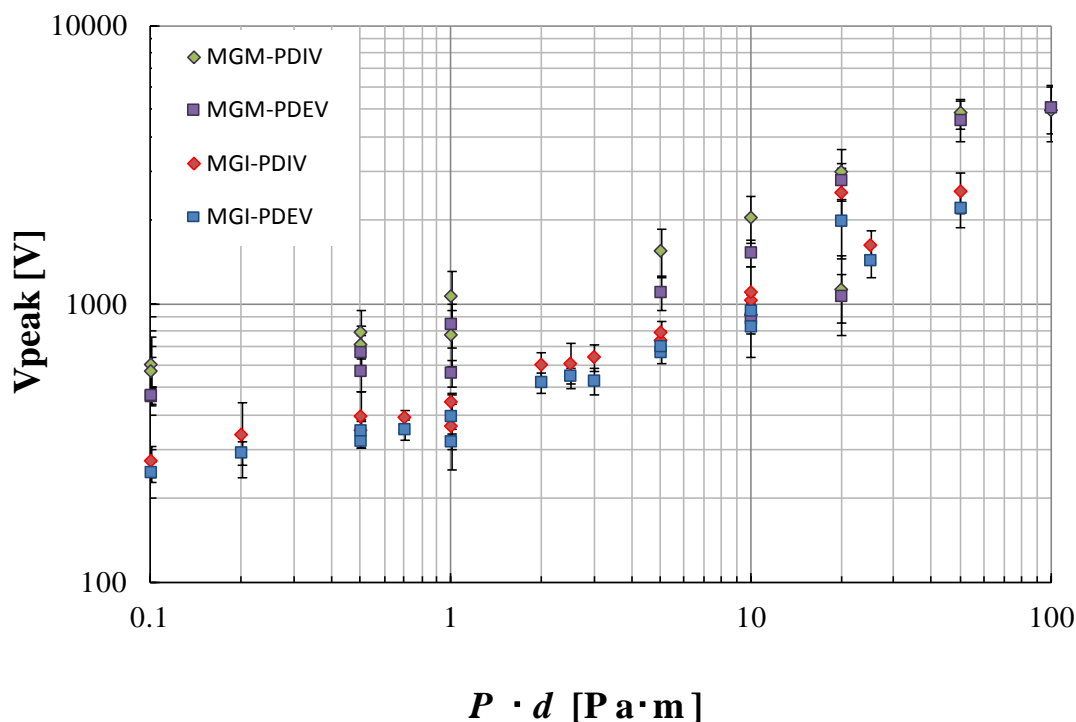


図 2-13 球平板電極を用いた際の PDIV-PDEV

図 2-14 に球平板電極を用いた際の PDIV の PDEV に対する比の値を示す。これは、図 2-13 に示した PDIV-PDEV の結果から計算したものである。横軸が測定圧力と空隙距離の積[Pa・m]、縦軸が PDIV の PDEV に対する比の値となっている。赤色のマーカーが MGM 電極系、緑色のマーカーが MGI 電極系を示す。

MGM 電極系は、およそ 1.2~1.4 倍、MGI 電極系は 1.1~1.2 倍となった。MGM、MGI 電極系のいずれにおいても、測定圧力と空隙距離によらず一定の比となった。このことから、部分放電によって生じる初期電子供給の効果は、0.1~10[Pa・m]の範囲においては一定であることを示唆している。また、PDIV の PDEV に対する比の値が MGM>MGI となった原因は、MGI 電極系の絶縁層によって電荷が残りやすくなったためだと考えられる。

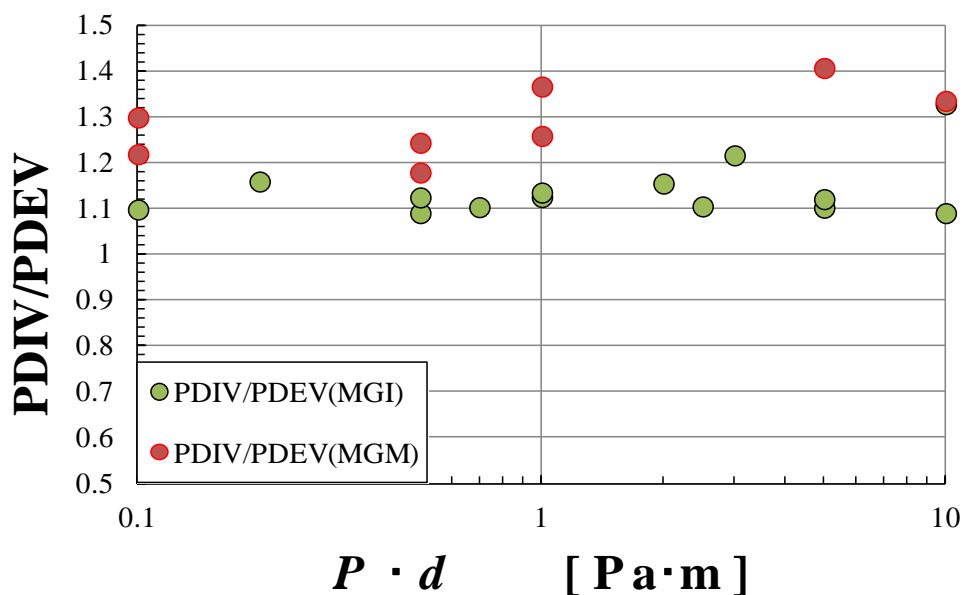


図 2-14 球平板電極を用いた際における PDIV の PDEV に対する比の値

次に、球平板電極を用いた繰り返し放電の試験結果について述べる。試験結果について述べる前に、部分放電開始時の極性についての定義を図 2-15 に示す。MGM、MGI 電極系ともに、球平板電極の球型電極が正、平板電極が負となる瞬間を正極性 (positive) と定義した。

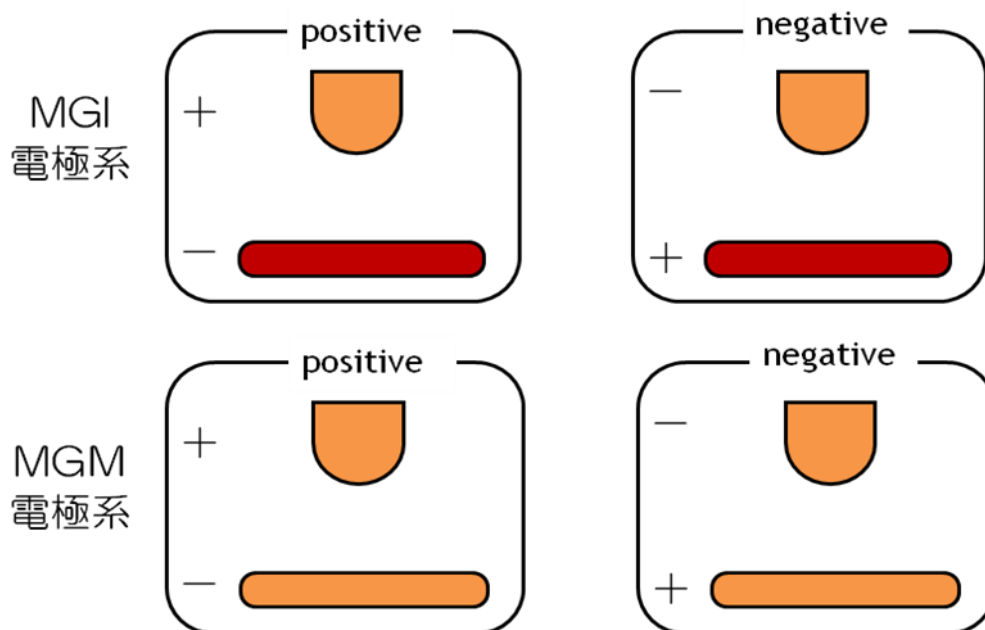


図 2-15 部分放電開始時における極性定義

図 2-16 に繰り返し放電による正極性放電回数をまとめた結果を示す。横軸が測定圧力と空隙距離の積 $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$ 、縦軸が正極性の放電回数を示す。この試験は 100 回の繰り返し放電を行った結果をまとめたものとなっている。黒のマーカーが MGI 電極系、白のマーカーが MGM 電極系の正極性放電回数を示す。

MGM 電極系において部分放電開始時における極性の偏りが見られなかったのに対して、MGI 電極系においては正極性での放電が多数を示した。これは、MGI 電極系の絶縁層表面に電子付着が生じたため、部分放電開始時において極性の偏りが発生したためと考えられる。

図 2-16 に示す結果から、MGI 電極系を用いた際に正極性で部分放電が生じ易いことがわかった。部分放電の生じ易さが PDIV に与える影響を見るため、正極性と負極性の PDIV 値をそれぞれまとめた。図 2-17 に MGI 電極を用いた際の繰り返し放電試験における正極性、負極性の PDIV を示す。横軸が測定圧力と空隙距離の積 $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$ 、縦軸が PDIV $[\text{Vpeak}]$ を示す。赤、青のマーカーがそれぞれ正極性、負極性で発生した部分放電開始電圧を示す。

図 2-18 の結果から、正極性と負極性の PDIV にほぼ差は生じないことがわかった。このことから、球対平板電極において絶縁層表面の電子付着効果は、部分放電発生時の極性のみ影響を与え、PDIV にはほぼ影響を与えないことがわかった。

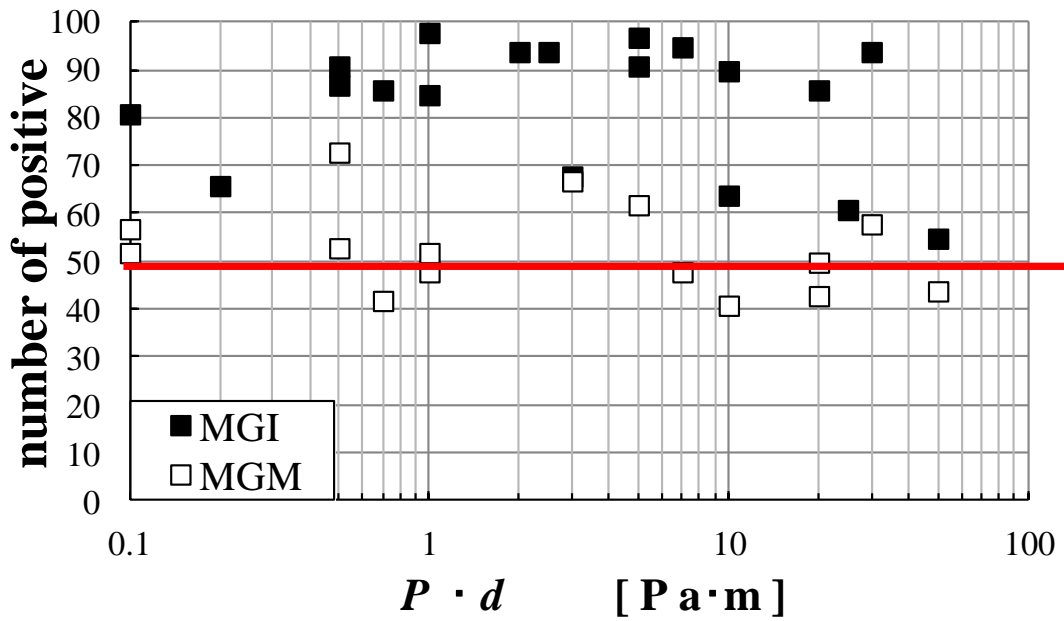


図 2-16 繰り返し放電試験における放電開始時の正極性放電回数

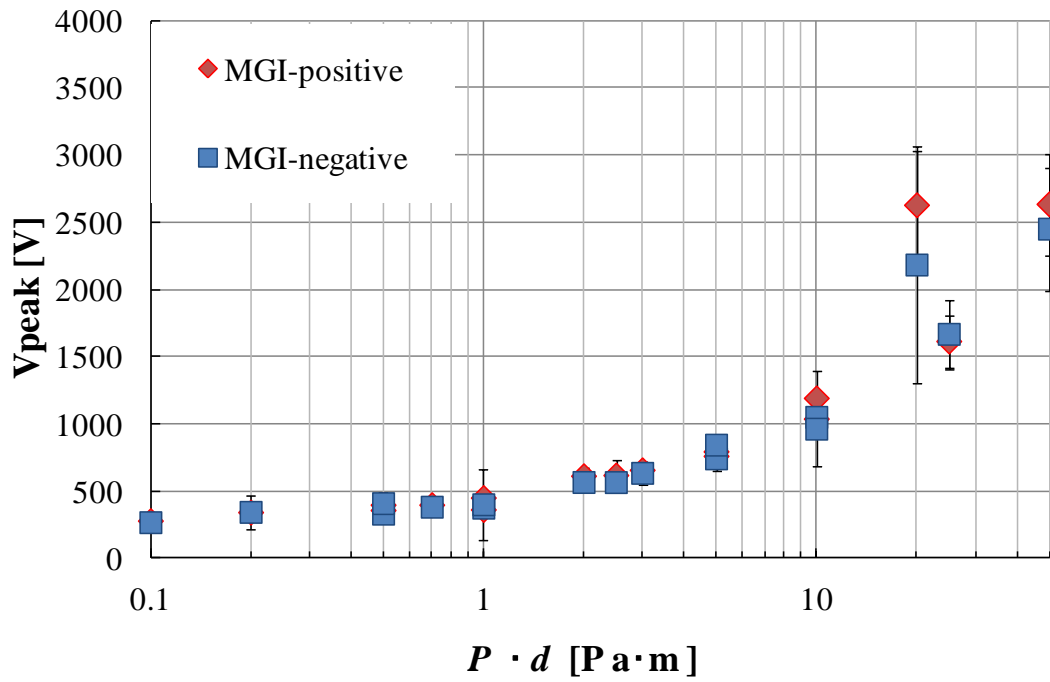


図 2-17 繰り返し放電試験における正極性、負極性の PDIV (MGI 電極系)

2-4 まとめ

- (1) PDIV、PDEV ともに MGM>MGI 電極系の傾向を示した。
- (2) MGM、MGI 電極系ともに PDIV>PDEV の傾向を示した。PDIV に対する PDEV の比は測定圧力、空隙距離によらず一定
- (3) MGI 電極においてのみ部分放電開始時の極性に偏りが生じた。その際の極性は正極性であるが、PDIV は正極性、負極性で差が見られなかった。

(1)、(2)、(3)いずれの結果も初期電子数の違いによって生じていると考えられる。(1)については、MGM 電極に比べ MGI 電極が空隙中に電子が残りやすくなっていることから生じたものと考えられる。(2)については、断続的に発生し続けている部分放電の影響によって、空隙中に電子が存在しているため PDIV>PDEV となっているものと考えられる。(3)については、極性に偏りが生じていることから、絶縁層表面に付着した電子が寄与した結果と考えられる。しかし、PDIV に影響を与えることは無く、発生時の極性に優位差を与える程度の影響であることがわかった。

第2章参考文献

- (1) F. Paschen: "Tuber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen drunken erforderliche Potentialdifferenz", Weid Ann. Physik und Chemie vol.37, p69-81, (1889)
- (2) J.M. Meek and J. D. Craggs: "Electrical breakdown of gases", Oxford Univ. press, pp.533-653 (1989)
- (3) S. Schreier : "On the breakdown voltage of some electronegative gases at low pressure", IEEE Trans PAS-83, pp468-471 (1964)
- (4) 電気学会 : "放電ハンドブック", pp155, 上巻 (1998)
- (5) T. Takuma, T. Kouno and H. Matsuda : "Field behavior near singular points in composite dielectric arrangement", IEEE Trans. EI Vol.EI-13, No.6, pp426-435, (1978)
- (6) L. H. Germer : "Electrical breakdown between lose electrodes in air", J. Applied Physics, Vol.30, No.1, pp.46-51, (1959)
- (7) R. Hackam and L. Altchek : "ac (50Hz) and dc electrical breakdown of vacuum gaps and with variation of air pressure in the range 10⁻⁹-10⁻² torr using OFHC copper, nickel, aluminum, and niobium parallel planar electrode", j. Applied Physics, Vol.46, No.2, pp.627-636 (1975)
- (8) M. Yumoto, N. Yamaoka and T. Sakai : "Current-voltage characteristics of nitrogen-gas discharge to the left of the Paschen minimum", J. Applied Physics, Vol.22, pp.1856-1861, (1989)
- (9) J. M. Torres and R. S. Dhariwal : "Electric field breakdown at micrometer separation", Nanotechnology, Vol.10, pp.102-107 (1999)
- (10) R. S. Dhariwal and, J.-M. Toress and M .P. Y. Desmulliez : IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol.147, No.5, pp.261-265, (2000)
- (11) H. Illias, G. Chen and P. L. Lewin: "Modelling of Surface Charge Decay in a Spherical Cavity within a Solid Dielectric Material Using Finite Element Analysis", 16th International Symposium on High Voltage Engineering 2009, E-18 (2009)
- (12) H. A. Illias, G. Chen, P. L. Lewin: "Measurement and Modeling of Partial Discharge Behavior in Spherical Cavity within a Solid Dielectric Material as a Function of Cavity Diameter", 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdom, Germany, July 4-9, E2-04 (2010)
- (13) E.C.Rogers: "The Self-extinction of Gaseous Discharges in Cavities in Dielectric", Proc. I.E.E.,pt.A, Vol.105, No.24, pp.621-630 (1958)

第3章 X線照射による励起がMGI、IGIツイストペアの部分放電に与える影響

3-1 目的

本項目ではツイストペアを用いた際、放電時にX線を照射することにより初期電子供給を促進させ部分放電を発生、測定することで部分放電発生メカニズムについての解明を進める事を目的としている。

IGI型、MGI型のツイストペアによる効果の差や、導体径が放電開始電圧、放電消滅電圧に与える影響を検討した。

3-2 実験条件

本項目で用いた測定回路は図 3-1 で示した実験回路を用いる電圧の印加方法及び放電開始電圧の判定は第2章（球平板電極を用いた試験による PDIV、PDEV の研究）の測定方法と同様である。本項目における測定圧力は 30 [Pa]~100,000[Pa]とした。

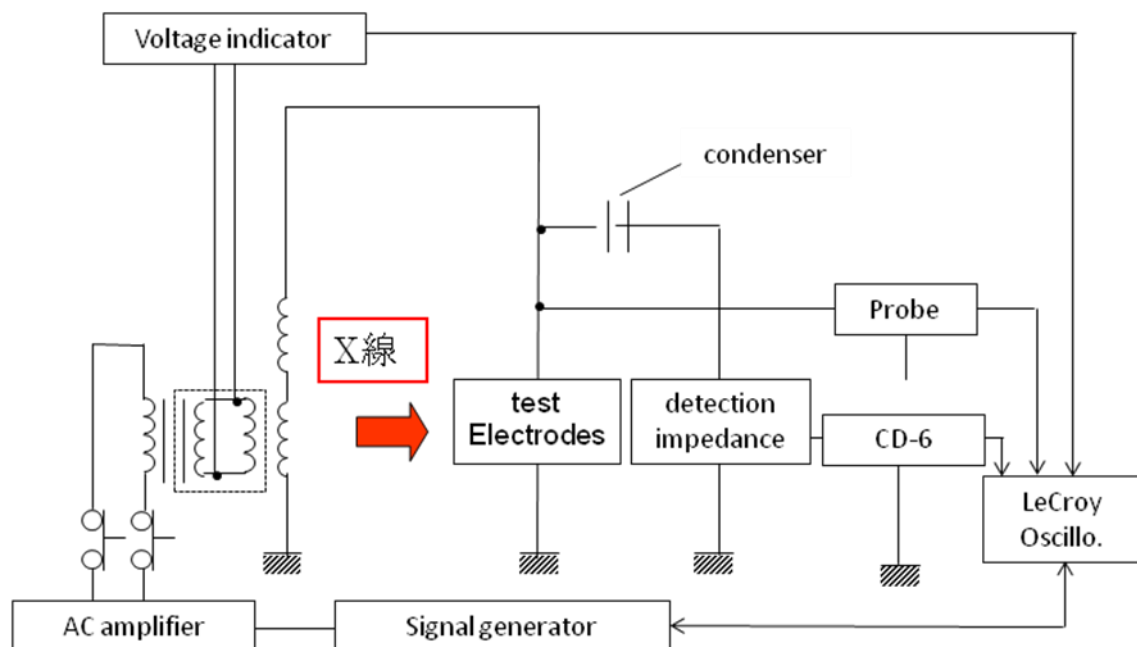


図 3-1 実験回路図

・ X 線源

試料のボイド空間にX線を照射するための光源として、図3-2に示すX線モジュール(松定プレシジョン製 XM10-60-05)を用いた。最大出力は10[W] (管電圧10 ~ 60 [kV], 管電流33~166[μ A])である。またX線モジュール駆動のために、X線源用直流電源(松定プレシジョン製 PLE-36-1.2)でX線モジュールにDC 24[V] を供給し、X線源制御用電源(松定プレシジョン製 PLE-18-2)の電流及び電圧を調整することにより、X線出力を調整した。なお、このX線モジュールの漏洩X線量は5[μ Sv/hr] (at 5 [cm])以下であり、X線照射中は安全面に配慮し、図3-3に示すサーベイメータ((株) アロカ製 TGS-121)を用いてX線量を手元で確認しながら実験を行った。



図 3-2 X線モジュール



図 3-3 サーベイメータ

・ ツイストペアサンプル

本章で用いたツイストペアサンプルの規格について表 3-1 に示す。導体径 1.2、2.0、2.8[mm]については、JIS 規格の巻線試験方法⁽¹⁾に規定されている規格で行った。導体径 3.8[mm]については規定されていなかったため2.8[mm]の規格に準拠して作製を行った。

表 3-1 ツイストペアサンプル規格

導体直径[mm]	導体種類	最小皮膜厚[mm]	皮膜種類
1.2	Cu	0.026	AIEI
2.0	Cu	0.030	EIW
2.8	Al	0.034	EIW
3.8	Al	0.034	EIW

図 3-4、図 3-5 に導体径 2.0[mm]の IGI ツイストペアと MGI ツイストペアの画像と断面図を示す。MGI ツイストペアサンプルは、片側のエナメル線に皮膜処理を施さずに作製を行った。

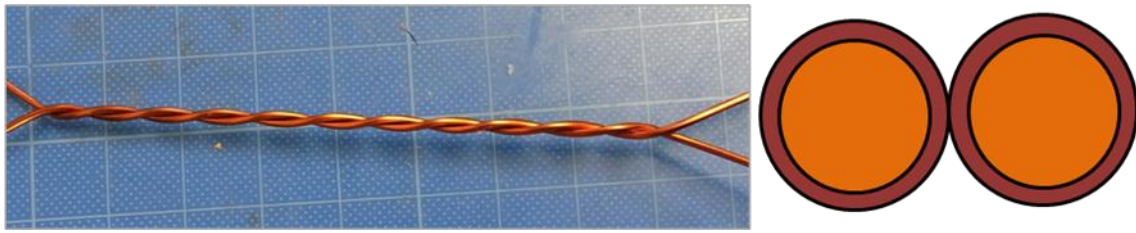


図 3-4 IGI ツイストペアサンプル (導体径 2.0[mm])

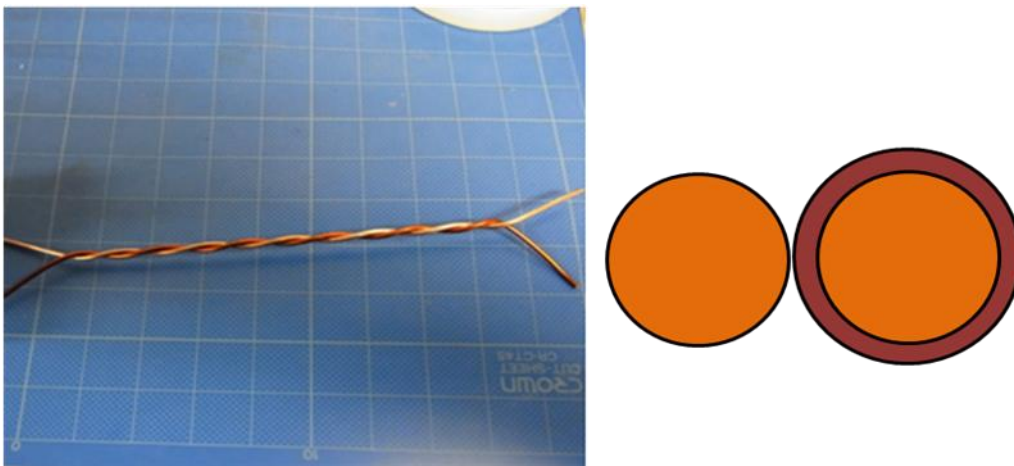


図 3-5 MGI ツイストペアサンプル (導体径 2.0[mm])

3-3 実験結果

・ IGI 型ツイストペアを用いた測定圧力の変化に対する PDIV 測定

IGI 型のツイストペアを用いた放電開始電圧を測定した結果を示す。

図 3-6、3-7、3-8、3-9 にそれぞれ導体径 1.2[mm]、2.0[mm]、2.8[mm]、3.8[mm]の結果を示す。横軸が測定圧力 p [Pa]、縦軸が放電開始電圧[Vpeak]を示す。赤丸のマーカが非 X 線照射時の PDIV (部分放電開始電圧)、青丸のマーカが X 線照射時の PDIV を示している。

全ての導体径で X 線照射によって放電開始電圧の減少が見られた。測定圧力の増加に伴い放電開始電圧の減少する傾向が見られた。これは球平板電極においても報告されており⁽¹⁾、X 線照射によって空隙中、または絶縁体表面上の分子が励起された結果、初期電子供給機構が促進され放電開始電圧の減少に繋がったと考えられる。

また、大気圧での測定において大幅な減少が見られたということは空隙中の気体分子による影響が大きい事が考えられる。

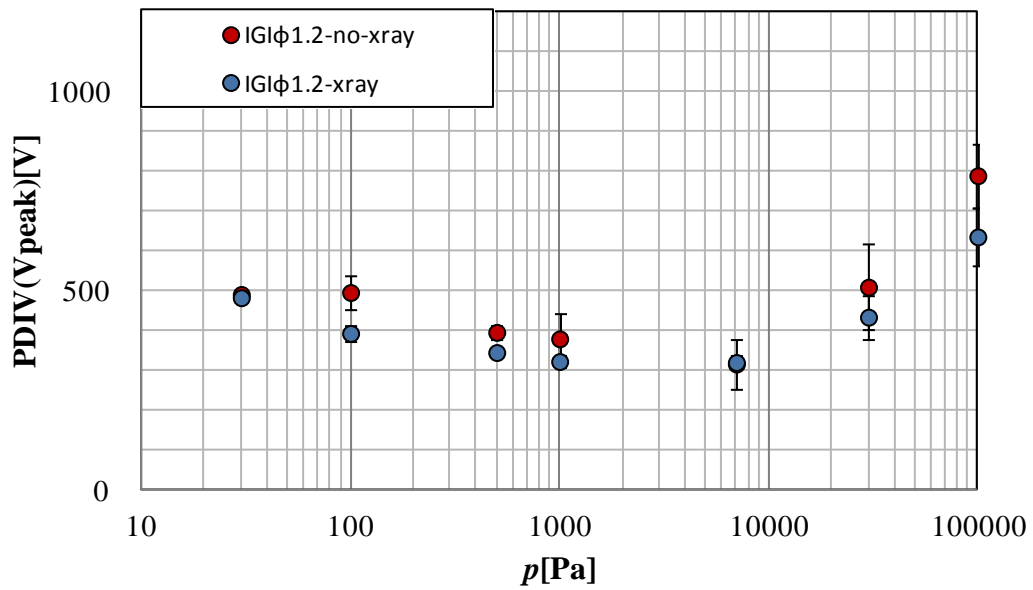


図 3-6 IGI 型ツイストペア 1.2[mm]の X 線照射結果

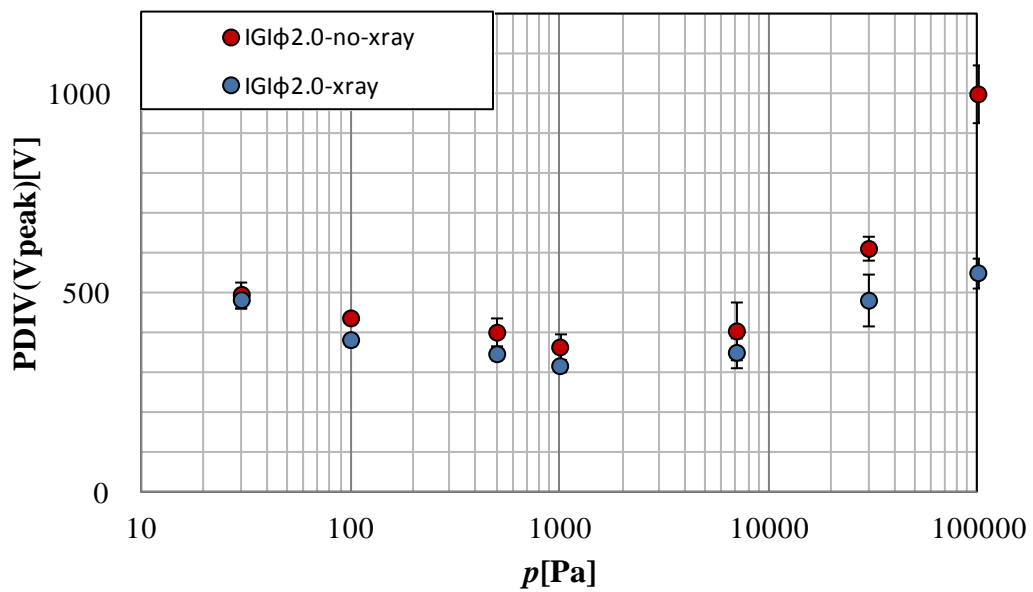


図 3-7 IGI 型ツイストペア 2.0[mm]の X 線照射結果

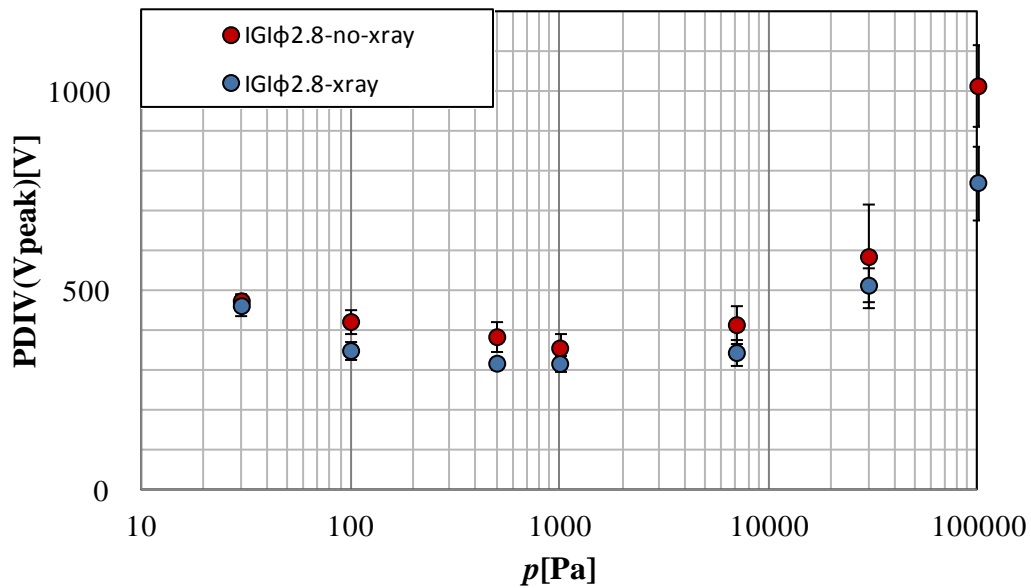


図 3-8 IGI 型ツイストペア 2.8[mm]の X 線照射効果

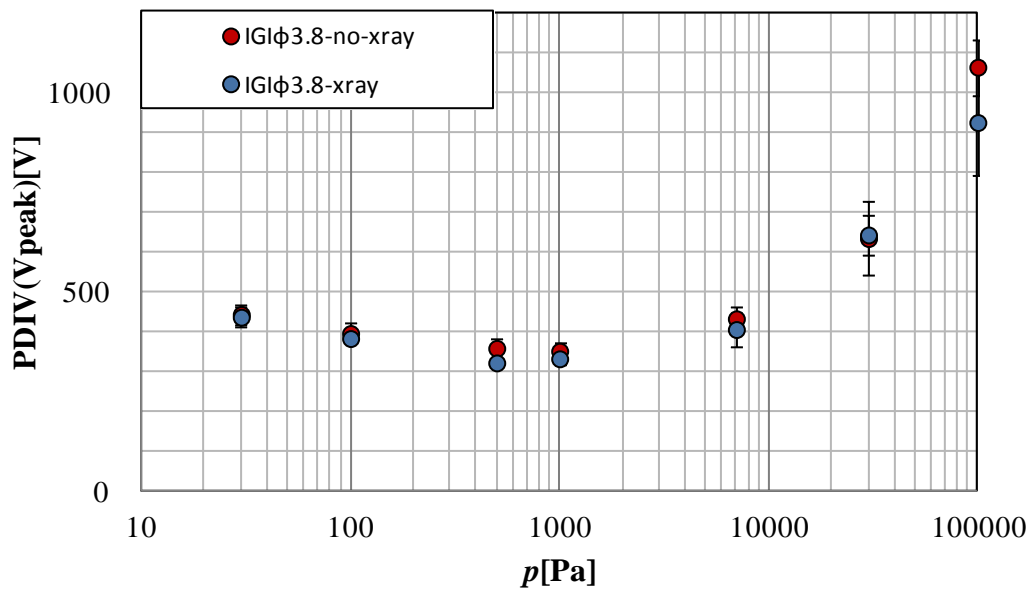


図 3-9 IGI 型ツイストペア 3.8[mm]の X 線照射効果

図 3-10、3-11、3-12、3-13、3-14、3-15、3-16 にそれぞれ測定圧力 30、100、500、1,000、7,000、30,000、100,000[Pa]毎にまとめたグラフを示す。

横軸が導体径、縦軸が放電開始電圧[V]を示す。赤丸のマーカが非 X 線照射時の PDIV (部分放電開始電圧)、青丸のマーカが X 線照射時の PDIV を示している。

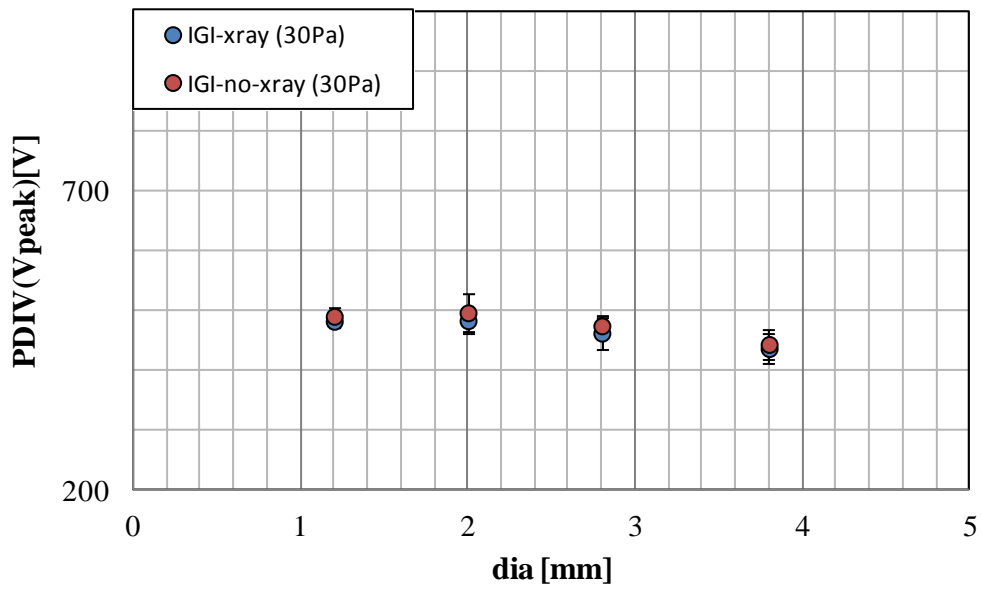


図 3-10 IGI 型ツイストペア 30[Pa]時の導体径比較

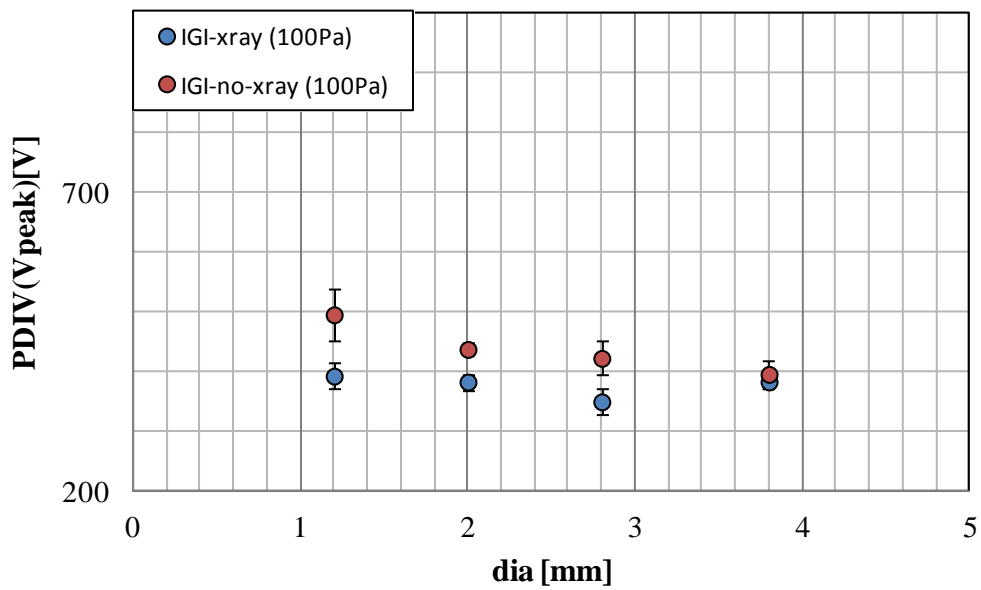


図 3-11 IGI 型ツイストペア 100[Pa]時の導体径比較

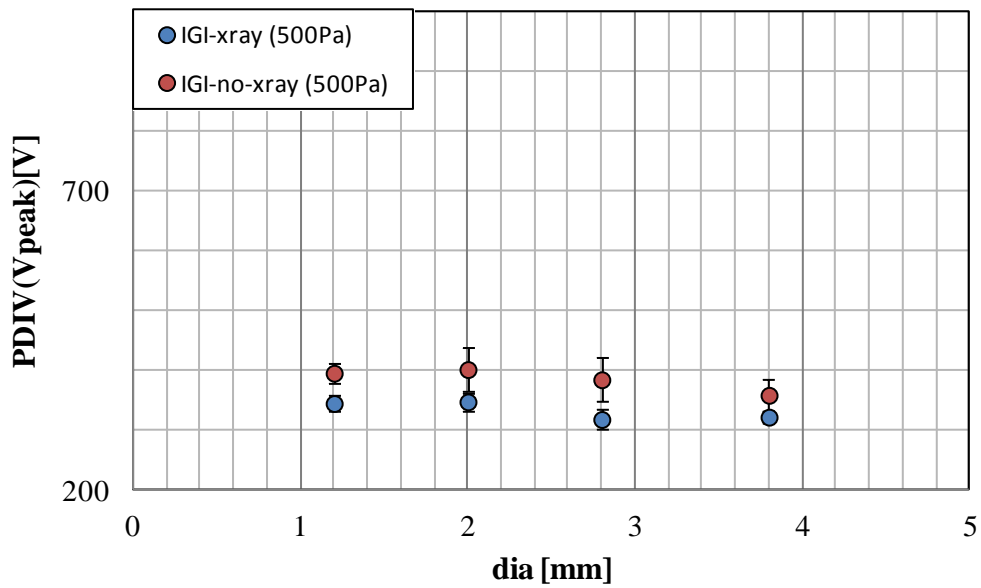


図 3-12 IGI 型ツイストペア 500[Pa]時の導体径比較

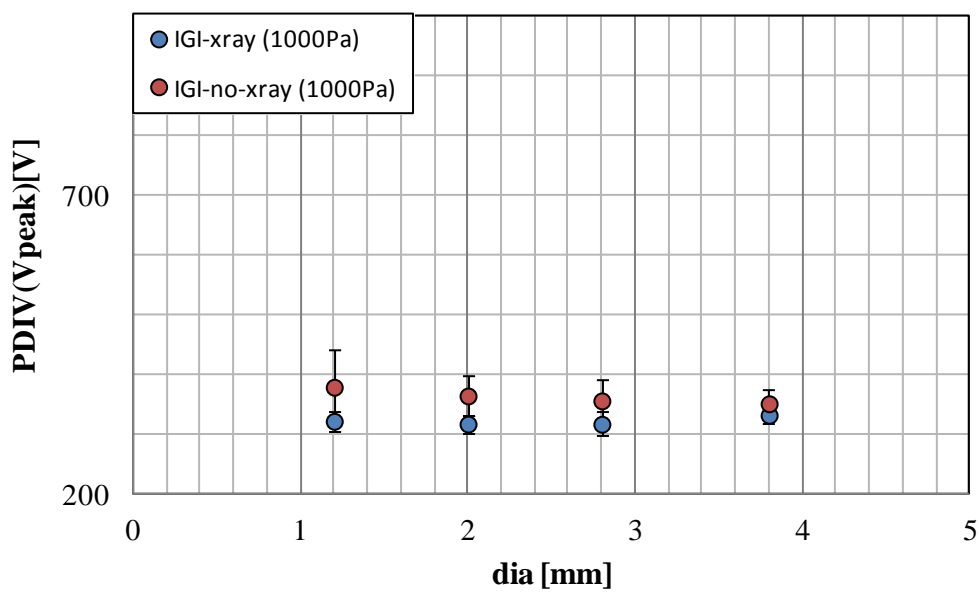


図 3-13 IGI 型ツイストペア 1,000[Pa]時の導体径比較

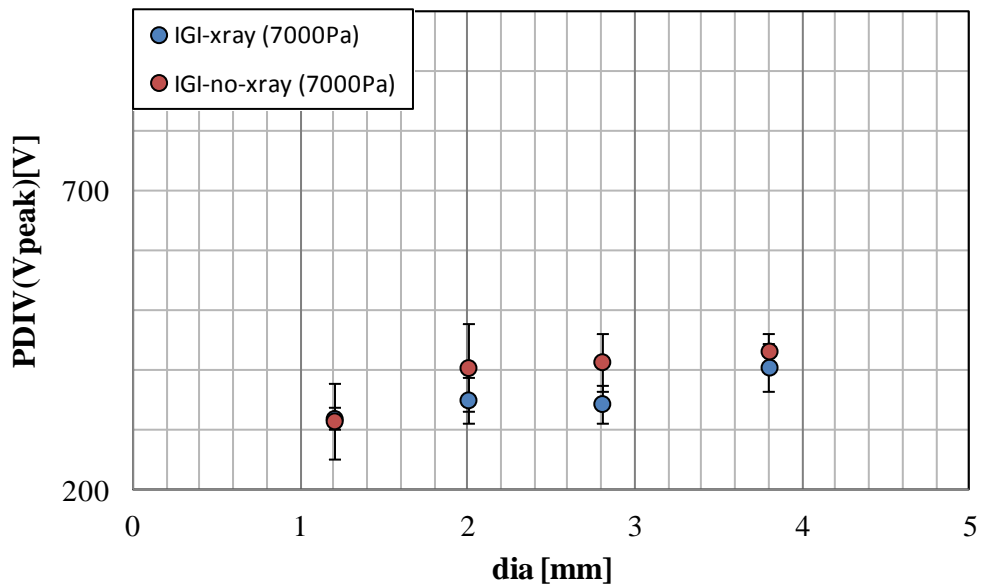


図 3-14 IGI 型ツイストペア 7,000[Pa]時の導体径比較

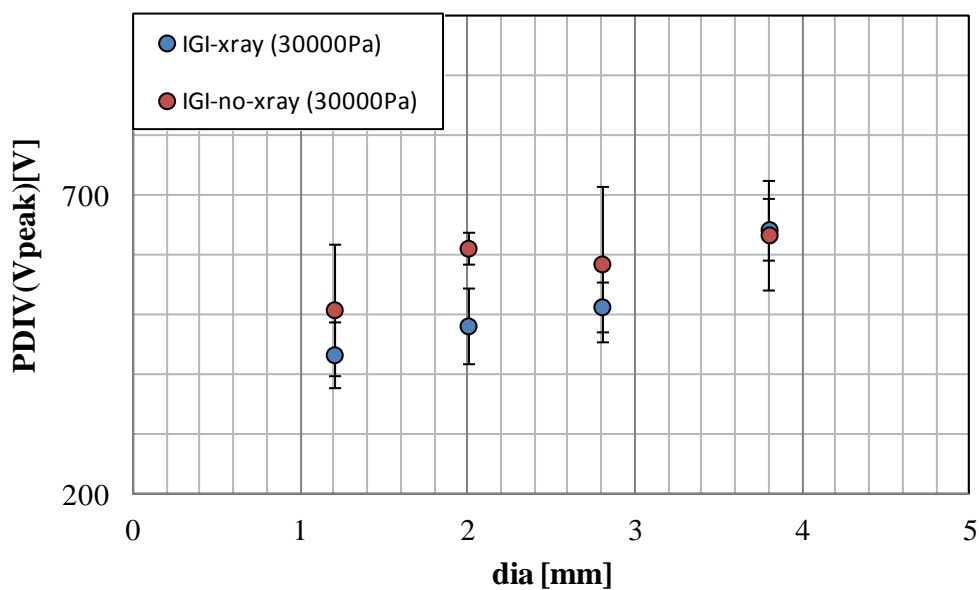


図 3-15 IGI 型ツイストペア 30,000[Pa]時の導体径比較

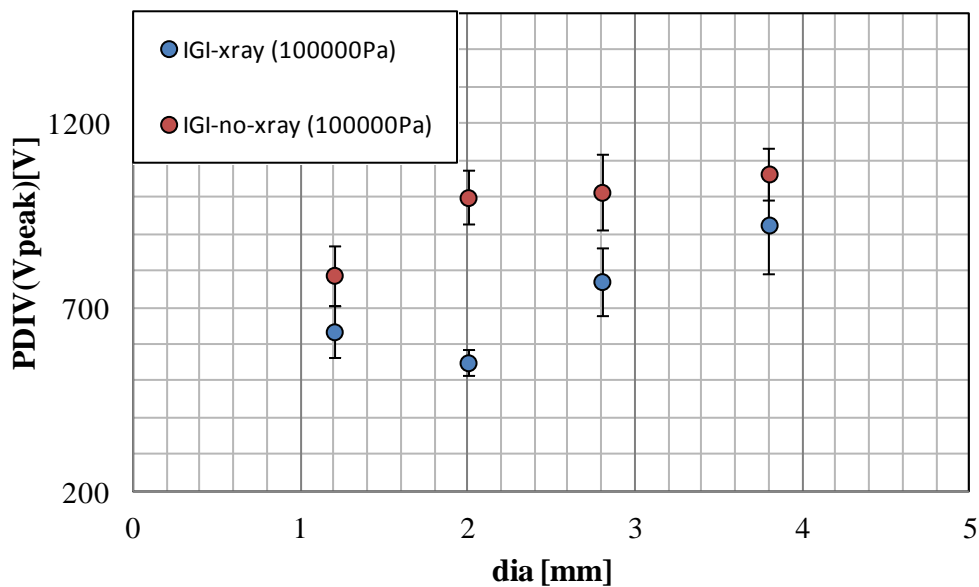


図 3-16 IGI 型ツイストペア 100,000[Pa]時の導体径比較

導体径の変化による X 線照射効果の違いは見られなかった。測定圧力の増加とともに X 線照射効果が増加した結果が空隙中の気体分子数が増加したものと考え、これはツイストペアサンプルにおいて放電時の空隙間距離にあまり差が生じないことから来ていると考えられる。

・ MGI 型ツイストペアを用いた測定圧力の変化にたいする PDIV 測定

次に MGI 型ツイストペアを用いた試験結果を図 3-17、3-18、3-19、3-20 にそれぞれ導体径 1.2、2.0、2.8、3.8[mm]の結果を示す。

使用したサンプルは IGI ツイストペアと同じ規格であるが、高圧側のサンプルのみ絶縁体皮膜が無く金属が剥き出しになっているものを使用した。横軸が測定圧力 p [Pa]、縦軸が放電開始電圧[V]を示す。

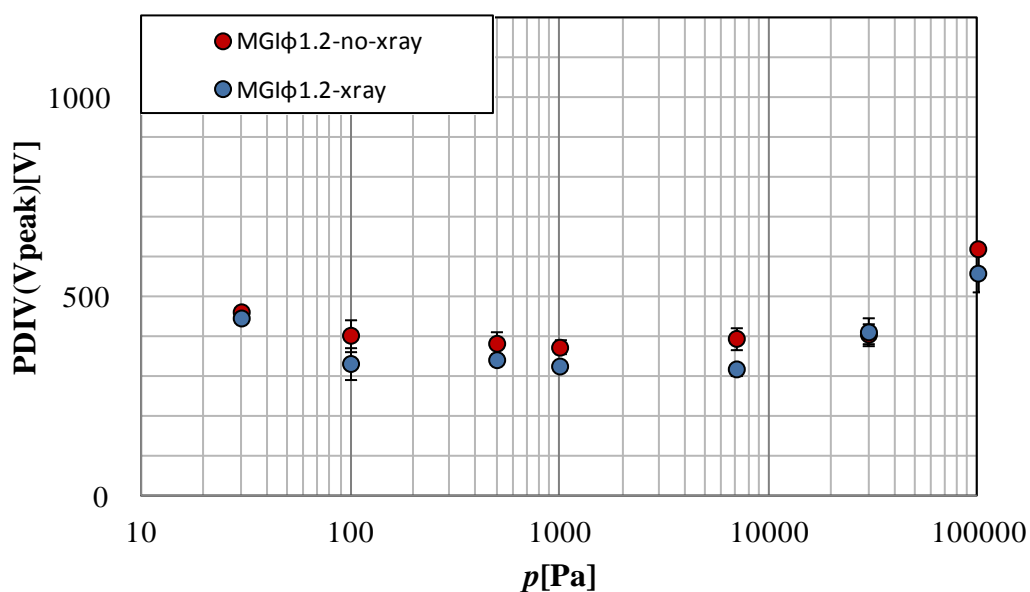


図 3-17 MGI 型ツイストペア 1.2[mm]の X 線照射結果

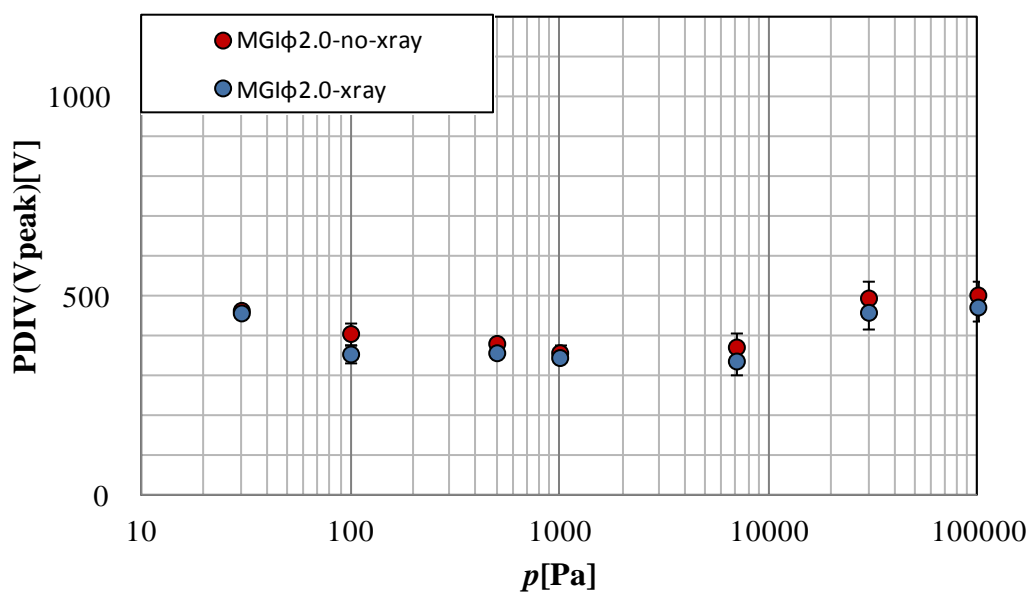


図 3-18 MGI 型ツイストペア 2.0[mm]の X 線照射結果

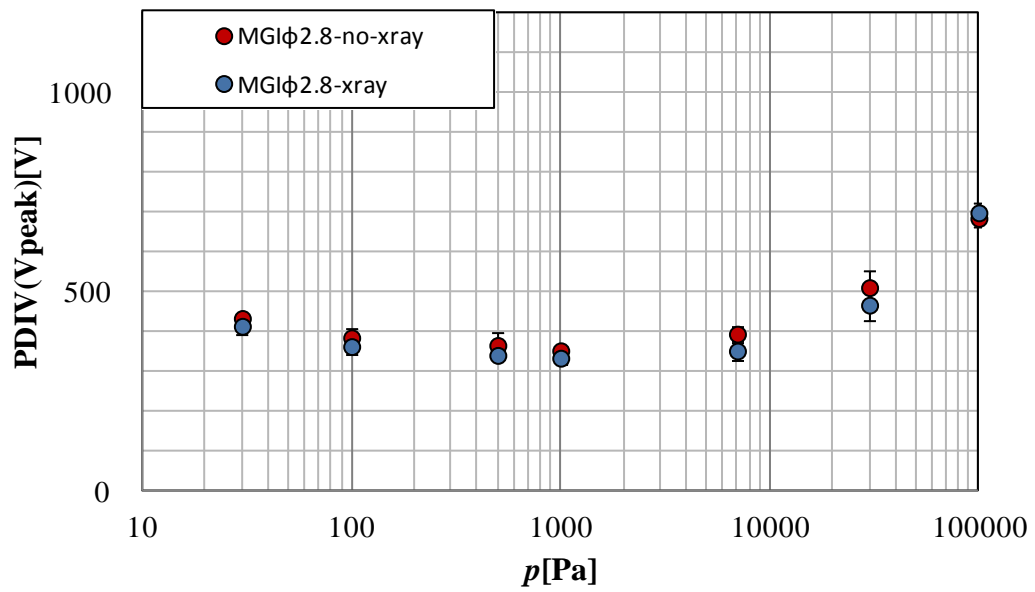


図 3-19 MGI 型ツイストペア 2.8[mm]の X 線照射結果

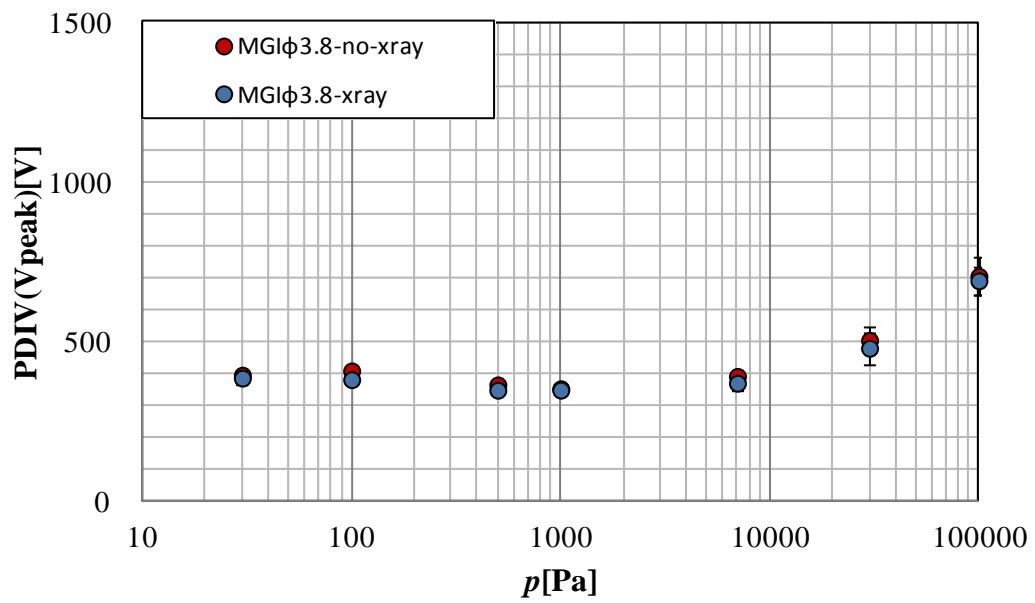


図 3-20 MGI 型ツイストペア 3.8[mm]の X 線照射結果

MGI 型ツイストペアにおいて X 線照射による放電開始電圧の減少は全ての測定圧力においてほぼ見られなかった。

IGI 型ツイストペアでは X 線照射による放電開始電圧の減少がはっきりと見られたのに対し MGI 型ツイストペアでは見られなかった。これについては以下の理由が考えられる。

(1)片側が金属である MGI 型ツイストペアにおいては IGI 型ツイストペアとは異なり金属表面からの電界電子放出が生じ、それによって初期電子の供給が行われている。それによって空隙間中の気体分子の励起状態に影響を受けないため X 線照射効果は生じない。

(2)MGI 型ツイストペアを用いることによる電界の変化で放電距離が短いこと、および放電開始電圧が低いいため X 線照射効果による減少が見えにくい。

次に MGI ツイストペアの導体径毎の X 線照射効果についてまとめたものを示す。

図 3-21、3-22、3-23、3-24、3-25、3-26、3-27 はそれぞれ 30、100、500、1,000、7,000、30,000、100,000[Pa]についてまとめた図となっている。横軸が導体径[mm]、縦軸が放電開始電圧[V]となっている。

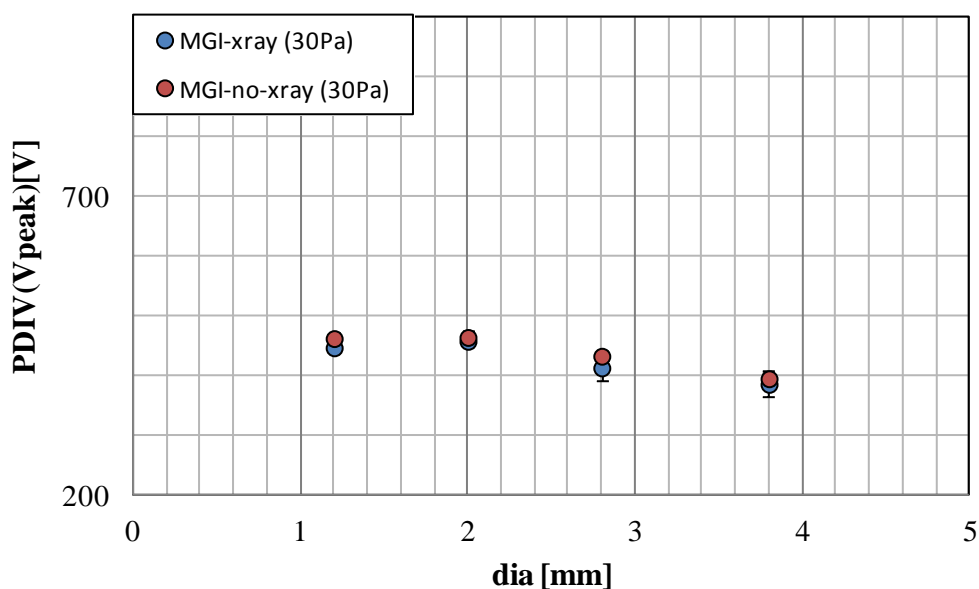


図 3-21 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(30[Pa])

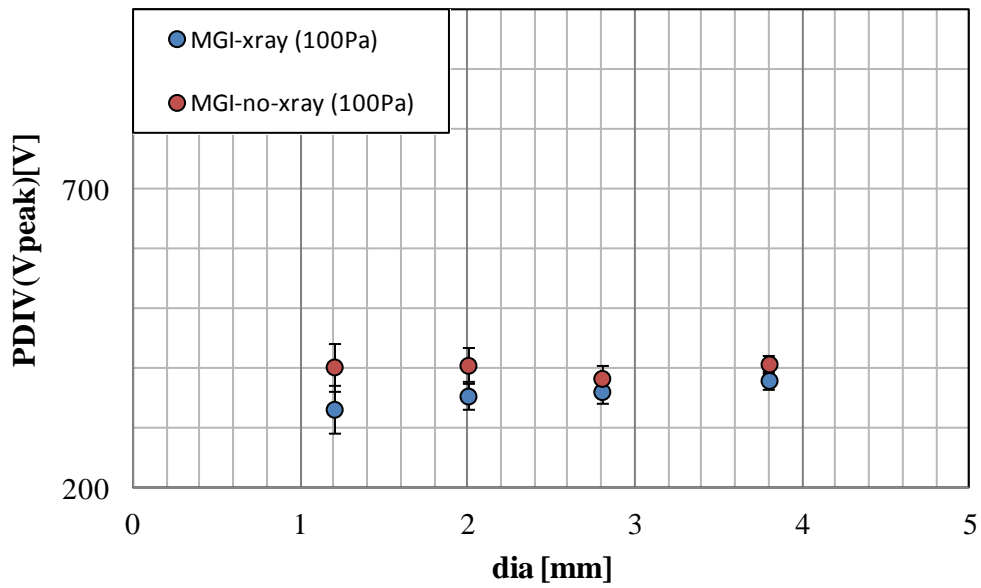


図 3-22 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(100[Pa])

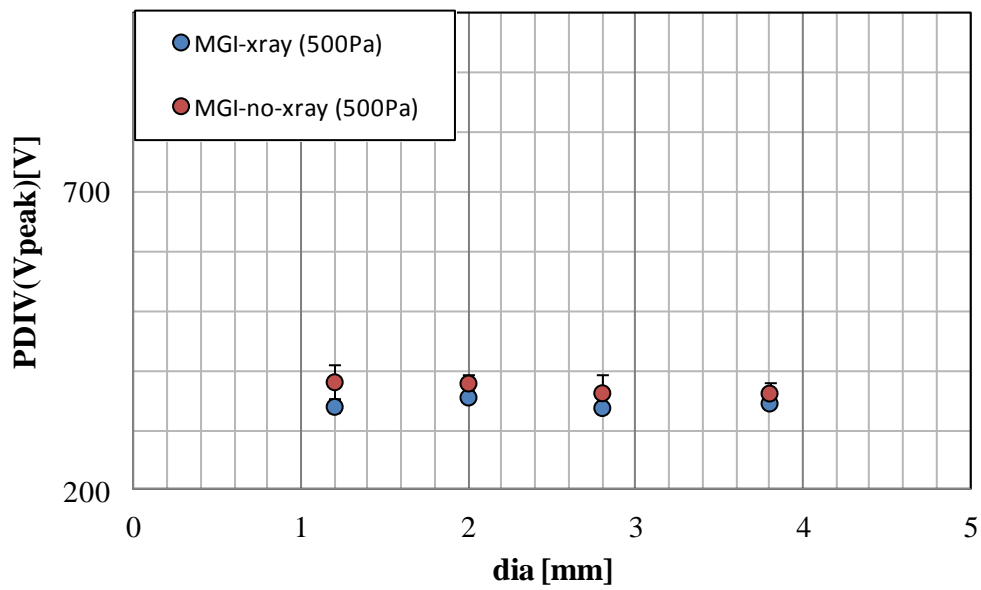


図 3-23 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(500[Pa])

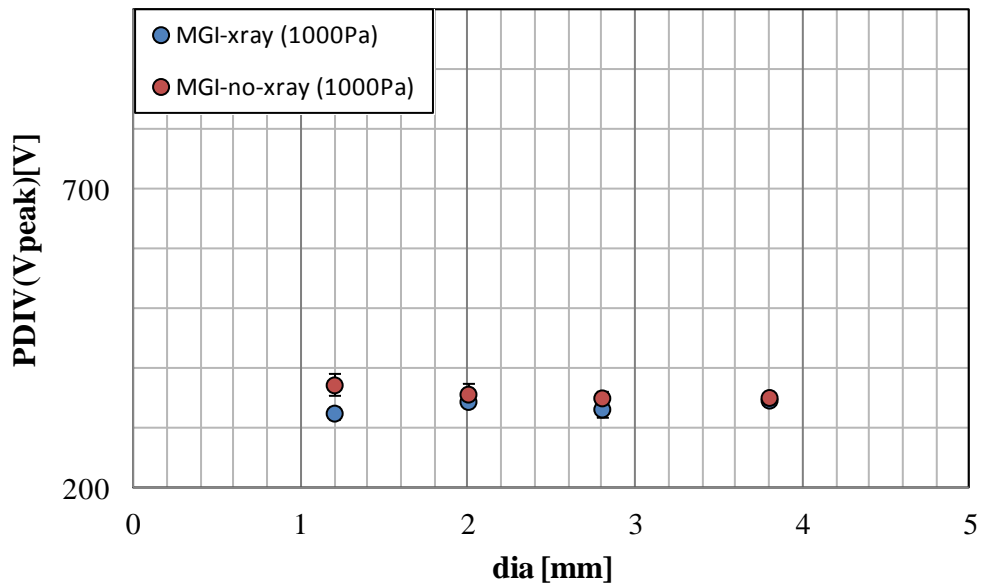


図 3-24 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(1,000[Pa])

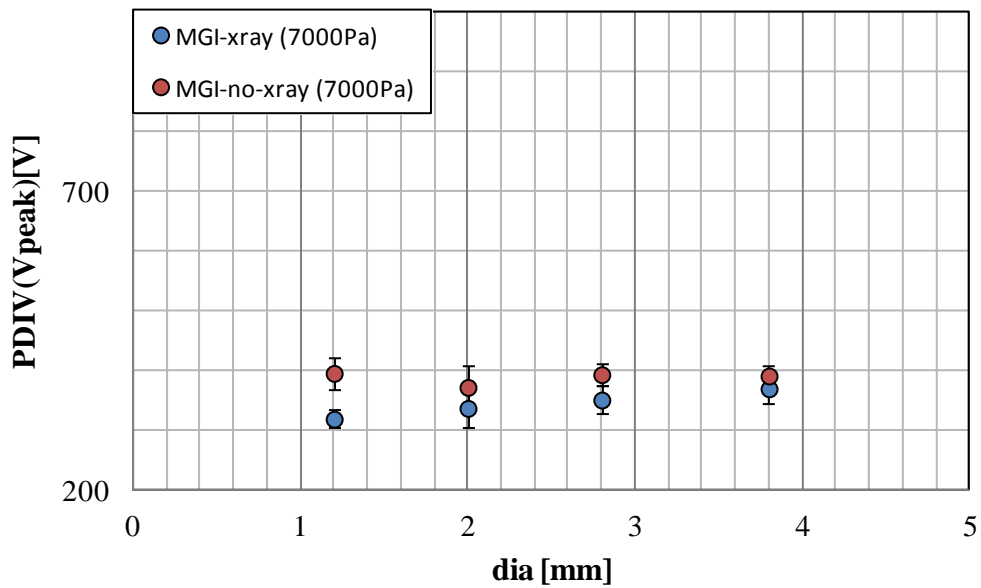


図 3-25 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(7,000[Pa])

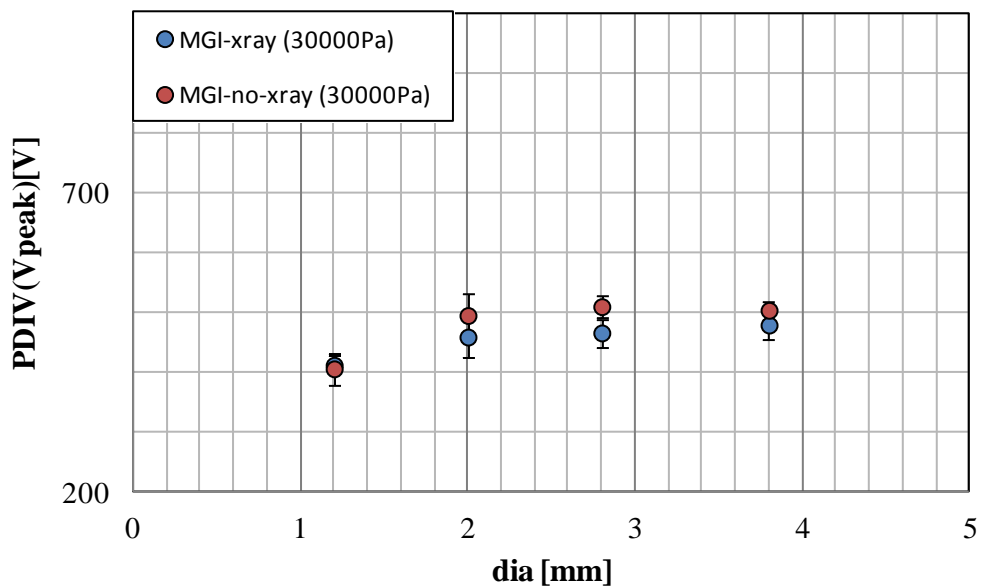


図 3-26 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(30,000[Pa])

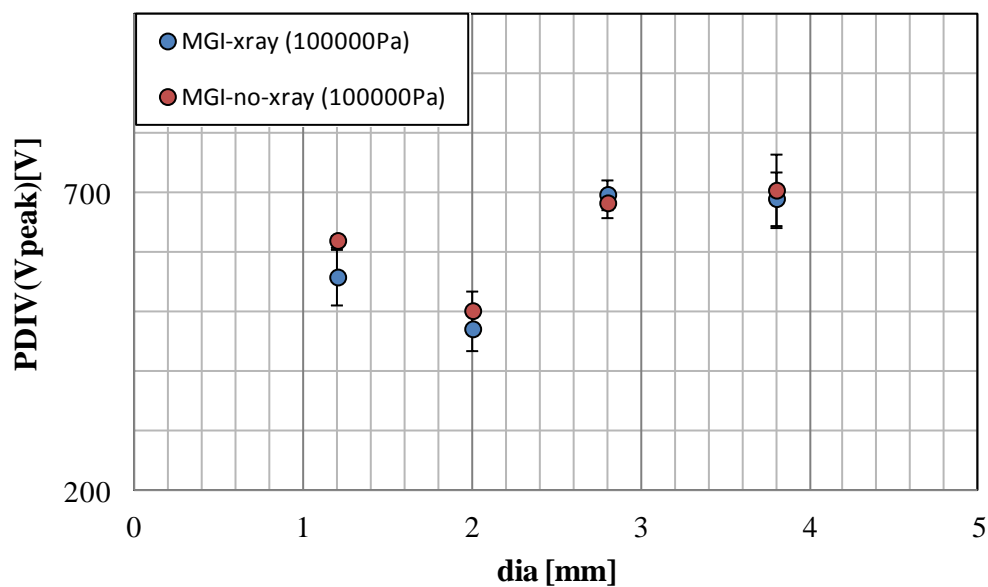


図 3-27 MGI 型ツイストペアの導体径毎の X 線照射結果(100,000[Pa])

IGI ツイストペアに比べると X 線照射による放電開始電圧の大きな減少は見られないがほぼ全ての測定圧力、導体径において非 X 線照射時の PDIV > X 線照射時の PDIV となっている。

7,000[Pa]以下の測定圧力においては導体径が細くなるほど X 線照射時の減少幅が大きくなっていることが分かる。これは導体径が細くなることによってツイストペア間の電界が

変化し、部分放電が生じた際の放電距離が増加しそれによって空隙間の気体分子数が増え X 線による励起効果が増加したためと考えられる。パッシェンの法則から考えても低気圧になるほどに放電距離は増加しやすくなるためと考えられる。

しかし、30,000、100,000[Pa]の測定結果からはその傾向から離れている。この2つの測定点においては異なった傾向を示したため今後は更に測定圧力の測定点を増やし、導体径の違いによる X 線照射効果の差を明らかにすることが重要と考えている。

次に X 線照射による放電開始電圧の減少が顕著に見られた IGI 型ツイストペアにおいて PDIV、PDEV を比較したものを示す。図 3-28、3-29、3-30、3-31 にそれぞれ導体径 1.2、2.0、2.8、3.8[mm]の試験結果を示す。横軸が測定圧力 p [Pa]を示し縦軸が放電開始電圧を示す。赤三角のマーカが非 X 線照射時の PDIV（放電開始電圧）を、青丸のマーカが X 線照射時の PDIV を、白抜き丸のマーカが非 X 線照射時の PDEV（放電消滅電圧）を、紫三角のマーカが X 線照射時の PDEV をそれぞれ示している。

この X 線照射、非照射時の PDIV、PDEV を比較することによって本論文の目的である設計基準になるための PDIV、PDEV の関係性を解明することが目的である。

X 線照射時における空隙間の気体分子は X 線照射効果によって励起され、部分放電発生の条件となる初期電子の供給が行われている。また同様に PDEV 時の状況というのは部分放電が断続的に発生し続け最後に部分放電が発生した瞬間であり、この状況は X 線照射時と同様に空隙間に部分放電発生の条件となる初期電子が豊富に存在していると考えたためである。

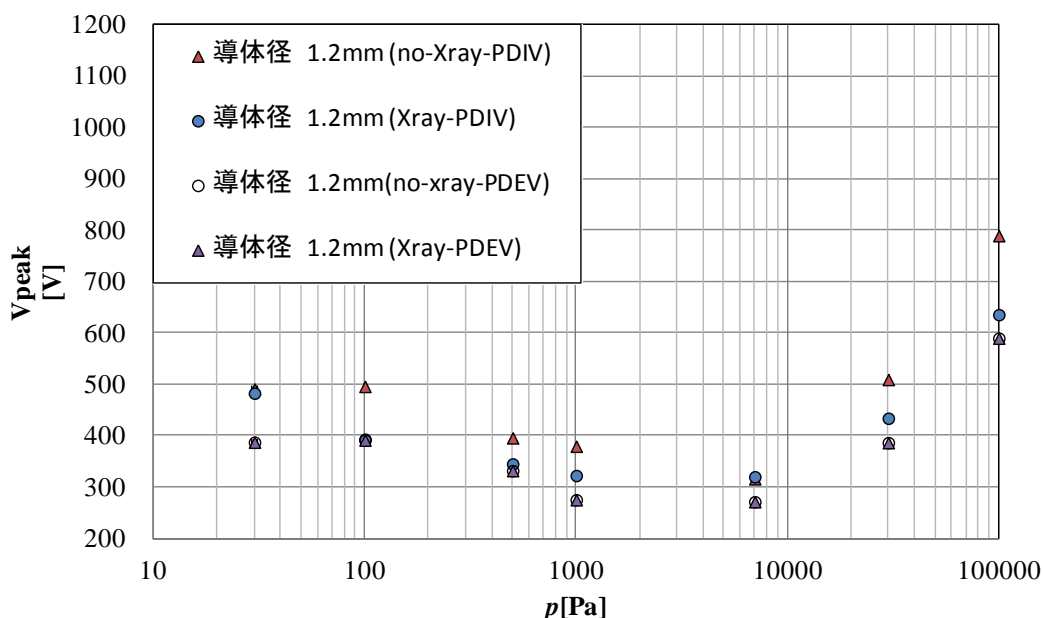


図 3-28 導体径 1.2[mm]の MGI 型ツイストペアにおける X 線照射時、非照射時の PDIV、PDEV 比較

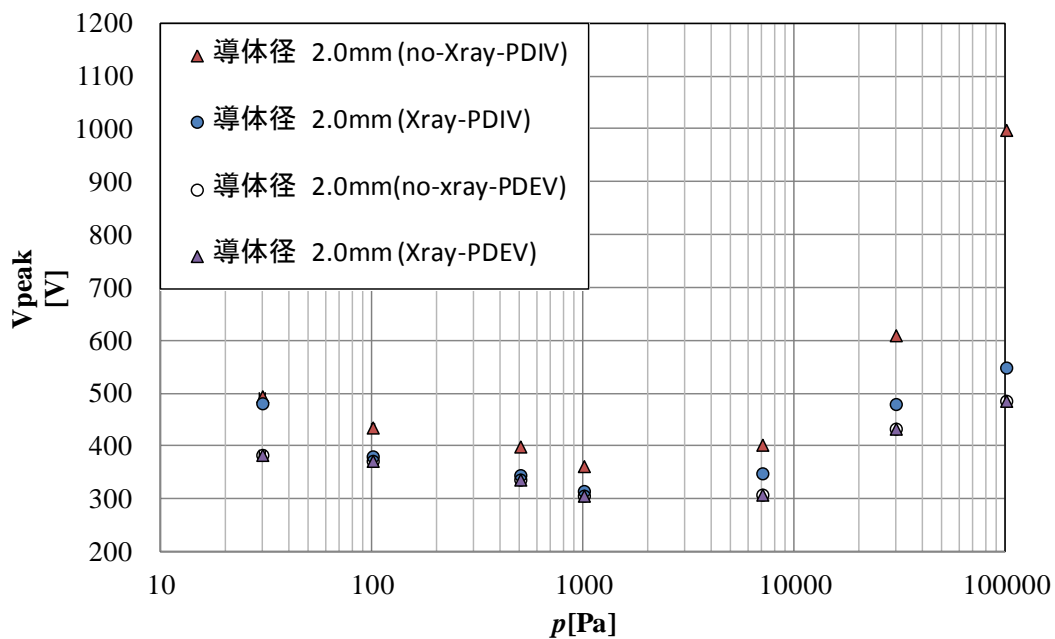


図 3-29 導体径 2.0[mm]の MGI 型ツイストペアにおける X 線照射時、非照射時の PDIV、PDEV 比較

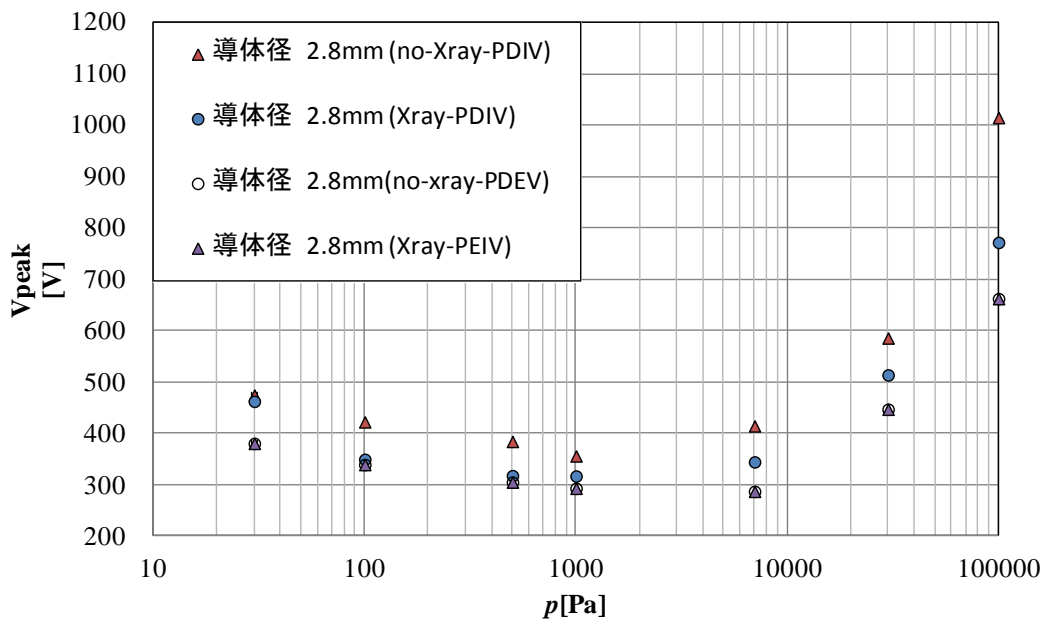


図 3-30 導体径 2.8[mm]の MGI 型ツイストペアにおける X 線照射時、非照射時の PDIV、PDEV 比較

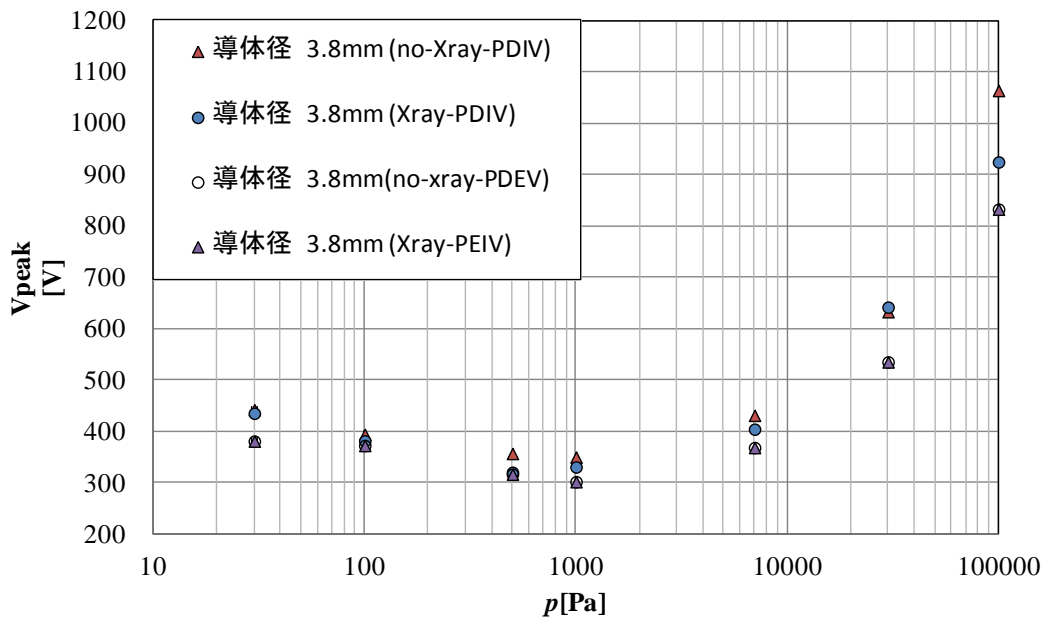


図 3-31 導体径 3.8[mm]の MGI 型ツイストペアにおける X 線照射時、非照射時の PDIV、PDEV 比較

X 線照射時の PDEV 値と X 線非照射時の PDEV 値はほぼ一致した。この結果から PDEV については X 線照射が放電消滅電圧に与える影響というものは殆ど無いという事がわかった。これは PDEV 時の条件においては空隙間に十分な初期電子が供給されているとも言える。

また、X 線照射時の PDIV は非照射時の PDEV に一致する事は無かったが全体の傾向として非 X 線照射時の PDIV > X 線照射時の PDIV > PDEV を示した。これは PDEV 時の初期電子供給よりも X 線照射時の初期電子供給が優れている事も示している。更に言えば放電消滅電圧が部分放電発生の最も低い電圧である可能性も示唆している。

3-4 まとめ

IGI型ツイストペア電極において、X線照射による放電開始電圧の減少は全ての条件において見られた。これはツイストペア間における空隙中の気体分子が励起されたためと考えられる。この結果は球平板電極におけるMGM、MGI型電極でのX線照射試験結果で報告されている結果⁽²⁾とも一致する。

MGI型ツイストペア電極においてはX線照射による放電開始電圧の減少は僅かしか見られなかった。この結果は次の2点が原因で生じている可能性があると考えている。

- (1) MGI型ツイストペアでは金属表面からの電界電子放出によって初期電子供給機構が成立し、IGI型と違いX線照射による空隙中の励起作用を受けないため
- (2) MGI型ツイストペアを用いることによって電界に変化が生じ空隙距離がIGI型ツイストペアに比べ大幅に減少しX線照射による空隙中の励起作用を受けないため

IGI型ツイストペアにおいて、X線照射時におけるPDIV値、非X線照射時におけるPDIV値、X線照射時におけるPDEV値、非X線照射時におけるPDEV値の比較を行った結果、次のような傾向を示した。

非X線照射時におけるPDIV > X線照射時におけるPDIV > 非X線照射時におけるPDEV = X線照射時におけるPDEV

この結果から明らかな事はPDEVの測定においてX線照射効果が生じないという事であった。これは、放電消滅電圧の部分放電が起きる瞬間の空隙中の初期電子がX線照射による励起を行い増加させた初期電子よりも豊富に存在する可能性を示唆している。

第三章参考文献

(1) JISC3216-5、巻線試験方法—第 5 部：電気的特性

(2)葉山 貴志, 中村 修平, 梅村 時博, 小迫 雅裕, 匹田政幸, 廣瀬達也, 中村勇介, 東山雅一:” 球体平板電極系の交流課電部分放電現象(3)”, 平成 23 年電気学会全国大会

謝辞

本論文の作成にあたり、指導と討論などに非常に多くの貴重な時間を割いていただき、また日常生活においても多くの助言をいただいた、三重大学工学部 中村 修平教授に深く感謝いたします。また、研究を進めていくうえで日頃から多くの指導や、討論における取りまとめをしてくださった三重大学地域イノベーション学研究科 梅村 時博教授、三重大学工学部 飯田 和生教授には心から感謝いたします。本論文で用いた実験回路、測定プログラムについて、お忙しい中大変尽力してくださった東芝株式会社 廣瀬 達也氏に大変感謝申し上げます。研究を進める上で適切な助言をいただき、質問に対して親身に返答していただいた東芝産業機器製造株式会社 東山 雅一氏、株式会社東芝電力システム社 前田 照彦氏、九州工業大学工学府 匹田 政幸教授、小迫 政裕准教授に感謝いたします。また協力し合い一緒に研究を進めてきた研究室の仲間に変感謝しております。また、他大学にも関わらず九州工業大学工学府の修士課程 1 年の巻木 翔平君には多くの実験を手伝ってもらいました。ここに感謝を申し上げます。最後になりましたが、影ながら支えてくださり修士課程まで進学させてくださった両親に深く謝意を申し上げます。

業績リスト

【口頭発表】

越智 潤, 中村 修平, 梅村 時博, 小迫 雅裕, 匹田政幸, 廣瀬達也, 中村勇介, 東山雅一 : ”
球体平板電極系の交流課電部分放電現象(4)”, 平成 24 年電気学会全国大会