

# 球対平板電極における交流課電放電現象



平成二十一年度

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

北村 真哉

第1章 序論	
1-1 はじめに	1
1-2 研究背景	4
1-3 目的	7
第2章 実験方法	8
2-1 実験回路と電圧印加方法	8
2-2 電極系を設置するフランジ	10
2-3 電極構成	11
第3章 MGM電極系における交流課電放電現象	13
3-1 はじめに	13
3-2 同一の電極を用いて繰り返し放電を行った場合における 繰り返し放電をおこなう前後での電流波形、放電開始電圧の変化	13
3-3 課電休止時間の違いが放電開始電圧に与える影響	24
3-4 20秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電パッシェンの比較	27
第4章 絶縁層を設けた電極系における空隙分担電圧と絶縁破壊電圧の比較	41
4-1 はじめに	41
4-2 絶縁層を設けた電極系における放電開始場所の観察	41
4-3 MGI電極系の空隙分担電圧とMGM測定値の比較	47
4-4 IGI電極系における空隙分担電圧とMGM測定値との比較	55
参考文献	61
第5章 総括	63
謝辞	65
業績リスト	66

# 第1章 序論

## 1-1 はじめに

我々の生活において、電力は言うまでもなく最も重要な資源の一つである。近年の世界的に見た電力需要の増加は著しく、今後も電力は我々の生活と切り離せない存在である。また、本国の電力は社会・産業機能の高度化により高品質・高信頼性な電力が求められており、エネルギーインフラとしての責任が増大している(1)。我々は日常、様々な電力機器を用いて、電力エネルギーを別のエネルギーに変換して利用している。例えば、電動機、電熱器、光源、二次電池、遮断機、開閉器と挙げればきりが無い。これらの電力機器については、現在経年機器が存在しているという現状がある。日本における66kV以上の遮断機の製造年分布を図1-1に、変圧器の製造年分布を図1-2に示す(1)。図1-1より、遮断機は1981年~1990年の10年で16,000台が製造されており、図1-2より、変圧器についても1966年~1975年、1981年~1990年の合計で約10,000台が製造されている。これらの電力機器には30年以上の非常に長期にわたる信頼性が求められているため、1980年代に製造された遮断機、変圧器はもちろん、1966年から1975年に製造された変圧器についても現在稼働中であることが十分に考えられる。このような経年機器が存在することは、電力機器における適切な保守管理を行うことが極めて重要であることを示している。しかし、変圧器のような電力機器は、常に稼働し続ける電力機器であり、保守管理が非常に困難である。電力用変圧器の部品交換等にかかる時間に関していえば、1年以上の工期を必要とすることもある(2)。しかしながら、電力用変圧器については保守管理が困難にも関わらず、長期にわたる信頼性が求められているため、保守管理が容易に行えるよう、現在電力用変圧器の異常・劣化診断についての研究がさかんに行われている。例えば、電力用変圧器の劣化診断を的確に行うことで、本当に整備が必要な電力用変圧器のみを割り出し、オーバーホールを行うことで、30年という寿命を70年に延長しようと試みる研究も行われている(2)。このように、高品質・高信頼な電力を必要とする現代社会において電力機器に求められる信頼性は常に重要な要素となっていることは明らかである。

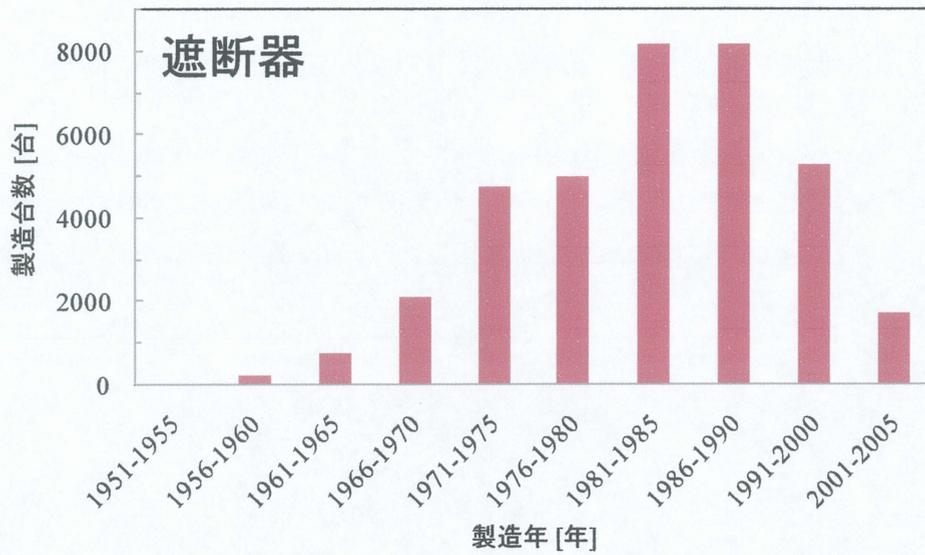


図 1-1 日本における 66[kV]以上の遮断機変圧器製造年分布(1)

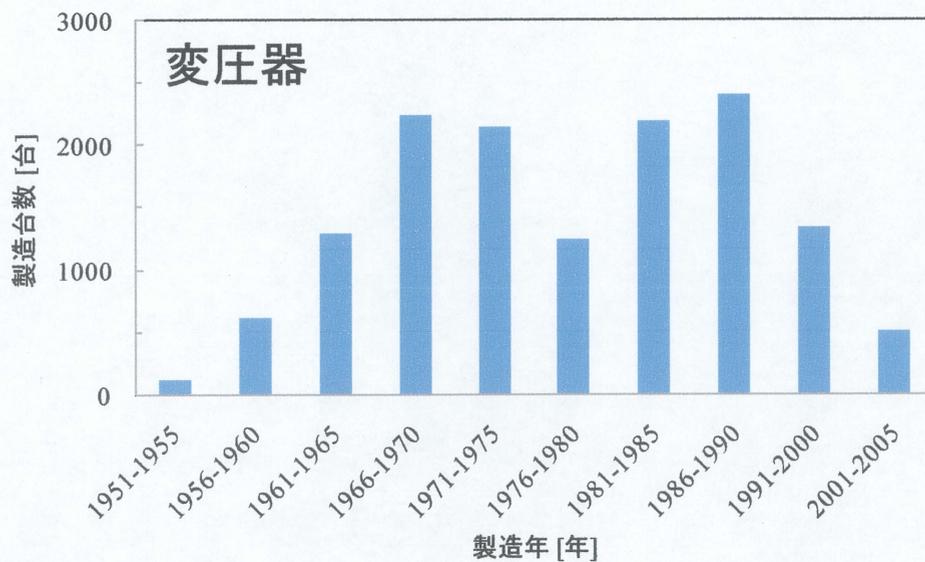


図 1-2 日本における 66[kV]以上の変圧器製造年分布(1)

電力機器の信頼性において、絶縁は機器の心臓部とも言われる重要な要素となっている。過去の電気機器の事故の大半は、絶縁にかかわる事故であった。当時は学問の裏付けがなく、経験だけで設計を行っていたため、思わぬ現象が現れ、故障を起こしたものと予想される(3)。そのため、電気技術と絶縁技術は過去より、表裏一体で進歩してきた。絶縁技術については、大分して絶縁材料と絶縁計測技術の分野がある。絶縁材料については、電気機器の発展に伴う大容量化、高速化小型化への挑戦と共に、新しい材料への要求が出され、エポキシ樹脂やシリコンゴムといった絶縁材料が盛んに研究されてきた(4)。中でもエポキシ樹脂は Gas Circuit Breaker(以降、GIS)やモールド変圧器といった高電圧機器へのモールド絶縁材料に広く用いられている。モールド機器に用いられるエポキシ樹脂は基本的にエポキシ樹脂と硬化剤、それに無機質の充填剤から構成されている。エポキシ樹脂はビスフェノール A 系が最も多く使用されており、硬化剤は、電氣的、熱的、機械的特性に優れた酸無水系が主に用いられている。さらに、耐クラック性の改善、大型モールド品の寸法精度の構造、コスト低減等のためにシリカやアルミナといった無機質の充填剤が用いられている(5)。しかし、モールドに用いる絶縁材料は充填剤を用いているにもかかわらず、樹脂内部にボイドや剥離、クラックが発生し、機器の絶縁性を低下させることが避けられない場合がある。樹脂内のボイドについては樹脂をモールドする過程で加圧、減圧を行うことで、極力除去するよう試みているが、すべてを取り除くことはできない。樹脂内に残るボイドや剥離、クラックといった欠陥は、そこから発生する部分放電が樹脂の劣化を進め電力機器の絶縁性能を著しく低下させる可能性がある(6)。そのため、欠陥内における部分放電については多くの検出、評価を行う計測技術が現在も研究されている(7)-(12)。これらの計測技術の多くは Acoustic Emission センサ(以降、AE センサ)を用いており、部分放電が発生した際に機器内を伝搬する AE 信号を検知することで部分放電の検出を行っている。また、AE センサによる計測以外にも Current Transformer(以降、CT)を用いた部分放電検出についての報告もされており(13)、計測技術についての研究も多岐に渡って行われている。以上から電力機器における絶縁は、機器の信頼性評価に直結する重要な要素となっていると言える。

## 1-2 研究背景

電力機器の信頼性において、これまでパッシェン則が設計基準として多く用いられてきた。パッシェン則とは、1889年にパッシェンによってはじめて実験的に明らかにされた火花電圧の相似則である(14)。このパッシェン則は、ある気体の平等電界における火花電圧  $V_s$  が、その気体の圧力  $p$  とギャップの長さ  $d$  の積のみの関数で表されることを示しており、式で表すと

$$V_s = f(pd) \quad (1-1)$$

となる。このパッシェン則に従って横軸を積  $pd$ 、縦軸を放電開始電圧として関係を描くと図 1-3 に示すパッシェン曲線を描くことができる。このパッシェン曲線は図 1-3 より、積  $pd$  が  $a$  点を境にして、 $a$  点より右の領域では積  $pd$  の増加に伴い放電開始電圧が増加しているのがわかる。また、 $a$  点より左の領域では積  $pd$  の減少に伴い放電開始電圧が増加している。このパッシェン則が成立する範囲については、広い積  $pd$  の範囲で成立することが知られている(15)。

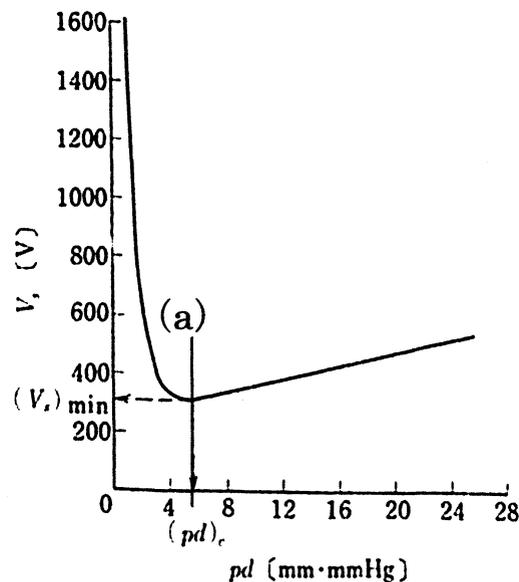


図 1-3 放電開始電圧と積  $pd$  の関係(16)

ここで、タウンゼント理論によりパッシェン則を導く。タウンゼント理論とは世代機構により支えられている電子なだれ走行を繰り返してゆく放電進展の様式である(17)。電極間において、陰極から飛び出した初期電子が電極間を進んでいく間に気体分子と衝突が起き、気体の電離が起きる。このとき、電離する数は  $e^{\alpha d}$  で与えられ、電流  $I$  が

$$I = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} I_0 \quad (1-2)$$

で与えられる。このとき、 $I_0$  は  $I$  が流れたときに、陰極表面から供給される初期電流、 $\alpha$  は電子の衝突電離作用によって気体中に生じた正イオンが、電界によって陰極の方へ移動する際に、中性気体分子と衝突して、これを電離する 2 次電離係数、 $\gamma$  は正イオンが陰極に衝突して電子を放出する係数である。(1-2)式より、

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1-3)$$

というタウンゼントの火花条件式が求まる。(1-3)式の条件式を満たすと、陰極と陽極の電極間において初期電子の供給さえ行われれば、外部から電子を供給がなくても電流が継続的に流れる自続放電が起きることとなる。(1-3)式を変形させ、タウンゼントの衝突電離係数式

$$\alpha = Ap \cdot \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (1-4)$$

に代入すると、以下の式を得る。ここで、定数  $A$ 、 $B$  は衝突電離係数の係数である。

$$V_s = \frac{B(pd)}{\log \left[ \frac{A(pd)}{\log \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right)} \right]} \quad (1-5)$$

(1-5)式が火花放電式であり、(1-5)式は積  $pd$  の関数である。以上より、タウンゼント理論より、パッシェン則を導くことができる。

このパッシェン則は上記のタウンゼント理論による導出以外に、ストリーマ理論からも導くことができる。ストリーマ理論は、タウンゼント理論のように世代機構によらないで、単一の電子なだれがストリーマに転換することによる火花放電の理論をストリーマ理論という。いわば、一世代機構の理論である。この様相を図 1-4 にミークの理論によるストリーマの進展を示す(18)。ミークは図 1-4 に示す様に、平等電界中を電子なだれが進展する様子を示している。まず陰極から放出された電子が電子なだれとなり陽極に向かい進展する場合、電子の速度と正イオンの速度に違いがあるため、電子なだれ先端には電子が存在し、その後を追うように正イオンが進展するようになる。その様子を a 図に示す。次に、電子なだれが陽極に到達すると、電子は陽極に吸収され電極間には正イオンの柱が残される。このとき、陽極近くには強い空間電荷電界が生じる。さらに、光により電離した電子や陰

極からの電子が、密に電荷が分布している領域に進み、結果電子が要求されるようになる。これを b 図に示す。そして、電子なだれ先端で正イオンと電子が混合させることで、その空間はプラズマ状態となり、このプラズマは陰極に向かい進展するこれがストリーマである。この様子を c 図に示す。そして最終的に全路破壊を引き起こす。この現象を正ストリーマあるいは陰極向けストリーマという。ストリーマについては、レータがミークと異なる理論を展開しており、これは負ストリーマ、陽極向けストリーマと呼ばれる。

実験による測定値との比較を行う際、タウンゼント理論とストリーマ理論の二つの理論のうちどちらを適用するかは、ギャップの長さや気体の圧力、電極形状や電圧の印加方法を考慮して、選択する必要がある。一般的に課電圧率(印加電圧/予想される放電開始電圧)が大きく、積  $pd$  が大きい方がストリーマ理論に基づく放電であると考えられている。

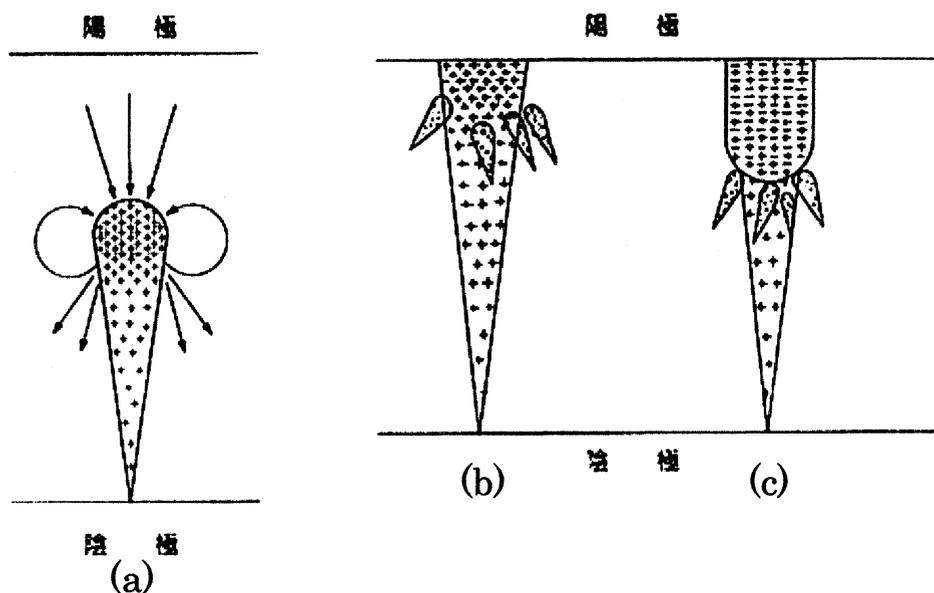


図 1-4 ミークの理論による電子なだれから正ストリーマへの転換(18)

### 1-3 目的

電力機器における絶縁が機器の信頼性に直結するという事は、これまでに述べてきた。本国における電力の信頼性や品質が、高度化する社会・産業機能において担っている割合は非常に大きいものといえる。本研究における目的は電力機器の一つである固体絶縁機器における絶縁性能評価についての調査である。固体絶縁機器内に生じてしまう導体と絶縁体間の剥離や、絶縁体内に存在するボイドといった微小空間に生じる部分放電現象について調査を行うことで、固体絶縁機器の絶縁性能や設計基盤の構築に繋がると期待されている。

本論文の構成は全 5 章からなっており、第 2 章では本研究における実験方法や評価方法について述べる。第 3 章では、固体絶縁機器内の微小空間における放電現象の挙動調査を行ううえで重要な基礎データとなる金属-空気層-金属からなる構成の電極系(以降、MGM 電極系)を用いて、交流電圧を印加した場合における放電開始電圧についての調査、検討を行った。第 4 章では固体絶縁機器内の微小空間における放電現象の調査として、固体絶縁機器内の剥離、ボイドを模擬した電極系に、交流電圧を印加した場合の部分放電開始電圧を測定し、微小空間における放電現象の調査、検討を行っている。第 5 章では、第 4 章までの結果を踏まえた総括を行っている。

## 第 2 章 実験方法

### 2-1 実験回路と電圧印加方法

本研究において、測定を行った実験回路を図 2-1 に示す。また表 2-1 に本研究で用いた機器をまとめて示す。本研究は、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ている。

印加電圧は、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-3CP:東芝産業機器製造(株)もしくは VE-6CP:東芝産業機器(株))により 30 倍もしくは 60 倍に昇圧される。以上より、昇圧された電圧が、実験回路へ印加される。

電極系は 100[k $\Omega$ ]もしくは 48[k $\Omega$ ]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。また、アース側には Current transformer(CTL-28-S90-05Z-1R1:U\_RD Co.Ltd)(以降、CT)を設置する。

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。この CD-6 に部分放電による放電電荷量が所定の値となったことを検出したら、オシロスコープ内のプログラムによってその時点でトリガを掛け、その時の電圧を Probe(PPE 20kV:LeCroy Co.)とオシロスコープ内のプログラムから放電開始電圧として記録する。なお、シールドルーム内のノイズレベル 0.5~5[pC]程度のため、放電開始とする放電電荷量は各項目により異なる。そのため、放電開始とする放電電荷量は各項目で記載する。

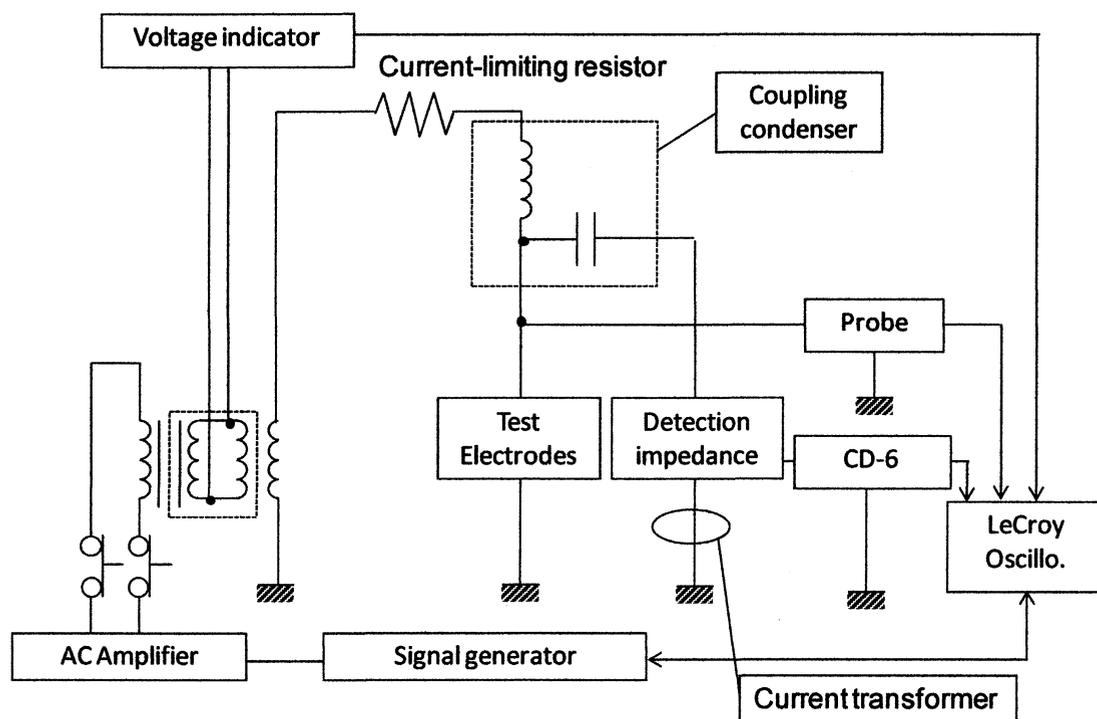


图 2-1 実験回路図

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 20kV	LeCroy	耐圧 20[kV]

## 2-2 電極系を設置するフランジ

本研究では、減圧下での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 2-2 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[m<sup>3</sup>]のものを使用している。本研究におけるフランジ内圧力の規定は、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する。

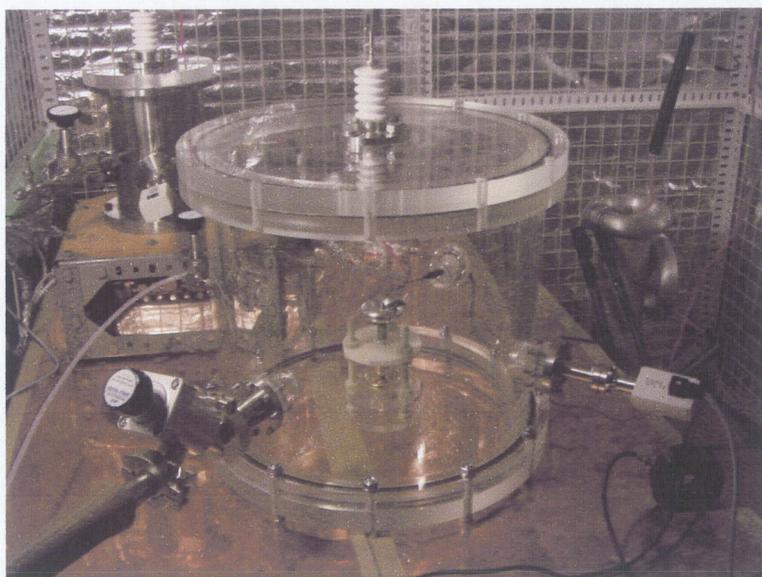


図 2-2 フランジ全体図

## 2-3 電極構成

図 2-3 に本研究で用いた電極系のモデル図を示す。本研究では、図に示した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測定を行っている。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。

本研究で用いた電極は上部電極、下部電極共に真鍮製である。図 2-4、図 2-5 に本研究で用いた上部、下部電極の寸法を示す。上部電極については、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]のものを使用している。下部電極については、全体の直径が 50[mm]のものを使用しており、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。手順は、トルエンに電極を漬け、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くものとした。第 3 章における電極系は上部、下部電極共に金属となっているが、第 4 章で用いた電極系は下部電極もしくは上部、下部電極共に絶縁層のコーティングを行っている。本研究においてコーティングを行った絶縁材料はエポキシレジンを用いている。このエポキシレジンビスフェノール A 系エポキシ樹脂を用いている。試料作製方法は、まず、主剤と硬化剤をそれぞれ 1:1 の割合で混合する。その後、混合した試料を 80[°C]の真空乾燥機にて 10 分間脱泡後、115[°C]に予熱しておいた電極を設置済みの注継金型に脱泡しつつ注継する。注継後、真空乾燥機にて約 10 分間脱法後、100[°C]の恒温槽にて 3 時間一次硬化を行う。一次硬化後、金型から取り出し、130[°C]で 12 時間、二次硬化を行う。二次硬化後、上部電極の球状部エポキシ表面に凹凸や穴といった欠陥がないことを目視で確認し完成とする。ここで使用した金型の絶縁層膜厚は、上部電極が 0.30[mm]、下部電極が 0.35[mm]と 0.55[mm]のものである。また、絶縁層膜厚は、放電開始電圧の測定が終了後、電極を切断することで、実測も行っている。その実測値は各項にて記述する。

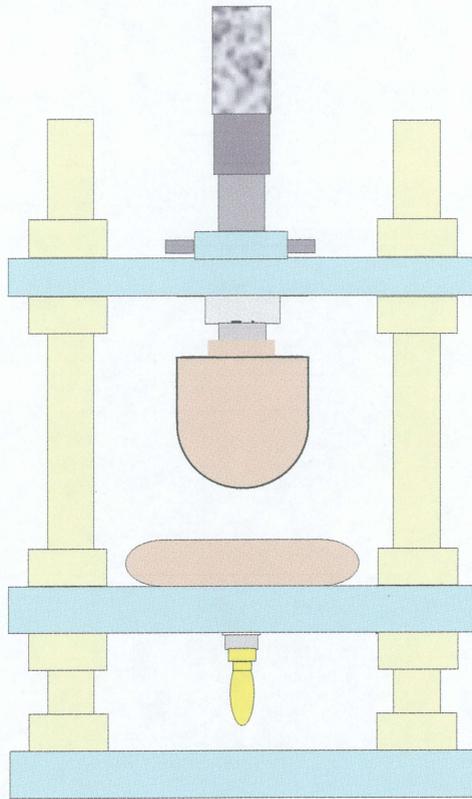


図 2-3 電極系モデル図

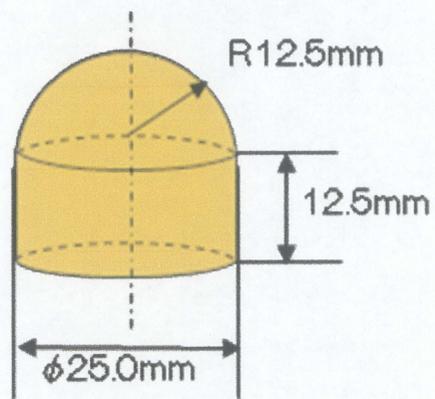


図 2-4 上部電極モデル図

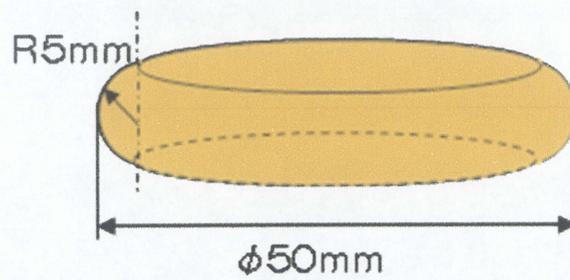


図 2-5 下部電極モデル図

## 第3章 MGM電極系における交流課電放電現象

### 3-1 はじめに

エポキシ注型絶縁機器などの固体絶縁機器において、導体と絶縁物間に発生する剥離や、絶縁物内に生じるボイドなどの微小空間が存在した場合、微小空間内に生じる部分放電が機器の絶縁性能に影響を与える可能性がある(6)。そのため、微小空間内における部分放電の発生条件と挙動の把握は、機器の絶縁寿命を考える上で極めて重要である。本章では、固体絶縁機器内に発生する剥離やボイドにおける絶縁性能を評価するための重要な基礎データとなる MGM 電極系の放電開始特性について検討を行う。

### 3-2 同一の電極を用いて繰り返し放電を行った場合における

#### 繰り返し放電を行う前後での電流波形、放電開始電圧の変化

#### 3-2-1 目的

MGM 電極系の放電開始電圧の測定を行うにあたり、同一の電極を用いて繰り返し放電を行った場合、繰り返し放電が放電電流と放電開始電圧に与える影響について検討を行う。さらに実験結果により今後の実験条件の確立を行う。

#### 3-2-2 実験条件

本項目で用いた測定回路は図 2-1 で示した実験回路を用いる。本項目では、同一の電極を用いて繰り返し放電を行い、繰り返し放電を行う前後における電流波形と放電開始電圧を測定する。実験方法は、まず印加電圧をオシロスコープ内のプログラムからの指示により 60[Hz]の正弦波交流を 6[V/s]で印加していく。次に、CD-6 より放電電荷量が 10[pC]となったところを放電開始としてそのときの印加電圧を放電開始電圧として記録する。このとき同時に電流波形も記録する。その後 20[s]、課電休止時間を設けた後、再び電圧を印加していく。この課電休止時間は、前課電による気体中の電荷の影響を少なくするために設ける。測定は、測定圧力 5,000[Pa]、空隙距離 0.2[mm]、1.0[mm]で行う。フランジ内は先に述べたように、乾燥空気であるが、フランジ内は前の放電による気体中の電荷の影響やフランジ内圧力を一定に保ちやすくするため、排気と吸気を常に行う。

本項目では「繰り返し放電」と独自に名付けた同一の電極を用いた放電試験を行っているため、ここで繰り返し放電について説明する。本項目における繰り返しとは放電が起きた回数を表している。本項目では、放電開始を検知した後、課電休止時間を 20[s]設けてあることから、課電開始時点から次の課電開始直前までを一区切りとして、その回数を数えてその回数を繰り返し回数とする。その例を図 3-1 に示した。次に図 3-2 に繰り返し放電の

実験手順を示す。繰り返し放電において、繰り返し回数 1~10 回るとき、放電開始電圧と放電電流の測定を行い、その後 11~110 回の間は放電開始電圧のみの測定を行う。その後 111~120 回目はふたたび放電開始電圧を放電電流の測定を行う。

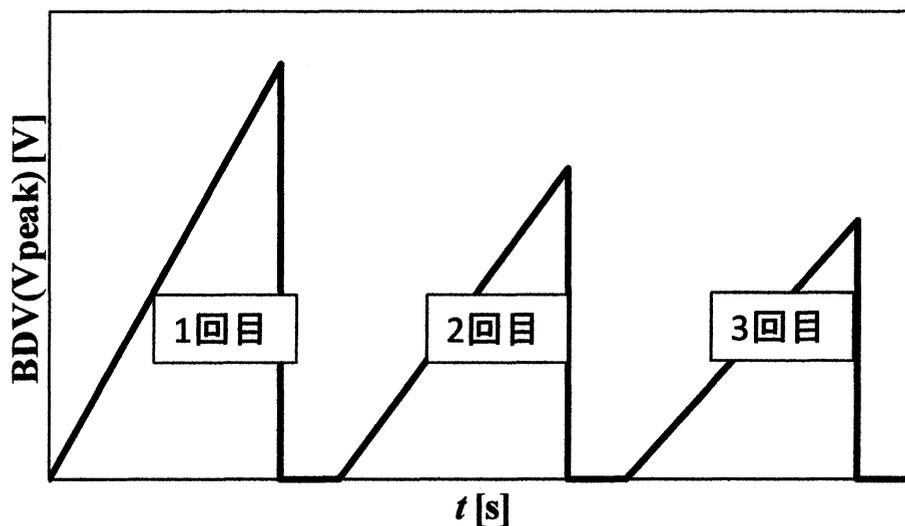


図 3-1 繰り返し放電回数例

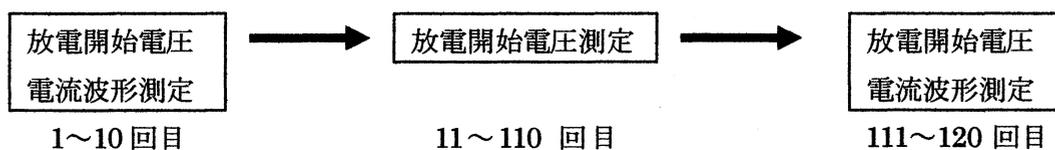


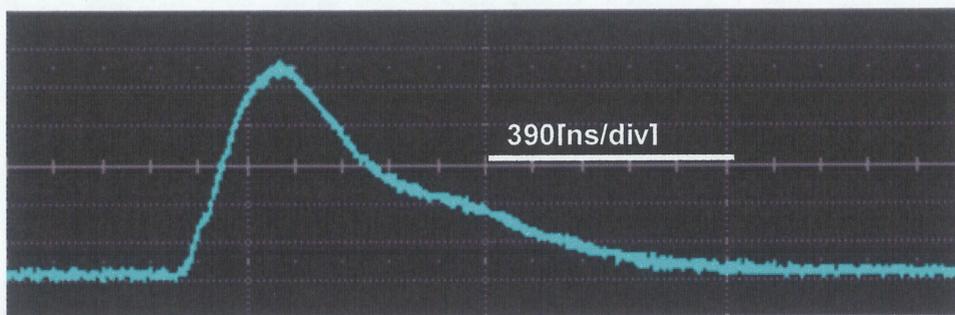
図 3-2 実験手順

### 3-2-3 実験結果

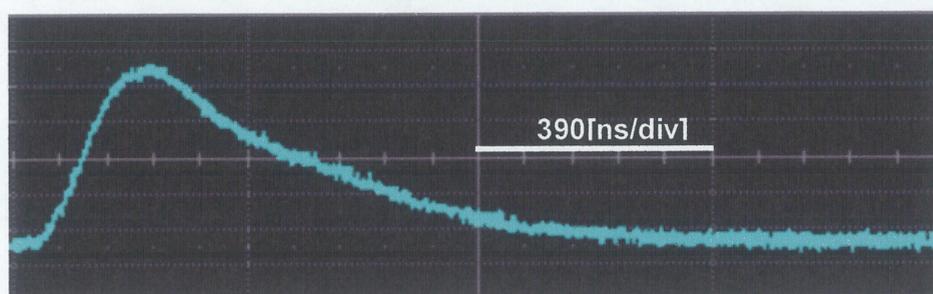
積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  と  $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の 2 種類における、繰り返し放電 1~10 回、111~120 回目放電電流波形の代表例を図 3-3、図 3-4 に示す。

ここで、電流波形を考察していく上で、Townsend の電流波形について考えなければならない。そのため、まず Townsend 放電電流についての説明を行う。図 3-5 に典型的な Townsend 型放電電流波形を示す。Townsend 型放電電流波形は、最初に電子性キャリアによる伝導成分が現れ、次に正イオンによる電流成分が観測される。よって、Townsend 放電電流波形が観測される時は電子電流後のイオン成分（ショルダー部分）が見られる(19)。

図 3-3、図 3-4 より、課電回数が増加しても電流波形のショルダー部分（イオン成分）を確認することができた。つまり、課電回数を変化しても放電形態の変化はないと考えられる。また、積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  ~  $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の範囲では Townsend 放電が起きている

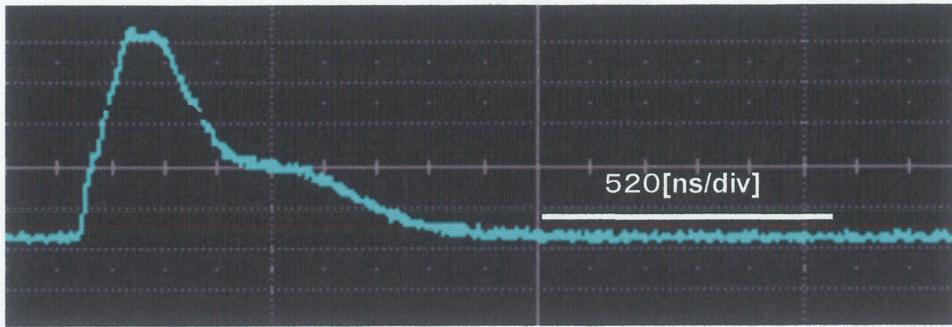


(a) 繰り返し課電 1~10 回電流波形 代表例

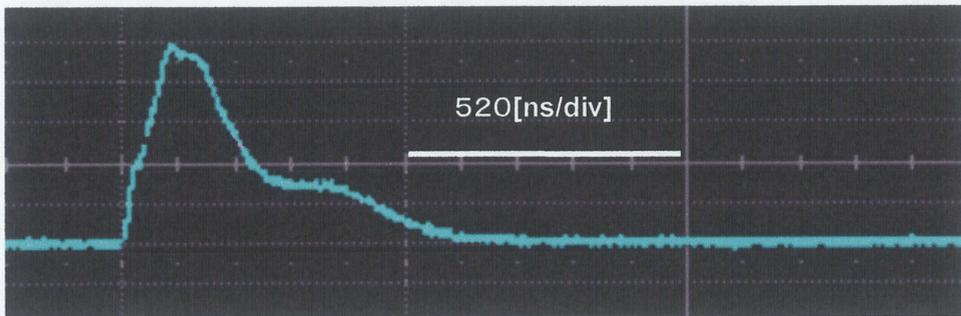


(b) 繰り返し放電 111~120 回電流波形 代表例

図 3-3 繰り返し放電による放電電流波形の変化  
(積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=0.2[\text{mm}]$ )



(a) 繰り返し放電 1~10 回電流波形 代表例



(b) 繰り返し放電 111~120 回電流波形 代表例

図 3-4 繰り返し放電による放電電流波形の変化  
(積  $pd=5.0[\text{Pa} \cdot \text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=1.0[\text{mm}]$ )

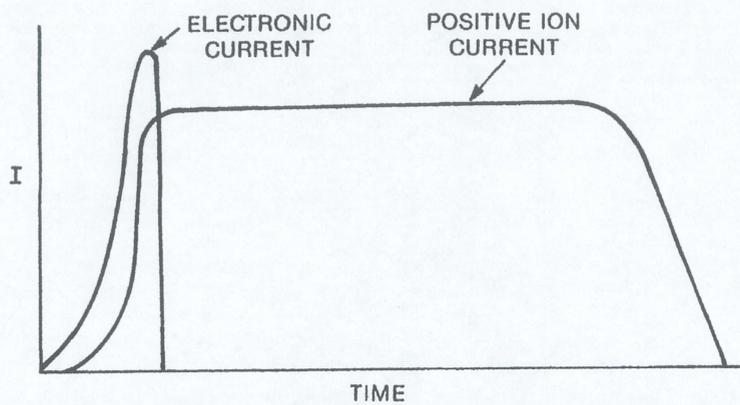


Fig. 6: Expected current dependence on time for discharges according to the model discussed in the text.

図 3-5 Townsend 電流波形(19)

次に、繰り返し放電における波尾長の変化を検討する。本項目における波尾長は、放電電流波形の立ち上がりの瞬間から、再び0になる地点までの時間のこととする。図3-6に波尾長の定義を図示する。図3-6は、CTで測定した波形を平滑化し図示したものである。ここで測定に用いたオシロスコープのサンプリング周波数は1[GHz]である。

積 $pd$ が1.0[Pa·m]、5.0[Pa·m]の2種類における、繰り返し放電1~10回、111~120回目での放電電流波尾長を図3-7、図3-8に示す。図3-7、図3-8の縦軸は放電開始電圧の瞬時値とした。測定点はそれぞれ10点取った中で、電流波形が観測できなかったものを除いた。図3-7、図3-8より、放電電流波形の波尾長は、繰り返し放電を行う前後で変化がなく、1~2[ $\mu$ s]で一定であることが分かる。また、積 $pd$ が1.0[Pa·m]と5.0[Pa·m]の測定値を比較しても、両者の波尾長に変化が生じないことがわかった。

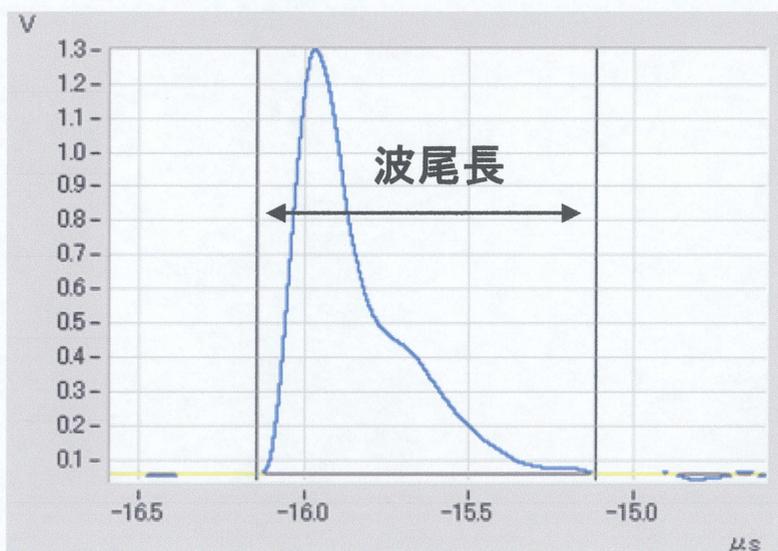
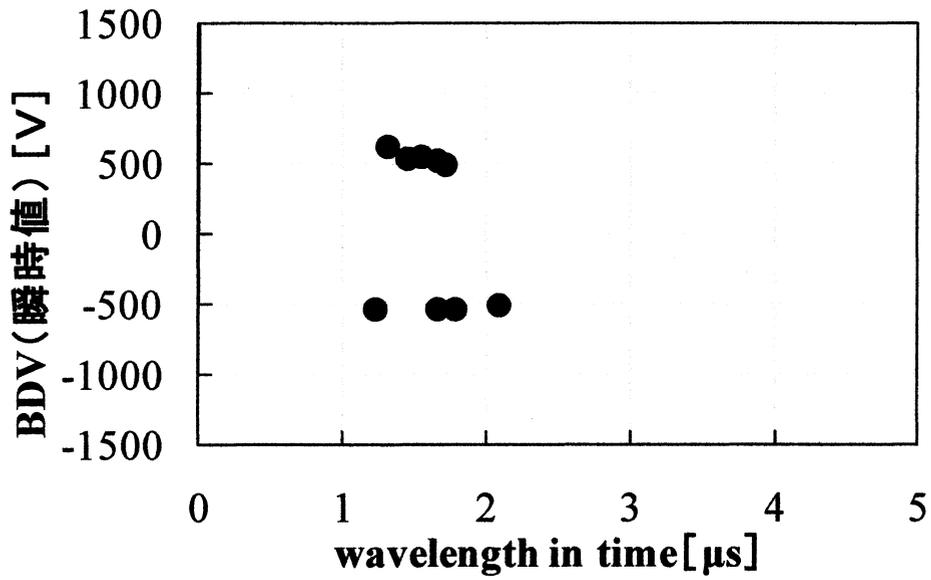
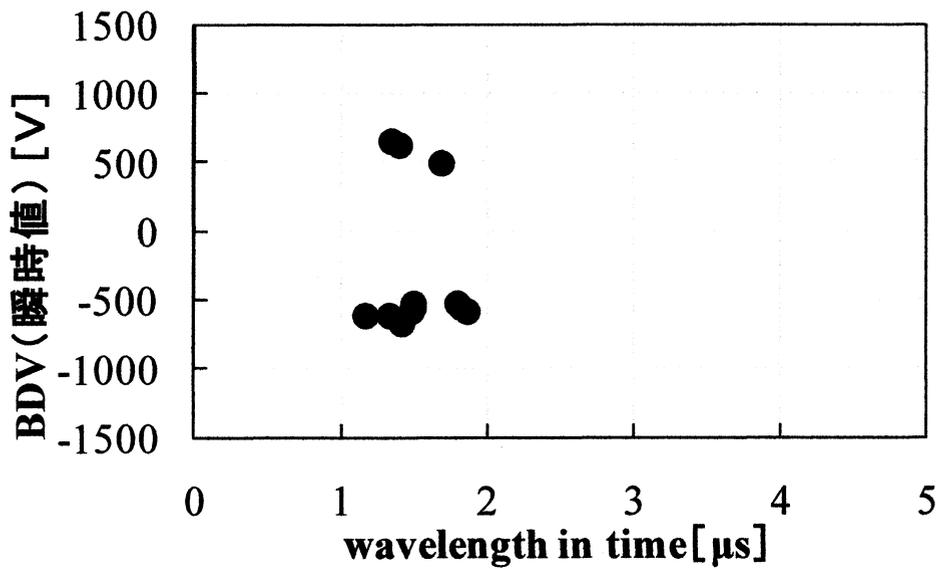


図3-6 波尾長の定義

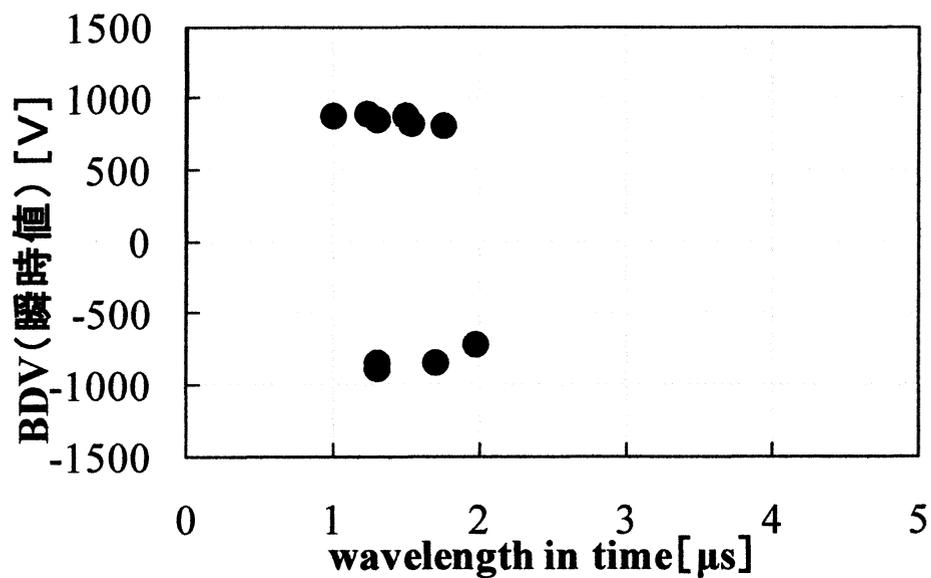


(a) 繰り返し放電 1~10 回放電電流波尾長

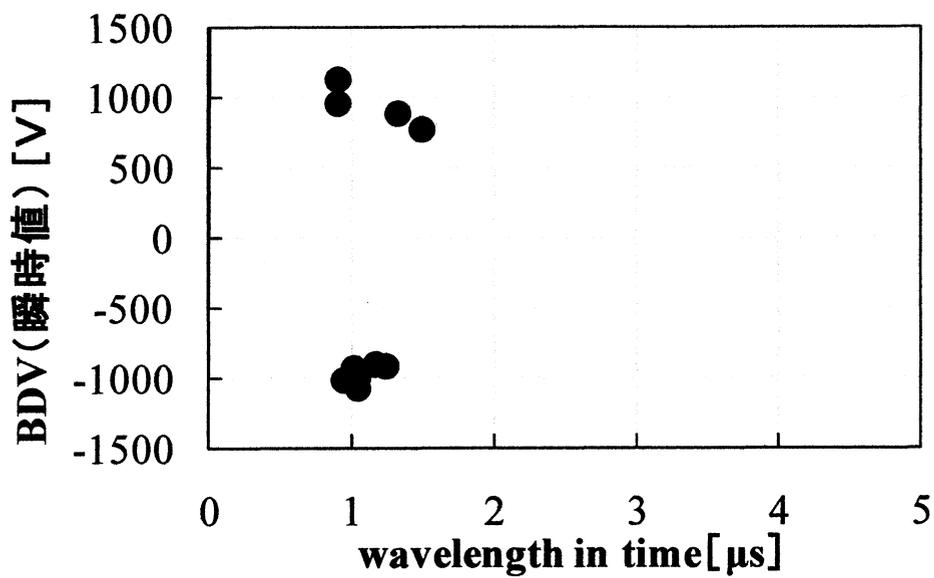


(b) 繰り返し放電 111~120 回放電電流波尾長

図 3-7 繰り返し放電による放電電流波尾長の変化  
(積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=0.2[\text{mm}]$ )



(a) 繰り返し放電 1~10 回放電電流波尾長

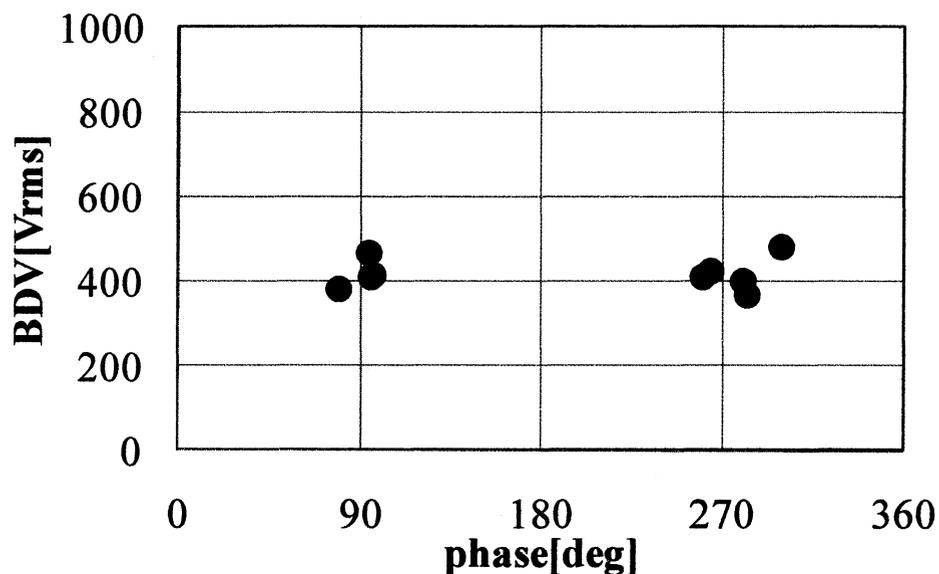


(b) 繰り返し放電 111~120 回放電電流波尾長

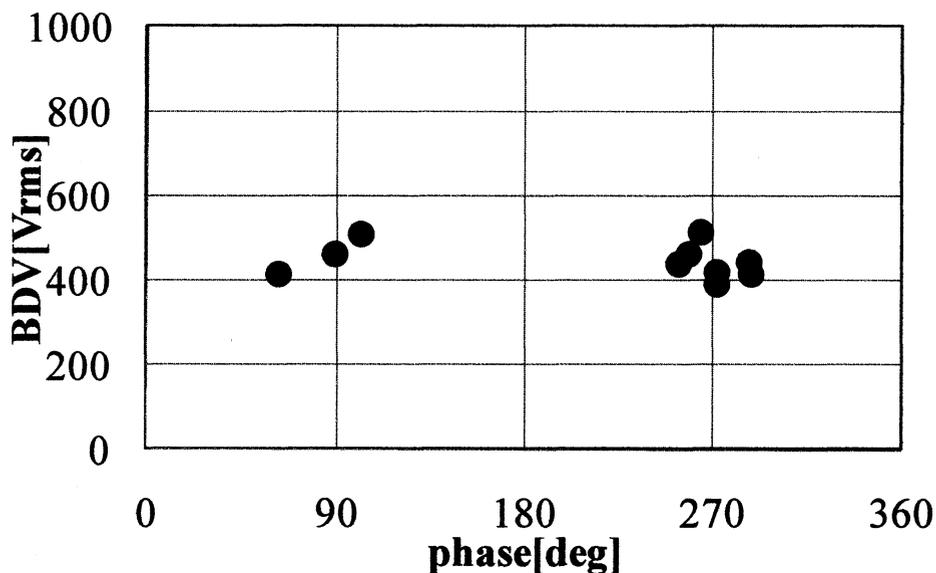
図 3-8 繰り返し放電による放電電流波尾長の変化

(積  $pd=5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=1.0[\text{mm}]$ )

繰り返し放電が放電開始電圧位相に及ぼす影響を図 3-9、3-10 に示す。図 3-9、図 3-10 より放電開始は位相 90[deg]、270[deg]付近で起きていることがわかる。これは印加電圧が正弦波であることから、正弦波ピーク付近で放電が開始していることを示す。また本章の実験は MGM 電極系を使用しているので、上部、下部の両電極共金属であり、電子の放出は上部電極、下部電極のどちらからでも可能であり、極性については考慮する必要はない。



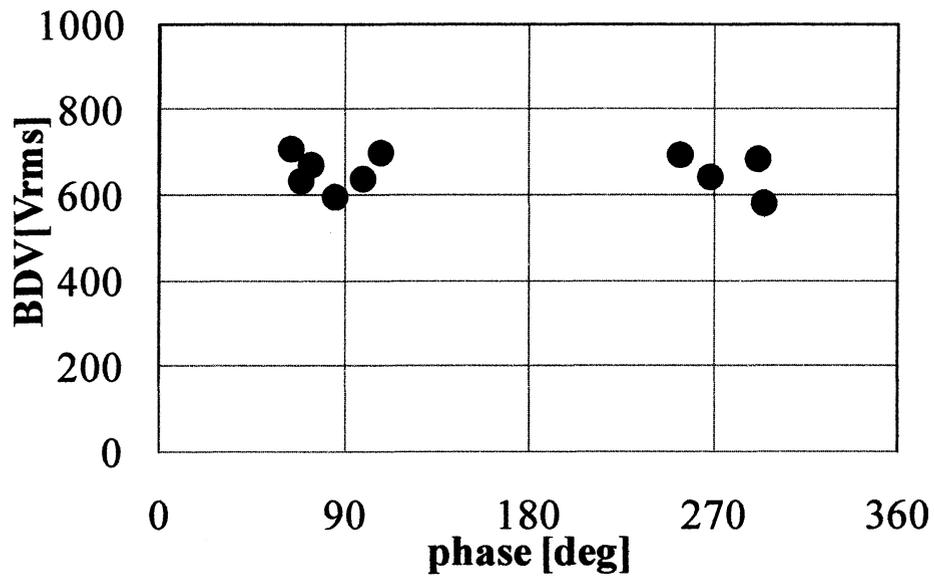
(a) 繰り返し放電 1~10 回放電開始電圧位相



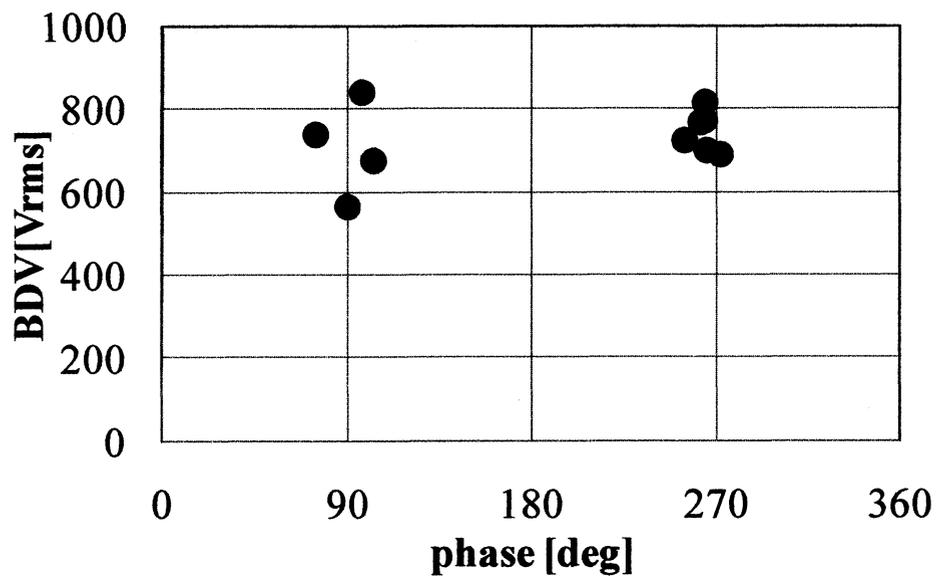
(b) 繰り返し放電 111~120 回放電開始電圧位相

図 3-9 繰り返し放電による位相の変化

(積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=0.2[\text{mm}]$ )



(a) 繰り返し放電 1~10 回放電開始電圧位相



(b) 繰り返し放電 111~120 回放電開始電圧位相

図 3-10 繰り返し放電による位相の変化

(積  $pd=5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=1.0[\text{mm}]$ )

次に積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の 2 種類による、繰り返し放電の変化における放電開始電圧の変化を図 3-11、図 3-12 に示す。図 3-11、3-12 には回数増加に伴う放電開始電圧の上昇を線形近似により示す。図 3-11、図 3-12 より、積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の両方において、繰り返し放電の回数増加に伴い、放電開始電圧が上昇することがわかる。しかし、放電開始電圧の増加量を比較すると、積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  では約  $100[\text{V}]$  あるのに対して、積  $pd=5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  では約  $50[\text{V}]$  となり、積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  における放電開始電圧の増加割合の方が大きいことがわかる。これは空隙における電界の強さが影響している可能性がある。電界  $E$  は以下の式を用いて算出する。

$$E = \frac{V}{d} \quad (3-1)$$

このとき、 $d$  は空隙距離、 $V$  は放電開始電圧とする。各空隙距離での放電開始電圧は、繰り返し放電 1~10 回の平均値を用いた。表 3-1 に各空隙距離における電界を示す。表 3-1 より、 $d=0.2[\text{mm}]$  は  $d=1.0[\text{mm}]$  より放電開始電圧が低いにもかかわらず、電界は高いことがわかる。よって電極にかかる電界が高い方が、電極表面に放電痕をより残したと考えられ、この放電痕に起因し放電開始電圧が増加すると考えられる。

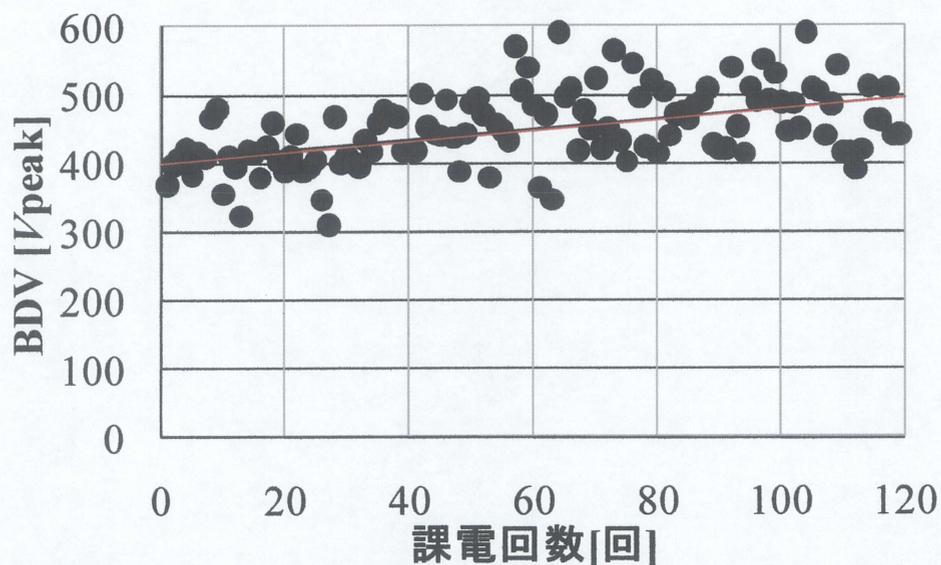


図 3-11 繰り返し放電による放電開始電圧の変化  
(積  $pd=1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=0.2[\text{mm}]$ )

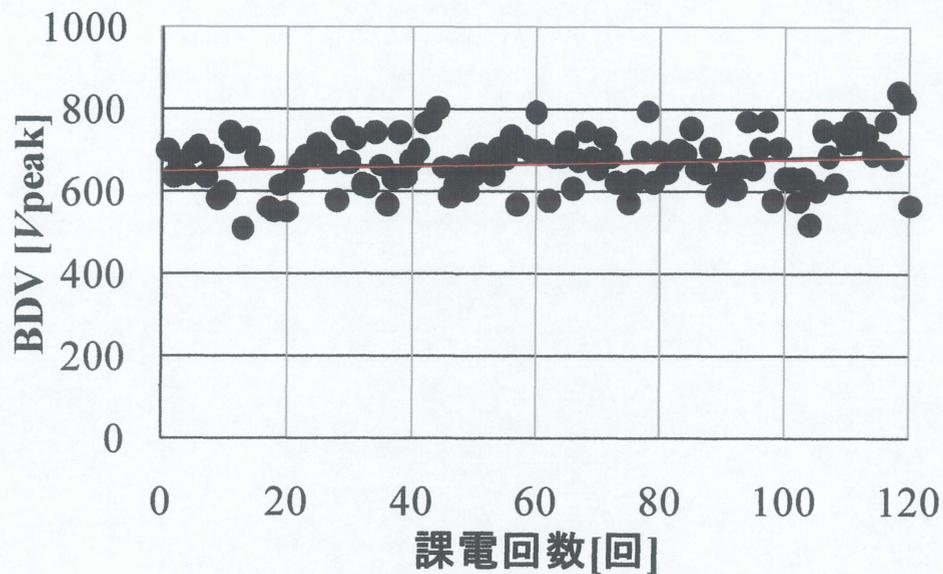


図 3-12 繰り返し放電による放電開始電圧の変化  
(積  $pd=5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $p=5,000[\text{Pa}]$ 、 $d=1.0[\text{mm}]$ )

表 3-1 各空隙距離における電界計算結果

空隙距離 $d$ [mm]	放電開始電圧 $V$ [Vpeak]	電界 $E$ [V/mm]
0.2	583	2915
1.0	921	921

### 3-2-4 まとめ

本項目では、今後の放電開始電圧の測定を行うにあたり、予備実験として、同一の電極を用いた繰り返し放電実験を積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 、 $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の 2 種類で測定を行った。

結果、電流波形、電流波形の波尾長、放電開始電圧位相は繰り返し放電を行う前後で変化が生じなかった。また、電流波形、電流波形の波尾長、放電開始電圧位相は、積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  ~  $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の範囲において、変化はなかった。一方、放電開始電圧は繰り返し放電の前後によって、放電開始電圧が上昇する傾向があった。また、積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の繰り返し放電前後の放電開始電圧上昇は、積  $pd$  が  $5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  のときの上昇よりも大きく、これは空隙における電界の強さが影響したと考えられる。

以上から本項目において、繰り返し放電による放電開始電圧の上昇を確認したことから、約 30 回程度であれば、放電開始電圧の上昇が比較的小さいことから、今後、同一の電極での測定は 30 回の放電開始を観測したら電極を交換するものとした。

### 3-3 課電休止時間の違いが放電開始電圧に与える影響

#### 3-3-1 目的

放電開始電圧の測定を行う際に、測定結果が信頼できる結果かどうかを見極める指標の一つとして、パッシェン則がある。このパッシェン則は、初期電子が十分存在した環境下において放電開始電圧の理論値と測定値が一致するという報告がある(20)。本項目では、課電休止時間を変化させた場合の放電開始電圧の変化から、初期電子が放電開始電圧に与える影響を確認し、今後の計測における課電休止時間の設定を目的とする。

#### 3-3-2 実験条件

本項目で用いた測定回路は図 2-1 で示した実験回路を用いる。実験方法は、まず印加電圧をオシロスコープ内のプログラムから 0[V]を印加開始電圧として、60[Hz]の正弦波交流を 6[V/s]で印加していく。CD-6 より放電電荷量が 10[pC]となったところを放電開始として、そのときの印加電圧を放電開始電圧として記録する。この後、再び交流電圧を印加していくが、本項目では課電休止時間が放電開始電圧に与える影響についての調査を行うため、課電休止時間を 1[s]、5[s]、20[s]、50[s]、100[s]、500[s]、1,000[s]として測定を行い、各点 10 回の平均値を求めている。なお、測定は 1[s]→5[s]→20[s]→50[s]→100[s]→500[s]→1,000[s]の順で行い、この一連の測定が終了するまで同一の電極を用いることとして、1[s]→1000[s]を行った後、順序を入れ替え、1,000[s]→1[s]の測定を行なう。測定雰囲気は先に述べたように、フランジ内を乾燥空気で満たしてあるが、フランジ内は前の放電による気体中の電荷の影響や、フランジ内圧力を一定に保ちやすくするため、排気と吸気を常に行っている。測定圧力は 5,000[Pa]、空隙距離は 0.2[mm]としている。

### 3-3-3 実験結果

図 3-13、3-14 に、課電休止時間を変化させた時の放電開始電圧、標準偏差を示す。図 3-13 は課電休止時間による放電開始電圧の変化について、図 3-14 は、課電休止時間を変化させたときの放電開始電圧の標準偏差を示す。放電開始電圧は印加電圧の最大値としている。図 3-13 より、課電休止時間が短くなるにつれて放電開始電圧が減少する傾向がみられる。また、図 3-14 より、放電開始電圧の標準偏差も図 3-13 の課電休止時間を短くするにつれて減少する傾向がみられる。これは課電休止時間を短縮することにより前の放電発生から次の放電発生までの時間が短くなることに起因していると考えられる。これは、前後の放電間隔が短くなることで、前の放電で発生したキャリアが空隙内に残っていることが考えられ、結果、次の放電開始電圧の減少を引き起こしていると言える

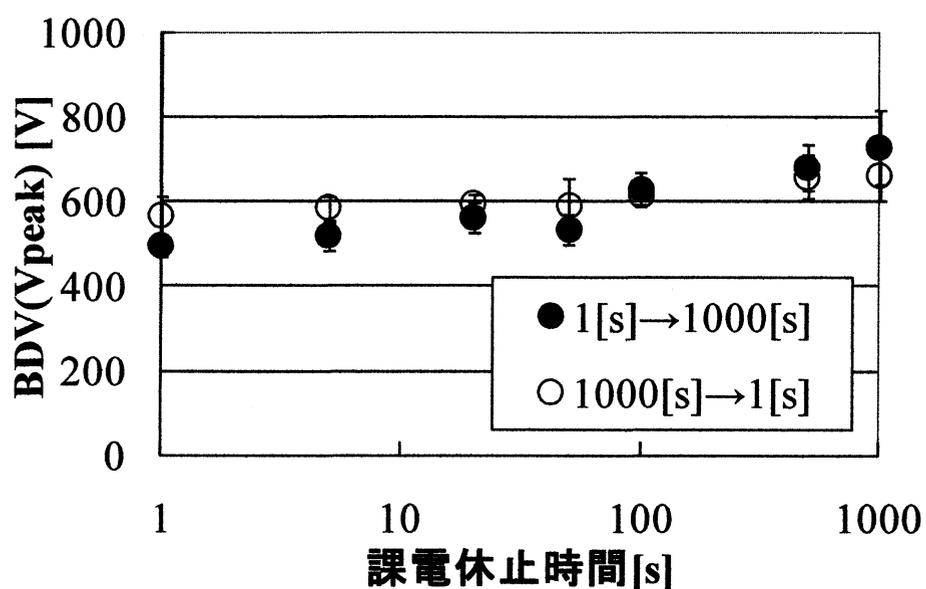


図 3-13 課電休止時間による放電開始電圧の変化

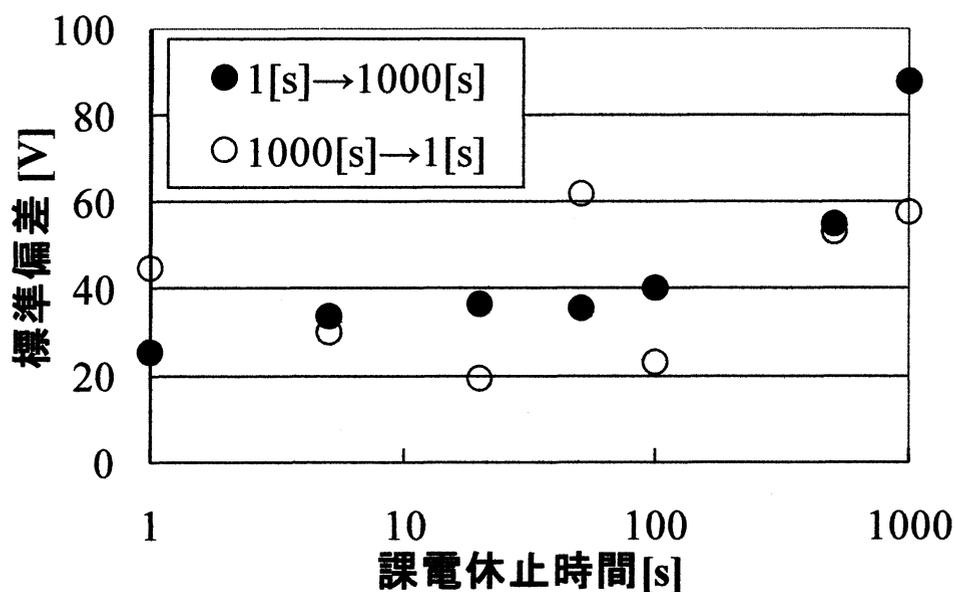


図 3-14 課電休止時間による放電開始電圧の標準偏差の変化

### 3-3-4 まとめ

本項目では、課電休止時間が放電開始電圧に与える影響を確認するため、課電休止時間を変化させた場合の放電開始電圧について測定を行った。結果、課電休止時間が短くなるにつれ、放電開始電圧は減少することがわかった。このことから、放電開始時間を短くすると、前の放電において空隙中に残るキャリアが次の放電に影響し、放電開始電圧を減少させていることがわかる。よって、今後放電開始電圧の測定を進める上で、測定値の精度を上げるためには、前放電のキャリアを十分残す方法を取り入れた後、課電休止時間をできる限り短くすることが必要といえる。

## 3-4 20秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電パッシェンの比較

### 3-4-1 目的

我々のグループの過去の研究において(21)、放電開始電圧を検出した場合、再び課電を行うまでに20[s]の課電休止時間を設けている。これは前の放電が起きた時に空間に残るキャリアや励起種の影響を受けないことを狙ったものである。しかし、課電休止時間を設けて、前の放電の影響を受けないようにした場合、S.Scherierによる文献値と比較して、放電開始電圧は高くなる傾向が見られた(22)。S.Scherierの報告は1964年の文献で、商用周波数60[Hz]によるコロナ開始電圧を測定した数少ない文献である。S.Scherierによると、パッシェンミニマム電圧はこれまで多くの直流課電によるパッシェンミニマム電圧の報告値345[V]とほぼ同じ値343[V]を観測している。我々の過去の報告で、高い測定値を得た原因の一つとして挙げられるのが、課電休止時間による前放電による影響である。S.Scherierの実験によると、前の放電が生じてから、放電が止むまで一度電圧を下げ、その後再び昇圧を行い、放電が再び観測されたときの電圧を放電開始電圧としている。この測定方法はすなわち、課電休止時間を設けていないことを意味していると考えられる。我々のこれまでの報告は、固体絶縁機器内の剥離放電環境に類似させるため、20[s]の課電休止時間を設けた上での放電開始電圧の測定を行ってきた。しかしながら、S.Scherierの文献値における放電開始電圧の測定は、課電休止時間を設けていないことから、我々の過去の測定値をS.Scherierの実験値に近づけるには、課電休止時間を設けずに前の放電における影響を受けた上で測定する必要があると考えられる。

本項目では、MGM電極系において、これまでの報告において用いた、前の放電が起きてから20[s]の課電休止時間を設け、再び課電を行う測定方法（以降、20秒間隔昇圧放電）によるパッシェンカーブの測定結果と、課電休止時間を設けず、S.Scherierの文献と測定方法を近づけた測定方法（以降、連続課電火花放電）によるパッシェンカーブの測定結果の比較を行うものとし、さらにいくつかの文献値との比較も行う。

### 3-4-2 実験条件

#### (1)20秒間隔昇圧放電

本項目では図2-1に示す実験回路を用いる。印加電圧は、まず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6[V/s]で印加していく。次に、CD-6より放電電荷量が10[pC]となったところを放電開始としてそのときの印加電圧を放電開始電圧として記録する。その後20[s]、課電休止時間を設けた後、再び電圧を印加していく。本項目では減圧下での測定を行っているため、測定圧力は1,000[Pa]、2,500[Pa]、5,000[Pa]、10,000[Pa]、50,000[Pa]、70,000[Pa]、100,000[Pa]とした。減圧下での測定において、フランジ内は排気と吸気を常に行っている。

## (2)連続課電火花放電

連続火花課電放電は、20 秒間隔昇圧放電と異なり課電休止時間を設けない課電方法である。その測定手順を図 3-15 に示す。図 3-15 より、印加電圧はオシロスコープ内のプログラムのから、60[Hz]の正弦波交流を 30[V/s]で印加していき、CD-6 より放電電荷量が 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、速やかに印加電圧を 50[%]に低減する。その後、再度オシロスコープ内のプログラムの指示により 60[Hz]の正弦波交流を 30[V/s]で放電開始を再び検知するまで印加していく。2 発目以降、放電開始電圧を検知したら、速やかに印加電圧を 70%まで低減させ、再度オシロスコープ内のプログラムの指示で 60[Hz]の正弦波交流を 30[V/s]で放電開始を検知するまで再度印加していく。印加電圧を放電開始検知後速やかに 70[%]ないし 50[%]に低減させることで、放電が消滅することを狙っている。また、昇圧速度を 6[V/s]から 30[V/s]にすることで、前後の放電間隔を短くすることも狙っている。連続課電火花放電においても 20 秒間隔昇圧放電と同様、測定は減圧下で行っている。その測定圧力は 1,000[Pa]、3,000[Pa]、5,000[Pa]、7,000[Pa]、10,000[Pa]、30,000[Pa]、50,000[Pa]、70,000[Pa]、100,000[Pa]とする。また減圧下での測定において、測定圧力の調整は、電極系をフランジ内に設置後、十分排気を行う。その後 100[Pa]以下になったら、乾燥空気を吸気し、所定の圧力に調節する。このとき、排気を同時に行わないことで、吸排気に伴う内部気体の移動や、前の放電による気体中の電荷への影響を極力避けることを狙った。

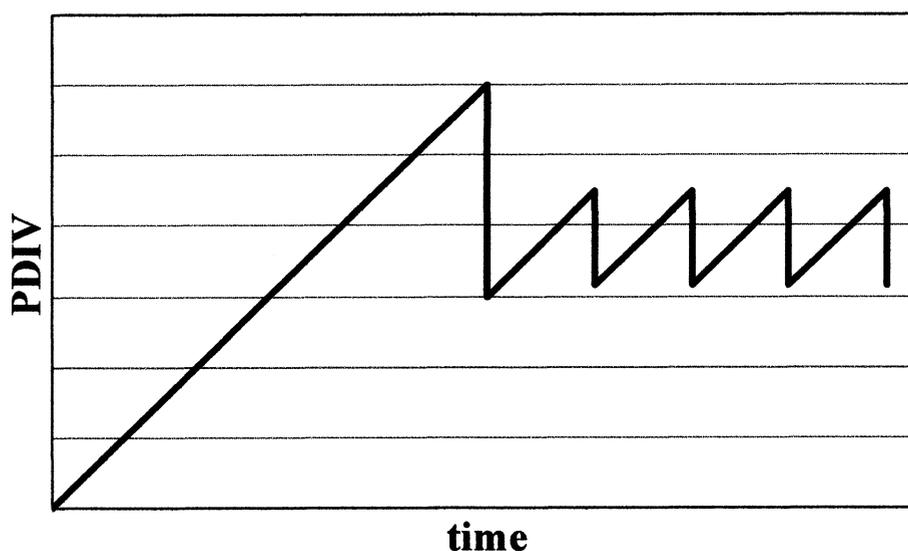


図 3-15 連続課電火花放電電圧印加方法

### 3-4-3 実験結果

#### (1)20 秒間隔昇圧放電

図 3-16、図 3-17 に 20 秒間隔昇圧放電の試験結果を示す。図 3-16 は縦軸を放電開始電圧、横軸を空隙距離  $d$  とする。図 3-16 の縦軸については図 3-17 と同様に放電開始電圧で、横軸を測定圧力  $p$  と、空隙距離  $d$  の積とする。ここでの放電開始電圧は、印加電圧が正弦波交流であることから、最大値  $V_{peak}$  としている。図中に示す文献値は、S.Scherier による測定値(22)である。

図 3-17 より、放電開始電圧は測定圧力が 1,000[Pa]を除いて、空隙距離が広くなることにより、増加する傾向が見られる。これは、空隙距離が広くなることにより、測定圧力との積  $pd$  が大きくなることから放電開始電圧が増加したものと考えられ、パッシェン則の傾向と合っている。しかし、測定圧力が 1,000[Pa]の測定値について、空隙距離が広くなるにつれて放電開始電圧が増加する傾向が見られない。これは、測定を行った積  $pd$  の範囲が、空隙距離 1.0[mm]以下の測定点で 1.0[Pa・m]以下となり、パッシェンレフトの領域であったことが考えられる。パッシェンレフトでの放電開始は半球電極先端の下部電極との最短距離で起きるのではなく、先端周辺の放電が起きやすい場所で放電が起きていると思われる。パッシェンレフトでの測定については、2,500[Pa]における 0.4[mm]以下の測定範囲、5,000[Pa]における 0.2[mm]以下の測定範囲、そして 10,000[Pa]における 0.1[mm]以下の測定範囲についても同様のことが言える。パッシェンレフトにおける放電開始が上部電極先端で起きなかった理由の検討として、電極系に 100[V]を印加したと仮定した場合の電界ベクトルの算出を、高速表面電荷法を用いて電界解析を行った。結果を図 3-18、図 3-19、図 3-20 に示す。図 3-18 は電界解析により計算した電界ベクトルの全体図、図 3-19 は電極直下の電界ベクトル図、図 3-20 は電位分布を示している。図にコーティングありと示したものは、放電開始が電極先端から起きるように先端 1φのみ金属面を露出し、他の部分にエポキシコーティングを行った電極についての解析結果である。それぞれの図でエポキシコーティングを行った半球電極と、行っていない半球電極についての比較を行っている。100[V]を印加したと仮定した場合における電極直下の最大電界の計算結果は、下部電極との空隙距離が 1.0[mm]において、エポキシコーティングを行っていない半球電極は 105.38[V/mm]、エポキシコーティングを行った半球電極は 104.73[V/mm]となり両者にほとんど差は見られず、電極直下に電界集中が見られる。また、空隙距離を 10[μm]とした場合、エポキシコーティングの有無にかかわらず、99.103[V/mm]となり空隙距離 1.0[mm]の計算結果と同様、電極直下に電界集中が見られる。この計算結果を表 3-2 に示す。表 3-2 には、空隙距離が 9.0[mm]における計算結果も示している。空隙距離が 9.0[mm]の場合についてはエポキシコーティングの有無により電界に差が見られる。以上から、空隙距離が短いときはエポキシコーティングの有無にかかわらず、電極直下に電界集中が起き、電界強度についても差は見られない。このことから、エポキシコーティングは必要ないと考えられる。しかし、図 3-17 よりパッシェンレフトにおいては放電開始電圧の上昇がないことから、半球電極先端

から放電が起きていなかった可能性がある。

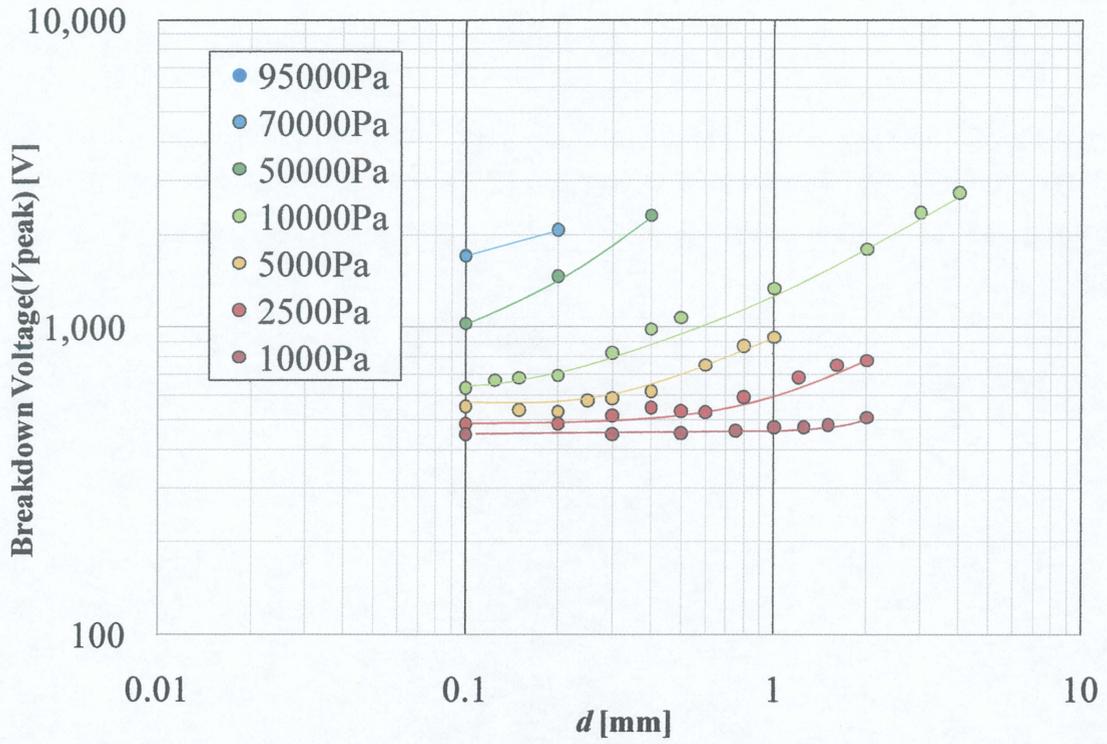


図 3-16 20 秒間隔昇圧放電結果(横軸：空隙距離  $d$ )

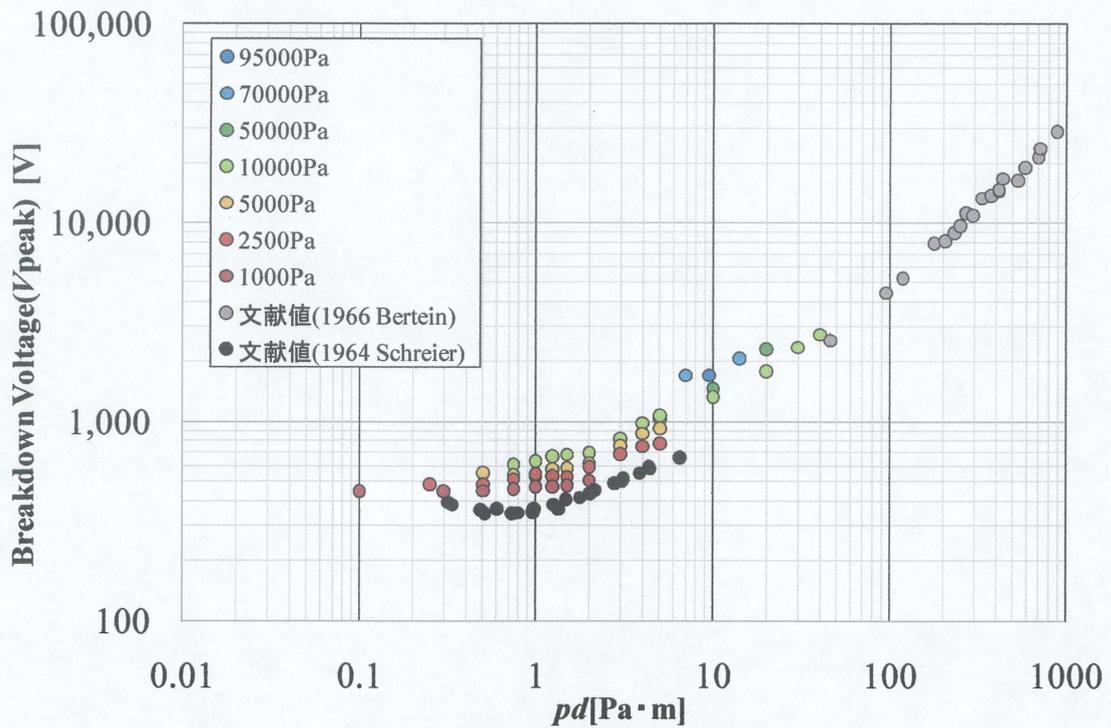
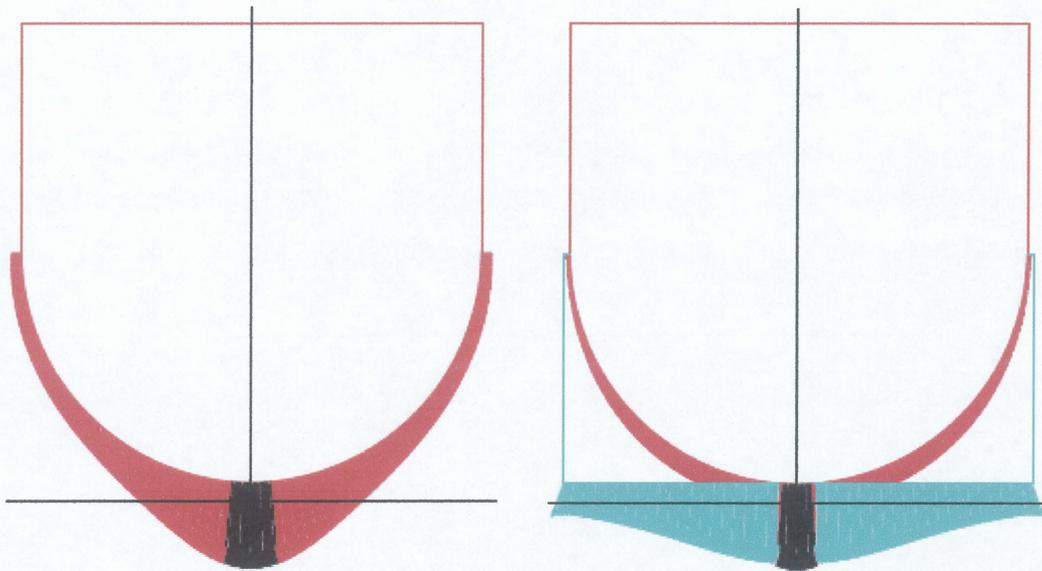


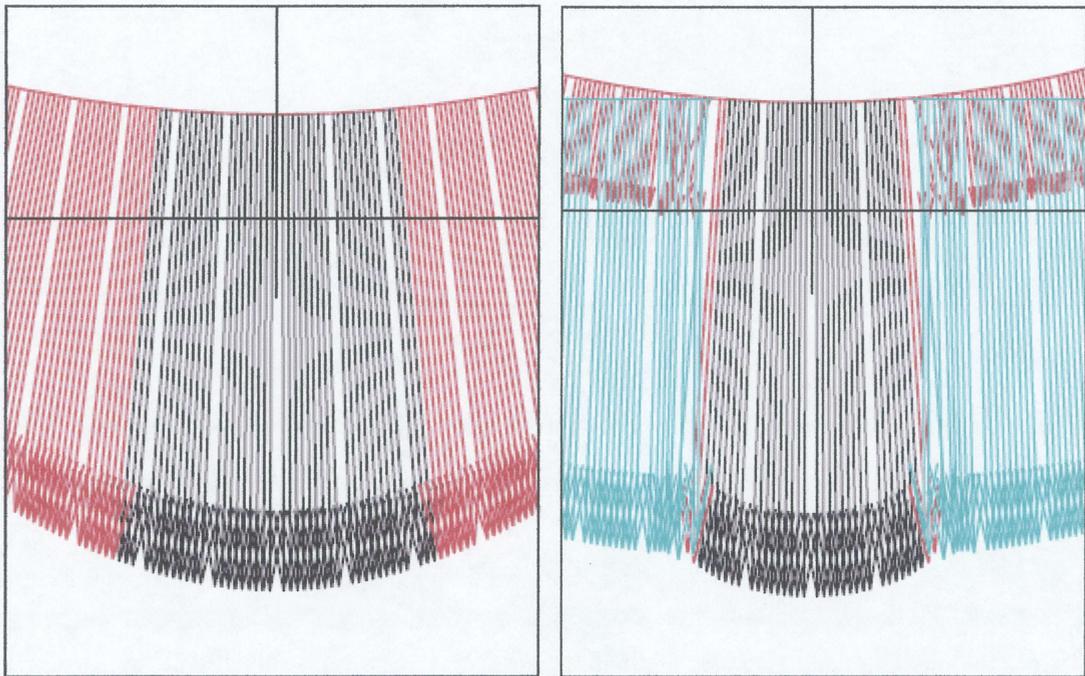
図 3-17 20 秒間隔昇圧放電結果(横軸：積  $pd$ )



エポキシコーティングなし

エポキシコーティングあり

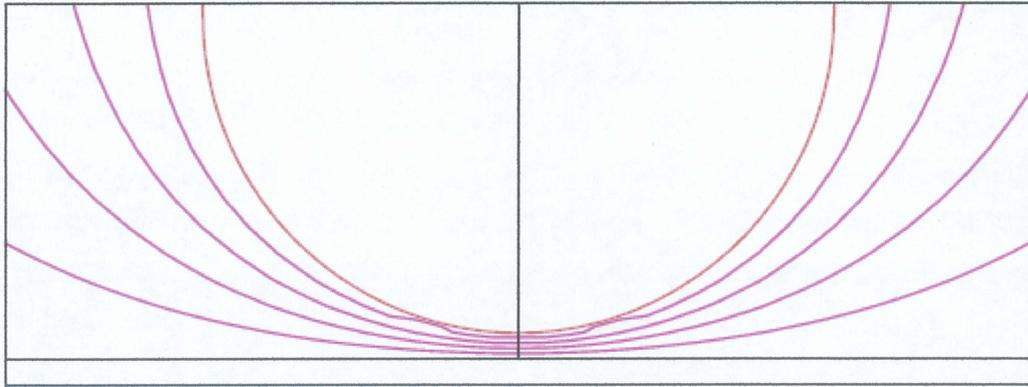
図 3-18 電界ベクトル解析結果(全体図)



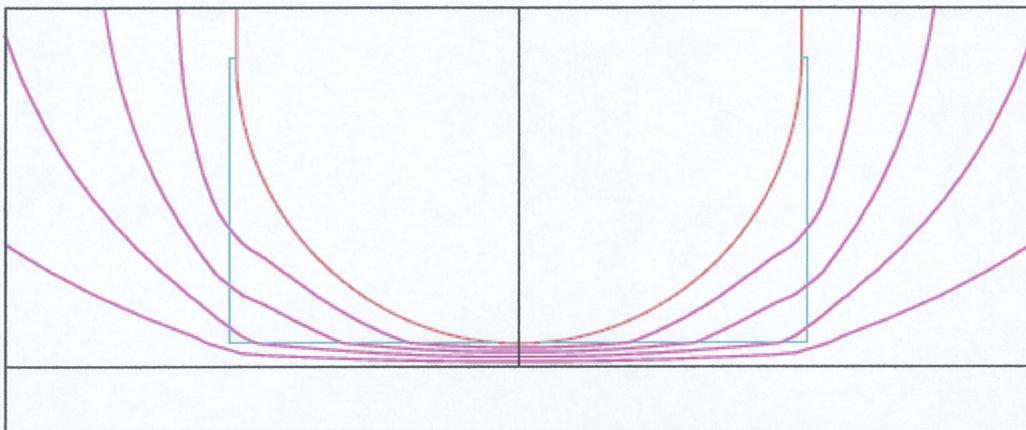
エポキシコーティングなし

エポキシコーティングあり

図 3-19 電界ベクトル解析結果(電極直下図)



(a) エポキシコーティングなし



(b) エポキシコーティングあり

図 3-20 電界ベクトル解析結果(電位分布)

表 3-2 電極直下の最大電界計算値(100[V]印加時)

空隙距離	9.0[mm]	1.0[mm]	10[ $\mu$ m]
エポキシなし	17.02[V/mm]	105.38[V/mm]	9910.33[V/mm]
エポキシあり	13.76[V/mm]	104.73[V/mm]	9910.33[V/mm]

図 3-17 より、積  $pd$  が大きくなるに従い、放電開始電圧が増加する傾向が見られる。これはパッシェン則の傾向と一致している。しかし、積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下の範囲において、パッシェン則に従うならば放電開始電圧は積  $pd$  の減少に伴い増加していくはずであるが、本項目における測定結果は放電開始電圧の上昇がない。これは、先に述べたように、半球電極先端から放電開始が起きていないと考えられる。なお、本測定におけるミニマム電圧は測定気圧が  $1,000[\text{Pa}]$  のときに約  $449[\text{V}]$  となっている。S.Scherier による文献値が  $0.729[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  のときに  $343[\text{V}]$  であることから、本項目における測定値は、S.Scherier による文献値と比較して約  $100[\text{V}]$  高い値となった。この理由として、課電休止時間を設けたことにより、前の放電での気体中の電荷への影響がなくなってしまうと考えられる。本項目では実機における放電形態を模擬しているため、課電休止時間を設けたが、S.Scherier の実験では課電休止時間を設けていない課電方法をとっていた。よって、S.Scherier の文献値に近づけるためには課電休止時間を設けずに、前の放電による影響を受けた方がいいと考えられる。また、本項目において、放電開始電圧を正確に測定していない可能性がある。本項目での放電開始電圧の測定値は、CD-6 に放電電荷量  $10[\text{pC}]$  を観測した時の印加電圧としている。この印加電圧は、Signal generator の入力を AC Amplifier で 100 倍に増幅した値をオシロスコープ内のプログラム内に計測し、その値を 30 倍したものを印加電圧としている。よってこの印加電圧は回路に印加した電圧の計算値であり、実際の測定値ではない。さらに、回路には  $100[\text{k}\Omega]$  の制限抵抗があり、また電極系と並列にカップリングコンデンサや検出インピーダンスが接続されている。よって、これらの影響、特に制限抵抗で電圧降下によって、実際の放電開始電圧より高い電圧を放電開始電圧としている可能性がある。

また、同じ積  $pd$  でも測定圧力が高いほど放電開始電圧が高い傾向がある。これは測定時の空隙距離が関係している可能性がある。空隙距離が  $1.0[\text{mm}]$  以下のような微小ギャップの場合、空隙中の初期電子が不足することで、放電開始電圧が上昇したと考えられる(20)。

## (2)連続課電火花放電

連続課電火花放電の測定結果を図 3-21、図 3-22 に示す。図 3-21 は、縦軸を放電開始電圧、横軸を空隙距離と測定圧力の積  $pd$  とする。また、図中に示す文献値(1964 Schreier) は 1964 年に S.Scherier により測定された測定値(22)、文献値(1966 Bertein)は、1964 年に H.Bertein により測定された測定値 (23) である。さらに、凡例には測定圧力と測定空隙距離範囲を記載してある。図 3-22 は、縦軸を放電開始電圧、横軸を空隙距離  $d$  にしたものである。図 3-21 より、積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  より大きい範囲において、放電開始電圧の測定値が文献値よりも高い傾向がある。この傾向は、測定圧力が  $100,000[\text{Pa}]$ 、 $70,000[\text{Pa}]$ 、 $50,000[\text{Pa}]$  の比較的圧力の高い測定結果ほど大きい。これは、図 3-21 の横軸を積  $pd$  としてあることから、同じ積  $pd$  でも測定圧力が高いほど空隙距離が小さく、ここでも空隙中の初期電子が不足しており、放電開始電圧が上昇したと考えられる(20)。また、S.Scherier に

よる文献値と比較すると、測定値は文献値より高い結果を得る。また、パッシェンミニマム電圧についても、測定することができず、 $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下のパッシェンレフトの領域では放電開始電圧の上昇を観測できない。図 3-22 より、放電開始電圧は空隙距離  $d$  が大きくなるにつれて大きくなる。また、同じ空隙距離  $d$  においても測定圧力が高い方がより高い放電開始電圧となる。しかし、図 3-22 では、本測定でパッシェンミニマム電圧が測定できないことから、 $3,000[\text{Pa}]$ 、 $5,000[\text{Pa}]$ の測定結果ではそれぞれパッシェンレフトの領域まで測定しているにもかかわらず、放電開始電圧の上昇は見られない。

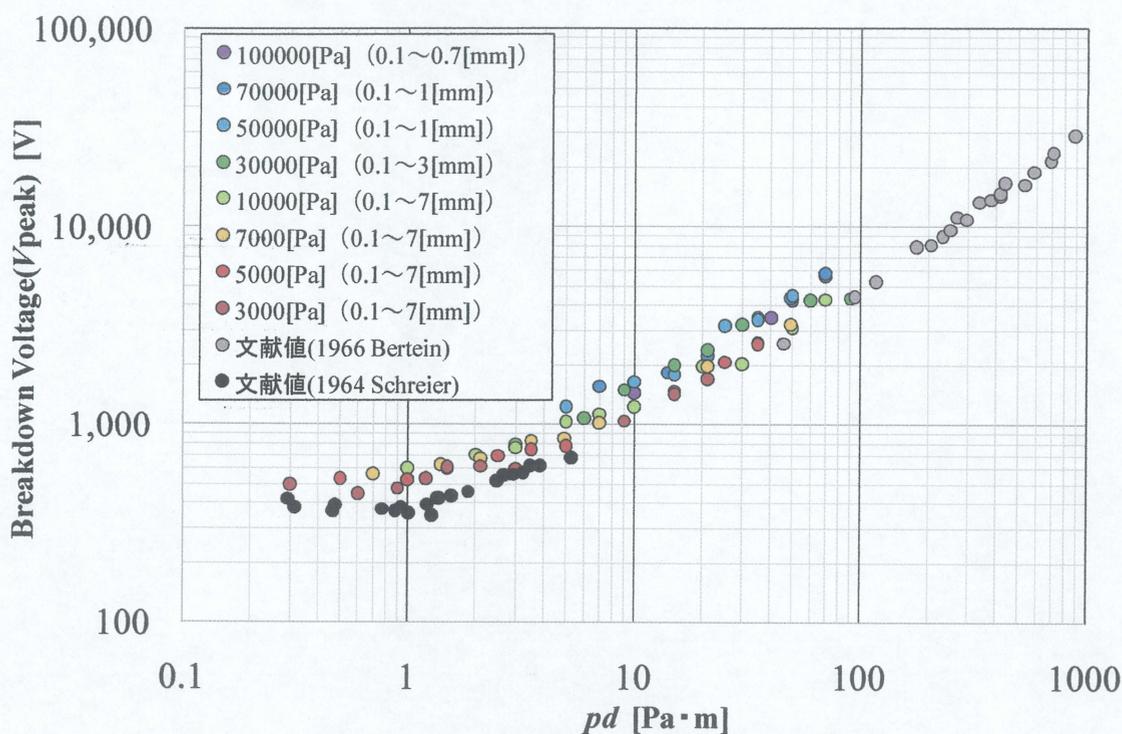


図 3-21 連続課電火花放電測定結果(横軸：積  $pd$ )

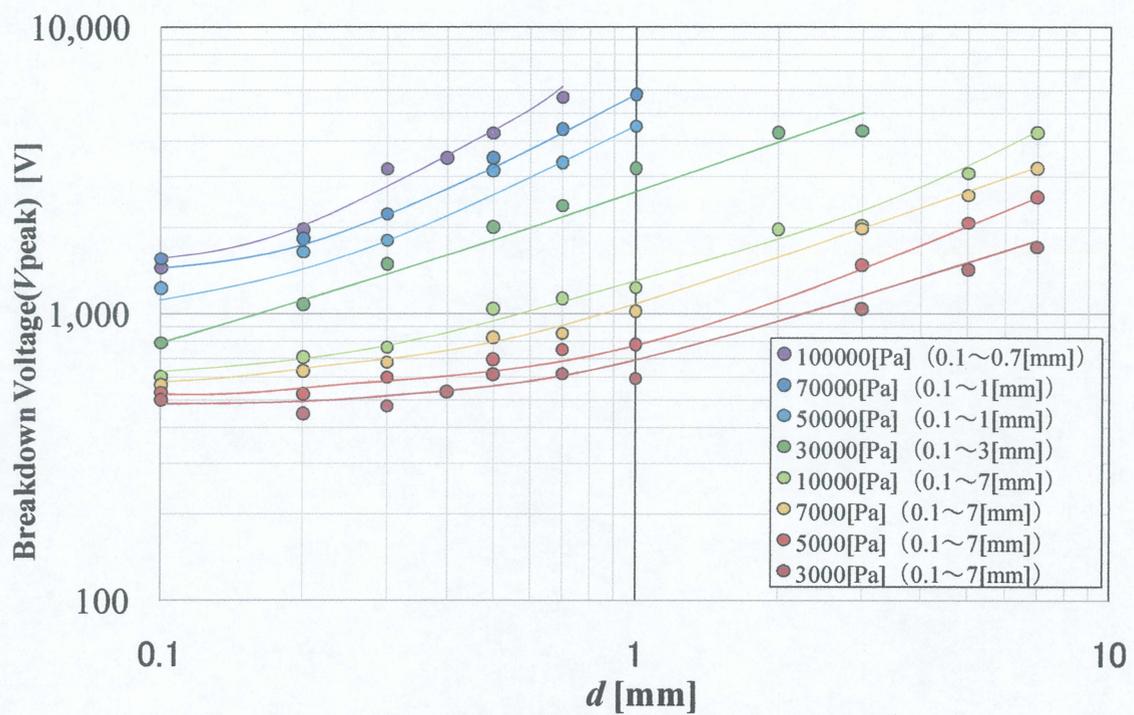


図 3-22 連続課電火花放電測定結果(横軸：空隙距離  $d$ )

## 20 秒間隔昇圧放電と連続火花課電放電の比較

表 3-3 に 20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の測定条件の違いを示す。

表 3-3 20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の測定条件の相違点

条件	20 秒間隔昇圧放電	連続課電火花放電
昇圧速度	6[V/s]	30[V/s]
課電休止時間	20[s]	0[s]
測定雰囲気	乾燥空気(循環)	乾燥空気(密封)
放電開始閾値	放電電荷量 10[pC]	放電電荷量 5[pC]
放電開始電圧	VT 一次側×30 倍 (算出値)	フランジ両端 (測定値)

20 秒間隔昇圧放電(図 3-17)と連続課電火花放電(図 3-21)において、放電開始電圧は連続課電火花放電の方が低い結果を得る。この原因としては 4 点考えられる。まず 1 点目は、表 3-3 に示した中の課電休止時間の影響である。20 秒間隔昇圧放電は前の放電後 20 秒間の課電休止時間を設けているため、その間に空間に残るキャリアや励起種の影響が少なくなってしまう、放電開始電圧が上昇したと考えられる。2 点目は、昇圧速度の違いである。20 秒間隔昇圧放電は 6[V/s]であるのに対して、連続課電火花放電は 30[V/s]となっていることから、結果、20 秒間隔昇圧放電は前の放電から次の放電までの所要時間が長くなり、前の放電の時に残ったキャリアや励起種の影響が少なくなってしまうと考えられる。3 点目は、測定雰囲気の影響である。両者とも同じ乾燥空気であるが、20 秒間隔昇圧放電は連続課電火花放電と異なり、常に乾燥空気の吸排気を行っている。このためフランジ内に気体の交換が起こり、フランジ内のキャリアや励起種が移動してしまい、放電開始電圧の上昇に繋がったと考えられる。そして 4 点目は、放電開始電圧の記録方法である。20 秒間隔昇圧放電は放電の発生を検知したら、その時の VT 一次電圧を 30 倍した値を放電開始電圧としていた。つまり、この値は測定値ではなく計算値である。さらに、VT の一次電圧は回路全体にかかる電圧であり、制限抵抗での電圧降下分を加味していないため、実際の放電開始電圧より高い値となっていた可能性がある。一方、連続課電火花放電は、フランジの両端電圧をプローブで実際に測定しているので、より実際の放電開始電圧に近いと考えられる。

次に、図 3-23 図 3-24、図 3-25 に測定圧力 5,000[Pa]における 20 秒間隔昇圧試験と連続課電火花放電の放電開始電圧の比較を示す。図 3-23、図 3-24、図 3-25 はそれぞれ、空隙距離 0.1[mm]、0.2[mm]、0.05[mm]の測定結果である。図中の 20 秒間隔は 20 秒間隔昇圧放電の測定値を示し、open、close はそれぞれ連続課電火花放電において、測定中に乾燥空気を循環させた状態での測定、もしくは密封状態での測定の差である。図 3-23、図 3-24、図 3-25 より、20 秒間隔昇圧試験の標準偏差は連続課電火花放電の標準偏差と比較して小さい傾向がある。これは、昇圧速度が連続課電火花放電では 30[V/s]と、20 秒間隔昇圧試験の

6[V/s]より速いため、本来放電が開始する電圧でも放電が起きないことがあり、測定結果がばらついたと考えられる。次に、open と close では close の方が、低い放電開始電圧測定結果となる傾向がある。これは、close ではフランジ内の空気が循環されないため、前の放電により影響を受けた電荷がフランジ内に残っており、低い放電開始電圧となった。

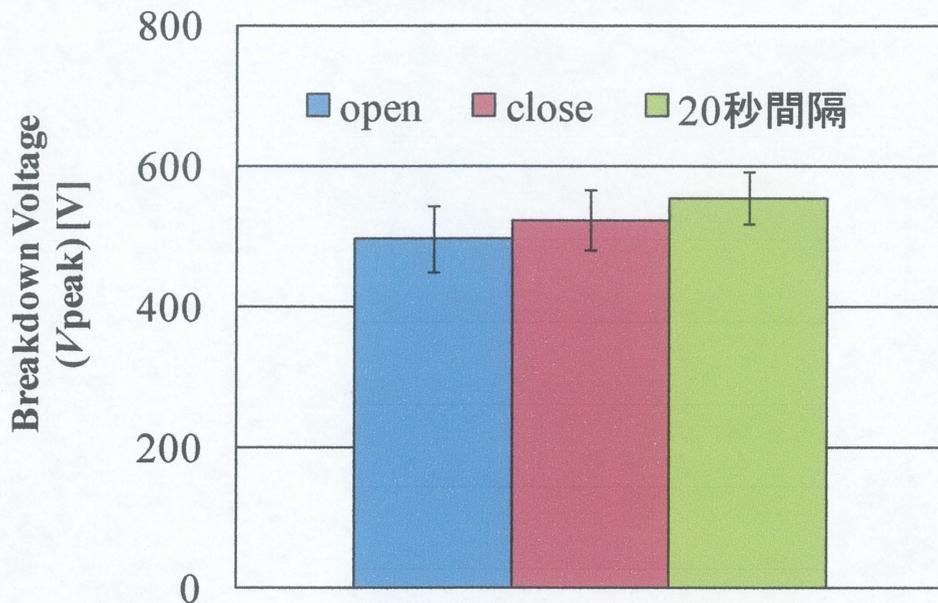


図 3-23 20 秒間隔昇圧試験と連続課電火花放電の比較( $p=5,000$ [Pa]、 $d=0.1$ [mm])



図 3-24 20 秒間隔昇圧試験と連続課電火花放電の比較( $p=5,000$ [Pa]、 $d=0.2$ [mm])

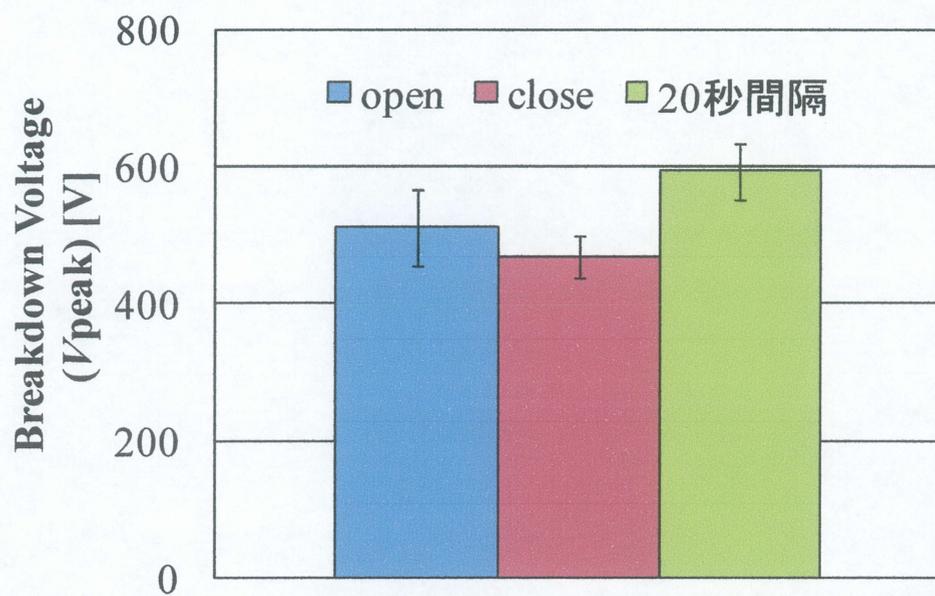


図 3-25 20 秒間隔昇圧試験と連続課電火花放電の比較( $p=5,000$ [Pa]、 $d=0.05$ [mm])

### 文献値と連続課電火花放電の比較

図 3-26 に文献値と連続課電火花放電の測定値との比較を示す。図 3-26 に示した凡例のうち、測定値は連続課電火花放電の測定値、Scheier (1964)(22)は交流課電によるパッシェンカーブの測定結果であり、Bertein (1966)(23)、Sakai (1989)(24)、Seeliger (1934)(23)、Lee et al (2001)(25)は直流課電によるパッシェンカーブの測定結果である。これらはすべて MGM 電極系を用いている。図 3-26 より、測定値は積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}] \sim 1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の範囲で Seeliger (1934)、Germer (1959)、Scheier (1964) の文献値より高い放電開始電圧を観測した。積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の領域において、積  $pd$  を増加していくにつれ、Bertein (1966) の文献値に近づく結果となった。ここでも、積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}] \sim 1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の範囲においては、微小ギャップによる初期電子の不足が考えられる。

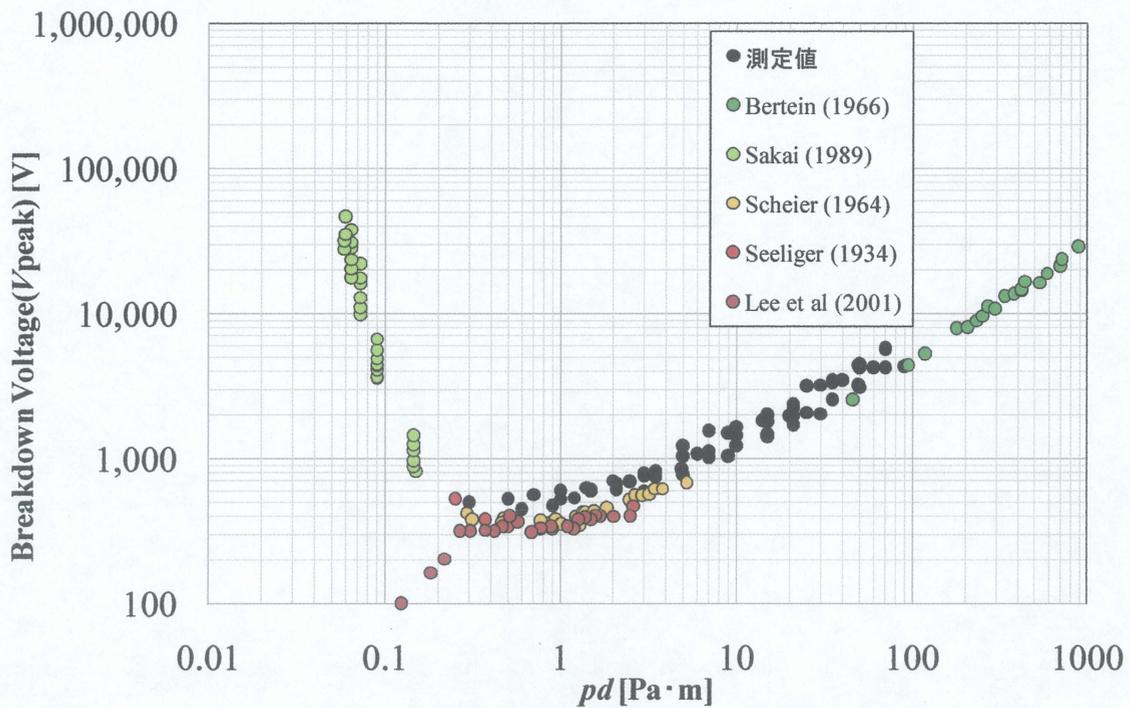


図 3-26 文献値と測定値の比較

#### 3-4-4 まとめ

本項目では、MGM 電極系における 20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の測定および測定結果の比較と、連続課電火花放電と文献値との比較を行った。

20 秒間隔昇圧放電において、積  $pd$  の増加により、放電開始電圧は増加する。しかしパッシェンレフト領域においては、放電開始が半球電極先端の下部電極との最短距離で起きるのではなく、先端周辺の放電が起きやすい場所で放電が起きていた。パッシェンミニマム電圧は、課電休止時間や放電開始電圧記録場所の影響で S.Scheier の文献値より高い約 449[V]となった。空隙距離が 1.0[mm]以下のような微小ギャップの場合、空隙中の初期電子が不足するため、同じ積  $pd$  でも測定圧力が高いほど放電開始電圧が高い傾向がある。

連続課電火花放電において、積  $pd$  が 10[Pa·m]より大きい範囲では、放電開始電圧の測定値が文献値よりも高い傾向がある。20 秒間隔昇圧放電と同様、微小ギャップにおける初期電子の不足が考えられる。パッシェンミニマム電圧についても約 449[V]で文献値よりも高い結果となった。パッシェンレフトの領域では 20 秒間隔昇圧放電と同様、放電開始電圧の上昇を観測できなかった。

20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の比較より、課電休止時間の影響、昇圧速度の違い、測定雰囲気の違い、放電開始電圧の記録方法の違いから、放電開始電圧は連続火花放電の方が低い測定結果となった。標準偏差については、昇圧速度の影響で連続課電火花放電の方が大きくなった。

連続課電火花放電文献値との比較では、放電開始電圧が、10[Pa·m]以上の積  $pd$  において、積  $pd$  を増加していくにつれ、文献値に近づく結果となった。

## 第4章 絶縁層を設けた電極系における

### 空隙分担電圧と絶縁破壊電圧の比較

#### 4-1 はじめに

第3章では、固体絶縁機器内に発生する剥離やボイドにおける絶縁性能を評価するための重要な基礎データとなる MGM 電極系の放電開始特性について測定を行った。本章では、固体絶縁機器内の剥離欠陥を模擬した金属-空気-絶縁層からなる電極系(MGI 電極系)やボイドを模擬した絶縁層-空気-絶縁層からなる電極系(IGI 電極系)における部分放電開始電圧の測定を行う。そこから、容量分担式によって空気層にかかる分担電圧を算出し、MGM 電極系における放電開始電圧や過去の文献値と比較することで、絶縁層を設けた電極系における放電現象の調査を行う。

#### 4-2 絶縁層を設けた電極系における放電開始場所の観察

##### 4-2-1 目的

絶縁層を含んだ電極系を用いて、交流課電における部分放電開始電圧の測定を行う際に、上部電極先端より部分放電の開始が起きているか観察を行う。また、部分放電開始が上部電極先端で起きていない場合、部分放電の開始が先端から起きるように検討を行う。

##### 4-2-2 実験条件

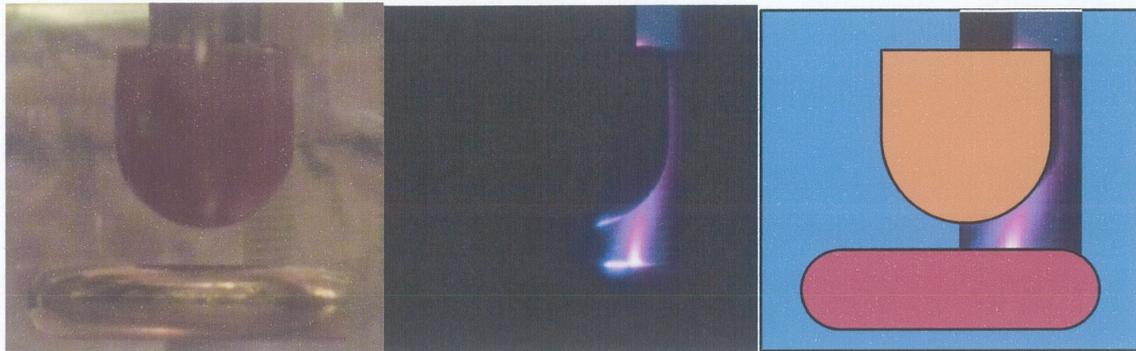
本項目における測定回路は図 2-1 に示す測定回路を用いている。電圧の印加方法及び放電開始電圧の判定は第3章の連続課電火花放電の測定方法と同様である。本項では、上部電極に 0.31[mm]の絶縁層を設け、IGM 電極系と、下部電極に 0.54[mm]の絶縁層を設けた MGI 電極系において、部分放電の開始場所の観察を行っている。部分放電開始場所の観察は、課電時の電極系をデジタルビデオカメラ(GZ-MG255:日本ビクター株式会社)を用いて録画した映像を用いて行なう。本項目における測定圧力は 30[Pa]、10,000[Pa]、100,000[Pa]とした。また、空隙距離は 0.1[mm]、1.0[mm]、5.0[mm]、7.0[mm]とした。

##### 4-2-3 実験結果

IGM 電極系における観測結果を図 4-1 に示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ、(a)測定圧力 30[Pa]、空隙距離 0.1[mm]、(b)測定圧力 10,000[Pa]、空隙距離 5.0[mm]、(c)測定圧力 100,000[Pa]、空隙距離 0.5[mm]における観察結果を示す。また、各図の左図は放電開始前の電極系の図、右隣の暗い図は放電開始時の画像((b)図は明るい中での撮影)、さらに(a)図の一番右図は電極系をモデル化したものである。(a)における放電開始時の画像と放電開始前の電極系画像

とを比較すると、放電開始時画像に電極系全体に影のような発光が見られる。この様子をモデル化したものが一番右の図である。これは、測定圧力と空隙距離の積  $pd$  がパッシェンレフト領域であることから、電極先端からでなく、放電が一番起きやすい場所から放電がおきていることを示している。次に図 4-1(b)において、放電開始時の画像を見ると、電極先端からではなく、側部の黒い点からの放電開始であることが確認でき、ここでも電極先端からの放電開始を見るができない。さらに、図 4-1(c)においては放電開始時の発光を確認することができなかった。

図 4-1(b)において部分放電開始が上部電極先端から確認できなかったため、上部電極先端より部分放電の開始が起きるよう検討を行う。図 4-1(b)において上部電極側部に見られる黒い点は、絶縁層を注継する際、十分にエポキシコーティングが行われず、金属が露出している部分である。ここからの放電を防ぐために、金属の露出部に RTV シリコーン(TSC392C:モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社)を塗り補てんしたものと、金属露出部に市販のビニールテープを貼ったもので、測定圧力 10,000[Pa]、空隙距離 5.0[mm]における同様の観察を行った。その観察結果を図 4-2 に示す。図 4-2(a)は RTV を補てんした結果であるが、上部電極上部までの発光が見られる。これは、沿面放電が電極上部まで走ったと考えられる。一方、図 4-2(b)に示すビニールテープを貼った電極は、上部電極先端からの放電を確認することができた。以上から、ビニールテープを貼ることは本項目における測定において、上部電極先端からの部分放電開始を行うために有効な手段であると考えられる。しかしながら、図 4-1(a)、図 4-1(c)の条件では、先端からの部分放電開始に伴う発光を観察することができなかった。これは、部分放電開始電圧の測定自体、非常に困難であることや、観察に用いたビデオカメラのフレームレートの低さから、放電開始の際に発光を観測できなかったと考えられる。



放電開始前の電極系図 放電開始時の発光 発光モデル図  
 (a) RTV 補てんを行った上部電極における部分放電開始観察



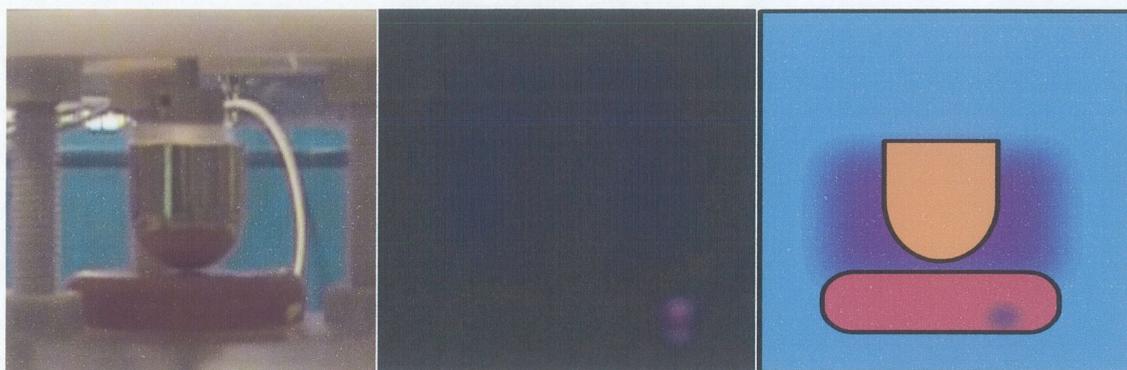
放電開始前の電極系図 放電開始時の発光 発光モデル図  
 (b) ビニールテープを上部電極に貼った場合における部分放電開始観察

図 4-2 上部電極に側部からの放電を防ぐための検討を行った  
 IGM 電極系における放電開始場所の観察

次に図 4-3 に MGI 電極系における放電開始時の観察結果を示す。図 4-3(a)、図 4-3(b)はそれぞれ、(a)測定圧力 30[Pa]、空隙距離 7.0[mm]、(b)測定圧力 100,000[Pa]、空隙距離 0.5[mm]における観察結果を示す。図 4-3(a)より電極全体に影のような発光が見られる。また、放電開始に伴う発光が下部電極下部の金属露出部の発光が見られる。ここでは IGM と同様、測定圧力と空隙距離の積  $pd$  がパッシェンレフト領域であることから、電極先端からでなく、放電が一番起きやすい場所からの放電開始であったことが考えられる。また、図 4-3(b)においても IGM と同様、放電開始に伴う発光は見られない。

下部電極に見られる金属露出部は、エポキシ注型時の注型部にできる突起を取り除く際に同時にエポキシが剥がれてしまう部分である。ここでは金属露出部からの放電を防ぐため、突起を取り除かないことにする。そして、再度測定、観察を行った結果を図 4-4 に示す。図 4-4(a)は測定圧力 30[Pa]、空隙距離 0.1[mm]の観察結果であるが、図 4-3(a)と比較すると、金属露出部からの放電は見られなくなった。しかしながら、電極系全体に影のような

放電が見られる。ここではやはり上部電極先端からの放電開始が見られなかったと考えられる。また、図 4-4(b)は測定圧力 10,000[Pa]、空隙距離 7.0[mm]における観察結果である。ここでは、金属露出部からの発光は見られず、電極先端からの放電を確認することができる。以上から、本項目においては、下部電極におけるエポキシ注型時にできる突起を取り除かないことで、金属露出部からの放電を防ぐことができると考えられる。



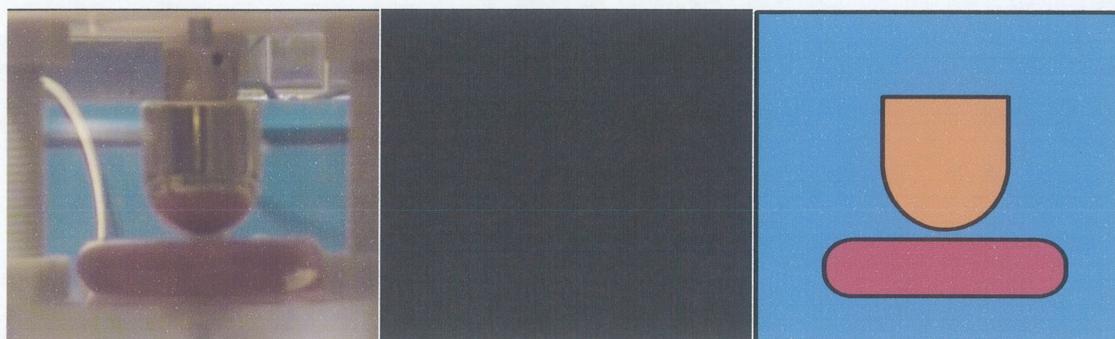
放電開始前の電極系図

放電開始時の発光

発光モデル図

(a)

測定圧力:30[Pa] 空隙距離:0.1[mm]



放電開始前の電極系図

放電開始時の発光

発光モデル図

(b)

測定圧力:100,000[Pa] 空隙距離:0.5[mm]

図 4-3 MGI 電極系における放電開始場所の観察

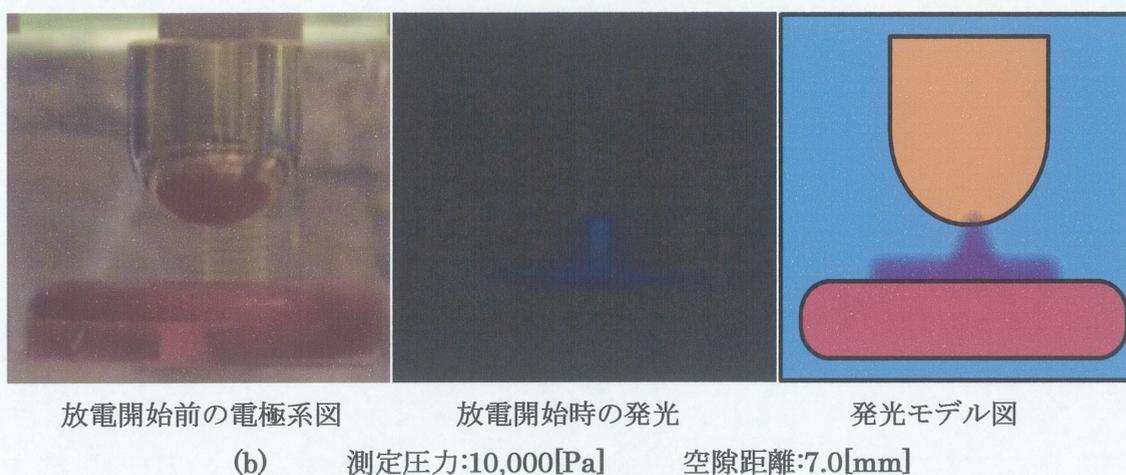


図 4-4 下部電極に金属露出部からの放電を防ぐための検討を行った MGI 電極系における放電開始場所の観察

#### 4-2-4 まとめ

本項目では、絶縁層を含んだ電極系における放電開始場所の観察ということで、デジタルビデオカメラを用いた放電開始時の発光を行った。結果、本項目において、上部電極については側部にビニールテープを接着させるだけで改善が見られ、また下部電極についてはエポキシ注型時にできる突起部を取り除かないことで改善が見られた。しかし、測定圧力が 100,000[Pa]のときや 30[Pa]のときには上部電極先端からの発光が見られない。これは、デジタルビデオカメラのフレームレートの低さや部分放電開始電圧の測定の困難さから、本項目において観察することができなかった。しかしながら、以降の絶縁層を含んだ部分放電開始電圧の測定において、上部電極、下部電極共に本項目で用いた改善策を適応させることとした。

## 4-3 MGI 電極系の空隙分担電圧と MGM 測定値との比較

### 4-3-1 目的

固体絶縁機器内の剥離欠陥を模擬した MGI 電極系において、交流課電を行ったときの部分放電開始電圧から容量分担式を用いて空隙分担電圧を求める。空隙分担電圧と MGM 測定値の比較を行うことで、MGI 電極系における放電現象のふるまいについての調査を行う。

### 4-3-2 実験条件

本項における測定回路は、図 2-1 に示す測定回路を用いる。電圧の印加方法及び放電開始電圧の判定は第 3 章の連続課電火花放電の測定方法と同様である。

本項における電極構成はこれまでと同様、上部電極を球電極、下部電極を平板電極としているが、下部電極について、エポキシコーティングを行うことで絶縁層を設けている。絶縁層を設けた下部電極は一連の測定が終了するまで同一のものを使用している。本項における下部電極の絶縁層膜厚は 0.54[mm]、0.35[mm]であった。

### 4-3-3 実験結果

MGI 電極系における部分放電開始電圧の測定結果を図 4-5、4-6 に示す。図 4-5、図 4-6 は部分放電開始電圧を縦軸、測定圧力と電極間距離の積  $pd$  としている。電極間距離は空隙距離と絶縁層の膜厚の和として算出している。また図 4-5 は絶縁層膜厚 0.35[mm]における部分放電開始電圧の測定結果、図 4-6 は絶縁層膜厚 0.54[mm]の部分放電開始電圧である。図中の凡例には、各測定圧力について色分けを示した。また各測定圧力と並べて、空隙距離を記載した。図中に示した黒丸の文献値は 1964 年の S.Scherier(22)による文献値で、灰色丸の文献値は 1966 の H.Bertain(23)による文献値である。これらの文献値は MGM 電極系における放電開始電圧の測定値である。図 4-5 より、MGI の測定値は文献値と比較すると、積  $pd$  が約 10[Pa·m] を境にして積  $pd$  が大きい領域では文献値より低い部分放電開始電圧を、小さい領域では文献値より高い部分放電開始電圧となる。積  $pd$  が 10[Pa·m] より小さい領域については、文献値の放電開始電圧が積  $pd$  を減少させるに従って減少していくのに対して、MGI 電極系の部分放電開始電圧測定値は積  $pd$  が約 3.0~4.0[Pa·m] 以下の領域において約 800[V](波高値)でほぼ一定となり、減少する傾向が見られない。これは、測定を行った MGI 電極系において、MGM 電極系と同様に、上部電極の部分放電が起きやすい経路からの部分放電開始があったと考えられる。同じような傾向は図 4-6 からも見ることができる。図 4-6 において、図 4-5 と同様に約 10[Pa·m] を境にして、積  $pd$  が大きい範囲では文献値より低い部分放電開始電圧を、積  $pd$  が小さい領域では文献値より高い部分放電開始電圧を得る。また図 4-5 おいて、MGI 電極系の部分放電開始電圧測定値が積  $pd$  約 3.0~4.0[Pa·m] 以下の積  $pd$  でほぼ一定となったのに対し、図 4-6 では積  $pd$  が約 5.0~6.0[Pa·m] 以下の範囲で約 800[V](波高値)でほぼ一定となっている。

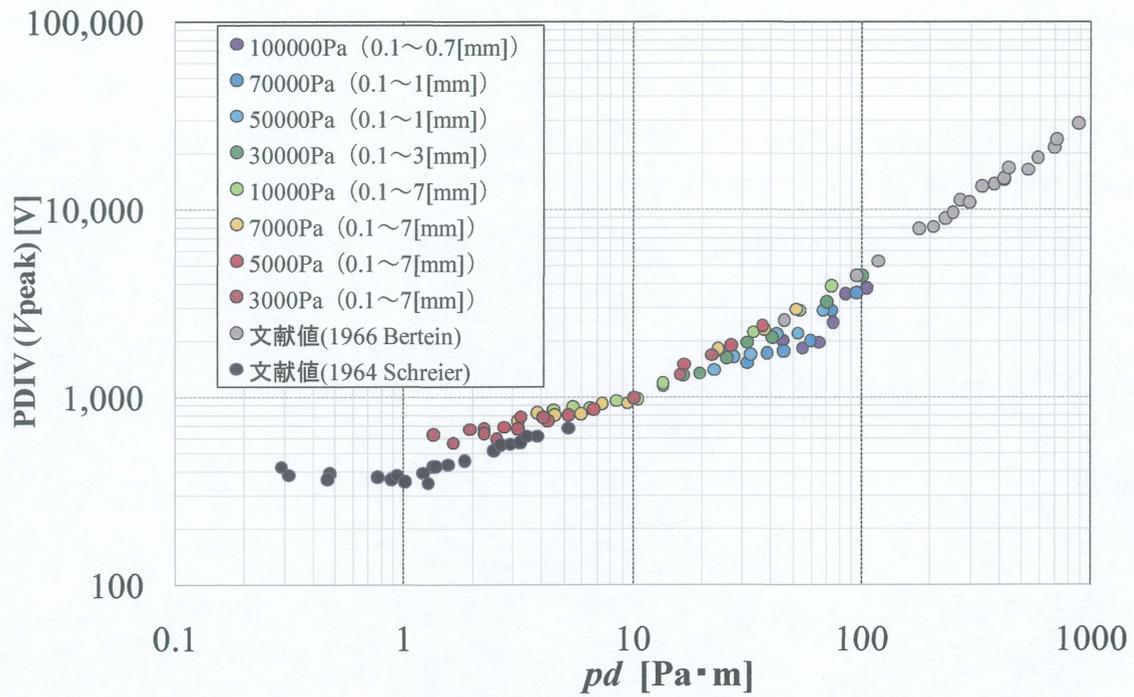


図 4-5 MGI 電極系における部分放電開始電圧と積  $pd$  の関係(絶縁層膜厚:0.35[mm])

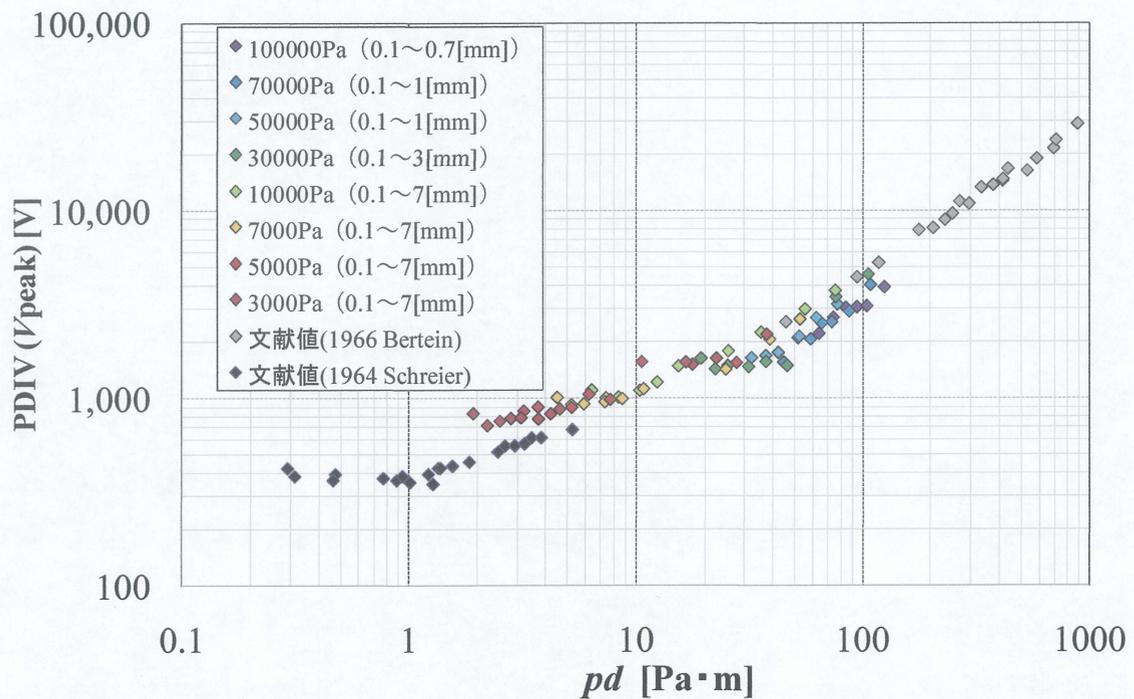


図 4-6 MGI 電極系における部分放電開始電圧と積  $pd$  の関係(絶縁層膜厚:0.54[mm])

次に図 4-5、図 4-6 について、測定した部分放電開始電圧から空隙分担電圧を求め、横軸  $pd$  との関係を求める。空隙分担電圧は以下から導出される。

まず、放電が生じる範囲は上部電極の先端における微小面積だと仮定する。すると、電極系は図 4-7 に示す金属-空気層-絶縁層の平行平板構造だと仮定できるので、空隙分担電圧は空気とエポキシ樹脂の誘電率と空隙距離、絶縁層の膜厚により導出することができる。図 4-7 に示すように、空気中の誘電率と空隙距離をそれぞれ  $\epsilon_g$ 、 $d_g$ 、絶縁層の誘電率と空隙距離をそれぞれ  $\epsilon_i$ 、 $d_i$  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電荷を示す。そして、電荷  $C$  は面積  $S$ 、誘電率  $\epsilon$ 、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

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

となることから、測定値  $V$  で導出されることがわかる。

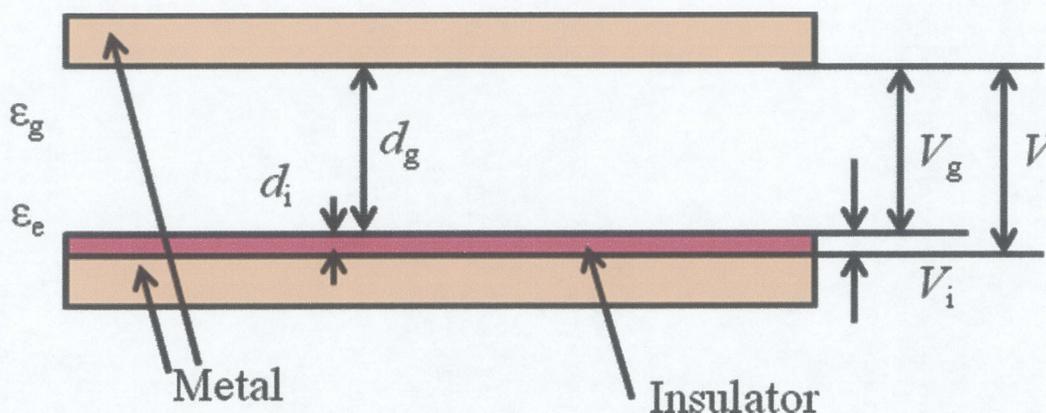


図 4-7 平行平板構造と仮定された微小面積における絶縁層を含む電極系

(4-3)式を用いて、算出した空隙分担電圧と、積  $pd$  の関係を図 4-8、図 4-9 に示す。図 4-8、図 4-9 における絶縁層の厚さはそれぞれ 0.35[mm]、0.54[mm]を用いた。また、絶縁層の誘電率は 4.11 とした。ここで、各図に示す凡例は図 4-6、図 4-7 と同様である。図 4-8 より、空隙分担電圧は積  $pd$  が約 10[Pa·m]以上の領域において、文献値とほぼ一致する結果を得

る。これは、空隙分担電圧が MGM 電極系における気体中の放電開始電圧と同様、パッシェン則に沿った放電現象である。しかしながら、積  $pd$  が約  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の領域においては、文献値よりも高い空隙分担電圧となった。積  $pd$  が約  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の領域は、積  $pd$  が測定圧力と空隙距離の積であることから、 $1.0[\text{mm}]$ 以下の空隙距離での測定値も多い。よって、ここでも MGM 電極系と同様に、ギャップが短いことによる初期電子の不足に伴う放電開始電圧の増加が考えられる。積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下のパッシェンレフト領域では、文献値における放電開始電圧が積  $pd$  の減少に伴い増加しているのに対して、空隙分担電圧は積  $pd$  の現象に伴い減少していく。この原因は図 4-5 における積  $pd$  約  $3.0\sim 4.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の積  $pd$  でほぼ一定となることに起因している。(4-3)式を用いて空隙分担電圧を算出する際、部分放電開始電圧  $V$  が一定であることから、空隙分担電圧  $V_g$  は空隙距離  $d_g$  と絶縁層膜厚  $d_i$  の比で決まる。よって、パッシェンレフト領域では積  $pd$  の減少により、空隙分担電圧よりも絶縁層にかかる電圧の方が大きくなってしまい、空隙分担電圧が減少したように見える。図 4-9 においても図 4-8 と同様の傾向が見られる。図 4-9 より、積  $pd$  が約  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の領域において文献値よりも高い空隙分担電圧となっていることがわかる。また、パッシェンレフト領域においても積  $pd$  の減少に伴う空隙分担電圧の増加はない。

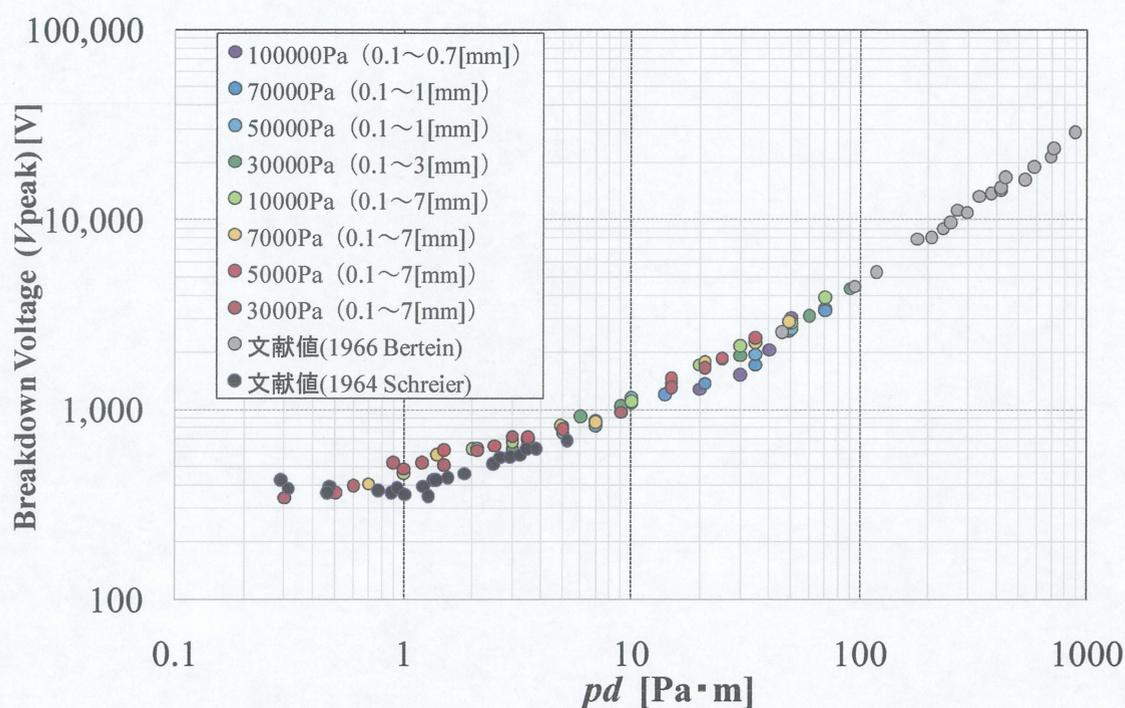


図 4-8 MGM 電極系における空隙層分担電圧と積  $pd$  の関係(絶縁層膜厚: $0.35[\text{mm}]$ )

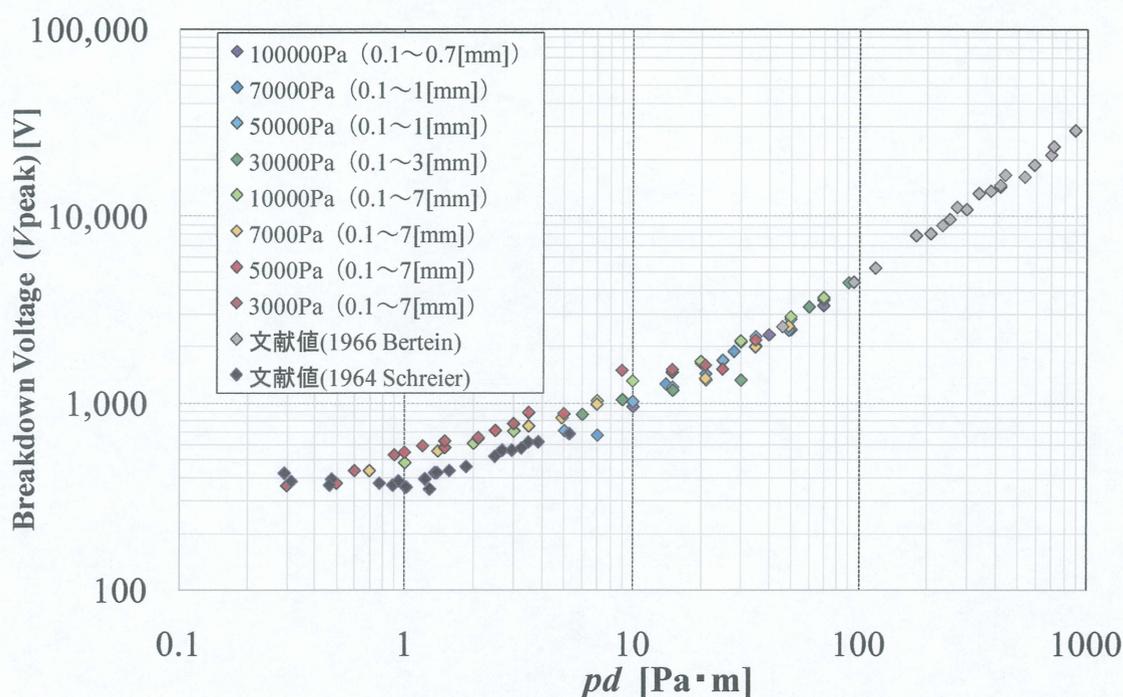


図 4-9 MGI 電極系における空隙層分担電圧と積  $pd$  の関係(絶縁層膜厚:0.54[mm])

空隙分担電圧について、各圧力別に空隙距離と空隙分担電圧の関係を示した図を図 4-10、図 4-11 に示す。図 4-10 と図 4-11 はそれぞれ絶縁層の膜厚が 0.35[mm]と 0.54[mm]における空隙分担電圧と空隙距離の関係である。図 4-10 より、空隙分担電圧は空隙距離の増加に伴い増加している。これは測定圧力と空隙距離の積  $pd$  が増加するためである。また、同じ空隙距離でも測定圧力が大きいほど空隙分担電圧は高くなっている。これも積  $pd$  の増加によるものである。また測定圧力 3,000[Pa]における空隙距離 0.3[mm]以下の領域や、測定圧力 5,000[Pa]における空隙距離 0.2[mm]以下の領域において、空隙分担電圧が減少し続けるのは、部分放電開始電圧の測定における積  $pd$  が約 3.0~4.0[Pa·m]より小さい範囲の積  $pd$  であることを考慮すると、部分放電の開始が上部電極先端からでなく、放電がより起きやすい経路で開始したためである。図 4-11 についても同様である。図 4-11 において、測定圧力 3,000[Pa]の空隙距離 0.3[mm]以下の領域や、測定圧力 5,000[Pa]の空隙距離 0.2[mm]以下の領域は、図 4-6 における積  $pd$  が 5.0~6.0[Pa·m]以下の領域であり、この領域についても上部電極先端からの放電ではないと言える。

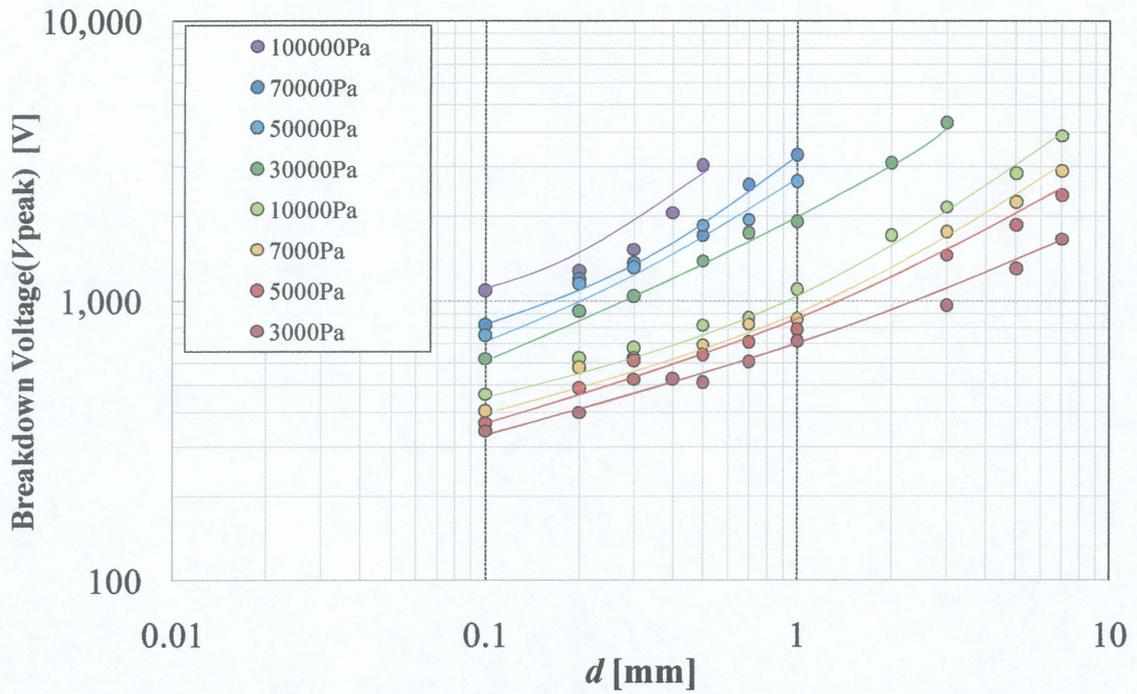


図 4-10 MGI 電極系における空隙層分担電圧と空隙距離  $d$  の関係(絶縁層膜厚:0.35[mm])

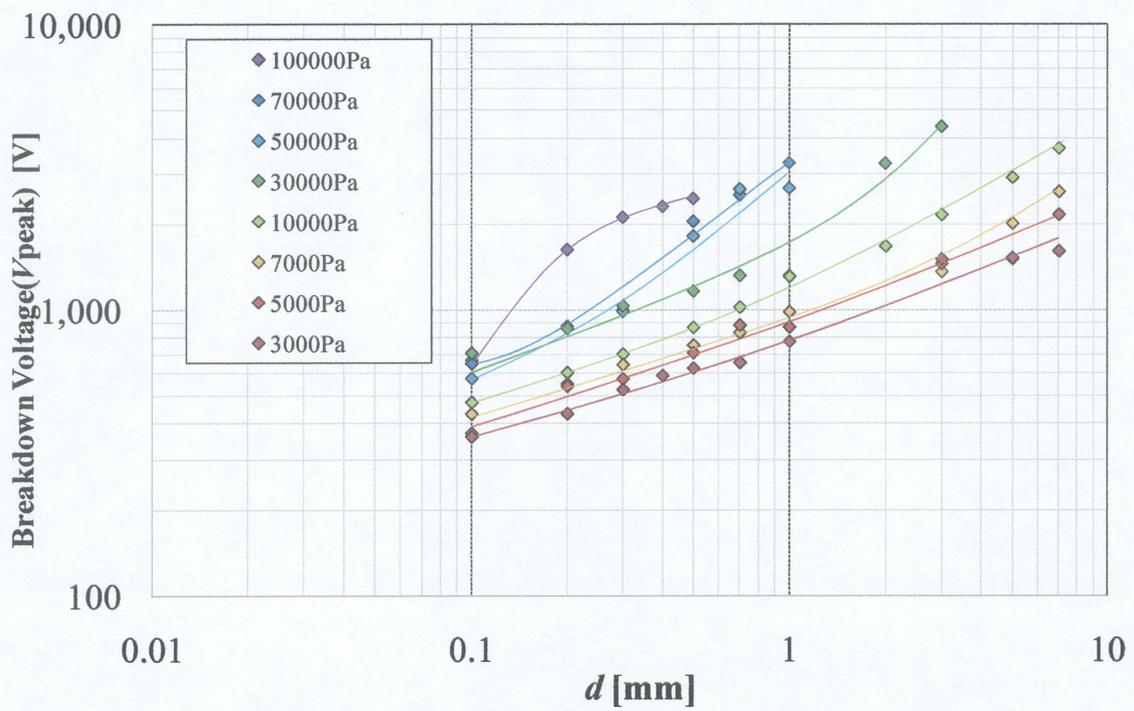


図 4-11 MGI 電極系における空隙層分担電圧と空隙距離  $d$  の関係(絶縁層膜厚:0.54[mm])

図 4-11、図 4-12 に、MGI 電極系における部分放電開始電圧の空隙分担電圧と、3 章において測定を行った連続課電火花放電における MGM 電極系における放電開始電圧の測定値の比較を示す。図 4-11、図 4-12 にはそれぞれ絶縁膜厚が 0.35[mm]、0.54[mm]における MGI 電極系の部分放電開始電圧から算出した空隙分担電圧を○で示した。また、MGM 電極系における放電開始電圧の測定値を●で示した。さらに、S.Scherier(22)による文献値を\*、H.Bertain(23)による文献値を△で示した。図 4-11 より、空隙分担電圧はパッシェンライト領域において、MGM 電極系における放電開始電圧とほぼ一致する。また、積  $pd$  が 10[Pa·m]以上の領域において、空隙分担電圧と文献値、MGM 電極系における放電開始電圧測定値が一致する。この傾向は図 4-12 についても見ることができ、図 4-11 と同様、空隙分担電圧と MGM 電極系における放電開始電圧はパッシェンライト領域において一致し、積  $pd$  が 10[Pa·m]以上の領域で文献値と一致する。しかし、図 4-11、図 4-12 における、パッシェンレフト領域の空隙分担電圧は、放電開始電圧が文献値のように上昇する様子や、MGM 電極系における放電開始電圧のように、一定値に収束する様子は見られない。少なくとも積  $pd$  が 10[Pa·m]以上の領域においては MGM 電極系と MGI 電極系の放電現象は同じであるといえる。

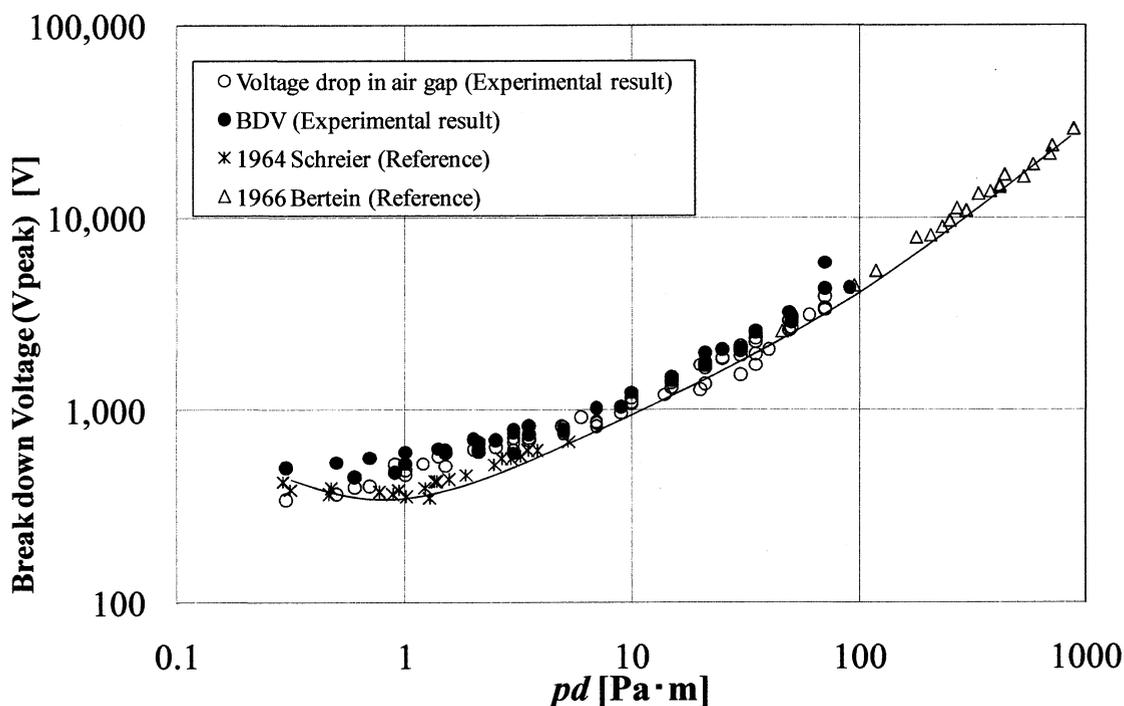


図 4-11 MGI 電極系における空隙層分担電圧と MGM 測定値の比較(絶縁層膜厚:0.35[mm])

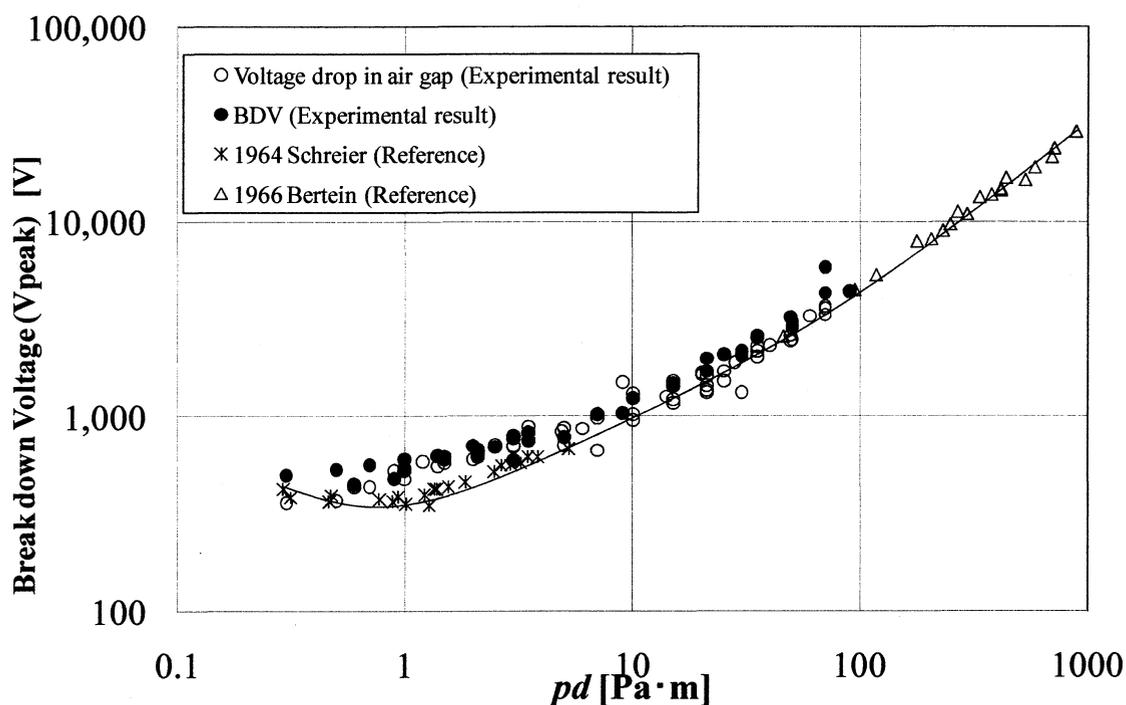


図 4-12 MGI 電極系における空隙層分担電圧と MGM 測定値の比較(絶縁層膜厚:0.54[mm])

#### 4-3-4 まとめ

本項目では、固体絶縁機器内の剥離を模擬した MGI 電極系における部分放電開始電圧を測定した。測定した部分放電開始電圧から容量分担式により空隙分担電圧を求め、MGM 電極系における放電開始電圧の測定値や文献値と比較を行った。以下に結果をまとめる。

MGI 電極系における空隙分担電圧は積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  から  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の領域では、文献値より空隙分担電圧の方が高い放電開始電圧となった。しかし、MGM 測定値とほぼ一致する。これは MGM 電極系と同様、短い空隙距離における初期電子の不足が考えられる。 $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の領域では、文献値、空隙分担電圧、MGM 測定値がほぼ一致することから、これらは同様の放電現象と考えられる。 $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下のパッシェンレフト領域については、上部電極先端からでなく、より放電が起きやすい経路から部分放電が開始したため、空隙分担電圧が減少していく結果となった。

## 4-4 IGI 電極系における空隙分担電圧と MGM 測定値との比較

### 4-4-1 目的

固体絶縁機器内のボイドを模擬した IGI 電極系において、交流課電を行ったときの部分放電開始電圧から容量分担式を用いて空隙分担電圧を求める。固体絶縁機器内のボイドにおいて、ボイド内の圧力を測定することは非常に困難である。しかしながら、本項目では気体の圧力を変化させて部分放電開始電圧の測定を行っていることから、実際のボイド内圧力を測定することができないが、金属が絶縁層に囲まれた状況における放電現象の振る舞いについての調査が可能だと考えられる。

### 4-4-2 実験条件

本項における測定回路は、図 2-1 に示す測定回路を用いる。電圧の印加方法及び放電開始電圧の判定は第 3 章の連続課電火花放電の測定方法と同様である。

本項における電極構成はこれまでと同様、上部電極を球電極、下部電極を平板電極としている。MGI 電極系と異なる点は、下部電極に加えて上聞電極についてもエポキシコーティングを施した絶縁層を設けている。絶縁層を設けた上部、下部電極は一連の測定が終了するまで同一のものを使用している。なお、本項における絶縁層の膜厚は、上部電極 0.31[mm]、下部電極 0.35[mm]である。

### 4-4-3 実験結果

図 4-13 に IGI 電極系における部分放電開始電圧の測定結果と、電極間距離と測定圧力の積  $pd$  の関係を示す。部分放電開始電圧の測定結果は MGI 電極系と同様に積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}] \sim 40[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  の領域において文献値とほぼ一致する部分放電開始電圧となっている。しかし、 $40[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の積  $pd$  においては文献値より低い部分放電開始電圧となっている。また、 $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下の積  $pd$  においては文献値よりも高い部分放電開始電圧となっている。また、積  $pd$  が約  $9.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下の積  $pd$  においては部分放電開始電圧がほぼ一定値に収束しているように見える。IGI 電極系においても MGM、MGI 電極系と同様に、上部電極の部分放電が起きやすい経路からの部分放電の開始があったと考えられる。

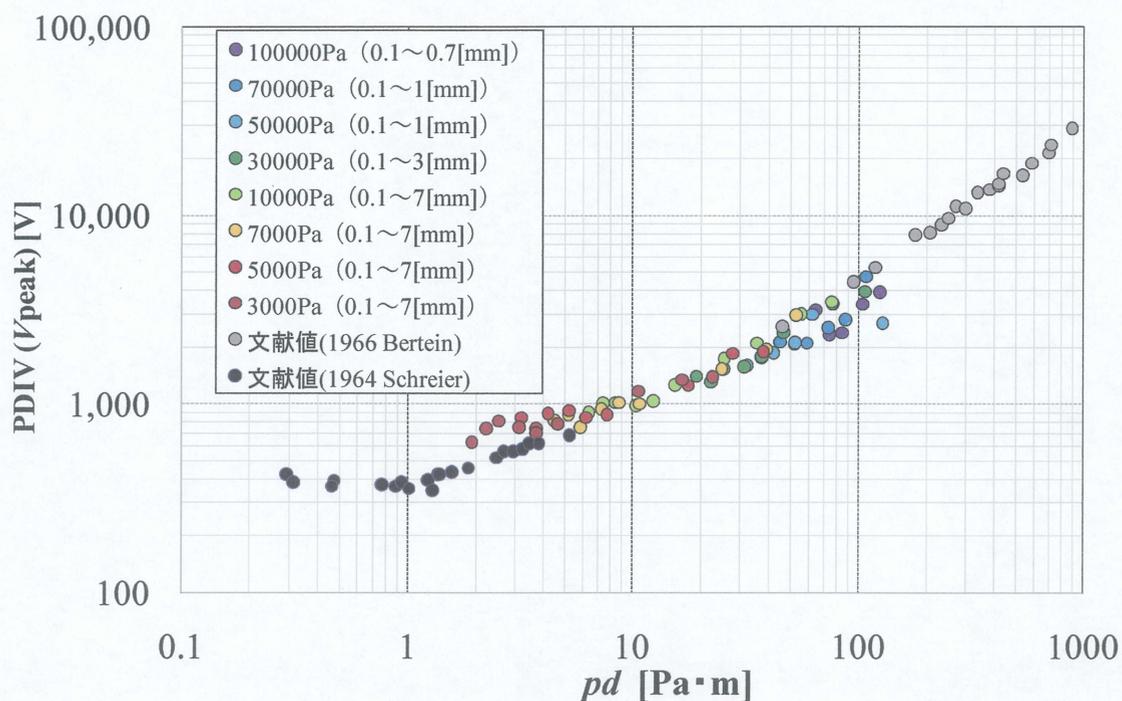


図 4-13 IGI 電極系における部分放電開始電圧と積  $pd$  の関係

図 4-14 は IGI 電極系における空隙分担電圧と積  $pd$  の関係を示したものである。図 4-14 の空隙分担電圧も(4-3)式を用いて、算出を行っている。また、絶縁層の厚さは 0.31[mm] と 0.35[mm] を採用し、エポキシの誘電率は 4.11 を用いた。各図の凡例は図 4-13 と同様である。図 4-14 より、積  $pd$  が 4[Pa·m]以上の領域において、空隙分担電圧と S.Sheirer、H.Bertain による文献値とほぼ一致する結果となった。IGI 電極系でもまた MGM、MGI 電極系と同様、パッシェン則に沿った放電現象が考えられる。しかしながら、IGI 電極系でもまた積  $pd$  が約 4.0[Pa·m]以下の領域においては、文献値よりも高い空隙分担電圧となった。また、積  $pd$  が 1.0[Pa·m]以下のパッシェンレフト領域においても、S.Sheirer による文献値では放電開始電圧が積  $pd$  の減少に伴い増加しているのに対して、空隙分担電圧は積  $pd$  の現象に伴い減少していく。ここでも、部分放電開始電圧の測定過程で、上部電極先端からでなく、放電が起きやすいところから発生したと考えられる。

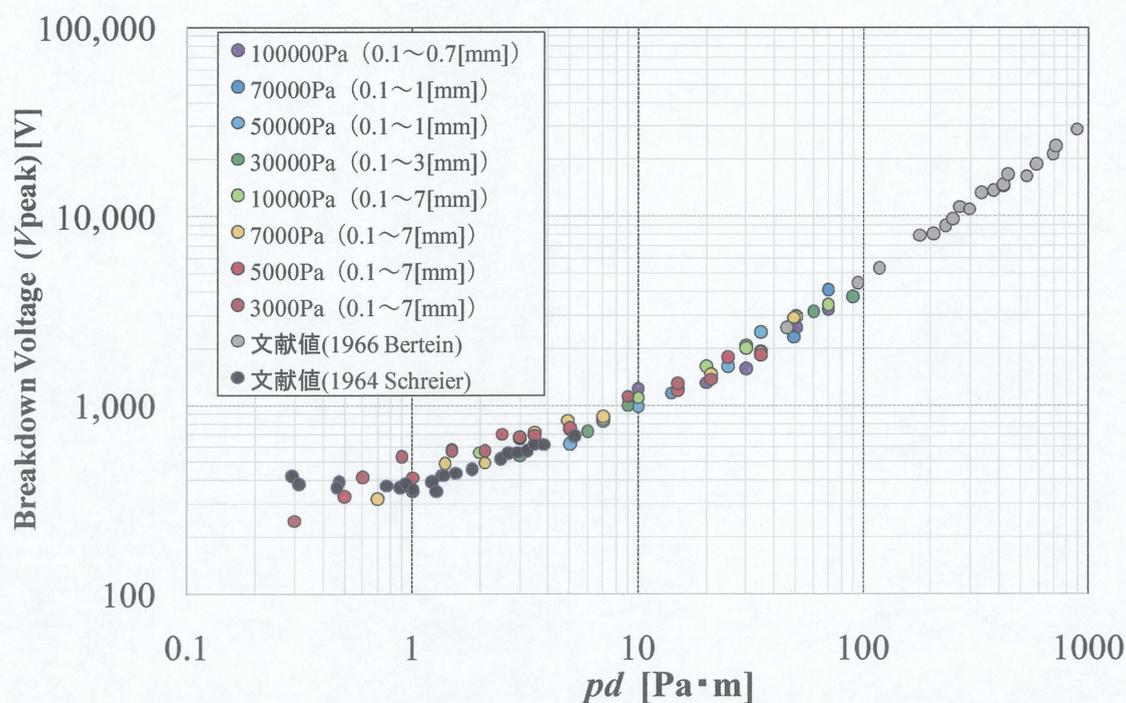


図 4-14 IGI 電極系における空隙層分担電圧と積  $pd$  の関係

図 4-15 に横軸を空隙距離をとる場合の測定圧力別空隙分担電圧曲線を示す。空隙分担電圧はこれまで同様(4-3)式を用いている。図 4-15 においても、測定圧力 3,000[Pa]における空隙距離 0.3[mm]以下の領域や、測定圧力 5,000[Pa]における空隙距離 0.2[mm]以下の領域において、空隙分担電圧は減少し続けるという。MGI 電極系での結果と同じ結果が起きている。このことから、IGI 電極系においても、MGI 電極系と同様の放電現象が起きているといえる。

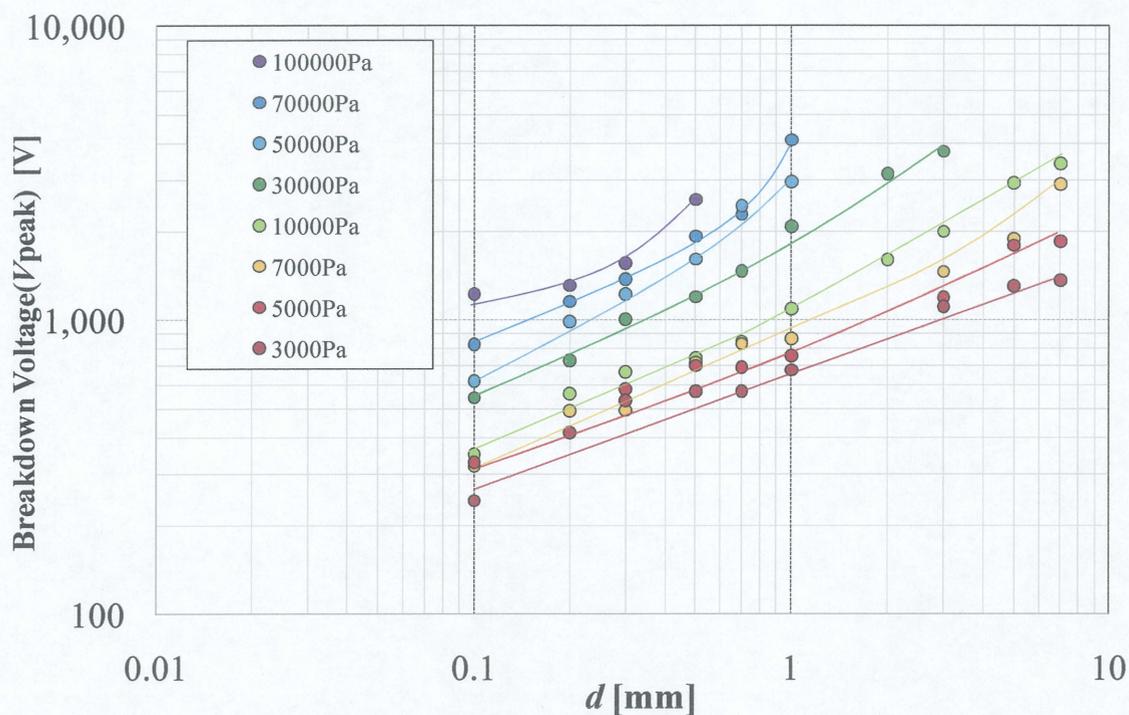


図 4-15 IGI 電極系における空隙層分担電圧と空隙距離  $d$  の関係

図 4-16 に、IGI 電極系における部分放電開始電圧の空隙分担電圧と、3 章において測定を行った連続課電火花放電における MGM 電極系における放電開始電圧の測定値の比較を行った。図 4-16 における凡例については、IGI 電極系の部分放電開始電圧から算出した空隙分担電圧を○で示し、MGM 電極系における放電開始電圧の測定値を●で示し、さらに S.Scherier による文献値を\*、H.Bertain による文献値を△で示した。図 4-16 より、空隙分担電圧はパッシェンライトにおいて、MGM 電極系における放電開始電圧とほぼ一致する。また、積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以上の領域において、空隙分担電圧と文献値、MGM 電極系における放電開始電圧測定値が一致する。しかし、図 4-15 における、パッシェンレフト領域の空隙分担電圧は、放電開始電圧が文献値のように上昇する様子や、MGM 電極系における放電開始電圧のように、一定値に収束する様子は見られない。しかしながら、少なくとも積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以上の領域において、MGI 電極系と同様に、MGM 電極系と IGI 電極系の放電現象は同じと考えられる。

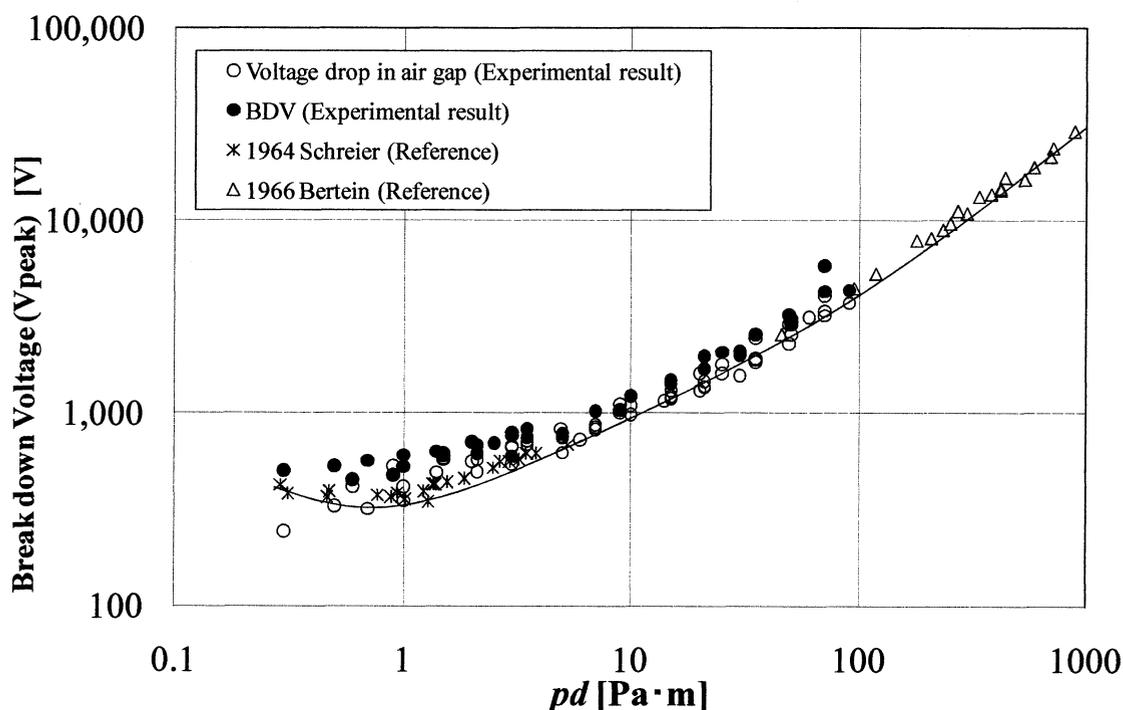


図 4-16 IGI 電極系における空隙層分担電圧と MGM 測定値の比較

#### 4-4-4 まとめ

本項目では、固体絶縁機器内のボイドを模擬した IGI 電極系における部分放電開始電圧を測定した。測定した部分放電開始電圧から MGI 電極系と同様に、容量分担式から空隙分担電圧を求め、MGM 電極系における放電開始電圧の測定値や文献値と比較を行った。結果を以下にまとめる。

IGI 電極系の空隙分担電圧について、MGI 電極系と同様に積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の領域において、部分放電開始電圧の正確な測定が行えなかったため、空隙分担電圧が減少して行く。  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ から  $4.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ の領域においても MGI 電極系と同様、短い空隙距離における初期電子の不足が考えられる。  $4.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以上の領域では、文献値、空隙分担電圧、MGM 測定値がほぼ一致することから、これらは同様の放電現象であると考えられる。

## 参考文献

- (1)遠藤奎将：電力設備の診断・保守の現状と動向，エコトピア科学シンポジウム，p.1-1(2009)
- (2)太田啓雅，福井克之：電力用変圧器の異常・劣化診断，エコトピア科学シンポジウム，p.2-1(2009)
- (3)磯部昭二：電気絶縁機器の実際，開発社，p.18(1981)
- (4)磯部昭二：電気絶縁機器の実際，開発社，p.13(1981)
- (5)電気学会：放電ハンドブック下巻，オーム社，p.236(1998)
- (6)北村真哉：球対平板電極系の交流課電部分放電現象(1)，第40回電気電子絶縁材料シンポジウム，P-5(2009)
- (7)前田孝夫，八木裕治郎，森山保，門間幸宏，森谷廣：モールド変圧器における部分放電検出と診断技術，平成16年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.175(2004)
- (8)植田俊明：6.6kV モールド機器の劣化度調査 劣化診断手法の検討，中部電力技術開発ニュース，No.123，pp.23-24(2006)
- (9)植田俊明，吉岡靖浩，森田浩三：6.6kV モールド機器の劣化度調査 劣化診断手法の検討，平成18年度電気学会電力・エネルギー部門大会，No.304(2006)
- (10)高野哲美，西山和男，門間幸宏：モールドトランスの部分放電診断および経年劣化診断，第151回高電圧技術研究会資料(2006)
- (11)Ching-Chau Su, Cheng-Chi Tai, Chien-Yi Chen, Ju-Chu Hsieh and Jiann-Fuh Chen: Partial Discharge Detection Using Acoustic Emission Method for a Waveguide Functional High-Voltage Cast-Resin Dry-Type Transformer, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (2008)
- (12)今博之他：電力ケーブルまたはその付属品の欠陥検出方法，特願2006-005814(2006)
- (13)植田俊明：電機器の部分放電検出方法とその装置，特願2009-47663(2009)
- (14)河野照哉：高電圧工学，朝倉書店，p.23(1994)
- (15)河野照哉：高電圧工学，朝倉書店，p.24(1994)
- (16)河野照哉：高電圧工学，朝倉書店，p.25(1994)
- (17)電気学会：放電ハンドブック，オーム社，p.101(1974)
- (18)電気学会：放電ハンドブック上巻，オーム社，p.113(1998)
- (19)J.C.Devins: The Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-19, No.5 (1984)
- (20)花井正広：SF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器の電気絶縁性能向上に関する研究，博士論文，p.32(2007)
- (21)中村修平：08年度下期報告書モールド絶縁システムの部分放電特性に関する研究・交流課電下放電開始電圧とパッシェン則との比較，東芝産器共同研究資料，p.8(2008)

(22)S.Schreier: On the Breakdown Voltages of Some Electronegative Gases at Low Pressures, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-83, pp.468-471(1964)

(23)J.M.Meek and J.D.Craggs: Electrical breakdown of gases, JOHN WILEY & SONS, p.542(1978)

(24)M.Yumoto, N.Yamaoka, T.Sakai: Current-voltage characteristics of nitrogen-gas discharge to the left of the Paschen minimum, Journal of Physics D: Applied Physics, vol.22, pp.1856-1861(1989)

(25)R.-T.Lee, H.-H.Chung and Y.-C.Chiou: Arc erosion behaviour of silver electric contacts in a single arc discharge across a static gap, IEE proceedings. Science, Measurement and Technology, vol.148, No.1, pp.8-14(2001)

## 第5章 総括

本論文では、電力機器の一つである固体絶縁機器における微小空間を模擬した場合の放電現象についての調査を行った。本論文の構成は、第3章において、固体絶縁機器における微小空間を模擬した放電現象についての調査を行う前に、金属・空気層・金属からなる MGM 電極系を用いた微小空間における交流課電による放電現象についての調査を行った。これは、第4章で絶縁層を含んだ電極系についての放電現象の調査を行う際に指標として非常に重要となってくるものである。第4章では、固体絶縁機器における微小空間の放電現象を調査するべく、第3章で用いた電極系と同様の形状をした電極系に、絶縁層設けた部分放電開始電圧の測定を行った。そして、測定を行った部分放電開始電圧を容量分担式により空隙分担電圧を求め、第3章の MGM 電極系における放電開始電圧と比較を行った。以下に本論文における結果の総括を記載する。

### MGM 電極系における放電現象

- ・同一電極を用いた繰り返し放電において、繰り返しの前後による電流波形、電流波形の波尾長、放電開始位相について変化はなく、また積  $pd$  が  $1.0\sim 5.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ の間では、積  $pd$  の差による変化も見られない。
- ・放電開始電圧については繰り返しの前後で変化が見られ、繰り返し後の放電開始電圧の方が大きい。また、空隙距離が小さいほど放電開始電圧の上昇は大きい。これは、空隙距離が小さいほど電界の強さが大きいことに起因している。
- ・課電休止時間が放電開始電圧に与える影響としては、課電休止時間が短いほど空隙中の放電に寄与するキャリアが残っており、低い放電開始電圧、小さい標準偏差となった。
- ・放電開始電圧と積  $pd$  の関係として、20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の比較を行った。両者ともに積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以下の積  $pd$  では S.Scherier の文献値よりも高い測定電圧となった。また、電界ベクトルの計算から、半球電極先端に電界集中が起きているはずだが、結果パッシェンレフト領域では球電極先端よりも放電が起きやすい個所からの放電が起きることで、放電開始電圧が一定値となった。
- ・20 秒間隔昇圧放電と連続課電火花放電の昇圧速度の違いは、20 秒間隔昇圧放電における空隙中のキャリアへの影響を低下させ、連続課電火花放電と比較したときの高い放電開始電圧に影響を与えている。
- ・標準偏差については、昇圧速度の違いに起因する差が見られた。20 秒間隔昇圧放電よりも昇圧速度の速い連続課電火花放電では、昇圧速度が速いため、本来の放電が起きるはずの電圧でも放電が起きないときがあり、20 秒間隔昇圧放電が低い標準偏差となる。
- ・文献値と連続課電火花放電の比較では、 $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$ 以上の領域において、積  $pd$  を増加に伴い、Seeliger、Bertein、Standards、Lee et al の Paschen カーブに近づく。しかし、S.Scherier の文献値よりは高い放電開始電圧を得た。

### MGI、IGI 電極系における放電現象

- ・絶縁層を含んだ電極系における部分放電開始電圧については、測定圧力と空隙距離の積  $pd$  が  $1.0[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下の領域で MGM 電極系と同様に部分放電開始電圧が一定値に収束する傾向が見られた。
- ・測定圧力と空隙距離の積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の領域においては H.Bertein による文献値と空隙分担電圧、さらに MGM 測定値がほぼ一致することから、少なくとも積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の領域では絶縁層を含んだ電極系について、MGM 電極系と同様にパッシェン則に沿った放電現象が起きていると考えられる。
- ・パッシェンレフト領域において、空隙分担電圧は、文献値のように積  $pd$  の減少に伴う増加が見られない。これは部分放電開始電圧の測定において上部電極先端からの放電が開始せず、放電が起きやすいところからの放電が起きたものに起因する。
- ・本研究において積  $pd$  がパッシェンレフト領域でロングパス放電が起きている。これは本研究に用いた電極系では確実に起きてしまう。パッシェンレフト領域までの正確な測定を行い、放電現象をさらに理解するためには、本論文で用いた単純な球対平板電極系ではなく、放電場所も考慮した電極系で測定を行う必要がある。

以上より、本研究において、固体絶縁機器内における剥離やボイドによる微小空間を模擬した電極系での放電現象は、積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以上の領域において、金属・空気層・金属電極系における放電現象と同様であり、パッシェン則に沿った現象であると言える。本論文では放電開始電圧の観点から調査を行っているが、放電現象における放電電流や、積  $pd$  が  $10[\text{Pa}\cdot\text{m}]$  以下の領域における放電開始電圧についてもさらなる調査、検討を行うことが重要である。今後、これらの放電現象を検討することが、固体絶縁機器内の放電現象解明に繋がると考えられる。

## 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 時博教授には心から感謝いたします。本論文で用いた実験回路について、お忙しい中大変尽力してくださった東芝株式会社 広瀬 達也氏、鳥羽商船高等専門学校 古森 郁尊准教授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。特に、修士課程1年の葉山 貴志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、彼の今後の御多幸を祈念しています。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】

- (1) 北村 真哉、中村 修平、清水 航、村上 泰：「新規シリコン組成物の機械的性質-混合液状態の攪拌時間と機械的性質の関係-」、平成 21 年 電気学会全国大会
- (2) 芦田 恭典、北村 真哉、長 広明、中村 修平、清水 航、村上 泰：「新規低温硬化型シリコン組成物の開発」、電子情報通信学会、有機エレクトロニクス研究会
- (3) 北村 真哉、葉山 貴志、中村 修平、梅村 時博、小迫 雅裕、大塚 信也、匹田 政幸、広瀬達也、東山 雅一：「球対平板電極系の交流課電部分放電現象(1)」、第 40 回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム
- (4) 北村 真哉、葉山 貴志、中村 修平、梅村 時博、小迫 雅裕、大塚 信也、匹田 政幸、広瀬達也、東山 雅一：「球対平板電極系の交流課電部分放電現象(2)」、平成 22 年 電気学会全国大会
- (5) 葉山 貴志、北村 真哉、中村 修平、梅村 時博、小迫 雅裕、大塚 信也、匹田 政幸、広瀬達也、東山 雅一：「球対平板電極における放電開始電圧とパッシェン則との比較」、平成 22 年 電気学会全国大会