

モールド機器の長寿命化を目的とする
産学連携プロジェクトの推進

(Management of collaboration project

between industry and academia

for life extension of resin molded electrical equipments)

2012年 3月

東 山 雅 一

目 次

第 1 章	序論	
1-1	まえがき	1
1-2	シリコン乾式変圧器、モールド変圧器の歴史	1
1-3	モールド変圧器の課題	5
1-4	本研究の目的	6
1-5	本論文の構成	8
	第一章の参考文献	10
第 2 章	モールド絶縁における微小空気ギャップの絶縁特性 (1)	
2-1	まえがき	11
2-2	実験方法	
2-2-1	電極系	11
2-2-2	部分放電計測システム	12
2-2-3	Paschen 則のレビュー	14
2-3	実験結果と考察	
2-3-1	MGM、MGI、IGI 電極系の Paschen 曲線	16
2-3-2	空気の火花電圧 V_s に対する X 線照射効果	18
2-3-3	Paschen ミニマム近傍の検討	19
2-4	まとめ	21
	第二章の参考文献	21
第 3 章	モールド絶縁系における微小空気ギャップの絶縁特性 (2)	
	MGM、MGI 電極系の部分放電挙動	
3-1	まえがき	24
3-2	実験方法	24
3-3	Paschen 則の拡張	26
3-4	実験結果と考察	
3-4-1	MGM、MGI 電極系の繰り返し部分放電特性	28
3-4-2	Paschen ライト及びミニマム領域の放電挙動	29
3-4-3	Paschen レフト領域の放電挙動	29

3-4-5	放電メカニズムの検討	3 2
3-5	まとめ	3 4
	第 3 章の参考文献	3 6
第 4 章	エポキシモールド絶縁システム中の人工ボイド内部分放電現象の検討	
4-1	まえがき	3 8
4-2	ボイド内部分放電のシミュレーションモデル	
4-2-1	ボイドサイズと放電電荷量の関係	3 9
4-2-2	放電時間遅れ	4 3
4-3	表面電荷モデルと二層誘電体モデルのシミュレーション結果 の比較	
4-3-1	ボイドサイズと電荷量の関係(Qa-2a 特性)	4 4
4-3-2	Qa-2a 特性の考察	4 6
4-4	放電時間遅れ(tinc-2a 特性)のシミュレーション結果と考察	4 6
4-5	エポキシ樹脂中ボイド内放電における X 線照射効果	
4-5-1	実験方法	4 8
4-5-2	X 線照射効果が PDIV および PDEV に与える影響について の結果と考察	4 8
4-6	まとめ	5 0
	第 4 章の参考文献	5 2
第 5 章	X 線照射によるエポキシ樹脂中の球状ボイド内放電とボイドサイズ推定方法の提案	
5-1	まえがき	5 3
5-2	電極構成と測定系	5 3
5-3	実験方法	5 5
5-4	実験結果	
5-4-1	部分放電発生位相特性	5 5
5-4-2	部分放電開始電圧及び放電電荷量	5 6
5-5	考察	
5-5-1	X 線照射下での PD 開始位相	5 7
5-5-2	放電開始メカニズム	6 2

5-6	ボイドサイズ推定方法の提案	6 4
5-7	まとめ	6 7
	第5章の参考文献	6 8
第6章	X線照射によるエポキシ樹脂中のボイド内放電の位置標定に関する検討	
6-1	まえがき	6 9
6-2	実験装置	
6-2-1	電極構成	7 0
6-2-2	測定系	7 2
6-2-3	X線源	7 3
6-3	X線照射によるエポキシ樹脂中球状ボイド内部分放電位置標定に関する基礎的検討	
6-3-1	まえがき	7 4
6-3-2	実験方法	7 5
6-3-3	実験結果	7 6
6-3-4	考察	8 0
6-3-5	まとめ	8 1
6-4	6.6kV 実モールド変成器を対象とした部分放電試験の検討	
6-4-1	まえがき	8 1
6-4-2	供試物	8 1
6-4-3	実験方法	8 2
6-4-4	実験結果	8 5
6-4-5	考察	8 7
6-4-6	まとめ	8 8
6-5	エポキシ板三枚重ね円柱ボイド試料に対するX線照射効果	
6-5-1	まえがき	8 8
6-5-2	実験方法	8 9
6-5-3	実験結果	8 9
6-5-4	考察	9 4
6-5-5	まとめ	9 4
6-6	まとめ	9 4

第6章の参考文献	96
第7章 モデルと実器の換算係数を導入した油浸コンデンサの新しい課電寿命推定方法の検討	
7-1 まえがき	97
7-2 ワイブル分布の適用	
7-2-1 機器寿命解析に適するワイブル分布の概要	99
7-2-2 期待寿命推定における課題	99
7-3 油浸コンデンサの寿命推定方法	
7-3-1 実器とモデルの寿命換算の考え方	100
7-3-2 実器期待寿命の推定の課題	103
7-3-3 実器のV-t特性と期待寿命の推定	105
7-4 まとめ	107
第7章の参考文献	109
第8章 総括	
8-1 研究成果の要約	111
8-2 研究成果の意義	113
8-3 本研究プロジェクトの運営について	114
謝辞	117
本研究に関して発表した論文	118

第1章 序 論

1-1 まえがき

電気エネルギーは光，動力，熱，情報など利用形態が広範囲にわたる上，安全で利便性が高いことに加えて，クリーンで高度な制御性を持つという性質があることから，わが国の基幹エネルギーのひとつとしてその需要が増大している。特に，近年の社会システムの高度情報化に伴い電力需要の増加に加え，安定した電力供給が強く求められている。⁽¹⁾

このような電力供給をささえる社会インフラのひとつが，電圧変換を担う変圧器で，プラント・機器への電力安定供給，信頼性維持のために重要な役割を果たしている。変圧器は，油入変圧器，SF₆ガス絶縁変圧器，シリコン乾式変圧器，モールド変圧器などに大別される。⁽²⁾

図 1-1 に電力流通系統⁽³⁾と主に使用される変圧器の種類を示す。

また，表 1-1 に各種変圧器の特性比較表を示す。

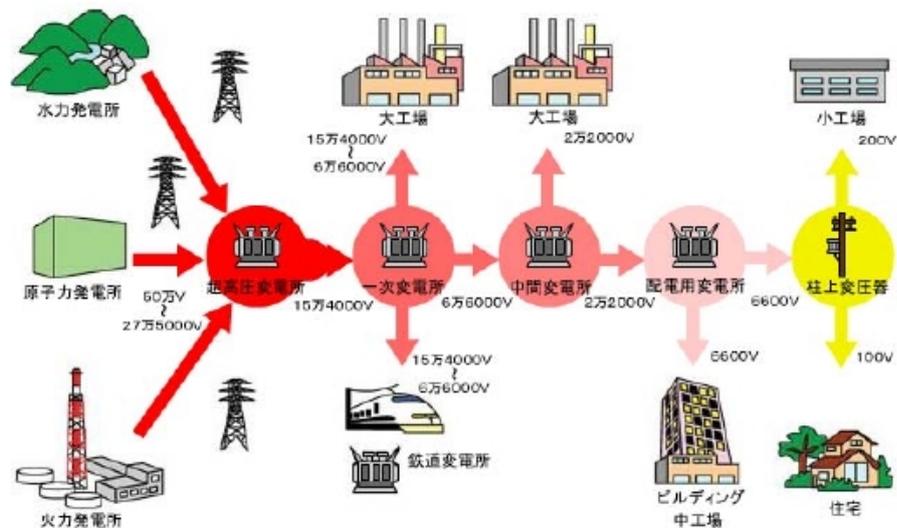
1-2 シリコン乾式変圧器，モールド変圧器の歴史

デパート，駅舎等多くの人が集まる大型ビルの建設が立ち上がってきた昭和 20 年代後半に，その電源設備の主要機器である変圧器については，ビル内設置という条件から小形化，軽量化，難燃性，防災性が特に強く要求されるようになった。

この要求特性を満足する変圧器として，国内では当初シリコン乾式変圧器が商品化された。

このシリコン乾式変圧器は，それまでの鉱油を絶縁・冷却の媒体とし絶縁紙を絶縁物の主体にした油入変圧器から，空気を絶縁・冷却媒体とし，マイカ，ガラス繊維，磁器とシリコンワニスで絶縁物とし，難燃性と小形軽量でキュービクルへの収納性が良いことを最大の特徴とした変圧器である。

このシリコン乾式変圧器は，昭和 29 年には名鉄百貨店に当時の国内最大容量である 3x1,000kVA(参考：全 6 台)が納入された。その後，小形軽量，難燃性という顧客が要求する性能と変圧器自身の信頼性が高く評価され，多くの重要なビルの電源用変圧器として設置された。また，容量も順次拡大され，最大容量の記録が相次いで更新された。



変圧器群

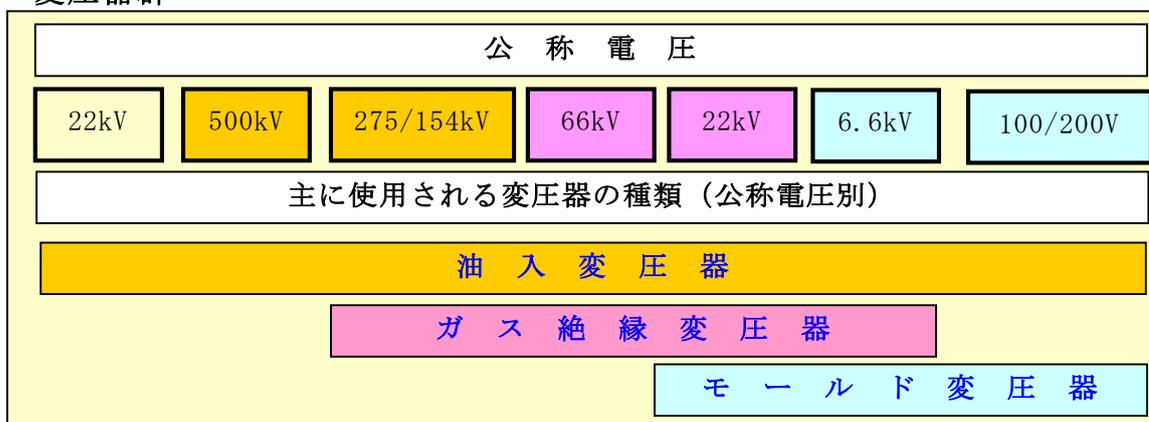


図 1-1 電力流通系統⁽³⁾と主に使用される変圧器の種類

表 1-1 各種変圧器の特性比較⁽⁴⁾

項目	難燃性変圧器			油入変圧器
	SF6ガス	モルト [*]	シリコン乾式	
絶縁・冷却媒体	SF6ガス	エポキシ樹脂 空気	シリコンワニス 空気	絶縁油 JISC2320 1種2号
燃 焼 性	不燃性	難燃性	難燃性	可燃性
適用一次電圧範囲(kV)	22~275	~33	~33	~500
適用容量範囲(kVA)	2,000~300,000	~20,000	~10,000	~1,000,000
絶縁の種類	E,F,H種	B,F,H種	H種	A種
屋内外の適用性	屋内外とも可	屋内用	屋内用	屋内外とも可
耐環境性	優れる	普通	やや劣る	優れる
保守性	普通	普通	やや劣る	普通
騒音	優れる	普通	普通	優れる
過負荷耐量	普通	普通	やや劣る	優れる

昭和 44 年には当時の世界最大容量の 7,000kVA 変圧器が阪急梅田駅ビルに設置され、その後、東京駅地下変電所、超高層ビル建築の草分けとなった霞ヶ関ビル、新宿超高層ビル群、成田空港ビル等々の著名なビル電源施設用にシリコン乾式変圧器が納入された。

この間、技術的な進歩も大きく、使用する絶縁物については、マイカ、ガラス繊維から耐熱ポリアミド紙、ポリイミドフィルム等の難燃性・自己消火性を有する有機化合物に進化した。また電磁鋼板の飛躍的な特性改良も進み、設計技術の進歩との相乗効果により、大幅な小形軽量化が実現された。シリコン乾式変圧器の外観写真を図 1-2 に示す。

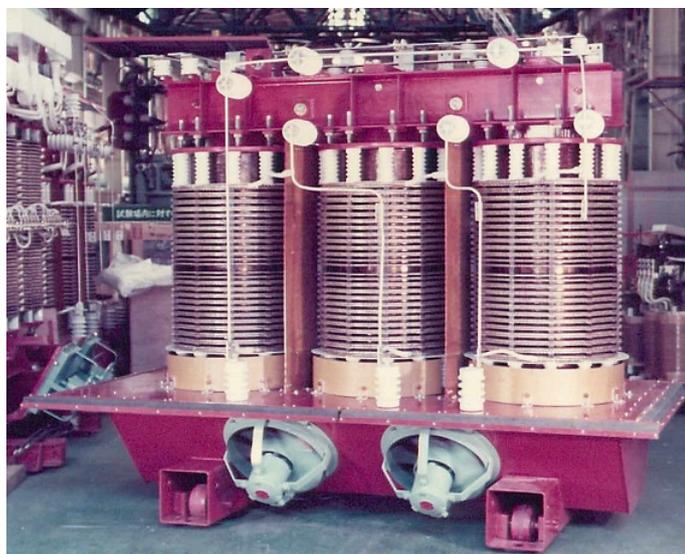


図 1-2 シリコン乾式変圧器外観

さらに、これらの技術がベースになって、昭和 50 年代半ばからエポキシレジンを真空含浸するモールド変圧器に代替されていった。このモールド変圧器は、コイルをエポキシ樹脂で注型したもので、樹脂と空気の複合絶縁を採用することで大幅なコンパクト化を図るとともに、耐湿、耐塵性を向上させた変圧器である。

モールド変圧器は、現在、電圧が 33kV までの乾式変圧器の主流となっており、容量も昭和 61 年に製作し納入された京阪電気鉄道(株)三条変電所向け 10,000kVA、平成 12 年に製作した中部電力碧南火力発電所向け 12,200kVA まで拡大している。

また、高効率化にも大きな進歩があり、直近では産業用電気機器として最初のトップランナー方式による省エネ法特定機器に指定され、更なる発展を目指して

いる。

高圧級（6.6kV）モールド変圧器の外観写真を図 1-3，特別高圧級（22kV）変圧器の外観写真を図 1-4 に示す。



図 1-3 高圧級（6.6kV）モールド変圧器外観



図 1-4 特別高圧級（22kV）モールド変圧器外観

モールド変圧器は、例えば、JISC4306-2005「配電用 6kV モールド変圧器」によって「一次巻線及び二次巻線の全表面が樹脂又は樹脂を含んだ絶縁基材で覆われた変圧器」と定義されている。一般的にモールド変圧器は、耐熱絶縁紙・耐熱フィルムなどで絶縁を施したコイルを金型などに収納し、その金型内にエポキシ

樹脂を真空下で注入するとともに、エポキシ樹脂を固化させて製作したモールドコイルを用いている。

金型を用いてモールドコイルを製造する場合の製造工程概要を図 1-5 に示す。

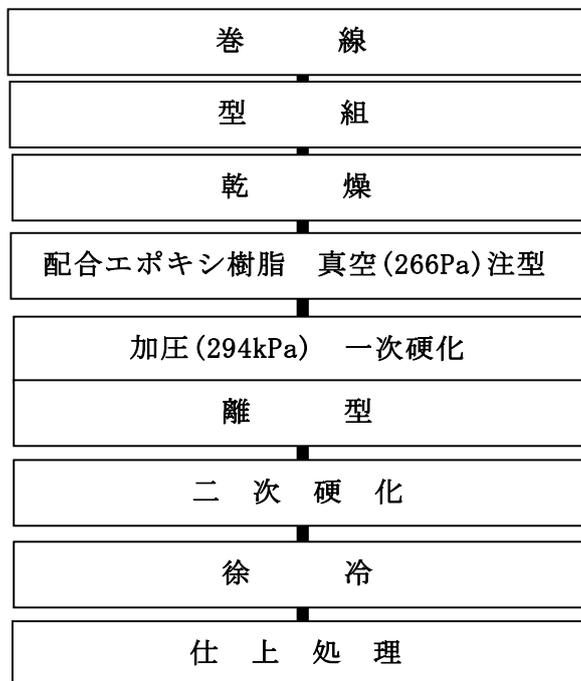


図 1-5 モールドコイルの製造工程例

1-3 モールド変圧器の課題

図 1-5 製造工程に示したようにモールドコイルの製造過程においてはエポキシ樹脂のコイル内への含浸性を向上させるために真空下でエポキシ樹脂を金型内に注入した後、圧力を加えて十分にコイル内にエポキシ樹脂を浸透させるようにしている。

しかしながら、樹脂ならびに絶縁物で構成されるコイルの形状が複雑であるため残存空気がコイル内にトラップされてしまう、樹脂が完全には脱泡できないなどの理由から金型内の残存ガスを完全に除去することは難しく、一定圧力の空隙がコイル内に残存してしまう可能性を否定することは出来ない。

変圧器は、社団法人日本電機工業会発行の「汎用高圧機器の更新のおすすめ」⁽⁵⁾では高圧配電用変圧器の更新推奨時期を 20 年としている。また、同様に「汎用機器更新のおすすめ」⁽⁶⁾においては、物理的安定使用期間が 20 年であると記載しているように寿命の長い機器であり、この寿命期間内に変圧器が経験する各種運

転状況下においても安定した性能を示すことが必要である。

これらを実現化する上で解消すべき技術課題は以下である。

1. コイル内部分放電発生メカニズムの解明
2. 部分放電発生遅れの発生原因解明とその解消策
3. 部分放電検出感度の向上並びに部分放電発生部位標定技術の向上

1-4 本研究の目的

上述のように、モールド変圧器の期待寿命は 20 年程度であることが各種文献にて紹介されているが、実際に運転されている変圧器においては、25 年以上運転される事例も多く見受けられる。そのため変圧器製造会社においては、機器の信頼寿命 30 年を確保するための方策を講じるとともに寿命検証を行っているのが実情である。

なお、モールド絶縁を採用している機器としては変圧器のほかに計器用変成器も存在し、絶縁特性に関する課題は共通することから以下では総称してモールド機器と呼ぶ。

例えば、モールド機器では、樹脂・導体等様々な界面が存在し、注型技術的にもボイド・剥離を考慮しなくてはならない。また、機器の運転中に侵入してくる異常電圧なども考慮する必要がある。一般的にモールド絶縁を劣化させる原因としては、熱劣化、電界劣化、応力劣化、環境劣化があると言われている。それら絶縁劣化の種類と要因、進行プロセス⁽⁷⁾を表 1-2 に示す。

表 1-2 モールド絶縁の絶縁劣化とその進行プロセス⁽⁷⁾

絶縁劣化の種類		要因	進行プロセス
熱劣化		熱	酸化, 熱分解 →機械的強度低下
電界劣化	部分課電劣化	ボイド (クラック, 剥離, 気泡)	酸化, 穿孔 →絶縁厚さ減少 →貫通破壊
	トリーイング	突起, 異物	
応力劣化		熱応力 ヒートサイクル 振動応力	クラック, 剥離など ボイド発生・進展 →電圧劣化
環境劣化		湿気, 塵埃など	汚損, 吸湿 →メグ低下, トラッキング

モールド機器は、その運転中、常に常規運転電圧に晒されることから、上述の劣化要因の中でも特に電界劣化を十分に考慮した機器設計が求められる。この電界劣化を考慮した上で機器の信頼寿命 30 年を確保する為には、機器の層間分担電圧を空気の最低破壊電圧とされる Paschen の火花電圧⁽⁸⁾⁽⁹⁾以下とすることを基本設計思想とすることが多い。

この Paschen の火花電圧とは、放電が発生する電圧に関する法則で 1889 年にドイツの物理学者フリードリヒ・パッシュェンによって発表されたもので放電開始電圧は、電極間距離とガス圧力の関数で表せるという経験法則である。図 1-6 に各種ガスのパッシュェンカーブ⁽⁹⁾を示す。図 1-6 の横軸はガス圧力と電極間距離の積であり、縦軸は絶縁破壊電圧である。図 1-6 に示されるように空気の場合、およそ 330Vpeak を最低値としてその左側および右側部分は破壊電圧が上昇することが分かっている。

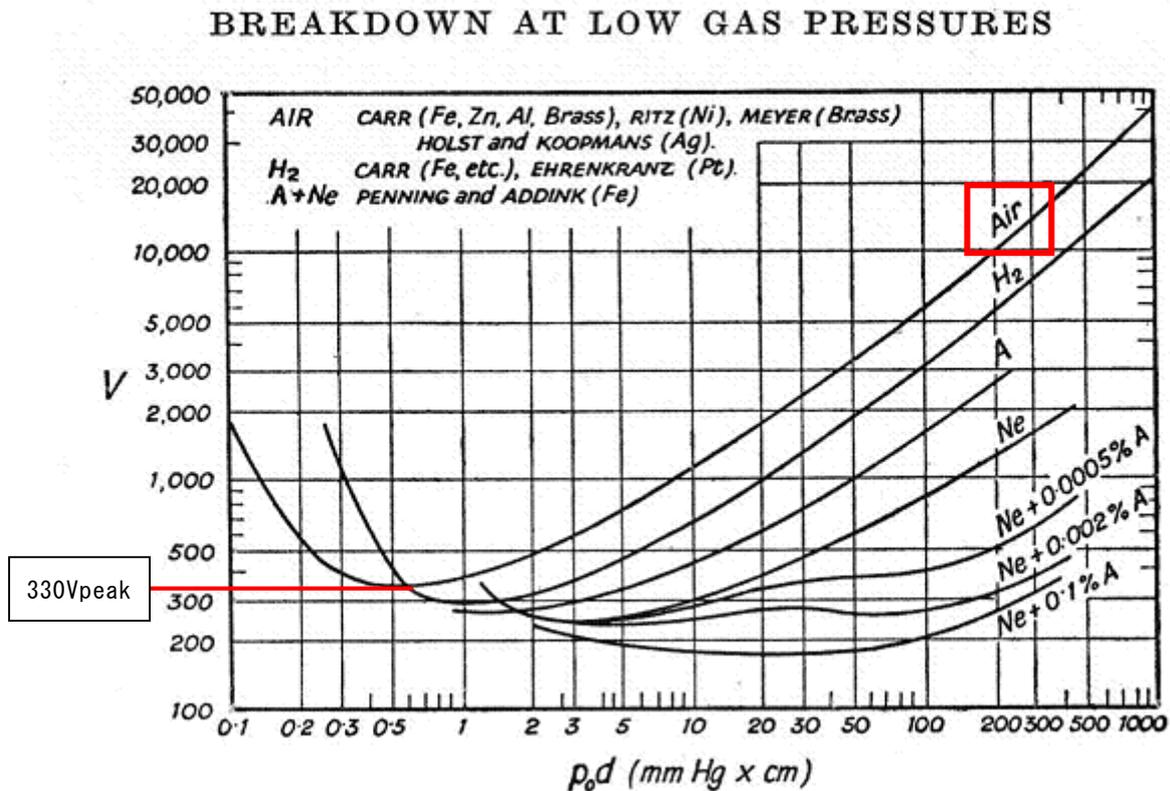


図 1-6 各種ガスの Paschen カーブ⁽¹⁰⁾

上述のように機器の層間分担電圧の設定においては、Paschen の火花電圧以下

とすることを基本思想とすることが多いが、実際のモールド機器では、部分放電特性の極端に悪い例やバラツキの大きい場合があり、部分放電制御・検出技術の抜本的改革が重要課題となっている。

これらは、固体絶縁系の基本的な課題であるにも拘わらず、その本質解明が出来ていないのが実情であるが、これらの解決には膨大な基礎データの収集と理論解析が必須であり、もはや製造メーカ単独の研究開発リソースのみで研究・開発を進めることは困難である。そのため、2008年より三重大学大学院工学研究科と、Paschen 則の確認までさかのぼった固体絶縁の部分放電基礎特性に関する共同研究を開始している。

一方、初期のモールド機器は既にフィールドでの運転開始後 30 年程度が経過し、その健全性確認手段の確立は喫緊の課題であることから、東芝産業機器製造（株）と三重大学との産学連携を加速するとともに更なる成果を得るとともにモールド機器開発の基盤技術の充実を図ることを目的として 2009 年より九州工業大学大学院工学府との間でも共同研究契約を締結し「東芝産業機器製造（株）—三重大学—九州工業大学」をスルーした産学協同大型プロジェクト研究として推進している。

本プロジェクトのスキームのイメージ図を図 1-7 に示す。

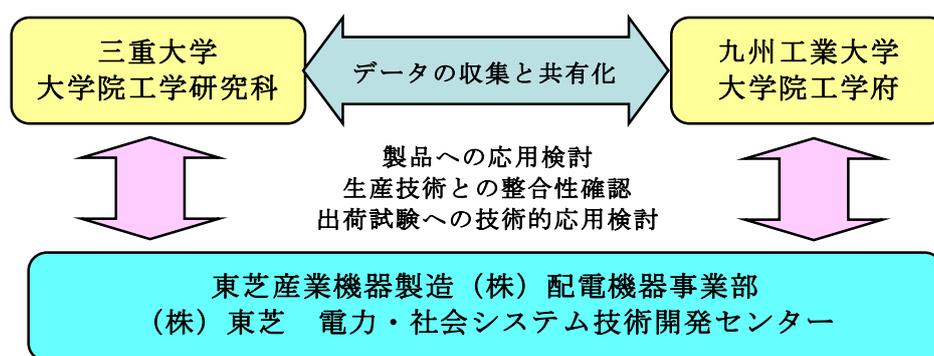


図 1-7 産学連携プロジェクトのスキーム (イメージ図)

1-5 本論文の構成

本論文は、8章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第1章では、モールド変圧器の歴史、モールド変圧器の概要、モールド絶縁における技術的課題を概説し、本研究の背景、目的について述べた。

第2章では、モールド絶縁系内に存在する微小空気ギャップの絶縁特性を調査し、金属電極 (MGM)、金属-樹脂電極 (MGI)、樹脂-樹脂電極 (IGI) 系について、Paschen 曲線の「 $0.02 < P \cdot d < 10$ (Pa·m)」領域における放電開始電圧 (火花電圧) について実験・検討を行い、部分放電開始電圧として求めた微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の平均値が従来の Paschen 曲線よりも高くなり、且つ「MGM 電極系 > MGI 電極系 > IGI 電極系」の傾向となることを明らかにした。また、この原因がギャップ内の初期電子の不足によることを確認した。

第3章では、第2章に引き続いてMGM、MGI電極系を用いてPaschenライト、ミニマム及びレフト領域の部分放電挙動について実験検討した結果、モールド絶縁システムの絶縁設計に有用な「Hackam - Paschen曲線」を提案した。

第4章では、実際のモールド変圧器の絶縁エポキシモールド中に存在するボイドPD特性 ($Q_a - 2a$ 特性) を、Pedersen⁽¹⁰⁾ および安井らの理論⁽¹¹⁾ を用いて比較・検討を行った。ボイド表面に誘起された電荷が放電により消散する際の電極間の電圧低下 ΔV と絶縁システムの静電容量 C との積で表わされる見掛けの放電電荷 Q_a について両モデルの相違と違いについて検討した結果を述べた。

第5章では、様々なサイズの人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電挙動の諸特性を明らかにした。さらに、これまでに実施している理論的検討を応用して本実験結果を検討し、実際のモールド機器の出荷前試験を想定した欠陥 (ボイド) 推定手法の原理を述べた。

第6章では、人工球状ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電の際に発生する放射電磁波の測定、形状の異なる円柱ボイドへの X 線照射効果について調査を行った結果を述べた。さらに、これまでに実施している基礎的検討を応用して、実器の 6.6 kV モールド変圧器での部分放電位置標定試験を行った結果についても述べた。

第7章では、油浸コンデンサを例にして、モデルの寿命特性からワイブル分布を用いて実器の寿命特性を推定する方法について検討し基本的な寿命解析の考え方を提案した。

この考え方は、コンデンサ以外の機器にも通じるものであり今後、モールド変圧器などにも適用拡大できると考えている。

また、第8章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を示した。

第 1 章の参考文献

- (1) 「新版電気工学ハンドブック」 (社)電気学会 昭 6 3
- (2) 竹越文男・塩田広・東山雅一：「産業用変圧器の技術と製品動向」 東芝レビュー, Vol. 51 No. 8, pp40-43(1996)
- (3) 電気が伝わる経路－送電の仕組み, 社団法人電気事業連合会ホームページ,
<http://www.fepc.or.jp/>
- (4) 中島廣一, 上川芳弘, 梅田正晴, 櫻井敏, 塩田広, 園部浩, 東山雅一, 三輪直弘：選び方・使い方 変圧器・変成器, 表 2.7 各種変圧器の特性比較, オーム社 (2005)
- (5) (社)日本電機工業会「汎用高圧機器の更新のすすめ」, (社)日本電機工業会 (2000)
- (6) (社)日本電機工業会「汎用電気機器更新のすすめ」, (社)日本電機工業会 (2008)
- (7) 電気学会技術報告 (Ⅱ部) 第 376 号 表 3.7 モールド絶縁の絶縁劣化とその進行プロセス (1991)
- (8) F. Paschen: “Tuber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen drunken erforderliche Potentialdifferenz”, Weid Ann. Physik und Chemie vol. 37, pp. 69-81 (1889)
- (9) J. M. Meek and J. D. Craggs: “Electrical breakdown of gases”, Oxford Univ. press, pp. 533-653 (1989)
- (10) G. C. Crichton, P. W. Karlsson and A. Pedersen : “Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, pp. 335-342 (1989)
- (11) 安井貞三, 山田有一：「球状ボイド内放電の理論計算と実験」, 住友電気, 第 94 号, pp. 36-50 (1966)

第2章 モールド絶縁における微小空気ギャップの絶縁特性(1)

2-1 まえがき

モールド機器等の絶縁システムは、導体をエポキシ樹脂で注型した固体絶縁系で、基本的には空気と樹脂とのハイブリッド絶縁システムである。実際のモールド機器では、注型するエポキシ樹脂やシート絶縁材料、導体の絶縁皮膜等さまざまな界面が存在し、これらの剥離や機器製造の注型プロセスにおけるボイドなどの可能性を考慮しなくてはならない。

モールド機器の絶縁システムでは、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)}が機器の絶縁設計における重要基本事項と位置づけられている。

しかしながら、モールド機器の絶縁設計に有用な Paschen 則に関する実用的なデータは比較的少なく、Meek ら⁽²⁾のまとめた Paschen 曲線を絶縁設計の基本としているのが実情であろう。

実際のモールド機器においては、Paschen 則の圧力 (P) とギャップ長 (d) に対する値としてさまざまな可能性があり、モールド機器の一層の小型化、高信頼性を実現するには、より実器を考慮した Paschen 則の検討が不可欠となってきた。また、固体絶縁中に存在するボイドでは放電の発生遅れ^{(3), (4)}があり、機器の品質管理の観点からも Paschen の法則^{(1) - (9)}を実用的な観点から詳しく検討する必要があることが分かって来た。

このような背景から、本章では、まず Paschen 則に関する文献^{(2) - (9)}を詳細にレビューし実際のモールド機器の絶縁システムにどのように適用するべきかなどを検討した。本研究では、モールド絶縁システムに応用する目的で、金属-金属電極 (MGM)、金属-樹脂コーティング電極 (MGI)、そして樹脂-樹脂電極 (IGI) を選定した。

まず、MGM 電極・MGI 電極・IGI 電極のそれぞれについて広い「 $P \cdot d$ 」積の領域における放電開始電圧（火花電圧）を求めて、従来の Paschen データとの比較検討を行った。さらに、モールド絶縁システムで重要な「放電遅れ」に関するさらなる知見を得るために、本研究の実験電極系に対する X 線照射効果についても検討した。

2-2 実験方法

2-2-1 電極系

本実験に用いた電極系は、金属電極 (MGM) 系、金属-樹脂電極 (MGI) 系、そして樹脂-樹脂電極 (IGI) 系の3種類とした。これらの外観を図 2-1 に示した。上部電極は、直径

25mm の半球形状、下部電極は直径 50mm のディスク状として、いずれも真鍮製で表面を鏡面仕上げとした。

電極表面への樹脂コーティングは、樹脂を薄く注型する専用の型を作成して実施した。コーティングする樹脂は実際のモールド機器に使用されているビスフェノール系で、真空含浸注型法にて電極表面にこの樹脂を薄くコーティングした。電極にコーティングされた樹脂の厚さは、その電極を切断して顕微鏡にて観察して計測した結果、下部電極が 0.35 mm (±0.01mm)、上部電極が 0.31 mm (±0.01mm)であった。電極のギャップ長は 0.1 ～ 7 mm とし、MGM では電極ホルダーに取り付けたマイクロメータとテスターにてゼロ点を確認して調整した。MGI および IGI 電極系のギャップ長は、電極ホルダーに取り付けたマイクロメータと読み取り顕微鏡を用いて適宜調整した。ギャップ長の調整精度は約 0.01mm であった。

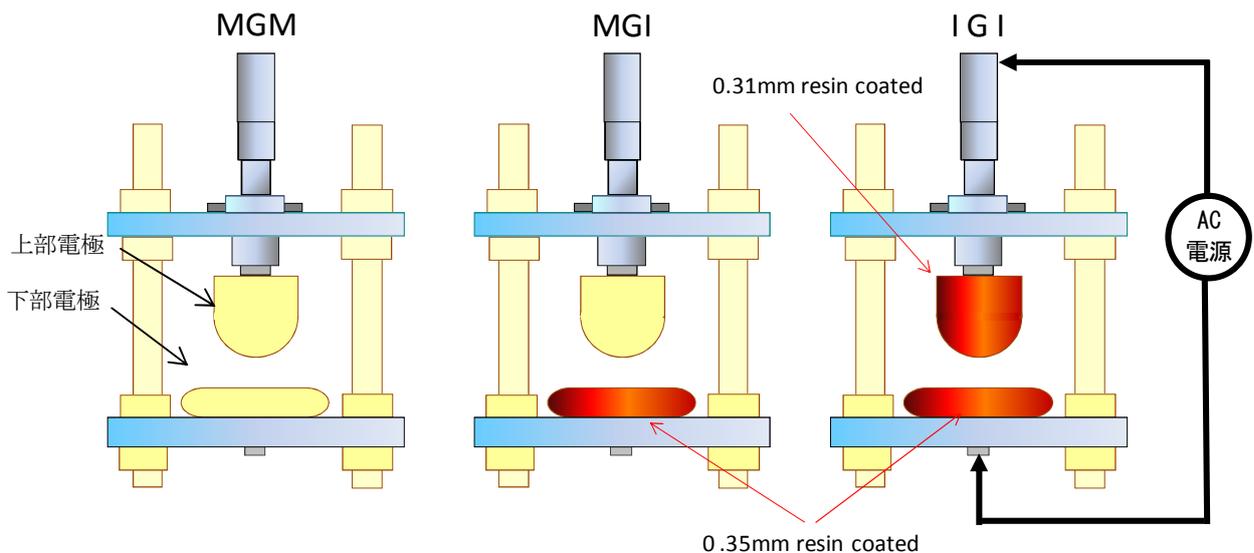


図 2-1 MGM, MGI 並びに IGI 電極模式図と電圧印加イメージ図

2-2-2 部分放電計測システム

本研究では、3 種類の電極系に対する空気の破壊電圧（火花電圧）は各電極ギャップに対する部分放電の発生する電圧 (PDIV: Partial Discharge Inception Voltage) を計測して、試料の絶縁破壊電圧 (V_s) とした。

図 2-2 に部分放電計測システムのブロックダイアグラムと電圧印加パターンを示す。試験用変圧器は、3kV、6kV および 30kV のモールド型計器用変圧器を利用し、測定範囲に適

した電圧クラスのを適宜用いた。本実験の電源は、エヌエフ回路ブロック（株）製の WF1973 信号発生器にて発生させた交流正弦波を、同 4502 増幅器を用い増幅して得た。電極系への電圧の印加方法は、パーソナルコンピュータ（PC）を用いて、電圧の印加と停止、昇圧速度を自動制御しエクセルファイルに測定結果を自動保存させるシステムを作製して行った。

各電極系の部分放電開始電圧（PDIV）は、日本計測（株）製の CD6 部分放電計測システムを用い、検出感度 5 pC にて行った。本実験では、部分放電の開始はそのまま空隙ギャップの全路破壊であった。

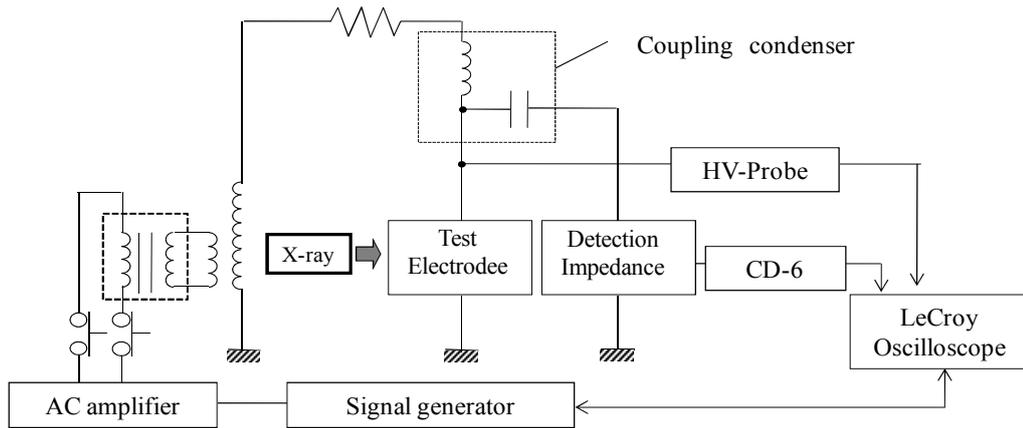
何回かの予備実験を参考にし、図 2-2 に示す電圧印加パターンにて部分放電開始電圧を求めた。まず昇圧速度 60V/sec にて 0V から昇圧を開始し、最初の部分放電検出後、直ちに電圧を最初の検出値の 50%に低減する。次に、この 50%値から同じ速度で再び電圧を昇圧・印加し、以降の部分放電検出は直前の検出値の 70%から繰り返し電圧を印加する方法とした。

この測定手順では、PC で自動制御するために昇圧速度と実験シーケンスが同一になるので安定した部分放電の測定が可能となり、データのばらつきを最小限に抑えることが可能となった。

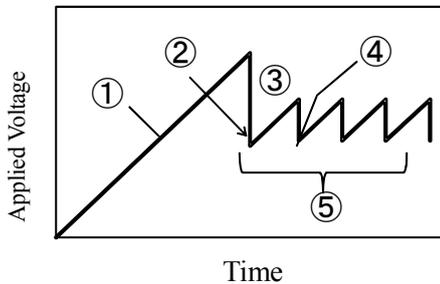
この一連の測定では、直前の絶縁破壊における残存電子や解離イオンなどの影響が懸念されるが直前の絶縁破壊における残存電子や解離イオンなどの空間電荷の影響と思われる様な破壊電圧の顕著な変動は無かった。この詳細については、第 3 章にて述べる。

測定データは 12 個とし、そのうちの最大値と最小値を除いた 10 個の平均値を求めて部分放電開始電圧（PDIV）、すなわち破壊電圧（ V_s ）とした。

X 線照射効果の実験は、松定プレジジョン（株）製の X 線モジュール XM10-60-05 を用いて、出力 5 W、電極からの照射距離 25 cm として実施した。また、実験に用いた電極の表面荒さは、（株）キーエンス製 VK-8710 走査型レーザ顕微鏡を用いて測定した。このときの測定精度は、水平及び垂直方向のいずれも 10 nm であった。



Voltage application method



- ① Voltage rise rate: 60V/sec
- ② Set down the voltage to 50% of the first PDIV
- ③ Raise voltage at 60V/sec, again
- ④ After the 2nd PDIV detection, set the voltage 70% of the former PDIVs
- ⑤ Repeat 12 times, then calculate the average of 10 data without the max. and min.

図 2-2 部分放電計測システムのブロックダイアグラムと電圧印加パターン

2-2-3 Paschen 則のレビュー

モールド絶縁システムにおける部分放電の発生電圧は、この絶縁システムに対する空気の火花電圧 (V_s) と考えて良い。空気の火花電圧は、多くの研究者によりさまざまな条件で求められているが、実際のモールド機器の絶縁設計に適用するには、圧力、絶縁距離 (ギャップ長)、温度、絶縁構成、ボイドや剥離、電界集中、トリプルジャンクション⁽¹⁰⁾ 等さまざまな条件を考えねばならない。

図 2-3 に、これまでに報告されている数多くの文献^{(2) - (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⁽⁴⁾ と Schreier⁽⁹⁾ が交流 (AC-peak)、そのほかは直流 (DC) による実験データである。ここでは、横軸を Paschen 則の圧力とギャップ長との積 $P \cdot d$ ($\text{Pa} \cdot \text{m}$) で整理した。本研究では、Paschen 曲線の最小値よりも「 $P \cdot d$ 」の大きい領域を Paschen ライト ($P \cdot d > 1$)、小さい領域を Paschen レフト ($P \cdot d < 1$)、最小値付近を Paschen ミニマ

ム、さらに ($P \cdot d < 0.01$) を高真空領域と定義する。

Paschen ミニマムおよびライトの領域は、Meek ら⁽²⁾ のまとめた結果が幅広く参照されている。モールド機器の絶縁設計においても、この特性は基本絶縁思想に取り入れられているが、ギャップ長が数ミリ以下のライト領域からミニマム領域以下については、実用的にはいくつか課題がある。例えば、ギャップ長が 1 mm 程度以下になると Paschen 曲線よりも火花電圧が高く測定されること⁽¹¹⁾、また前述した発生遅れ^{(3), (4)} 等があり、これらをどのように絶縁設計に反映すべきかが重要な課題となっている。

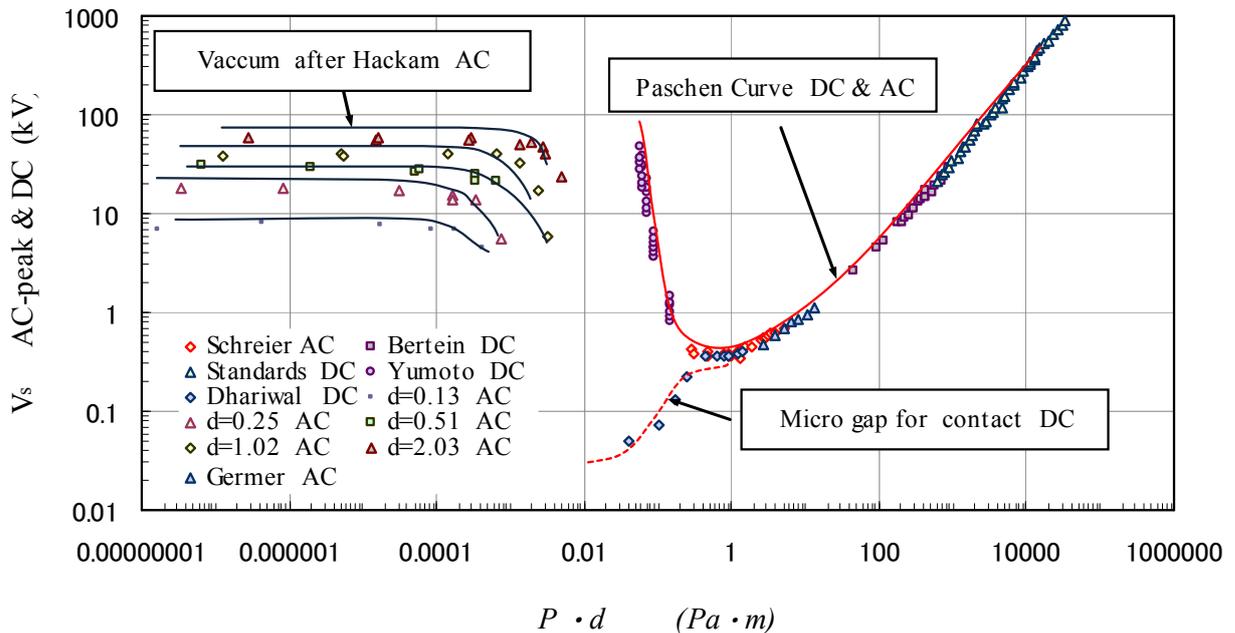


図 2-3 空気中における Paschen カーブ^{(1) - (9)}

Paschen レフトでは、Yumoto ら⁽⁶⁾ が示した「 $P \cdot d$ 」の減少とともに火花電圧が上昇する特性と Torres ら⁽⁷⁾ および Dhariwal ら⁽⁸⁾ が大気圧の μm ギャップで報告している「 $P \cdot d$ 」の減少とともに火花電圧が減少する特性がある。この相反する特性は、機器の絶縁設計を行うに当たっては極めて重要な課題である。

Yumoto ら⁽⁶⁾ の報告（窒素ガス、電極径 168 ϕ 、ギャップ長 17-33mm, dc) では、特殊な凹形電極を用いて電極端部からのロングギャップ放電を避けることにより Schreier⁽⁹⁾ の報告結果よりさらに低「 $P \cdot d$ 」領域への延長としてパッションレフトの特性が得られている。

Torres ら⁽⁷⁾ および Dhariwal ら⁽⁸⁾ の $15\mu\text{m}$ 以下における火花電圧 (dc) の研究報告 (図 2-3 : micro gap for contact で示すデータ, $0.04 < P \cdot d < 1.4$) では, 電極からの電界電子放出および量子的トンネル効果による破壊電圧の著しい低下挙動を示すとしている。これらは, 鏡面仕上げの電極を使用しているにもかかわらず, ギャップ長が短くなることにより電極の電界が高くなり, 破壊メカニズムが「真空の放電メカニズム」と同様になるためと言われている。

次に, Hackam ら⁽⁴⁾ が求めた高真空領域の特性 (電極径 13.5mm の銅製ディスク, ギャップ長をパラメータ) は, 圧力に依存しない特性である。この特性は, Paschen レフトよりもさらに低「 $P \cdot d$ 」の特性となり, Paschen レフトの特性とどのような関係となるかは議論すべき点である。

以上に示した幅広い「 $P \cdot d$ 」領域に関する絶縁破壊挙動を明確にすることは, モールド機器の絶縁設計の基本思想を明確にするために極めて重要である。本研究では, $0.2 < P \cdot d < 100$ ($\text{Pa} \cdot \text{m}$) の領域における空気の絶縁破壊電圧 V_s を部分放電開始電圧として求め, 以上に説明した従来データと比較検討する。

2-3 実験結果と考察

2-3-1 MGM, MGI, IGI 電極系の Paschen 曲線

図 2-4 に, MGM 電極系における部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を示す。同図には, 図 2-3 に示した Paschen の文献データも記載した。ここでは, 各実験条件 (圧力とギャップ長の異なる 54 種類の組み合わせ) に対する測定値の平均, 最大, 最小を示した (ここでは, 前述した 10 個の測定データから求めた)。今回実験した 54 の条件では, 最初の絶縁破壊値が高い値となる確率はおおよそ 28 %であった。特定の圧力もしくはギャップ長でこの初期値が必ず高い破壊値となる傾向は認められなかった。この現象は, 以下に示す MGI 電極系および IGI 電極系のいずれも同様であり, 最初の破壊値が必ず高くなる確率はそれぞれ全実験条件の約 22 %, 約 25 %あった。

図 2-4 から明らかなように, MGM 電極系の領域「 $0.5 < P \cdot d < 10$ 」では, 空気の V_s の平均値 (図中に実線で示した) はいずれも Paschen 曲線よりも高い値であった。空気の V_s が従来の Paschen 曲線よりも高くなる現象は, 僅かではあるが「 $P \cdot d$ 」が小さいほど顕著になる傾向があり, この結果は花井ら⁽¹¹⁾, Mansour ら⁽¹²⁾ の SF6 ガス微小ギャップに関する報告と一致し, 初期電子の不足^{(2), (11), (12)} によると思われる。

図 2-5 に MGI 電極系における部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を示す。ここで、ギャップ長 d は、コーティングした 0.35 mm 厚さの樹脂層を含まない空隙のギャップとし、 V_s も空気（比誘電率 = 1.0）層と樹脂（比誘電率 = 4.1）層の容量分担として空隙の分担電圧として求めた。MGI 電極系では、平均値が MGM 電極系よりも従来の Paschen 曲線に近づく傾向であり、特に領域「 $10 < P \cdot d < 100$ 」では、Paschen 曲線とほぼ一致している。一方、最小値は Paschen 曲線よりも低くなる傾向を示した。

図 2-6 に、IGI 電極系について MGI 電極系と同様に部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を、平均値、最大値、最小値とともに示した。ここでも、ギャップ長 d は、樹脂厚さを含まない空隙のギャップとし、 V_s も空気層と樹脂層の容量分担から空隙の分担電圧として求めた。IGI 電極系においても、MGI 電極系とほぼ同様の結果が得られたが、その平均値は、Meek ら⁽²⁾のまとめた Paschen 曲線により近づく傾向であった。

以上に示したように、ギャップ長が比較的短い領域の空気の火花電圧 V_s は、従来報告されている Paschen 曲線よりも高い傾向であることが明らかになった。その傾向は、「MGM 電極系 > MGI 電極系 > IGI 電極系 \geq 従来の Paschen 曲線」であることが確かめられた。

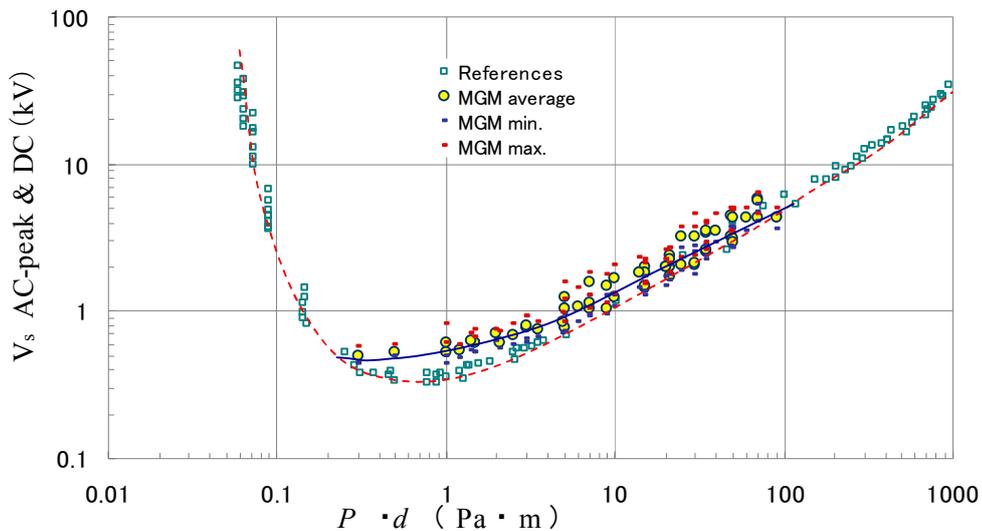


図 2-4 MGM 電極系の部分放電開始電圧と $P \cdot d$ との関係

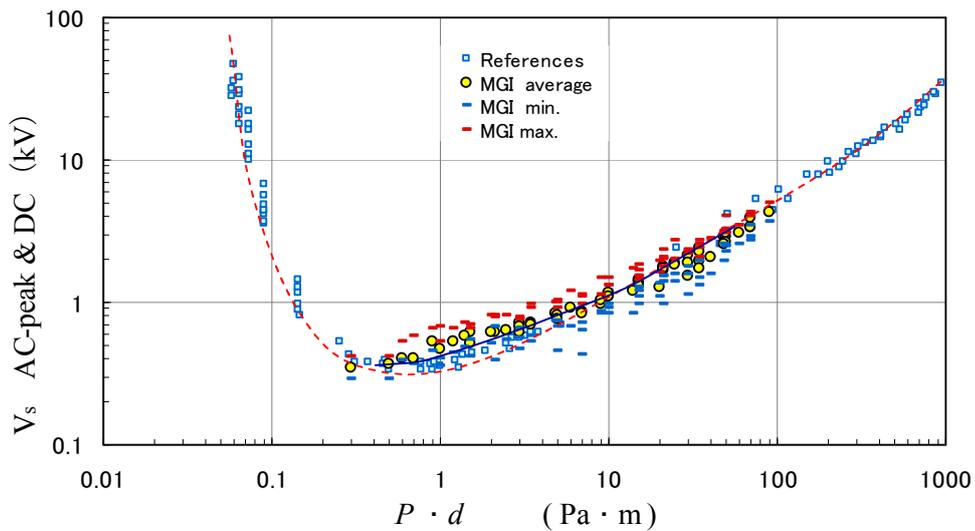


図 2-5 MGI 電極系の部分放電開始電圧と $P \cdot d$ との関係

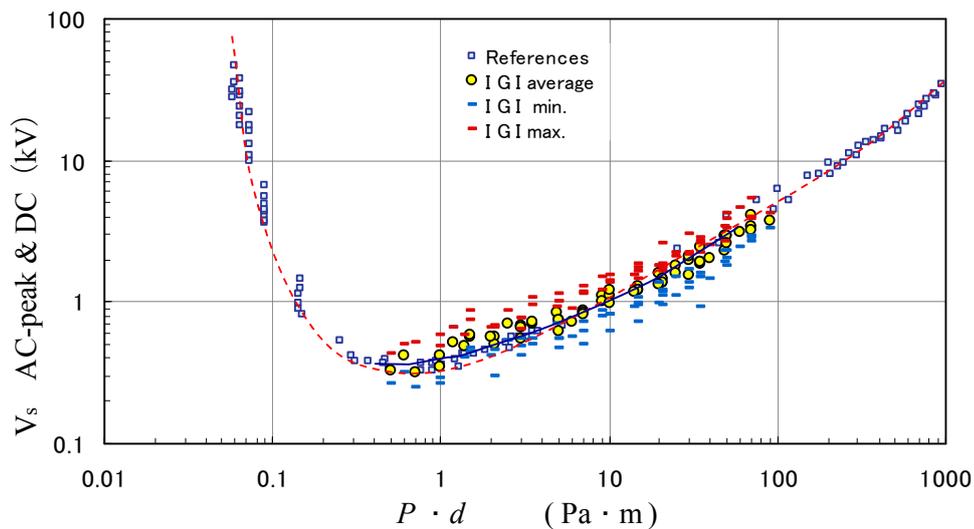


図 2-6 IGI 電極系の部分放電開始電圧と $P \cdot d$ との関係

2-3-2 空気の火花電圧 V_s に対する X 線照射効果

各電極系に対する X 線照射効果について、MGM 電極系は $0.3 < P \cdot d < 30$ の 7 条件，MGI 電極系は $0.23 < P \cdot d < 30$ の 6 条件，IGI 電極系は $0.23 < P \cdot d < 10$ の 4 条件として実施した。ギャップ長は、0.1 mm 及び 1 mm を基本とし、X 線の照射は電極から 25cm 離れた位置から、出力 5W の強さで行った。図 2-7 に測定結果を従来の Paschen 曲線とともに示した。同図から明らかなように、X 線の照射により最大値と最小値の差が小さくなり、且つ測定値がよく知られている Meek ら⁽²⁾ のまとめた Paschen 曲線とほぼ一致することが明確にな

った。この事実は、MGM, MGI, IGI いずれの電極系に於いても同様であり、電極系による違いは認められなかった。

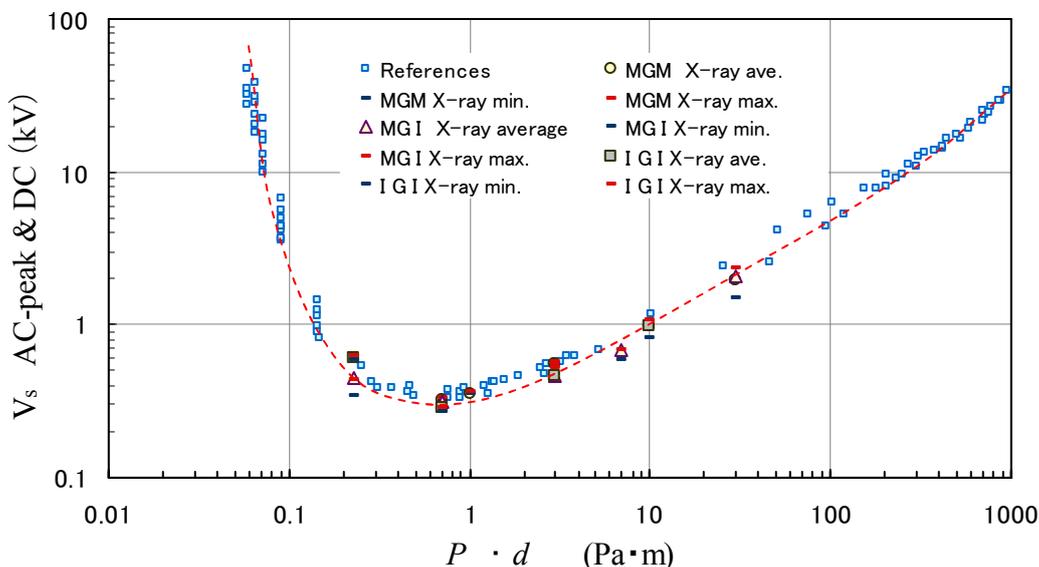


図 2-7 部分放電開始電圧に与える X 線照射の影響

従って、本実験にて得られた「破壊電圧 V_s 」が高くなる原因は、ギャップ空間の初期電子の不足⁽²⁾,⁽¹¹⁾,⁽¹²⁾によると判断される。また、「高い破壊電圧 V_s 」の傾向が「MGM 電極系>MGI 電極系>IGI 電極系 \geq Paschen 曲線」であることは、部分放電による電荷がエポキシ樹脂の表面に堆積することによる可能性⁽¹¹⁾を示唆すると考えられる。

2-3-3 Paschen ミニマム近傍の検討

大気圧のマイクロギャップについて求めた報告(図 2-3)では、Paschen ミニマム近傍からレフトにかけて「 $P \cdot d$ 」の低下とともに V_s が著しく低下し、電極表面からの電界電子放出によると説明されている⁽⁷⁾,⁽⁸⁾。電界電子放出は、F-N (Fowler - Nordheim)理論から 3 MV/mm 以上の電極表面電界が必要であるが、実際にはこの二桁以上小さい電界で生ずるとも報告されている⁽¹³⁾。ちなみに、Germer⁽⁵⁾によれば電界電子放出は 40 kV/mm 以上と言われている。そこで、本実験における電極の表面電界 E_s を次式にて算出し電界電子放出の可能性について検討した⁽¹⁴⁾。

$$E_s = \beta \times \alpha \times (V / d) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta = 2 + h / r \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで β は電極の表面荒さなどによる電界増倍係数、 α は電極の幾何学的形状に依存する電界不平等率、 V は印加電圧、 d はギャップ長、 h は電極表面の微小突起の高さ、 r はこの微小突起の半径である。

電界不平等率 α を検討するため、本実験の電極系のギャップの空気層の電界を求め、静電容量分担として求まる平均電界(V/d)と併せて図2-8に示した。同図より、電界解析結果と平均電界はほぼ一致し、本実験のギャップ長においては、電界不平等率 α がほぼ1であることを確認できた。

次に、電界増倍係数 β を検討するために本実験に用いた真鍮電極及びエポキシ樹脂をコーティングした電極の表面粗さを測定した結果、表面荒さ Ra は、真鍮電極で $Ra=0.01\sim0.03\ \mu\text{m}$ 、エポキシ樹脂をコーティングした電極で $Ra=0.19\sim0.37\ \mu\text{m}$ であった。また、電極表面の微小突起の高さ h 、微小突起の半径 r は、真鍮電極で $h=0.03\sim0.05\ \mu\text{m}$ 、 $r=0.05\sim3\ \mu\text{m}$ 、樹脂をコーティングした電極で $h=0.3\sim0.7\ \mu\text{m}$ 、 $r=3\sim10\ \mu\text{m}$ であった。

これらの測定結果と(2)式より本実験の電極の β は約2~2.4と近似でき電極表面の電界は高々19kV/mm程度と見積もることが出来る。以上から、本実験の範囲では、電界電子放出は考えられないことが分かった。

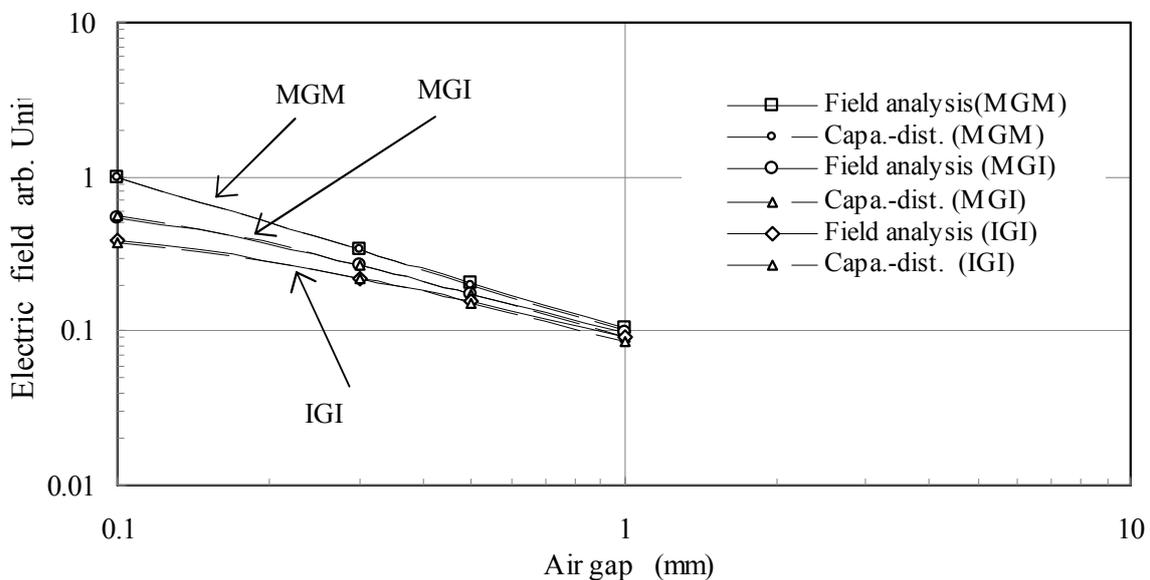


図2-8 空気ギャップ長に対する電界強度

2-4 まとめ

本章では、Paschen 則に関する文献^{(1) - (9)}を詳細にレビューし、MGM, MGI, IGI 電極系の「 $0.2 < P \cdot d < 100$ 」領域における放電開始電圧（火花電圧）を求めて、実用的なモールド絶縁の観点から検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 部分放電開始電圧として求めた微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の平均値は、従来の Paschen 曲線よりも高くなり「MGM 電極系 > MGI 電極系 > IGI 電極系 \geq Paschen 曲線」の傾向となることがわかった。

(2) X線照射効果から、微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の高い原因がギャップ内の初期電子の不足によることを検証した。さらに、X線照射によりいずれの電極系でも従来の文献値（直流）に示されている火花電圧 V_s とほぼ一致することが確認された。

以上より、従来から設計プラクティスとして用いられてきている Paschen ミニマム値を意識した機器の絶縁設計の妥当性を確認することが出来た。

第2章の参考文献

- (1) F. Paschen: “Tuber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen drunken erforderliche Potentialdifferenz”, Weid Ann. Physik und Chemie vol. 37, pp. 69-81 (1889)
- (2) J. M. Meek and J. D. Craggs: “Electrical breakdown of gases”, Oxford Univ. press, pp. 533-653 (1989)
- (3) T. Moriuchi and M. Tan:” Partial discharge property in a spherical void “, Trans IEEJ, Vol. 104, No. 11, pp. 629-634 (1984) (in Japanese)
森内孝彦, 丹通雄: 「球状ボイド内における放電時間遅れ」, 電学論誌, Vol. 104, 11号, pp. 17-22 (1984)
- (4) 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)
- (5) L. H. Germer :” Electrical breakdown between close electrodes in air”, J. Applied Physics, Vol. 30, No. 1, pp. 46-51 (1959)
- (6) 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)
- (7) J. M. Torres and R. S. Dhariwal :” Electric field breakdown at micrometer separation”, Nanotechnology, Vol. 10, pp. 102-107 (1999)
- (8) 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)
- (9) S. Schreier :” On the breakdown voltage of some electronegative gases at low pressure”, IEEE Trans PAS-83, pp. 468-471 (1964)
- (10) T. Takuma, T. Kouno and H. Matsuda :” Field behavior near singular points in composite dielectric arrangement”, IEEE Trans. EI Vol. EI-13, No. 6, pp. 426-435 (1978)

- (11) 花井正弘：「SF6 ガス絶縁変圧器の電気絶縁性能向上に関する研究」，名古屋大学大学院工学研究科 学位論文 pp 25-49 (2008)
- (12) D. A. Mansour, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo and H. Okubo : ” Surface charge accumulation and partial discharge activity for small gaps of electrode/epoxy interface in SF6 gas”, IEEE Trans. DEI Vol.16, No.4, pp.1150-1157 (2009)
- (13) 電気学会：” 放電ハンドブック”， pp. 302-303, 上巻 (1998)
- (14) Y. Inagawa, F. Miyazaki, K. Kato, M. Sakaki, H. Ichikawa and H. Okubo : ” Effect of surface roughness on conditioning effect under non-uniform electric field in vacuum”, DEI-04-25 (2004) (in Japanese)
- 稲川諭季彦，宮崎郁佳，加藤克己，榊正幸，市川裕己，大久保仁：“真空中不平等電界下コンディショニングの電極表面粗さ依存性”， 放電， 誘電・絶縁材料， 高電圧合同研究会， DEI-04-25 (2004)

第3章 モールド絶縁系における微小空気ギャップの絶縁特性(2)

—MGM, MGI 電極系の部分放電挙動—

3-1 まえがき

モールド機器の絶縁システムは、その構造上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、機器の設計から製造に至る基本技術においてはこれを最重要基本事項として位置づけてきている。しかしながら、実際のモールド機器においては、Paschen則の圧力とギャップ長に対する値としてさまざまな可能性があり、現在のモールド機器の一層の小型化、高信頼性を実現するには、より実器を考慮した検討が不可欠である。第1章では、金属電極(MGM)、金属-樹脂電極(MGI)、樹脂-樹脂電極(IGI)系について、Paschen曲線の「 $0.2 < P \cdot d < 100$ [Pa・m]」領域における放電開始電圧(火花電圧)について実験検討して、以下を明らかにした。⁽³⁾

部分放電開始電圧として求めた微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の平均値が従来のPaschen曲線よりも高くなり、且つ「MGM電極系>MGI電極系>IGI電極系」の傾向となる。また、微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の高い原因がギャップ内の初期電子の不足によることを確認した。

本章では、第1章に引き続いて「 $P \cdot d$ 」積の左側(レフト)領域、ミニマム近傍から右側(ライト)領域について、MGM電極系とMGI電極系を用いて実験・検討し、各領域における放電挙動と放電メカニズムについて検討した。

3-2 実験方法

本実験に用いた電極系及び実験方法の詳細は、第1章及び参考文献⁽³⁾に詳述してあるのでここでは概要を示す。電極は、金属電極(MGM)系、金属-樹脂電極(MGI)系の2種類で、直径25mmの半球形状の上部電極と直径50mmのディスク状の下部電極の組み合わせとした(図3-1)。これらは、いずれも真鍮製で表面を鏡面仕上げとした。MGI電極系の下部電極には、実際のモールド変圧器に使用されているビスフェノール系レジンを厚さ0.35mmでコーティングした。電極のギャップ長は0.03~10mmとし、MGMでは電極ホルダーに取り付けたマイクロメータによりテスターにてゼロ点を確認して調整した。MGI電極系のギャップ長は、電極ホルダーに取り付けたマイクロメータと読み取り顕微鏡を用いて適宜調整した。ギャップ長の調整精度は約0.01mmであった。

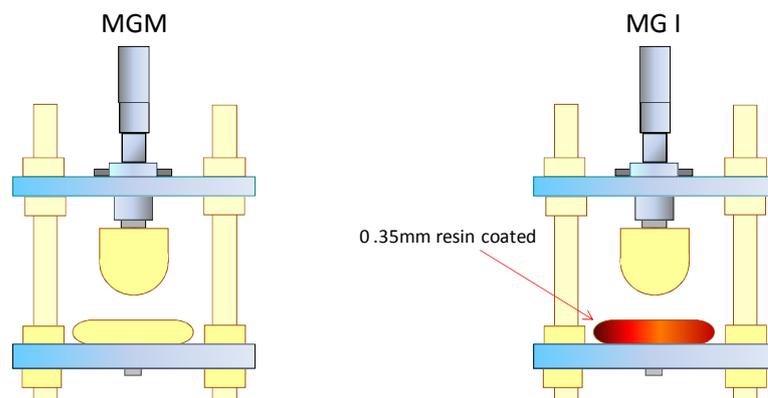


図 3-1 MGM 及び MGI 電極

図 3-2 は、電極システムの部分放電測定システムのブロックダイアグラムと印加電圧パターンを示した。試験用変圧器は、3 kV、6 kV および 30 kV のモールド型計器用変圧器を利用し、測定範囲に適した電圧クラスのものを選択した。本実験の電源は、エヌエフ回路ブロック（株）製の WF1973 信号発生器にて発生させた交流正弦波を、同 4502 増幅器を用い増幅して得た。電極系への電圧印加は、パーソナルコンピュータ（PC）を用いた自動制御で行い、測定結果はエクセルファイルに自動保存されるシステムである。

各電極系の部分放電開始電圧（PDIV: Partial Discharge Inception Voltage）は、日本計測（株）製の CD6 部分放電計測システムを用い、検出感度 5 pC にて行った。本研究では、部分放電開始電圧（PDIV）を計測し、これを各電極系に対する空気の破壊電圧（火花電圧： V_s ）とした。ちなみに部分放電開始はそのまま空隙ギャップの全路破壊であった。

放電時の発光状態は、ディテクト（株）製のデジタルハイスピードカメラ HAS-220（CCD 使用）を用いて、毎秒 1000 フレームの頻度にて撮影した。高速カメラ撮影、電流波形の取り込みは、CD6 部分放電検出器の放電検出パルスをトリガー信号とし、また電流波形の測定は 50 Ω のシャント抵抗を用いて LeCroy 製 454 デジタルオシロ（周波数帯域 500GHz，サンプリングレート 2GHz/s）および Tektronix 製の DP0-4140 デジタルオシロ（周波数帯域 1GHz，サンプリングレート 10GHz/s）にて行った。

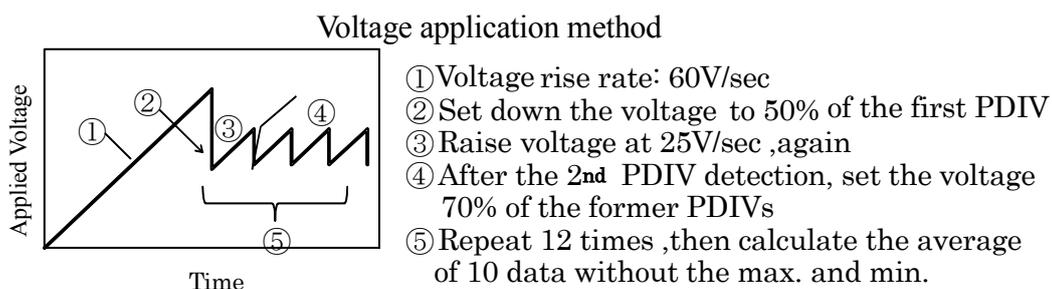
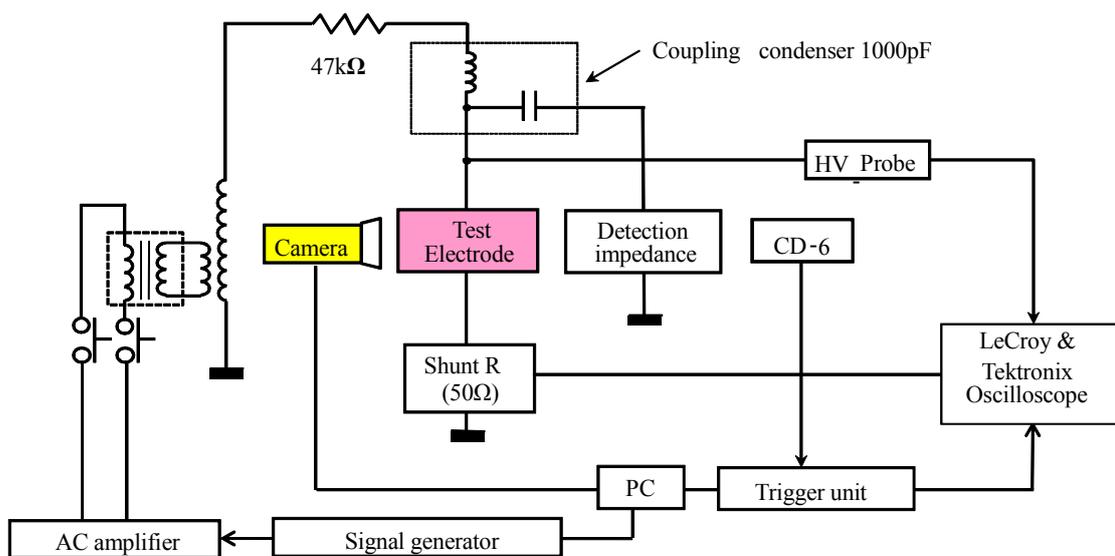


図 3-2 部分放電測定システムのブロックダイアグラムと印加電圧パターン

3-3 Paschen 則の拡張

ギャップ長 0.1 mm 及び 1 mm にて真空度を適宜調整して、「 $0.02 < P \cdot d < 10$ 」における 5 条件に対する V_s を X 線照射条件下にて測定した結果を、文献データとともに図 3-3 に示した。

高真空領域における Hackam ら⁽⁴⁾の報告では、破壊電圧がギャップ長に依存し ($V_s = k \cdot d m$)、圧力に依存しない特性で、破壊メカニズムとして電界電子放出が示されている。しかし、Paschen レフト領域に近い「 $0.001 < P \cdot d < 0.01$ 」の領域をよく観察すると、破壊電圧が「 $P \cdot d$ 」の増加とともに低下する圧力依存性が現れ、しかもギャップ長をパラメータにして Paschen レフトの特性に漸近する傾向を示していると推測できる。

一方, Torres ら⁽⁵⁾ および Dhariwal ら⁽⁶⁾ の大気圧の μm ギャップで報告は, $4\ \mu\text{m}$ 以下の領域では, 高真空領域の破壊メカニズムと類似し, 電界電子放出が提唱されている。

また, 特殊電極で求めた Yumoto ら⁽⁷⁾ の Paschen レフトの結果は, ギャップが $17\sim 30\ \text{mm}$ と大きい。この領域の部分放電は, グロー放電状であり, 衝突電離による電子増倍よりはむしろ, 高エネルギー励起された分子またはイオンによる電子増倍プロセスが絶縁破壊と放電をより支配的としているとしている。

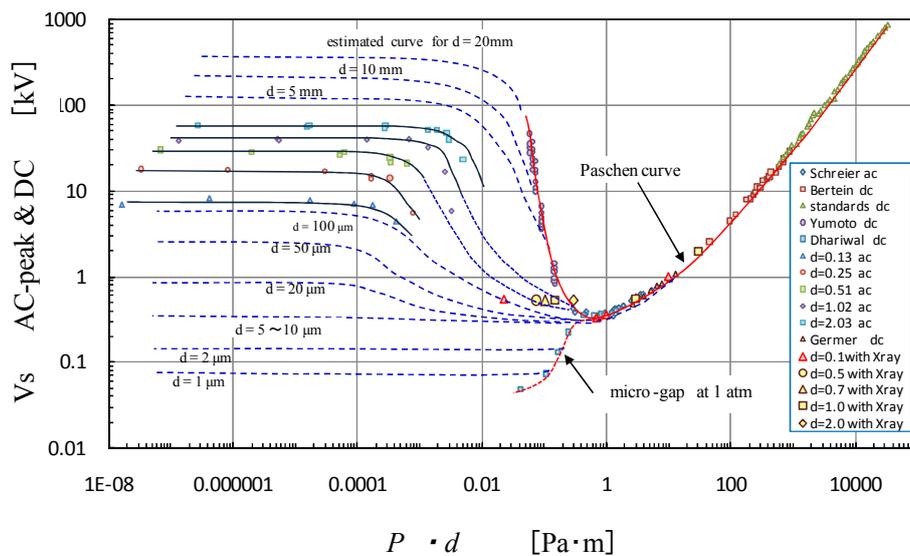


図3-3 Paschen ミニマム近傍とレフト領域における部分放電開始電圧と $P \cdot d$ との関係⁽³⁾

本研究では, これらの実験結果^(2, 4, 5, 6, 7)を総合的に考えて, 「 $0.001 < P \cdot d < 0.1$ 」の領域を「放電プロセスの遷移領域」として高真空領域の絶縁破壊特性と Paschen レフト領域の特性が連続すると推定した。そこで, Hackam ら⁽⁴⁾ のギャップ長依存性を, Dhariwal ら⁽⁶⁾ の大気圧のマイクロギャップの結果を考慮して, $2.5\ \text{mm}$ 以上と $0.1\ \text{mm}$ 以下の領域に外挿し, ギャップ長をパラメータとして図 3-3 中に青い破線で示した。すなわち, ギャップ長 $2.5\ \text{mm}$ 以上では, Yumoto ら⁽⁷⁾ の Paschen レフトとつながり, ギャップ長 $0.1\ \text{mm}$ 以下では Dhariwal ら⁽⁶⁾ の大気圧の μm ギャップの特性とつながると考えた。

まだデータが十分ではないが, これらの結果を総合すると, Hackam⁽⁴⁾ のデータと Yumoto ら⁽⁷⁾ のデータは, Meek ら⁽²⁾ がまとめた Paschen 曲線と一連でつながる可能性があることを示唆している。これを, 「Hackam-Paschen 特性」とする。今後, この領域の破壊特性を明確にすることは重要であり, ひいては, 固体絶縁モールド機器の基本絶縁設計に極めて有用と考えられる。

3-4 実験結果と考察

3-4-1 MGM, MGI 電極系の繰り返し放電特性

放電メカニズムを検討する前に、各電極系における放電開始電圧のトレンドを図3-2に示す手順で200回まで測定し、さらに最初の放電が発生する印加電圧の位相を求め、その測定結果の一例を図3-4に示した。

ここで注意しておくべきことは、後述する様に放電検出後も数サイクルの間は電圧を停止することが計測システム上出来ないので何発かの放電パルスが継続して生じていることである。印加電圧が正のサイクルで最初の放電パルスを検出した場合を positive (記号□)、負のサイクルで検出した場合を negative (記号◇) とした。

本研究で実施した多数の繰り返し放電実験では、印加電圧の正のサイクルで放電する 경우가多く、電極条件もしくは「 $P \cdot d$ 」積の条件に依存する明確な傾向は認められなかった。繰り返し放電特性では、ほとんどの実験条件で放電開始電圧、すなわち V_s は、およそ一定であった。これは、放電により生成される電子や正イオンなどが空間電荷もしくは堆積電荷として影響する可能性が低いことを示唆している。従って、本実験で求めた放電開始電圧 V_s は、およそ一定であり、電極樹脂の表面などへの電荷の帯電現象による放電開始電圧の上昇傾向⁽⁸⁾は認められないと考えられる。

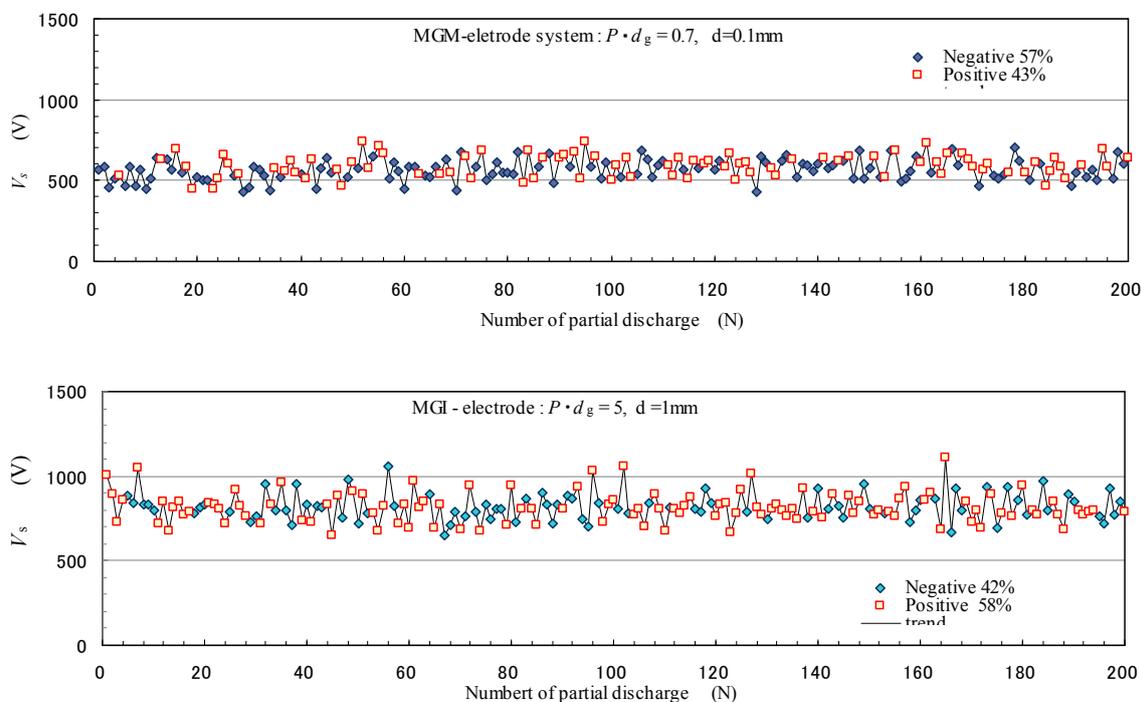


図 3-4 MGM 及び MGI 電極系における部分放電開始電圧の変化例

3-4-2 Paschen ライト及びミニマム領域の放電挙動

図 3-5 及び図 3-6 は、Paschen ライト領域 $P \cdot d = 3$ [Pa·m] ($P=30,000$ Pa, $d=0.1$ mm) における部分放電開始特性の典型的な例を MGM 電極系, MGI 電極系について示した。図中の LeCroy オシロの画像は、印加電圧波形 (ブルー), CD6 コロナ検出器出力パルス (黄色, 部分放電パルス電流に対応) 放電パルス電流 (赤), テクトロニクス的高速オシロと高速 CCD カメラをトリガーする信号 (緑) を示している。

電流波形の詳細は、テクトロニクス的高速オシロにて測定し、同図に示した。さらに、高速 CCD カメラの撮影画像とそれから得られる放電発光状態のイメージ図も示した。Paschen ライト領域の部分放電は、MGM 電極系では立ち上がり時間が数十 ns 程度、放電継続時間が $500\text{ns} \sim 1 \mu\text{s}$ 弱の放電パルス電流であった。一方 MGI 電極系では立ち上がりが数 ~ 10 ns、放電継続時間は MGM 電極系よりも短くなる傾向であった。

放電に伴う発光形態は、MGM 電極系では「枝分かれのない稲妻形状 (本論文では『Streamer タイプ』と定義する)」の発光、MGI 電極系では「電極系全体が薄く輝くグロー放電形状 (本論文では『Glow タイプ』と定義する)」の発光であった。すなわち、金属電極系では、いわゆる「Townsend」または「streamer」放電⁽⁹⁾が観測されるが、エポキシ樹脂である絶縁物が介在すると放電電流が減少し、Glow タイプの発光を伴う放電に変化することが分かった。

Paschen ミニマム領域の部分放電は、Paschen ライト領域のそれらとほぼ同様の放電挙動を示した。放電に伴う発光は、Paschen ライトの場合と同様に MGM 電極系では Streamer タイプの放電発光形態であったが、MGI 電極系では Glow タイプの放電発光形態として観測された。

3-4-3 Paschen レフト領域の放電挙動

図 3-7 及び図 3-8 は、Paschen レフト領域 $P \cdot d = 0.1$ [Pa·m] ($P = 1,000$ Pa, $d = 0.1$ mm) における部分放電開始特性の一例を MGM 電極系, MGI 電極系について示した。前述した様に Paschen レフト領域では、ロングパスを含めたさまざまな放電経路が可能⁽⁷⁾であるが、ここでは単純に絶縁最短距離を用いて $P \cdot d$ 積とした。

Paschen レフト領域では、いずれの電極系においても放電の立ち上がり時間と放電持続時間が長くなる傾向であった。いずれの電極系においても、放電電流は Paschen ライト領域と比べて小さくなり、且つ放電による発光が Glow タイプの放電となった。

$P = 30,000[\text{Pa}] \quad d = 0.1[\text{mm}] \quad pd=3[\text{Pa}\cdot\text{m}]$

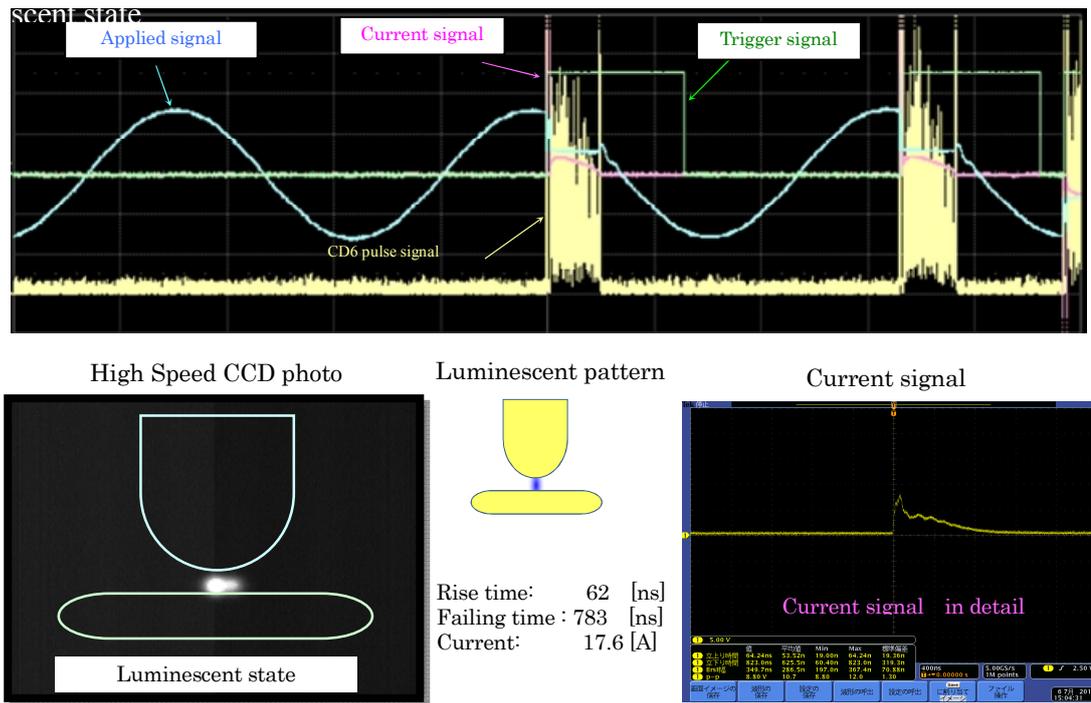


図 3-5 部分放電開始特性の典型例 (MGM 電極, Paschen ライト領域)

$P = 30,000[\text{Pa}] \quad d = 0.1[\text{mm}] \quad pd=3[\text{Pa}\cdot\text{m}]$

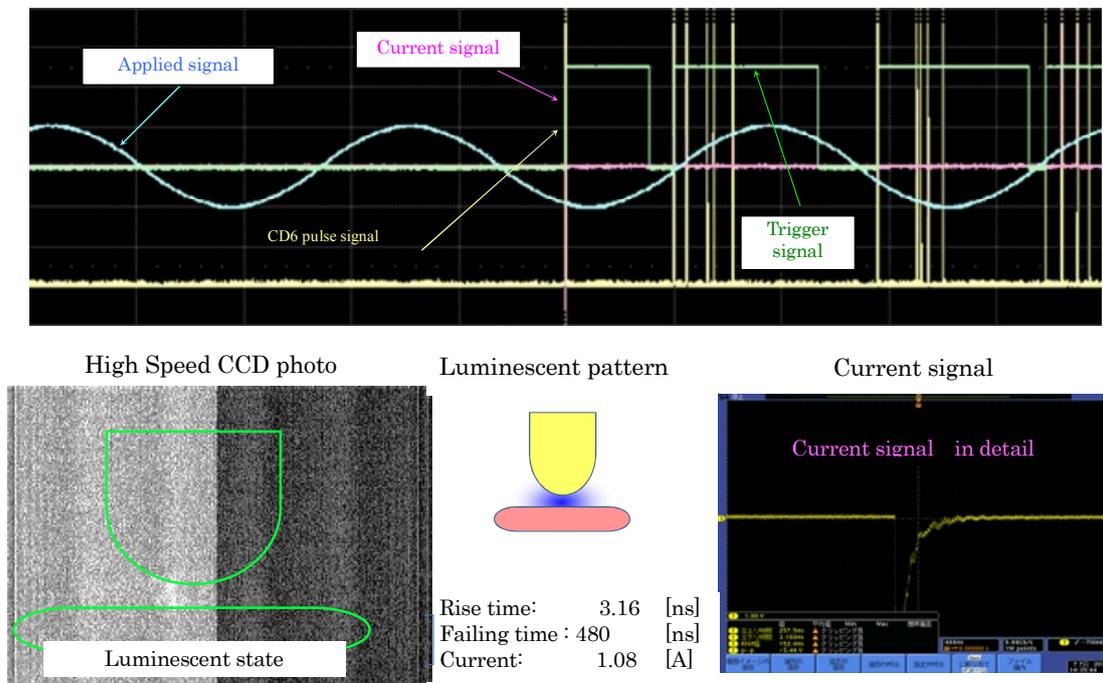
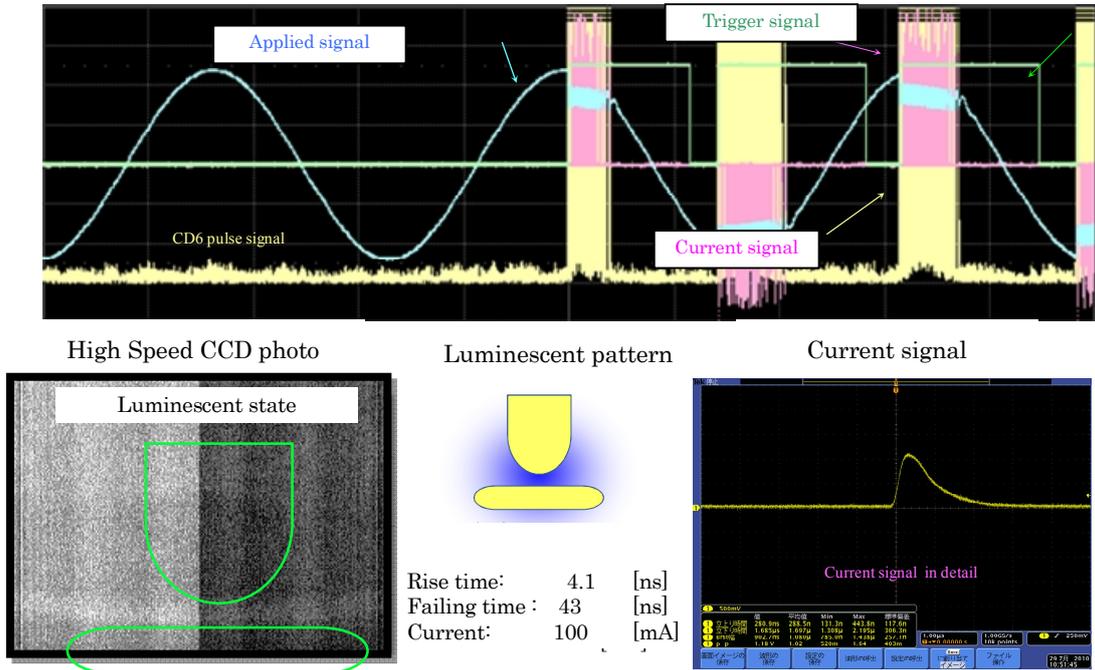


図 3-6 部分放電開始特性の典型例 (MGI 電極, Paschen ライト領域)

$P = 1,000[\text{Pa}]$ $d = 0.1[\text{mm}]$ $pd = 0.1[\text{Pa}\cdot\text{m}]$



3-4-5 放電メカニズムの検討

本章では、ギャップ長 $d = 0.1 \text{ mm}$ の結果について検討する。図 3-9 は、本実験で求めたさまざまな条件における放電電流の立ち上がり時間と持続時間（オシログラム上の立ち下がり時間）および放電電流についてまとめた。さらに、図 3-10 は、図 3-5～図 3-8 の結果を基にして求めた電流波形のイメージ図を示した。

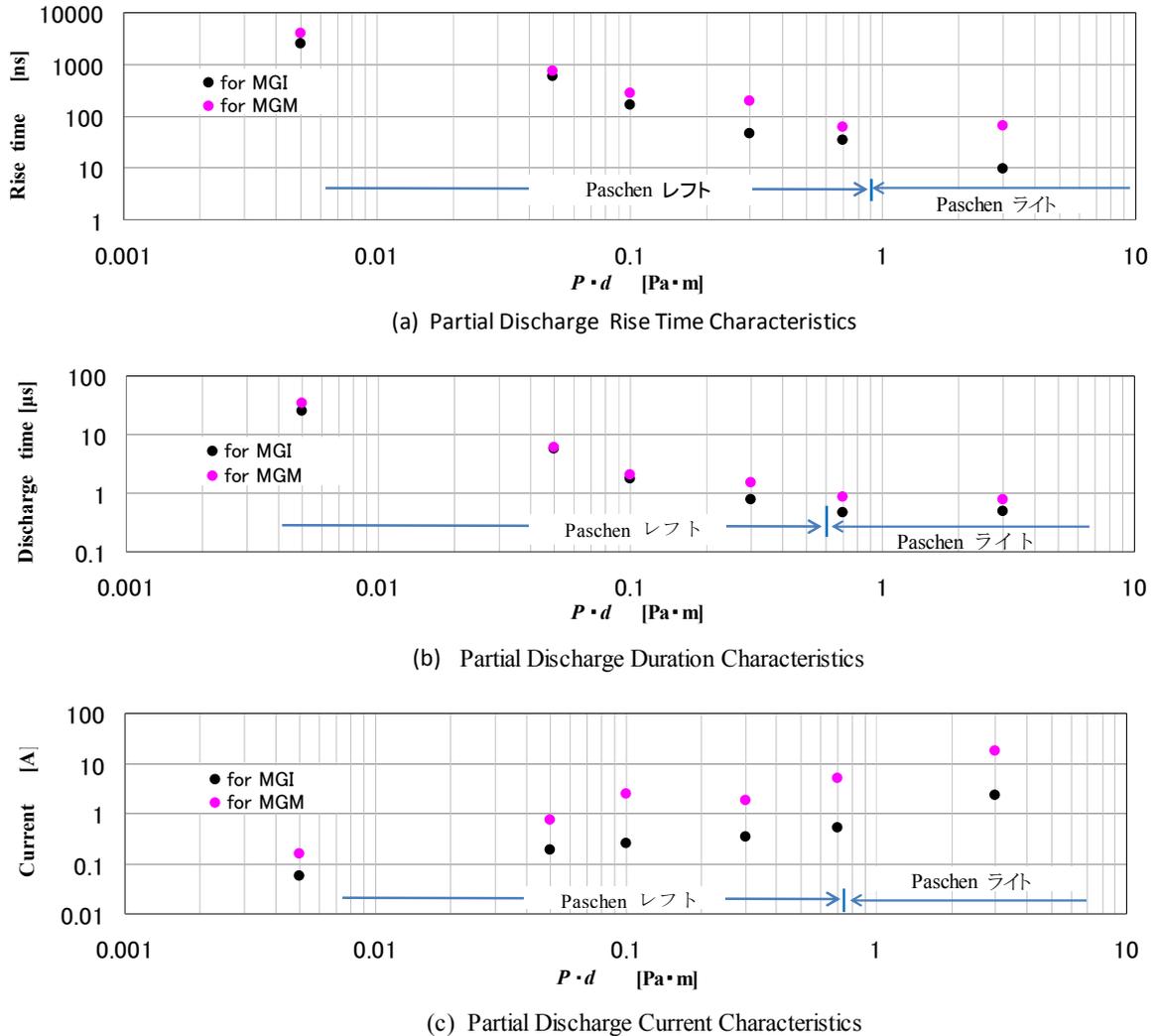


図 3-9 放電電流の立ち上がり時間と持続時間

$d=0.1 \text{ mm}$ ギャップ

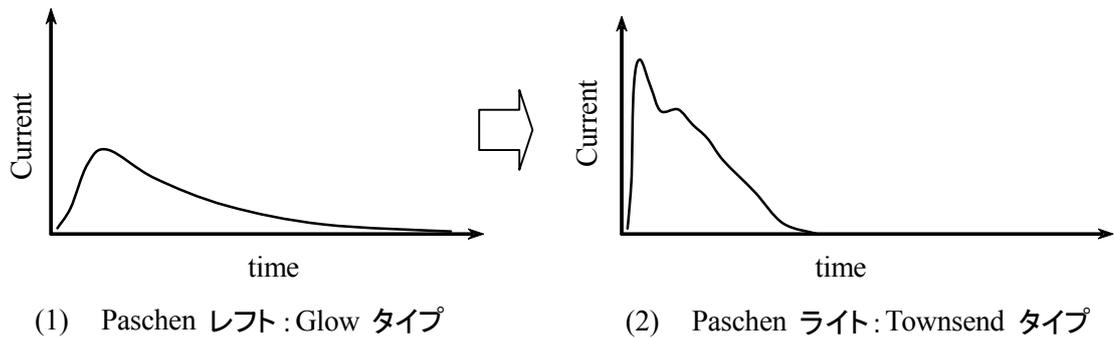


図 3-10 部分放電電流波形のイメージ図

d=0.1mm ギャップ

MGM 電極系の Paschen ミニマム及びライト領域では、図 3-10 に示した様に Townsend もしくは Streamer タイプの放電パルス電流が観測された。Townsend タイプの部分放電パルス電流は、「電子なだれ」による急峻なスパイク状の電子電流と「電離した正イオン」の移動によるフラットトップなイオン電流との和と考えられている⁽⁹⁾。本研究では、ギャップ長が 0.1mm と短く且つ印加電圧も低いため、電子電流がイオン電流に隠れた状態であると推定される。また、放電電流が大きくなると Streamer タイプの放電発光形態に移行していく。一方、MGM 電極系のレフトでは、放電電流が小さく、Glow タイプの放電発光形態の放電が観測された。

次に、MGI 電極系の部分放電では、いずれの「 $P \cdot d$ 」条件においても電極間ギャップ全体が発光する Glow タイプの放電発光形態であった。放電電流波形は、Townsend タイプに類似するが、放電持続時間は Devins⁽⁹⁾ が報告しているギャップ長 0.1 mm の放電持続時間約 50 ns よりもかなり長い数十 μ 秒であった。また、放電電流は MGM 電極系の Paschen ライトに比べて小さく、本実験系では 5A 程度以下である。これは、電極間のイオンや電子の密度が低いことを反映していると推定される。これらの結果から、電子と正イオンのプラズマ状態の Glow タイプに発光していると考えられる。

図 3-11 は、放電開始および放電状態のイメージとしてまとめた。本実験条件では、前報で述べた様に電極からの電界放出は困難である⁽³⁾。従って、放電開始は、自然界から供給される宇宙線などによって電離した初期電子が、Yumoto ら⁽⁷⁾ が提案している「高エネルギー励起された分子またはイオンによる電子増強プロセス」によって持続すると考えるこ

とが妥当と思われる。

MGM 電極系の Paschen ライトでは、放電プラズマを形成するイオンと電子の密度が高く、また放電電流も大きいので、これら放電プラズマの拡散が抑制されて Streamer タイプの放電発光となっていると考えられる。一方、イオンと電子の密度が低くなる Paschen レフトでは、放電プラズマを形成するイオンや電子が周囲に容易に拡散して Glow タイプの放電発光を形成していると推定される。

いずれにしても、電極系の違いや「 $P \cdot d$ 」積の違いにより部分放電タイプの相違が生ずる原因については、さらなる実験・検討が必要であり、今後の研究課題と考えている。

3-5 まとめ

本論文では、MGM, MGI 電極系を用いて Paschen ライト、ミニマム及びレフト領域の部分放電挙動について実験検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 文献レビューと Paschen ミニマム近傍領域の実験から、モールド絶縁システムの絶縁設計に有用な「Hackam - Paschen 曲線」を提案した。
- (2) MGM, MGI いずれの電極系においても、繰り返し課電による電荷の堆積などによる放電開始電圧の顕著な影響は認められなかった。
- (3) MGM 電極系では、Paschen ミニマム及びライト領域で Streamer タイプの放電発光、Paschen レフトでは Glow タイプの放電発光が観測された。
- (4) MGI 電極系では、Paschen 曲線のすべての領域に於いて、グロー状の放電が観測された。
これは、電極間のイオンや電子の密度が低いこと、および放電電流が MGM 電極系よりも小さいことが関係していると思われる。
- (5) MGM 電極系および MGI 電極系の放電形態の原理的なイメージを提案した。

今後、ギャップ長の異なる電極系における幅広い「 $P \cdot d$ 」領域における部分放電特性についても実験・検討を行い、微小ギャップの様々な電極系における絶縁メカニズムを解明する予定である。

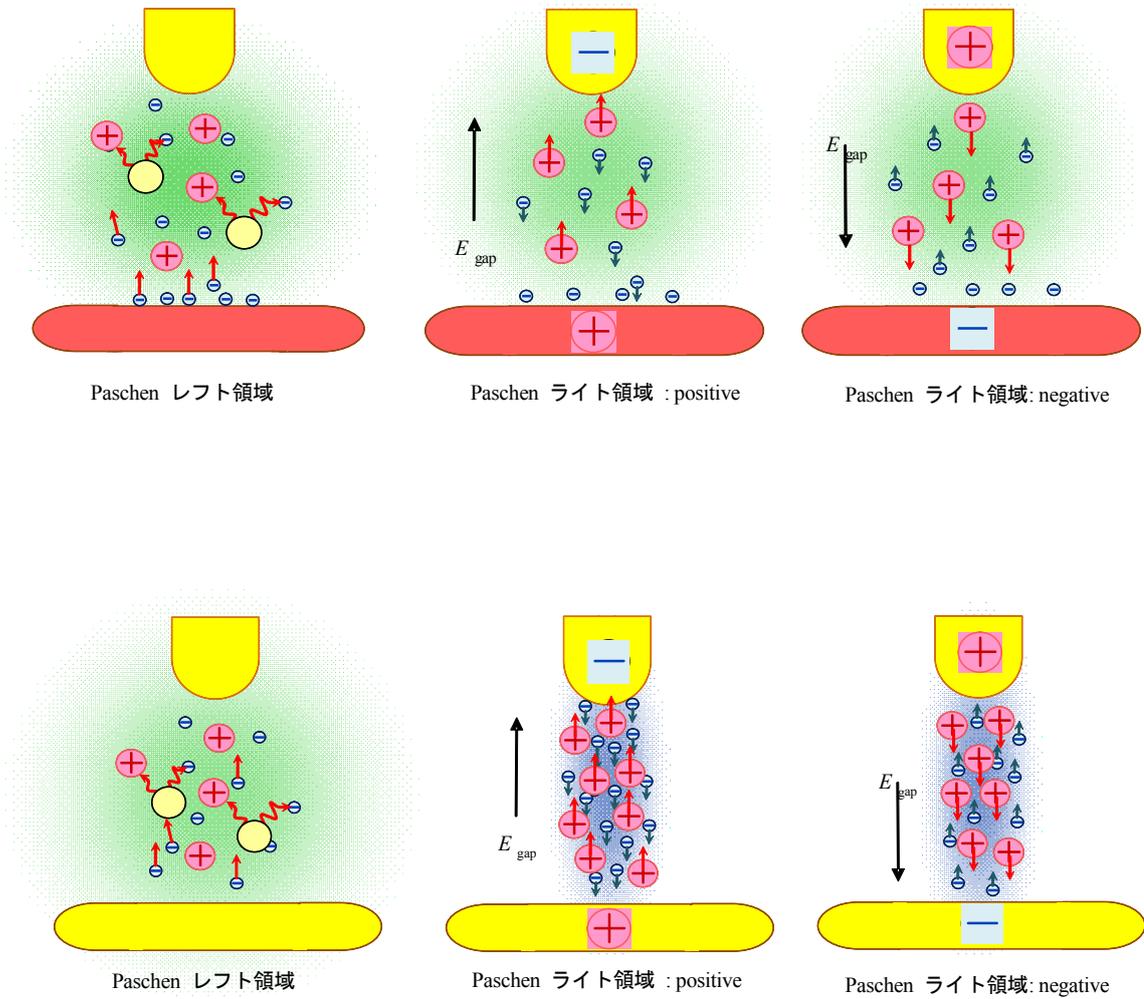
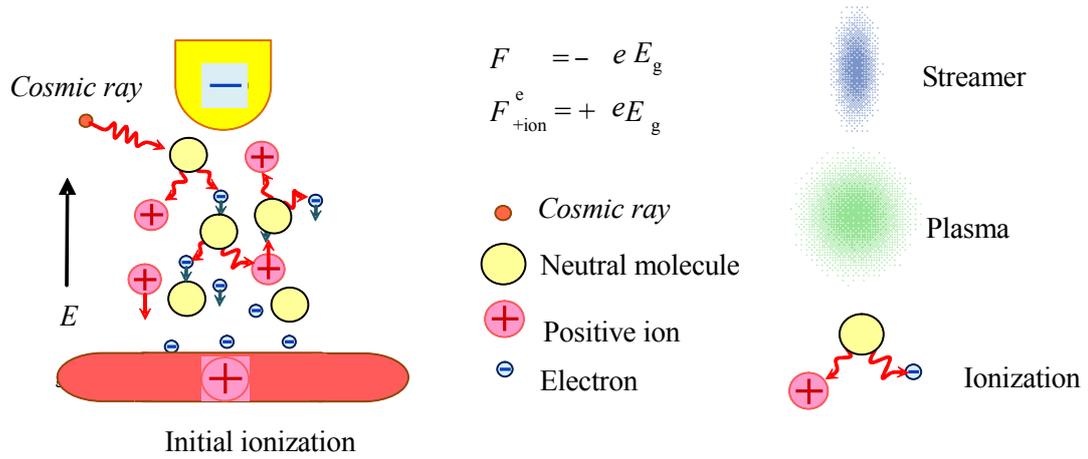


図 3-11 MGM, MGI 電極系における部分放電発生イメージ図

第3章の参考文献

- (1) F. Paschen: “Tuber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen drunken erforderliche Potentialdifferenz” , Weid Ann. Physik und Chemie
vol.37, pp. 69–81 (1889)
- (2) J. M. Meek and J. D. Craggs: “Electrical breakdown of gases” , Oxford Univ. press,
pp. 533–653 (1989)
- (3) M. Higashiyama, H. Suzuki, T. Hirose, T. Maeda, T. Hayama, S. Nakamura, T. Umemura,
M. Kozako and M. Hikita: “Insulation behavior of small-air-gap for the molded
insulation System” , Trans IEEJ, Vol.131, No.7, pp.630–636 (2011) (in
Japanese)
東山雅一, 鈴木勇人, 広瀬達也, 前田照彦, 葉山貴志, 中村修平, 梅村時博, 小迫雅裕,
匹田政幸:「モールド絶縁における微小空気ギャップの絶縁特性」, 電学論誌, Vol. 131,
7号, pp. 630–636 (2011)
- (4) 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)
- (5) J. M. Torres and R. S. Dhariwal : ” Electric field breakdown at micrometer
separation”, Nanotechnology, Vol. 10, pp. 102–107 (1999)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) D. A. Mansour, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo and H. Okubo : ” Surface charge
accumulation and partial discharge activity for small gaps of electrode/epoxy
interface in SF6 gas”, IEEE Trans.DEI Vol.16, No.4, pp. 1150–1157 (2009)
- (9) J. C. Devins : ” The 1984 J. B. Whitehead Memorial Lecture, The physics of partial

discharge in solid dielectrics”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-19, No. 5, pp.
75-495 (1984)

第4章 エポキシモールド絶縁システム中の人工ボイド内部分放電現象の検討

4-1 まえがき

固体絶縁システムを採用しているモールド機器では樹脂-導体等の様々な界面が存在しボイド・剥離等の欠陥が絶縁システム中に内在すれば、絶縁性能の低下に至る恐れがある。そのため製造プロセスで欠陥を排除するとともに、欠陥を検出することが重要とされる。モールド変圧器においてはこれらの微小欠陥の検出技術は、まだ経験的な技術に頼っている部分が多く、理論的な技術確立には至っていないのが現状である。

初期のモールド機器は、既に実フィールドで運転を開始後40年程度が経過し、その健全性確認手段の確立・精度の向上は喫緊の課題とされている。このことから、前述した絶縁物中のボイド等の欠陥を、製造過程、運転中に如何に検出出来るかが機器の信頼性を確保する上で重要になりつつある。一方、固体中のボイドや剥離に対する放電現象および放電シミュレーション解析など多くの検討がなされてきた。しかしながら、モールド変圧器など実器の絶縁システムを想定したボイド放電やその検出技術に対する詳細な理論および実験はまだ十分に理解されるには至っていない。

以上の観点より、本研究では絶縁診断・絶縁設計・試験状態等の幅広い観点から、部分放電制御・検出技術の抜本的改革および高感度測定系の確立を目指している。そのためX線照射により、初期電子を供給し放電遅れなく放電を発生できることや適切な放電検出感度を知ることは、実際の工場出荷前試験の試験時間と試験環境設定の知見になりうるものであると考え、実際の工場出荷前試験における放電検出感度と生産性の向上を目的とした試験時間の設定を念頭に検討を行っている。

本研究では、絶縁物中の密閉ボイド内における放電現象のモデルとして、二つのモデルについて比較検証している。一つ目は、複雑ではあるが物理的な現象に基づく唯一最も完成度の高いモデルであり、かつ世界的にも広く参考にされている1980年代後半にA. Pedersenら⁽¹⁾によって提唱されたモデルである。これを以下に表面電荷モデルと呼ぶ。二つ目は、静電界の理論を適用したモデルであり、1960年代後半に安井ら⁽³⁾によって提唱されたモデルである。これを以下に二層誘電体モデルと呼ぶ。この報告後から現在に至るまで、電力ケーブル等のモールド機器がこの理論および実験値に基づいて設計されているのが現状である。過去の研究のうち、最も基礎現象に基づいたボイド放電モデルを確立したと考えられる“表面電荷モデル”と、現在まで電力ケーブルにおける絶縁設計の根拠

とされ続けている“二層誘電体モデル”を比較検証することは、放電現象に基づく表面電荷モデルを用いて評価することで現在採用されているモールド機器の絶縁設計に対して設計の妥当性を示すためにも重要であると考えます。

そこで本章では、A. Pedersen らによって提唱されたボイド放電理論における固体中ボイド直径(2a)と見掛けの放電電荷量 Q_a の関係式、また安井らによって示された球状ボイド内放電の理論のそれぞれに基き、エポキシモールド変圧器の絶縁システムを模擬した構成においてボイド直径(2a)と見掛けの放電電荷量 Q_a の関係(Q_a-2a 特性)について検討を行った。この際、両者の理論の仮定や計算結果を比較することにより、部分放電(PD ; Partial Discharge)測定系の検出感度について議論した。

また、実際の工場出荷前試験における X 線導入時の新規試験時間設定のための知見を得るために、1990 年代後半に L. Niemeyer ら⁽⁴⁾によって示されているボイド放電開始遅れ時間 t_{inc} ($t_{inc}-2a$ 特性)についても検討を行った。

最後に、予めボイドサイズを測定済みの人工ボイド入りボイドエポキシ樹脂厚板を用いて、ボイド内部分放電開始電圧(PDIV ; Partial Discharge Inception Voltage)を知るために実験を行った。得られた PDIV 特性と Pedersen および安井の両モデルの解析結果に放電電荷量の実験値をプロットすることで、エポキシ樹脂への X 線照射効果と両放電モデルのうちどちらがより妥当であるかについて検討した。

4-2 ボイド内部分放電のシミュレーションモデル

4-2-1 ボイドサイズと放電電荷量の関係

まず固体中ボイドにおける部分放電を考慮する上で参考にした概念を以下に示す。

(1) 表面電荷モデル

A. Pedersen らは、誘電体内にある気体ボイドにおける放電電荷量について理論式を導出している。条件として、誘電体中ボイドは球状の気体(空気)ボイドとし、ボイド内気圧を 0.1 MPa としている。また、放電形態はストリーマ放電を仮定し、また、放電時間遅れは無視している。 Q_a の導出は、以下のように要約できる。

ボイド内部分放電によってボイド表面 S に電荷 $\pm q_s$ [C] が誘起される。これにより双極子配列が起こり、ボイド内に電界 E_q が形成される(図 4-1(a))。誘電体を挟む電極上にも同様の誘起電荷が現れる。これにより続いて放電が起こる(図 4-1(b))と、ボイドの表面電荷密度 σ は、ボイド内の電界 E_i が放電を停止させる値 E_{res} まで減少する(図 4-1(c))。電極上

の誘起電荷およびボイド表面の電荷± q_s の一部は放電時のエネルギーとして放出され、電極間の電位差が ΔU だけ減少して $U - \Delta U$ となり、電極上の電荷は $Q + \Delta Q$ となる。ここで、最初の放電がボイドに起こる前の電極間の電圧を U および電荷を Q として、 ΔQ は電源から供給される電荷である。回路の線路インピーダンスが放電に起因する電流に対して非常に大きい場合、絶縁システムの静電容量を C [F]、とすると、見かけの放電電荷量 $Q_a = q$ は以下の式によって示される。

$$q = -\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla} \lambda = - \int_S \lambda \sigma dS = C \Delta U + \Delta Q \approx C \Delta U \cdots \cdots (1)$$

$$q = -K \Omega \varepsilon \left(\vec{E}_i - \vec{E}_l \right) \cdot \vec{\nabla} \lambda_0 \cdots \cdots (2)$$

$$E_i - E_l = \frac{B E_l}{\sqrt{2ap}} \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $\vec{\mu}$ ：誘起電荷がボイドの S 面に分布している際の双極子モーメント、 K ：形状パラメータ ($K = 3$ ：球状ボイド)、 Ω ：ボイドの体積[mm³]、 E_l ：この電界以下に達すると放電が止まる電界、すなわち電離成長が停止する臨界電界[V/m]、 λ ：ラプラス方程式を満たす無次元の電界変化パラメータ ($\lambda_0 = -1$)、 B ：気体特性を示す定数[Pa/m]^{1/2} ($B = 8.6$)、 a ：ボイド半径[m]、 p ：気体の圧力[Pa]である。

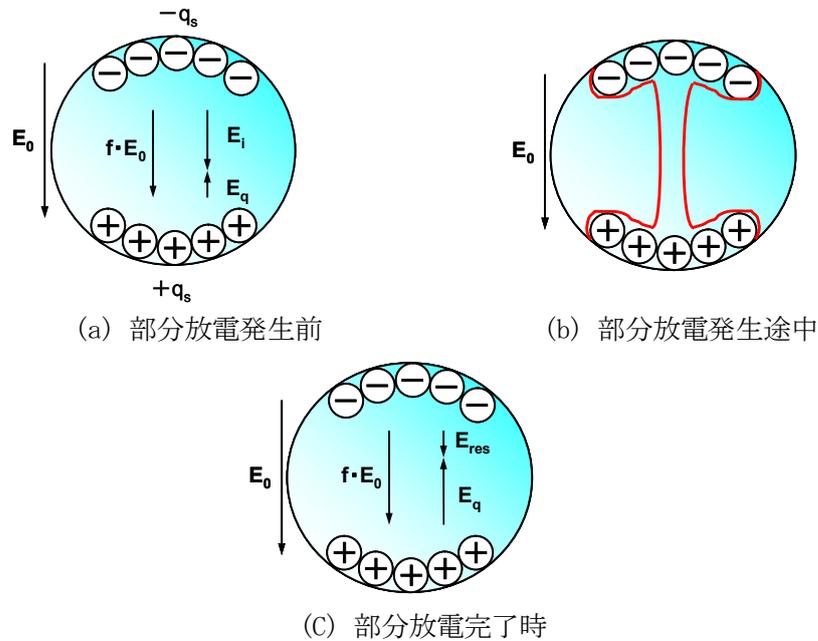


図 4-1 部分放電発生前後におけるボイド表面電荷の移動と電界⁽³⁾

(2) 二層誘電体モデル

安井らは、従来から用いられているコンデンサーによる等価回路(Whitehead のボイド放電 ABC 等価回路モデル)を用いた解析と比較して(図 4-2 参照), 固体誘電体試料中にボイドが存在する場合について, 静電界理論によりボイド放電を理論的に解析している。

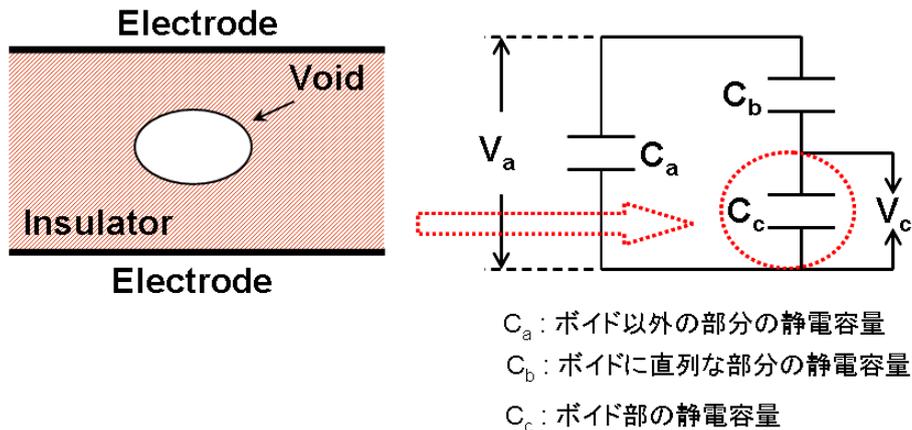


図 4-2 Whitehead による部分放電の ABC 等価回路モデル⁽²⁾⁽³⁾

その結果, ボイド内放電の放電開始電圧 V_i , 見かけの放電電荷量 Q_a と真の放電電荷量 Q_t の関係, 真の放電エネルギー J_t を導出している。さらに, ポリエチレンケーブル中にボイドが存在する場合に交流電圧印加の場合のボイド放電実験を行い, 上記の解析式と比較検討している。

以下, 二層誘電体モデルによるボイド半径 a と放電電荷量 Q_a , Q_t の関係の導出を要約する。誘電率 ϵ_1 なる誘電体中に誘電率 ϵ_2 なる球状ボイドが存在する場合に, 球状ボイドから遠く離れた外部電界 E が平等電界 V/d であれば, 静電界理論より球内の電界も平等電界 $E_i = f E$ となる。ここで, f は電界強調因子であり, 次式で表わされる。

$$f = \frac{3\epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad \dots\dots (4)$$

球状ボイド近傍では平等電界ではなくモーメント M なる双極子を置いた場合の電界となる。このとき, 球状ボイド内に蓄積されている電荷 Q_v は, 電気変位 $D_1 = \epsilon_2 E$ を半球面で面積分して次式で表わされる。

$$Q_v = \pi a^2 E \frac{3\epsilon_1 \epsilon_2}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad \dots\dots (5)$$

次に、厚さ d 、面積 A なる平行平板試料中に半径 a なる球状ボイドが存在する場合を考える。球状ボイドの両端の最大電位差 v_g がボイドの放電開始電圧 V_s を超えた場合に持続放電(ボイド PD)放電が開始する。ボイド両端にかかる電圧 v_g が、平板状ボイドの放電開始電圧の実験式(6)式より得られる値($p = 1$ [atm])を超える時に、放電が発生する。

$$v_i = 37.6pd + 0.71 \quad [\text{kV}_{peak}] \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 p : 気圧 [atm], $d = 2a$: 放電間隙長 [cm] である。

ボイド内部で放電が発生すると、ボイド内面の電位差がゼロとなるまで、放電が続くと仮定する。すなわち、放電により、ボイドが完全に短絡するとしてボイドを完全導体球として見なしている。(図 4-3 参照)

このときの、放電開始以前および後の等価誘電率を $\tilde{\epsilon}$, $\tilde{\epsilon}'$ とすると、放電前後の試料の静電容量 C_1 , C_2 はそれぞれ、

$$C_1 = \tilde{\epsilon} \frac{S}{d} = \frac{S}{d} \epsilon_1 \left(1 + \frac{4\pi a^3}{Sd} \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \right) \quad \dots\dots (7)$$

$$C_2 = \tilde{\epsilon}' \frac{S}{d} = \frac{S}{d} \epsilon_1 \left(1 + \frac{4\pi a^3}{Sd} \right)$$

外部より試料に実電荷 $\pm Q'$ を与えて両電極間の電位差が V となった場合にボイド内の放電が発生する。このとき、電荷移動が発生し、電極間の電位が $V - \Delta V$ に低下する。電荷保存則により、放電前後の実電荷 $\pm Q'$ は保存されるので、

$$Q' = C_1 V = C_2 (V - \Delta V) \quad \dots\dots (8)$$

見掛けの放電電荷量 $Q_a = C_1 \Delta V$ より、

$$Q_a \cong \frac{4\pi a^3}{d} E \frac{3\epsilon_1^2}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad \dots\dots (9)$$

また、真の放電電荷量 Q_t は球状ボイド内の蓄積電荷 Q_v と Q_a との和で近似でき、次式で与えられる。

$$Q_t \cong Q_v + Q_a = \pi a^2 E \frac{3\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \left(1 + \frac{4a \varepsilon_1}{d \varepsilon_2}\right) \quad \dots\dots (10)$$

ここで、 ε_1 ：平行平板誘電体の誘電率、 ε_2 ：球状ボイドの誘電率、 a ：球状ボイドの半径[m]、 d ：試料の厚さ[m]、 E ：ボイド外部の印加電界[V/m]である。

4-2-2 放電時間遅れ

ボイド内電界がストリーマ開始条件を満たす場合でも、放電開始のトリガとなる初期電子の供給で放電開始の有無が決まる。よって、実際のボイドPDの場合には、初期電子供給されるまでの放電時間遅れ t_{inc} を考慮しなければならない。放電の発生していないボイドでの初期電子供給メカニズムとしては、①自然高エネルギー放射粒子（宇宙線、放射物質からの放射線）の気体中での光電離、②絶縁体バルク内での光電離とそれに引き続く光電子のボイド内への供給、③ボイド表面からの電界放出、などがある。

L.Niemeyerらは、エポキシ樹脂内のボイドでは、放電遅れを支配する初電子供給は、自然高エネルギー放射粒子（宇宙線、放射物質からの放射線）の気体中での光電離であるとして、放電遅れ時間(放電開始時間) t_{inc} を次式で与えている。

$$t_{inc} \approx [C_{rad} \Phi_{rad} \left(\frac{\rho}{p}\right)_0 p (\pi a b^2) (1 - \nu^{-1/n})]^{-1} \quad \dots\dots (11)$$

ここで、 C_{rad} ：気体における放射線相互作用、 Φ_{rad} ：宇宙線・放射線放射量子束密度、 $(\rho/p)_0$ ：気圧換算ガス密度[kg/m³Pa⁻¹]、 $\pi a b^2$ ：ボイドの体積[m³]、 ν ：過電圧率である。空気の場合には、 $C_{rad} \cdot \Phi_{rad} \cong 2 \times 10^6$ [kg⁻¹s⁻¹]、 $n=1/2$ 、 $(\rho/p)_0 \cong 10^{-5}$ [kg/m³Pa⁻¹]である。

4-3 表面電荷モデルと二層誘電体モデルのシミュレーション結果の比較

上述したように、実際のモールド変圧器において、危険度の高い部位としてボイド Partial Discharge (PD) ケースモデルを定めて検討を行う。本章では巻線周辺におけるボイドを想定しており、モールドコイル内の電圧がかかる部分を平行平板のモデルで仮定した。概略図を図4に示す。ここでは、2節に示した表面電荷モデルと二層誘電体モデルの両方の理論に基づき、それぞれ(2)式および(9)式からボイドサイズ(直径) $2a$ と電荷量 Q_a 、 Q_t の関係を計算して、両モデルを比較した。計算には、仮定として、モールド変圧器絶縁

システムをギャップ長 g の平行平板電極とし、エポキシ絶縁内に球状ボイドが存在するとした。

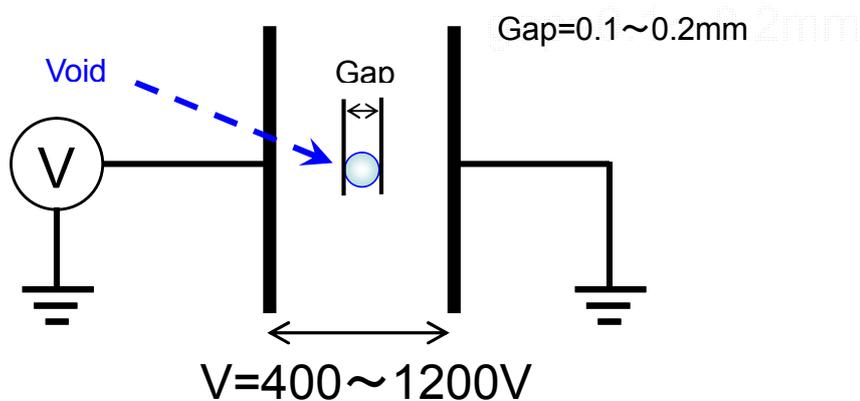


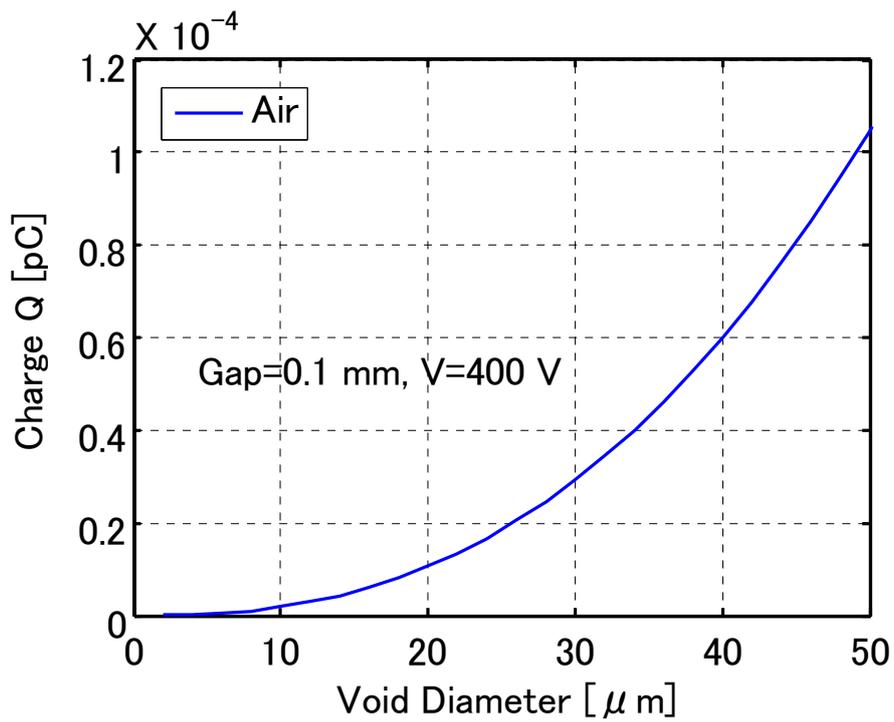
図 4-4 ボイド中の部分放電発生モデル

ここでは、ギャップ間隔 g を $0.1 \sim 0.2$ [mm]、電極間の電位差 V を $400 \sim 1200$ [V] として、ボイド径 $2a$ を変化させた時の見かけの放電電荷量 Q_a の変化を計算により求めた。

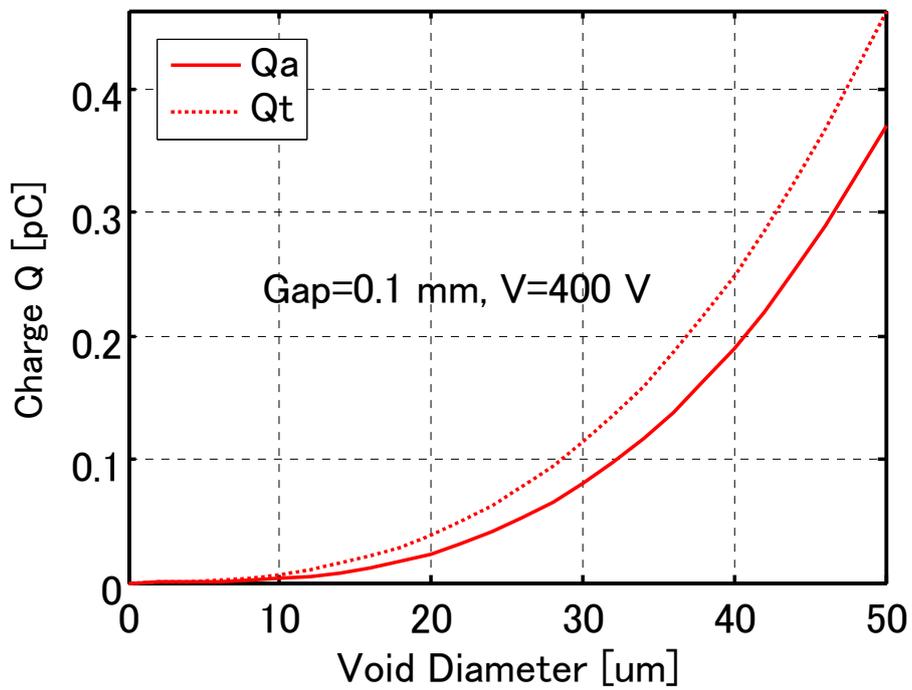
4-3-1 ボイドサイズと電荷量の関係 (Q_a-2a 特性)

上述したボイド PD ケースモデルにおいて、ボイドサイズと電荷量の関係 (Q_a-2a 特性) を表面電荷モデルと二層誘電体モデルの両方のモデルで解析した。

一例として、ギャップ間隔 $g = 0.1$ [mm]、電極間の電位差 $V = 400$ [V] のときの表面電荷モデルと二層誘電体モデルにおける Q_a-2a 特性をそれぞれ図 4-5 (a) および (b) に示す。



(a) Pedersen モデル (ギャップ $g = 0.1$ [mm], $V = 400$ [V])



(b) 安井モデル (ギャップ $g = 0.1$ [mm], $V = 400$ [V])

図 4-5 Pederson モデルと安井モデルにおける Q_a-2a 特性

(ギャップ $g = 0.1$ [mm], $V = 400$ [V])

4-3-2 Qa-2a 特性の考察

図 4-5 の結果より、表面電荷モデルと二層誘電体モデルを比較すると、同サイズのボイド中における二層誘電体モデルから求めた Q_a は、表面電荷モデルからの Q_a より約 3,000 倍大きくなる結果となった。これらの結果の違いは、両者のボイド PD の考え方の違いに起因するとして、以下のように解釈できる。表面電荷モデルでは、ボイド内の電界 E_i がストリーマ開始となる最小値に制限され放電開始電界に達した瞬間に放電が発生する、すなわち、過電圧が無く放電遅れ時間をゼロとして、 Q_a を計算している。放電はボイド内電界 E_i が、電離が成長しない臨界電界 $E_l = E_{res} = E_{str}$ (E_{str} : ストリーマ電界) となると停止する。そのため、表面電荷モデルではボイド PD によって電荷の一部が消費されるものの、残存電荷が存在する。以上のモデルの条件から、評価される Q_a は、与えられた条件下での最小値となる。

一方、二層誘電体モデルでは、ボイド電圧 v_g が、平板状ボイドの放電開始電圧の実験式(6)式より得られる値($p=1$ [atm])を超える時に、放電が発生するとしている。2 節で示したように、二層誘電体モデルでは、放電後のボイド内電荷はゼロになり、完全導体として振る舞う。放電によりボイド内電荷すなわち電極上の束縛電荷が消散すると、電極の電圧が ΔV 低下するとともに、これを補償する電荷が電源より供給される。このように二層誘電体モデルでは消散する電荷量が表面電荷モデルと比較して相対的に多くなるので、 ΔV がより大きくなる。 $Q_a = C_1 \Delta V$ なので、二層誘電体モデルの方が、表面電荷モデルよりも同条件にて大きな Q_a となると解釈される。

言い換えると、ボイド表面に分布された電荷は PD 前後によって変化するが、表面電荷モデルと二層誘電体モデルでは、放電後のボイド内の電荷量の変化量が異なり、これに伴う電極間の電圧低下分が異なる。このため、評価される Q_a が異なる。今後、さらなる研究動向の調査と実験の結果から、どちらのモデルが適切かを判断する予定である。

4-4 放電時間遅れ (t_{inc-2a} 特性)のシミュレーション結果と考察

放電測定系を構築する上で放電開始時間 (t_{inc}) とボイドサイズ ($2a$) の関係 ($t_{inc} - 2a$ 特性) を把握しておくことは、例えば、ボイドサイズの管理値の決定のみならず PD 試験における適切な放電検出感度と試験時間を決定する際に、非常に重要である。ここでは、(11)式を用いて、ボイド内圧力 $p=75$ kPa として、過電圧率 \cdot を 2, 3, 5 倍に変化させた場合の放電開始時間 t_{inc} とボイドサイズ $2a$ の関係を計算した。図 4-6 に、その結果を示す。

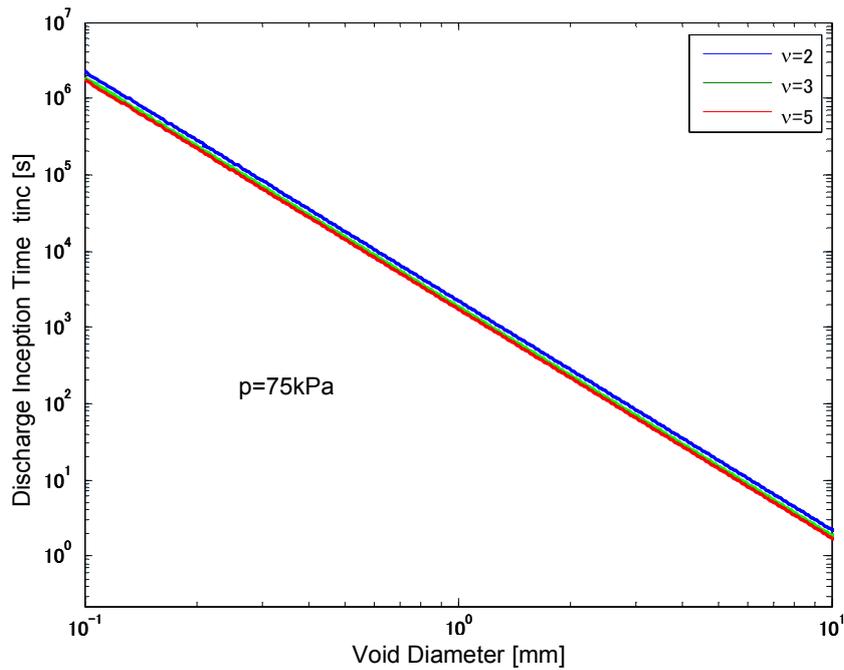


図 4-6 部分放電発生遅れ時間 t_{inc} とボイド径 $2a$ との関係 ($p=75$ kPa)

図 4-6 より、過電圧率を変化させてもボイドサイズと放電遅れ時間の関係はほとんど変化が見られなかった。すなわち、印加電圧に関わらず、2 mm サイズのボイドがある場合には、200 s ほどの電圧印加時間で放電が発生するが、50 μ m サイズのボイドがある場合には 10,000 s (~ 3 hr) の放電遅れが発生することがわかる。この結果より自然放射線下では、放電遅れは過電圧の大きさに関わらずほとんど変化せず、ボイドサイズが小さくなれば放電遅れ時間は指数関数的に増加してしまうことがわかる。そのため実器の PD 試験においては、試験時間や検出感度に制約があるため、過電圧印加による放電遅れ時間短縮と検出感度向上は不適切であると考えられる。以上より、放電遅れ時間の短縮のために、放電開始のトリガとなる初期電子の生成を促進する手法である放射線量の増加が有効であると考えられ、印加する放射線量によって大幅に制御できることが示唆された。しかしながら、印加電圧を上昇させるとボイドに印加される電界が上昇し、初電子供給メカニズムとして、ボイド壁からの電界放出による電子供給など電界に強く依存する機構を考慮する必要があるが出てくる。また、エポキシ樹脂内に残るボイド気体のガス圧力も、放電開始電圧、放電遅れ時間や放電電荷量に密接に影響を及ぼす。これらについては、今後の実験と検討により、本報告の解析結果と比較・検討を行う予定である。

4-5 エポキシ樹脂中ボイド内放電における X 線照射効果

4-5-1 実験方法

特にボイド欠陥を含む固体絶縁システムにおいて、放電遅れを大きく減少させるために初期電子を発生させる強力で有効な手段として、X 線照射技術がよく知られている。実験は、PDIV 特性についてエポキシ樹脂に対する X 線照射効果を調査することを目的としている。試験試料はエポキシ樹脂を加工して球状ボイドが含まれている。試料の厚さは 4 mm で、ボイドの直径は 2 mm である。また、真鍮製の平行平板円盤状電極の間に試料を挿入して、この電極系は沿面放電抑制の観点から液体絶縁材に浸した（フロリナー）。図 4-7 は交流高圧電源として変圧器(200 V/50 kV)を含んだ実験装置を示している。X 線モジュール(松定プレシジョン(株)製, XM10-60-5, 最大出力 10 W, 管電圧 10~60 kV, 管電流 33~166 μ A)は、X 線が発生させるために使用し、モールド電極の平行平板電極に対して平行に内部のボイドへ向けて照射を行う。電圧昇圧方法はステップ方式であり、PD 開始電圧(PDIV)を決定するために用いて、1kV 昇圧 10 秒ホールドとした。PD が発生後、電圧は PD 消滅電圧(PDEV)を測定するために同じ割合の速さで減少させた。本実験は、試料における PDIV と PDEV を決定するために行っており、X 線モジュールの出力を変えることにより X 線照射の効果を確認した。

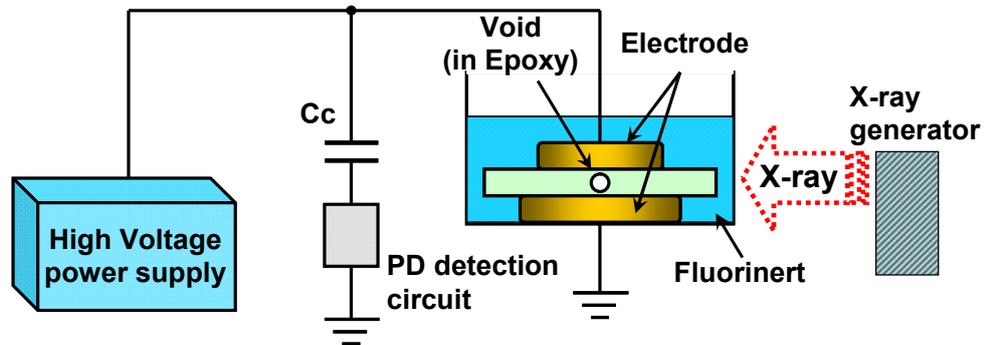


図 4-7 X 線照射実験模式図

4-5-2 X 線照射効果が PDIV および PDEV に与える影響についての結果と考察

図 4-8 は、X 線モジュールの出力を変化させた場合の、PDIV と PDEV 値の X 線出力依存性を示している。ただし X 線照射量の強度は、X 線モジュールに供給された電力(管電流と管電圧値は任意)によって制御されている。同図より、X 線照射なし(X 線モジュール出力が

0 W) の場合は PDIV と PDEV の両方が 19 kV であった。X 線モジュール出力(試料に照射された X 線照射強度)の増加に伴い、PDIV と PDEV の両方が減少していることがわかる。特筆すべきは、X 線照射によって PDIV および PDEV 値が減少し、X 線モジュール出力の増加とともにバラツキも減少することである。さらにはモジュール出力を増加させることで PDIV および PDEV 値が底打ちする飽和傾向も示された。この実験結果は、X 線照射によって引き起こされた直接的なイオン化およびボイド壁面からの電界放出によって、ボイド空間へ初期電子が促進されたと解釈できる。

また、図 4-9 は Pedersen および安井の両モデルの Q_a-2a 特性 (片対数表示) に、図 4-8 に示した実験結果をプロットしたものである。図中のシンボル (○および△) は実験結果をプロットしたものであり、12 回の測定の中の放電電荷量の最大値 $Q_{a \text{ Max}}$ と平均値 $Q_{a \text{ Ave}}$ を表している。同図より、二層誘電体モデルの曲線に近い値が得られたためボイド内放電の物理モデルとしては二層誘電体モデルの方がより妥当であると考えられる。

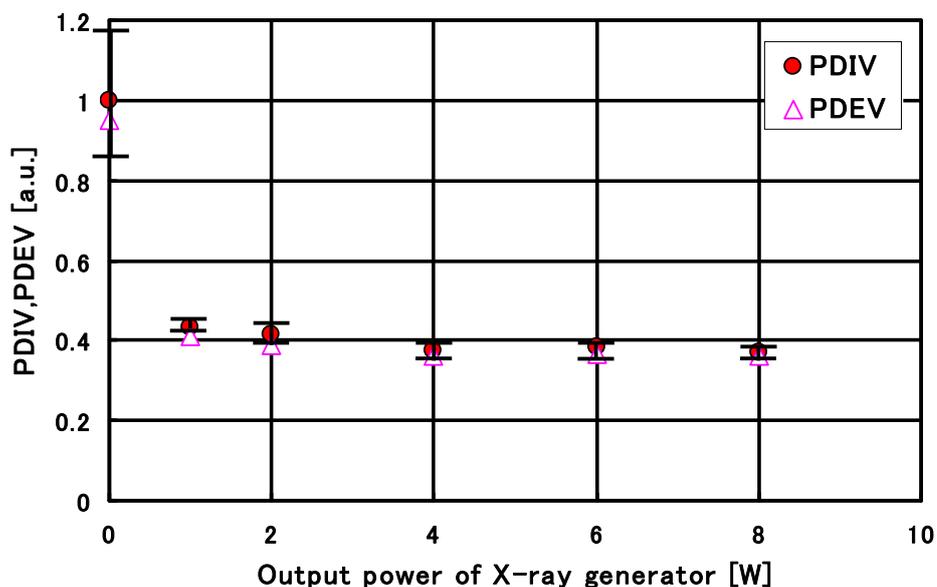


図 4-8 PDIV/PDEV と X 線出力の関係

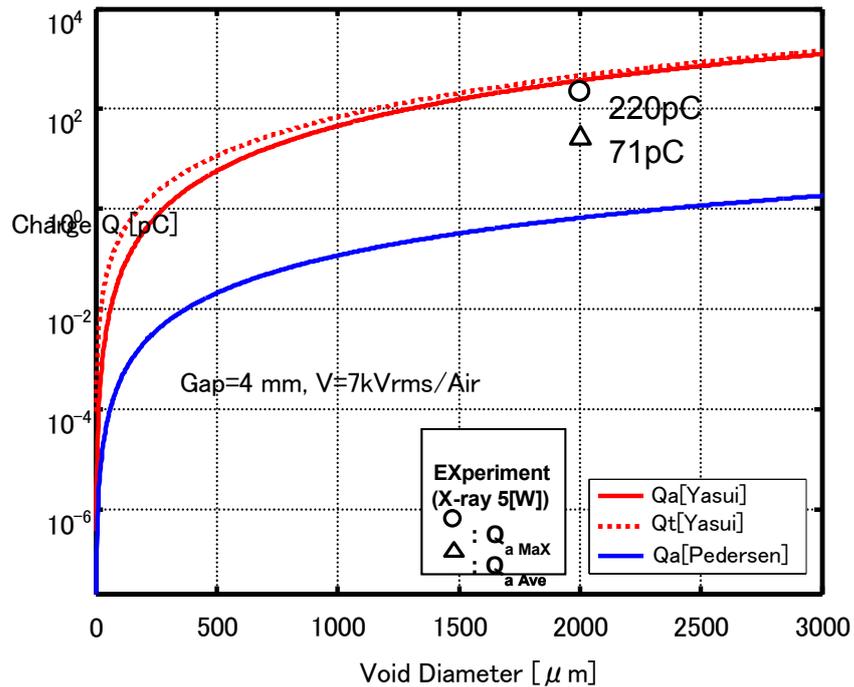


図 4-10 Q_a-2a 特性 (安井, Pederson モデル) と実測値

(gap = 4 [mm], V = 7 [kVrms], $2a = 2$ [mm])

このことから、実際の工場出荷前試験において X 線照射により放電遅れを解消し、かつ過電圧のかかっていない状態での放電電荷量を取得できる可能性が示され、より妥当な二層誘電体モデルの曲線を用いることで放電電荷量の実験値がボイドのサイズを推測するための一つの要素となると考えられる。

4-6 まとめ

本章では、実際のモールド変圧器の絶縁エポキシモールド中に存在するボイド PD 特性 ($Q_a - 2a$ 特性) を、Pedersen および安井らの理論を用いて比較・検討を行った。ボイド表面に誘起された電荷が放電により消散する際の電極間の電圧低下 ΔV と絶縁システムの静電容量 C との積で表わされる見掛けの放電電荷 Q_a について両モデルの相違と違いについて検討した。その結果、二層誘電体モデルでは消失する電荷量が表面電荷モデルと比較して相対的に多くなるので、 ΔV がより大きくなり、結果として二層誘電体モデルの方が、表面電荷モデルよりも大きな Q_a となると解釈された。

さらに、ボイド内 PD を考慮する上で重要となる Niemeyer らの放電遅れ時間の理論から、

ボイドサイズと放電遅れ時間の関係($t_{inc} - 2a$ 特性)を検討した。実験は、特定のサイズの人工的なボイドを含むエポキシ樹脂についての、PD 開始電圧(PDIV)を得るために行った。ボイドを含むエポキシ樹脂試料への X 線照射量の増加に伴い、PDIV および PDEV 値の両方が減少することがわかった。

第4章の参考文献

- (1) G. C. Crichton, P. W. Karlsson and A. Pedersen : “Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids” , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, pp. 335-342 (1989)
- (2) S. Whitehead: “Dielectric Breakdown of Solids” , Clarendon Press. Oxford (1951)
- (3) 安井貞三, 山田有一 : 「球状ボイド内放電の理論計算と実験」, 住友電気, 第 94 号, pp. 36-50 (1966)
- (4) F. Gutfleisch and L. Niemeyer : “Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids ” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp. 729-743 (1995)
- (5) 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)
- (6) 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, Potsdam, Germany, July 4-9, E2-04 (2010)
- (7) 岡本達希, 高橋俊裕, 宮寄悟, 倉石隆志: 「積分方程式による非対称電極系における部分放電特性解析」, 第 41 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集, S1-2, (2010)

第5章 X線照射によるエポキシ樹脂中の球状ボイド内放電と

ボイドサイズ推定方法の提案

5-1 まえがき

固体絶縁システムを採用しているモールド機器では樹脂-導体等の様々な界面が存在し、ボイド・剥離等の欠陥が絶縁システム中に内在すれば、絶縁性能の低下に至る恐れがある。そのため製造プロセスで欠陥を排除するとともに、欠陥を検出することが重要とされる。モールド変圧器においてはこれらの微小欠陥の検出技術はまだ経験的な技術に頼っている部分が多く、理論的な技術確立には至っていないのが現状である。初期のモールド機器は、既に実フィールドで運転を開始後 30 年程度が経過し、その健全性の確認手段の確立とその精度の向上は喫緊の課題とされている。このことから、絶縁物中のボイド等の欠陥を、製造過程および運転中に如何に検出出来るかが機器の信頼性を確保する上で重要になりつつある。以上の観点より、本研究では絶縁診断・絶縁設計・試験状態等の幅広い観点から、部分放電制御・検出技術の抜本的な改革を目指している。

本研究では、これまでエポキシ樹脂による固体絶縁システムに人工的な密閉ボイドを製作して、同ボイド内における基本的な部分放電 (PD ; Partial Discharge) 挙動の解明を目指しており、本研究では放電開始時の初期電子の不足に起因する放電遅れを考慮しながら、形状が明確な人工的なボイドを有するエポキシ樹脂絶縁システムに対して X 線照射を行い、その効果を検討している^{(1) - (4)}。本章では、様々なサイズの人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電挙動の諸特性(ボイドサイズ-放電開始電圧, ボイドサイズ-放電電荷量, 位相特性等) について調査を行った結果を述べる。さらに、これまでに実施している理論的検討を応用して本実験結果を検討し、実際のモールド機器の出荷前試験を想定した欠陥 (ボイド) サイズ推定手法の提案を行う。

5-2 電極構成と測定系

本実験では、全体をエポキシモールドした平行平板電極間に人工ボイドが内在する電極系を使用している。使用したエポキシモールド電極試料 (以下、モールド電極と呼称する) の作製方法を以下に示す。

エポキシ樹脂は、主剤 (三菱化学株製, エピコート 816B) および硬化剤 (三菱化学株製, エピキュア 113) を混合した。なお, エピコート 816B はビスフェノール A 型液状エポキシ

樹脂（エポコート 828）を反応希釈剤で低粘度化したものである。以下、試料の作製に用いたエポキシ樹脂は十分に混合・真空脱泡を施している。硬化前のエポキシ樹脂中に注射器を用いて種々のサイズの気泡（ボイド）を作り、硬化させる。硬化後、電動カッターを用いてボイドの周囲を微小なブロック状に裁断し、ボイドブロックを作製する（図 5-1(a)）。作製したボイドブロックを平行平板電極の片方にエポキシ樹脂で接着する（図 5-1(b)）。この際に、接着作業中にボイドブロックと電極との間に新たな気泡または空隙が生じないように十分に注意を払った。接着後、ブロックを接着した電極と新しい電極との一組の平行平板電極系を金型にセットして、同じエポキシ樹脂を注型・脱泡を行い、全体をエポキシモールドする。硬化後に金型から取り出し、完成（図 5-1(c)）となる。完成したモールド電極は、金属電極には真鍮製の円盤状（直径 25 mm）平行平板電極を用いており、電極間ギャップ g は 3 mm である。なお本実験に用いた試料のボイドサイズ（直径 $2a$ ）は、0.21 mm, 0.29 mm, 0.49 mm, 0.61 mm, 0.65 mm である。ボイドサイズは顕微鏡を用いて 0.01 mm の精度で測定している。

電極系および測定系構成の回路図を図 5-2 に示す。実験装置は主に、モールド電極試料、測定系、X 線源で構成されている。電源は、商用電源 200 V から変圧器で昇圧し 30 kVrms まで印加できる。変圧器から 20 k Ω の制限抵抗を経由し、試料の電極の高圧側に接続している。試料と並列に結合コンデンサ（1000 pF）を設置し、接地との間に検出インピーダンス DI-21（株式会社計測器製造所製）を挿入して、この両端に発生するパルス電圧を 400 kHz 同調式部分放電測定器 CD-6（株式会社計測器製造所製）により増幅し、PD パルス信号としてオシロスコープ（レクロイ・ジャパン株式会社製, WaveSurfer 62Xs-A, 2.5 GS/s, 600 MHz）にて収録する。試験中のモールド電極周囲の沿面放電防止の観点から、液体絶縁物フロリナート中に電極全体を浸している。また、密閉ボイド空間における放電現象については、放電開始のトリガーとなる初期電子が欠乏しているため放電開始遅れが生じることが知られている。そのため本研究では、ボイド内における放電形成のために十分な初期電子を供給することを目的とした X 線照射を行っている。照射方向は、図 5-2 に示すようにモールド電極の平行平板電極に対して平行に内部のボイドへ向けて照射を行う。なお、X 線管の照射口からボイドまでの距離は 60 mm とした。印加電圧波形は 1/2000 高圧プローブ（パルス電子技術株式会社製, EP-50K）を用いて観測した。X 線源は、X 線モジュール（松定プレジジョン株式会社製, XM10-60-5, 最大出力 10 W, 管電圧 10~60 kV, 管電流 33~166 μ A）を使用しており、駆動電源は DC 24 V である。

5-3 実験方法

交流信号発生器（株式会社エヌエフ回路設計ブロック製, WF1974）により, 商用周波数 60 Hz の正弦波交流を 10 mVrms/sec. の昇圧速度で出力し, 電力増幅器（株式会社エヌエフ回路設計ブロック製, 4520A）および変圧器を介して試料に電圧を印加した（図 2 参照）。なお, 電圧印加と同時に X 線モジュール（XM10-60-5）からの X 線照射を行い, オシロスコープに出力された CD-6 からの PD パルス信号を取得する。X 線モジュールの出力は 5 W とし, 全ての実験において照射を行っている。電圧印加開始後, PD 開始電圧（PDIV ; PD Inception Voltage）まで昇圧し, 閾値（検出感度 5pC）を超えた瞬間の PD パルス発生時における PDIV 値および放電電荷量 q_a を測定した。この過程を 12 回繰り返し, 最大値および最小値を除く 10 点で統計処理を行った。なお, 本実験の検出感度は 3pC 以上である。

5-4 実験結果

実験の際に CD-6 により検出されたオシロスコープでの放電波形の一例を図 5-3 に示す。さらに, X 線の照射効果を確認するためにモールド電極試料を供試物とした。X 線の照射と未照射の場合の PDIV を比較した。これを図 5-4 に示す。なお同図では X 線源の出力を増加させることで, PDIV 値の X 線源出力依存性に着目してまとめている。同図より, $2a = 0.29 \text{ mm}$ のボイドにおいては, X 線源の出力は 2 W でも十分な効果があることがわかる。

5-4-1 部分放電発生位相特性

観測されたボイド内 PD について, PD の発生位相の分布と見かけの PD 電荷量 q_a を, ボイドサイズに応じてそれぞれ図 5-5 にまとめて示す。

なお, 取得データはオシロスコープで測定する際に, 閾値を超えた瞬間のフレーム内（サンプリング時間 : 0.1sec）で観測された PD パルスについて, 12 回の測定で得られた全てのパルスを表示している。放電現象は確率事象であるために, 図中の q_a を示す要素の総数は種々のボイドサイズにおいて必ずしも一致するとは限らず, それは図 5-5 から確認できる。同図から, ボイドサイズの増加に伴って PD 電荷量が増加し, PD 発生頻度も上昇する傾向がわかる。また, いずれのボイドサイズにおいても PD 発生位相が印加電圧波形のピーク値（ 90° および 270° ）付近に集中していた。

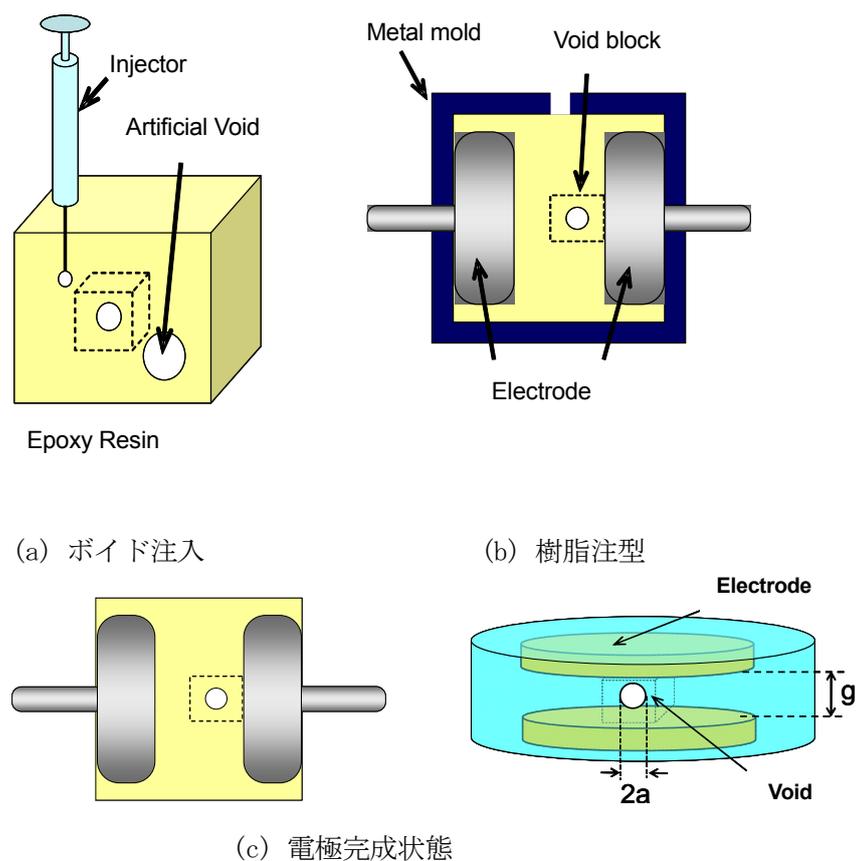


図 5-1 樹脂注型されたボイド残存電極の作製方法

5-4-2 部分放電開始電圧および放電電荷量

観測されたボイド内 PD について、PD 開始電圧および PD 電荷量 (q_a) のボイドサイズ (直径 $2a$) 依存性を図 5-6 に示す。なお PD 電荷量については、PDIV 時の一発目の PD パルスについて、試験 12 回分の測定結果 (最大値および最小値を除く計 10 点) を統計処理している。PD 電荷量 q_a はボイドサイズが大きくなるにつれて指数関数的に増加し、PDIV 値についてはボイドサイズが大きくなるにつれて低下する傾向が見られた。なお、ここでは点線で近似曲線を表している。

5-5 考察

3 節にて示した実験結果を踏まえると、X 線照射下、すなわち放電開始のトリガーとなる初期電子が豊富に供給されていると考えられる状況下において、密閉ボイド空間内での PD はボイドサイズが変化すると PDIV および見かけの PD 電荷量 (q_a) が変化していた。以下

にこれら実験結果を検証する。ここで、図7に示すように閾値を超えた瞬間のオシロスコープで検出される1フレーム内におけるいくつかのPDパルス信号のうち、 n 番目のPDパルス P_n とその次のパルス P_{n+1} 間の位相差を $\Delta\phi_{n, n+1}$ と定義する。

5-5-1 X線照射下でのPD開始位相

取得したデータ(図5-5参照)のうち、閾値を超えた瞬間の1フレーム中に複数個検出されたPDパルス(12回の測定分)について、PD発生位相 ϕ とボイド直径 $2a$ の関係をまとめたものが図5-8である。特に、各ボイドサイズにおける1フレーム中の放電開始から三発目までのPDパルス P_1, P_2, P_3 の発生位相の関係について示しており、各パルスは印加電圧波形1周期($-180^\circ \sim 180^\circ$)のうちどの位相で発生したかを示している。いずれのボイドサイズについても、閾値を超える瞬間のPD(P_1)発生位相は電源波形のピーク値(90° および 270° (-90°))付近に集中していることがわかる。これはX線照射下であることから、十分に初期電子がある状態であり、ボイド両端の電位差がPDIVに達した瞬間に直ちに放電が形成しているためであると考えられる。1番目のPDがピーク値付近に発生した後、2番目のPDは逆方向の電界がかかった直後のゼロクロス(180°)近傍で発生するが、3番目のPDについては1番目の位相を踏襲して、印加電圧波形のピーク近傍で発生する傾向にある。実験で観測された波形のうち各周期中に2発の放電パルスが周期的に検出されている場合(図5-3参照)には、1発目のPDパルスから数えて奇数番目のパルスの多くは先述したように踏襲する傾向を示していた。このことから、1周期中の2発のPDパルスで一組完結の、一連の放電発生現象が存在することが示唆される。

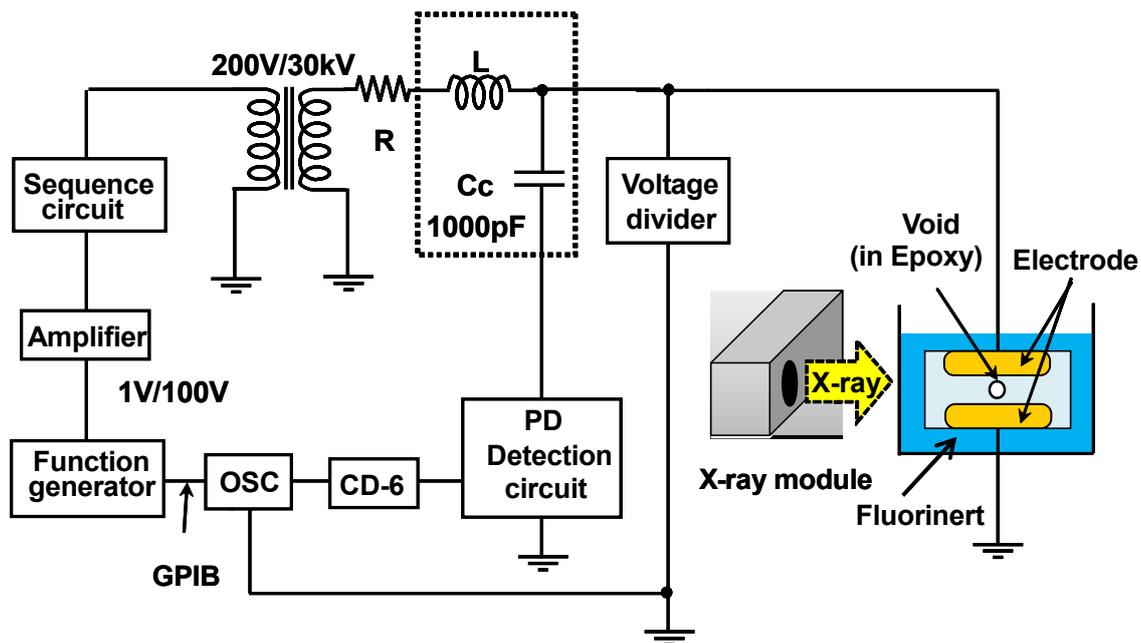


図 5-2 計測回路

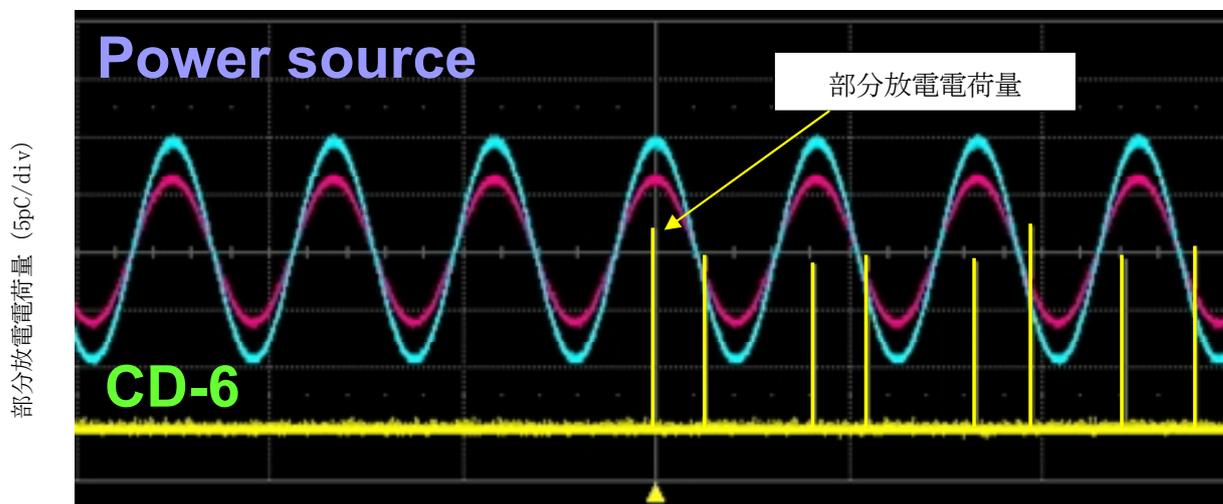


図 5-3 $2a = 0.65 \text{ mm}$ のボイド内在時の部分放電検出波形 (5 pC/div, 20 ms/div)

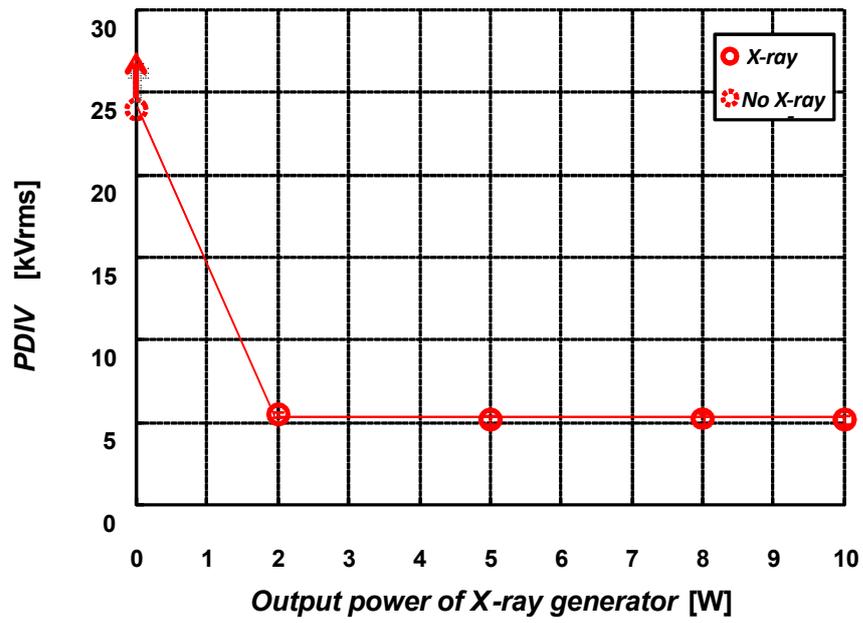
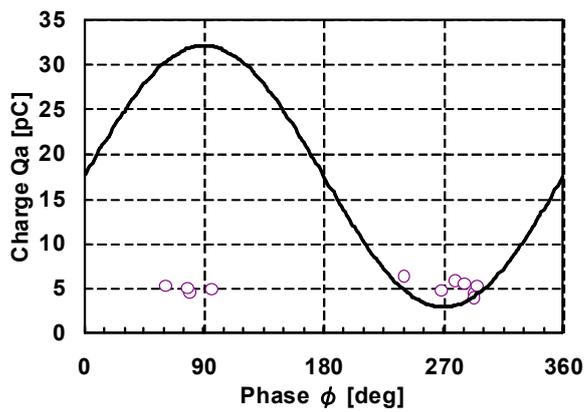
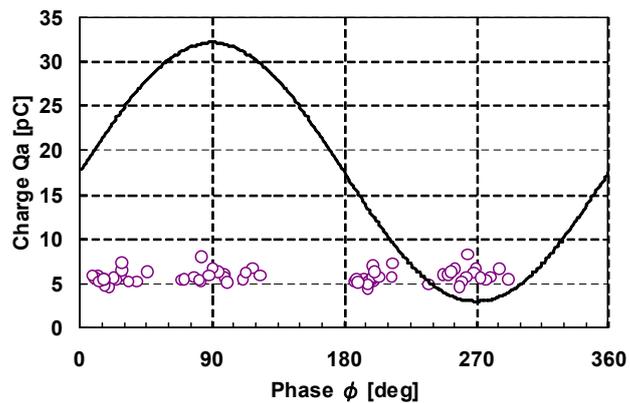


図 5-4 X線出力と部分放電開始電圧の関係 ($2a = 0.29$ mm)



(a) $2a = 0.21$ mm



(b) $2a = 0.29$ mm

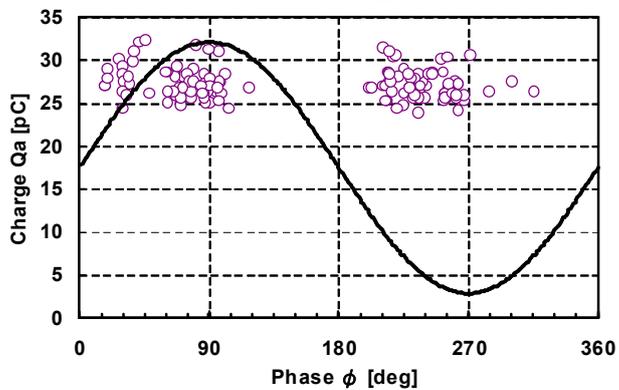
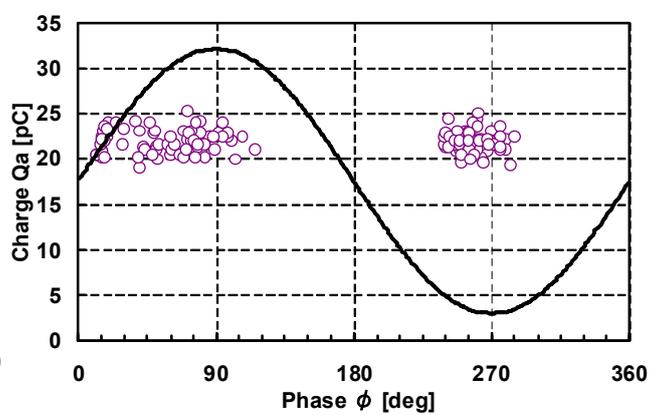
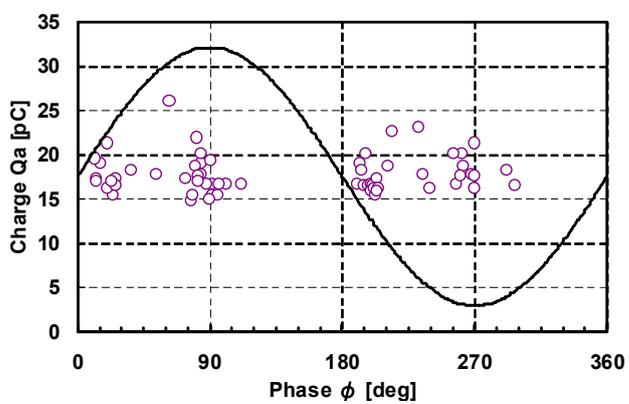


図 5-5 ボイドサイズ別 ϕ - q パターンの変化

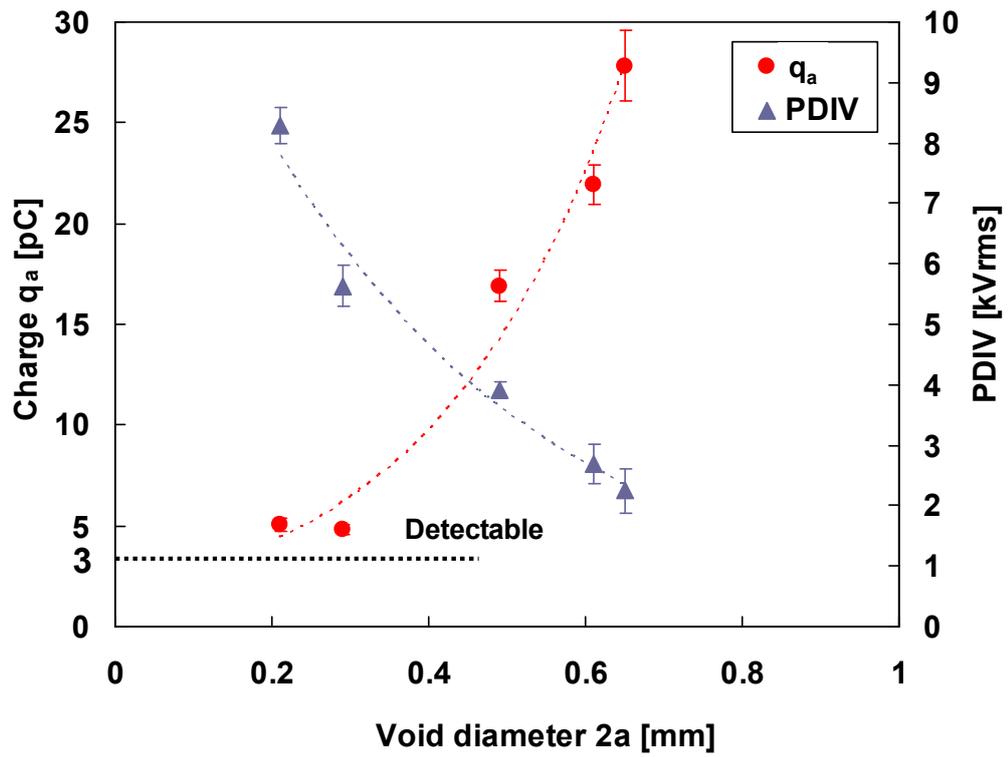


図 5-6 ボイドサイズ別部分放電開始特性

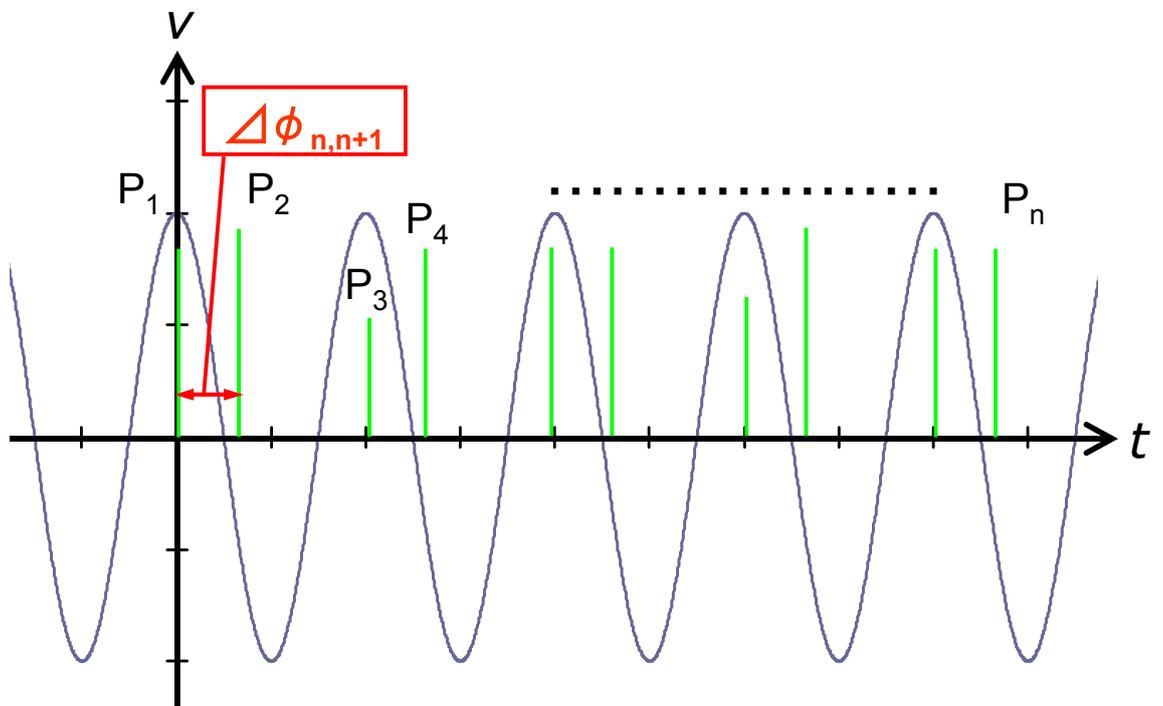


図 5-7 $\Delta\phi_{n,n+1}$ の定義

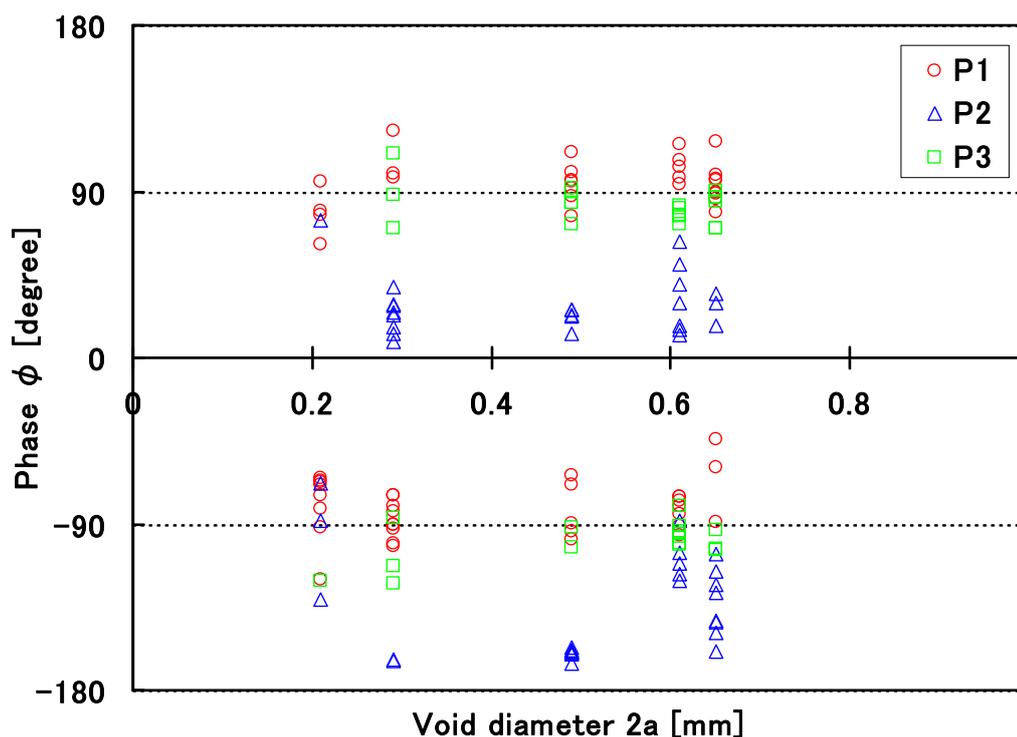
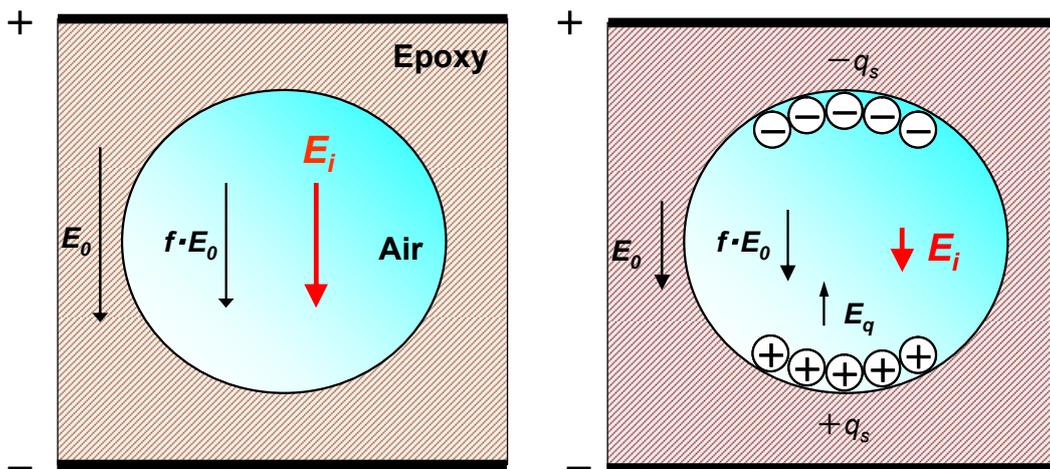


図 5-8 ボイドサイズ別位相特性 ($\phi - 2a$)

5-5-2 放電開始メカニズム

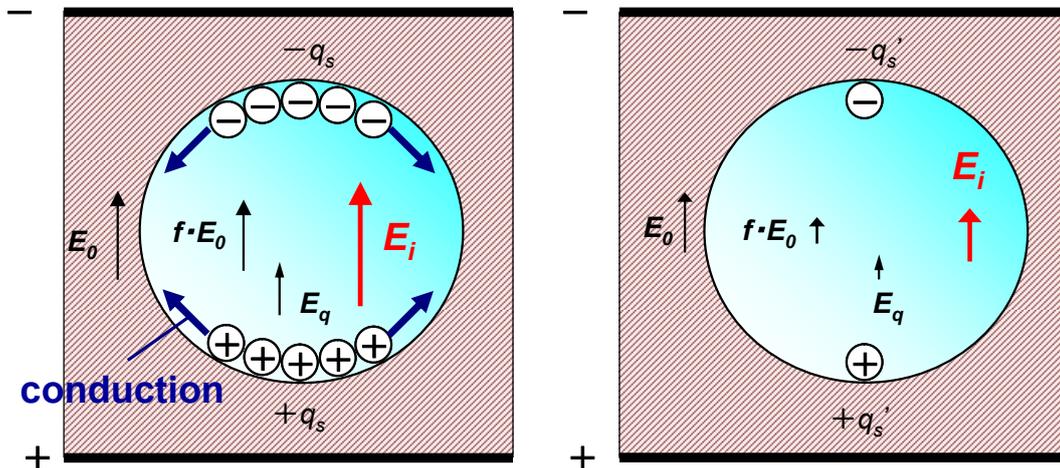
通常の固体誘電体中のボイド放電では、一発目の放電が発生した際にボイド表面に電荷が蓄積され、二発目の放電は外部電界が逆向きに最大になる前に放電が発生する。これは、蓄積電荷が作るボイド内の電界に対して逆向きに働き始めた外部電界が重畳することで、ボイド両端の電界が放電開始電界に達するために、結果的に放電が発生するものであると認識されている^{(5) - (7)}。

本実験の場合は X 線照射を行うことで十分な初期電子が供給できているため、過電圧印加とならずにボイド内 PD が放電開始電界に達した瞬間に開始されていると考えられる。しかしながら 5-4-1 項で前述したように、三発目の PD 発生位相は一発目の位相を踏襲して電源波形のピークとなり、二発目の PD による蓄積電荷の影響がみられない。このような 1 周期中の正負 2 発の PD パルスで一組完結の、一連の PD 発生現象 (X 線照射下) について、図 5-9 に示す略図を用いて以下のように考える。



(a) 一発目の部分放電前

(b) 一発目の部分放電後



(c) 二発目の部分放電前

(d) 二発目の部分放電後

- E_0 : Background field
- f : Field enhancement factor
- q_s : Accumulated charge
- E_q : Field due to accumulated charge
- E_i : Field inside void

図 5-9 部分放電発生前後の電荷蓄積メカニズムモデル

ボイド内の平均電界が外部電界 E_0 と電界強調因子 f との積 $f \cdot E_0$ と、蓄積電荷による電界 E_q との和が放電開始電界 E_c に達した瞬間に発生する。

$$f \cdot E_0 + E_q = E_c \quad \dots \dots (1)$$

一発目の放電では前荷電によるボイド表面の蓄積電荷の影響がなく、ボイド内電界が放電開始電界 E_c に達した瞬間に直ちに放電が開始される。また X 線の照射による豊富な初期電

子供給のため、電源波形のピークにて放電が開始される。この時ボイド内の平均電界 E_i は、外部電界 E_0 と電界強調因子 f との積に等しい (図 5-9(a))。最初の PD 発生後、ボイド表面に電荷 $\pm q_s$ [C] が蓄積され、双極子配列が起こり、ボイド内に電界 E_q が形成される (図 5-9(b))。これにより、外部電界が逆向きに印加されると引き続き放電が起こる (図 5-9(c))。ここで電極上の蓄積電荷およびボイド表面の電荷の一部は放電時のエネルギーとして放出され、電極間の電位差が減少する。

ここで本実験結果を見ると、三発目の放電発生位相が一発目の位相を踏襲することから、X 線照射下におけるボイド放電では二発目の放電発生直後の放電由来の電荷蓄積がほとんどないと推測できる (図 5-9(d))。これにより、二発目の放電直後はボイド蓄積電荷による電界 E_q が小さいために、外部電界 E_0 との和が放電開始電界 E_c に達することなく、外部電界が逆向きに印加されるまで放電が開始しないものであると考えられる。今後はロングメモリでの測定を行い、放電開始後の各パルス位相についてさらなる解析を行う必要がある。

5-6 ボイドサイズ推定方法の提案

上記の実験結果および考察を踏まえて、本研究では固体絶縁機器の PDIV 試験において固体絶縁システム中に内在する未知のボイド欠陥に関する情報を精度よく取得し、かつ機器の信頼性についての的確に判断するための方法を検討する。以下にボイドサイズ推定法の原理を示す。なお本章では X 線照射下であることを前提とする。

【手法-1】

(1) 外部電界 E_0 よりボイド内電界 E_i の計算

試験中に図 5-10 のような放電パルスが観測されたとする。一発目の放電の際の瞬時値 V_{P1} を求める。

(2) パッシェン則を用いたボイドサイズの推定

次に、ボイドの形状を球、ボイド内の気圧を 0.1 MPa と仮定する。求めた瞬時値 V_{P1} を破壊電圧とみなしパッシェン曲線を用いる。これにより該当する pd 積が導出できるため、圧力 p は既知としてボイド直径 d を推定する。

例えば、図 5-10 では $V_{P1} = 3,800$ V_{peak} であり、この電圧がボイド両端にかかると仮定すると、図 5-11 に示すように文献から引用したパッシェン則⁽⁸⁾に照合して常温常圧下で計算すると、 $2a = 0.70$ mm と推定できる。実際はボイドにかかる分担電圧はこれよりも小さ

いので、ボイド直径 $2a$ の推定値はこの値よりも小さくなると考えられる。

【手法-2】

本章で上述したように、1 周期中の正負 2 発の放電パルスで一組完結の、一連の放電発生現象が存在すると考えられる。三発目の放電発生位相が一発目の位相を踏襲することから、X 線照射下におけるボイド放電では二発目の放電発生直後の放電由来の電荷蓄積がほとんどないと推測できる。この考え方に基ついた推定手法を以下に述べる。

(1) 見かけの放電電荷量の測定

試験中に図 5-10 のような放電パルスが観測されたとする。一発目および二発目の放電電荷量 q_{a1} , q_{a2} を測定する。また、PDIV 値から一発目の放電の際のボイドの外部電界が計算できる。実器においては把握できるギャップにおいて適用し電界値を計算する。

(2) 外部電界 E_0 よりボイド内電界 E_i の計算

ボイドが球状であると仮定すれば（このとき形状パラメータ K は 1 である）、ボイド内電界 E_i は外部電界 E_0 の電界強調因子 f （球状ボイドの場合 $f = 4/3$ ）倍であることから求めることができる。（エポキシの比誘電率 $\epsilon_r = 4$ ）

(3) 真の放電電荷量 q_r の導出

一発目および二発目の放電電荷量 q_{a1} , q_{a2} を用いて、真の放電電荷量 q_r を導出する。ここで一発目の放電による真の放電電荷量 q_r は、①見かけ放電電荷量として観測されるものとそれ以外で②ボイドへ電荷蓄積されるもの、③ボイド内壁面での表面伝導による再結合で消滅する電荷 q' の三つに分かれること、その後の二発目に蓄積電荷のほとんどが消散されることを考慮すると、以下の式(2)が成り立つと考えられる。

$$q_r = q_{a1} + q_{a2} + q' \quad \dots \dots (2)$$

ここで本章におけるボイド放電は、一発目の放電後にボイド壁面に電荷蓄積が起り、二発目の放電で蓄積電荷のほとんどが失われることで、1 周期中の正負 2 発の放電パルスで一組完結の、一連の放電発生現象が存在すると考えている。

(4) 理論式⁽⁵⁾によるボイドサイズの推定

求めたボイド内電界 E_i の大きさを放電開始電界 E_c として、求めた放電電荷量 q_{a1} , q_{a2} を理論式に代入することで、ボイドサイズが導出できる。理論式を下記に示す。

$$q = -K\Omega\epsilon\left(\vec{E}_i - E_c\right) \cdot \vec{\nabla} \lambda_0 \quad \dots \dots (3)$$

$$E_i - E_i = \frac{BE_i}{\sqrt{2ap}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 K : 形状パラメータ, \dots : ボイドの体積[mm³], E_i : この電界以下に達すると放電が止まる電界, すなわち電離成長が停止する臨界電界[V/m], \dots : ラプラス方程式を満たす無次元の電界変化パラメータ, B : 気体特性を示す定数[Pa/m]^{1/2}, a : ボイド半径[m], p : 気体の圧力[Pa]である。

例えば, 図 5-10 において, ボイド表面伝導で消滅する電荷 q' を考慮せずに上記の手法を適用すると, 求めるボイド直径は $2a = 108 \text{ mm}$ が導出される。この結果は実際のボイド径 0.65mm と大きく異なる結果となった。これはボイド内での部分放電現象の過程でボイドの表面電荷の伝導により消滅する電荷量 q' の影響が大きいためと考えられる。

以上の手順を踏むことで, ボイドサイズの推定が可能となると考えられる。これら推定法で導出したボイドサイズは, いずれの手法においても実際の値と異なる結果となった。その要因は, いくつか仮定したパラメータにあると考えられる。ボイドの形状の識別とその特性の違いの把握や電荷蓄積を含めたボイド内放電メカニズムの解明(放電形態の調査, 放電開始の定義等), X線照射量と放電電荷量の関係等について今後更なる調査が必要である。

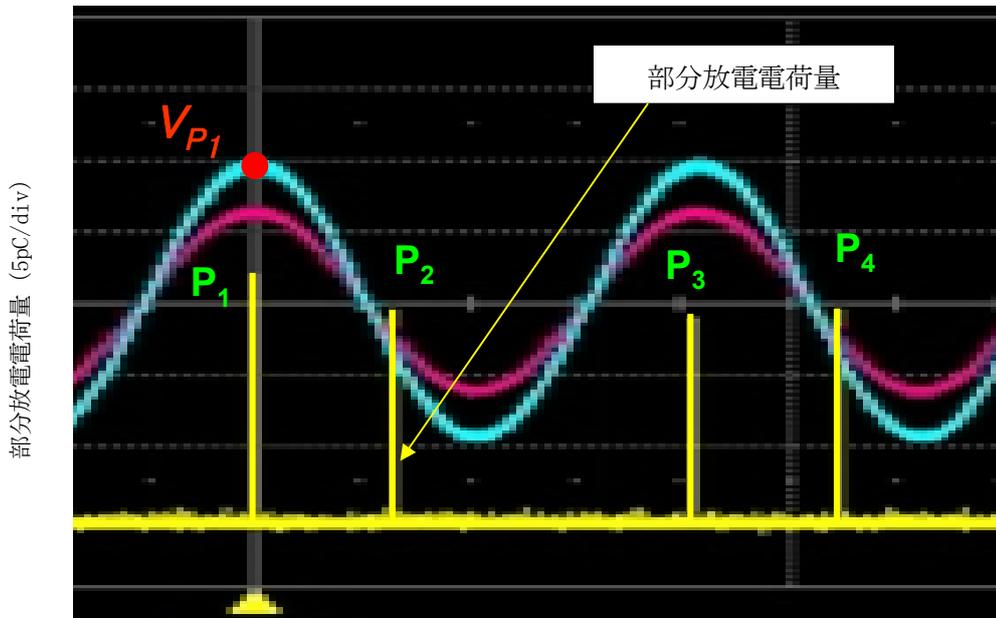


図 5-10 部分放電検出波形例 ($2a = 0.65 \text{ mm}$, 2kV/div (H. V. Div), 5pC/div , 20ms/div)

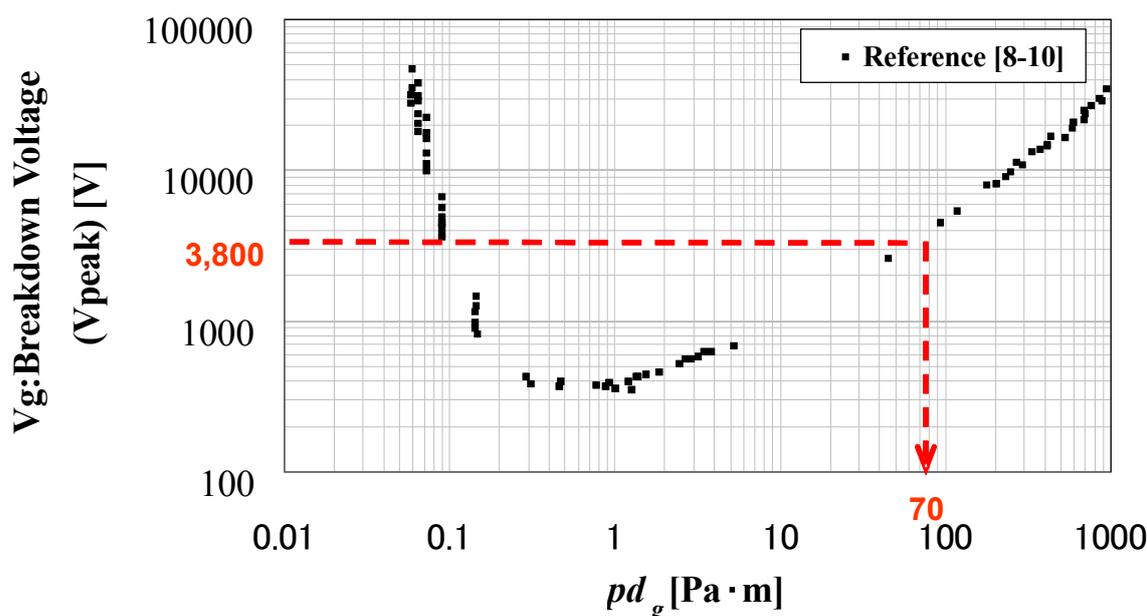


図 5-11 種々の気体における部分放電開始電圧（平行平板電極）^{(8) - (10)}

5-7 まとめ

本章では様々なサイズの人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電挙動の諸特性について報告した。さらに、これまでに実施している理論的検討を応用して本実験結果を検討し、実際のモールド機器の出荷前試験を想定した欠陥（ボイド）推定手法の原理を述べた。

本研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 全体をエポキシモールドした平行平板電極間に人工ボイドが内在する電極系を用いて X 線照射を行った結果, PDIV が低下し, X 線源の出力が 2 W で十分な効果があることがわかった。またボイド内電界がちょうど放電開始電界 E_c になった瞬間に必ず PD が発生していることがわかった。
- 2) ボイド内 PD について, PD 開始電圧および PD 電荷量 (q_a) のボイドサイズ (直径 $2a$) 依存性を測定できた。0.2 ~ 0.7 mm のボイド直径 $2a$ の試料において, 放電電荷量は 5 ~ 28 pC だった。
- 3) X 線照射時における PD メカニズムを検討した。
- 4) ボイドサイズの推定を行った。

第 5 章の参考文献

- (1) 高田他:「モールド絶縁システム中のボイド径と部分放電電荷量に関する調査」, 第 40 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, D-6 (2009)
- (2) 高田他:「エポキシモールド変圧器中のボイド径と部分放電電荷量に関する研究」, 平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会, 05-2P-03 (2009)
- (3) 高田他:「エポキシ誘電体中ボイド試料の部分放電開始に対する X 線照射効果の検討」, 平成 22 年電気学会全国大会, 1-135 (2010)
- (4) M. Hikita, M. Kozako, H. Takada: “Partial Discharge Phenomena in Artificial Cavity in Epoxy Cast Resin Insulation System”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation (2010)
- (5) G. C. Crichton, P. W. Karlsson and A. Pedersen: “Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, pp. 335-342 (1989)
- (6) 安井 貞三, 山田 有一:「球状ボイド内放電の理論計算と実験」, 住友電気, 第 94 号, pp. 36-50 (1966)
- (7) F. Gutfleisch and L. Niemeyer: “Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp. 729-743 (1995)
- (8) J. M. Meek, J. D. Craggs: “Electrical Breakdown of Gases”, Oxford at the clarendon press (1953)
- (9) 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)
- (10) M. Yumoto, N. Yamaoka and Takao 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)

第6章 X線照射によるエポキシ樹脂中のボイド内放電の位置評定に関する検討

6-1 まえがき

エポキシ樹脂などを用いた固体絶縁システムから構成されるモールド変圧器の絶縁診断技術の確立と高度化を目指す上で、絶縁破壊の前駆現象である部分放電特性を知る必要がある。

本章では絶縁異常を引き起こす原因の一つとされるボイド欠陥に着目し、固体絶縁体中にボイド欠陥を模擬した際の部分放電(PD)特性について検討した。

また、固体絶縁システムを採用する電力機器の、工場出荷前試験及び現地での絶縁異常の早期発見とその検出技術の向上を目的とし、人工球状ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電の際に発生する放射電磁波の測定、形状の異なる円柱ボイドへのX線照射効果について調査を行った内容を述べる。

さらに、これまでに実施してきた基礎的検討を応用して、実器の6.6 kVモールド変圧器での部分放電位置標定試験を行ったのでその結果についても述べる。

6-2 実験装置

本実験の実験装置の配置図を図6.1に、また実験回路図を図6.2に示す。実験装置は主に、モールド電極試料、測定系、X線源で構成されている。電源は、商用電源200 Vから変圧器で昇圧し30 kVrmsまで印加できる。変圧器から20 k Ω の制限抵抗を經由し、試料の電極の高圧側に接続している。試料と並列に結合コンデンサ(1,000 pF)を設置し、接地側電極との間に検出インピーダンス(株)日本計測器製造所製, DI-21)を挿入して、この両端に発生するパルス電圧を400 kHz同調式部分放電測定器(株)日本計測器製造所製, CD-6)により増幅し、PDパルス信号としてオシロスコープ(レクロイ・ジャパン(株)製, WaveSurfer 62Xs-A, 2.5 GS/s, 600 MHz)にて収録する。試験中のモールド電極周囲の沿面放電防止の観点から、液体絶縁物フロリナート中に電極全体を浸した。

また、密閉ボイド空間における放電現象については、放電開始のトリガーとなる初期電子が欠乏しているため放電開始遅れが生じることが知られている。そのため本検討では、ボイド内における放電形成のために十分な初期電子を供給することを目的としたX線照射を行っている。照射方向は、図6.2に示すようにモールド電極の平行平板電極に対して平行に内部のボイドへ向けて照射を行う。なお、X線管の照射口からボイドまでの距離は60 mm

とした。印加電圧波形は 1/2, 000 高圧プローブ（パルス電子技術(株)製, EP-50K) を用いて観測した。X 線源は, X 線モジュール（松定プレジジョン(株)製, XM10-60-5, 最大出力 10 W, 管電圧 10~60 kV, 管電流 33~166 μ A) を使用しており, 駆動電源は DC 24 V である。

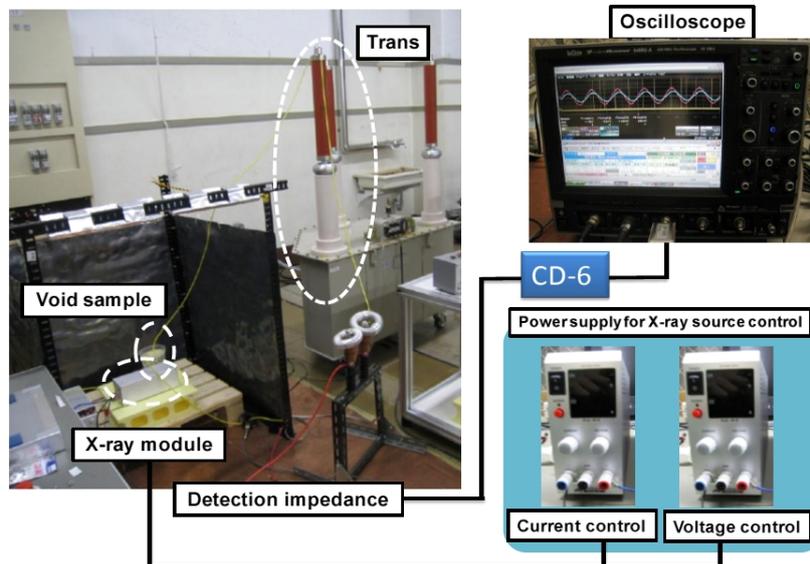


図 6-1 実験装置の配置図

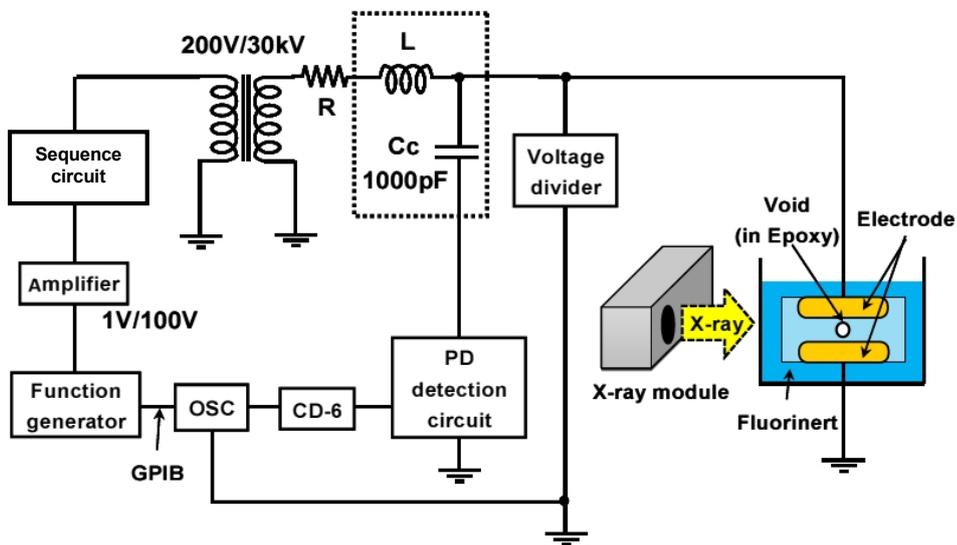


図 6-2 実験装置の回路図

6-2-1 電極構成

本実験では, 全体をエポキシモールドした平行平板電極間に人工ボイドが内在する電極系を使用している。使用したエポキシモールド電極試料（以下, モールド電極と呼称する）

の作製方法を以下に示す。

(1) 球状ボイド試料

エポキシ樹脂は、主剤（三菱化学株製，エピコート 816B）および硬化剤（三菱化学株製，エピキュア 113）を混合した。なお，エピコート 816B はビスフェノール A 型液状エポキシ樹脂（エピコート 828）を反応希釈剤で低粘度化したものである。以下，試料の作製に用いたエポキシ樹脂は十分に混合・真空脱泡を施した。硬化前のエポキシ樹脂中に注射器を用いて種々のサイズの気泡（ボイド）を作り，硬化させた後，電動カッターを用いてボイドの周囲を微小なブロック状に裁断し，ボイドブロックを作製した（図 6-3(a)）。

作製したボイドブロックを平行平板電極の片方にエポキシ樹脂で接着した（図 6-3(b)）。この際に，接着作業中にボイドブロックと電極との間に新たな気泡または空隙が生じないように十分に注意を払った。接着後，ブロックを接着した電極と新しい電極との一組の平行平板電極系を金型にセットして，同じエポキシ樹脂を注型・脱泡を行い，全体をエポキシ樹脂モールドした。硬化後に金型から取り出し，完成（図 6-3(c)）させた。完成したモールド電極は，金属電極には真鍮製の円盤状（直径 25 mm）平行平板電極を用いており，電極間ギャップ g は 3 mm であった。なお本実験に用いた試料のボイドサイズ（直径 $2a$ ）は，0.21, 0.65 mm であった。ボイドサイズは顕微鏡を用いて 0.01 mm の精度で測定した。

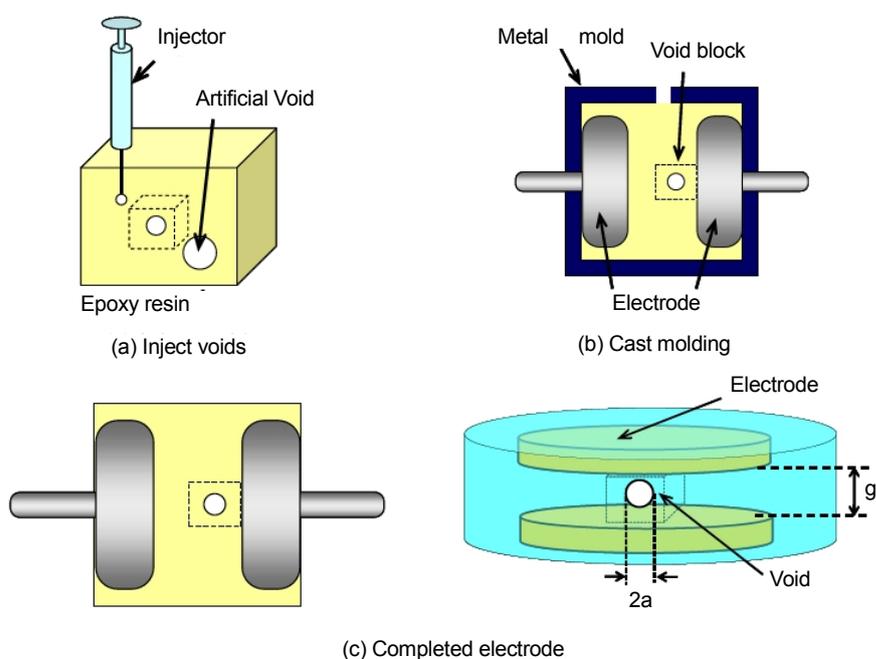


図 6-3 エポキシ樹脂注型電極作製方法

(2) 三枚重ね円柱ボイド試料

エポキシ樹脂は上述と同様のものを用いた。まず、厚さ 1 mm のエポキシ板を作製し、50mm 四方に複数裁断した。その内の 2 枚に直径 1.5 mm と 3.5 mm の円柱状の穴をドリルで空けた。穴の開いた板を穴が開いてないエポキシ板で挟み込み円柱ボイド試料を作製した (図 6-4, 図 6-5 参照)。

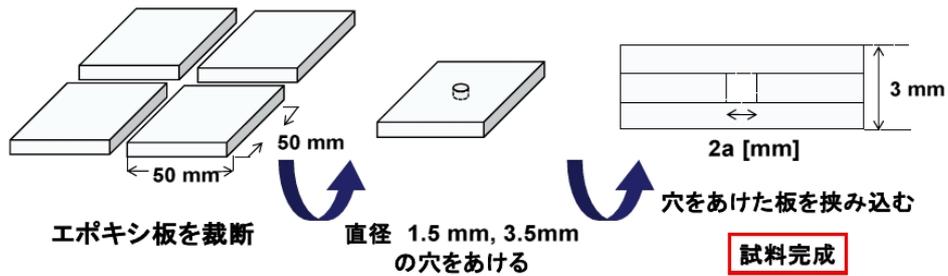


図 6-4 円柱状ボイド試料の作製手順

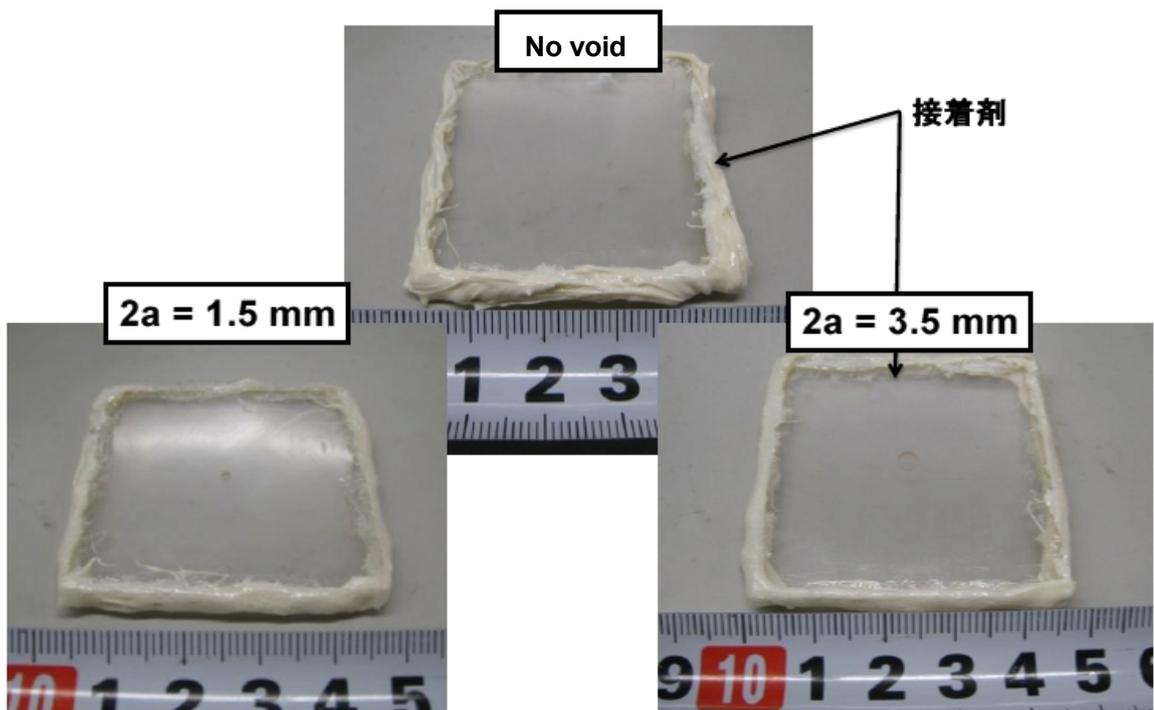


図 6-5 円柱ボイドサンプルの写真

6-2-2 測定系

(1) CD-6&検出インピーダンス

PD の放電電荷量 Q [pC] の測定は、(株)日本計測器製造所製の CD-6 (同調式部分放電計測器)

を用いた。CD-6 は、本実験に用いた検出インピーダンス DI-21(日本計測器製造所製)の両端に発生するパルス電圧を測定器内で増幅し、オシロスコープに出力するものである。また、CD-6 では同調周波数をノイズの影響を受けにくい 400 kHz に設定されており、高感度の PD 測定を可能としている。

(2) オシロスコープ

CD-6 より出力された放電電荷量 Q の測定にはレクロイ・ジャパン(株)製の WaveSurfer62Xs-A デジタルオシロスコープを用いた。アナログバンド幅は 600 MHz, サンプリングは 2.5 GS/s である。ループセンサーを用いた PD 放射電磁波測定の際には Tektronix 製の TDS7254 デジタルオシロスコープを用いた。アナログバンド幅は 2.5 GHz, サンプリングは 4 チャンネル同時使用で 10 GS/s である。

(3) 高圧プローブ

試験用変圧器の印加電圧の波形と PD パルス発生位相の関係を測定するために耐圧 50 kV, 分圧比 2000 : 1 の高圧プローブ(Pulse Electronic Engineering 製, EP-50K)を用いた。

(4) ループセンサー(L. S. : Loop Sensor)

図 6-6 に作製したループセンサーを示す。感光基板(ガラスエポキシ)上にループを作製し、レセプタクルを用いて SMA ケーブル基板をとハンダで接続した構造とした。なお、ループ直径は 10 mm である。

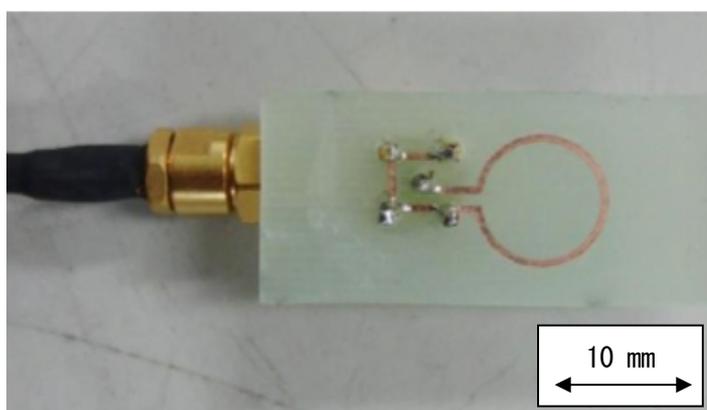


図 6-6 ループセンサーの外観写真

6-2-3 X 線源

試料のボイド空間に十分な初期電子を供給するために、本実験では X 線源を用いて行った。

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 6-7 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, 図 6-1 に示す X 線源用直定プレシジョン製 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 線安全面に配慮し, サーベイメータ((株) アロカ製 TGS-121)を用いて手元で確認しながら実験を行った。



図 6-7 X線モジュールの外観写真

6-3 X線照射によるエポキシ樹脂中球状ボイド内放電位置標定に関する基礎的検討

6-3-1 まえがき

エポキシモールド変圧器のコイル絶縁システムに使用される固体絶縁物は, 製造プロセスにおいて微小なボイドなどの欠陥を技術的に避けなければならない。固体絶縁物内にボイド欠陥が存在すると, その周囲の絶縁物の誘電率よりもボイド内のそれが低いためにボイド内での絶縁破壊強度が低くなり, 部分放電(PD)が発生し易くなる。固体絶縁物が放電にさらされることで, 直接的に侵食されるばかりでなく, 物理的, 化学的に劣化してしまう。

このような劣化が進行すれば, ついには絶縁破壊に至る場合がある。しかしながら, 現状では微小欠陥の検出はまだ経験的な面に頼る部分が多く, 基本理論に基づく技術の確立には至っていない。また, 絶縁物に介在するボイド内での PD は, 放電開始のトリガーとなる初期電子が欠乏しているため, 非常に長い放電時間遅れがあることが知られている。このような放電時間遅れのため, 絶縁物にボイド欠陥があるにも関わらず PD が検出できない可能性があり, 機器の信頼性に大きな影響を及ぼしかねない。そのため, 対象機器に X 線照射を行うことで初期電子供給をし, 放電時間遅れを短くし, PD を誘発させることで未然に欠陥を検出するシステムを検討している。

本節では、人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内 PD により発生する放射電磁波の測定を行ったのでその結果を述べる。さらに、複数のセンサを用いた PD 位置標定に向けた検討についての調査を行った結果を述べる。

6-3-2 実験方法

交流信号発生器（株式会社エヌエフ回路設計ブロック製，WF1974）により，商用周波数 60 Hz の正弦波交流を各試料（ボイド直径 $2a = 0.21, 0.65$ mm）の X 線照射下での部分放電開始電圧（PDIV；PD Inception Voltage）の 1.5 倍の電圧（12.4, 3.36 kVrms）を印加した（図 6-8 参照）。なお，電圧印加後に X 線モジュール（XM10-60-5）からの X 線照射を行い，オシロスコープに出力された CD-6 からの PD パルス信号および 3 つのループセンサ（L.S）からの電磁波信号を取得した。なお，L.S の取得信号はアンプ（Agilent, 0.1-1300MHz, 25dB）およびバンドパスフィルタ（Mini-Circuits, BHP-400+, 395MHz-3.2GHz）を介してオシロスコープに接続した。また，X 線モジュールの出力は 2 W とした。図 6-9(a)にボイド径の違いによる PD 放射電磁波の測定（測定回数 10 回）の実験構成図を示した。同図(b)に PD 信号の到達時間差による位置標定試験（測定回数 30 回）の実験構成図を示した。ボイド-L.S 間距離を d とする。例えば，ボイド-L.S 1 間の距離を d_1 として表記した。

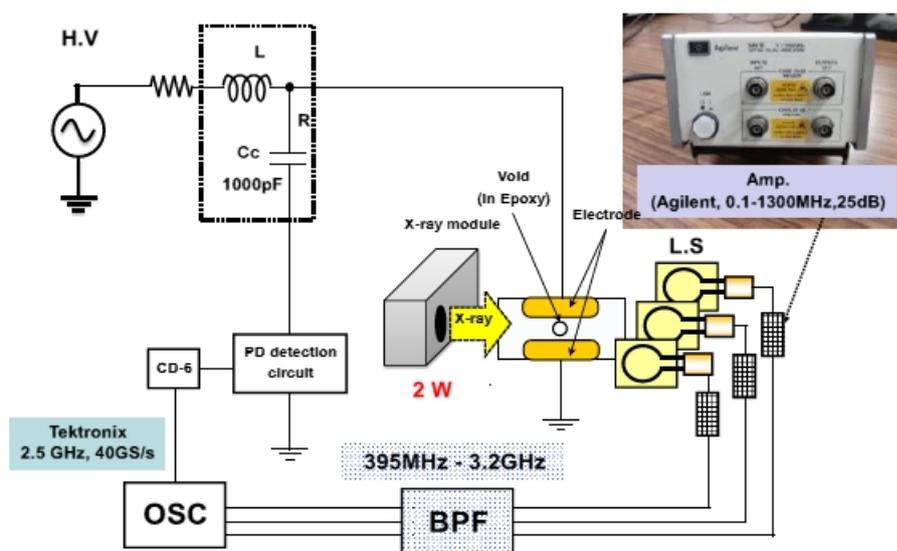
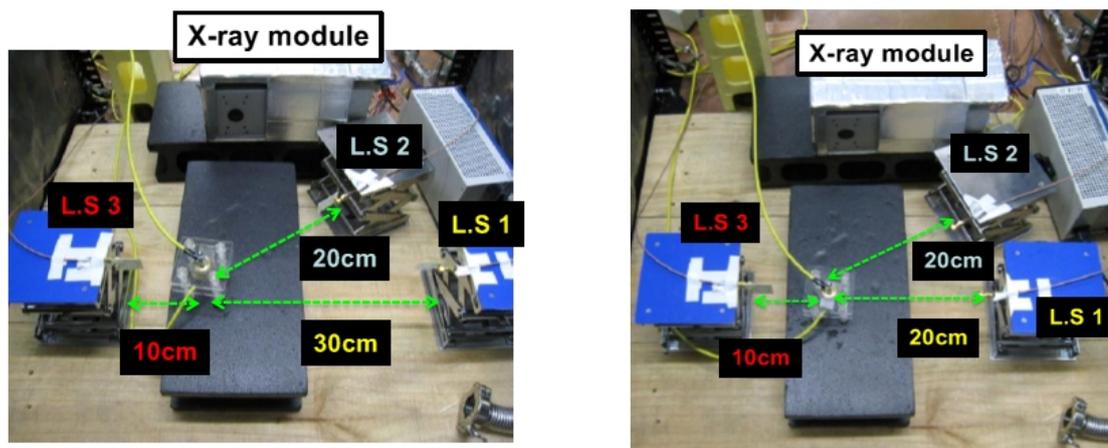


図 6-8 X 線照射下での電圧印加実験回路



(a) $2a = 0.21, 0.65\text{mm}, (d_1, d_2, d_3) = (30, 20, 10\text{cm})$ (b) $2a = 0.65\text{mm}, (d_1, d_2, d_3) = (20, 20, 10\text{cm})$

図 6-9 部分放電放射電磁波の測定用実験装置配置図

6-3-3 実験結果

(1) ボイド径の違いによる PD 放射電磁波の測定結果

図 6-9(a)に示す L.S の配置 ($(d_1, d_2, d_3) = (30, 20, 10\text{cm})$) でボイド直径 $2a = 0.21\text{mm}$ の PD による CD-6 の波形および各 L.S にて取得した電磁波波形を図 6-10 に示す。同図を拡大した波形を図 6-11 に示す。また、PD 源からの距離 d に対する電磁波信号の振幅値の測定結果を図 6-12 に、放電電荷量に対する電磁波信号の振幅値の測定結果を図 6-13 に示す。

さらに、L.S の配置は同条件で $2a = 0.65\text{mm}$ の PD による CD-6 の波形および各 L.S にて取得した電磁波波形を図 6-14 に示す。同図を拡大した波形を図 6-15 に示す。PD 源からの距離 d に対する電磁波信号の振幅値の測定結果を図 6-16 に、放電電荷量に対する電磁波信号の振幅値の測定結果を図 6-17 に示す。以上の結果を放電電荷量に対する電磁波信号の振幅値としてまとめた結果を図 6-18 に、ボイド直径に対する電磁波信号の振幅値、放電電荷量としてまとめた結果を図 6-19 に示す。



図 6-10 CD-6 及び L.S. で取得した放射電磁波波形 ($V_a = 12.4 \text{ kV}_{\text{rms}}$, $2a = 0.21 \text{ mm}$)



図 6-11 L.S. で取得した放射電磁波波形 ($V_a = 12.4 \text{ kV}_{\text{rms}}$, $2a = 0.21 \text{ mm}$)

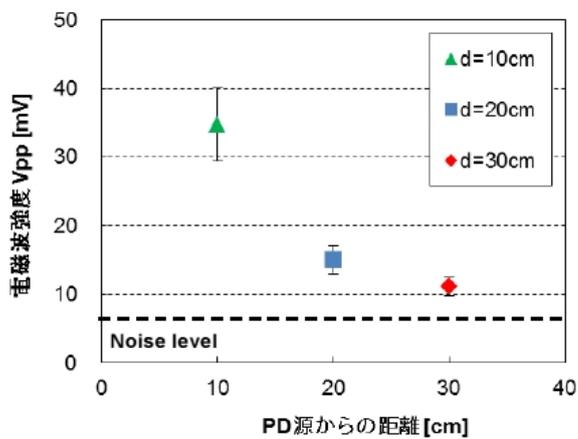


図 6-12 PD 源からの距離と電磁波強度の関係 ($2a=0.21 \text{ mm}$)

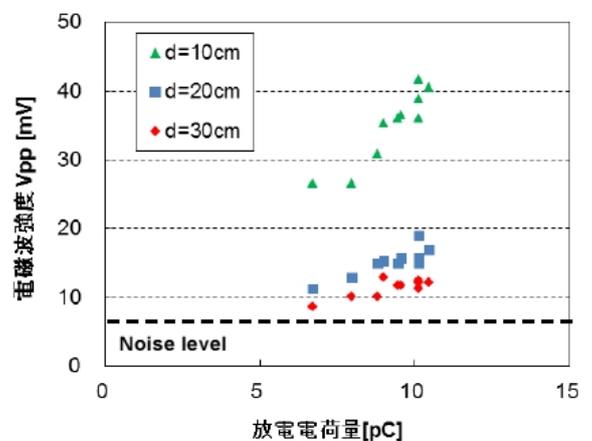


図 6-13 放電電荷量と電磁波強度の関係 ($2a=0.21 \text{ mm}$)

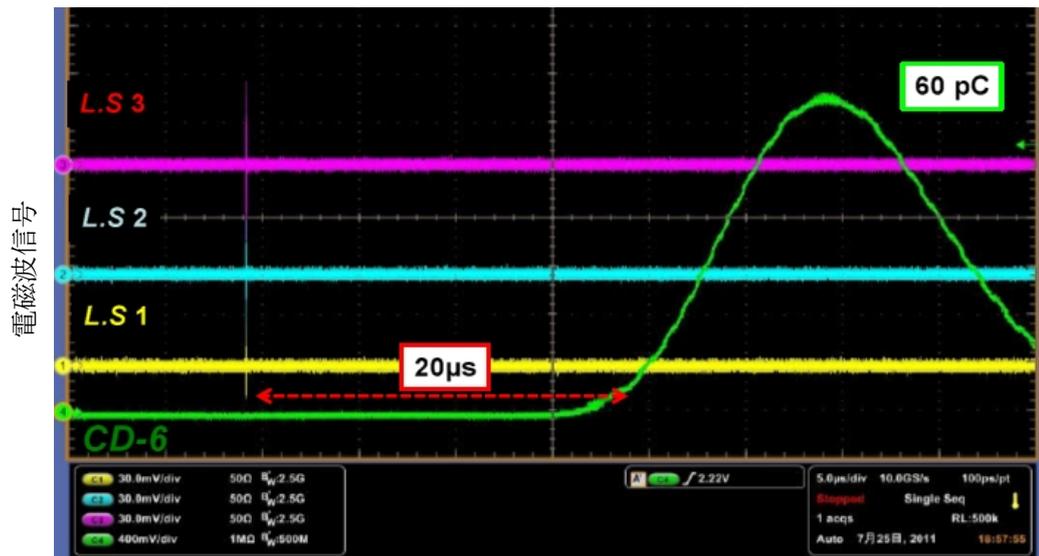


図 6-14 CD-6 及び L.S で取得した放射電磁波波形 ($V_a = 3.36 \text{ kVrms}$, $2a = 0.65 \text{ mm}$)

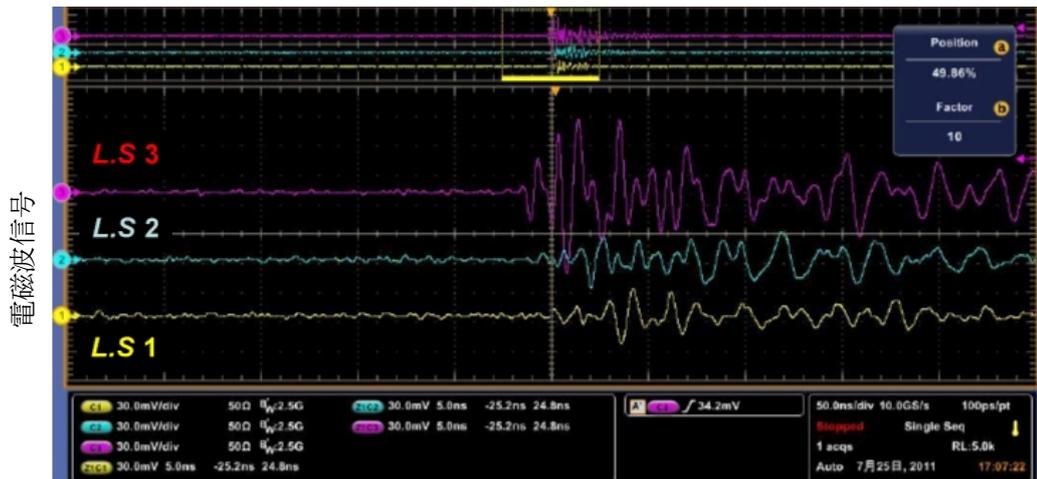


図 6-15 L.S. で取得した放射電磁波波形 ($V_a = 3.36 \text{ kVrms}$, $2a = 0.65 \text{ mm}$)

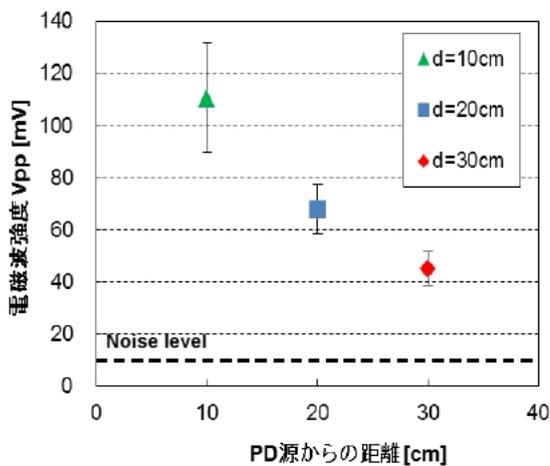


図 6-16 PD 源からの距離と電磁波強度の関係 ($2a=0.65 \text{ mm}$)

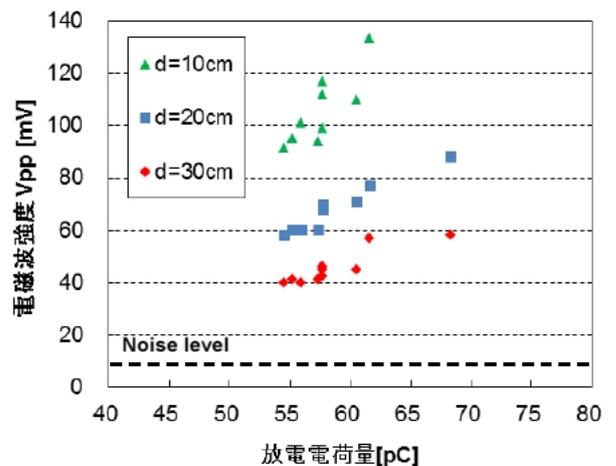


図 6-17 放電電荷量と電磁波強度の関係 ($2a=0.65 \text{ mm}$)

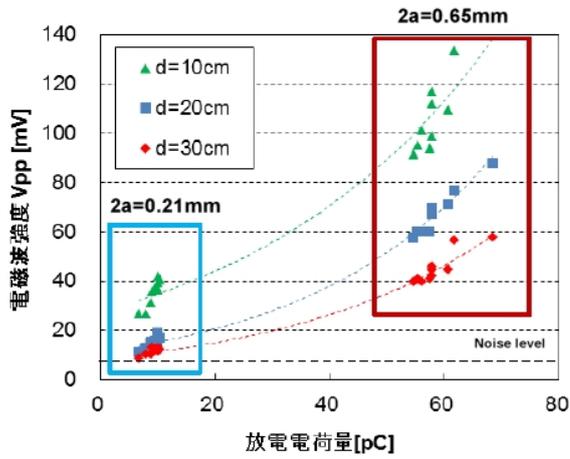


図 6-18 放電電荷量に対する電磁波信号の振幅値 (離隔距離別)

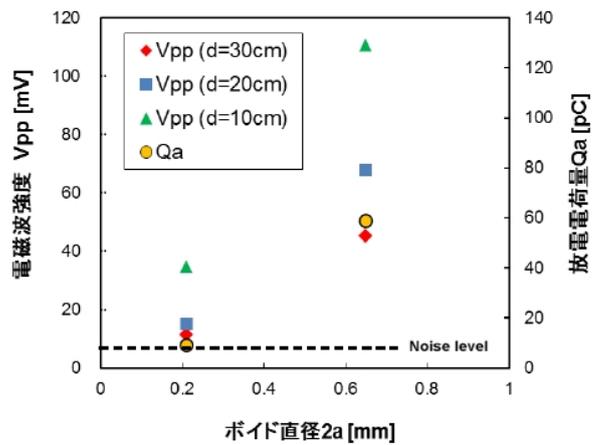


図 6-19 ボイド直径に対する電磁波信号の振幅値及び放電電荷量

(2) PD 信号の到達時間差による位置標定試験の基礎的検討

図 6-9(b)に示す L.S の配置 ((d_1, d_2, d_3)=(20, 20, 10cm)) でボイド直径 $2a = 0.65$ mm の PD による CD-6 の波形および各 L.S にて取得した電磁波波形の一例を図 6-20 に示す。

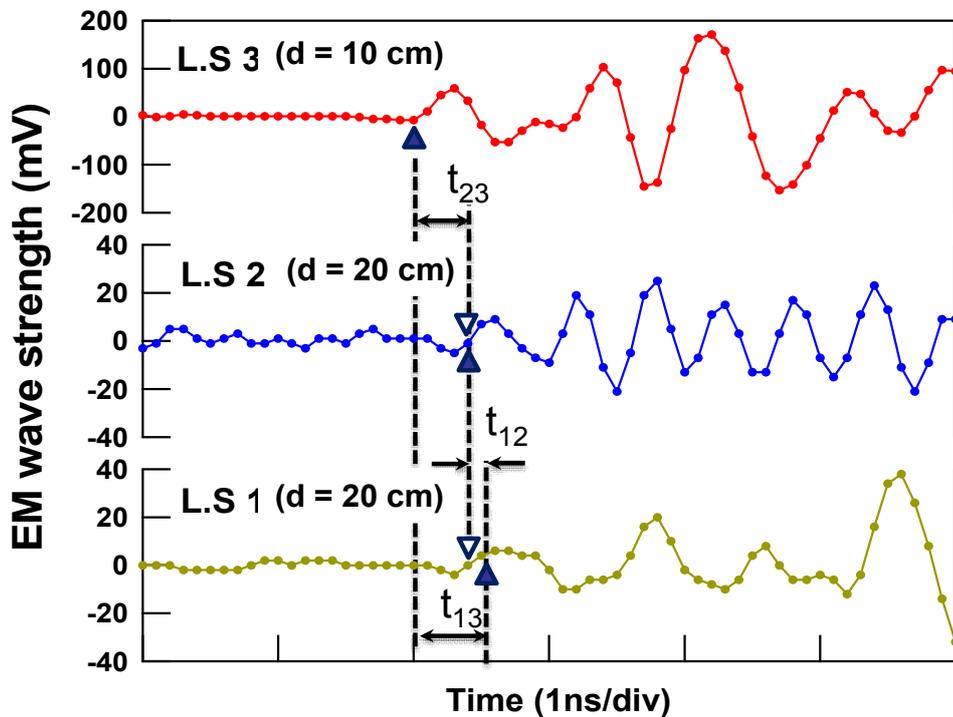


図 6-20 CD-6 及び各 L.S. にて取得した電磁波波形の一例

($V_a = 3.36$ kVrms, $2a = 0.65$ mm)

6-3-4 考察

(1) ボイド径の違いによる PD 放射電磁波の考察

図 6-10, 図 6-14 より CD-6 の PD 信号の立ち上がりと L.S による電磁波信号の時間差が $20 \mu s$ 程度あることがわかった。これは CD-6 の波形生成に費やす時間が $20 \mu s$ かかるためであると考えられる。そのため, ボイド直径 $2a = 0.21, 0.65 \text{ mm}$ いずれの試料にててもボイド放電による PD 放射電磁波を L.S にて取得可能であることがわかった。また, 図 6-12, 図 6-16 より PD 源からの距離が離れるにつれ, 電磁波信号強度が低下する傾向があるが, PD 源から 30 cm 離れた位置でも PD 放射電磁波を取得可能であることがわかった。さらに, 図 6-13, 図 6-17, 図 6-18 より, ボイド直径により決まる放電電荷量が大きくなると電磁波信号強度も大きくなる傾向があることがわかった。以上の結果から, ボイド直径と放電電荷量および電磁波信号強度には相関性があると考えられる (図 6-19 参照)。さらに, 数 pC 程度の放電でも L.S を適切な位置に配置することにより, PD 検出できることがわかった。

表 6-1 各センサ間における到達時間差の 30 組のデータの平均値と理論値

	t13 [ps]	T23 [ps]	t12 [ps]
Experiment	487	330	170
Theory	333	333	0

(2) PD 信号の到達時間差による位置標定試験の基礎的検討

図 6-20 より, すべての L.S によって PD 放射電磁波を取得できており, センサボイド間距離が離れることで電磁波信号強度が小さくなることがわかった。ここで, 各センサにおける PD 放射電磁波の信号到達時間を求めた。PD 信号と到達時間を算出するため, P. Kundu らが提案している累積エネルギーによる到達時間差を求める手法⁽¹⁾を用いた。同図の▲は前述した手法で求めた PD 信号の到達時間の実験値を示した。

また, ▽は L.S 3 の電磁波信号の到達時間の実験値を基準とし, 電磁波が光速で伝搬すると仮定した場合の到達時間の理論値を示した。実験値と理論値の到達時間を比較すると, 第一波の信号が感度よく取得できている L.S 2 についてはよく一致した。しかし, 第一波の信号が小さい L.S 1 では 1 ポイント異なることがわかった。

この原因として, L.S 固有の感度の差による影響が考えられる。表 6-1 に各センサ間 (L.S 1-3, L.S 2-3, L.S 1-2)における到達時間差(t13, t23, t12)の 30 組のデータの

実験値の平均値および理論値を示す。同表より、到達時間差の実験値と理論値の差が最大 170 ps であるため、標定誤差 5 cm 以内であることがわかる。以上のことから、今回の測定環境においては、誤差 5 cm 以内で PD 位置標定が可能であることがわかった。

6-3-5 まとめ

人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内 PD により発生する放射電磁波の測定および複数のセンサを用いた PD 位置標定に向けた検討についての調査を行った。その結果、ボイド直径 $2a = 0.21$ mm の試料（放電電荷量数 pC 程度）に対しても L.S を用いて PD 放射電磁波信号を取得できることがわかった。さらに、複数のセンサを用い、PD 放射電磁波信号の到達時間差による検討を行ったところ、実験値と理論値の標定誤差が 5 cm 以内であることがわかった。以上のことから L.S による PD 位置標定の可能性が示唆された。

6-4 6.6 kV 実モールド変成器を対象とした部分放電試験の検討

6-4-1 まえがき

本研究では、固体絶縁モールド変圧器の絶縁システムにおける部分放電発生機構の解明に基づき放電発生安定化技術を確立し、さらには機器内部の放電発生位置を正確に同定する技術、および工場での出荷前・現地での信頼性の高い絶縁異常診断技術を確立することを主たる目的とする。

これまで、人工ボイドを封入したエポキシモールド試料に対して PD 位置標定の可能性があることが示唆された。しかしながら、実器（6.6 kV 変圧器）での PD 検出および位置標定が可能であるかは未だにわかっていない。そのため、工場出荷時の PD 試験にて不健全と見なされた変圧器と PD 試験を通過した健全な変圧器との差異について比較・検討することで信頼性の高い変圧器出荷試験法に繋がることを期待している。

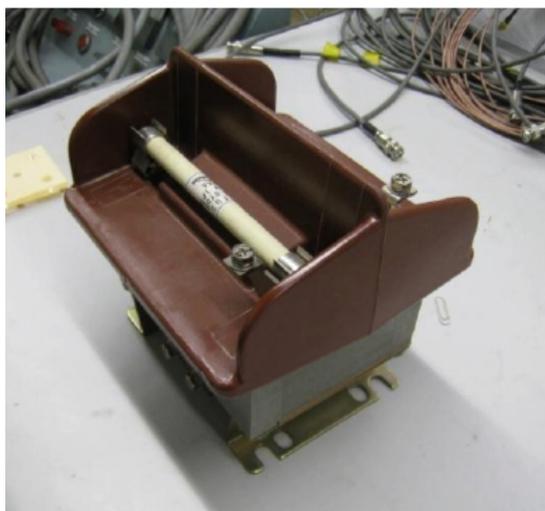
本節では、健全および不健全な実器を対象とした実験室レベルでの PD 試験、放電源位置標定の検討を行ったのでその結果について述べる。

6-4-2 供試物

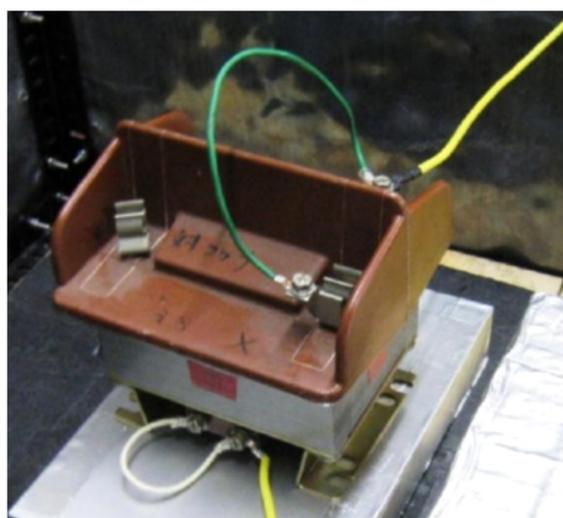
本実験で用いた実器は、図 6-21 (a) に示す(株)東芝製 6.6 kV モールド形計器用変成器である。事前に部分放電試験を行い、工場にて規定の PD 試験を行い、放電が発生しなかった製品を用いた。

対して、同図(b)に示す実器は同図(a)と同様の変圧器であるが、工場での PD 試験において、基準値以下の印加電圧にて放電が検出されたために不良品として処理されたものを用いた。

何らかの欠陥が存在しているとして、本器を対象として PD 試験を行った。以降、図 6-21(a)を健全 VT、同図(b)を不健全 VT と呼ぶ。



(a) 健全 VT



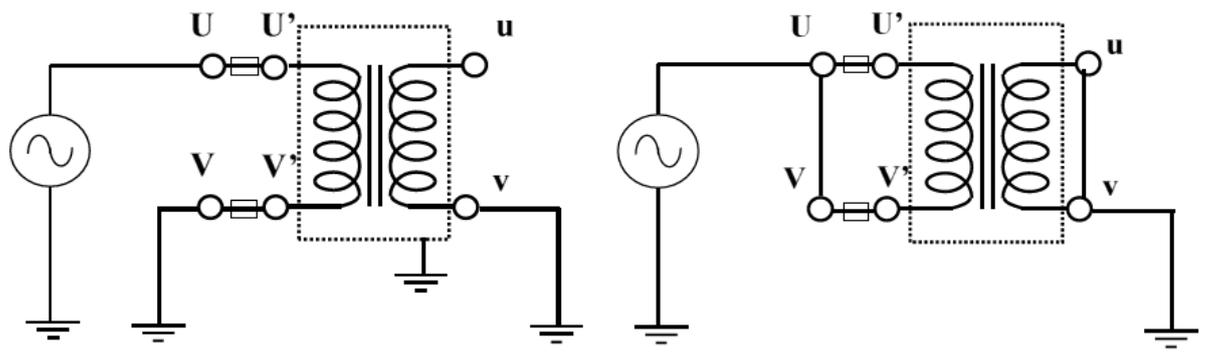
(b) 不健全 VT

図 6-21 供試器の外観写真

6-4-3 実験方法

(1) 健全 VT および不健全 VT の PD 試験法

交流信号発生器（株式会社エヌエフ回路設計ブロック製，WF1974）により、商用周波数 60 Hz の正弦波交流を電力増幅器および変圧器を介して試料に電圧を印加した。その際の共試物の結線方法を図 6-22 に示す。同図(a)，(b)の 2 通りの結線方法にて実験を行った。測定器として、CD-6 による PD 電流パルス，ループセンサ (L.S) による電磁波信号，ウルトラホン（東栄電気工業株，SE-7，共振周波数 40 kHz）による音波を用い PD 測定を行った（図 6-23，図 6-24 参照）。なお，PD 開始電圧 (PDIV ; PD Inception Voltage) は CD-6 にトリガー（閾値 5 pC）をかけて測定した。



(a) 相間絶縁検証時の結線

(b) 大地間絶縁検証時の結線

図 6-22 相間, 大地間絶縁検証時の結線方法

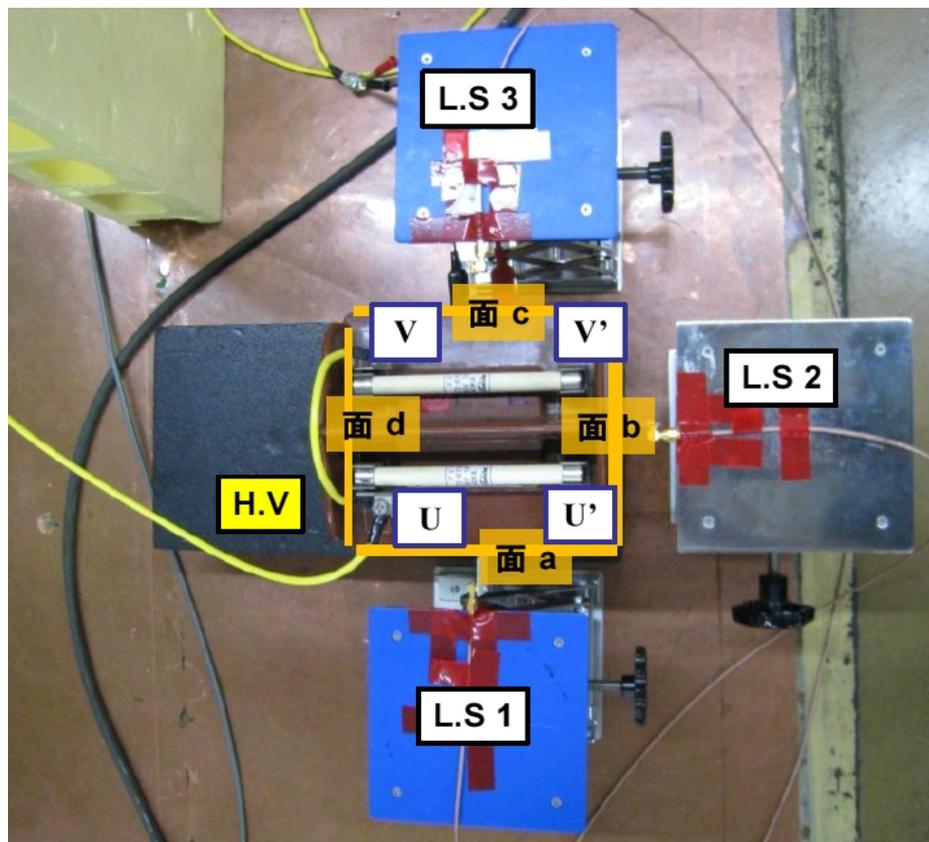


図 6-23 ループセンサーによる部分放電測定回路 (平面図)



図 6-24 ウルトラホン外観写真

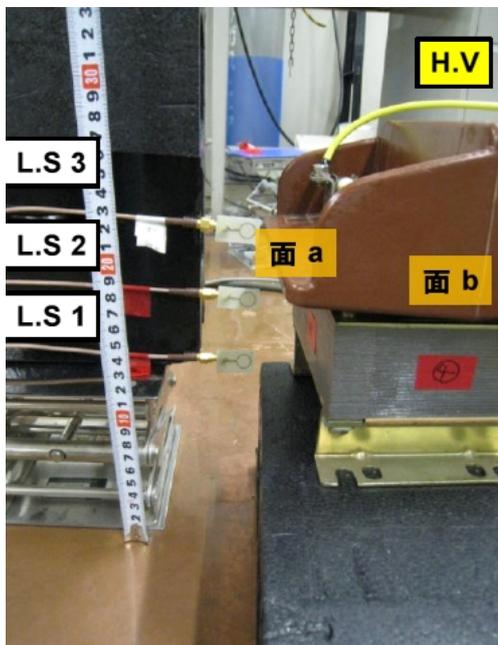


図 6-25 ループセンサーによる
部分放電測定回路
(ケース 1)

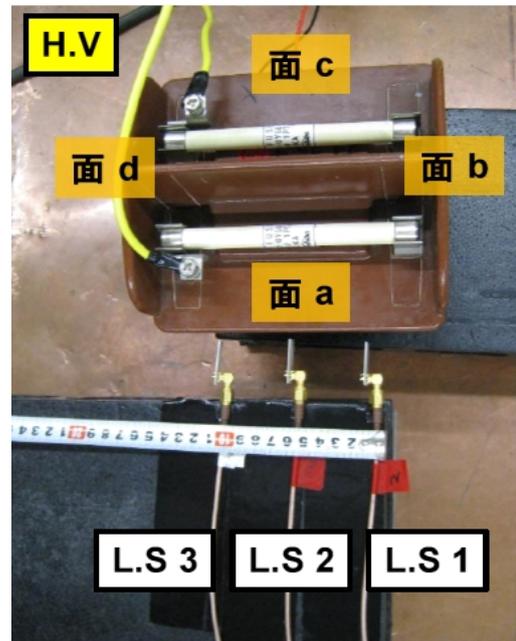


図 6-26 ループセンサーによる
部分放電測定回路
(ケース 2)

(2) 不健全 VT における PD 位置評定試験

(1)項に述べた実験にて、各結線法にて健全 VT、不健全 VT において PD 放射電磁波を L.S にて取得できた (表 6-2, 表 6-3 参照)。その中でも実験結果に差異のあった結線方法 phaseto phase の条件で、不健全 VT について PD 位置標定試験を行った。3 つの L.S の配置を変更し、PD 位置標定試験を行った (図 6-25, 図 6-26 参照)。

6-4-4 実験結果

(1) 健全VT および不健全VT のPD 試験結果

実験の際にCD-6により検出されたオシロスコープでの放電波形の一例を図6-27（健全VT, phase to phase), 図6-28（不健全VT, phase to phase) に示す。また, 3つのL.Sにて検出された電磁波波形の一例を図6-29（健全VT, phase to phase), 図6-30（不健全VT, phase to phase) に示す。以上の結果より, 各結線方法に対するPDIV, 電荷量, L.S 標定結果, ウルトラホン標定結果を表6-2, 表6-3 に示す。同表のL.S 標定結果のa, b, cは図6-23の面a, b, cに対応している。

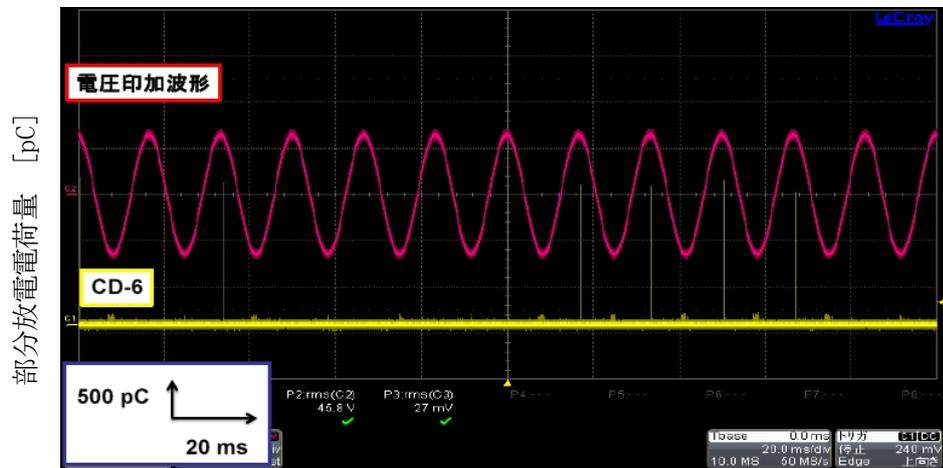


図6-27 CD-6にて検出した電磁波波形（健全VT, $V_a = 6.9$ kVrms, phase to phase)

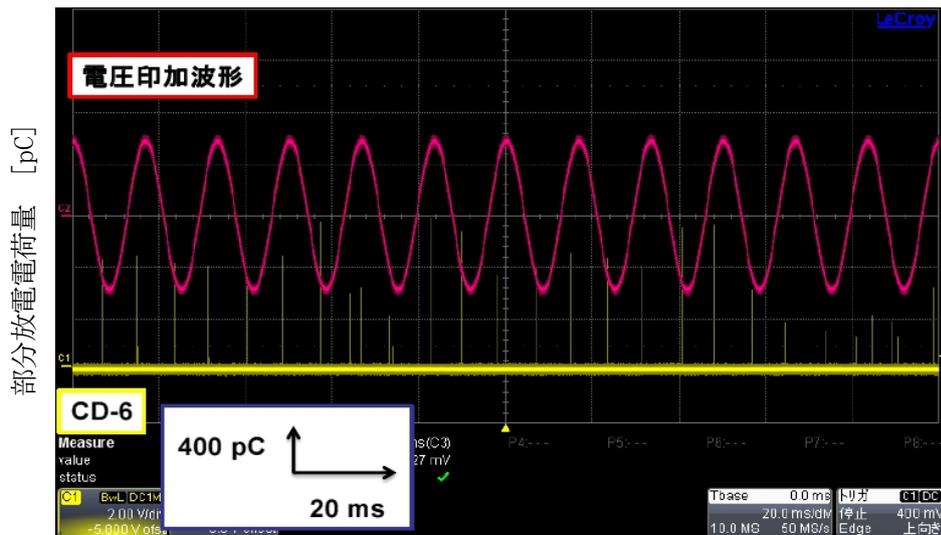


図6-28 CD-6にて検出した電磁波波形（不健全VT, $V_a = 7.6$ kVrms, phase to phase)

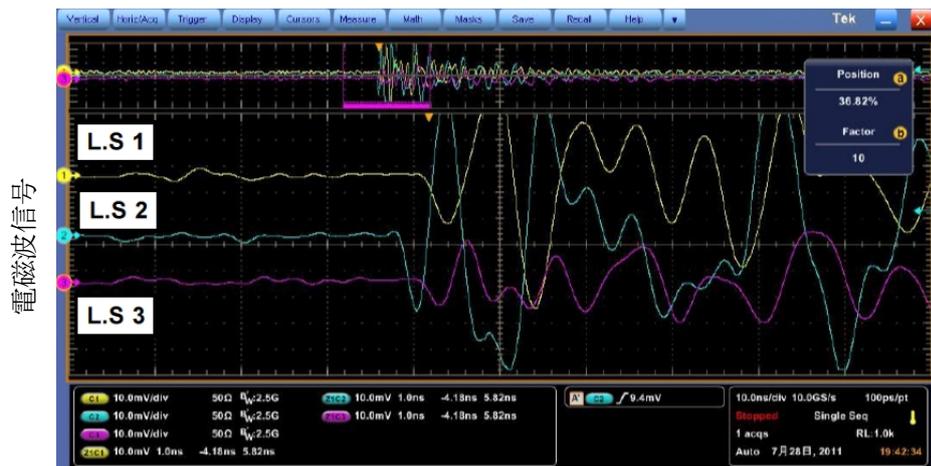


図 6-29 L.Sにて検出した電磁波波形 (健全VT, phase to phase)

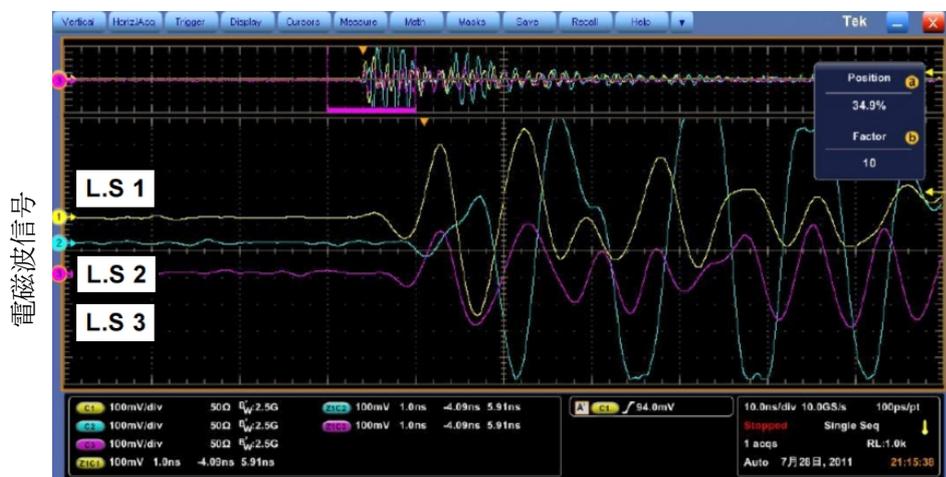


図 6-30 L.Sにて検出した電磁波波形 (不健全VT, phase to phase)

表 5.1 各結線方法に対する PDIV, 電荷量, LS・ウルトラホン標定結果 (健全 VT)

結線方法	PDIV [kV]	電荷量 [pC]	L.S. による標定			ウルトラホン による標定
			1st pulse	2nd pulse	3rd pulse	
① phase to phase	6.87	1, 600	b	a	C	端子 (U')
② phase to earth	5.82	20~40	c	a	b	鉄心部

表 5.2 各結線方法に対する PDIV, 電荷量, LS・ウルトラホン標定結果 (不健全 VT)

結線方法	PDIV [kV]	電荷量 [pC]	L.S. による標定			ウルトラホン による標定
			1st pulse	2nd pulse	3rd pulse	
① phase to phase	7.14	825~1, 870	a	c	b	未検出
② phase to earth	6.30	5~20	c	a	b	未検出



図 6-31 L.S によって検出された電磁波波形（ケース 1，健全 VT，phase to phase）

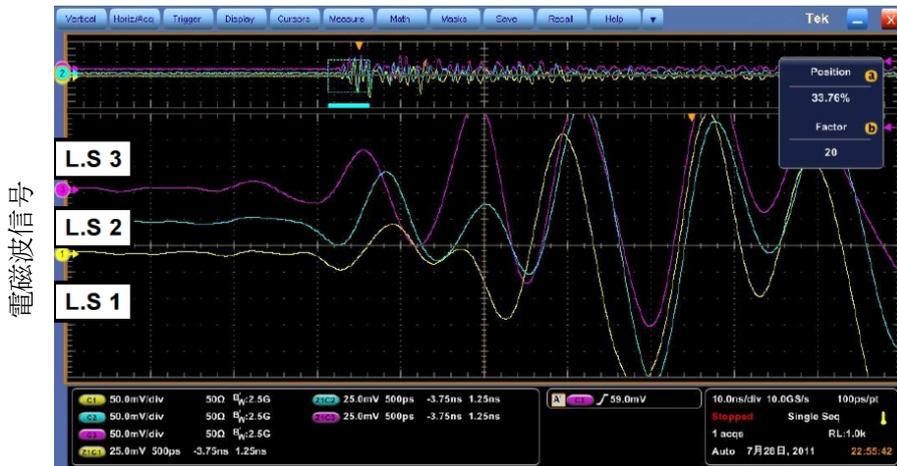


図 6-32 L.S によって検出された電磁波波形（ケース 2，不健全 VT，phase to phase）

(2) 不健全 VT における PD 位置評定結果

図 6-31 に L.S を図 6-25 のように配置したときの PD 放射電磁波の測定結果を示す。図 6-32 に L.S を図 6-26 のように配置したときの PD 放射電磁波の測定結果を示す。

6-4-5 考察

図 6-27，図 6-28 より健全 VT 及び不健全 VT の両方から PD 電流パルスが，図 6-29，図 6-30 より PD 放射電磁波が測定できていることがわかる。また，表 6-2 と表 6-3 の結線方法 phase to phase を比較すると，健全 VT ではウルトラホンにより音波が検出されるが不健全 VT では音波が検出されなかった。そのため，健全 VT では高電圧端子部でのコロナ放

電が生じていると考えられる。

逆に、不健全 VT では内部での放電が生じている可能性が考えられる。不健全 VT の L.S による PD 位置標定の結果では、図 6-30 より到達時間が早い順に L.S 1 (面 a), L.S 3 (面 c), L.S 2 (面 b) であることがわかる。同様に図 6-31 では L.S 3, L.S 2, L.S 1, 図 6-32 では L.S 3, L.S 2, L.S 1 の順に到達時間が早いことがわかる。以上のことから、図 6-33 に示す領域付近の内部で PD が発生していると考えられる。

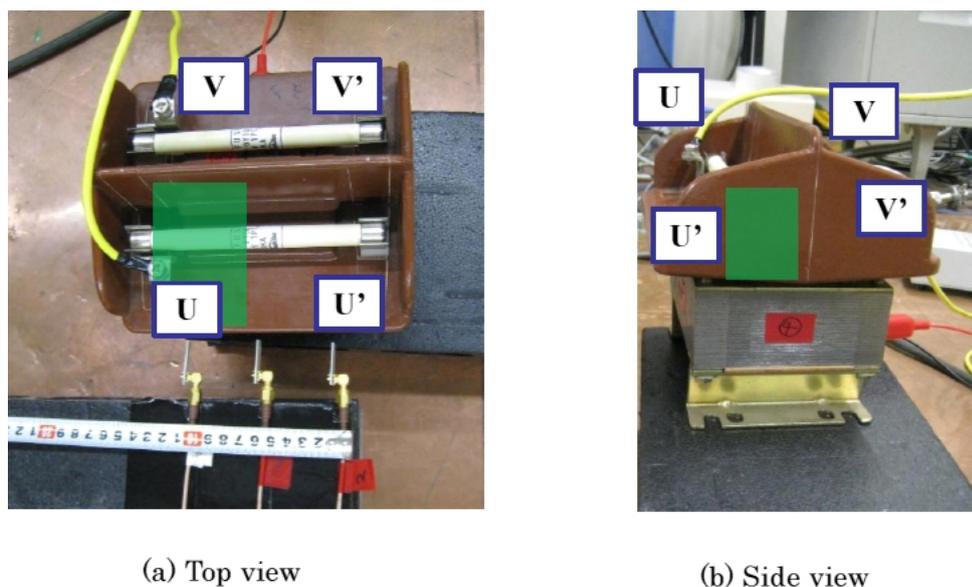


図 6-33 PD が発生していると推定される部位 (緑部分)

6-4-6 まとめ

健全および不健全な実器を対象とした実験室レベルでの PD 試験, PD 源位置標定試験を行った。その結果として健全 VT, 不健全 VT 両方とも PD が検出された。しかしながら、健全 VT では外部でのコロナ放電が生じている可能性が示唆された。また、不健全 VT で L.S による PD 位置標定を行ったところ高圧側の端子近傍の内部で放電が発生している可能性があることがわかった。

6-5 エポキシ板三枚重ね円柱ボイド試料に対する X 線照射効果

6-5-1 まえがき

エポキシモールド変圧器のコイル絶縁システムに使用される固体絶縁物は、製造プロセスにおいて微小なボイドなどの欠陥を技術的に避けなければならない。固体絶縁物内にボイド欠陥が存在すると、部分放電(PD)が発生し、最終的に絶縁破壊に至る可能性がある。

しかしながら、現状では微小欠陥の検出はまだ経験的な面に頼る部分が多く、基本理論に基づく技術の確立には至っていない。また、絶縁物に介在するボイド内での PD は、放電開始のトリガーとなる初期電子が欠乏しているため、非常に長い放電時間遅れがあることが知られている。このような放電時間遅れのため、絶縁物にボイド欠陥があるにも関わらず PD が検出できない可能性があり、機器の信頼性に大きな影響を及ぼしかねない。

これまでに、人工的に球状ボイドを封入したエポキシモールド試料に対して X 線照射することにより、放電遅れ時間が短くなり、部分放電開始電圧 (PDIV) が低下することがわかった。しかしながら、実器での欠陥を考慮すると、球状ボイドのみでなく、円柱状のボイドが存在する可能性がある。

本節では、エポキシ板を三枚重ねた円柱ボイド試料を用いて、PD 特性に対して X 線照射効果があるか検証を行った。

6-5-2 実験方法

交流信号発生器 (株エヌエフ回路設計ブロック製, WF1974) により、商用周波数 60 Hz の正弦波交流を 10 mVrms/sec. の昇圧速度で出力し、電力増幅器 (株エヌエフ回路設計ブロック製, 4520A) および変圧器を介して試料に電圧を印加した (図 6-34 参照)。なお、電圧印加と同時に X 線モジュール (XM10-60-5) からの X 線照射を行い、オシロスコープに出力された CD-6 からの PD パルス信号を取得した。X 線モジュールの出力は 2 W とし、全ての実験において照射を行った。電圧印加開始後、PD 開始電圧 (PDIV ; PD Inception Voltage) まで昇圧し、閾値 (検出感度 5pC) を超えた瞬間の PD パルス発生時における PDIV 値および放電電荷量 q_a を測定した。この過程を 12 回行い、最大値および最小値を除く 10 点で統計処理を行った。なお、本実験の検出感度は 3pC 以上である。沿面放電防止の観点から、試料全体をフロリナートに浸した。

6-5-3 実験結果

径方向へのボイド直径 $2a = 1.5 \text{ mm}$ の試料を用いた実験で、CD-6 により検出されたオシロスコープでの放電波形の一例を図 6-36 (X 線照射無)、図 6-37 (X 線照射有) に示す。同様に $2a = 3.5 \text{ mm}$ の試料を用いた実験結果を図 6-38 (X 線照射無)、図 6-39 (X 線照射有) に示す。これらの結果を CD-6 の 1~3 番目のパルスの印加電圧波形に対する位相特性を図 6-40 から図 6-43 に示す。さらに、図 6-44 にボイド直径に対する PDIV、図 6-45 に

ボイド直径に対する放電電荷量を示す。なお、ボイド無しのエポキシ板三枚重ねの試料では 6.5 kVrms まで PD フリーであった。

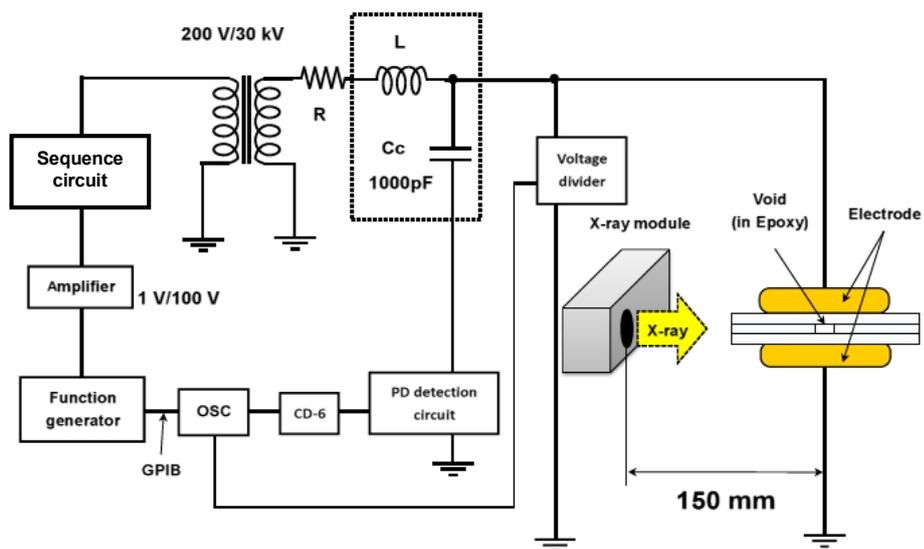


図 6-34 実験回路

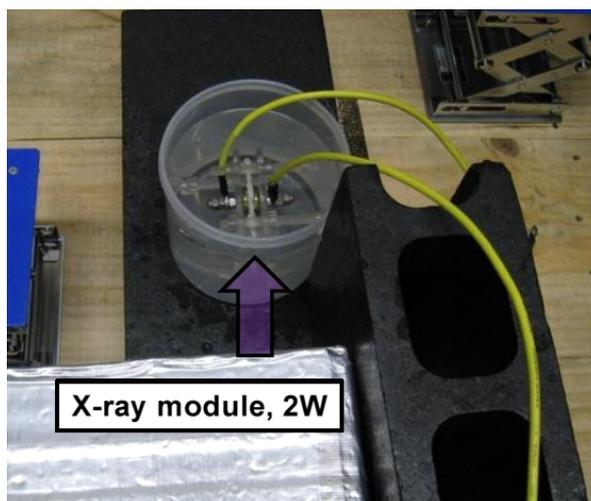


図 6-35 実験配置図

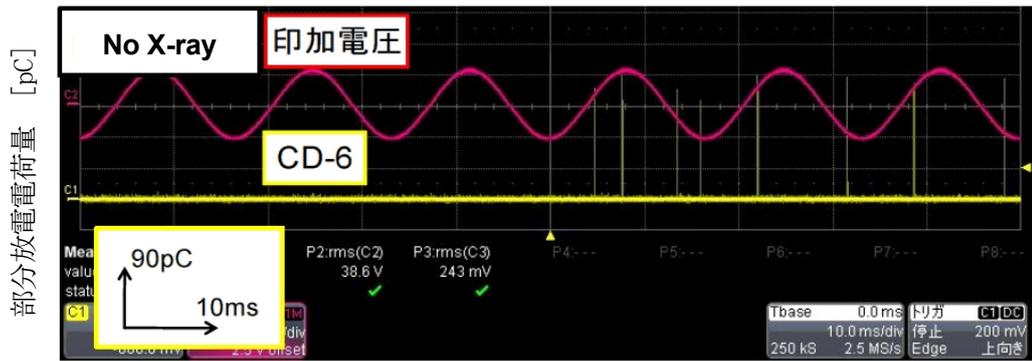


図 6-36 CD-6 によって検出された電磁波波形 ($2a = 1.5 \text{ mm}$, $V_a = 5.8 \text{ kVrms}$, no X-ray)

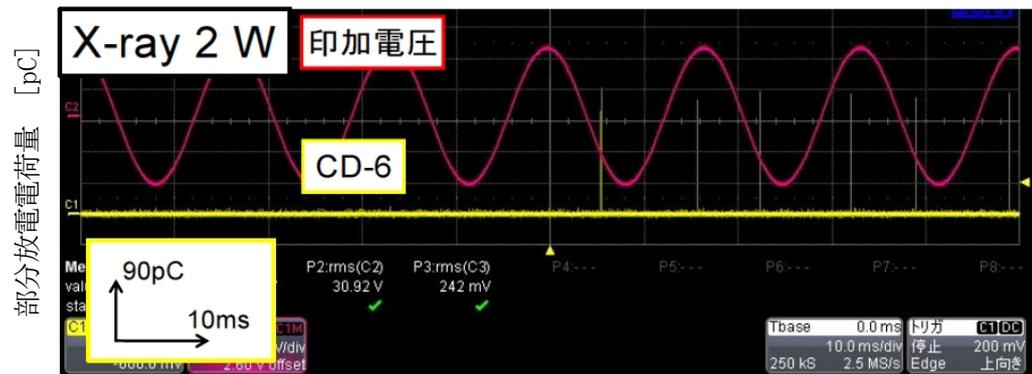


図 6-37 CD-6 によって検出された電磁波波形 ($2a = 1.5 \text{ mm}$, $V_a = 4.6 \text{ kVrms}$, X-ray)

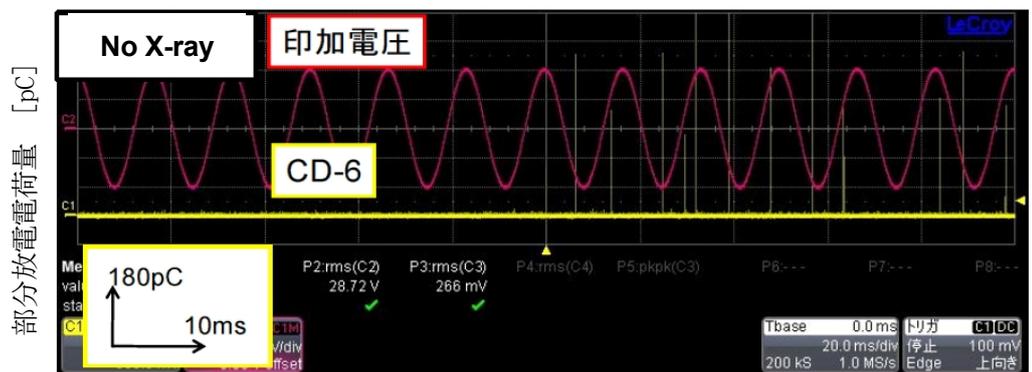


図 6-38 CD-6 によって検出された電磁波波形 ($2a = 3.5 \text{ mm}$, $V_a = 4.3 \text{ kVrms}$, No X-ray)

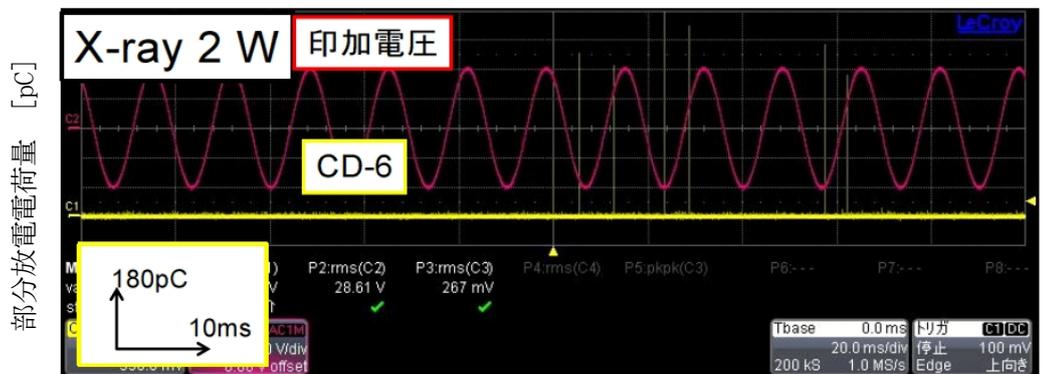


図 6-39 CD-6 によって検出された電磁波波形 ($2a = 3.5 \text{ mm}$, $V_a = 4.3 \text{ kVrms}$, X-ray)

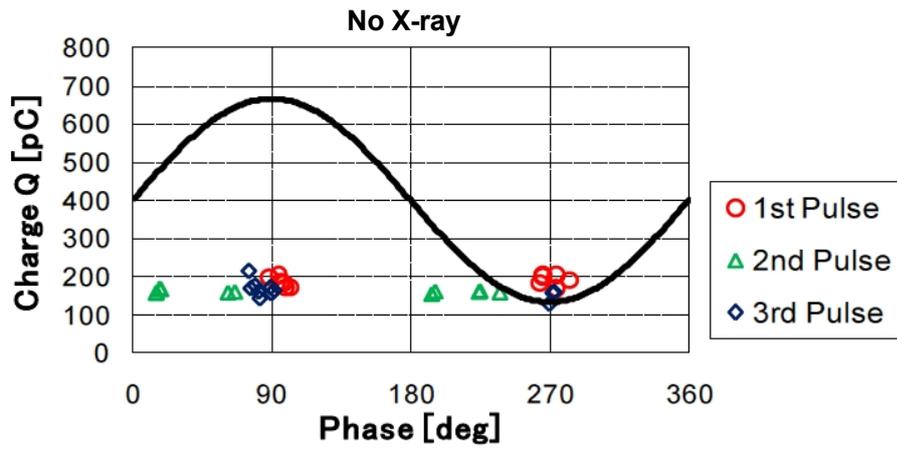


図 6-40 放電パルスの印加電圧に対する位相特性 ($2a = 1.5 \text{ mm}$, no X-ray)

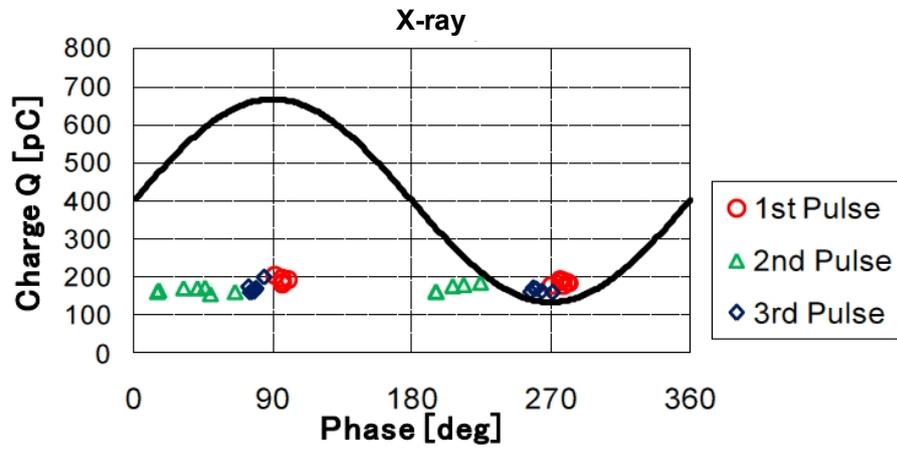


図 6-41 放電パルスの印加電圧に対する位相特性 ($2a = 1.5 \text{ mm}$, X-ray)

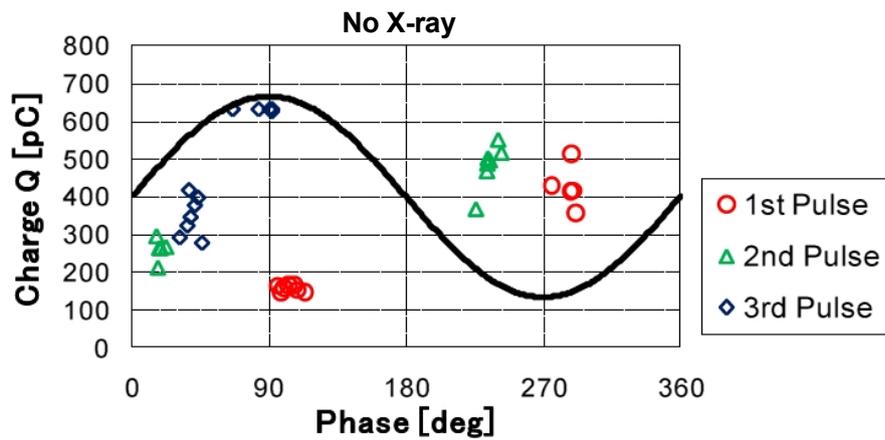


図 6-42 放電パルスの印加電圧に対する位相特性 ($2a = 3.5 \text{ mm}$, no X-ray)

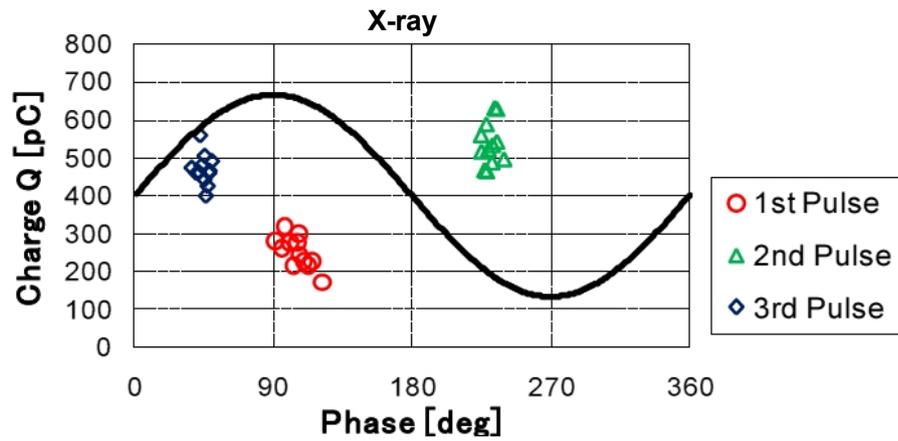


図 6-43 放電パルスの印加電圧に対する位相特性 ($2a = 3.5 \text{ mm}$, X-ray)

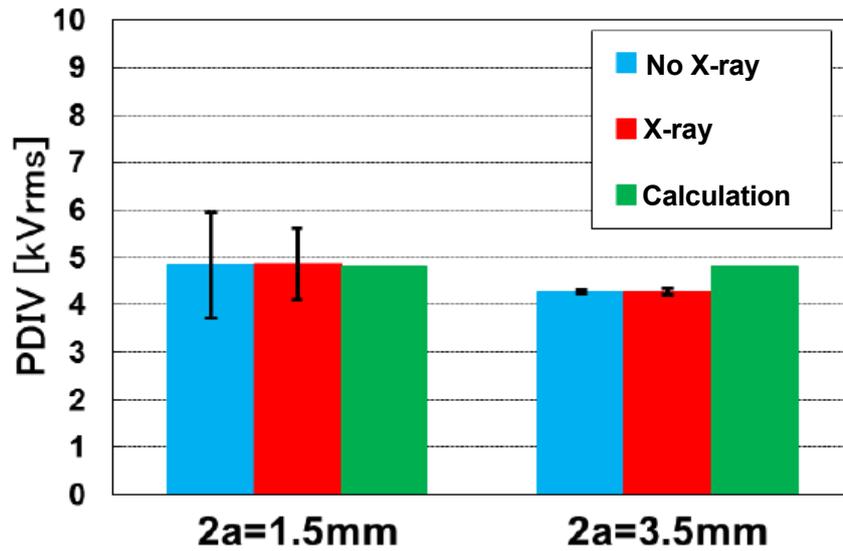


図 6-44 ボイド直径と PDIV の関係

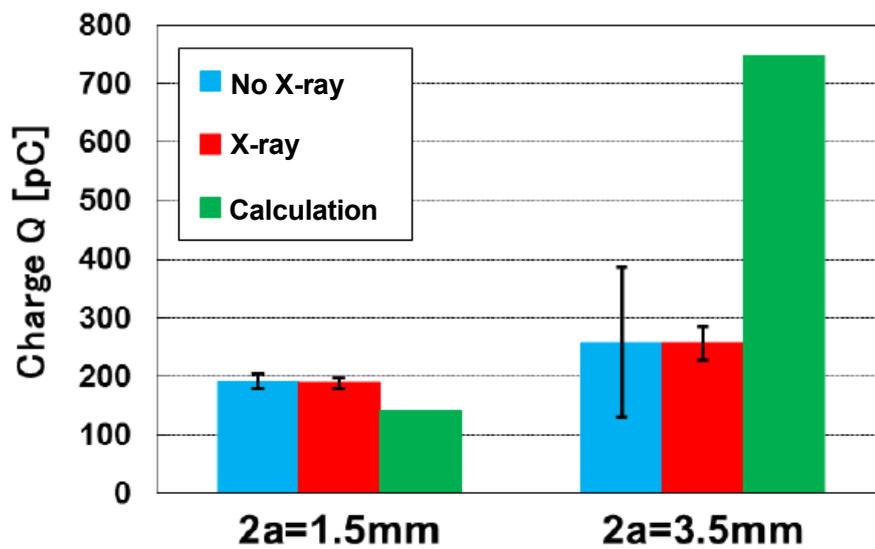


図 6-45 ボイド直径と放電電荷量の関係

6-5-4 考察

図 6-36 から図 6-39 の結果より、各試料において X 線照射の有無に関わらず PD が検出されていることがわかる。また、図 6-40 から図 6-43 の結果より各試料において X 線照射による位相特性への影響はないと考えられる。図 6-44 および図 6-45 に、円柱ボイド直径 $2a$ に対する PDIV 値、放電電荷量 Q の実験結果および平行平板コンデンサモデルの計算式⁽²⁾に基づいた計算結果を示す。測定点は実験方法により 12 回測定した放電電荷量の最大・最小を除く 10 回の平均値を示しており、計算におけるエポキシ樹脂の比誘電率は 4.0 とした。

図 6-44 より PDIV 値を計算値と比較すると計算値にほぼ一致することがわかる。一方、図 6-45 より放電電荷量を計算値と比較すると、ボイド直径 $2a = 1.5 \text{ mm}$ の場合にはよく合うが、 $2a = 3.5 \text{ mm}$ になると合わなくなることがわかる。

これはコンデンサモデルではボイド空間全体で放電に至ると考えるが、実際にはボイド直径が増加することにより、ボイド内の局所的な空間で放電に至っていることによる影響が考えられる。さらに、X 線照射により PDIV 値および放電電荷量に与える影響がほとんどないことがわかる。

これは碓井らの報告⁽³⁾と同様の傾向となる。しかし、球状ボイド試料への X 線照射効果と異なる結果⁽⁴⁾である。この原因として、球状ボイドでは放電のきっかけとなる初期電子が不足しているために X 線照射効果が顕著にみられる。これに対し、円柱ボイドでは角部に電界が集中し、電界による初期電子放出が支配的となることから X 線照射効果があまり見られなかったと考えられる。

6-5-5 まとめ

エポキシ板を三枚重ねた円柱ボイド試料を用いて、PD 特性に対して X 線照射効果があるか検証を行った。その結果、X 線照射により PDIV、電荷量、位相特性に与える影響がないことがわかった。そのため、円柱ボイドのような電界が強調されるような欠陥については X 線による初期電子供給がなくとも PD が発生することがわかった。

6-6 まとめ

本章では、人工球状ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内における部分放電の際に発生する放射電磁波の測定、形状の異なる円柱ボイドへの X 線照射効果について調査を行った結果を述べた。さらに、これまでに実施している基礎的検討を応用

して、実器の 6.6 kV モールド変圧器での部分放電位置標定試験を行った結果についても述べた。

本章の研究成果を以下にまとめる。

1) 人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて、ボイド内 PD により発生する放射電磁波の測定および複数のセンサを用いた PD 位置標定に向けた検討についての調査を行った。その結果、ボイド直径 $2a = 0.21 \text{ mm}$ の試料（放電電荷量数 pC 程度）に対してもループセンサーを用いて PD 放射電磁波信号を取得できることがわかった。さらに、複数のセンサを用い、PD 放射電磁波信号の到達時間差による検討を行ったところ、実験値と理論値の標定誤差が 5 cm 以内であることがわかった。以上のことからループセンサーによる PD 位置標定の可能性が示唆された。

2) 健全および不健全な実器を対象とした実験室レベルでの PD 試験、PD 源位置標定試験を行った。その結果として健全 VT、不健全 VT 両方とも PD が検出された。しかしながら、健全 VT では外部でのコロナ放電が生じている可能性が示唆された。また、不健全 VT で L.S による PD 位置標定を行ったところ高压側の端子近傍の内部で放電が発生している可能性があることがわかった。

3) エポキシ板を三枚重ねた円柱ボイド試料を用いて、PD 特性に対して X 線照射効果があるか検証を行った。その結果、X 線照射により PDIV、電荷量、位相特性に与える影響がないことがわかった。そのため、円柱ボイドのような電界が強調されるような欠陥については X 線による初期電子供給がなくとも PD が発生することがわかった。

第 6 章の参考文献

- (1) P.Kundu, et al. : “A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques” Applied Acoustics 70 1378–1383 (2009)
- (2) S.Hirabayashi, et al. : “Estimation of the Size of Voids in Coil Insulation of Rotating Machine” , IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, VOL. EI-9, NO. 4, DECEMBER 1974
- (3) 碓井, 他 : 「絶縁物中ボイドの部分放電開始に及ぼす X 線照射効果」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-96-52
- (4) M.Hikita, et al. : “X-ray Irradiation Induced Discharge of Spherical Void in Epoxy Resin”, 2011 Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, 5 to 8 June 2011, pp.463-467 (2011)

第7章 モデルと実器の換算係数を導入した油浸コンデンサの 新しい課電寿命推定方法の検討

7-1 まえがき

電気機器の寿命設計は、「機器の絶縁寿命は過去の実績や経験から決まっ
ていて、必ずしも技術的な根拠が明確にされているわけではない⁽¹⁾」
とされているように、ノウハウ的な要素が大きいために、これまでに
公表されている技術文献は少ないのが実情である。実際の機器開発等
では、各機器で採用されている絶縁システムと同じ絶縁システムで構
成されるモデルを用いる評価が一般的である。これは、実際の機器の
寿命をより高い信頼度で評価すべきという基本的な考え方に基
づいている。しかしながら、実際の機器開発では、材料、製造技術
を含めた実器の様々な条件を反映することが必ずしも可能となるわけ
ではなく、絶縁材料もしくはそれらの基本的な絶縁システムとして
実験・解析して寿命評価されることが主となっている⁽²⁾。例えば、
課電寿命評価は、機器に適用されている絶縁システムの絶縁材料を
ベースとした電極モデルとしてそれらの $V-t$ 特性から検討(3-7)
されている。こうした事情の中、電力ケーブルや電力用油浸コン
デンサは変圧器や回転機等と比較してその構造が比較的シンプル
であるため、実用機器の寿命評価を行うため小型モデルを用いる
ことが比較的容易である。その反面、電力ケーブルや電力用コン
デンサの設計電界は、変圧器や回転機のそれよりも格段に高く
(数倍と推定して良い)、耐熱寿命評価よりも課電寿命評価に
重点がおかれている。

機器の課電寿命評価においては「ワイブル分布」を適用した様
々な検討が行われている^(4, 5, 8-11)。しかしながら、実用機器の
絶縁・寿命設計に観点をおいた解析は少なく^(8, 11)、多くは、
絶縁材料もしくはそれらの基本的な絶縁システムの寿命検討に
とどまっていると思われる。このように、電気機器の期待寿命
の推定は、未だに難しい技術課題である。これは、モデルの実
験結果を用いてどのように実器の寿命を推定するかが明らかに
されていなかったためである。

さて、油浸コンデンサの課電寿命に関連するいくつかの文献⁽¹²⁻¹⁷⁾
があるが、いずれも絶縁システムの課電特性や、劣化による材
料物性の変化について述べたものが多く機器としての寿命に
言及している例はほとんどない。

本章では、モールド機器など重電機器の寿命推定方法の評価
方法立案を目的として、電力

用油浸コンデンサを例にとって課電寿命推定を行う基本的な考え方と具体的な手法について検討・提案した。まずワイブル分布の概要とその適用の基本的な考え方について述べ、次にモデルから実器への寿命換算する場合の課題を検討するとともにモデルと実器の具体的な寿命データを用いて新しい寿命評価の考え方の検証を行った。

7-2 ワイブル分布の適用

7-2-1 機器寿命解析に適するワイブル分布の概要

ワイブル分布は物の寿命がその最弱点部分の破壊で決まるとして誘導されている⁽¹⁸⁾。「故障の最弱点モデル」という考え方に基づいた場合、機器全体の絶縁システムは、適切な最小単位のモデルを仮定してそれらを直列に接続したシステムとして取り扱うことができる^(8,18)。

例えば、金子ら⁽⁸⁾は電力ケーブルのインパルス破壊電圧についてワイブル分布の統計理論から検討しインパルス破壊強度がケーブル長さに依存することを示した。本章では、この考え方を電力用油浸コンデンサのモデルと実器の課電寿命時間との関係に応用して実器とモデルの寿命を換算する方法を提案した。

寿命時間の確率変数「T(特性寿命時間)」の実現値を「t」とすると、期待寿命時間の累積確率分布関数：F(t)は次式で表される。

$$F(t) = 1 - \exp[-(t - \gamma)^m / t_0] \\ (t \geq t_0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

γ : 位置パラメータ

t_0 : 尺度パラメータ

m : 形状パラメータ

形状パラメータ「 m 」は、統計的な分布形状を決めるパラメータで $m = 1$ なら指数分布、 $m > 3 \sim 4$ ならば正規分布に近づく。この意味でワイブル分布は、指数分布、正規分布を含んだより広い意味の分布関数と考えて良い⁽¹⁷⁾。確率変数を寿命時間とするときは、形状パラメータ「 m 」は、その値によって特別な意味をもち、 $m < 1$: 初期不良故障 (故障率減少形)、 $m = 1$: 偶発故障(故障率一定)、 $m > 1$: 摩耗故障(故障率増加形)で、これらを時間軸で表すとよく知られている「バスタブ曲線⁽²⁾」となる。

さて、実器の期待寿命時間の累積分布関数は、基本単位となるモデルを n 個直列にした場合と等価と仮定するので次式が得られる⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned}
F_n(t) &= 1 - \exp[-(t_n - \gamma)^m / t_0]^n \\
&= 1 - \exp[-n(t_n - \gamma)^m / t_0] \\
&\quad (t \geq t_0) \quad \dots\dots\dots (2)
\end{aligned}$$

t_n : 実器の寿命時間

γ : 位置パラメータ

t_0 : 尺度パラメータ

m : 形状パラメータ

モデル試料の累積確率分布 $F_1(t)$ と実器の累積確率分布

$F_n(t)$ が同じとすると、モデルと実器が課電寿命試験において、同じ確率で破壊する寿命時間を求めることになり $n(t_n - \gamma)^m = (t_1 - \gamma)^m$

すなわち、

$$t_n = \gamma + (t_1 - \gamma) / n^{1/m} \quad \dots\dots\dots (3)$$

t_1 : モデルの寿命時間

位置パラメータ γ を考慮しないときは、

$$t_n = t_1 / n^{1/m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。この(3)式または(4)式がモデルと実器の寿命時間の換算係数となる。従って、モデル試料を用いた実験データからモデルの期待寿命時間が求まると、実器の期待寿命はモデルの $[1/n^{1/m}]$ 倍と推定できる。この寿命時間の換算係数式は、後述する様にコンデンサの絶縁構造、破壊モードの観点から実器とモデルが同等と解釈できる場合に適用できる。変圧器や回転機の絶縁システムでは、それらの絶縁システムに対する電圧の加わり方が明確となり、且つ実器のモデル化が物理的に可能な場合に適用可能と思われるが、個々に検証が必要である。

以上に述べたワイブル分布の統計的な取り扱いの詳細については、文献⁽⁸⁾を参照されたい。

7-2-2 期待寿命推定における課題

ワイブル分布が寿命推定に応用できることは、多くの研究結果で確認されている^(5, 8, 10, 11)。しかしながら、実際の課電寿命試験の解析では、考慮すべきことが幾つかある。

最も重要な点は、モデルと実器の破壊(故障)モード(または形態)が同じであることである。つまり、統計的な処理を行って寿命を解析するのであるから、実験する試料の絶縁破壊

のモードが、一連の実験条件において同じであることを前提として解析を進めなければならない。本研究では、寿命データを解析するにあたり、これらの点に注意して検討を進めた。

例えば、課電する電圧の違いによって絶縁破壊する状態が異なるのであれば、それらの実験で得られたデータは、統計的に異なる母集団になる。つまり、絶縁破壊の形態(沿面破壊, 貫通破壊, 放電劣化破壊, トリーイング破壊, 場合によっては熱的破壊など)が同一と判断できる場合に、得られたデータ群が統計的に同じ母集団に属すると考えるのが妥当である。この段階になって初めて、モデル試料のデータの統計的な解析処理により実器の期待寿命の推定が可能となる。ここでは、以下の条件が満足されなくてはならないとした。

- ①モデル試料と実器の破壊モード, 破壊メカニズムなどが同じである。また、破壊場所がいずれも電解強度が高くなっている部分もしくは材料の欠陥分布などと一致する。
- ②一連の実験条件における寿命データがワイブル分布に従う。
- ③実器とモデルの破壊データのワイブル分布の傾き m が同程度である。

7-3 油浸コンデンサの寿命推定方法

7-3-1 実器とモデルの寿命換算の考え方

本検討では、実器素子 $11\mu\text{F}$ とモデル素子 $0.1\mu\text{F}$ の油浸コンデンサ試料をそれぞれ 8 個作製して課電寿命試験を実施した。実際の 200kVA クラスの電力用油浸コンデンサは、この $11\mu\text{F}$ の素子を複数個直並列に接続した構成である。従って、この「実器素子 $11\mu\text{F}$ 」は実器と考えて良い。すなわち、この実器素子が一個絶縁破壊することは、実器が絶縁破壊することと同等である。一方モデル素子 $0.1\mu\text{F}$ は、以下に述べるように「実器素子 $11\mu\text{F}$ 」と全く同じ誘電体(絶縁)材料を使用し同一の誘電体構成で、寸法のみが小さくなっている。

この静電容量の違いは、例えば部分放電特性の違いとして懸念されるが、電力用コンデンサではこの程度の容量差での部分放電特性の違いはほとんど無いと言って良い。これは、電力用コンデンサの部分放電の発生がアルミ箔電極端部で生ずるため⁽¹⁶⁾一旦部分放電が発生すると直ちに 100pC 以上となり、実用的には検出感度の影響を受けにくいためと考えられる。また、モデル試料の静電容量を $0.1\mu\text{F}$ とした理由は、モデル試料として数多く作成すること、実器と同等の特性が得られ、且つ実器とほぼ同じ構造とすることで実器の性能評価をより正しくできるという実績による。ちなみに、Chiba ら⁽⁷⁾ は 100-200pF 程度, Colla ら⁽¹²⁾ は $0.4\mu\text{F}$, Mammootty ら⁽¹⁴⁾ 及び Ratra⁽¹⁵⁾ らは $0.02\mu\text{F}$, 緒志ら⁽¹⁶⁾ は 1000pF の容量にて実験・検討しているが、本研究で検討している様な、モデルと実器との相関関係

の観点からの議論をしていない。

コンデンサの誘電体は、二軸延伸ポリプロピレン(PP)フィルム二枚とコンデンサ薄紙(CD)一枚からなる三層構造で、これに合成絶縁油を真空含浸して作成した。モデル素子の製造条件は、実器のそれと同じとした。モデル素子 $0.1\mu\text{F}$ は幅 8cm, 長さ 166 cm, 実器素子 $11\mu\text{F}$ (実器を構成する素子と同一の大きさ) は幅 54cm, 長さ 2093 cm のアルミ電極箔を用いて反物状に巻回した一般的な構造で、図 7-1 に示した構造である。

コンデンサ素子試料の課電は、定格電圧の 5 倍, 4 倍, 3 倍とし、課電から絶縁破壊に至るまでの時間を寿命時間として求めた。また、課電温度は室温および 80°C とした。絶縁破壊したすべての試料は、分解して破壊場所、破壊形態などを詳細に調べた。

本研究の誘電体構成の油浸コンデンサの寿命試験における絶縁破壊は、その構造上電界が極端に高くなるアルミ電極箔(箔の端部が数ミクロンと非常に薄いために電界集中が著しい)の端部にて発生する⁽¹⁴⁾。アルミ箔端部以外で発生することはまれである。

緒志ら⁽¹⁶⁾は、PP フィルムを使用しない比較的設計電界の低い油浸紙コンデンサ実器について調査し、絶縁破壊が電極箔端部以外で生じていることを示しているが、これは誘電体構成がコンデンサ紙と鉱物油という絶縁構成特有の劣化形態によると考えられる。電極端部で劣化が著しく発生してこの端部に劣化生成物が蓄積していること、さらにこの劣化生成物が電極箔内部まで拡散・浸透して、その結果誘電体であるコンデンサ紙の誘電損失の増大、局部過熱の発生による絶縁破壊に至ったと推定される。

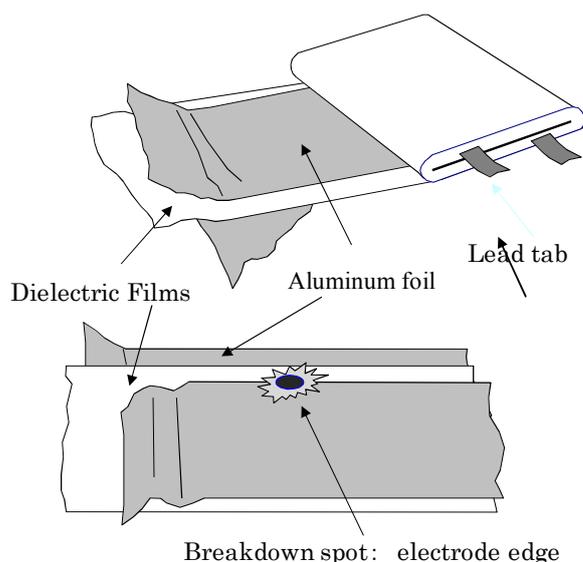


図 7-1 モデルコンデンサと実際のコンデンサ素子の外観

さて、課電試験にて絶縁破壊した実器試料とモデル試料を分解してそれらの絶縁破壊部分を調べた結果、いずれの課電電圧条件においても、破壊場所がアルミ電極箔の端部であること、それらの破壊形態も同じであることなどを確認した。すなわち、本研究の誘電体構成の油浸コンデンサ素子の絶縁破壊は、アルミ箔端部から誘電体を貫通して対向するアルミ箔電極端部に至り、モデルと実器での破壊形態が同じと考えられる。

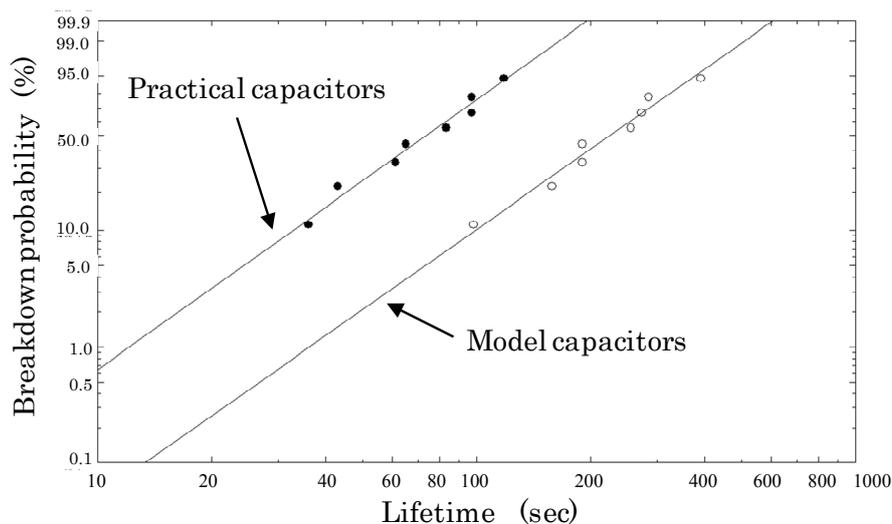


図 7-2 モデルコンデンサと実際のコンデンサ素子のワイブルプロット

こうしたモデルと実器の絶縁破壊形態一致は、回転機や変圧器などの他の電気機器の絶縁試験、機器の事故及び故障形態でも類似することが多い。すなわち、実器の絶縁構成を考慮して絶縁破壊のメカニズムが現象的に解明される場合は、実器の絶縁破壊形態を再現できるモデルを作り上げることが可能である。しかしながら、製造技術と使用材料の絶縁特性を考慮して、個々の機器に適したモデルを考えねばならないと思われる。

次に、課電寿命試験とは別に作製し、定格電圧の4倍で課電寿命試験を行った実器素子11 μF とモデル素子0.1 μF の課電寿命時間のワイブルプロットを図 7-2 に示す。図から明らかな様に、ワイブル分布の傾き「 m 」は実器素子で 2.31, モデル素子で 2.35 であり、ほぼ一致することがわかった。これらワイブルパラメータの計算は、専用に開発した解析ソフトを用いて計算した。従って、試作したコンデンサは、①モデルと実器の破壊メカニズムと形態が同じ、②寿命特性がワイブル分布に従う、③その形状パラメータがほぼ同じであること等が確認出来た。そこで、油浸コンデンサのモデルー実器の寿命換算係数を考える基本として、

電極箔端部の「周長」の比を適用して検討した。

モデル素子と実器スケール素子の電極周長比を求めると $(2,825+54)/(166+8)=16.3$ 倍、また図 7-2 から形状パラメータ $m \doteq 2.33$ として、「モデル-実器の寿命時間の換算係数」は、 $1/n1/m=1/(16.3)^{1/2.33} \doteq 1/3.3$ 倍となる。

実器素子 $11\mu\text{F}$ とモデル素子 $0.1\mu\text{F}$ の寿命データの詳細は省略するが、図 7-2 に示したワイブル分布の平均寿命時間はモデルが 224.5 秒、実器スケールが 76.1 秒であった。従って、実際のスケールファクターは、「 $76.1/224.5 \doteq 3.11$ 」となり、上述した「3.3」とほぼ一致し、以上に述べた考え方の妥当性が検証できた。

7-3-2 実器期待寿命の推定の課題

モデルコンデンサの V-t 特性の一例を図 7-3 に示した。ポリプロピレンフィルムと絶縁紙からなる複合誘電体を採用した本研究の油浸コンデンサの場合、室温以下では温度が低くなるほど寿命が短く、室温以上では温度が高くなるほど寿命が長くなることが示されている。これは、含浸する絶縁油の部分放電-温度特性に関連すると考えられる⁽¹⁶⁾。すなわち、絶縁油の温度が高いと部分放電開始電圧が高くなり、その結果として高温での耐電圧寿命が良くなると考えられているが、その物理的な解釈はまだ曖昧で、論理的には明確にされていない。実用機器の寿命を解析する場合、特に機器の信頼性を検討する場合には、こうした温度の要因も十分に検討しておかねばならない。

V-t 特性の寿命時間データのワイブル分布の一例として、図 7-3 に示すデータの中から室温の定格電圧の 4 倍(4E)と 3 倍(3E)における寿命データのワイブルプロットを図 7-4 にまとめた。ここでは実験の都合上、各課電電圧とも 5 個の試料であった。図 7-4 に示したワイブル分布の形状パラメータは、「 $m = 1.2 \sim 1.3$ 」となり、いずれの課電電圧でもほぼ同じであった。

さらに、絶縁破壊した試料を分解した結果、アルミ箔端部に破壊痕があり、いずれも同じ破壊メカニズム、破壊形態であった。従って、これらの実験データは、課電電圧が異なるものの同じ実験母集団に属すると解釈出来ると考えた。しかし、「実器換算」の場合の試料と同一であるにも拘わらず、前述した「 $m = 2.3$ (図 7-2 に示した)」よりも小さい。

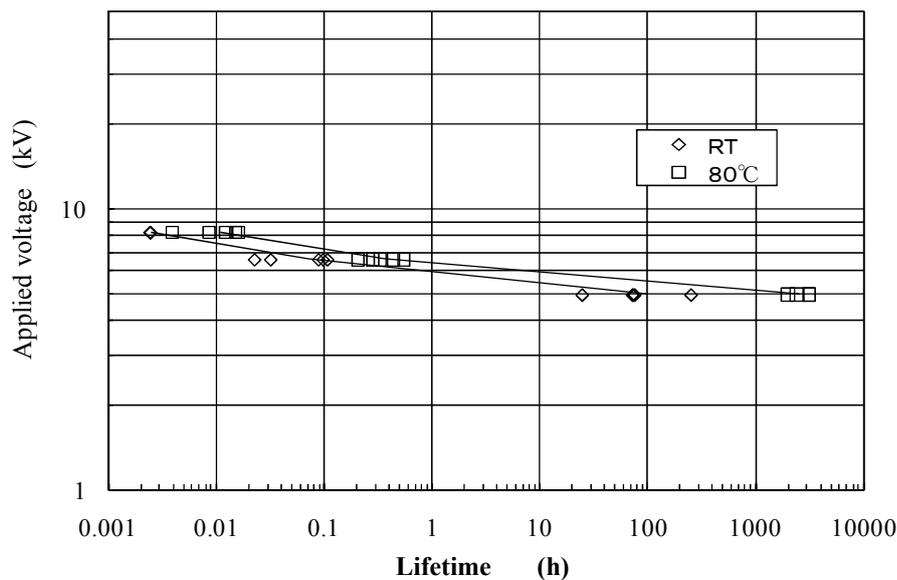


図 7-3 モデルコンデンサの V-t カーブ

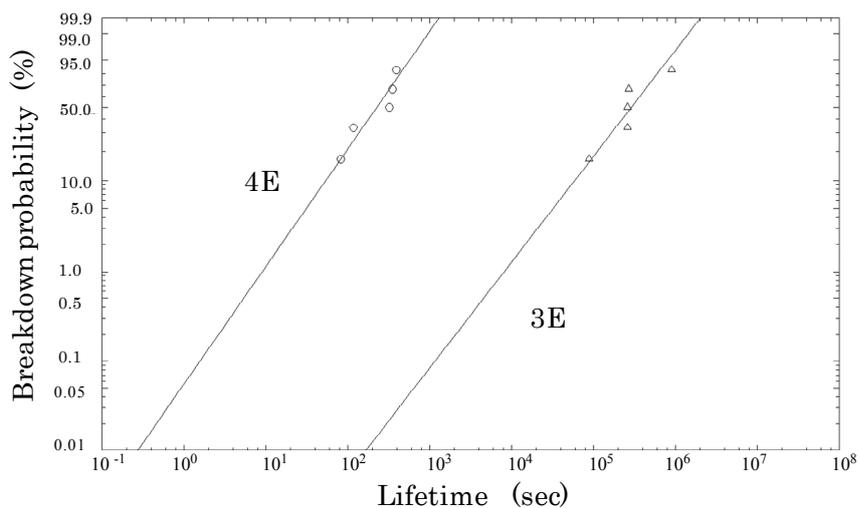


図 7-4 過電圧 (3E, 4E) 印加時のモデルコンデンサの V-t カーブ

寿命換算実験で用いたモデル試料は 8 個, 課電寿命試験 (V-t 特性) 用のモデルは 5 個で, これらはいずれも同一構造のモデルコンデンサ $0.1 \mu\text{F}$ である。一連の実験データについて, サンプル数 $n=5$, および $n=8$ としてワイブル分布, さらにこれらが同じ母集団と仮定した合計 13 個を一群のデータとしたワイブル分布を求め, その結果を図 7-5 に示した (図は, 見やすくするために寿命換算実験モデルのデータ (8 個) を 10 倍, 課電寿命試験用のモデルと寿命換算実験モデル (13 個) を複合した母集団データを 100 倍してひとつのグラフに対比して示した)。

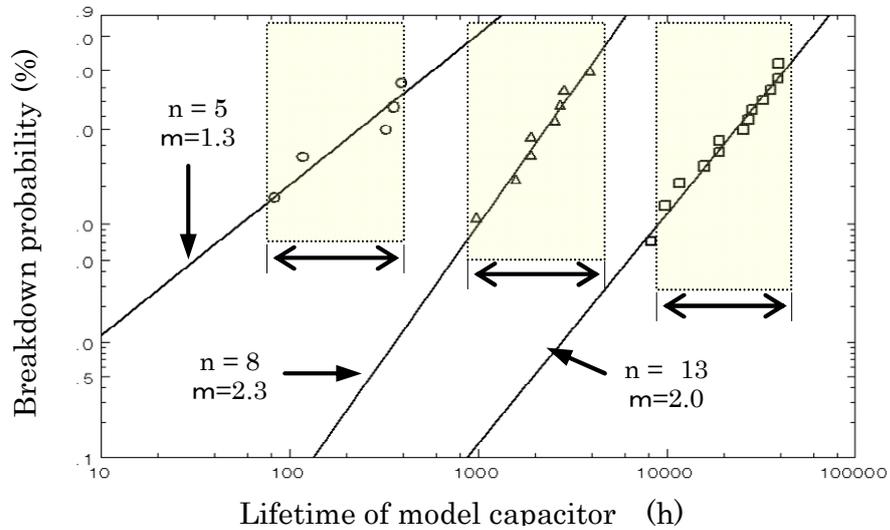


図 7-5 形状パラメータに与えるデータ数の影響

この結果から、各実験のデータは、それらのバラツキの範囲がほぼ同じであり、一つの母集団に属すると判断出来ると考えた。これは、データ数が少ないと統計処理上、ワイブル分布の縦軸に対して縮小した分布となるため「 m 」が小さめになることを示し、実験サンプルのデータ数として 10 個以上が望ましいことを示唆している。

従って、ここで議論している「モデル-実器の寿命換算係数」を求める場合、そのワイブル分布の係数「 m 」は、サンプル数の多いケースである「 $n=13$ 」とした場合の値「 $m=2.0$ 」を採用するのが良いと考えた。

7-3-3 実器の V-t 特性と期待寿命の推定

一般的なワイブル分布による寿命解析では、各課電条件に対するワイブル統計処理を行い、それらの分布に対する傾きである形状パラメータ「 m 」、位置パラメータなどを求めて、各課電電圧における特定の故障率での寿命時間を求めて、寿命曲線を求める。その具体的な手法は、機器や実験データによりケースバイケースである。

この場合の課題は、少ない試料数にて機器の寿命を推定する場合、煩雑さと曖昧さが増してくることである。そこで、本研究のワイブル分布の適用では、前述したように各課電条件の実験で求めたデータの破壊形態が同じで、ワイブル分布の形状パラメータ「 m 」が同じであることを考慮し課電電圧が異なっても同じ母集団に属すると仮定する。これにより、サン

ル数が増加できることになり、より精度の高い検討が可能となる。

各電圧のデータを総合したすべてのデータは、課電劣化と言う物理的要因に対して、本来一つの母集団に属することを意味する。次に、一つの母集団と仮定するすべての実験データ（各課電電圧に対するデータ全体）を用いて、最小二乗法により「期待寿命の近似曲線」を求める。課電電圧が定格電圧の5倍～3倍のすべての寿命データを用いて、時間軸方向への最小二乗法を適用して、近似曲線を計算するとモデル試料の寿命特性として図 7-6 に示す結果が得られた。

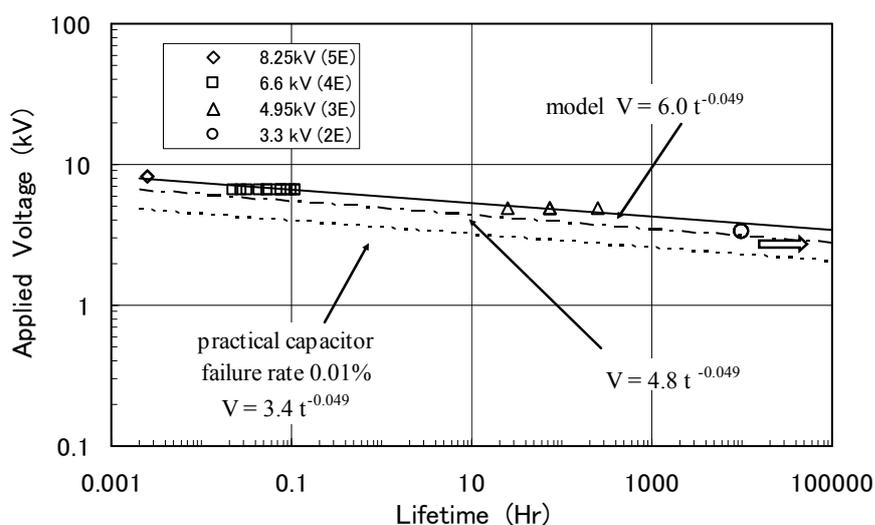


図 7-6 モデルから実器への寿命推定

実器への換算係数は、前述した考え方に従って求める。ここでは、上記で求めた近似式に対してすべての各データを正規化し、この正規化したデータをワイブル統計処理して「モデル-実器」換算のファクターの推定を行う。図 7-7 は、正規化した寿命データのワイブルプロットを示す。ここでは、課電電圧を定格電圧の2倍とした実験では、約1万時間課電したにも拘わらずいずれも未破壊であったため正規化するデータ群から除外した。

正規化して求めたワイブル分布の形状パラメータは、「 $m=1.26$ 」となった。この値は、これまで議論してきた「 $m=2.0$ 」と異なるが、正規化したデータ群における形状パラメータとなるので以降の解析では、この値を用いて前述した考え方に基づく「モデル-実器換算係数 n 」として、 $(296)^{1/1.26} = 92.0$ 倍を得た。

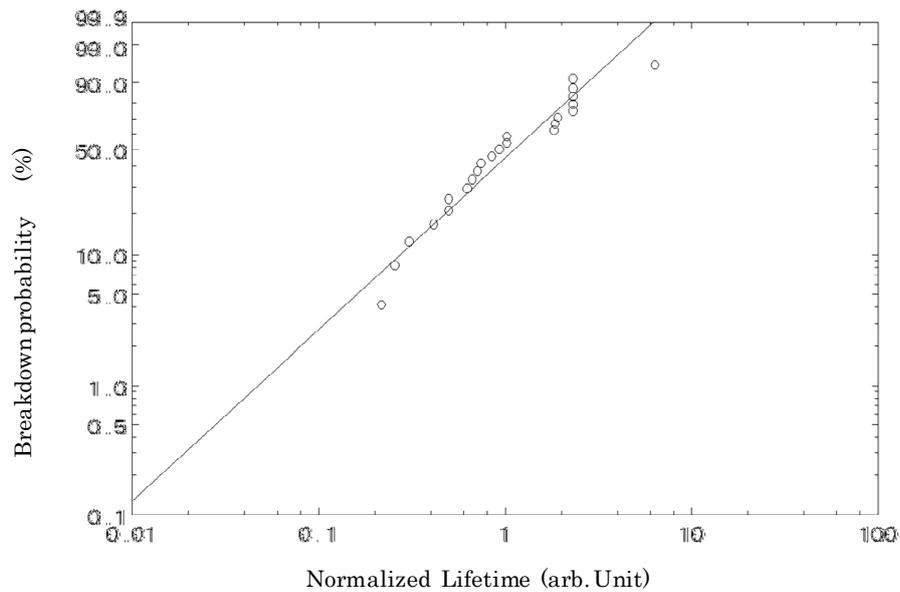


図 7-7 正規化されたワイブルプロット

次に、実用機器の故障率をいくらに想定するかは、機器の信頼度をどのように設定するかであり、大変難しい問題である。本論文では、実用機器の実際の故障率を考慮して、故障率 0.01%に対する寿命式を検討し次式を得た。

モデルの平均寿命式 : $V=6.0 t^{-0.049}$

実器の 0.01%寿命式 : $V=3.4 t^{-0.049}$

その結果を、寿命曲線として図 7-6 に破線で示した。電力用コンデンサの実際の運転では、1.15 倍の過電圧を想定することになっている。そこで、上式を用いて求めた実器の定格電圧の 1.15 倍の過電圧を想定した電圧に対する期待寿命は、約 20 年となる。ちなみに、このタイプの電力用の油浸コンデンサの市場における実際の故障率(事故率)は約 0.002%程度であり、本論文にて検討した期待寿命を検討する場合の故障率 0.01%は実用的には十分と考えている。

7-4 まとめ

本章では、油浸コンデンサを例にして、モデルの寿命特性からワイブル分布を用いて実器の寿命特性を推定する方法について検討し、以下の基本的な寿命解析の考え方を提案した。

(1) 油浸コンデンサの実器の寿命特性は、モデルと実器の電極箔の周囲長の比「 n 」を「モデルー実器換算係数」の基本データとすることにより、モデルコンデンサの寿命特性から推定

することが可能である。

(2) モデルと実器の破壊メカニズムと形態が同じと仮定出来る場合、モデルー実器換算係数は、①モデルの寿命データ（各破壊時間）を近似寿命式で規格化し、②そのワイブル分布の形状パラメータ「 m 」を求めて上記(1)の電極箔の周長比「 n 」から、 $1 / n^{1/m}$ として求められる。

今後、この考え方を他の電気機器、例えばモールド機器への適用拡大を検討する予定である。

第7章の参考文献

- (1) 内田克己, 伊藤泰郎, 宮本昌広, 江原由泰, 瀬川和哉; 「絶縁材料・電気機器の絶縁寿命限界の考え方」, 平成14年電気学会全国大会予稿集第2分冊, 2-S3-1, p223-226, (2002)
- (2) 江原由泰, 浦野孝治, 芳賀義昭, 清水教之, 長尾雅行, 松浦虔士; 「絶縁材料の寿命を決める基本特性」, 平成14年電気学会全国大会予稿集第2分冊, 2-S3-2, p227-230, (2002)
- (3) T. W. Dakin; ” The Endurance of Electrical Insulation ” 第四回絶縁材料シンポジウム予稿集, p147, (1971)
- (4) L. Simoni; ” A New Research into the to the Voltage-Endurance Test on Electrical Insulation ” IEEE Trans. Electr. Insul. EI-8, 3, p76-86 (1973)
- (5) L. Simoni; ” A New Research into the Voltage Endurance of Solid Dielectrics ” IEEE Trans. Electr. Insul. EI-10, 1, p17-27 (1975)
- (6) T. W. Dakin and S. A. Studniarz; ” The Voltage Endurance of Cast and Molded Resin ” Proc. 13th Electrical and electronic Insulation Conference, p318-321 (1977)
- (7) S. Chniba and R. Tobazeon; ” Long Term Breakdown of Polypropylene Films ” Proc. 1st Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, p433-438 (1983)
- (8) R. Kaneko, K. Sugiyama; ” Consideration for dependence of impulse breakdown strength on cable length ” , Trans IEEJ, Vol.93-B No.5, pp213-220 (1973) (in Japanese)
金子隆治, 杉山敬二; 「電力ケーブルの衝撃電圧破壊強度の長さ依存性の検討」電学論誌 93-B, 5, p213-220 (1973)
- (9) H. Hirose: ” A consideration on mathematical models for long term V-t characteristics ” , Trans IEEJ A, Vol.106, No.4, pp185-192 (1986)
広瀬英雄; 「長時間 V-t (電圧-寿命) 特性に用いられる数学モデルについての一考察」電学論誌 A, 106, 4, p185-192 (1986)
- (10) H. Hirose: ” A statistical model of optimum mathematical model selection and lifetime estimation in long-term V-t characteristics ” , Trans IEEJ, Vol.107-A, No.4, pp185-192 (1986) (in Japanese)
広瀬英雄; 「長時間 V-t 特性における最適数学モデル選定と寿命推定の統計的方法」電学論誌 A, 107 4 p185-192 (1986)

- (11) H. Hirose:” Statistical consideration on the V-t characteristic model and Weibull probability distribution” , Trans IEEJ, Vol.1a6-A, No.10, pp1840-848, (1996) (in Japanese)
広瀬英雄 ; 「V-t 則とワイブル分布の統計的考察」 電学論誌 A, 116-A, 10, p840-848 (1996)
- (12) F. Colla, G. Pattini, M. Rinaldi and R. Sasdelli:” Voltage endurance of all polypropylene film impregnated capacitors” , IEE Conf. on Dielectric Materials, Measurements and Application, pp41-44 (1979)
- (13) D. G. Shaw, S. W. Cichanowski, A. Yializis:” A changing capacitor technology - Failure mechanism and design innovation” , IEEE Trans. Elec. Insul. EI-16, 5, PP399-413 (1981)
- (14) K. P. Mammootty and T. S. Ramu:” Properties of castor oil impregnated all-polypropylene and polypropylene-paper capacitors” , IEEE Trans. Elec. Insul. EI-18, 5, PP541-550 (1983)
- (15) M. C. Ratra, H. N. Nagamani and S. Ganga:” Aging of polypropylene film for capacitor application under combined electrical and thermal stress” , IEEE Conf. on Elec. Insul. and Dialect. Phenomena., pp295-300 (1990)
- (16) T. Oshi, S. Tsukao, T. Ishii, S. Itahashi, K. Terao and M. Kanba:” Properties of aged oil impregnated paper capacitor” , Nisshin-Denki Giho, Vol.48, No.1, pp150-22, (2003) (in Japanese)
緒志哲郎, 塚尾茂之, 石井正, 板橋悟, 寺尾薫, 神庭勝; 「電力用油浸コンデンサの経年劣化について」 日新電機技報, Vol. 48, No. 1, pp150-22, (2003)
- (17) T. Umemura, K. Abe, K. Akiyama, Y. Tanaka;” All-film power capacitor with folded electrode Foil” IEEE Trans. Power Delivery, Vol.PWRD-2, 1, p182-188 (1986)
- (18) 日本科学技術連盟 (日科技連) 編: 「信頼性データの解析」 日科技連出版社 (1976)

第8章 総括

8-1 研究成果の要約

近年の社会情勢から、電力流通の高品質化および電力の低コスト化に加えてその防災性能の向上が強く要求されるようになってきている。この防災性能への要求の高まりに応じて、難燃性で小形・軽量を特徴とするモールド変圧器がビルや鉄道用など特に防災性能を要求される場所を中心に使用されている。

本論文においては、モールド変圧器の電気絶縁性能を向上させる上で、モールド変圧器の設計の基礎となるモールド絶縁システム中の微小空気ギャップの絶縁特性、各種電極系における放電形態、残存ボイドと放電電荷の関係ならびに部分放電発生遅れ現象の解消を目的としてX線照射によるエポキシ樹脂中の球状ボイド内放電とボイドサイズ推定方法に関する基礎的な調査・研究を行いその結果をまとめた。以下に各章ごとに得られた研究結果を要約する。

第2章では、モールド絶縁系内に存在する微小空気ギャップの絶縁特性を調査し、金属電極 (MGM)、金属-樹脂電極 (MGI)、樹脂-樹脂電極 (IGI) 系について、Paschen 曲線の「 $0.02 < P \cdot d < 10$, (Pa·m)」領域における放電開始電圧 (火花電圧) について実験・検討を行い、部分放電開始電圧として求めた微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の平均値が従来の Paschen 曲線よりも高くなり、且つ「MGM 電極系 > MGI 電極系 > IGI 電極系」の傾向となることを明らかにした。

また、微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の高い原因がギャップ内の初期電子の不足によることを確認した。さらに、従来の文献を詳細レビュー結果の詳細検討と Paschen ミニマム近傍の実験結果から、現実のモールド絶縁システムの絶縁設計として考慮すべき実用的な Paschen 曲線を提案した。

第3章では、第2章に引き続いてMGM、MGI電極系を用いてPaschenライト、ミニマム及びレフト領域の部分放電挙動について実験検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 文献レビューと Paschen ミニマム近傍領域の実験から、モールド絶縁システムの絶縁設計に有用な「Hackam - Paschen 曲線」を提案した。
- (2) MGM、MGI いずれの電極系においても、繰り返し課電による電荷の堆積などによる放電開始電圧の顕著な影響は認められなかった。
- (3) MGM 電極系では、Paschen ミニマム及びライト領域で『streamer タイプ』の放電発

光, Paschen レフトでは『glow タイプ』の放電発光が観測された。

(4) MGI 電極系では, Paschen 曲線のすべての領域に於いて, グロー状の放電が観測された。これは, 電極間のイオンや電子の密度が低いこと、および放電電流が MGM 電極系よりも小さいことが関係していると思われる。

(5) MGM 電極系および MGI 電極系の放電形態の原理的なイメージを提案した。

第4章では, 実際のモールド変圧器の絶縁エポキシモールド中に存在するボイド PD 特性 ($Q_a - 2a$ 特性) を, Pedersen および安井らの理論を用いて比較・検討を行った。ボイド表面に誘起された電荷が放電により消散する際の電極間の電圧低下 ΔV と絶縁システムの静電容量 C との積で表わされる見掛けの放電電荷 Q_a について両モデルの相違と違いについて検討した。その結果, 二層誘電体モデルでは消失する電荷量が表面電荷モデルと比較して相対的に多くなるので, ΔV がより大きくなり, 結果として二層誘電体モデルの方が, 表面電荷モデルよりも大きな Q_a となると解釈された。

さらに, ボイド内 PD を考慮する上で重要となる Niemeyer らの放電遅れ時間の理論から, ボイドサイズと放電遅れ時間の関係 ($t_{inc} - 2a$ 特性) を検討した。実験は, 特定のサイズの人工的なボイドを含むエポキシ樹脂についての, PD 開始電圧 (PDIV) を得るために行った。ボイドを含むエポキシ樹脂試料への X 線照射量の増加に伴い, PDIV および PDEV 値の両方が減少することがわかった。

第5章では, 様々なサイズの人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて, ボイド内における部分放電挙動の諸特性を明らかにした。さらに, これまでに実施している理論的検討を応用して本実験結果を検討し, 実際のモールド機器の出荷前試験を想定した欠陥 (ボイド) 推定手法の原理を述べた。

第6章では, 人工球状ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて, ボイド内における部分放電の際に発生する放射電磁波の測定, 形状の異なる円柱ボイドへの X 線照射効果について調査を行った結果を述べた。さらに, これまでに実施している基礎的検討を応用して, 実器の 6.6 kV モールド変圧器での部分放電位置標定試験を行った結果についても述べた。

本章の研究により得られた結果は以下である。

1) 人工ボイドを封入したエポキシモールド試料を用いて, ボイド内 PD により発生する放射電磁波の測定および複数のセンサを用いた PD 位置標定に向けた検討についての調査を行った。その結果, ボイド直径 $2a = 0.21$ mm の試料 (放電電荷量数 pC 程度) に対しても

ループセンサを用いて PD 放射電磁波信号を取得できることがわかった。さらに、複数のセンサを用い、PD 放射電磁波信号の到達時間差による検討を行ったところ、実験値と理論値の標定誤差が 5 cm 以内であることがわかった。以上のことからループセンサによる PD 位置標定の可能性が示唆された。

2) 健全および不健全な実器を対象とした実験室レベルでの PD 試験、PD 源位置標定試験を行った。その結果として健全 VT、不健全 VT 両方とも PD が検出された。しかしながら、健全 VT では外部でのコロナ放電が生じている可能性が示唆された。また、不健全 VT で L.S による PD 位置標定を行ったところ高圧側の端子近傍の内部で放電が発生している可能性があることがわかった。

3) エポキシ板を三枚重ねた円柱ボイド試料を用いて、PD 特性に対して X 線照射効果があるか検証を行った。その結果、X 線照射により PDIV、電荷量、位相特性に与える影響がないことがわかった。そのため、円柱ボイドのような電界が強調されるような欠陥については X 線による初期電子供給がなくとも PD が発生することがわかった。

第 7 章では、油浸コンデンサを例にして、モデルの寿命特性からワイブル分布を用いて実器の寿命特性を推定する方法について検討し、以下の基本的な寿命解析の考え方を提案した。

(1) 油浸コンデンサの実器の寿命特性は、モデルと実器の電極箔の周囲長の比「 n 」を「モデルー実器換算係数」の基本データとすることにより、モデルコンデンサの寿命特性から推定することが可能である。

(2) モデルと実器の破壊メカニズムと形態が同じと仮定出来る場合、モデルー実器換算係数は、①モデルの寿命データ（各破壊時間）を近似寿命式で規格化し、②そのワイブル分布の形状パラメータ「 m 」を求めて上記(1)の電極箔の周長比「 n 」から、 $1 / n^{1/m}$ として求められる。

この考え方は、コンデンサ以外の機器にも通じるものであり今後、モールド変圧器などにも適用拡大できると考えている。

今回得た結果を、今後、他の電気機器、例えばモールド機器への適用拡大を図っていく。

8-2 研究成果の意義

本論文は、ビル・鉄道施設などで主流となりつつあるモールド変圧器などのモールド機器の電気絶縁の向上ならびに電気絶縁診断に関する研究についてまとめたものである。

従来からモールド機器の内部絶縁設計の基本として採用されてきた空気の最低火花電圧（絶縁破壊電圧）を表す Paschen ミニマム値は、その実測値のほとんどが直流電圧下で取得されたものが多く交流電圧下で取得されたデータは少ないのが実状であったが本研究では実際のモールド機器が運転される条件である交流電圧下でのデータを取得した。

また、ギャップ長さが 1mm 程度以下の比較的短い領域では従来報告されている Paschen 曲線よりも高い傾向となることを明らかにするとともに、その理由を初期電子の不足に起因するものであると推定した。

また、上述の初期電子不足による破壊電圧の上昇は部分放電の発生遅れ現象に繋がるものであるが、その回避手段のひとつとしてギャップに X 線を照射し初期電子を与えることで回避できることを明らかにするとともに X 線照射によって得られる Paschen 曲線は従来から報告されている火花電圧と一致することを確認した。

本研究において得られた結果により従来からモールド機器の絶縁設計プラクティスとして用いられてきた Paschen ミニマム値を採用することの妥当性を確認することができた。

更には、各種電極における放電形態を詳細に観測し、検討を加えることによって、より有用な「Hackam-Paschen 曲線」を提案した。これにより、今後、絶縁設計の合理化が推進できるものと考えられる。

また、既に 30 年程度フィールドで運転されているモールド機器の絶縁診断を行なう上でその検出感度の向上を実現するための手法のひとつとして X 線照射とその効果を明らかにすることができた。

この研究成果により、フィールドで運転されているモールド機器の診断精度を向上させることが出来るとともに、製造工場における出荷試験においてもより高い診断精度が得られることが期待できる。

8-3 本研究プロジェクトの運営について

本研究の目的のひとつである、産学連携プロジェクトの運営に関して以下に述べる。本研究開発プロジェクトは、第 1 章に示したような背景のもと、三重大学、九州工業大学、東芝産業機器製造(株)、(株)東芝 電力・社会システム技術開発センターの四者が共同研究を行なってきたものである。

このプロジェクトでは、三重大学にモールド絶縁の基礎データ収集と現象解明、九州工業大学に部分放電検出の精度向上研究をメインテーマとして研究活動を進めていただくこと

もに、(株)東芝 電力・社会システム技術開発センターのメンバーが製造者内の研究者としてそれらデータの共同検討を行い、東芝産業機器製造(株)の設計者が、製品への応用検討を進めてきた。

具体的には4者が、月次で参集し実験データの開示・考察・次月の実験方針などを協議することによって情報の共有化と研究方針のレベル合わせを行なってきた。

また、各年度の前期、後期末においては、それぞれの大学にて半期分の研究成果の報告会を開催して半期ごとの研究進捗成果を相互確認するとともに翌期の期初に当期の研究方針検討、各大学ならびに企業側の分担を決めて研究を推進した。年度別の実施内容概要は以下である。

2008年 三重大学：共同研究契約締結、文献調査、実験設備整備

東芝：文献調査、実験設備整備

2009年 三重大学、九州工業大学、東芝の役割分担協議

三重大学：実験開始

九州工業大学：共同研究契約締結、文献・特許調査、実験設備整備

東芝：CAE解析結果の実験結果との対比・検討

2010年 三重大学、九州工業大学、東芝の役割分担協議

三重大学：基礎データ継続収集

九州工業大学：基礎データ継続収集

東芝：CAE解析結果の実験結果との対比・検討

2011年 三重大学、九州工業大学、東芝の役割分担協議

三重大学：実器を想定したモデルの寿命劣化試験

九州工業大学：実器を対象とした部分放電測定システムの構築

東芝：実器の設計への適用検討、実器モデルの製作と寿命評価準備

以上のような活動を進めるとともに、得られた知見はその都度学会等へ論文発表を行った。

(詳細は、本研究に関連して発表した論文を参照願いたい)

これらの活動は、三重の地で変圧器事業を営む東芝産業機器製造(株)と地域の大学である三重大学とが産学連携して共同研究を行なうとともに、その研究成果を共同発表することにより、三重県において学術と産業が一体となり、基礎研究・産業応用・商品化までのプロセスを完結させることが可能であることを示すものであり、地域の有する技術ポテンシャルの高さを対外的に示すとともに地域の技術開発が活性化していることを示すことが

できたと判断できる。

更には、この産学連携に九州工業大学を加えることによって、より大きな地域連携に発展する可能性を有していると考えられる。

以上のように本プロジェクトの目的を達成するための手段のひとつである「東芝産業機器製造(株)―三重大学―九州工業大学の3極体制による産学協同プロジェクト」は、今後の地域イノベーション推進のあり方の一例を示すものであると考える。

謝 辞

本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました三重大学大学院地域イノベーション学研究科 科長 鶴岡信治先生、同大学院地域イノベーション学研究科 教授 坂内正明先生、准教授 萩原克幸先生に深甚なる感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり懇切なるご指導、ご助言をいただきました三重大学大学院工学研究科 教授 中村修平先生、社会連携研究センター 特任教授 梅村時博先生、九州工業大学大学院工学府 教授 匹田政幸先生、助教 小迫雅裕先生に深く感謝致します。

本研究は、東芝産業機器製造（株）、（株）東芝、三重大学ならびに九州工業大学の産学連携共同研究として遂行されたものであります。共同研究推進に多大なるご支援を賜りました（株）東芝 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部 主幹 前田照彦氏、東芝産業機器製造（株）配電機器事業部 静止器製造部 開発設計担当 課長 鈴木勇人氏に深くお礼申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり多大なるご支援をいただきました、横倉邦夫氏、廣瀬達也氏、中村勇介氏をはじめとする（株）東芝 電力・社会システム技術開発センターの方々、東芝産業機器製造（株）の諸先輩方、同僚の皆様に心よりお礼申し上げます。

本研究に関して発表した論文

(1) 学術論文誌

	論文題目	会議名称・発表年	共著者
01	モデルと実器の換算係数を導入した油浸コンデンサの新しい課電寿命推定方法の検討	電気学会論文誌 B、第 131 巻、第 3 号、pp. 329-334 (2011)	東山 雅一、秋山 憲一 前田 照彦、中村 修平 梅村 時博、匹田 政幸
02	モールド絶縁における微小空気ギャップの絶縁特性	電気学会論文誌 B、第 131 巻、第 7 号、pp. 630-636 (2011)	東山 雅一、鈴木 勇人 廣瀬 達也、中村 勇介 前田 照彦、葉山 貴志 中村 修平、梅村 時博 小迫 雅裕、匹田 政幸
03	エポキシモールド絶縁システム中の人工ボイド内部分放電現象の検討	電気学会論文誌 A、第 131 巻、第 9 号、pp. 785-791 (2011)	高田 一、林 昌幸 小迫 雅裕、匹田 政幸 中村 修平、梅村 時博 中村 勇介、廣瀬 達也 東山 雅一
04	エポキシ絶縁中ボイド放電における X 線照射効果の物理的考察 (研究開発レター)	電気学会論文誌 A、第 132 巻、第 2 号、pp. 154-155 (2012)	林 昌幸、高田 一 小迫 雅裕、匹田 政幸 中村 修平、梅村 時博 中村 勇介、廣瀬 達也 東山 雅一
05	X 線照射によるエポキシ樹脂中の人工ボイド内部分放電特性の検討	電気学会論文誌 A、第 132 巻、第 4 号、pp. XXX-XXX (2012) (電学論誌採録決定済み)	東山 雅一、高田 一 林 昌幸、小迫 雅裕 匹田 政幸、中村 修平 梅村 時博、中村 勇介 廣瀬 達也

(2) 国際会議

	論文題目	会議名称・発表年	共著者
01	Breakdown Voltage of Inter electrode Gap between Sphere-plane Electrodes under ac Voltage	2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI2010) 6-10 Jun. 2010, San Diego, USA (2010 年)	M. Higashiyama, T. Hayama, S. Nakamura, T. Hirose, M. Hikita and M. Kozako
02	Partial Discharge Phenomena in Artificial Cavity in Epoxy Cast Resin Insulation System	2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI2010) pp. 660-664 6-10 Jun. 2010, San Diego, USA (2010 年)	M. Hikita, M. Kozako, H. Takada, M. Higashiyama, T. Hirose, S. Nakamura and T. Umemura
03	X-ray Irradiation Induced Discharge of Spherical Void in Epoxy Resin	IEEE Electrical Insulation Conference 2011 5-8 June. 2011, Annapolis, USA (2011 年)	M. Hikita, M. Kozako, H. Takada, M. Hayashi, M. Higashiyama, T. Hirose, Y. Nakamura, S. Nakamura and T. Umemura

04	Study on Time Lag of Void Discharge in Epoxy Resin by Considering Attenuation of X-ray Irradiation Dose	2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials 6-10 September, 2011, Kyoto, Japan MVP2-20, pp. 405-408 (2011年)	M. Hayashi, H. Takada, M. Kozako, M. Hikita, S. Nakamura, T. Umemura, M. Higashiyama
----	---------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------

(3) 学会発表

	論文題目	会議名称・発表年	共著者
01	球対平板電極における部分放電開始電圧とパッシェン則との比較	平成 21 年電気学会全国大会 No. 1-065 3月 17-19 日, 北海道 (2009 年)	今西 悠規、中村 修平 廣瀬 達也、梅村 時博、 東山 雅一
02	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 P-5 8月 26-28 日, 松江 (2009 年)	北村 真哉、葉山 貴志、 中村 修平、梅村 時博、 小迫 政裕、大塚 信也、 匹田 政幸、廣瀬 達也、 東山 雅一
03	モールド絶縁システム中のボイド径と部分放電電荷量の関係に関する調査	第 40 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム D-6 8月 26-28 日, 松江 (2009 年)	高田 一、小迫 雅裕、 大塚 信也、匹田 政幸、 中村 修平、梅村 時博、 廣瀬 達也、東山 雅一
04	エポキシモールド変圧器中のボイド径と部分放電電荷量の関係に関する研究	平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会 05-2P-03 9月 28-29 日, 飯塚 (2009 年)	高田 一、小迫 雅裕、 大塚 信也、匹田 政幸、 中村 修平、梅村 時博、 廣瀬 達也、東山 雅一
05	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 No. 1 3月 17-19 日, 東京 (2010 年)	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、廣瀬 達也、 東山 雅一
06	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 No. 1-034 3月 17-19 日, 東京 (2010 年)	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、廣瀬 達也、 東山 雅一
07	エポキシ誘電体中ボイド試料の部分放電開始に対する X 線照射効果の検討	平成 22 年電気学会全国大会 No. 1-035, 第 1 分冊 p. 44 3月 17-19 日, 東京 (2010 年)	高田 一、林 昌幸、 小迫 雅裕、大塚 信也、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、廣瀬 達也、 東山 雅一
08	エポキシ樹脂中の異なるボイド径に対する部分放電特性の X 線照射効果	平成 22 年度電気関係学会九州支部連合大会 05-2P-07, p. 558 9月 25 日-26 日, 福岡 (2010 年)	林 昌幸、吉田 哲志、 高田 一、小迫 雅裕、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、中村 勇介、 廣瀬 達也、東山 雅一

09	パッシェン則各領域の放電メカニズムの検討	第41回電気電子絶縁材料システムシンポジウム P-2 11月15日-17日, 秋田 (2010年)	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
10	X線照射によるエポキシ樹脂中の球状ボイド内放電とボイドサイズ推定方法の提案	第41回電気電子絶縁材料システムシンポジウム A-4, pp. 35-40 11月15日-17日, 秋田 (2010年)	高田 一、吉田 哲志、 林 昌幸、小迫 雅裕、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、中村 勇介、 廣瀬 達也、東山 雅一
11	エポキシ樹脂中ボイド放電におけるX線照射効果の物理的考察	第41回電気電子絶縁材料システムシンポジウム P-12, pp. 219-220 11月15日-17日, 秋田 (2010年)	林 昌幸、吉田 哲志、 高田 一、小迫 雅裕、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、中村 勇介、 廣瀬 達也、東山 雅一
12	ツイストペアの交流課電部分放電現象(1) - 気圧によるPDIVの変化 -	平成23年 電気学会全国大会 No. 1-094 3月16-18日, 大阪 (2011年)	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
13	球対平板電極系の交流課電部分放電現象(3) - Paschen 則各領域のPDIVに及ぼすX線照射効果 -	平成23年 電気学会全国大会 No. 1-093 3月16-18日, 大阪 (2011年)	中村 修平、葉山 貴志、 梅村 時博、小迫 雅裕、 匹田 政幸、廣瀬 達也、 中村 勇介、東山 雅一
14	X線照射によるエポキシ樹脂中球状ボイド内における部分放電発生位相特性	平成23年 電気学会全国大会 No. 2-068 3月16-18日, 大阪 (2011年)	高田 一、吉田 哲志、 林 昌幸、小迫 雅裕、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、中村 勇介、 廣瀬 達也、東山 雅一
15	X線照射線量減衰を考慮したエポキシ樹脂中のボイド放電遅れ時間の検討	平成23年 電気学会全国大会 No. 2-069 3月16-18日, 大阪 (2011年)	林 昌幸、吉田 哲志、 高田 一、小迫 雅裕、 匹田 政幸、中村 修平、 梅村 時博、中村 勇介、 廣瀬 達也、東山 雅一
16	球状ボイドを含むエポキシモールド絶縁モデルにおけるX線照射による部分放電位置標定の基礎的検討	平成23年度電気関係学会九州支部連合大会 04-2P-03 9月26日-27日, 佐賀 (2011年)	林 昌幸、卷木 翔平、 小迫 雅裕、匹田 政幸、 中村 修平、梅村 時博、 中村 勇介、広瀬 達也、 東山 雅一
17	円柱形ボイドを含むエポキシの部分放電特性のX線照射効果	平成23年度電気関係学会九州支部連合大会 04-2P-04 9月26日-27日, 佐賀 (2011年)	卷木 翔平、林 昌幸、 小迫 雅裕、匹田 政幸、 中村 修平、梅村 時博、 中村 勇介、広瀬 達也、 東山 雅一