

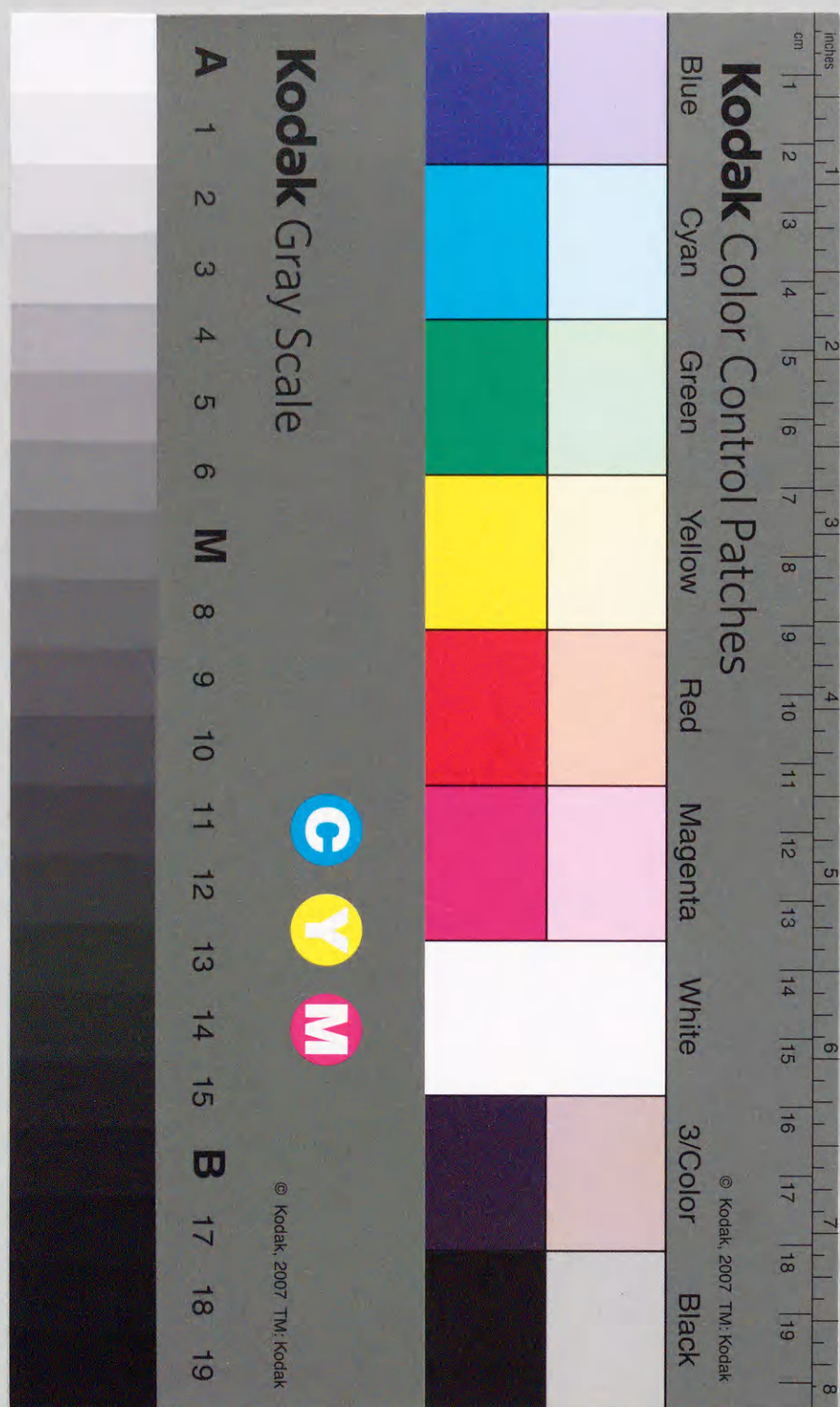
高分子の部分酸化還元と  
その部分酸化に関する研究

1981年12月

第11巻(第2号)

石田隆弘

東京理科大学





①

高分子の部分放電劣化と  
群小部分放電に関する研究

1992年12月

博士（工学）

石 田 隆 弘

豊橋技術科学大学



## 論文要旨

論文題目	高分子の部分放電劣化と群小部分放電に関する研究
------	-------------------------

合成高分子材料は、その優れた電気絶縁性、機械的特性および化学的安定性などから電気絶縁材料として広く用いられている。絶縁体中や絶縁体に接する導体近傍にボイドが存在した場合には、部分放電 (Partial Discharge : PD) が発生する。PDは、高分子絶縁材料の寿命を決定する主要因の一つであると広く認識されている。PDが引き起こす劣化の影響は、電力機器の高電圧化、高電界化が進むにつれて大きくなり、電力機器の長期信頼性に障害を与える。従って、PDによる長期絶縁劣化現象の解明および発生の防止が電力機器の高信頼性化のための重要な課題である。さらに、内部部分放電劣化試験において、放電電荷量が非常に小さく、放電の発生頻度が非常に高い群小部分放電 (Swarming Pulsive MicroDischarges : SPMD) の存在が確認され、その危険性が報告された。このため、部分放電現象を詳細に検討する事が可能な部分放電特性解析装置 (ComputerAided Partial Discharge Analyzing System : CAPDAS) を開発した。さらに、群小部分放電を定量的に評価できる新しいパラメータとして放電群小率を導入した。本論文では、これらの新しい技術を用いて、部分放電劣化と群小部分放電の発生について検討し、得られた結果について述べている。



第1章では、序論として、本研究の目的と背景および本論文の概要を述べている。

第2章では、本研究に関連する従来の研究についてまとめている。

第3章では、部分放電現象を詳細に検討する事が可能な部分放電解析装置(CAPDAS)の概要、計測方法および得られるデータについて述べている。この装置は、パルス法とブリッジ法の二つの部分放電検出方法を併用しており、パーソナルコンピュータにより部分放電特性を統計的に解析することが可能である。二つの検出方法を併用することにより、従来困難であった群小部分放電の定量的な解析を行うことを可能にしている。さらに、放電の群小化を定量的に評価するパラメータとして新たに定義した放電群小率について述べている。

第4章では、針状のボイドをもつ試料を用いて、トリーが発生する前後の部分放電特性の変化に注目して、絶縁材料が破壊にいたるまでの部分放電特性の変化を調べた。その結果、トリーが発生する前段階に放電形態が群小部分放電に移行する傾向が認められ、さらに絶縁体表面の侵食・劣化と群小部分放電の発生に大きな関連性があることが明らかとなった。

第5章では、開放ボイド試料を用いて、放電の群小化を引き起こす要因について調べた。その結果、従来から放電の群小化の要因とされてきたボイド内の圧力変化や気体組成の変化のない開放ボイド系試料においても放電が群小化することが明らかとなり、ボイド表面の劣化が群小部分放電の発生に大きく寄与していることがわかった。

第6章では、模擬表面劣化試料を用いて表面の荒れの電極依存性

を測定し、ボイド表面の荒れが放電の群小化に与える影響について調べた。その結果、表面が荒れた場合には放電開始電圧および消滅電圧が低下し、放電が群小化の傾向を示すことが明らかとなった。さらに、表面の荒れが負となる極性において群小化がより進むことが明らかとなり、ボイド表面の荒れが放電の群小化の要因の一つとなることが示唆された。

第7章では、模擬表面劣化試料を用いて部分放電特性を測定し、電圧依存性や周波数依存性などから、放電の群小化の新たな要因について調べた。その結果、放電の群小化は表面の荒れが大きくなるに従い促進され、さらに電圧の変化率 $dV/dt$ が大きくなると促進されることが明らかとなった。また、内部部分放電特性の周波数加速試験を行う場合には、単純な意味での周波数加速の等価性が失われるため注意が必要であることが明らかとなった。

最後に第8章では、本論文の総括を述べるとともに、今後の研究に対する、いくつかの課題について言及している。



## Summary

Title : Study on Internal Partial Discharge Degradation and  
Swarming Pulsive Microdischarges in Polymers

Polymers are generally being used as the insulator because of its superior electrical, mechanical and chemical performance. When there is an internal void within the insulator or between conductor and insulator, partial discharges (PD) occur in the void under the voltage application. It is generally recognized that PD degradation phenomenon is one of the important factors which determine the life of the polymeric insulator. With the increase in design stress of power apparatuses, PD degradation decreases their long-term reliability. Therefore it is imperative to clarify the long-term PD degradation characteristics and to prevent PD degradation for the better reliability of power apparatuses. Furthermore the swarming pulsive microdischarges (SPMD) and their harm have been recognized in PD degradation because SPMD practically tend to be undetectable by the conventional PD pulse measuring system behind the noise. Therefore, a personal-computer-aided PD analyzing system (CAPDAS) suitable for the study of the SPMD which incorporate both corona pulse

analyzing system (CPAS) and balanced Lissajous figure method system integrating corona charge (bridge method system) has been developed. In the course of study the author introduced a new PD parameter, SPMD ratio, for a quantitative analysis of SPMD. Using this new technique, the PD degradation and the appearance of SPMD are investigated and discussed in detail.

In chapter 1 as the introduction of this study, the purpose and the background of this thesis are stated.

In chapter 2, the forerunners' studies concerned with this thesis are summarized.

In chapter 3, the outline of CPAS and bridge method system forming CAPDAS suitable for the study of SPMD and the typical data obtained are described. CAPDAS processes PD signals in two ways : a conventional pulse charge detection method (CPAS) and a balanced Lissajous figure method (bridge method system). It can analyze the PD signals statistically with the personal computer. The differences of the charge integrals of both positive and negative PD pulses for the corresponding phase in a cycle measured by these two methods provide a good quantitative measure of SPMD. With a simple calculation a new PD parameter, the SPMD ratio, is introduced by the author to analyse SPMD quantitatively.

In chapter 4, it is clarified by using needle void specimens that SPMD appears just before the tree initiation.

In chapter 5, it is clarified by using an open void



specimen that there are another factor affecting SPMD namely the void surface roughness besides already reported factors, such as gaseous pressure in void and a gaseous fraction of oxygen in void.

In chapter 6, by changing the void surface roughness of the specimen, its effect on the appearance of SPMD was studied and turned out evident.

In chapter 7, the dependence of SPMD ratio on the magnitude and frequency of applied voltage was studied and a new factor, the instantaneous change rate of the applied voltage, was found to affect the appearance of SPMD.

In chapter 8, main results and conclusions throughout the investigations in this thesis are summarized.

## 高分子の部分放電劣化と群小部分放電に関する研究

### 目次

ページ

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の目的と背景	1
1.2	本論文の概要	3
1.3	参考文献	4
第 2 章	本研究に関するこれまでの研究	6
2.1	まえがき	6
2.2	部分放電現象	6
2.2.1	単一媒質中における部分放電	9
2.2.2	等価回路	11
2.3	部分放電による劣化	12
2.3.1	材料の物理・化学変化	12
2.3.2	密閉ボイド劣化	13
2.3.3	開放ボイド劣化	15
2.3.4	材料劣化におよぼす種々の要因	16
2.3.5	ボイドからトリーへの転換	16
2.4	部分放電の検出法	17
2.4.1	電氣的検出法	17
2.4.2	光および音響の検出	19
2.4.3	コンピュータを用いた計測	20
2.5	試験方法	22
2.5.1	電極の種類	22
2.5.2	電圧加速とその限界	26
2.5.3	周波数加速とその限界	28
2.6	参考文献	28



第3章	部分放電特性解析システム	33
3.1	まえがき	33
3.2	部分放電検出	33
3.2.1	パルス法による部分放電検出	35
3.2.2	ブリッジ法による部分放電検出	37
3.2.3	パルス法とブリッジ法の比較	38
3.3	部分放電特性解析システムの計測・計算処理	41
3.4	部分放電特性諸量の算出	43
3.4.1	部分放電分布特性(パルス法)	43
3.4.2	部分放電特性諸量(ブリッジ法)	45
3.4.3	総放電電荷量と総放電エネルギー	48
3.5	放電群小率の導入	49
3.5.1	群小部分放電	49
3.5.2	放電群小率の定義	50
3.6	参考文献	52
第4章	針状ボイド試料の部分放電特性	54
4.1	まえがき	54
4.2	試料	55
4.3	実験方法	56
4.4	実験結果	57
4.5	検討	61
4.6	まとめ	65
4.7	参考文献	66
第5章	開放ボイド試料の部分放電特性	67
5.1	まえがき	67
5.2	試料	68
5.3	実験方法	70
5.4	実験結果	71
5.5	検討	75
5.6	まとめ	76
5.7	参考文献	77

第6章	模擬表面劣化の電極依存性	79
6.1	まえがき	79
6.2	試料	79
6.3	実験方法	81
6.4	実験結果	82
6.5	検討	86
6.6	まとめ	88
6.7	参考文献	89
第7章	模擬表面劣化試料の部分放電特性	90
7.1	まえがき	90
7.2	試料	90
7.3	実験方法	92
7.4	実験結果	92
7.5	検討	95
7.6	まとめ	97
7.7	参考文献	98
第8章	総轄	100
8.1	本研究により得られた知見	101
8.2	今後の課題と問題点	105
8.3	参考文献	106
謝辞		107
本研究に関する業績		108



## 第 1 章 序 論

### 1.1 本研究の目的と背景

社会情勢は高度成長から安定成長に推移してきたが、この成長の一端を担ってきたのは、他ならぬ電気・電子工学である。工業社会の成長に伴い電力需要は増加の一途をたどり、電力供給を支える各種電力機器の高性能化、高信頼化の要求が高まると共に、省スペース化および小型化の要求も高まってきた。この要求に応える技術的要因の一つは、まさに電気絶縁技術である。

電気絶縁材料は電力機器の絶縁部を構成すると共に、構造材としての働きも持っているため、優れた絶縁性能を有することはもちろん、耐熱性、加工性、圧縮・引っ張り・曲げ等に対する機械的特性、化学的安定性なども同時に要求される。この要求は、機器の高性能化、高信頼化および小型化が進むと共に、さらに厳しいものとなってきた。

電力機器の絶縁性能を支える電気絶縁材料は、時間の経過と共に電氣的、機械的、熱的ストレスなど、多くの物理的、化学的ストレスを受け劣化する。これらの中で、電氣的劣化に属する部分放電劣化は、各種合成高分子絶縁材料の電気絶縁性能を劣化させる主な要因の一つと考えられ、古くから注目を集めている。特に近年機器の高電圧化が進むにつれ、部分放電による絶縁材料の劣化は大きな問題となり、この劣化機構の解明が強く望まれている。しかし、部分放電はその発生に統計的時間遅れや電子なだれの発生から放電が完了するまでの形成遅れを有し、また個々の放電の広がりもばらつき



を含み、さらに放電による劣化も経時変化を持つため、個々の放電の放電電荷量や放電エネルギーなどを人為的に一定とすることは難しく、部分放電を介して進行する絶縁材料の劣化条件を一定にすることは困難なものとなっている。実際に、試料に一定電圧を加えて行う課電試験では、放電電荷量計測や寿命試験の結果は試料により大きなばらつきを持ち、その評価に大きな支障をきたしている。このように、部分放電による絶縁材料の劣化機構の解明や放電の正確な計測方法、材料の耐久性の適切な評価方法などはいまだに確立されたものとはなっていないため、これらに対する有効な試験方法や評価技術の確立は早急に望まれており、精力的に研究が進められている<sup>[1]</sup>。

最近では、高電圧機器、特にモールド機器では絶縁材料のモールド技術が向上し、大きなボイドはほとんど含まなくなってきたが、絶縁層と電極界面に存在する残留ボイドや、機械的応力などによって発生する剥離ボイドやクラックなどで発生する部分放電劣化が問題となってきており、内部放電、特に微小な密閉空間中での内部部分放電の試験方法の開発に焦点が向けられるようになってきた。ところが、部分放電劣化試験において、電圧印加を続けていく間に、通常の放電検出に使用される電流パルス法による放電検出方法では、検出される放電電荷量が徐々に小さくなり、ついには放電が検出されなくなり、一見放電が消滅したように観測される現象が起こった。しかし、光電子増倍管を用いた放電検出方法により、一見放電が消滅したように観測された時点においても、通常の部分放電に比べて放電電荷量が非常に小さく、放電の発生頻度が非常に高い放電が発生していることが確認された<sup>[2]</sup>。この放電は、一般に群小部分放

電と呼ばれている。また、放電が通常の放電形態から群小部分放電に移行した後も劣化が進行し、最終的には絶縁材料の全路破壊に進展することから、その発生原因や発生機構の解明が望まれてきている。これに対する報告はいくつかあるが<sup>[3]</sup>、詳細は明らかにされていない。

本論文の目的は、高分子材料であるエポキシ樹脂を中心にP M M A (Polymethyl methacrylate)やガラス板を使用して、内部部分放電を様々な条件下で計測することにより、絶縁材料の劣化機構、特に群小部分放電の発生原因、発生機構を解明することである。

## 1.2 本論文の概要

本論文は、8章からなる。

第1章では、序論として、本研究の目的と背景および本論文の概要を述べている。

第2章では、本研究に関するこれまでの研究についてまとめている。

第3章では、従来から部分放電検出に使用されている電流パルス法と、群小部分放電の検出も可能なブリッジ法の二つの部分放電検出方法を併用し、両方式で検出した信号をパーソナルコンピュータを用いて統計的に解析することにより、従来困難であった群小部分放電の解析を行うことが可能な部分放電解析システム(CAPDAS)の概要、計測方法および得られるデータについて述べている。さらに、放電の群小化の定量的評価を行う指針として新たに定義した放電群小率についても述べている。



第4章では、針状のボイドをもつ試料を用いて、トリ－が発生する前後の部分放電特性の変化について述べており、絶縁材料が破壊にいたるまでの部分放電特性の変化について明らかにしている。

第5章では、開放ボイド試料を用いることにより、従来から放電の群小化の要因として示されてきたボイド内の気圧変化や気体組成の変化などの他にも、放電を群小化に導く要因としてボイド表面の荒れの影響が示唆されたことを明らかにしている。

第6章では、模擬表面劣化試料を用いて電極依存性を測定することにより、表面の荒れが放電の群小化を引き起こす要因となり、ボイド表面の荒れが負極性となった場合に放電の群小化が促進される事を明らかにしている。

第7章では、模擬表面劣化試料を用いて部分放電特性を測定し、電圧依存性や周波数依存性などから、ボイド表面の荒れが放電の群小化を引き起こす要因であり、放電の発生間隔が短くなると前の放電で発生した空間電荷や絶縁体表面の電荷の影響により放電の群小化が促進される事を明らかにしている。

第8章では、本論文の総括を述べるとともに、今後の研究に対するいくつかの課題について言及している。

### 1.3 参考文献

- [1] 例えば、電気学会技術報告：「部分放電劣化」，II-164 (1984)
- [2] 北村，平林：「エポキシ樹脂における内部部分放電の経時変化」，電気学会論文誌A，103巻，9号，pp.507-514 (1983)

- [3] 井関，竜田：「部分放電における群小放電」，絶縁材料研究会資料，EIM-83-45，pp.55-62 (1983)



## 第2章 本研究に関するこれまでの研究<sup>[1]</sup>

### 2.1 まえがき

部分放電による絶縁材料の劣化は機器、ケーブルなどの高電圧化に伴って近年ますます大きな問題となり、放電の正確な計測方法や材料の耐久性の適切な試験方法の確立あるいは材料の劣化機構の解明などが国際的にも取り上げられるようになった。最近では内部放電、それも図2.1に示すような絶縁体に含まれるボイドや機械的な力によって生じた剥離・クラック等の微小な密閉系の内部放電の試験方法の開発に関心が向けられるようになってきた。

本章では、部分放電現象、材料の劣化、検出方法、材料試験方法など本研究に関連するこれまでの研究の概要を述べる。

### 2.2 部分放電現象

部分放電は、電圧を印加した金属導体の突起部分に生ずる不平等電界領域や、固体絶縁体中のボイドや液体絶縁体中の気泡などの気

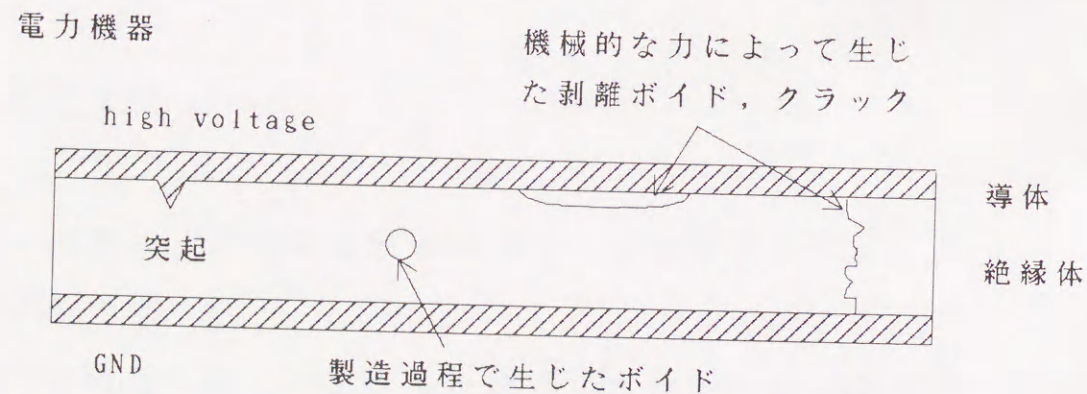


図2.1 絶縁体中の部分放電発生場所

ボイド試料		開放型試料
絶縁体中	金属電極と接する	
<p>注入ボイド 埋め込みボイド パンチホールボイド</p>	<p>パンチホールボイド 剥離ボイド トリーイング試料</p>	<p>6φ IEC(b) 球対平板</p>

図2.2 種々の部分放電試料

層部分に発生する部分的な放電現象である。気体絶縁体では比較的容易に部分放電が発生するが、固体や液体の媒質中でも部分放電が起こることは考えられる。しかし、この部分放電が導体突起部と固体や液体との界面に存在する気層部分を介して起こるのか、あるいは固体や液体自体の部分的破壊現象であるかは簡単には判別できない。いずれにしても、固体や液体中に部分的破壊が生ずれば必ず気層部分が発生することになり、その気層部分において後続する部分放電が起こると考えられる。

一方、実用的な電気絶縁構成中への気層部分の存在は避けられないものであり、図2.2に実際に存在すると思われる気層を模擬して、ボイドを固体絶縁体中に作り部分放電の研究が行なわれている。いずれも固体絶縁体中のボイドや剥離、ケーブル絶縁の突合せギャップあるいは液体絶縁体中の気泡を模擬したものである。これらの気層部分の誘電率は周囲媒質より低いため電界強調が生じ、絶縁破壊の強さの低い気体で部分放電が起こる。図2.3に単一ボイドを含む



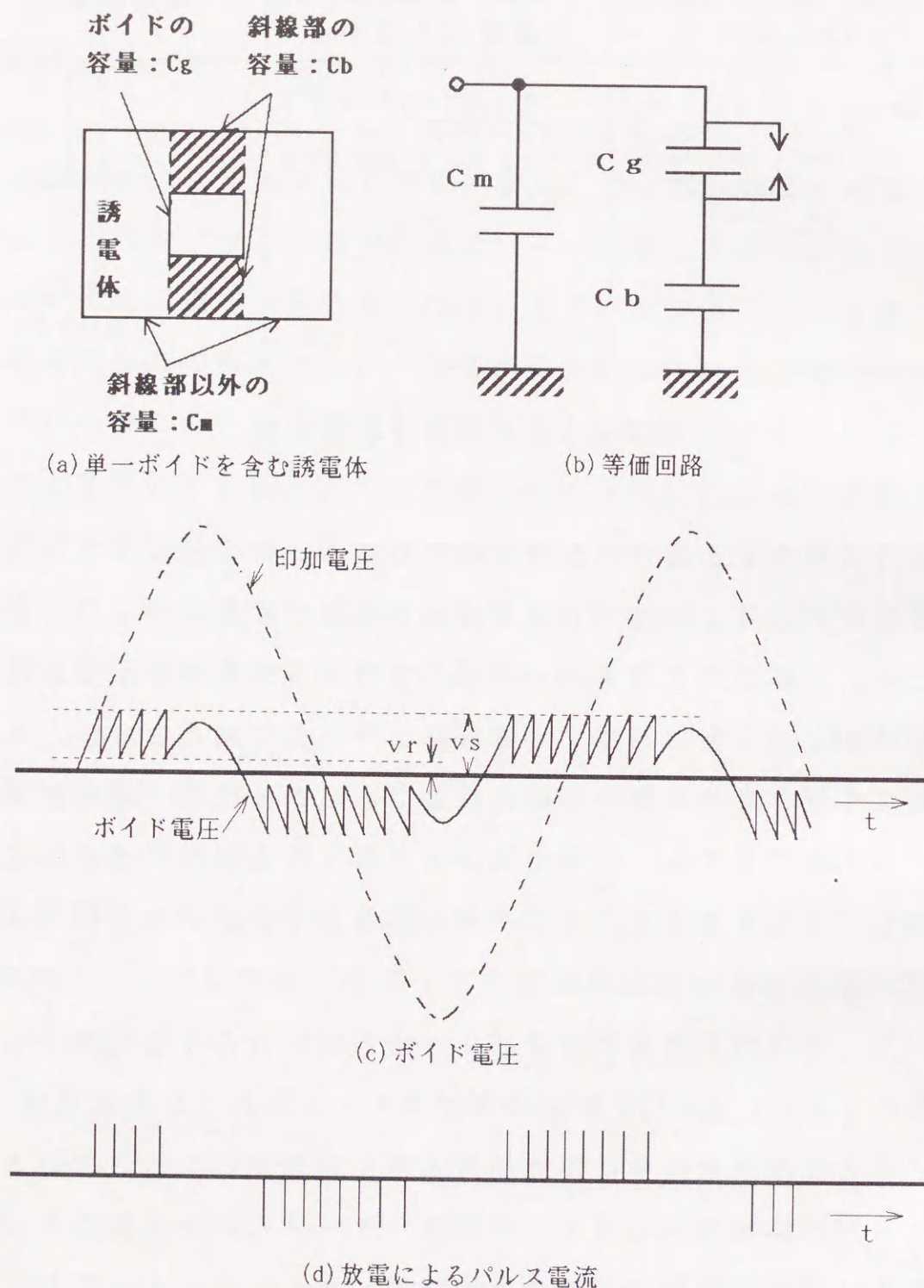


図2.3 単一ボイドを含む絶縁体の内部放電発生モデル

誘電体中で発生する内部部分放電をモデル的に表した図を示す。図2.3(a)に示すような単一ボイドを含む誘電体の等価回路はボイド部の容量を $C_g$ 、ボイドと直列な部分の容量を $C_b$ 、その他の部分の容量を $C_m$ とした場合図2.3(b)のような等価回路として表される。誘電体に電圧を印加するとボイド部には破線のような印加電圧が加わる。しかしボイド内は気体であるため気体の放電電圧( $v_s$ )に達するとボイド内で放電が発生し、ボイド両端の電圧は残留電圧( $v_r$ )まで急激に低下し、同時に図2.3(d)のような放電によるパルス電流が流れる。放電が発生した後も印加電圧は上昇するため、ボイド部の電圧は再び上昇して $v_s$ に達すると放電が発生し、これを繰り返す。印加電圧がピークを越えるとボイド部の電圧は先ほどとは逆極性になり、放電も逆方向に発生して逆極性のパルス電流が流れる。ここで注意すべき点は、図2.3(d)に示すように電源位相の負のピークから正のピークの間には発生する放電が正極性放電であり、正のピークから負のピークの間には発生する放電が負極性放電となる事である。以下、部分放電に関する研究について述べる。

#### 2.2.1 単一媒質中における部分放電

##### I. 気体中の部分放電

気体中の針対平板電極間の部分放電については、その放電開始電圧がバッシュェン則によりほぼ決定されることがわかっており、さらに部分放電の特性に関しても十分解析がなされている<sup>[2]</sup>。

部分放電の発生している領域においては電子、正負イオン、励起



分子などの放電生成物が存在するが、それらの時間的変化や相互作用などが、固体絶縁体の劣化作用との関連で注目されている。酸素や水蒸気雰囲気中でのオゾンやイオン種の分析が行われたり<sup>〔3〕</sup>、空气中あるいは窒素と酸素の混合気体中で生成される分子について、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ が多いが $\text{O}_3$ と $\text{HNO}_3$ は寿命が短く、それらの分解過程で生ずる原子状酸素が高分子の劣化を促進するという結果が報告されている<sup>〔4〕</sup>。

## II. 液体中の部分放電

液体絶縁媒質特に絶縁油中での部分放電に関しては、油の流動帯電や浮遊粒子に起因する部分放電が、変圧器の高電圧化に伴って実用面からの問題として提起された。油中の部分放電は液体の局所的な破壊現象で、いわゆる液体絶縁体の破壊機構のいずれかが作用していると考えられるが、その部分放電を発生させる原因を究明する研究が進められてきたといえる。油中に存在する導電性粒子が電極に接近したとき生ずる局所電界が、平等電界で測定した破壊の強さに達すると微小放電が発生する事実が報告されている<sup>〔5〕</sup>。油は流動状態で使用される場合も多く、金属と接触しながら移動する過程で帯電し、流速や体積抵抗率などの条件により帯電量が増すと部分放電を発生する。この機構は詳細に解明され、さらに帯電を防止する対策が確立されて超高压変圧器の信頼性を著しく高めた<sup>〔6〕</sup>。

## III. 固体中の部分放電

固体絶縁体中で部分放電が生ずるか否かは確証が得られていない。しかし、電極として針を挿入した絶縁体（トリーイング試料）の電極形状において高電圧を印加すると、部分的な破壊が発生する電界以下で針先端近傍の固体中に電界発光現象が観測される。これは室温のエポキシ樹脂や極低温のポリエチレンなどで認められているが<sup>〔7〕</sup>、スペクトル的に気中の部分放電光とは異なることやこの発光が固体と針電極のコンタクトが緊密なときに起こることから、電極からの注入電荷に関連した現象と考えられている。従って固体中の局部高電界現象には気体や液体中の部分放電と異なった状況もあり得るといえる。しかし、さらに高電界に至るとトリーが発生して、気層中の放電が生じることになる。また、針先端には本来数 $\mu\text{m}$ 程度のボイドは必ず存在するという報告もある<sup>〔8〕</sup>。

一方、トリー管路を模擬したPMMAの細管中での放電は、管路を等電位にする作用ではなくて、管壁への電荷の堆積により電界が歪みされトリーが進展するとの報告もある<sup>〔9〕</sup>。

### 2.2.2 等価回路

部分放電を現象的に理解するために等価回路モデルが提案されている。ボイド放電においては、ボイド壁面に電荷が堆積する効果や放電エネルギーによりボイド壁面が物理的・化学的に変化するので等価回路的扱いが複雑となる。円柱状ボイドに対しては、電界方向および垂直方向にCとRによる等価回路を示して、部分放電諸量の経時変化、発光状態などの観測結果とを対応させた報告がある<sup>〔10〕</sup>。その結果、ボイドの表面抵抗が放電状態の変化に関係があることや



印加電界と垂直な方向への放電の可能性が示唆されており、ボイド放電の解明に向けての手がかりを与えている。

### 2.3 部分放電による劣化

#### 2.3.1 材料の物理・化学変化

絶縁材料が部分放電にさらされると、放電によって直接的に侵食されるばかりでなく、放電が原因で生じる活性酸素、オゾン、酸化窒素、酸等によって、材料は物理的、化学的に変化し劣化していく。

材料の変化を把握する手段として、従来から行われている放電の電気的諸量や重量変化の測定他に、物理的諸量の計測として顕微鏡やSEM（走査形電子顕微鏡）によるサンプル表面の観測をはじめ、表面あらさ、変色、引張強度、静止摩擦係数などの測定が行われている。また、化学的諸量の測定として赤外線吸収スペクトル、紫外線吸収スペクトル、X線解析、染色法などによる材料の劣化度合、劣化生成物の分析が行われている。

#### I. ポリエチレンの劣化

ポリエチレンが外部から空気の供給が無い状態で部分放電劣化を受けると、結晶性生成物もしくはゲル状生成物が確認できる<sup>[11]</sup>。結晶性生成物は、赤外スペクトル測定から、シュウ酸などの酸の結晶と考えられ<sup>[11]</sup>、ゲル状生成物は解重合したポリエチレンと考えられる<sup>[11]</sup>。ゲル状生成物は不安定で空気中に放置すると数分で消

え去るという報告もある<sup>[12]</sup>。

また、高湿度下の放電は硝酸の生成をともない、材料の局所的な侵食を生じる。材料の寿命は、相対湿度の影響を受けやすいという報告もある<sup>[13]</sup>。

#### II. エポキシの劣化

SEMによる観察の結果、 $10\mu\text{m}$ ～ $20\mu\text{m}$ のシュウ酸と思われる結晶劣化生成物の堆積が認められた<sup>[14]</sup>。また、硝酸の付着が確認された例もあり、これらの酸は樹脂の侵食やボイドの表面抵抗の低下をきたし、部分放電特性に影響を及ぼすことが知られている。

#### 2.3.2 密閉ボイド劣化

##### I. 実験に使用されるボイド電極

密閉ボイドによる絶縁材料の部分放電劣化の研究を行う場合には、ボイド形状により得られる結果が異なるため<sup>[15][16]</sup>、実験に使用する試料のボイド形状が重要となる。

密閉ボイドは大きく分けて、片側が金属電極であるもの(MGI)と、周囲が完全に絶縁体であるもの(IGI)の2種類がある。人工ボイドのギャップ長は、通常数 $100\mu\text{m}$ ～数 $\text{mm}$ 、試料の絶縁厚さは $1\sim 10\text{mm}$ が用いられている。構成材料としては、通常充てん剤無しのエポキシ樹脂、ポリエチレンが用いられる。エポキシに関しては充てん剤入りの検討例もある<sup>[17]</sup>。



## II. 密閉ボイドの初期部分放電特性

片側が金属電極のサンプルは、開放ボイド系試料と似た特性を示し、放電開始電圧はパッシェン則より求めた値に近い<sup>[16]</sup>。一方、周囲が完全に絶縁体のボイド、とりわけ球状ボイドにおいては、放電の開始電圧がパッシェン則から求めた値の数倍～数10倍にも達するという報告もある<sup>[18]</sup>。

各種密閉ボイドについて、放電パルスの放電電荷量－放電個数特性（ $q-N$ 特性）<sup>[15]</sup>や電源位相－放電電荷量特性（ $\phi-q$ 特性）<sup>[18]</sup>が測定されており、金属電極に接したボイド(MGI)ではパルスの電荷に分布がみられるが、球状ボイドでは放電電荷のそろったパルスが規則正しく発生することも報告されている<sup>[16]</sup>。これら密閉ボイドで観測される放電電荷量は1pC～1000pC程度である。

## III. 密閉ボイドの劣化特性

密閉ボイドにおける部分放電の特徴は劣化特性に顕著に現れる。密閉ボイドの劣化を観測すると、初期段階では部分放電にさらされたボイド壁が白濁して見える。次に、ボイド壁がしだいに侵食されて表面が荒れてざらざらした状態になる。侵食が進むと、それまで均一であった侵食面に0.1～0.2mm程度の複数個のピット状侵食孔が形成される。その後ピットは数を増やし個々に成長するが、やがて一つのピットの先端から突然電気トリーが発生、進展して絶縁破壊にいたる。劣化の最終段階で生ずるトリーの進展時間はトリー発生までの劣化時間に比べると非常に短時間である<sup>[19]</sup>。

放電による侵食の様相はボイド形状に依存する。円筒状ボイドの場合はボイドの角端部分が侵食され<sup>[20]</sup>、角端部を持たないMGI系ボイドの場合は電極頂点部分で侵食が生じる<sup>[19]</sup>。球状ボイドの場合には同心円状の劣化痕跡がボイド上下面で認められる<sup>[21]</sup>。劣化の進んだものでは無数のピットあるいは鋭い溝状の侵食孔が見られることもある<sup>[22]</sup>。これらの劣化痕跡は単に幾何学的に考えられる最大電界部分で生じるとは限らない。この理由としてボイド内壁の表面抵抗を考慮に入れた検討例もある<sup>[23]</sup>。

密閉ボイドの劣化過程を知るために、部分放電特性やボイド内圧力の経時変化の測定、顕微鏡写真やSEMによる劣化表面の観測などが行われている。中でも部分放電特性の測定は一般的に行われており、最大放電電荷、放電電流など数多くの測定例がある。ここで特徴的なのは、劣化時間が経過するに従って最大放電電荷や放電電流が減少すること、その間にボイド内圧力が減少すること<sup>[24]</sup>などである。放電電荷の減少の原因は、ボイド壁の表面抵抗の低下<sup>[25]</sup>なども考えられているが、ボイド内の圧力、気体の種類、ボイド内壁の幾何学的形状などの変化も大きく影響していると考えられ、本論文の最重要な課題でもある。

### 2.3.3 開放ボイド劣化

開放ボイドでは放電に伴って発生するガスは外気に置換されるので、消費される酸素や窒素などの気体は外から常に供給されることになる。従って比較的一定のガス成分下での劣化の検討が行える。

ガラス電極系による実験から<sup>[26]</sup>、( $N_2+O_2$ )混合ガス中の $N_2$ の比



率が高くなるほどボイド端部で部分放電が発生しやすくなること、 $N_2$ 中ではポリエチレンやポリプロピレンなどの高分子材料の寿命が長いことなどが確認された。

#### 2.3.4 材料劣化に及ぼす種々の要因

種々の絶縁系の中で発生する部分放電現象は、これまでに述べられたような部分放電が発生する部分の形状や電界条件の他、材料の使用場所の条件により温度や湿度、機械的応力、気圧などの影響を受けるが、これらの因子は通常単独ではなく複合的に働く。

絶縁材料の部分放電劣化のプロセスは、おおよそ次のようになっているものと考えられる。

- |               |   |      |
|---------------|---|------|
| (1)材料内部への電荷注入 | □ | 初期劣化 |
| (2)部分放電開始     |   |      |
| (3)侵食劣化       | □ | 中期劣化 |
| (4)ピットの形成     |   |      |
| (5)トリー進展      | □ | 末期劣化 |
| (6)絶縁破壊       |   |      |

劣化に及ぼす種々の要因は、実は全ての段階でそれぞれ影響を与えているのであるが、一般的に悪条件と思われるものが劣化の進行を停止させるように見えたり、潜伏的となり、一般的経過をたどらず最終段階に至ることもある。

#### 2.3.5 ボイド放電からトリーへの転換

エポキシ樹脂を用いた厚手のボイド試料 (CIGRE Method-I試料など) では、ボイド放電で生成されたピットの先端からトリーが発生することが確認された。ピットが形成される過程も未だ明確にされていないが、ピットがどのような状態になったとき、あるいはどのような条件が整ったときにトリーが発生するのかについても明らかににはなっていない。唯一の知見は、トリーへ転換したピットの先端半径がほぼ  $10 \sim 20 \mu m$  であったという実験事実だけである。ピットの生成は部分放電の不均一劣化によるものであり、部分放電の局所化に対応している。

ボイド内放電においては放電がボイド全体にわたるのは放電開始初期のみであることが多く、時間の経過とともに放電が局在化していき、劣化の後期には多くのピットやクラックが特定の場所に集中してみられる<sup>[27]</sup>。これらの劣化の局在化が起こる理由として、内壁抵抗の変化による電界分布の変歪<sup>[23]</sup>や、化学変化の不均一性などが考えられている。不均一劣化が起こると、それがさらに放電の局在化を助長することもある。

#### 2.4 部分放電の検出法

部分放電が発生すると光や音波が発生し、閉回路が形成されれば電気信号が発生する。従って部分放電を検出する方法としては電氣的検出法および光、音響の検出法などが考えられる。

##### 2.4.1 電氣的検出法



電氣的検出法は絶縁体中のボイドが電圧印加により放電（気体の絶縁破壊）を起こすときに流れる電流を積分した量すなわち電荷を計測するものであるが、一般には”見かけの放電電荷”が計測される。これはボイド放電のエネルギーに比例するものと考えられているが、油浸絶縁などでは平均的なエネルギー測定も行われている。検出法としては検出インピーダンスと増幅器の種類により、広帯域法、狭帯域法（同調式）および低周波法に分けられる。

検出回路で問題となるのは、できるだけ微小な放電を検出することおよび雑音除去を行うことである。

## I. 放電の検出感度

見かけの放電電荷は供試絶縁体にかかる電圧の変化にその静電容量を乗じた量であるが、放電電荷の検出はその電圧変化分を計測するものであるから、供試物の静電容量が大きくなると検出感度は低下する。実験室レベルでは0.1pC以下の測定も可能であるが、現場では変圧器で1000pC、ケーブルで100pC程度である。

## II. S/N比の向上

発電機巻線やSLケーブルでは運転中に数100～数1000pCの放電が発生しているので、従来の計測技術で十分計測可能である。コンデンサの場合には、常規使用状態では本来部分放電が発生しない設計となっているが、絶縁油の改良、開発などにより過渡的な過電圧に対してある程度部分放電を許容する設計を採用する場合もある。変

圧器、XLPEケーブル、OFケーブルなどは本来部分放電が発生しない設計となっており、工場試験などでは部分放電電荷はある一定の値（規定値）以下と決められている。しかしこの値は雑音レベルが決定要因となっているので、規定値がそのままそれぞれの絶縁体に許容されるべきものであるかどうかは明確ではない。そこでS/N比の向上が望まれる。現在では高圧機器、ケーブルのコンパクト化と共に高い信頼性が要求されるので、このことは一層重要になると考えられる。

シールドルームの利用はS/N比の向上に理想的であるが、シールドルームを節約したり、現場計測する場合には他の技術の開発が重要である。

### 2.4.2 光および音響の検出

部分放電の検出には通常既述の電氣的検出法が用いられるが、それ以外にも光による検出法や音響による検出法など種々の方法がその特徴を生かし用いられている<sup>[28]</sup>。

光や音響は変換器を用いれば電気信号に変えることができる。光

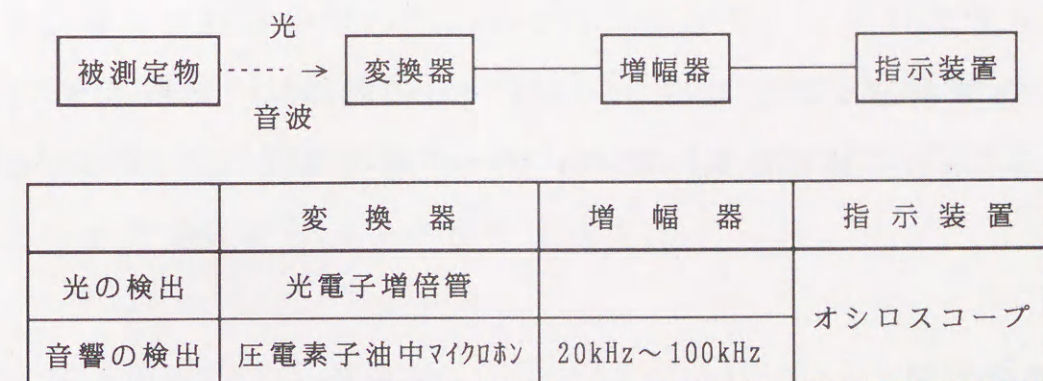


図2.4 光または音響の検出回路



または音響の検出回路は図2.4に示すように、微弱な光または音圧を電気信号に変える変換器、この信号の増幅器ならびに指示装置から構成される。

これらの検出法には以下の特徴がある。

- (1)電磁的ノイズの影響を受けない。
- (2)電気信号と音響信号の到達時間差から発生位置評定ができる。
- (3)インパルス電圧試験にある程度適用できる。

これに対して、固体中の部分放電を検出する場合には以下のような欠点がある。

- (1)一般に測定感度が悪い。
- (2)被測定物に制約がある。

例えば、光の検出では密閉ボイドを対象にすると透明ないしは半透明な絶縁体にしか適用できない。ケーブルなどでは光検出は不可能であるが、さらに音響検出も困難である。ケーブルは半径方向に音響インピーダンスの異なるものが重なっているので音波の減衰が大きくなるものと思われる。

#### 2.4.3 コンピュータを用いた計測

部分放電計測においてはコンピュータの利用は一般的となっており、おもに雑音対策、新しいデータ処理を利用の目的としている。

#### I. 雑音対策

コンピュータを用いた計測では、データの取り込み後、適切なデータ処理が可能であるため、部分放電計測における様々な雑音除去法が提案されている<sup>[28]-[30]</sup>。

ホワイトノイズを除去する方法としては相関解析手法が1979年初期に提案されたが、その後の進展はないようである。これは交流電圧の1サイクルを $n$ 等分して位相ウィンドウをつくり、 $i$ 番目のウィンドウに現れるパルスを何サイクルかにわたって加算しようとするもので、正負ランダムに現れるホワイトノイズは除去されると考えた手法である<sup>[28]</sup>。これは位相角平均法と呼ばれる。逆に同じ位相角に同じパルスが雑音として現れるときは、減算することによって雑音を減らすことができる。これらの他にコンピュータ計測により $q-N$ 特性（放電パルスの発生頻度分布）の計測を行い、電圧印加前と印加後の特性の差を求める方法もある。

#### II. 新しいデータ処理

部分放電の計測において従来から放電開始電圧、最大放電電荷、平均放電電流、放電エネルギーなどが測定されてきた。しかし、部分放電は多くの情報を含んでいるにもかかわらず、計測技術の限界により多くの情報を有効に利用できていない。今日、コンピュータの発達により、多くのデータ処理が可能になったため、部分放電の全く新しく有用なパラメータが考えられた。

#### (1)波高分析器(PHA)の適用



部分放電の $q-N$ 分布は波高分布特性である。これは部分放電の特徴をよく表わすパラメータであるので、これまでもいくつかの研究機関で計測されてきた。その方法としては単一増幅器でスキヤニングする方法、10個の増幅器を用いる方法、単一チャンネルの波高分析器を用いる方法などが考えられてきた。

### (2) コンピュータの利用

PHAの考えを一層押し進めて、複雑な部分放電研究をある意味で統計的な見地から進めるため、コンピュータを用いて部分放電の種々のパラメータを計測、演算、出力する方法が開発された<sup>[28][30][31][32]</sup>。パラメータとしては以下に示すものが定義された。

- (a) 放電電荷量－放電個数特性 ( $q-N$ 特性)
- (b) 電源位相－放電電荷量特性 ( $\phi-q$ 特性)
- (c) 電源位相－位相平均放電電荷量特性 ( $\phi-q_{cave}$ 特性)
- (d) 電源位相－パルス平均放電電荷量特性 ( $\phi-q_{pave}$ 特性)
- (e)  $q-N$ 特性の時間変化特性
- (f) 分布のパターン解析

## 2.5 試験方法

### 2.5.1 電極の種類

部分放電の試験方法を電極系から分類すると表2.1のようになる。沿面放電、内部放電の形態の区別は、放電の起こる気相間隙が開放されているか、密閉されているかによる。また、放電空隙が金属電

表2.1 部分放電試験電極系の分類

放電の形態	M G I 系	I G I 系
沿面放電 (開放系)	棒対平板電極 針対平板電極	平行平板電極 ガラス電極
内部放電 (密閉系)	CIGRE Method-I CIGRE Method-II 剥離模擬ボイド 針先ボイド	3枚重ね円柱ボイド 球状ボイド

極に接している場合がMGI系であり、放電空隙が絶縁体におおわれている場合がIGI系である。

### I. 沿面放電

#### (1) MGI系

棒対平板電極の間に試験片をはさんで電圧を印加する方法は単純であるため材料試験法の規格に採用されている。図2.5に示す形状のIEC-(b)電極によるPE、PET、PVCについての厚さ、電圧、周波数に対する実験結果がまとめられており、電圧加速、周波数加速の限界について報告されている<sup>[33]</sup>。

また、図2.6に示すように下部電極がリング状の針－複合電極を用いて、針電極直下に集中する放電と沿面放電を分離して測定し、それぞれの放電パルスの大きさ、数の分布と破壊への寄与を調べ、



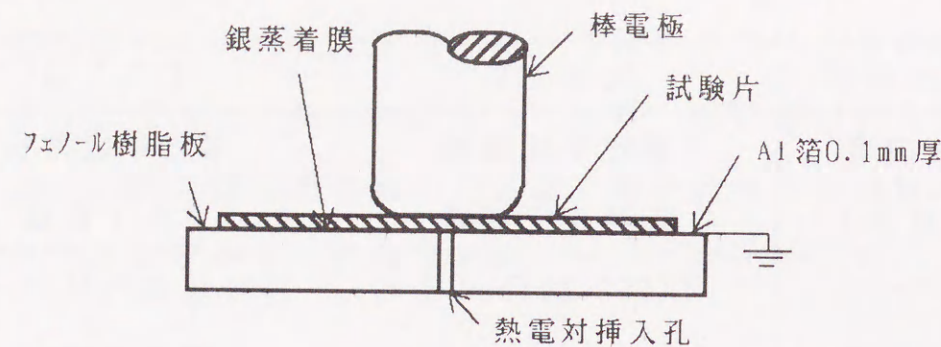


図 2.5 IEC(b)電極

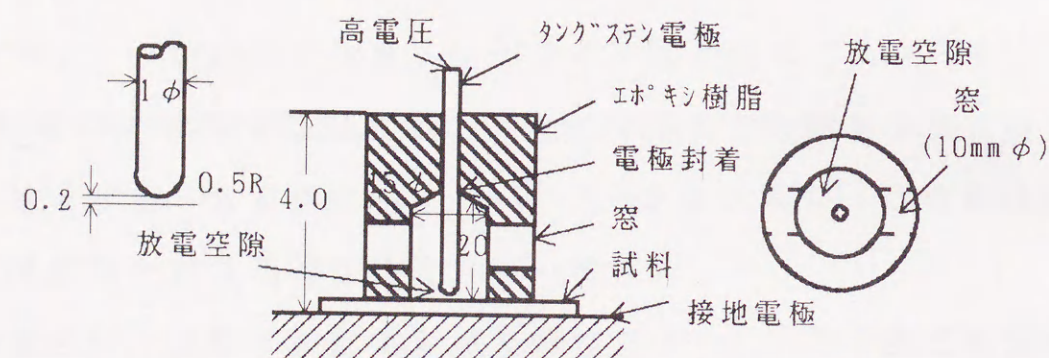


図 2.6 CRIEPI-B電極

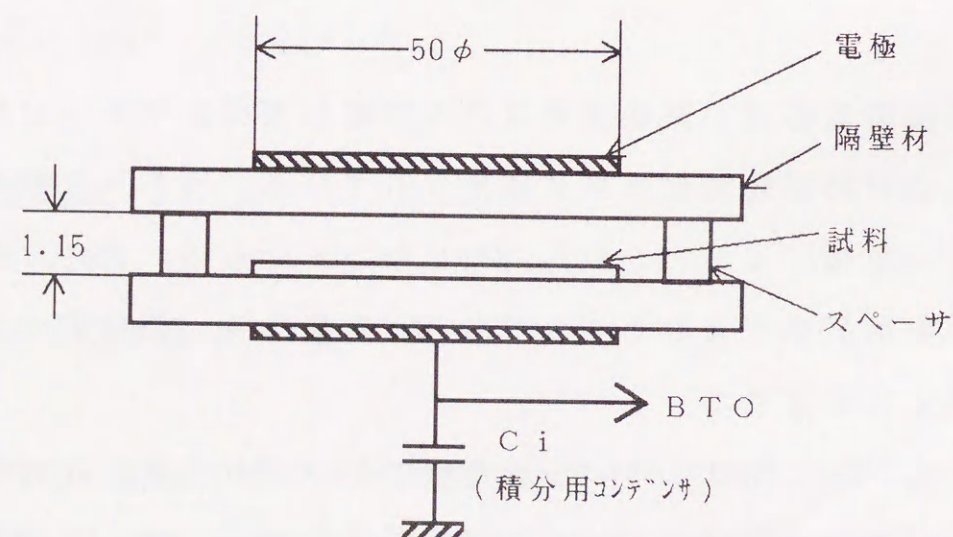


図 2.7 平行平板電極

さらに周波数加速の効果についても報告されている<sup>[34]</sup>。

## (2) IGI系

ガラス板に隔てられた平行平板電極間の空隙内で起こるオゾナイザ型の放電を用いて、部分放電の化学的劣化作用が検討された<sup>[35]</sup>。図2.7に示す電極系を用いて行われた低気圧下での実験報告によると、圧力×空隙厚さの小さな所で放電エネルギー当たりの重量減少速度が急増することが報告されている<sup>[36]</sup>。これを大気圧に換算すると $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 以下の微小ボイドに相当し、微小ボイド中の放電の模擬方法として興味をもたれている。

## II. 内部放電

### (1) MGI系

CIGRE Method-I電極系試料は円筒形の内部ボイドを持つ試料であり、CIGRE国内委員会で検討が進められた。また、CIGRE Method-II電極系試料は剥離ボイドを模擬した内部ボイド試料であり、ボイド壁面の影響をなくす電極構成となっており、現在研究が進められている。

### (2) IGI系

IGI系のボイド密閉度を変えて劣化の周波数依存性を調べた結果、



密閉度がよい場合にはボイド中の酸素が消費されて窒素中の放電に移行し、密閉度が悪い場合には酸化生成物によりボイド壁面抵抗が減少して共に寿命が長くなる傾向があり、ボイド内への酸素の供給が試験の再現性に大きく影響すると報告されている<sup>[37]</sup>。

また、特殊な発泡剤を添加した低密度PEシートを発泡剤を含まない同一のPEフィルムでサンドイッチしたのち、加熱融着と同時に発泡させ、直径0.2~0.3mmの球に近い回転楕円体ボイドを0.4~0.5mm厚のシート中に含む図2.8に示す試料による実験の報告<sup>[21][38]</sup>や、図2.9に示すように球電極を埋め込んだPE試料の対向する面の中央にくぼみをつくり、これを互いに熱融着させることによって種々の寸法のボイドを持つ試料による実験の報告<sup>[39]</sup>や、U字型のくぼみを持つエポキシ樹脂板をボイドを含むように再度加熱硬化させて、図2.10に示すように作製した密閉ボイドを持つ試料による実験の報告<sup>[15]</sup>がある。

## 2.5.2 電圧加速とその限界

固体絶縁の電圧劣化、特に低電界側の放電開始電圧近傍のV-t特性は、表2.2のようにまとめられている<sup>[40]</sup>。この中で、空隙内で

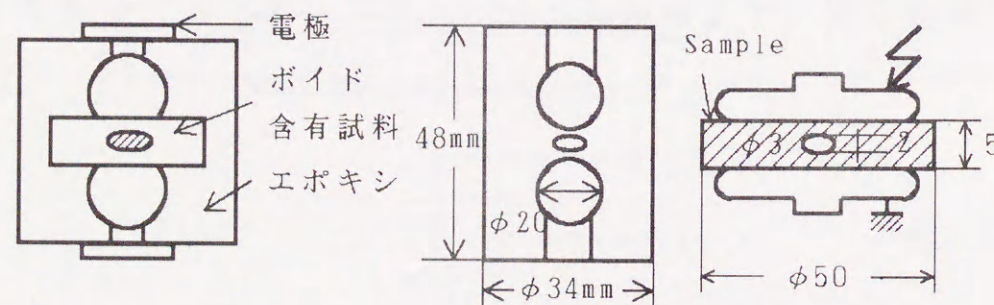


図2.8 PE密閉ボイド\*

図2.9 PE密閉ボイド\*

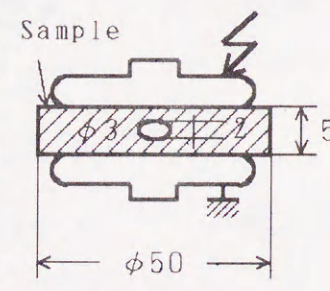


図2.10 エポキシ密閉ボイド\*

表2.2 電圧劣化の種類とV-t特性<sup>[40]</sup>

電圧劣化の種類		形状	V-tのパターン	nの値	ばらつきから見た破壊のパターン
部分放電 劣化	表面放電			2~3前後 (第II領域)	I領域: 初期破壊 II領域: 累積劣化形 III領域: 偶発破壊形
	内部放電			薄手試料 4前後	表面放電劣化の場合と同様
トリーイング劣化				6~29 (ばらつく)	
空隙や著しい電界集中の無い場合				10~15	初期破壊形または偶発破壊形

部分放電が起こっている第II領域では逆n乗則のnの値は2~3前後で、摩耗劣化領域であり、電圧加速が成立する。第III領域への折れ曲がり、放電開始電圧の近傍であるために放電が不安定、間欠的となるために寿命が伸びるものと考えられる。高電圧側の第I領域への折れ曲がりについては詳細な報告がある<sup>[41]</sup>。

このように、広い範囲にわたってV-t特性を求めることにより電圧加速の限界を知ることができる。精度の高い寿命予測をするためにはばらつきの少ない試験方法を採用すると共に、第II領域の範囲内で適用する必要がある。



### 2.5.3 周波数加速とその限界

周波数加速に関する各種電極系と材料の組合せをまとめた報告があり、加速による温度上昇あるいは試験時の湿度の違いなどにより比例関係は必ずしも成り立たないと述べられている<sup>[42]</sup>。また、赤外線温度計を用いたIEC(b)電極による周波数加速試験の結果、周波数加速の上限は試料の表面温度が上昇し、劣化速度が増大するために制限されるという報告がある<sup>[33]</sup>。

一方、ガラス電極系を用いた実験では、温度上昇はそれほど大きくなく、周波数上昇に伴う酸素消費量の増大に周囲からの供給が追従できなくなって寿命が伸びる傾向があるという報告もある<sup>[26]</sup>。

### 2.6 参考文献

- [1] 電気学会技術報告：部分放電劣化，II-164，(1984)
- [2] 放電ハンドブック 改訂新版，電気学会，p102 (1974)
- [3] F.Cribier, et al. : "Analysis of the species created by corona discharges and their interactions with surface", IEEE Symp. EI, pp.282-285 (1976)
- [4] 金子，他：「放電による気体分解生成物の発生と消滅」，電気絶縁材料シンポジウム，pp.173-176 (1975)
- [5] S.Birlasekaran, M.Darveniza : "Microdischarges from Particles in Transformer Oil", IEEE Trans. EI, 11-4, pp.162-163 (1976)
- [6] M.Higaki, Y.Kako, M.Moriyama, M.Hirano, K.Hiraishi, K.

Kurita : "Static Electrification and Partial Discharges Caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled Core Type Transformers", IEEE Trans. PAS, 98-4, pp.1259-1267 (1979)

- [7] M.Kosaki, et al. : "Treeing of Polyethylene at 77K", IEEE Symp. EI, pp.132-135 (1976)
- [8] 曾祢，他：「微小空隙中の放電の挙動に対する検討」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-75-32 (1975)
- [9] A.B.Borishade : "The Development of Electrical Discharges in Simulated "Tree" Channels", IEEE Trans. EI, 12-5, pp.348-354 (1977)
- [10] 伊藤，堺，鳥山：「ボイドの等価回路とボイド放電の経時変化との対応」，電気学会論文誌A，95巻，8号，pp.335-340 (1975)
- [11] Y.Makis : "The Lifetime Estimation of Plastic Films by Measuring the Specimen Temperature Rise", IEE Conf. DMMA, pp.93-96 (1979)
- [12] J.P.Reyuders : "Electrical Degradation Caused by Partial Discharges in Oil Immersed Insulation", IEE Conf. DMMA, pp.19-22 (1975)
- [13] 藤岡，角田：「高分子絶縁材料の部分放電劣化に及ぼす湿度の影響」，電気学会論文誌A，96巻，3号，pp.119-126 (1976)
- [14] B.Salvage, et al. : "A Study of the Effects of Internal Discharges on a Epoxy Resin Using a Scanning



- Electron Microscope", ISH, pp.665-668 (1975)
- [15] 北村, 谷, 平林: 「エポキシ樹脂中の球状ボイドの部分放電特性」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-79-74, pp.11-25 (1979)
- [16] 夏目, 他: 「エポキシモールド絶縁におけるボイド放電とその測定」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-78-76 (1978)
- [17] 福士, 他: 「無機質粉充填エポキシ樹脂のV-t特性」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.135-142 (1977)
- [18] 岡本, 他: 「球状ボイド中の部分放電の位相特性」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.97-100 (1978)
- [19] 北村, 他: 「エポキシ樹脂の内部放電劣化の検討」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.165-168 (1979)
- [20] 青柳, 他: 「エポキシ注型品の実用状態における長時間V-t特性」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-77-14 (1977)
- [21] 阿部, 他: 「PE中の単一ボイドにおける内部放電劣化」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-77-32 (1977)
- [22] 津久井: 「プラスチックフィルム絶縁のボイド放電劣化特性」, 電気学会論文誌A, 98巻, 8号, pp.415-422 (1978)
- [23] 伊藤, 他: 「ボイドを含む高分子絶縁材料の等価回路とその放電劣化」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-77-28 (1977)
- [24] 東村, 他: 「課電劣化時における人工ボイド内圧力の変化」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.169-172 (1980)
- [25] 家田, 田中: 「CIGRE SC15 WG06 TG1 (国内) 共同実験」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-79-73 (1979)

- [26] 池田, 他: 「ガラス電極法による耐内部放電性評価試験の周波数加速性」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.201-204 (1978)
- [27] C.Mayoux: "Corona Discharge and Ageing Process of an Insulation", IEEE Trans. EI, 12-2, pp.153-158 (1977)
- [28] 田中: 「絶縁材料の物性と測定、部分放電測定法」, 電気学会雑誌, 95巻, 5号, pp.364-368 (1975)
- [29] 堀井, 貫洞, 高木, 坂東, 高梨: 「部分放電平衡検出回路による外部雑音の抑制」, 電気学会論文誌A, 95巻, 8号, pp.349-355 (1975)
- [30] 田中, 他: 「部分放電計測解析システムの開発とその機能」, 電気絶縁材料研究会資料, EIM78-3 (1978)
- [31] 岡本, 田中: 「種々の電極系における部分放電パターン(IGI電極系の場合)」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-79-77, pp.37-46 (1979)
- [32] 曾祢, 他: 「ミニコンピュータシステム利用による耐コロナ性の診断」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.153-156 (1975)
- [33] 平林, 他: 「部分放電劣化寿命における電圧および周波数加速限界の検討」, 電気学会論文誌A, 100巻, 6号, pp.345 (1980)
- [34] 竹岡, 他: 「針-複合電極を用いた絶縁材料の寿命試験と部分放電パルス」, 電気絶縁材料シンポジウム, pp.151-154 (1977)
- [35] 電気学会技術報告: 「絶縁材料のコロナ放電による劣化(1)」, I-74, (1966)



- [36] 寺田, 堀: 「低気圧空気中の放電劣化から推定した微小ボイドの特徴」, 電気学会論文誌 A, 95巻, 10号, pp.431-438 (1975)
- [37] 津久井: 「絶縁材料のボイド放電劣化特性」, 電気絶縁材料研究会資料, EIM77-29 (1977)
- [38] 片山, 阿部, 岩田, 朴木: 「PE中の単一ボイド内放電特性」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-79-75, pp.19-25 (1979)
- [39] P.Fischer, K.W.Nissen: "Partial Discharge Characteristics in Artificial Voids in Polyethylene", ETZ, 99-8, pp.475-480 (1978)
- [40] 夏目, 他: 「固体絶縁の電圧劣化とV-t特性」, 電気絶縁材料研究会資料, EIM76-42 (1976)
- [41] 平林, 他: 「部分放電劣化におけるV-tカーブの高電界の折れ曲がり電圧及び寿命の絶縁厚さ依存性」, 電気絶縁材料研究会資料, EIM76-43 (1976)
- [42] D.R.Johnston, J.T.LaForte, P.E.Podlhorez: "Frequency Acceleration of Voltage Endurance", IEEE Trans. EI, 14-3, pp.121-126 (1979)

### 第3章 部分放電特性解析システム

#### 3.1 まえがき

従来部分放電計測には、放電開始電圧、消滅電圧、最大放電電荷量、平均放電電流、放電エネルギーなどの測定が行われていた。今日でもこれらの重要性は変わりはないが、部分放電そのものはさらに多くの情報を含んでいる。これまでは、計測技術の限界により部分放電に含まれている多くの情報を取り入れることができなかった。しかし、コンピュータ技術を導入することにより多量のデータを処理することが可能となった。コンピュータ技術を用いて部分放電の統計処理を行うことにより、部分放電に対して新しい考察が加えられるようになってきた。

本章では、本研究で使用したコンピュータ技術を用いた部分放電特性解析システム(Computer Aided Partial Discharge Analyzing System: CAPDAS)の概要を述べる。さらに、内部部分放電劣化が進行すると共に現れる、個々の放電電荷量が非常に小さく放電発生頻度が非常に高い群小部分放電(Swarming Pulsive Microdischarges: SPMD)について概説する。

#### 3.2 部分放電検出

本研究で使用した部分放電特性解析システム(CAPDAS)の構成図を図3.1に示す。このシステムは、部分放電信号を計測する信号検出部と、検出部で得られた部分放電信号をコンピュータを用いてサン



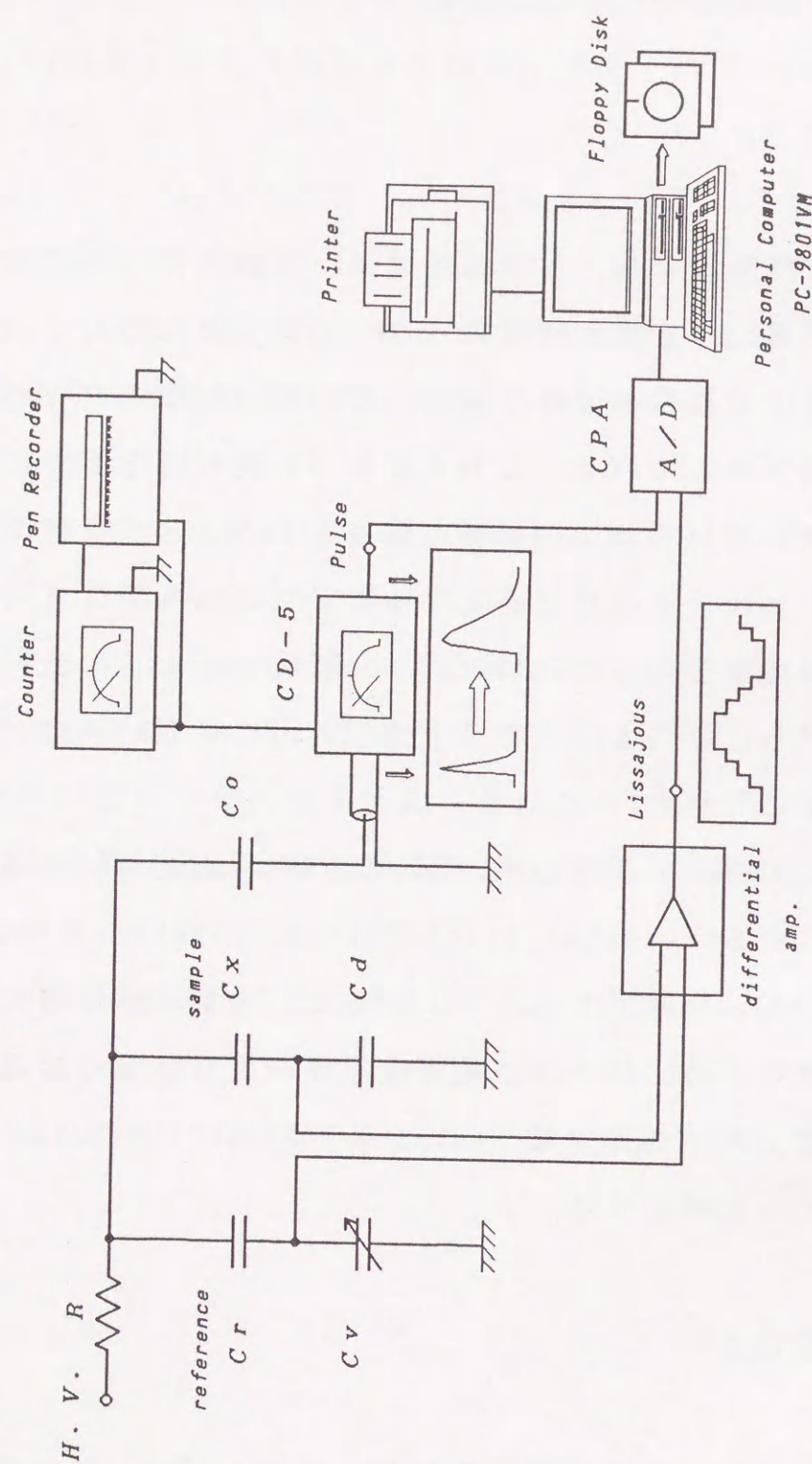


図3.1 部分放電特性解析システム(CAPDAS)の構成図

プリングし統計処理を行う処理部から構成される。

部分放電検出法には、従来から使用されている同調式部分放電測定器を用いた電流パルス法と、試料を含む4つの静電容量によりブリッジを構成し、より高感度に部分放電を検出することができるブリッジ法（平衡型リサージュ法）の二種類の部分放電検出法を用いている。

電流パルス法による部分放電信号の検出では、コンピュータを用いて統計処理することにより個々の放電の位相特性など様々な解析を行うことができる。しかし、放電信号は供試試料、検出コンデンサおよび測定器の検出インピーダンスで構成される閉回路を流れる急峻な放電電流によって検出されるため、試料の容量、検出コンデンサの容量などにより放電の検出感度は決定され、後述する群小部分放電については測定感度以下となり検出することが困難となる。

ところが、もう一つの検出方法であるブリッジ法では、放電信号を検出コンデンサに蓄えられるトータルの電荷量で積分値として検出するため、個々の放電を個別に検出することには不向きであるが、原理的に非常に小さな放電も検出することが可能であり、群小部分放電も十分に検出できる。従って、この二つの部分放電検出法を併用することにより、より詳細な部分放電現象の考察が可能となる。

### 3.2.1 パルス法による部分放電検出

電流パルス法による部分放電測定の基本回路を図3.2に示す。供試試料( $C_x$ )において部分放電が発生すると、急峻なパルス電流が試料、結合コンデンサ( $C_0$ )および検出インピーダンス( $Z_d$ )で構成され



る閉回路を流れる。この電流によって検出インピーダンス両端に発生したパルス電圧を増幅器によって増幅して検出する方法である。

一般に部分放電の大きさは電荷量で表示されるが、供試試料( $C_x$ )内部で発生した部分放電電荷量が同じでも、供試試料( $C_x$ )および結合コンデンサ( $C_o$ )の静電容量が変わると、検出インピーダンス( $Z_d$ )に検出される電圧値も変わるので、電荷量を知るためには校正を行う必要がある。そのため、既知の模擬的な放電電荷量を供試試料に注入し、検出器の指示値と放電電荷量の係数を求め、検出器の指示値を電荷量に換算することにより、放電電荷量を知る。

本システムでは、部分放電検出器として同調式部分放電測定器：CD-5（日本計測器製）を使用している。CD-5は、部分放電パルスを半値幅約 $15\mu s$ の電圧パルスとして出力し、出力電圧は $1\sim 10V$ の範囲で線形性が保証され、パルス時間分解能は約 $20\mu s$ である。また、放電電荷量の校正には部分放電校正器：NPG-2（日本計測器製）を使用した。

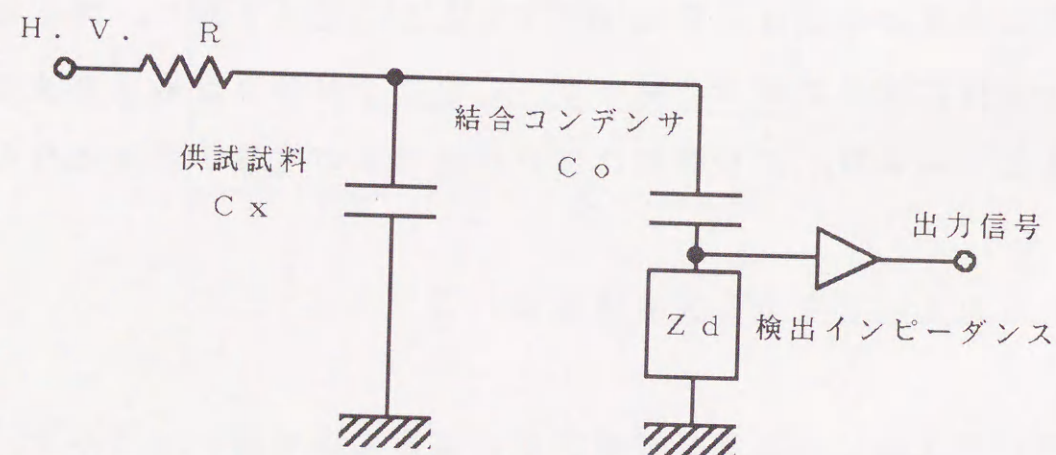


図3.2 電流パルス測定回路

### 3.2.2 ブリッジ法による部分放電の検出

ブリッジ法（平衡型リサージュ図形法）による部分放電測定の基本回路は、図3.3に示すように供試試料( $C_x$ )とリファレンス試料( $C_r$ )、検出コンデンサ( $C_d$ )および可変コンデンサ( $C_v$ )の4つでブリッジが構成されている。 $C_v$ を調整することによりブリッジの平衡をとり、印加電圧により供試試料に流れる充電電流が出力に現れないようにする。 $C_x$ で放電が発生すると放電電流が流れブリッジのバランスが放電電荷量分だけくずれる。従って $C_d$ と $C_v$ の電位差は部分放電パルスの積分波形となり、放電発生時刻において垂直に立ち上がる階段状波形となる。その立ち上がりの電圧変化 $\delta v_a$ （真値）が個々の放電の電荷量に相当する。実際には、信号を差動増幅器（増幅度： $A$ ）で増幅して電圧変化 $\delta V_a$ （測定値）を得るため、一個の放電パルスの放電電荷量( $q$ )は

$$q = C_d \cdot \delta v_a = C_d \cdot \delta V_a / A \quad (3.1)$$

で得ることができる。また、部分放電をパルス電流の積分波形とし

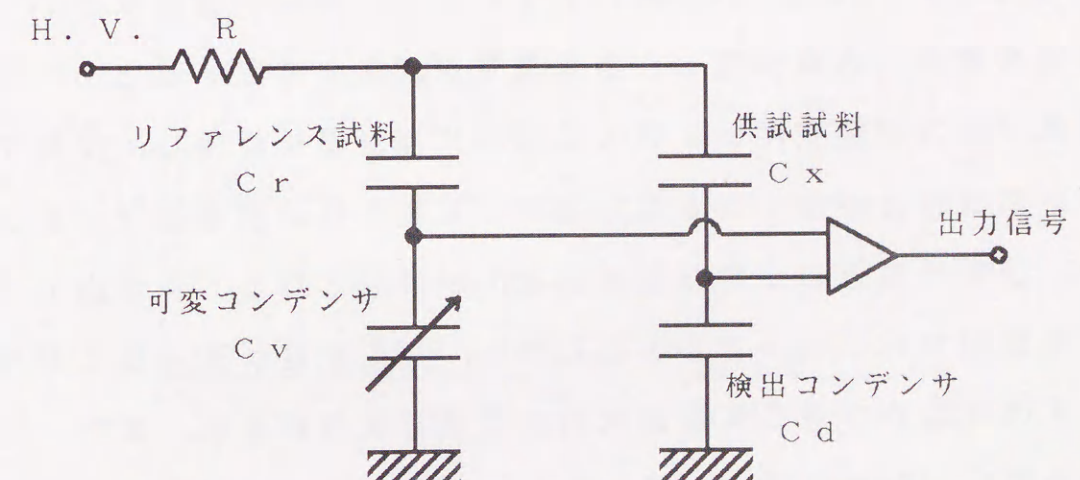


図3.3 平衡ブリッジ測定回路



て検出するため、微小な放電に対しても高感度に検出できる特徴を持っている。このブリッジ部分と差動増幅器の部分に合わせて、平衡ブリッジ測定回路と呼ぶこととする。

この検出回路はBridge Circuit for Integrating Measurementsとも呼ばれており、この回路を用いて、内部ボイド放電によるエポキシ樹脂の絶縁破壊について放電エネルギーの観点からの検討した報告がある<sup>[1][2]</sup>。また、静電容量と誘電正接( $\tan \delta$ )を測定するためのブリッジ(例えばHigh-voltage Sheringbridgeや、Transformer ratio-armbridge)も部分放電現象の評価に適用されている<sup>[3]</sup>。

### 3.2.3 パルス法とブリッジ法の比較

電流パルス法およびブリッジ法(平衡型リサージュ法)により検出される放電波形の一例を図3.4に示す。電流パルス法の部分放電検出器として使用している同調式部分放電測定器: CD-5の最小検出放電電荷は0.2 pC以下と保証されているが、実際の測定においては放電電荷量の大きな放電と小さな放電が同時に存在するため、大きな放電パルスが測定範囲に収まるように減衰器を調整して使用する。そのため減衰比が高くなるにしたがって最小検出放電電荷は大きくなり、放電電荷量の小さな放電の検出が困難となる。また出力パルスの半値幅が約15  $\mu$ sであることから、発生頻度が高くなると放電パルスの重なりによる測定誤差も生ずる可能性がある。また、CD-5の出力は0~10Vの範囲であり、図3.4に示すように正パルス・負パルスとも同極性の出力となる。従って印加電圧の正・負のピークに

相当する90度及び270度付近で放電が発生していない位相点を境として正パルス・負パルスを区別する。なお、パルス時間分解能は公称値で約20  $\mu$ sである。

これに対し、ブリッジ法では平衡ブリッジ回路により部分放電電荷量をパルス電流の積分波形として $\Sigma q$ の形で検出するため、放電電荷量の小さな放電に対しても測定可能であり、パルスの重なり心配も生じない。ところがブリッジ法では、電流パルス法で行う個々の部分放電パルスを分離して計測する方法については、 $\Sigma q$ の階段状の波形から各放電パルスをy軸方向のステップ状の変位として読み取ることになるので困難となる。

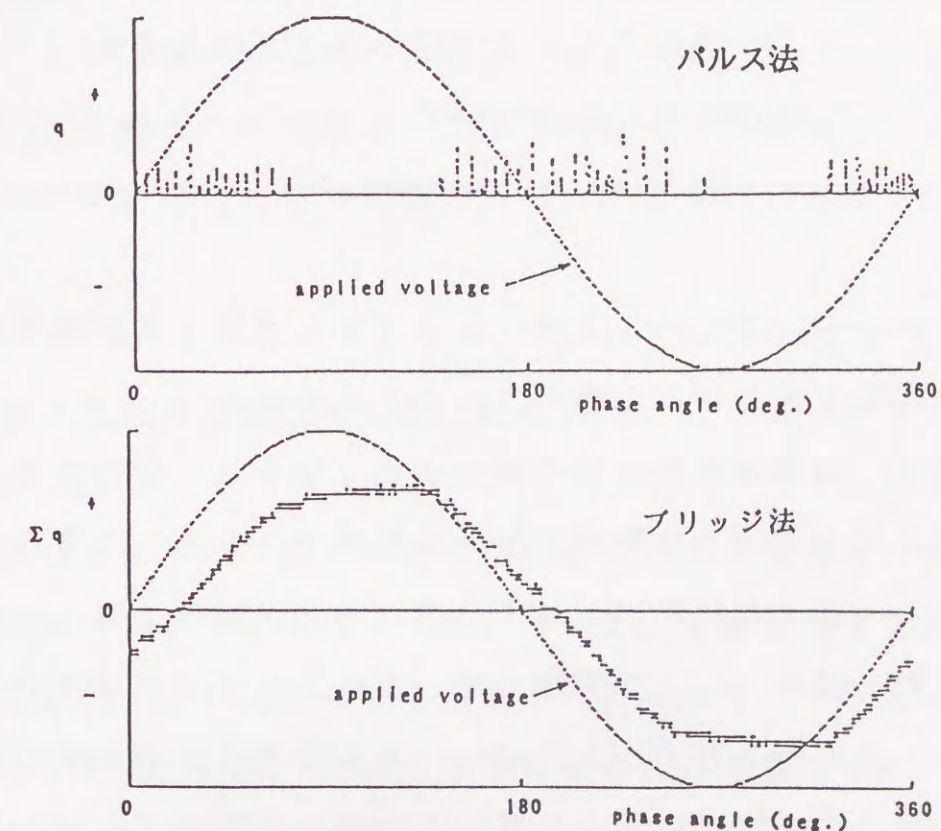


図3.4 パルス法、ブリッジ法による検出波形



表3.1 パルス法とブリッジ法の比較

パルス法	
個々の放電について測定	
放電の分布特性が容易に得られる	
検出感度に限界がある	
本構成では最小検出放電電荷:0.2pC	
ブリッジ法	
放電電荷量の積分値を測定	
原理的にあらゆる放電を検出可能	
平衡ブリッジ回路と積分回路を使用	
個々の放電の分離が困難	

以上のことから、電流パルス法およびブリッジ法（平衡型リサージュ法）の特徴をまとめると表3.1のようになる。

これまでは、放電電荷量がある程度小さくなると、部分放電は絶縁体の劣化に対して大きな影響を与えず無視できるという考えがあったことから、個々の放電パルスを分離する事が困難であり、全ての放電電荷量を積分した形で測定してしまうブリッジ法は部分放電計測にはあまり適用されず、もっぱら、ある程度以上の大きな放電を測定し、個々の放電パルスを分離して計測することが可能なパルス法が用いられてきた。近年放電電荷量が小さく放電発生頻度が非常に高い群小部分放電（SPMD）の存在が確認され<sup>〔4〕</sup>、また群小部分

放電の絶縁体の劣化に対する有害性も指摘された<sup>〔4〕</sup>。従って、従来用いられてきたパルス法のみではなく、群小部分放電に対しても測定可能な計測方法を用いて、群小部分放電に注意を払う必要性がある。

電流パルス法では、群小部分放電は放電電荷量が小さいため検出感度以下となり、放電を検出する事が困難となる。しかし、電流パルス法とブリッジ法（平衡型リサージュ法）の二種類の放電検出法を併用することにより、群小部分放電についても検出することが可能となったことは部分放電現象の研究を進める上で大きな利点となる。本研究で使用したCAPDASは、両方式による部分放電検出信号を同時に測定し、取り込むことができるので、両者を解析することにより得られる部分放電特性諸量を比較することにより、群小部分放電のようにパルス法で検出する事が困難である放電などについても定量的評価を行うことが可能となる。その詳細については3.5節で述べる。

### 3.3 部分放電特性諸量の計測・計算処理

前述したように、部分放電特性解析システムは電流パルス法とブリッジ法（平衡型リサージュ法）の二種類の部分放電検出方式を併用しており、図3.4に示すような2つの検出波形を同時に計測することができる。計測・計算処理部は各部分放電検出器から得られる信号のサンプリングおよび取り込みを行う波形記憶装置と取り込まれた信号を統計解析して必要なデータを出力するパーソナルコンピュータにより構成される。この構成を図3.5に示す。



波形記憶装置にはマルチ・チャンネル波形解析装置:APC-204(オートニクス製)を使用している。この装置は、入力感度 $0.1\sim 25.6V$  p-p、周波数帯域 $300kHz$ または $100kHz$ の入力部を4チャンネル搭載しており、サンプリングタイムが最大 $1\mu s/word$ 、分解能 $12bit$ のA/D変換器、 $64kword/ch$ の記憶容量を持っている。本研究では、電流パルス法の出力が $0\sim 10V$ であることから入力感度を $12.8Vp-p$ 、サンプリングタイムを $5\mu s$ として使用している。従って本研究で利用した波形記憶装置の分解能は $2.44mV/dig.$ となる。〔5〕

電流パルス法およびブリッジ法(平衡リサージュ法)の両検出法により検出された放電信号は、波形記憶装置によりサブリングされ、コンピュータに転送される。コンピュータに取り込まれた部分放電信号はフロッピーディスクに一時保存され、後述する部分放電特性諸量が統計的に計算・処理される。また、統計処理されたデータは必要な形式で出力する事が可能である。

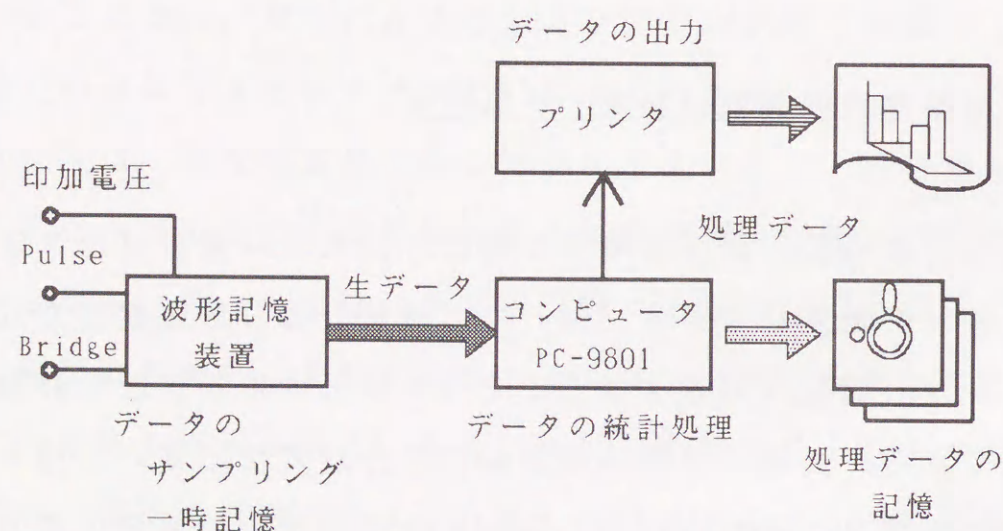


図3.5 部分放電解析システムの計測・計算処理部の構成

### 3.4 部分放電特性諸量の算出

本研究では二種類の部分放電検出法を併用している。これらから得られる信号を統計処理し、電源位相に対する解析を行うことにより、部分放電に対してより詳細に検討を加えることが可能となる。放電信号を統計処理することによって得られる部分放電特性諸量は以下に示す通りである。

#### 3.4.1 部分放電分布特性(パルス法)

電流パルス法の検出信号は、CD-5の出力パルスをA/D変換して計測するため、計算プログラムにより、5～6点のサンプリング値から最小二乗法二次の曲線で個々の放電パルス波形を近似し、そのピーク値とその時刻とを記録する。通常のサンプリングタイムは $5\mu s$ であり、CD-5の出力パルスの半値幅が約 $15\mu s$ であることを考えると、通常の放電パルスであれば、この近似で十分対応できると考えられる。

電流パルス法により計測された信号からは、表3.2に示す6種類の部分放電特性が統計処理される。測定サイクル数は $L$ 、サンプリング時間は $T$ とする。 $q_{im}$ は放電電荷量が $l[pC]$ 以上 $m[pC]$ 以下である放電電荷量区間を示し、この区間で発生する放電の発生個数を $n_{im}$ と定義する。 $\phi_i$ は電源波形の1サイクルを $n$ 等分に分割したときの、 $i$ 番目の位相区間を示す。本研究では $n=120$ としたため、 $\phi_i$ は $3deg.$ きざみである。 $q_{ij}$ はウィンド $\phi_i$ 中で発生した $j$ 番目の放電の放電電荷量を示す。



表3.2 部分放電分布特性 (パルス法)

(A) Discharge Level (q) vs Repetition Rate (N)

$$N(q_{im}) = \frac{1}{T} n_{im}$$

(B) Phase Angle ( $\phi$ ) vs Repetition Rate (N)

$$N(\phi_i) = \frac{1}{T} n_i$$

(C) Phase Angle ( $\phi$ ) vs Cycle-mean Discharge Level ( $q_{cave}$ )

$$q_{cave}(\phi_i) = \frac{1}{L} \sum_j q_{ij}$$

(D) Phase Angle ( $\phi$ ) vs Pulse-mean Discharge Level ( $q_{pave}$ )

$$q_{pave}(\phi_i) = \frac{1}{n_i} \sum_j q_{ij}$$

(E) Phase Angle ( $\phi$ ) vs Maximum Discharge Level ( $q_{max}$ )

$$q_{max}(\phi_i) = \text{Max}_j \{q_{ij}\}$$

(F) Phase Angle ( $\phi$ ) vs Discharge Current (Iq)

$$Iq(\phi_i) = \frac{1}{T} \sum_j q_{ij} = q_{pave}(\phi_i) * N(\phi_i)$$

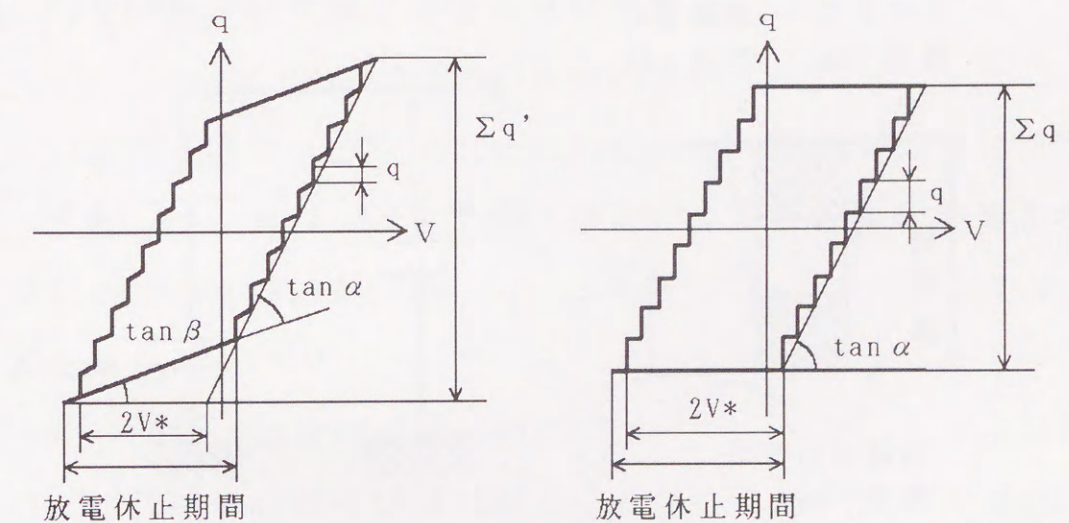
統計処理された6種類の分布特性は、コンピュータにより3次元表示させ、プリンタにより出力することができる。さらに、放電電

荷量-発生頻度-位相分布 (q-N- $\phi$  分布) を出力することも可能であり、放電パルスの位相分布を詳細に評価する事ができる。

### 3.4.2 部分放電特性諸量 (ブリッジ法)

ブリッジ法 (平衡型リサージュ法) により計測された信号からは、1サイクル当たりの総放電エネルギー (U)、半サイクル当たりの総放電電荷量 ( $\Sigma q$ )、ボイド間の放電開始電圧 ( $v_s$ )、残留電圧 ( $v_r$ ) などが計算できる。図3.4(b)で与えられる放電電荷量 ( $\Sigma q$ ) を縦軸に、その時の印加電圧を横軸に入力すると、図3.6のようなリサージュ図形を描くことができる。ここで、半サイクル当たりの総放電電荷量 ( $Q_L$ ) は、図3.7に示す部分放電等価回路で示すボイド容量の関係から次式で与えられる。

$$Q_L = \Sigma q = n \cdot q = 2 \{ (Cb^2 / (Cg + Cb)) \} (V_m - V_r) = 2 \cdot Cb (V_m - V_r) \quad (\text{但し } Cg \ll Cb) \quad (3.2)$$



(a) 平衡していない場合 (b) 平衡している場合

図3.6 リサージュ図形



1 サイクル当たりの放電エネルギー( $U_L$ )は、一発の放電の放電エネルギーを  $u$  とすると

$$U_L = 2 \cdot n \cdot u = n \cdot q \{ (C_g + C_b) / C_b \} (V_s + V_r) \\ = (V_s + V_r) \cdot Q_L \quad (\text{但し } C_g \ll C_b) \quad (3.3)$$

となる。放電休止期間を  $2V^*$  とすると、

$$2V^* = V_s + V_r \quad (3.4)$$

と表されるので式(3.3)は、

$$U_L = 2V^* \cdot Q_L \quad (3.3')$$

と書き換えられる。ここで、ブリッジが完全に平衡している場合には図3.6(b)のような傾いていない平行四辺形となるため、 $Q_L$ 、 $2V^*$  はそれぞれその高さ、幅となる。したがって1サイクル当たりの放電エネルギー( $U_L$ )はその面積に相当する。一方、完全に平衡していない図3.6(a)の場合にも、放電休止期間に相当する部分の傾き  $\tan \beta$  を用いて、 $Q_L$  は次式により補正することができる。

$$Q_L = \Sigma q_L' - 2 \cdot V_m \cdot \tan \beta \quad (3.5)$$

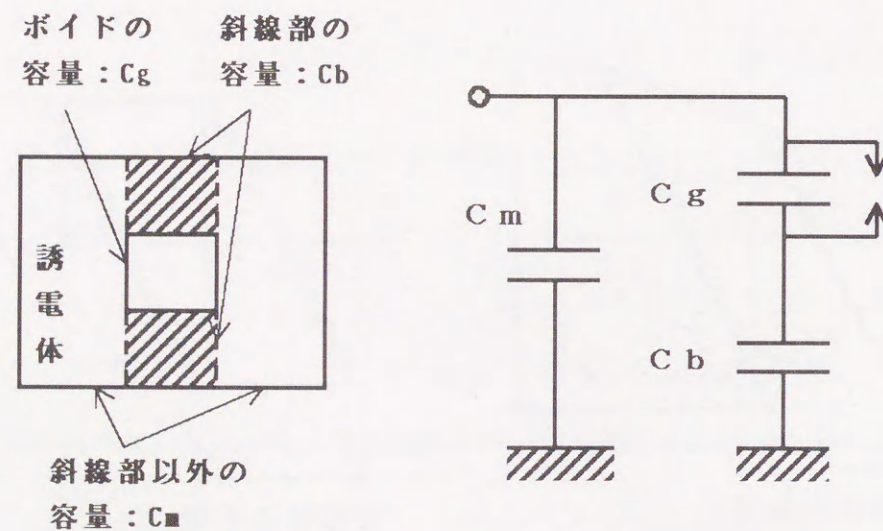


図3.7 部分放電の等価回路

ここで、 $\Sigma q'$  はリサージュ回路が平衡していない場合のリサージュ図形の最大値と最小値の差である。放電エネルギー( $U_L$ )に関しては、リサージュ図形が  $\tan \beta$  だけ傾いてもその面積は保存されるため、補正の必要がないことが簡単な幾何学的計算からわかる。

つぎに  $V_s$ 、 $V_r$  について考えてみる。放電期間のリサージュ図形の傾きを  $\tan \alpha$ 、放電休止期間のその傾きを  $\tan \beta$  とすると、次式で与えられる。

$$\tan \alpha = C_m + C_b \quad (3.6)$$

$$\tan \beta = C_m + C_g \cdot C_b / (C_g + C_b) \quad (3.7)$$

また、完全に平衡していない場合のリサージュ図形の幅の補正は、

$$2V^* = \{1 - (\tan \beta / \tan \alpha)\} (V_s + V_r) \\ = \{1 - (\tan \beta / \tan \alpha)\} \{ (C_g + C_b) / C_b \} (V_s + V_r) \quad (3.8)$$

となるので、式(3.6)、式(3.7)より  $\tan \alpha - \tan \beta$  は次式で与えられる。

$$\tan \alpha - \tan \beta = C_b^2 / (C_g + C_b) \quad (3.9)$$

式(3.9)を  $C_b$  について解くと次式が得られる。

$$C_b = [(\tan \alpha - \tan \beta) + \{(\tan \alpha - \tan \beta)^2 + 4 \cdot C_g (\tan \alpha - \tan \beta)\}^{1/2}] / 2 \quad (3.10)$$

また、式(3.8)、式(3.9)より  $2V^*$  は次式のように書き換えられる。

$$2V^* = \tan \alpha (V_s + V_r) / C_b \quad (3.11)$$

このことから、

$$V_s = (2V^* \cdot \tan \alpha + q) / (2 \cdot C_b) \quad (3.12)$$

$$V_r = (2V^* \cdot \tan \alpha - q) / (2 \cdot C_b) \quad (3.13)$$

が得られる。



### 3.4.3 総放電電荷量と総放電エネルギー

ブリッジ法（平衡型リサージュ法）の半サイクル当たりの総放電電荷量（ $\Sigma q$ ）は、前述したようにリサージュ図形の高さから式（3.2）により求めることができ、平衡が不十分な場合には式（3.5）により補正して求めることができる。また、電流パルス法でも次式により半サイクル当たりの総放電電荷量を求めることができる。

パルス法では、時刻 $t_i$  [s]で発生した放電パルスの放電電荷量を $q_i$  [C]とすると、正、負の極性に分けて、

$$\begin{aligned} Q_{p+} &= (1/L) \sum_{q_i > 0} q_i \\ Q_{p-} &= (1/L) \sum_{q_i < 0} q_i \end{aligned} \quad (3.14)$$

として計算できる。

1 サイクル当たりの総放電エネルギー（ $U$ ）は、ブリッジ法の場合には式（3.3'）より求めることができ、パルス法のエネルギー（ $U_p$ ）は、次式により求めることができる。

$$U_p = (1/L) \sum_i q_i \cdot V(t_i) \quad (3.15)$$

ところで、パルス法では放電の検出感度の問題などにより、ブリッジ法より測定誤差が大きいことから一般に、

$$Q_p (\text{パルス法}) \leq Q_L (\text{ブリッジ法}) \quad (3.16)$$

$$U_p (\text{パルス法}) \leq U_L (\text{ブリッジ法}) \quad (3.17)$$

となる。特に、SPMD、PLPDに対しては式（3.16）、式（3.17）の傾向が大きくなる。SPMDについてはこの傾向が顕著であるほどパルス法の検出感度以下の放電が数多く発生しているといえる。従って両方法による部分放電信号を同時計測し、計測された $Q_{p+}$ ・ $Q_{p-}$ と $Q_L$ 、 $U_p$ と

$U_L$ を比較することにより放電の群小化について定量的な評価を行うことが可能となる。

### 3.5 放電群小率の導入

内部部分放電劣化現象の経時変化を測定していくと、通常の放電形態から個々の放電電荷量が非常に小さく単位時間当たりの放電個数が非常に多い放電に移行することが確認された<sup>[6]</sup>。この放電現象は群小部分放電（SPMD）と呼ばれている。群小部分放電は放電電荷量が非常に小さいため通常の放電検出器では検出感度以下となり検出する事が困難である。放電が群小部分放電に移行した後においても総量はそれ以前の放電とほぼ同量の放電が発生しており、放電が群小化した後でも絶縁材料の劣化は進み群小部分放電が発生している状態から突然絶縁材料の全路破壊にいたる。機器の部分放電試験を行う場合、実際には群小部分放電が発生して絶縁材料の劣化が進んでいるにも関わらず放電が発生していないと判断される可能性があり、その有害性についていくつかの報告がある<sup>[4][7][8]</sup>。しかしこれまでは群小部分放電への放電形態の移行を定量的に判断する手法がなく、不明な点も多く残されていた。そこで、群小部分放電を定量的に判断する量として新たに放電群小率というパラメータを定義した。

#### 3.5.1 群小部分放電

固体絶縁材料の部分放電による劣化現象に関しては、これまで多



くの研究がなされてきており、特に内部ボイドを有する試料においては、電流パルス法により観測される放電電荷量が課電時間の経過に伴い低下・消滅し、その状態が絶縁破壊の直前まで継続することが報告されている<sup>[4][6]</sup>。従来、この放電電荷量の低下が生じる原因として、無パルス性放電説<sup>[9][10]</sup>、ボイド壁面の導電化説<sup>[11]</sup>、ボイド内圧力の変化説<sup>[10]</sup>、ボイド内気体組成変化説<sup>[8][12][13]</sup>など数多くの仮説が提示され、これを検証するために種々の実験が試みられたが、仮説を裏付ける実験結果はまだ得られておらず<sup>[6]</sup><sup>[9]</sup>、不明な点も多い。しかしながら放電が低下した状態においても、実際には放電が消滅しているのではなく、個々の放電電荷量が非常に小さく単位時間当たりの放電発生個数が非常に多い放電形態（群小部分放電：SPMD）に移行していることが、部分放電の光電流測定により示された<sup>[6]</sup>。

SPMDが優勢になった状態においても総放電電荷量は群小化以前とあまり変わらないことや、絶縁破壊の直前までSPMDが継続することなどから、SPMDが内部放電劣化と関係があることが示唆された<sup>[4]</sup><sup>[7][8]</sup>。このことから、SPMDの発生機構や劣化との関係を解明することは極めて重要な事であると考えられる。

### 3.5.2 放電群小率の定義

これまでSPMDは、電流パルス法での検出が可能か不可能かによって判断され、定量的な評価はなされなかった。ところが、ブリッジ法を併用したCAPDASを開発することにより、SPMDの検出および定量的な解析を行う手段を導入することが可能となった。すなわち、SP

MDを定量的に評価するパラメータとして、放電群小率を以下のように定義した。

平衡ブリッジ法による検出波形を縦軸に、印加電圧を横軸に入力すると、図3.6のようなリサージュ図形が描かれる。個々の放電電荷量( $q$ )は縦軸方向のステップ状の変位に相当するので、正極性放電、負極性放電それぞれの半サイクル当たりの放電電荷量の総和( $Q_L$ )、1サイクル当たりの放電エネルギー( $U_L$ )は式(3.2)、(3.3)で与えられる。

もちろんこれらの値はパルス法からも計算可能である。時刻 $t_i$ において発生した放電パルスの電荷量を $q_i$ とすると半サイクル当たりの放電電荷量の総和( $Q_p$ )は正、負の極性に分けて式(3.14)で与えられる。また、1サイクル当たりの放電エネルギー( $U_p$ )は、式(3.15)で与えられる。

ところで、ブリッジ法ではあらゆる大きさの放電を原理的に検出する事が可能であるのに対し、パルス法では原理的に測定感度に限界があるため、半サイクル当たりの総放電電荷量および1サイクル当たりの放電エネルギーには、

$$Q_{p+}, Q_{p-} \text{ (パルス法)} \leq Q_L \text{ (平衡ブリッジ法)}$$

$$U_p \text{ (パルス法)} \leq U_L \text{ (平衡ブリッジ法)}$$

という関係がある。この傾向が顕著であるほどパルス法の検出感度以下の放電が数多く発生していると考えられる。このことから、パルス法およびブリッジ法で検出された総放電電荷量をもとに、放電の群小化の度合を定量的に表わす新たなパラメータとして、放電群小率を次式のように定義した。



$$\text{放電群小率} = \frac{Q_L - Q_P}{Q_L} \times 100 \quad [\%]$$

つまりブリッジ法で検出される放電電荷量からパルス法で検出される放電電荷量を差し引いた値すなわちパルス法で検出できない放電の、全体の放電に対する比を放電群小率として定義した。この放電群小率はパルス法による部分放電の検出感度に依存する量であり、ここではCD-5の部分放電測定時の検出感度を基準として採用した。

これまで、放電の群小化を定量的に表わすパラメータは定義されていなかった。しかし、今後は本論文で定義した放電群小率を用いることにより一部の放電のみが群小化した場合などにおいても、群小化を定量的に考察することが可能となり、より明確にSPMDに対する検討を加えることが可能となる。

### 3.6 参考文献

- [1] D. Kind, D.Konig : Electrie, 21, pp.9-13 (1967)
- [2] D. Kind, D.Konig : "AC Breakdown of Epoxy Resins by Partial Discharges in Voids", IEEE Trans. EI, 3-2, pp. 40-46 (1968)
- [3] 電気学会技術報告：部分放電劣化，II-164 (1984)
- [4] 北村，平林：「エポキシ樹脂における内部部分放電の経時変化」，電気学会論文誌A，103巻，9号，pp.507-514 (1983)
- [5] 石田，水野，長尾，小崎：「群小部分放電特性解析システムの開発とその応用」，電気絶縁材料シンポジウム，V-6，pp. 283-286 (1989)

- [6] 家田，田中：「CIGRE SC15 WG06 TG1 (国内) 共同実験」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-79-73，PP.1-10 (1979)
- [7] 松葉：「部分放電による劣化 (レビュー)」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-38，PP.25-34 (1983)
- [8] 山田，匹田，大橋，家田：「JH-1電極系における群小部分放電の発生機構に関する一考察」，電気絶縁材料シンポジウム，VI-6，pp.177-180 (1985)
- [9] 東村，加子，津久井：「密閉ボイドの部分放電特性に影響を及ぼす要因の検討」，電気絶縁材料シンポジウム，VI-1，pp. 109-112 (1981)
- [10] 田中：「CIGRE SC-15 WG-06 TG1の活動」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-36，PP.5-14 (1983)
- [11] 伊藤，堺，鳥山：「ボイドの等価回路とボイド放電の経時変化との対応」，電気学会論文誌A，95巻，8号，pp.335-340 (1975)
- [12] 井開，福永，竜田：「内部部分放電の経時変化と部分放電劣化」，電気学会論文誌A，107巻，5号，p.271 (1987)
- [13] 井開，竜田：「部分放電における群小パルス」，電気絶縁材料研究会資料，EIM-83-41，pp.55-62 (1983)



## 第4章 針状ボイド試料の部分放電特性

### 4.1 まえがき

電力機器の高性能化の要求に答えるため、機器の絶縁部を構成する絶縁材料として高分子材料が採用されている。高分子材料は優れた絶縁性能を持っているが、時間の経過とともにその性能は低下してくる。絶縁材料性能低下の主要因として、内部部分放電による絶縁材料の劣化および侵食があげられる。

内部部分放電の侵食によって合成高分子材料が全路破壊に至る場合、多くは樹脂中にトリリーが進展し、最終的に破壊に至ることから、内部ボイドからのトリリーング現象は、高分子材料の寿命に直接関係する問題であるといえ、内部放電によるトリリーング現象の解析には大きな関心が寄せられている。トリリー現象そのものについては金属電極を埋め込んだ試料による研究成果が多く報告されている。またトリリーの発生条件についての報告例もある<sup>[1]</sup>が、内部ボイド中の放電からトリリーが発生し進展していく過程の部分放電特性の位相分布などの変化について報告された例は余りない。従って高分子絶縁材料に内部部分放電によってトリリーが発生し、絶縁破壊するまでの部分放電特性の変化を測定することは、内部部分放電現象の研究を進めるにあたり重要なことといえる。

本章では、内部部分放電により高分子絶縁材料にトリリーが発生し、高分子絶縁材料が全路破壊に至るまでの部分放電特性の変化について基礎的な知見を得る事を目的とし、内部ボイドからトリリーが発生しやすい針先の形状のボイドを持った針状ボイド試料を使用して、

内部部分放電によりボイド部分からトリリーが発生し、トリリーが進展していく過程における部分放電特性の変化を測定し、検討を加えた結果について述べる。

### 4.2 試料

実験に使用した試料の形状を図4.1に示す。ボイド部分からのトリリーング劣化を模擬するため、比較的トリリーが発生しやすい、針先ボイドを持つ試料形状を用いた。試料は先端曲率半径 $10\mu\text{m}$ 、先端角度 $30\text{deg.}$ に研磨した針をエポキシモールドし、硬化させた後で一旦針を抜きさり、ボイド長が $1.0\text{mm}$ となるように実体顕微鏡で観測しながら再び同一の針を差し込み、差し込んだ針の根元をエポキシ接着剤でシールし、密閉した。その後、絶縁体厚さが約 $4.0\text{mm}$ と

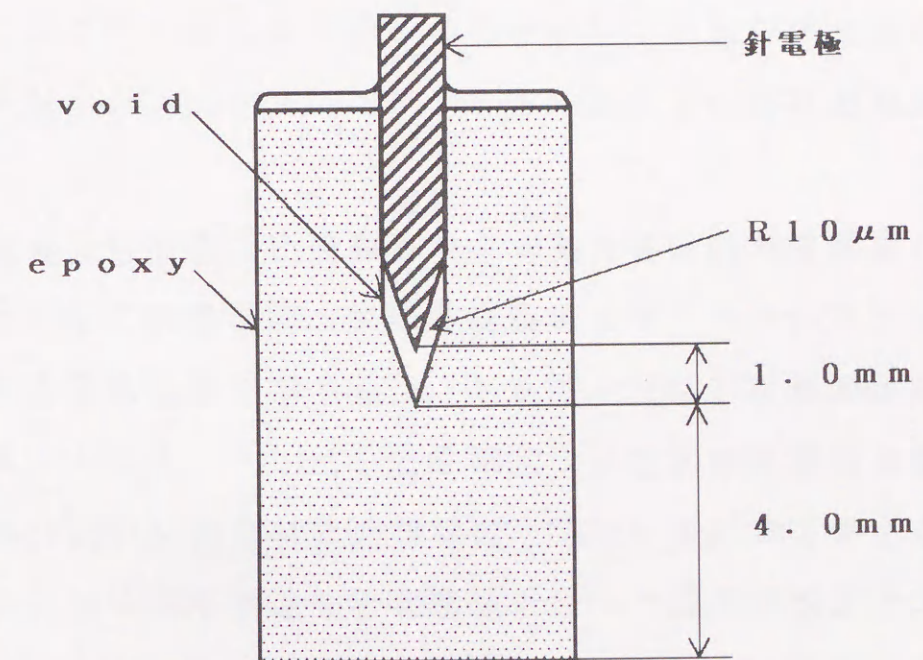


図4.1 針状ボイド試料



表4.1 エポキシ樹脂の配合比および硬化条件

試 料			無 充 填
配合比 (重量部)	主 剤	C Y 2 0 5	1 0 0
	硬化剤	H Y 9 0 5	1 0 0
	可とう性付与剤	D Y 0 4 0	9
	硬化促進剤	D Y 0 6 1	1
硬 化 条 件			80℃ / 5h + 120℃ / 5h
硬化後の比誘電率 (20℃)			3. 5 3

なるように研磨し、側面はトリーが進展する様子が観測できるように平面仕上げを行った。

実験に使用したエポキシ樹脂は表4.1に示す標準配合比および硬化条件で注型法により作成した。

#### 4.3 実験方法

図4.1に示す針状ボイド試料を平板電極上に固定して室温で行い、沿面フラッシュオーバーを防止するために動粘度10(cSt)のシリコンオイル(信越:KF-96)中に浸漬し、針電極側を接地して平板電極に60Hzの交流電圧を印加して実験を行った。

実験は、第3章で述べた部分放電特性解析装置(CAPDAS)を用いて、表4.2に示す実験手順で、部分放電特性の測定を行った。試料1では、最初にAC12kVrmsを1時間印加した後、ボイド部を実体顕微鏡で観察した結果、トリーの発生が観測されなかったので劣化を促進

表4.2 各試料の実験手順

試料番号	電圧印加方法	トリー発生	トリー形態
1	12kV:1時間,以後15kV	440 min 後	ブッシュ状
2	15kV一定	450 min 後	樹枝状

させるため印加電圧を15kVrmsに上昇させて、トリーの発生を示す $q_{max}$ の急増が観測されるまで実験を行った。また、試料2については印加電圧を最初からAC15kVrmsとして実験を行った。部分放電特性の検出は、試料1ではCAPDASのパルス法のみを、試料2ではCAPDASのパルス法とブリッジ法を併用して用いた。

#### 4.4 実験結果

CAPDASのパルス法により測定された試料1の部分放電諸特性の経時変化を図4.2、図4.3に示す。また、試料2の結果を図4.4に示す。

試料1については図4.2に示すように、電圧印加開始約440分後にパルス法により測定した放電電荷量が急増し、印加電圧位相-パルス平均放電電荷量分布( $\phi-q_{pave}$ 分布)は右上がりの傾向を示した。試料1では、トリーの進展に伴って放電電荷量が急増する前段階に、パルス法による測定で放電電荷量が非常に小さくなり、放電がほとんど観測されない状態となった。また試料2では、電圧印加開始60分後の顕微鏡観察で極細トリーの発生が観測された。この極細トリーは、電圧印加約450分後にトリーが大きく成長するま



で同じ形態を保っており、その間はトリー形状に大きな変化はみられず、部分放電特性にも大きな変化は現れなかった。ところが、試料1と同様に、試料2で極細トリーが発生する前の電圧印加開始約30分後に、図4.4(a)に示すパルス法による $\phi-q_{pave}$ 分布において正パルスが非常に小さくなった。しかしこの時点においても図4.4(c)に示すブリッジ法で測定されたリサージュ図形はそれまでと大きく変化せず、放電が発生していることが観測されている。

顕微鏡観察および写真撮影の結果、 $\phi-q_{pave}$ 分布の急増期とほぼ同時にトリーが進展していることが確認された。さらに、パルス法による測定で放電が観測されなくなった時点において、ピットが生

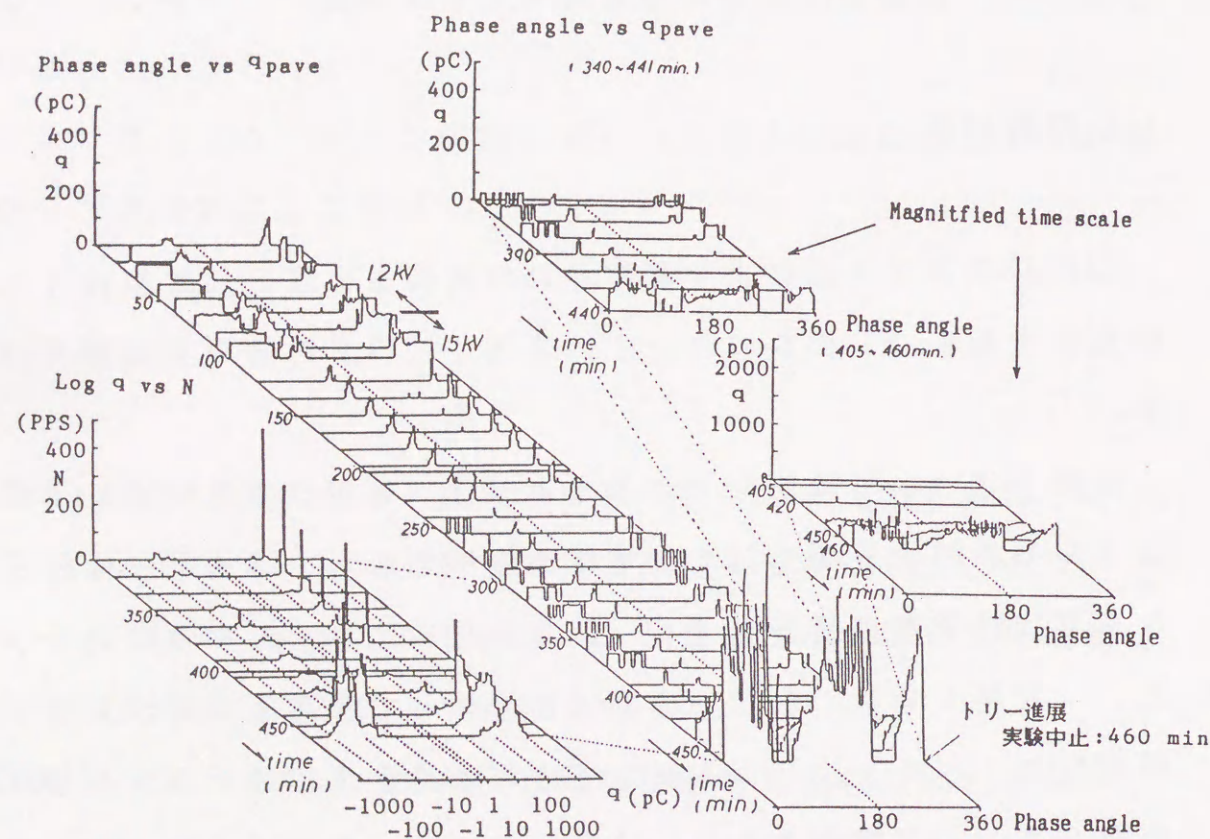
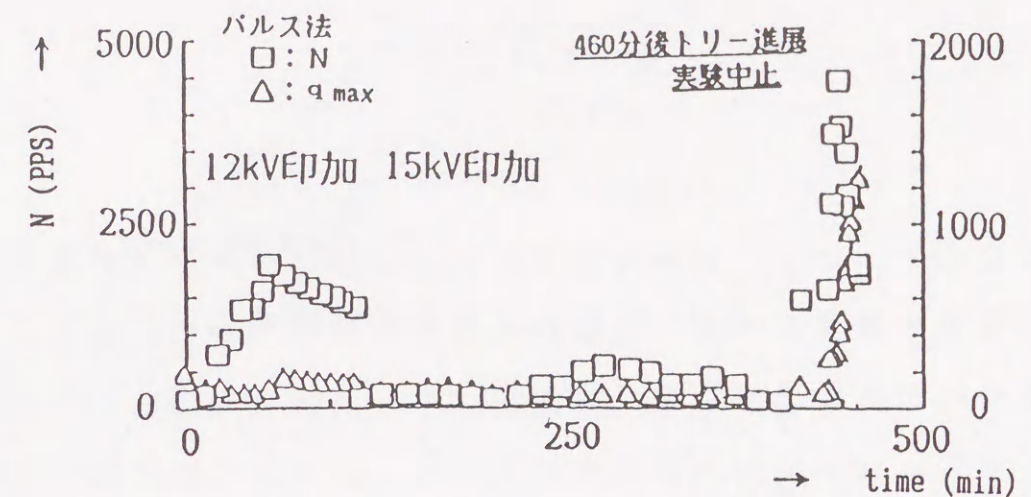
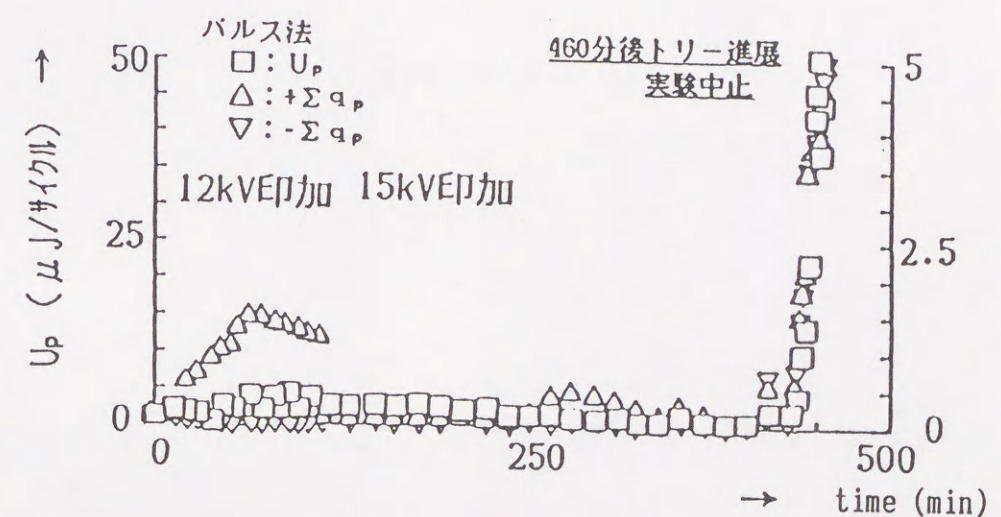


図4.2 試料1の部分放電特性の経時変化



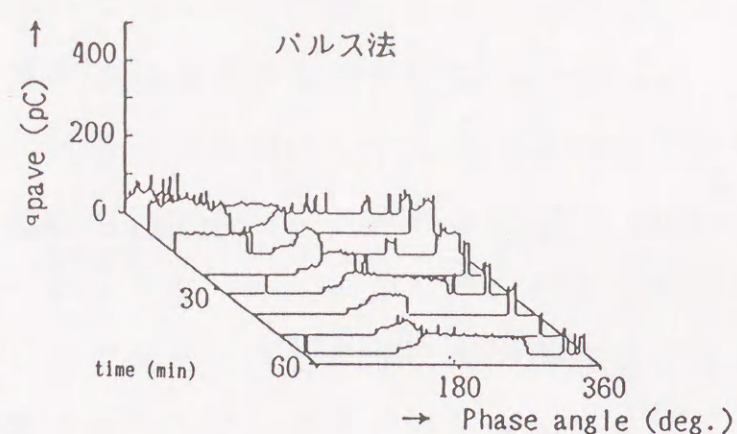
(a) 放電个数、最大放電電荷量の経時変化



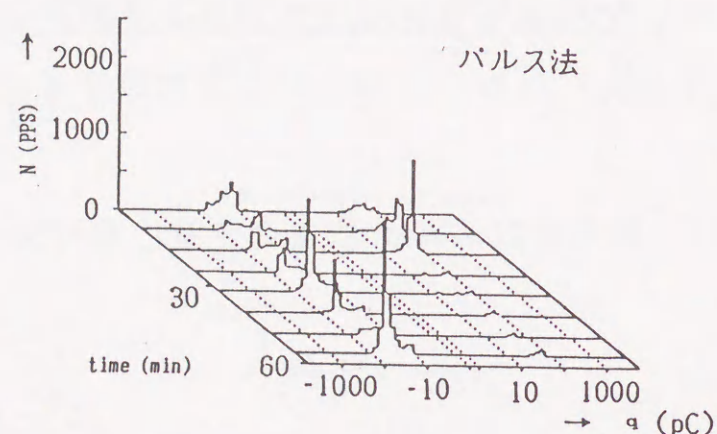
(b) 放電エネルギー、総放電電荷量の経時変化

図4.3 試料1の部分放電特性の経時変化

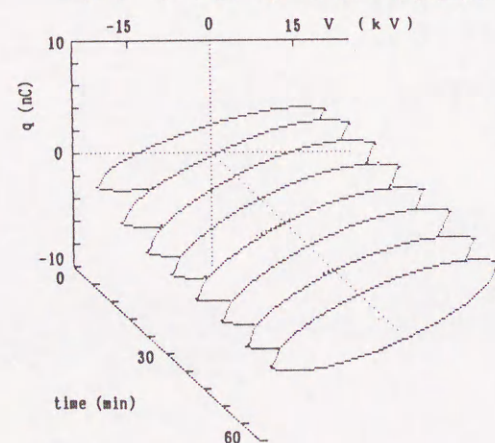




(a)  $\phi$ - $q_{pave}$ 分布の経時変化



(b)  $q$ - $N$ 分布の経時変化



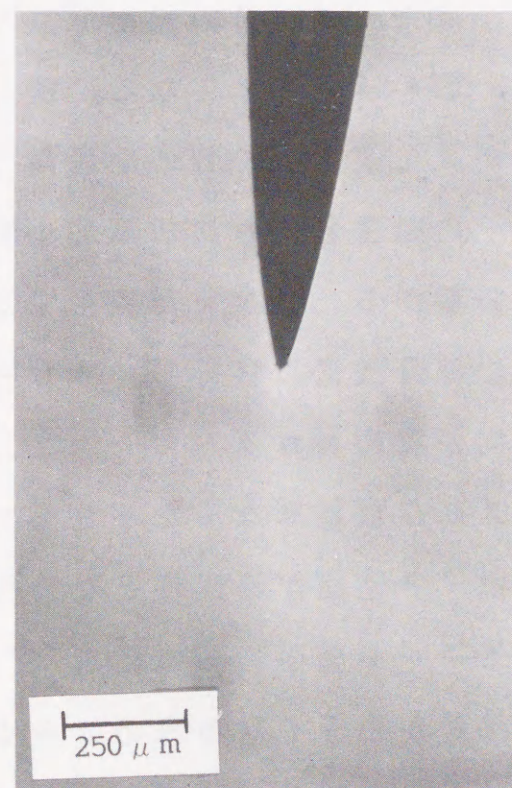
(c) リサージュ図形の経時変化

図4.4 試料2の部分放電特性の経時変化

成していることが観測された。放電が観測されなくなった時点でのボイド先端部および発生したトリーの顕微鏡写真の一例を図4.5に示す。

#### 4.5 検討

各試料の部分放電特性の経時変化の測定の結果、トリーが発生および成長する前段階に、パルス法により測定された総放電電荷量が小さくなることが観測された。この傾向は、特に樹脂側が負となる極性で顕著に現れた。しかし、パルス法で放電が観測されなくなった時点でも、ブリッジ法による測定から得られた各周期当たりの総



(a) 観測されたピット



(b) 発生したトリー

図4.5 ボイド先端部のピットおよび発生したトリーの一例



放電電荷量は、それまでと大きく変わらず観測されており、総放電電荷量は変わっていない事を示している。このことから、トリーが発生および成長する前段階には放電電荷量がパルス法の検出感度以下となり群小部分放電が発生していることが示唆された。

図4.6に、試料1と同じ実験手順でトリー発生まで部分放電特性を測定した試料のトリー発生前後の検出感度7.8pCにおける放電群小率の経時変化を示す。この試料は電圧印加約395分後にブッシュ状のトリーが観測された。図4.6よりトリーが発生する直前の340分から380分ころまで放電群小率がほぼ100%であり、ほとんどの放電が群小化している事がわかる。その後トリーが発生すると急激に放電群小率が低下し、トリーの進展とともに放電が群小部分放電から通常の放電に戻っている事がわかる。また、試料2の検出感度7.8pCにおける放電群小率を計算すると、図4.7のようになる。図4.7より、試料1の結果と同様にトリーが発生する450分の前段階では放電群小率が90%以上と高く、トリーの発生とともに放電群小率は低くなっていることがわかる。以上の事から、トリーが発生する場合には、その前段階に放電形態が群小部分放電に移行し、トリーが発生すると通常の放電形態に戻る傾向が認められる。

放電の低下現象は、放電形態がパルス的な放電でなくなるためであるとする無パルス性放電説<sup>[2][3]</sup>、ボイド壁面が導電性となり放電が発生しにくくなるためであるとするボイド壁面の導電化説<sup>[4]</sup>、ボイド内圧力が低下するために放電電荷量が小さくなるためであるとするボイド内圧力の変化説<sup>[3]</sup>、ボイド内の酸素が消費されて窒素中での放電形態に移行するためであるとするボイド内気体組成変化説<sup>[5][6][7]</sup>など数多くの仮説が提示されている。この中で無パ

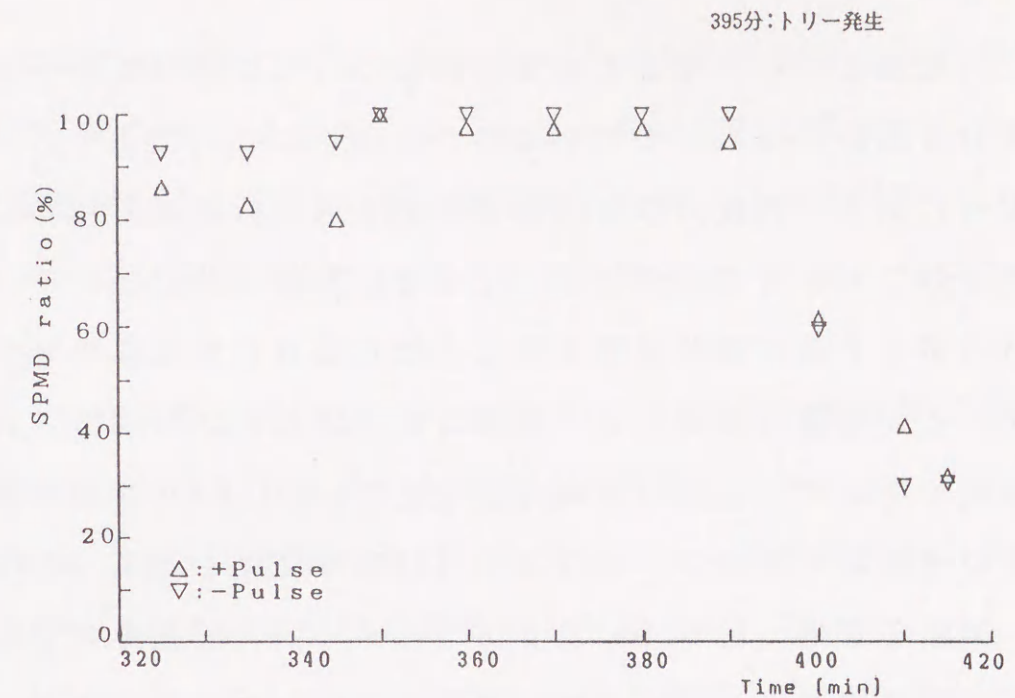


図4.6 試料1の放電群小率の経時変化（検出感度7.8pC）

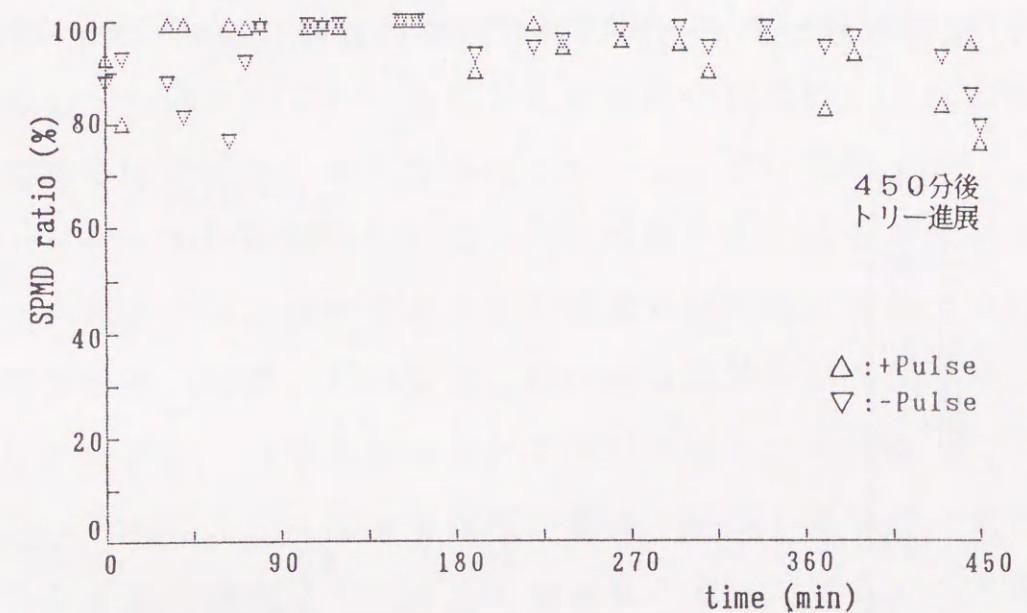


図4.7 試料2の放電群小率の経時変化（検出感度7.8pC）



ルス性放電説とボイド壁面の導電荷説については放電の低下現象が群小部分放電の発生のためである事が明らかにされた事で否定された。さらにボイド内圧力の変化説よボイド内気体組成変化説については我々のこれまでの研究においてもその影響は確認されている。図4.8にボイド内の気体組成を変化させた場合の放電群小率の変化を示す。この実験は放電により酸素のみが酸化により消費された状態を模擬するため、空気の窒素分圧である81.3kPaだけ窒素を充填し、その後酸素を加えていきながら部分放電特性を測定した結果である。実験の結果、図4.8に示すようにボイド内酸素量が少なくなると放電群小率は高くなり、放電が群小化する傾向はみられたが実際に放電の一部が群小化した電圧印加2.5時間後の放電群小率と比較すると放電群小率の増加傾向は少なかった。さらに、放電がほぼ完全に群小化した後でボイド内気体を空気一気圧に置換したところ、放電形態が群小化前の放電形態に復帰しなかった。以上の事

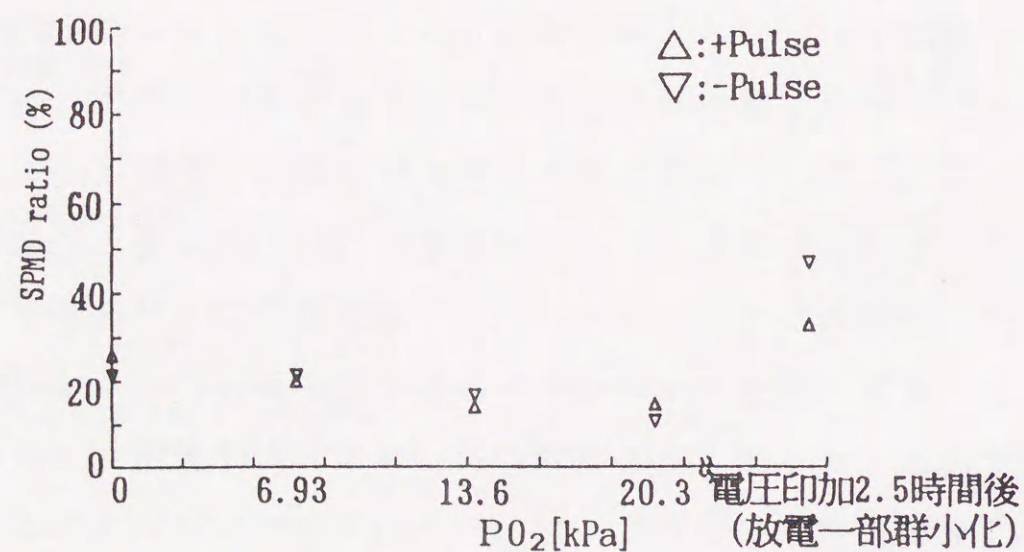


図4.8 放電群小率の気体組成依存性 (検出感度7.8pC)

から、放電の群小化にボイド内圧力やボイド内気体組成は放電の群小化に多少影響を与えるものの、放電の群小化の主要因とはならないことがわかった。このように群小部分放電の発生要因についてはいくつかの説が提案されているがその詳細はいまだ明らかになっていない。

今回、部分放電特性の測定と並行して行った顕微鏡観察の結果、放電が群小化している時点に針状ボイド先端部においてピットの生成などによるボイド表面の荒れが発生している事が観測された。このことから、ボイド先端部表面に荒れが発生する場合やトリーが成長する場合など、ボイド表面状態の変化と放電の群小化現象とがなんらかの関係があることが考えられる。

#### 4.6 まとめ

針状ボイド試料を用いて、内部部分放電によりボイド部分からトリーが発生し、進展していく過程における部分放電特性の変化を調べた。実験の結果明らかとなった事柄について以下に要約する。

トリーが発生する前段階として、放電形態が群小部分放電に移行しトリーが発生すると通常の大サイズの放電に戻る事が確認された。また顕微鏡観察の結果、群小部分放電へ放電形態が移行するのとはほぼ同時期に針状ボイド先端部において表面の荒れが観測されていることから、SPMDの発生と絶縁体表面の侵食・劣化などボイド表面状態の変化が大きく関係していることが示唆された。これまでの報告にあった放電の群小化の要因以外に、ボイド表面の荒れも放電の群小化を引き起こす要因となる可能性が考えられる。



#### 4.7 参考文献

- [1] 北村, 平林: 「エポキシ樹脂の内部部分放電劣化末期におけるトリ-進展現象」, 電気学会論文誌A, 104巻, 10号, pp. 561-568 (1984)
- [2] 東村, 加子, 津久井: 「密閉ボイドの部分放電特性に影響を及ぼす要因の検討」, 電気絶縁材料シンポジウム, VI-1, pp. 109-112 (1981)
- [3] 田中: 「CIGRE SC-15 WG-06 TG1の活動」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-83-36, pp.5-14 (1983)
- [4] 伊藤, 堺, 鳥山: 「ボイドの等価回路とボイド放電の経時変化との対応」, 電気学会論文誌A, 95巻, 8号, pp.335-340 (1975)
- [5] 山田, 匹田, 大橋, 家田: 「JH-1電極系における群小部分放電の発生機構に関する一考察」, 電気絶縁材料シンポジウム, VI-6, pp.177-180 (1985)
- [6] 井開, 福永, 竜田: 「内部部分放電の経時変化と部分放電劣化」, 電気学会論文誌A, 107巻, 5号, p.271 (1987)
- [7] 井開, 竜田: 「部分放電における群小パルス」, 電気絶縁材料研究会資料, EIM-83-41, pp.55-62 (1983)

#### 第5章 開放ボイド試料の部分放電特性

##### 5.1 まえがき

固体絶縁材料の部分放電による劣化現象に関して、内部ボイドを有する試料では、課電時間の経過にともない電流パルス法により観測される放電電荷量が低下・減少していき、一見放電が消滅した状態となり、その状態が絶縁破壊の直前まで継続することが報告されている<sup>[1]-[5]</sup>。しかし、実際にはこの状態においても放電は消滅しているのではなく、個々の放電電荷量が非常に小さく単位時間当たりの放電個数が非常に多い放電形態である、いわゆる群小部分放電(Swarming Pulsive Microdischarges: SPMD)に移行していることが、光電子増倍管を用いた放電光の測定により示された。

SPMDが発生した状態においても総放電電荷量は群小化前とあまり変わらないこと、多くの場合絶縁破壊の直前までSPMDが継続することなどから、SPMDが内部放電劣化と関係あることが示唆され、前章の結果もこれを支持している<sup>[3][6][7]</sup>。前述のようにSPMDが生じる原因として、ボイド内圧力の変化説<sup>[8]</sup>、ボイド内気体組成変化説<sup>[7][9][10]</sup>などいくつかの仮説が提示され、これを検証するために種々の実験が試みられたが、仮説を十分に裏付ける実験結果はまだ得られておらず<sup>[1][11][12]</sup>、不明な点も多く残されている。

本章では、放電の群小化についての基礎的な理解と、これまでに報告されてきた内部部分放電の群小化の要因についての基礎的な知見を得るため、CIGRE Method-II電極を改良し、ボイド中に常に新鮮な乾燥空気が充填される構造とした試料を用いて、これまでに報告されてきた放電の群小化の要因のうち、ボイド内圧力の変化説と



ボイド内気体組成の変化説についてその有効性を確かめる実験を行い、検討を加えた結果について述べる。ここでCIGRE Method-II電極は、厚さ1mmの絶縁体と高さ125 $\mu$ mの円筒形のボイドから構成される図5.1に示す形状の剥離ボイドを模擬した密閉ボイド試料であり、内部部分放電試験に一般的に用いられている電極系である。

## 5.2 試料

実験に使用した試料の形状を図5.2に示す。ボイド内圧力とボイド内気体組成の変化が放電の群小化の要因であるという、これまでの報告の妥当性を確かめるために、CIGRE Method-II電極系を改良した試料を用いた。試料の改良点は、CIGRE Method-II電極の平板

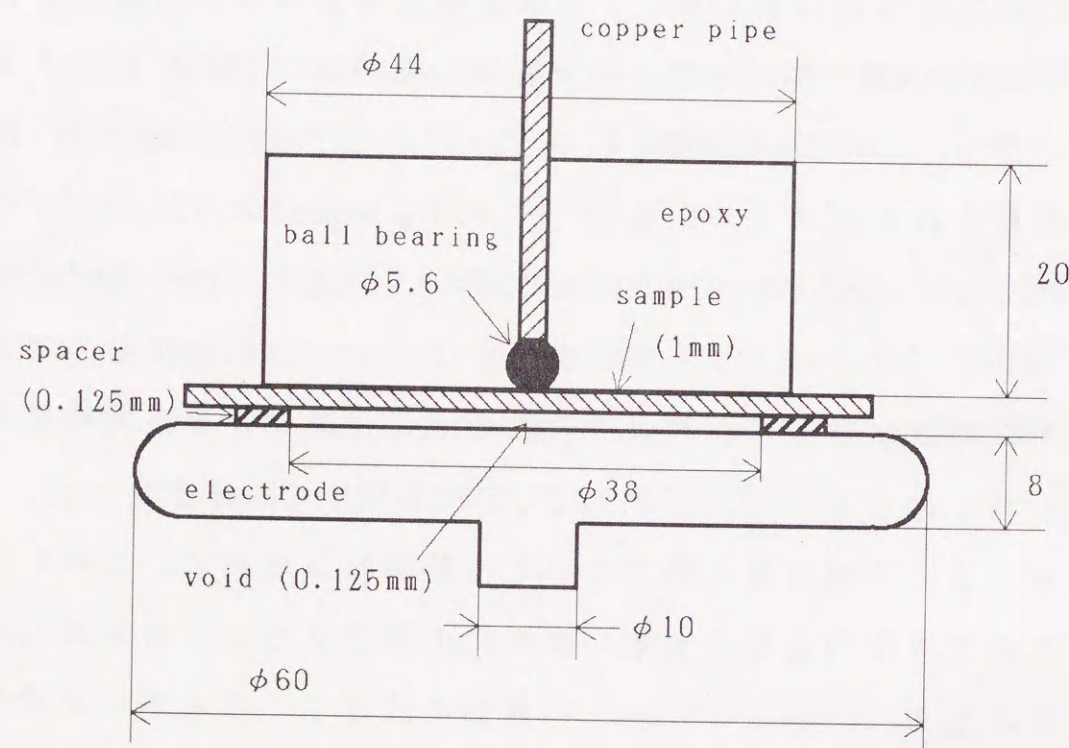


図5.1 CIGRE Method-II電極系試料

電極の放電が発生しない領域にあらかじめ付いている空気抜き用の貫通孔を用い、図5.2に示すようにこれと反対側にもう一つ同様な貫通孔を開け、それぞれにガラス管を挿入し、エポキシ接着剤で接続部をシールした。さらにガラス管に接続したゴムチューブを通して片側から乾燥空気を流入し、もう一方のガラス管からボイド内の空気を排出させ、常に新しい乾燥空気がボイド内を満たし、ボイド内圧力もほぼ大気圧となる構造とした。なお、実験に使用したエポキシ樹脂板は表5.1に示す標準配合比および硬化条件で注型法により作成した。

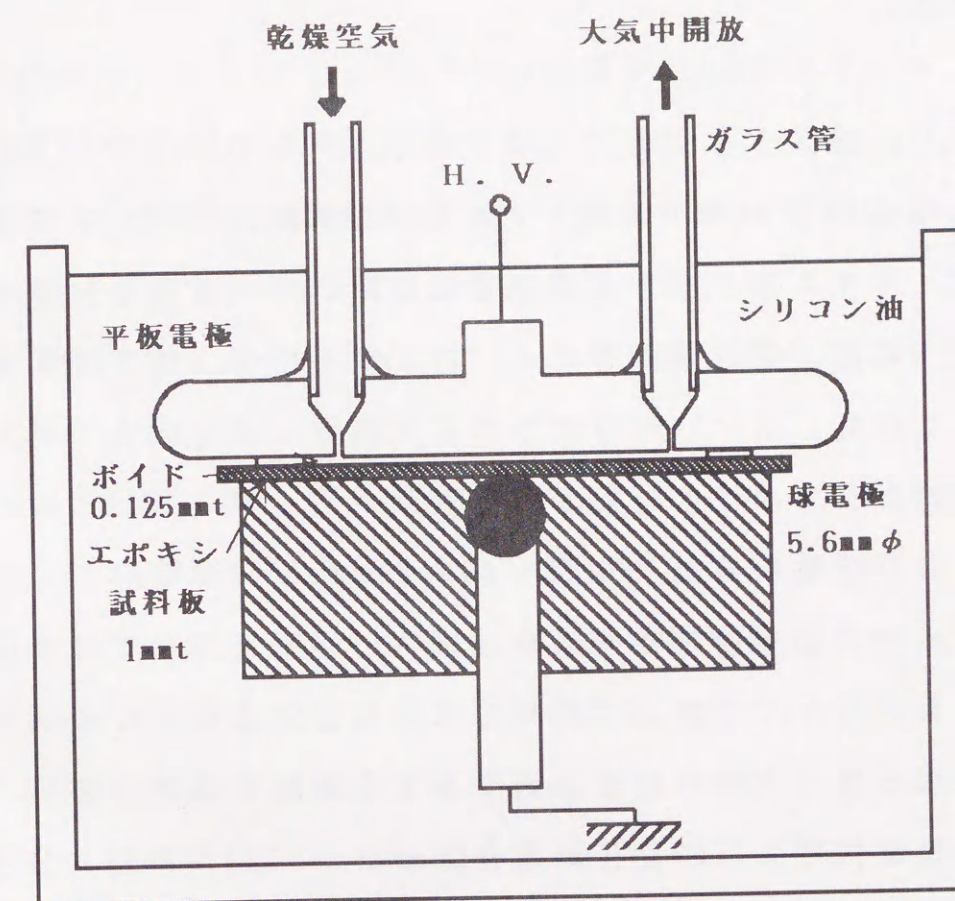


図5.2 開放ボイド試料



表5.1 エポキシ樹脂の配合比および硬化条件

試 料			無 充 填
配合比 (重量部)	主 剤	C Y 2 0 5	1 0 0
	硬化剤	H Y 9 0 5	1 0 0
	可とう性付与剤	D Y 0 4 0	9
	硬化促進剤	D Y 0 6 1	1
硬 化 条 件			80℃ / 5h + 120℃ / 5h
硬化後の比誘電率 (20℃)			3. 5 3

## 5.3 実験方法

試料は、沿面フラッシュオーバーを防止するため、図5.2に示すように動粘度10(cSt)のシリコンオイル(信越:KF-96)中に浸漬した。また、ガラス管を通して平板電極に開いている貫通孔の一方から毎分2cc程度の乾燥空気をボイド内に流入させ、他方の貫通孔から大気中に排気しボイド内空気を常に大気中の気体組成・圧力とほぼ同じ状態になるようにした。

試料には平板電極側から60Hz・AC24kVrmsの交流電圧を印加し、第3章で述べた部分放電特性解析装置(CAPDAS)を用いて部分放電特性の測定を行った。実験は、試料の部分放電開始電圧および消滅電圧を計測した後、試料が絶縁破壊するまで電圧を印加し続け、その間の部分放電特性の経時変化測定を行った。

表5.2 放電開始電圧(Vi)・消滅電圧(Ve)

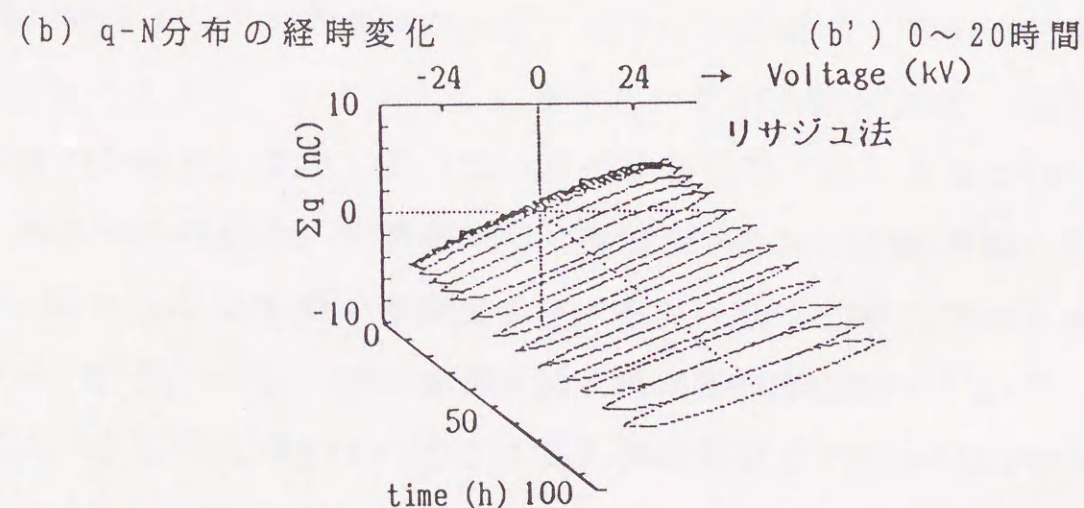
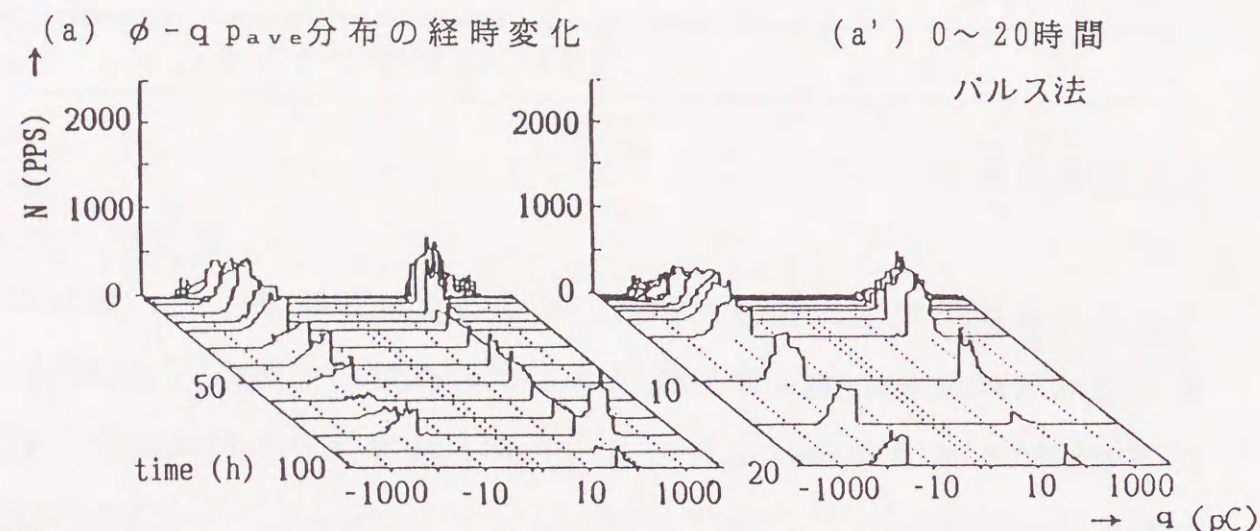
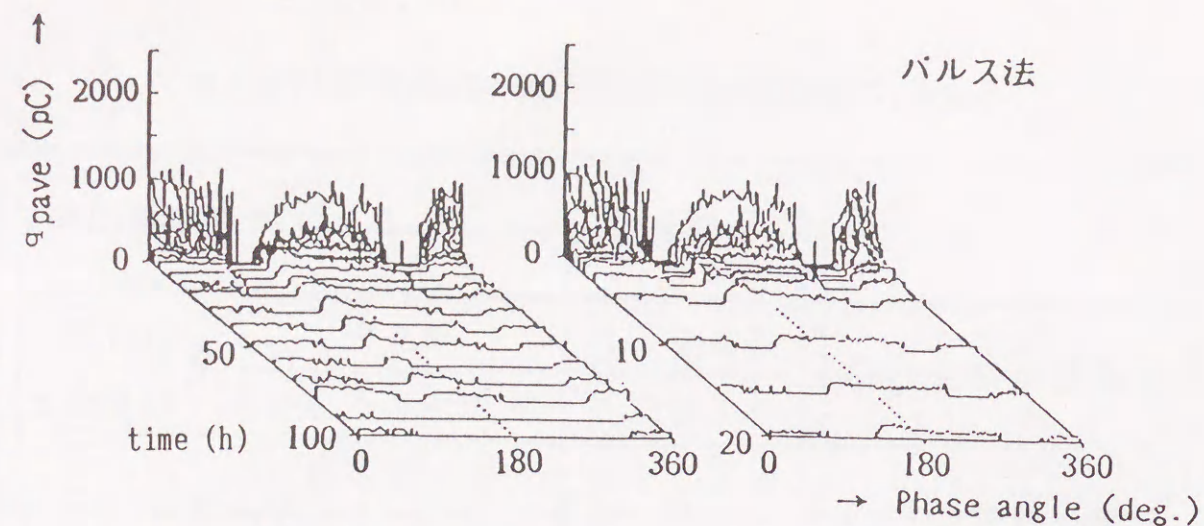
	測定値[kV]	ボイド部換算値[kV]
放電開始電圧(Vi)	3. 0 5	0. 9 3
放電消滅電圧(Ve)	2. 8 5	0. 8 7

## 5.4 実験結果

この試料は、電圧印加後約102.9時間後に絶縁破壊した。試料の電圧印加開始直後の放電開始電圧および消滅電圧を表5.2に示す。ここでボイド部換算値は試料のボイド部と絶縁体部の静電容量の比から換算した値である。測定された値はパッシェン・カーブから求められた値(ボイド部で約1.10kV)よりも多少低めではあるが、ほぼ計算値と一致している。

CAPDASで測定された部分放電特性を図5.3に示す。図5.3において図(a)は電圧印加開始から試料が絶縁破壊するまでのパルス法で測定された印加電圧位相-パルス平均放電電荷量分布( $\phi$ - $q_{pave}$ 分布)、図(a')は電圧印加開始から20時間後までの分布、図(b)は電圧印加開始から試料が絶縁破壊するまでのパルス法で測定された放電電荷量-放電個数分布( $q$ - $N$ 分布)、図(b')は電圧印加開始から20時間後までの分布、図(c)は電圧印加開始から試料が絶縁破壊するまでのブリッジ法で測定されたりサジュー図形の変化をそれぞれ





(c) リサージュ図形の経時変化

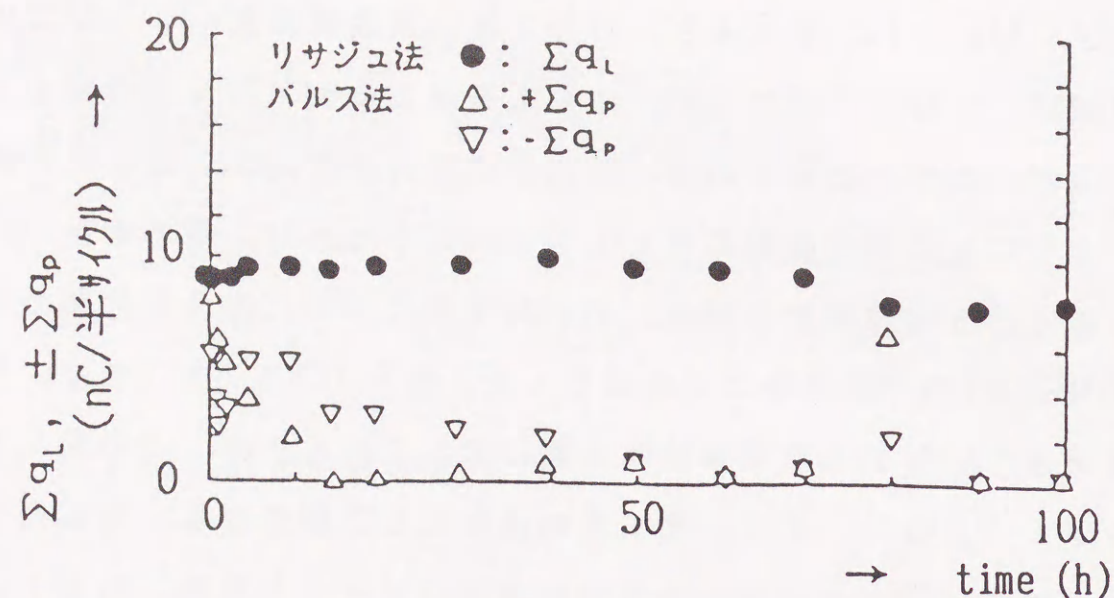
図5.3 部分放電特性の経時変化

示す。なお、パルス法の測定感度は15.6pCである。

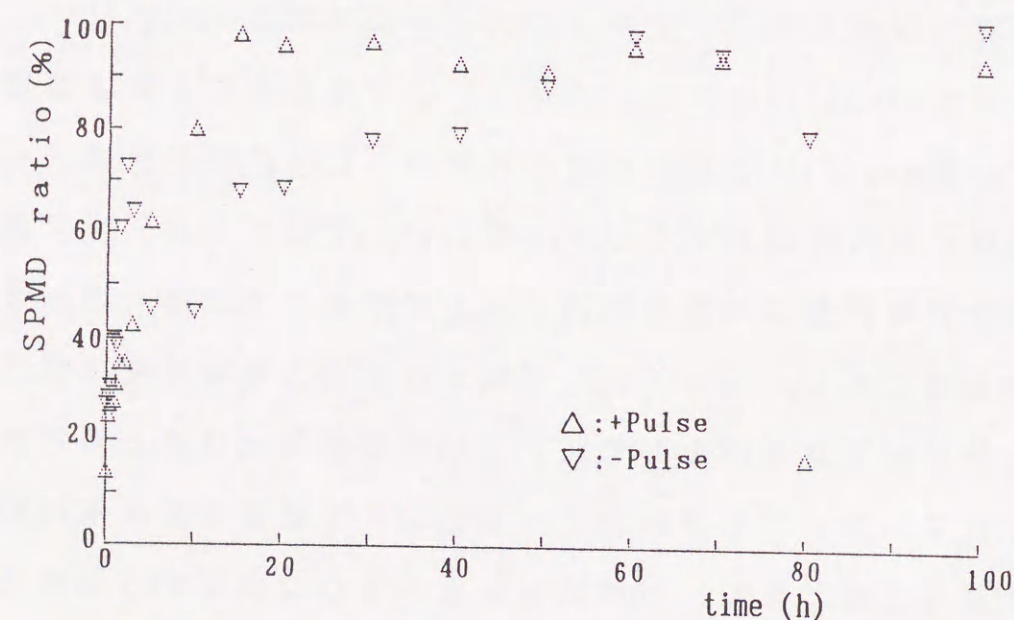
図5.3(a)、(a')を見ると、パルス平均放電電荷量 $q_{pave}$ は電圧印加初期には約1000pCほどの大きな放電が正・負パルスとも発生しているが、わりと初期の段階（電圧印加開始後数時間）で時間の経過とともに放電電荷量が急減していることがわかる。その後数10pCの大きさの放電が発生し続け、約90時間後には負パルスが計測できなくなり、102.9時間後に絶縁破壊した。図5.3(b)、(b')では、放電電荷量 $q$ に対する放電個数 $N$ を図に示してあるため、この変化の様子がよくわかる。まず、電圧印加直後には正極性放電・負極性放電ともほぼ1000pCの辺りに放電発生個数のピークがある。しかし、時間の経過とともに放電発生個数のピークは低電荷量側に移り、10時間を過ぎたあたりからそのピークは検出感度である15.6pC以下となっていることがわかる。これに対して図5.3(c)のリサージュ図形は時間の経過によらずそれほど大きな変化は示していない。

図5.4(a)にパルス法、ブリッジ法で測定された総放電電荷量を示す。図5.4(b)はこれらの値から算出した、試料が破壊するまでの放電群小率の経時変化を示す。図5.4(a)ではブリッジ法で測定された総放電電荷量は時間の経過によらず破壊までほぼ一定の値を示しているのに対し、パルス法で測定された総放電電荷量は電圧印加10時間後あたりから減少していき、50時間以降ではほとんど放電が検出されていないことがわかる。図5.4(b)では放電群小率が時間の経過とともに高くなり、30時間後あたりからはほぼ90%を越え、ほとんどの放電が群小化してしまいその状態が破壊直前まで継続していることが認められた。





(a) 総放電電荷量



(b) 放電群小率 (検出感度 15.6pC)

図 5.4 部分放電特性の経時変化

## 5.5 検討

開放ボイド系試料を用いた実験の結果、ブリッジ法で測定された総放電電荷量は時間の経過によらず破壊までほぼ一定の値を示しているのに対し、電圧印加約10時間後からパルス法で測定された放電電荷量は小さくなり、一部の放電はパルス法の検出感度以下となった。これにともない総放電電荷量も非常に少なくなった。これらの経時変化により放電群小率は時間の経過とともに高くなり、50時間以降ではほぼ90%を越え、ほとんどの放電が群小化したことを示した。これまでに述べたように放電の群小化が発生する要因としては、放電による酸化作用で密閉ボイド内の酸素が消費されボイド内圧力が低下することによるものとするボイド内圧力の変化説<sup>[9]</sup>、同様に密閉ボイド内の酸素が消費されボイド内が窒素雰囲気に変化することによるものとするボイド内気体組成変化説<sup>[7][11][12]</sup>などが考えられてきた。しかし、今回の実験ではボイド内に常に新しい乾燥空気を流入し一方の貫通孔を大気中に開放して内部気体の置換を行いながら課電を行った。ボイド内気体組成の変化やボイド内圧力の変化は起こっていないと考えられる今回の実験においても放電が群小化する事が確かめられたことから、これまでに報告されてきたボイド内気体組成の変化やボイド内圧力の変化のみによって放電の群小化が発生するわけではないことが示唆された。

さらに一般のCIGRE Method-II電極系試料では数十～百数十時間後から放電が群小化し始めるのに対し、開放ボイド系試料を用いた今回の実験では約10時間後からという短時間で放電の群小化が起こった。また、実験後に解体した試料は、通常の密閉型試料に比べ試



料板表面の劣化が激しく発生していた。エポキシ樹脂を劣化させる主要因としては放電にともなう酸化作用があげられる。通常の密閉ボイド系の試料であれば初期の段階の酸化作用でボイド内の酸素は消費され、その後は放電劣化により発生するガス等により劣化が進行するものと考えられる。しかし、開放ボイド系試料では常に新しい乾燥空気が供給されているため、酸素は消費し尽くされることはなく、エポキシ試料板の表面層の劣化は密閉型試料に比べて速く進行するものと考えられる。また、放電の群小化は、通常の密閉ボイド系試料に比べて早期に発生した。今回の試料による以上の結果から、第4章で示唆された群小部分放電の発生と絶縁体表面の侵食、劣化が大きく関係しているという内容を支持した結果が得られた。

#### 5.6 まとめ

開放ボイド系試料により、ボイド内圧力の変化とボイド内気体組成の変化が原因であるという放電の群小化の要因について、その妥当性を確かめる実験を行い、検討を加えた結果明らかとなった事柄について以下に要約する。

- (1) 開放ボイド系試料においても、放電劣化にともない放電の群小化が発生することが明らかとなった。
- (2) 開放ボイド系試料では、通常の密閉ボイド系試料に比べ放電の群小化が早期に発生することが明らかとなった。
- (3) 開放ボイド系試料においても放電の群小化が発生したことから、これまで放電の群小化の要因であると報告されてきたボイド内圧力の変化説、ボイド内気体組成変化説は、放電劣化

にともなう群小化の主要因とはならないことが示唆された。

- (4) 群小部分放電の発生にボイド表面の劣化が大きく関係していることが示唆された。

#### 5.7 参考文献

- [1] 家田，田中：「CIGRE SC15 WG06 TG1 (国内) 共同実験」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-79-73，PP.1-10 (1979)
- [2] 片山，阿部，岩田，朴木：「PE中の単一ボイド内放電特性」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-79-75，pp.19-26 (1979)
- [3] 松葉：「部分放電による劣化 (レビュー)」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-38，PP.25-34 (1983)
- [4] 夏目，前田，元起：「注型絶縁物のCIGRE Method-I電極による耐内部放電性の検討」，電気学会絶縁研究会資料，EIM-81-28，pp.1-100 (1981)
- [5] 北村，谷，平林：「エポキシ樹脂の内部微小放電による劣化過程の検討」，電気学会絶縁研究会資料，EIM-81-30，pp.19-28 (1981)
- [6] 北村，平林：「エポキシ樹脂における内部部分放電の経時変化」，電気学会論文誌A，103巻，9号，pp.507-514 (1983)
- [7] 山田，匹田，大橋，家田：「JH-1電極系における群小部分放電の発生機構に関する一考察」，電気絶縁材料シンポジウム，VI-6，pp.177-180 (1985)
- [8] 田中：「CIGRE SC-15 WG-06 TG1の活動」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-36，PP.5-14 (1983)



- [9] 井関, 竜田: 「部分放電における群小パルス」, 電気学会絶縁研究会資料, EIM-83-41, pp.55-62 (1983)
- [10] 井関, 福永, 竜田: 「内部部分放電の経時変化と部分放電劣化」, 電気学会論文誌A, 107巻, 5号, p.271 (1987)
- [11] 東村, 加子, 津久井: 「密閉ボイドの部分放電特性に影響を及ぼす要因の検討」, 電気絶縁材料シンポジウム, VI-1, pp.109-112 (1981)
- [12] 加古, 東村: 「エポキシ樹脂の内部部分放電によるボイド内ガス圧およびボイド内表面抵抗の変化」, 電気学会論文誌A, 105巻, 10号, pp.555-561 (1985)

## 第6章 模擬表面劣化試料の電極依存性

### 6.1 まえがき

内部ボイドを有する内部部分放電劣化試料において、課電時間の経過にともない、個々の放電電荷量が非常に小さく単位時間当たりの放電個数が非常に多い放電形態である群小部分放電 (Swarming Pulsive Microdischarges : SPMD)に移行することが放電光の測定により示された。この群小部分放電の発生原因としては、前述のようにボイド内圧力の変化説<sup>[1]</sup>、ボイド内気体組成変化説<sup>[2][3][4]</sup>などいくつかの仮説が提示されたが、前章の実験結果からこれらが放電の群小化の主要因とはならないことが明らかとなった。さらに劣化が進んだ後においては、放電劣化と放電の群小化がなんらかの関係があることが前章までの結果により示された。

本章では、前章までに明らかとなった放電劣化と放電の群小化との関係を明白にするため、ボイドを形成する絶縁物表面に人工的に傷をつけてボイド表面が放電劣化によって荒された状態を模擬した試料を作成し、試料板表面の荒れが部分放電特性に与える影響について調べる実験を行い、検討を加えた結果について報告する。

### 6.2 試料

実験に使用した試料の形状を図6.1に示す。ボイド表面の荒れが放電の群小化に与える影響を調べるため、CIGRE Method-II電極系試料を改良した試料を用いた。試料板には厚さ1mmのガラス板を使



用した。供試試料は、試料板表面に厚さ0.125mmのポリイミドフィルムをシアノクリート系接着剤で貼合わせた構造のものと、ポリイミドフィルムを平板電極表面に貼合わせた構造の2種類を用意し、表面の荒れの極性による部分放電特性の違いを測定できるようにした。試料板にガラス板を使用したのは、ガラスの耐部分放電性が高く、ピットによる電界集中からトリッキングに移行するのを防ぎ、

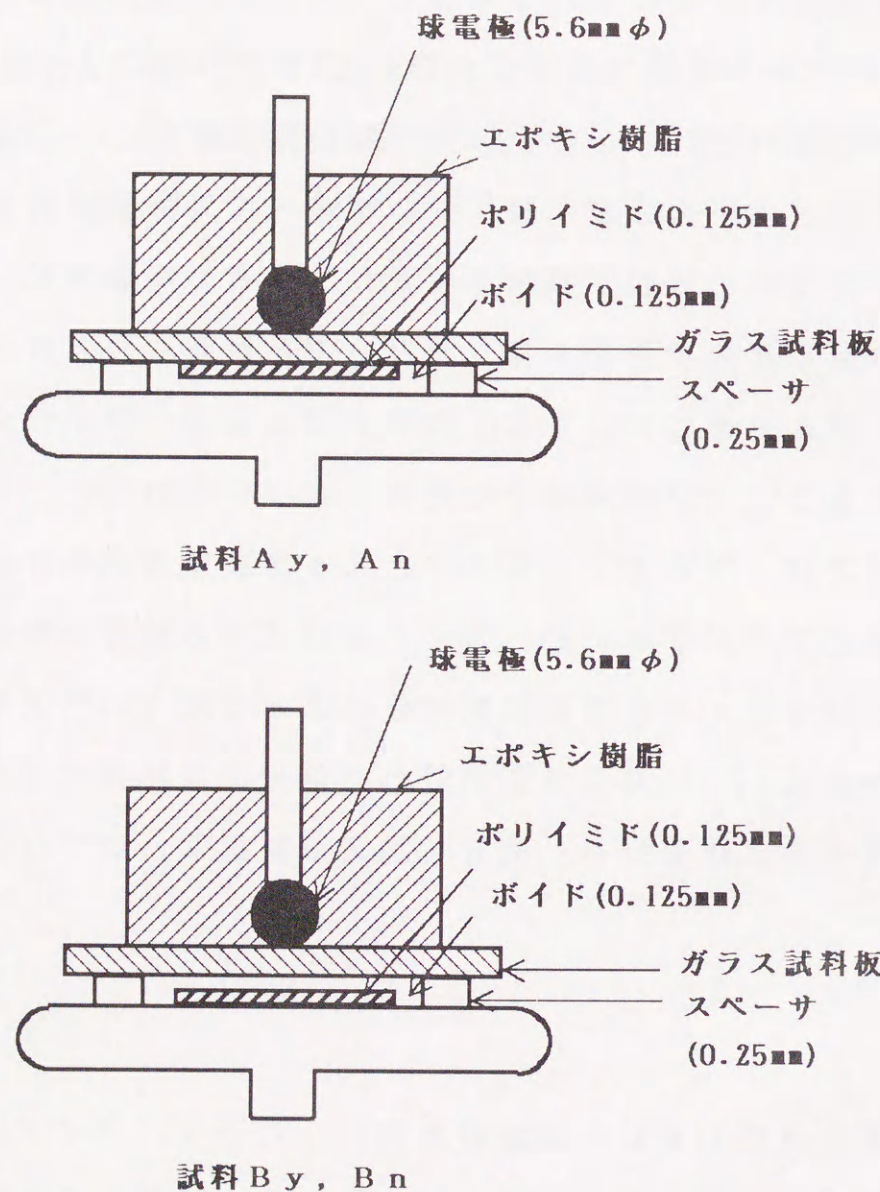


図6.1 試料形状

表6.1 試料名

試料名	ポリイミドフィルム貼り付け面	表面状態
A y	ガラス表面	荒れている
A n		荒れていない
B y	平板電極表面	荒れている
B n		荒れていない

経時変化が無視できるためである。またポリイミドフィルムは、ガラス転移温度が500℃とエポキシ樹脂（120～150℃）に比べ高く、放電に対して安定であると考えられるために使用した。

ポリイミドフィルムには、表面の荒れを模擬するために、CIGRE Method-II電極の放電面積に相当する球電極直下約10mmφのところに先端半径50μmの針により、直径約100μm、深さ約100μm程度のピットを作製した。ピットの存在密度は20個/mm<sup>2</sup>程度である。さらに、ピットを作製した表面をサンドペーパーで荒してボイド表面が部分放電により劣化された形状を模擬した。また、比較のために表面を荒さない試料も作製し、表6.1のとおり試料名を定義した。

### 6.3 実験方法

試料は沿面フラッシュオーバーを防止するために動粘度10(cSt)のシリコンオイル（信越：KF-96）中に浸漬した。球電極を接地電極とし、交流ランプ電圧を平板電極側から加え、各試料の部分放電開始電圧(Vi)・消滅電圧(Ve)の測定を以下の順序で行った。図6.2に



示すように、試験電圧である24kVrmsまで電圧変化率1kV/sで交流ランプ電圧を印加して部分放電開始電圧を測定し、その電圧を1分間保持した後、再び電圧変化率1kV/sで電圧を降下させ、部分放電消滅電圧を測定した。この操作を4回繰り返し、第1回目のデータは初期電子の不足などのためにばらつきが大きいため除外して、第2回めから第4回めの測定値を平均して各試料の部分放電開始電圧・消滅電圧とした。部分放電開始電圧・消滅電圧は、第3章で述べた部分放電解析装置(CAPDAS)のパルス法の計測装置であるCD-5の出力電圧をもとに、放電が発生しているかないかによって測定を行った。次に、印加電圧を12kVrms、18kVrms、24kVrmsと変化させて各印加電圧における部分放電諸特性を部分放電解析装置によって行った。

#### 6.4 実験結果

各試料の部分放電開始電圧・消滅電圧の測定結果を表6.2に示す。ポリイミドフィルムを電極側、絶縁体側どちらに接着した場合にも、

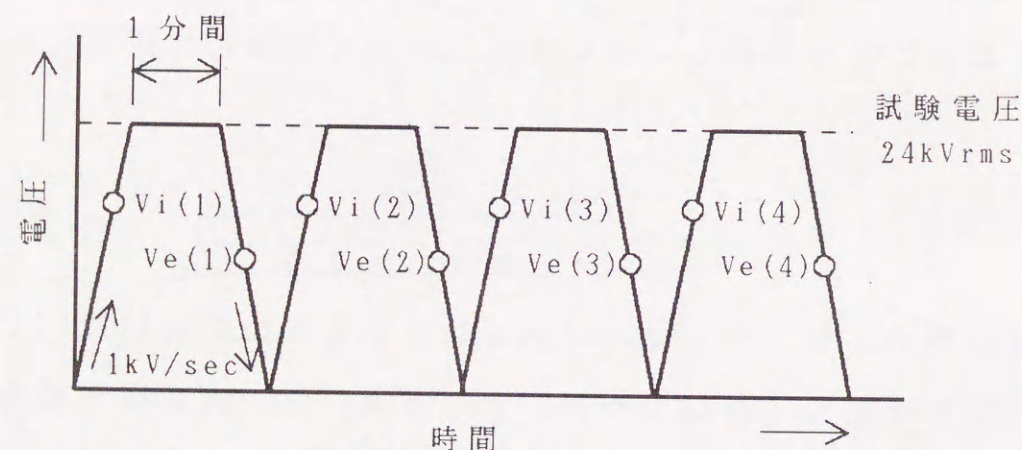


図6.2 部分放電開始電圧・消滅電圧の測定方法

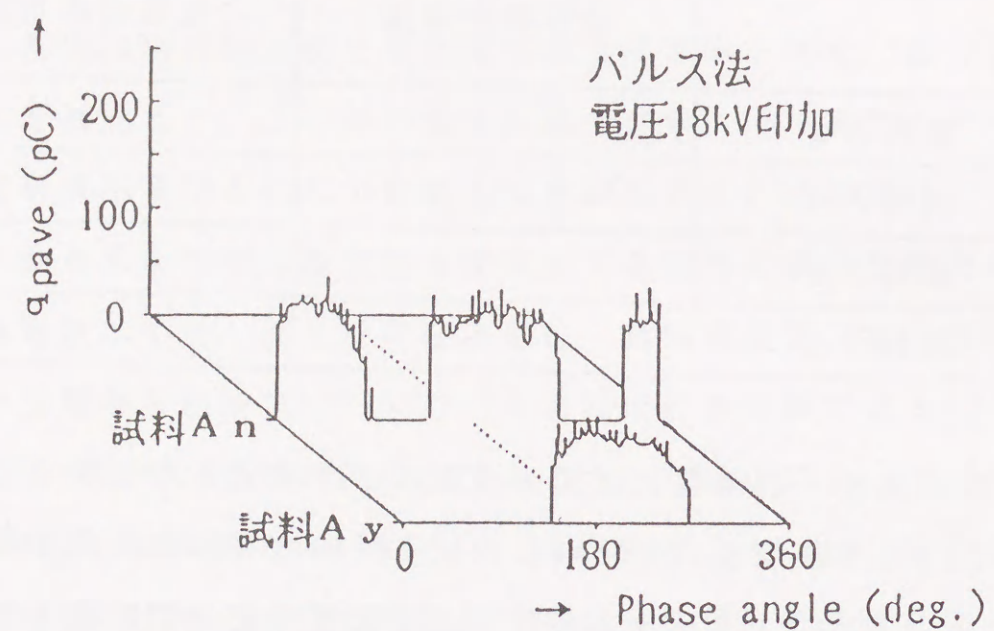
表6.2 各試料の部分放電開始電圧・消滅電圧

	放電開始電圧 $V_i$ [kV]	放電消滅電圧 $V_e$ [kV]
試料 A y	5. 3 2	5. 4 0
試料 A n	6. 2 1	7. 6 6
試料 B y	2. 8 4	3. 5 5
試料 B n	4. 0 0	5. 0 5

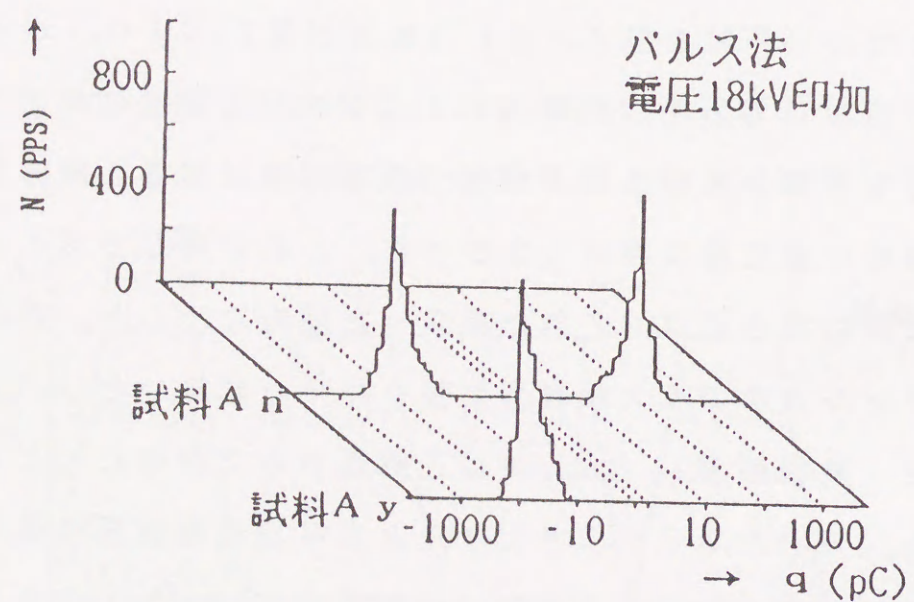
放電開始電圧・消滅電圧は表面の荒れが存在する方が低くなった。

図6.3に印加電圧18kVrmsにおける試料AyとAnの部分放電特性を示す。(a)には、1パルス当たりの放電電荷量の印加電圧位相に対する分布特性( $\phi$ - $q_{pave}$ 分布特性)、(b)には放電個数の放電電荷量分布特性( $q$ - $N$ 分布)を示す。図6.4には、印加電圧18kVrmsにおける試料ByとBnの部分放電特性を示す。(a)には $\phi$ - $q_{pave}$ 分布、(b)には $q$ - $N$ 分布を示す。図6.3および図6.4より、ボイド表面に荒れが存在していない試料(An,Bn)では、正極性パルス・負極性パルスとも位相分布形状および $q$ - $N$ 分布特性が同様な傾向を示し、部分放電特性に極性差は存在しなかった。これに対してボイド表面が荒れた試料の場合には、これと異なった傾向を示した。荒れたポリイミドフィルムをガラス板表面に張り付けた試料Ayではパルス法による測定(検出感度15.6pC)では正極性パルスがほとんど検出されなかった。荒れたポリイミドフィルムを平板電極表面に張り付けた試料Byではパルス法による測定(検出感度15.6pC)で負極性パルスが正極性パルスに比べて放電電荷量( $q_{pave}$ )が小さく、放電個数も少なかった。



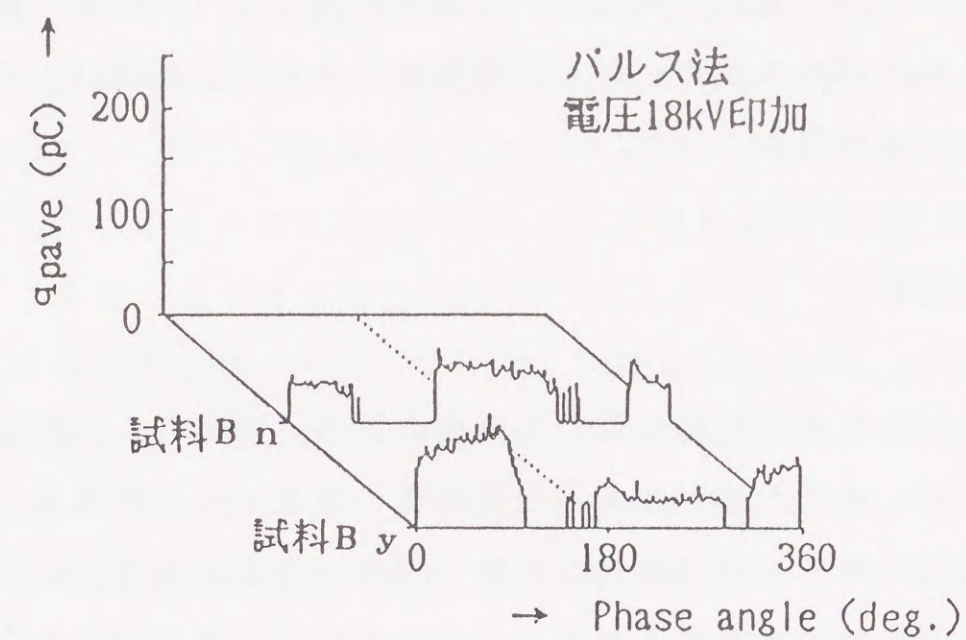


(a) 試料A<sub>y</sub>、A<sub>n</sub>の $\phi$ - $q_{pave}$ 分布

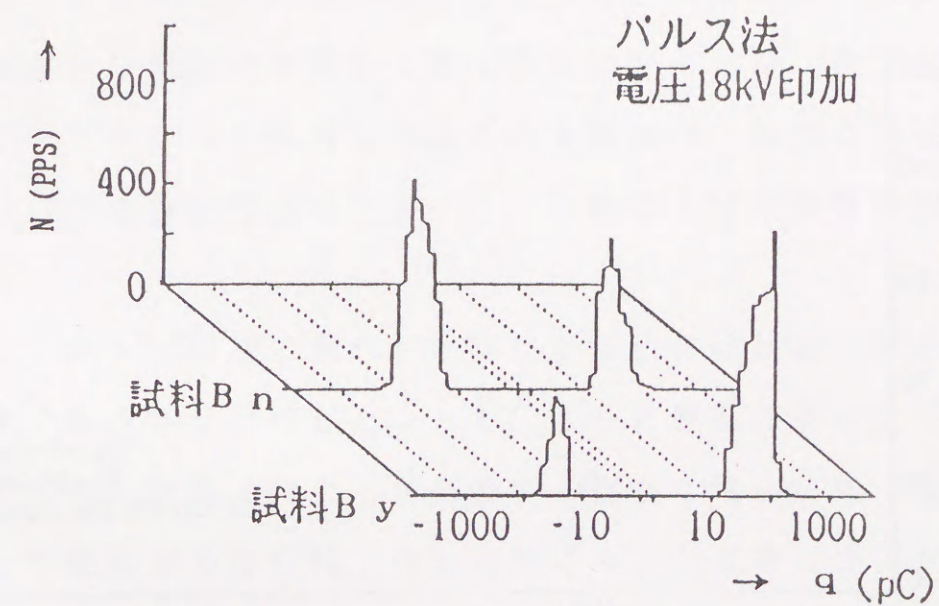


(b) 試料A<sub>y</sub>、A<sub>n</sub>の $q$ - $N$ 分布

図6.3 試料A<sub>y</sub>、A<sub>n</sub>の部分放電特性 (印加電圧18kVrms)



(a) 試料B<sub>y</sub>、B<sub>n</sub>の $\phi$ - $q_{pave}$ 分布



(b) 試料B<sub>y</sub>、B<sub>n</sub>の $q$ - $N$ 分布

図6.4 試料B<sub>y</sub>、B<sub>n</sub>の部分放電特性 (印加電圧18kVrms)



図6.5に試料Ay, Byの検出感度15.6pCにおける放電群小率を示す。図6.5より、表面の荒れている面が高電圧側（平板電圧側）であれば負極性パルスが群小化し、接地側であれば正極性パルスが群小化する傾向が認められた。

## 6.5 検討

模擬表面劣化試料を用いた実験の結果、表面を人工的に荒した試料では、荒れた面が金属平板電極側の場合でも絶縁体側の場合でも、放電開始電圧・消滅電圧は表面の荒れが存在する方が低くなった。表面の荒れが存在すると荒れにより局所的な電界が高められ放電が発生しやすい状態となり、その結果放電開始電圧・消滅電圧が低下したものと考えられる。また表6.2の結果では放電消滅電圧が放電

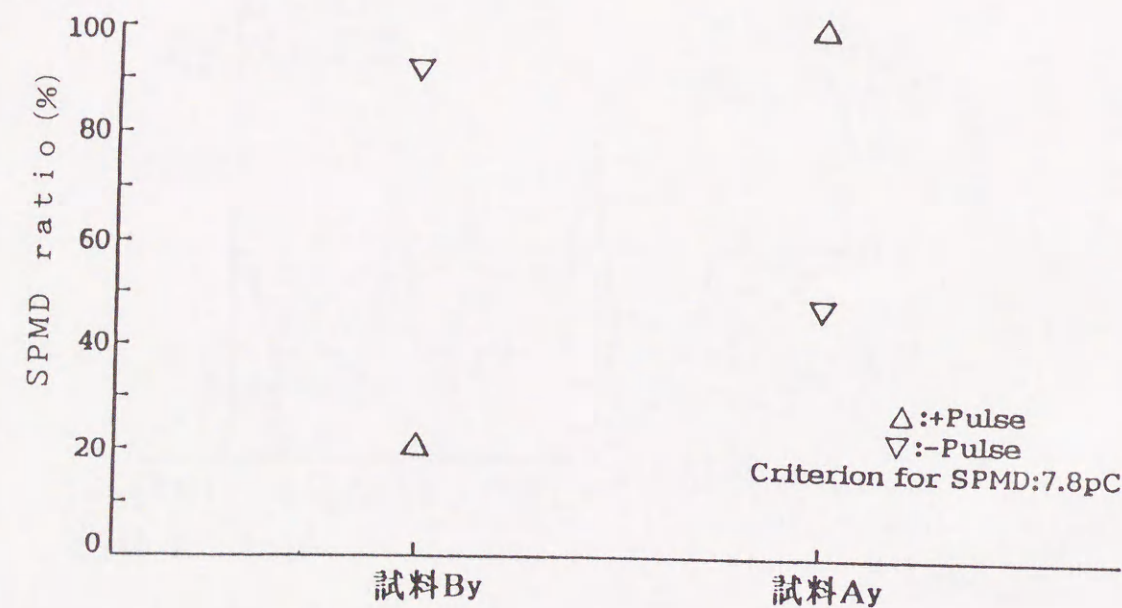


図6.5 試料Ay, Byの検出感度15.6pCにおける放電群小率

開始電圧よりも高くなった。放電消滅電圧が放電開始電圧よりも高くなることは、ボイドに放電が発生した場合の残留電圧が高くなることにより説明可能である。本実験で用いた模擬表面劣化試料は通常のCIGRE Method-II電極系試料にポリイミドフィルムを張り付けて作製しているため残留電圧が高くなり、放電消滅電圧が放電開始電圧よりも高くなったものと考えられる。

ガラス試料板表面にポリイミドフィルムを接着した場合、表面を荒していないフィルムの場合には部分放電特性は正極性放電及び負極性放電で大きな差がなかった。これに対して表面を荒したポリイミドフィルムを接着した試料の場合には、検出感度15.6pCでは正極性放電が検出されておらず、放電群小率も正極性放電が高くほぼ100%となった。

一方平板電極表面にポリイミドフィルムを接着した場合には、表面を荒らしていないフィルムの場合には前者と同様に部分放電特性は正極性放電及び負極性放電で大きな差がなかったが、表面を荒したポリイミドフィルムを接着した試料の場合には、前者とは逆に検出感度15.6pCでは負極性放電が小さく、放電群小率も負極性放電が高くなった。

以上のことから、表面の荒れが存在した場合には放電の群小化が発生しやすくなることが明かとなった。さらに表面の荒れたフィルムの接着面により、放電の群小化が発生する極性に違いが生じた。放電の群小化が発生する極性は、荒れたフィルムを接着した面が負となる極性において発生した放電であった。荒れた表面の極性が負であることから表面の荒れにより局部電界が高められ、初期電子の供給が容易となることにより放電が発生しやすくなったものと考えら



れる。その結果として放電電荷量が小さくなり放電の群小化が起こったものと考えられる。

以上の事から、ボイド表面に荒れが発生した場合、放電が発生しやすくなり、結果として放電の群小化が促進される傾向が示唆された。前章までに、内部部分放電試料において群小部分放電が発生する要因として、ボイド表面の劣化が大きく関連していることが示唆されてきたが、特に劣化により生じた表面の荒れが放電の群小化の要因となることが示唆された。

#### 6.6 まとめ

ボイド表面が荒れた状態を模擬するため、人工的にボイド表面を荒した模擬表面劣化試料を用いて、試料板表面の荒れが部分放電特性に与える影響について調べる実験を行い、検討を加えた結果、明らかとなった事項について以下に要約する。

- (1) 人工的に荒した樹脂をボイド表面に接着した場合、荒していない樹脂を接着した場合と比較して放電開始電圧・消滅電圧が低下することが明らかとなった。
- (2) 表面を荒した樹脂をボイド表面に接着した場合には、放電の群小化が発生することが明らかとなった。
- (3) 放電の群小化が発生する場合には、荒れた表面に対して極性効果を持つことが明らかとなった。高電圧側の表面に荒れた樹脂を接着した場合には負極性パルスが群小化し、接地側電極に荒れた樹脂を接着した場合には正極性パルスが群小化した。すなわち、表面の荒れが負側となる極性で発生した放電が群小化

した。

- (4) 表面の荒れが放電の群小化の要因となることが示唆された。

#### 6.7 参考文献

- [1] 田中：「CIGRE SC-15 WG-06 TG1の活動」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-36，PP.5-14（1983）
- [2] 山田，匹田，大橋，家田：「JH-1電極系における群小部分放電の発生機構に関する一考察」，電気絶縁材料シンポジウム，VI-6，pp.177-180（1985）
- [3] 井開，竜田：「部分放電における群小パルス」，電気絶縁材料研究会資料，EIM-83-41，pp.55-62（1983）
- [4] 井開，福永，竜田：「内部部分放電の経時変化と部分放電劣化」，電気学会論文誌A，107巻，5号，p.271（1987）



## 第7章 模擬表面劣化試料の部分放電特性

### 7.1 まえがき

これまで群小部分放電 (Swarming Pulsive Microdischarges : SPMD) の発生原因として、ボイド内圧力の変化説<sup>[1]</sup>、ボイド内気体組成変化説<sup>[2][3][4]</sup>など数多くの仮説が提示されてきた。これらの仮説は放電の群小化にある程度の影響は与えるが、実際に部分放電劣化により放電が群小化した場合ほどの影響は示さないことが明かとなった。前章までに群小部分放電の発生要因として、部分放電劣化によって生じたボイド表面の荒れが影響を与えているという結果が得られた。

本章では、ボイド表面の荒れと放電の群小化の関係を明らかにするとともに、放電の群小化が何故ボイド表面の荒れにより発生するのかを明白にするため、表面荒さを変えた数種類の模擬表面劣化試料を用いて、試料板表面の荒れの違いが部分放電特性に与える影響について調べた。さらに印加電圧周波数の違いが部分放電特性に与える影響について調べる実験についても行い、検討を加えた結果について報告する。

### 7.2 試料

実験に使用した試料の形状・寸法を図7.1に示す。ボイド表面の荒れが放電の群小化に与える影響を調べるため、CIGRE Method-II 電極系試料を改良した試料を用いた。試料板には、厚さ1mmのPMMA

表7.1 試料の分類と表面の荒れ

		表面荒さ
試料 A	荒していない	
試料 B	#1500で荒した	約 0.5 $\mu\text{m}$
試料 C	#60で荒した	3 ~ 4 $\mu\text{m}$

(Polymethyl methacrylate)を使用し、放電により試料板表面が侵食を受けた形状を模擬するために、PMMA試料板表面をサンドペーパーで傷つけてボイド表面に荒れを作製した。本実験では、実際に部分放電劣化により侵食を受けた場合の表面荒さが数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ であることから、試料の表面の荒れの程度を表7.1に示す2通りとした試料を作製した。また、比較のために表面を荒していない試料も用意し、表面荒さの違いによる部分放電特性の変化を調べることがで

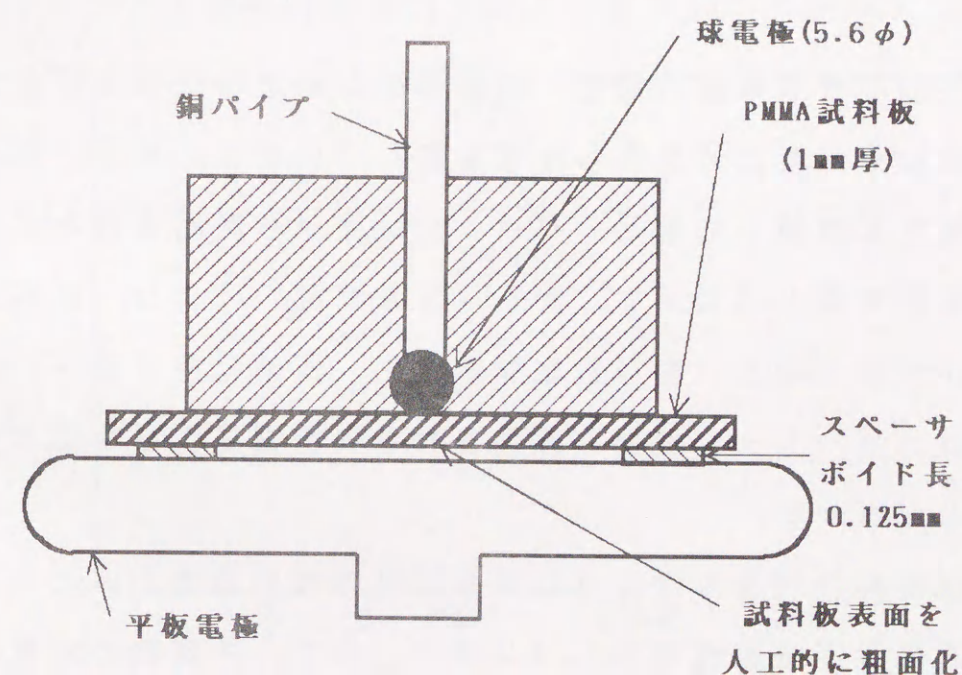


図7.1 試料形状および寸法



きるようにした。

### 7.3 実験方法

沿面フラッシュオーバーを防ぐため、動粘度10(cSt)の室温のシリコンオイル(信越:KF-96)中に試料を浸漬した。球電極側を接地し、平板電極側から各試料に60Hzの交流電圧を印加した。まず、第3章で述べた部分放電解析装置(CAPDAS)を用いて図6.2に示す方法によって各試料の部分放電開始電圧( $V_i$ )・消滅電圧( $V_e$ )の測定を行い、さらに12kVrms, 18kVrms, 24kVrmsの各印加電圧時における部分放電特性諸量の測定も行った。さらに試料Cについては、印加電圧周波数400Hzにおける部分放電特性についても測定を行った。

### 7.4 実験結果

各試料の部分放電開始電圧・消滅電圧の測定結果および各値をボイド部分の分担電圧に換算した値を表7.2に示す。また、ボイド部の分担電圧に換算した値と、パッシェン値から算出されるボイド部の火花電圧を図7.2に示す。表7.2および図7.2より、試料板表面の荒れが大きくなるに従い放電開始電圧・消滅電圧は低下し、しかも見かけ上パッシェン値から算出される火花電圧よりも低くなっていることがわかる。

部分放電解析装置で測定された各試料の検出感度95pCにおける放電群小率の電圧依存性を図7.3に示す。また、各試料の放電電荷量-放電個数分布特性( $q$ - $N$ 分布特性)を図7.4に示す。図7.3より、

表7.2 部分放電開始電圧( $V_i$ )・消滅電圧( $V_e$ )

		測定値 [kV]	ボイド部換算値 [kV]
試料 A	放電開始電圧( $V_i$ )	3. 2 5	1. 2 6
	放電消滅電圧( $V_e$ )	2. 9 1	1. 1 3
試料 B	放電開始電圧( $V_i$ )	2. 6 6	1. 0 3
	放電消滅電圧( $V_e$ )	2. 5 5	0. 9 9
試料 C	放電開始電圧( $V_i$ )	2. 3 8	0. 9 2
	放電消滅電圧( $V_e$ )	2. 3 0	0. 8 9

各試料とも放電群小率は正の電圧依存性を持っており、特に試料Cの正パルスでは他の値に比べ放電群小率が高くなっており、電圧依存性も大きいことがわかる。このことから、放電の群小化は印加電圧が高くなるに従い促進されることがわかる。さらに、図7.4より、試料A→B→Cと試料板表面の荒れが大きくなるに従い、放電個数

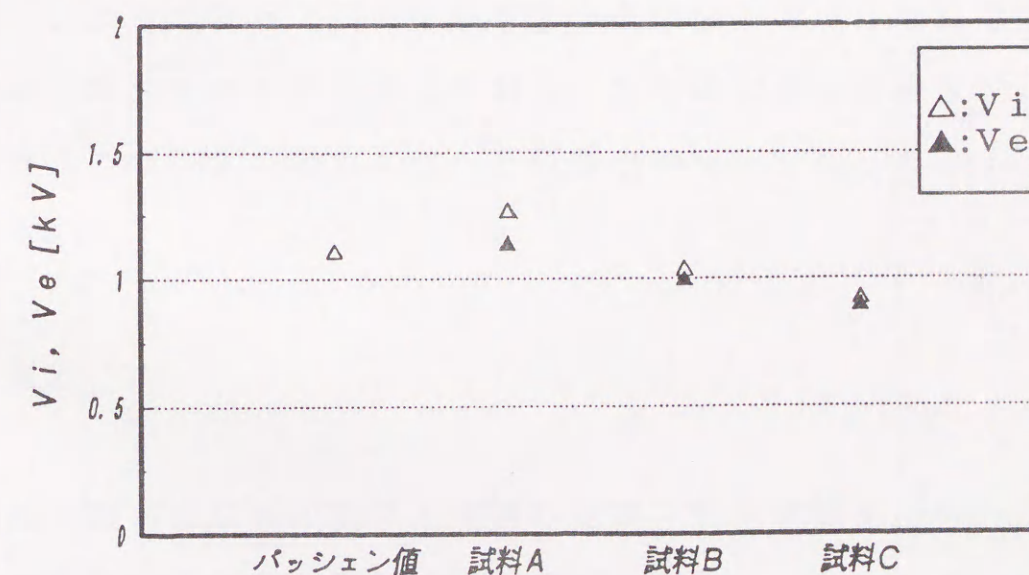
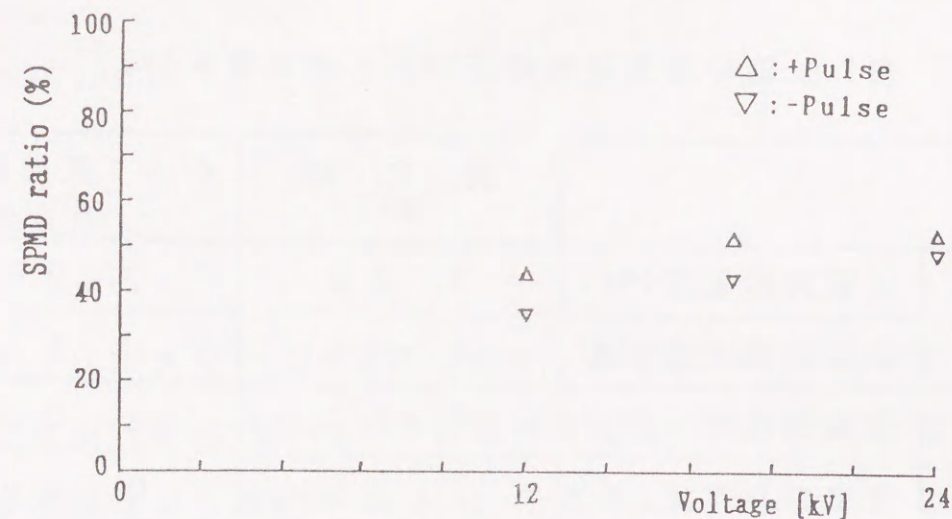
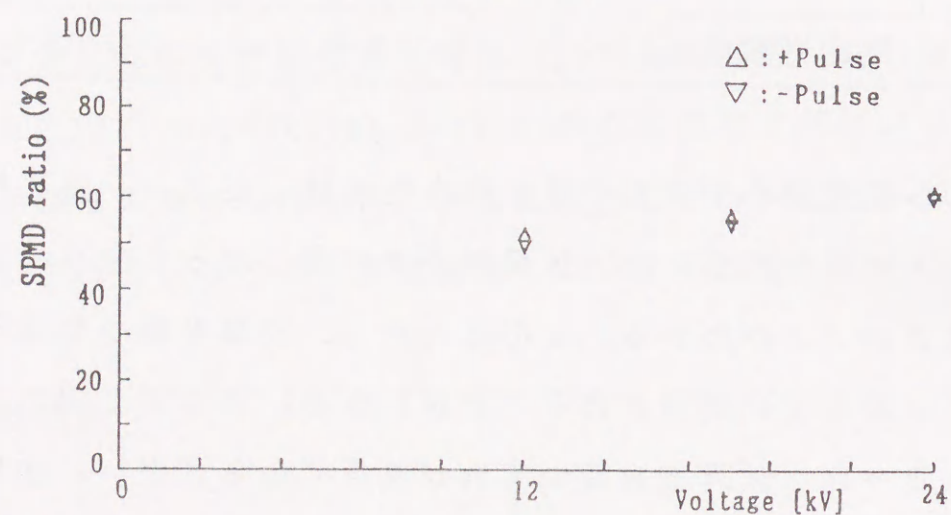


図7.2 部分放電開始電圧( $V_i$ )・消滅電圧( $V_e$ )

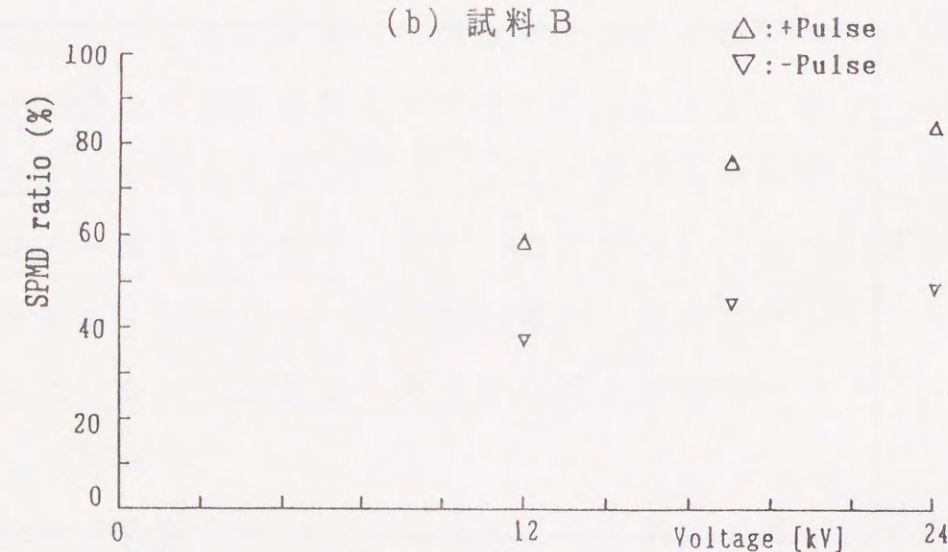




(a) 試料 A



(b) 試料 B



(c) 試料 C

図7.3 放電群小率の電圧依存性 (検出感度95pC)

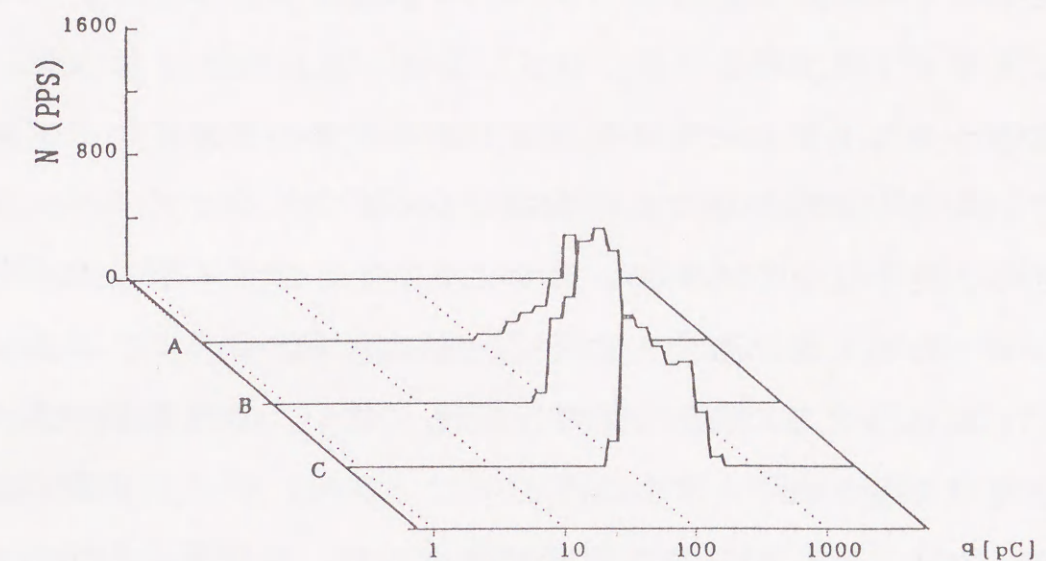


図7.4 q-N分布特性

が最大となる放電電荷量が低下していくことがわかる。

さらに、印加電圧周波数を60Hzおよび400Hzとした場合の、検出感度19pCにおける試料Cの放電群小率の印加電圧依存性を図7.5に示す。図7.3の結果と同様にいずれの周波数においても放電群小率は正の印加電圧依存性を示しており、また印加電圧周波数が400Hzの場合の方が60Hzの場合に比べ放電群小率が高くなっていることがわかる。

## 7.5 検討

模擬表面劣化試料を用いた実験の結果、試料板表面の荒れが大きくなるに従い放電開始電圧、消滅電圧は低下し、しかも見かけ上パッシェン値から算出される火花電圧よりも低くなった。このことは、



試料板表面の荒れが増加するに従い、放電がより低電圧で発生することを示しており、荒れが進むにつれて放電が発生しやすい状態になることを示している。

放電群小率は各試料とも正の電圧依存性を持っており、特に試料Cの正パルスでは他の値に比べ放電群小率が高くなっており、電圧依存性も大きいことがわかる。このことから、放電の群小化は印加電圧が高くなるに従い促進されることがわかる。さらに、試料A→B→Cと試料板表面の荒れが大きくなるに従い、放電個数が最大となる放電電荷量が低下していく。このことから、ボイド表面の荒れが大きくなるに従い局所的な電界が強められ、初期電子の供給が容易となることにより、小さな放電が数多く発生することが考えられる。この結果、放電の群小化が促進されたものと考えている。

印加電圧周波数を60Hz、400Hzと変化させた場合には、やはりいずれの周波数においても放電群小率は正の印加電圧依存性を示しており、また、印加電圧周波数が400Hzの場合の方が60Hzの場合に比

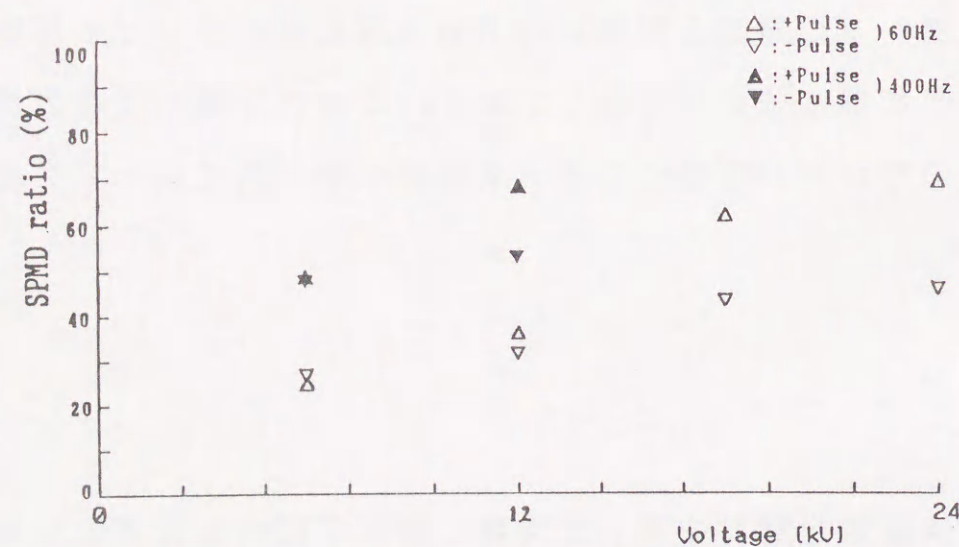


図7.5 放電群小率の電圧依存性（検出感度19pC）

べ放電群小率が高くなっていることがわかる。印加電圧が高くなるに従い放電の群小化が促進されること、印加電圧周波数が増加するほど放電の群小化が促進されることは、電圧の変化率 $dV/dt$ が大きくなるほど放電の群小化が促進される事を意味している。すなわち、放電が発生してから次の放電が発生するまでの時間間隔が短くなる場合に放電の群小化が促進されることが考えられる。放電間隔が短くなると、ボイド空間に前の放電で発生した正イオンや負イオンなどの空間電荷が存在したり、絶縁体表面が帯電している状態で放電が発生することが考えられ、これら前の放電の影響が残っている間に次の放電が発生した場合に、放電の群小化が促進されることが考えられる。

以上のことから内部部分放電特性の周波数加速試験を行う場合には、印加電圧の周波数が高くなるほど放電の群小化が促進されて放電形態が変化するため、放電パルスの大きさは変化せず、単位時間当たりのパルス数が周波数に比例するという単純な意味での周波数加速試験の等価性の根拠が失われてしまうことが明らかとなった。

## 7.6 まとめ

表面荒さを変えた数種類の模擬表面劣化試料を用いて、試料板表面の荒れの違いが部分放電特性に与える影響について調べ、また印加電圧周波数の違いが部分放電特性に与える影響について調べる実験を行い、検討を加えた結果、明らかとなった事項について以下に要約する。

- (1) ボイド表面の荒れが大きくなるに従い、放電開始電圧・消滅



電圧は低下することが明らかとなった。さらに、見かけ上パッシェン値から算出される火花電圧よりも低くなった。これは、ボイド表面の荒れが増加するに従い放電が発生しやすい状態になることを示している。

(2) 放電群小率は、正の印加電圧依存性を持つ事が明らかとなった。放電の群小化は印加電圧が高くなるに従い促進される。

(3) ボイド表面の荒れが大きくなるに従い、放電の発生個数が最大となる放電電荷量が低下していくことが明らかとなった。

(4) 印加電圧周波数が高いほど放電の群小化は促進されることが分かった。

(5) (2)、(3)より、電圧の変化率 $dV/dt$ が大きくなるほど放電の群小化が促進される事が明かとなった。すなわち、ボイド空間やボイド壁面に空間電荷が存在したり、絶縁体表面が帯電しているなど前の放電の影響が残っている間に次の放電が発生した場合に、放電の群小化が促進されることが考えられる。

(6) 内部部分放電特性の周波数加速試験を行う場合には、放電パルスの大きさは変化せず、単位時間当たりのパルス数が周波数に比例するという単純な意味での周波数加速試験の等価性の根拠が失われてしまうため、注意が必要であることが明らかとなった。

#### 7.7 参考文献

[1] 田中：「CIGRE SC-15 WG-06 TG1の活動」，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-83-36，PP.5-14（1983）

[2] 山田，匹田，大橋，家田：「JH-1電極系における群小部分放電の発生機構に関する一考察」，電気絶縁材料シンポジウム，VI-6，pp.177-180（1985）

[3] 井開，竜田：「部分放電における群小パルス」，電気絶縁材料研究会資料，EIM-83-41，pp.55-62（1983）

[4] 井開，福永，竜田：「内部部分放電の経時変化と部分放電劣化」，電気学会論文誌A，107巻，5号，p.271（1987）



電気絶縁材料として用いられる合成高分子材料は、各種電力機器の絶縁部を構成すると共に、構造材としての働きも持っている。このため、合成高分子材料は優れた絶縁性能を有することはもちろん、耐熱性、機械的特性、化学的安定性なども同時に要求される。しかしどんなに高性能な高分子材料であっても、時間の経過と共に多くの物理的、化学的ストレスを受けてその性能は劣化してしまう。多くの劣化要因の中でも、部分放電劣化は各種合成高分子絶縁材料の電気絶縁性能を劣化させる主要因の一つであると考えられている。このため、部分放電による絶縁材料の劣化機構の解明や放電の正確な計測方法、材料の耐久性の適切な評価方法など、有効な試験方法や評価技術の確立が早急に望まれており、これまでに研究が進められてきている。この中で、電圧印加を続けていく間に、通常の部分放電試験に使用される電流パルス法による放電検出方法では、検出される放電電荷量が徐々に小さくなり、ついには放電が検出されなくなり、一見放電が消滅したように観測される現象が起こった。しかし、一見放電が消滅したように観測された時点においても、実際には通常の部分放電に比べて放電電荷量が非常に小さく、放電の発生頻度が非常に高い群小部分放電が発生していることが確認された。また、群小部分放電と絶縁材料の劣化の相関が明らかにされたことや、多くのボイド試料で放電の群小化現象が確認されたことから、群小部分放電の発生原因や発生機構の解明が望まれている。

以上の事から本論文では、従来から使用されている放電検出器ではその検出が困難である群小部分放電を検出し、統計的に解析する

ことが可能である部分放電解析装置の開発を行った。さらに、群小部分放電を定量的に評価できるパラメータとして、新たに放電群小率の定義を行った。この装置およびパラメータをもとに、内部ボイドを含む試料のボイド形状、内部気体状態、ボイド表面状態や印加電圧周波数など様々な条件下で部分放電特性の測定を行い、群小部分放電の発生原因、発生機構の解明を行った。これまで、定性的に、漠然としかとらえられていなかった群小部分放電を検出し、統計的に解析を行うことが可能な部分放電解析システムを開発したこと、群小部分放電を定量的に評価できるパラメータを定義したことは、非常に価値のある成果であると言える。以下に本研究で得られた主な知見を列挙する。

#### 8.1 本研究により得られた知見

第1章では序論として本研究の目的と背景並びに本論文の概要を述べている。

第2章では本研究に関するこれまでの研究などについてまとめた。これにより、高分子の絶縁劣化、特に部分放電劣化の定量的評価に関する研究の必要性が明らかとなった。

第3章では従来困難であった群小部分放電についても解析することが可能である、パルス法とブリッジ法の二つの部分放電検出方法を併用した部分放電解析システム(CAPDAS)の概要、計測方法および得られるデータについて述べた。この装置は、パーソナルコンピュータを用いて部分放電信号を統計的に解析することにより、部分放電電荷の電源電圧位相に対する分布特性や放電個数の放電電荷量に



対する分布特性などの様々な解析を行うことができるため、部分放電特性の解析に非常に有効な装置である。さらに、内部ボイドを含む部分放電試料により発見され、その危険性が憂慮されてきた群小部分放電について、定量的な評価を与える指針として新たなパラメータである放電群小率を定義し、この内容についても述べた。

第4章では内部部分放電劣化現象の概要を理解し、高分子絶縁材料が全路破壊に至るまでの部分放電特性の変化について基礎的な知見を得るため、針先形状のボイドを持った針状ボイド試料を使用して、内部部分放電によりボイド部分からトリ－が発生し、トリ－が進展していく過程における部分放電特性の変化を測定し、検討を加えた。その結果、トリ－が発生する前段階に放電形態が群小部分放電に移行することが認められた。さらに、群小部分放電への放電形態の移行とほぼ同時期に針状ボイド先端部における表面の荒れが観測されていることから、SPMDと絶縁体表面の侵食、劣化が大きく関係していることが示唆された。

第5章では放電の群小化についての基礎的な理解と、これまでに報告されてきた内部部分放電の群小化の要因についての基礎的な知見を得るため、CIGRE Method-II電極を改良し、ボイド中に常に新鮮な乾燥空気が充満される構造とした試料を用いて、これまでに報告されてきた放電の群小化の要因のうち、ボイド内圧力の変化説とボイド内気体組成の変化説についてその有効性を確かめる実験を行い、検討を加えた。その結果以下の事が明らかとなった。

- (1) 開放ボイド系試料においても、放電劣化にともない放電の群小化が発生することが明らかとなった。
- (2) 開放ボイド系試料では、通常の密閉ボイド系試料に比べ放電

の群小化が早期に発生することが明らかとなった。

- (3) 開放ボイド系試料においても放電の群小化が発生したことから、これまで放電の群小化の要因であると報告されてきたボイド内圧力の変化説、ボイド内気体組成変化説は、放電劣化にともなう群小化の主要因とはならないことが示唆された。
- (4) 群小部分放電の発生にボイド表面の劣化が大きく関係していることが示唆された。

第6章では人工的にボイドを形成する絶縁体表面に傷をつけてボイド表面が放電劣化によって荒された状態を模擬した試料を用いて、試料板表面の荒れが部分放電特性に与える影響について調べる実験を行い、検討を加えた。その結果以下の事が明らかとなった。

- (1) 人工的に荒した樹脂をボイド表面に接着させた場合、荒していない樹脂を接着させた場合と比較して放電開始電圧・消滅電圧が低下することが明らかとなった。
- (2) 表面を荒した樹脂をボイド表面に接着した場合には、放電の群小化が発生することが明らかとなった。
- (3) 放電の群小化が発生する場合には、荒れた表面に対して極性効果を持つことが明らかとなった。高電圧側の表面に荒れた樹脂を接着した場合には負極性パルスが群小化し、接地側電極に荒れた樹脂を接着した場合には正極性パルスが群小化した。すなわち、表面の荒れが負側となる極性で発生した放電が群小化した。
- (4) 表面の荒れが放電の群小化の要因となることが示唆された。

第7章ではボイド表面の荒れと放電の群小化の関係を明らかにするとともに、放電の群小化が何故ボイド表面の荒れにより発生する



のかを明白にするため、表面荒さを変えた数種類の模擬表面劣化試料を用いて、試料板表面の荒らさ違いが部分放電特性に与える影響について調べ、さらに印加電圧周波数の違いが部分放電特性に与える影響についても調べる実験を行い、検討を加えた。その結果以下の事が明らかとなった。

- (1) ボイド表面の荒れが大きくなるに従い、放電開始電圧・消滅電圧は低下することが明らかとなった。さらに、見かけ上パッシェン値から算出される火花電圧よりも低くなった。これは、ボイド表面の荒れが増加するに従い放電が発生しやすい状態になることを示している。
- (2) 放電群小率は、正の印加電圧依存性を持つ事が明らかとなった。放電の群小化は印加電圧が高くなるに従い促進される。
- (3) ボイド表面の荒れが大きくなるに従い、放電の発生個数が最大となる放電電荷量が低下していくことが明らかとなった。
- (4) 印加電圧周波数が高いほど放電の群小化は促進されることが明らかとなった。
- (5) (2)、(3)より、電圧の変化率 $dV/dt$ が大きくなるほど放電の群小化が促進される事が明かとなった。すなわち、ボイド空間やボイド壁面に空間電荷が存在したり、絶縁体表面が帯電しているなど前の放電の影響が残っている間に次の放電が発生した場合に、放電の群小化が促進されることが考えられる。
- (6) 内部部分放電特性の周波数加速試験を行う場合には、放電パルスの大きさは変化せず、単位時間当たりのパルス数が周波数に比例するという単純な意味での周波数加速試験の等価性の根拠が失われてしまうため、注意が必要であることが明らかとな

った。

## 8.2 今後の課題と問題点

本論文の以上に述べた知見により、高分子の内部部分放電、特に群小部分放電を含めた劣化現象の測定が可能となった。さらに、放電の群小化というこれまで漠然としか捉えられていなかった現象に対して、放電群小率というパラメータを定義したことにより、放電の群小化を定量的に評価する事が可能となり、劣化にともなう群小部分放電の主要な発生要因の一つを明らかにした。今後、部分放電解析装置・放電群小率を用いた部分放電現象の測定と検討を行うことにより、高分子の部分放電劣化現象のより詳細な解析が行われることが望まれる。

本論文に関連した今後の課題および問題点を以下に述べる。

1. 放電電荷量は放電電圧と放電が発生した領域の容量で決定される。群小部分放電の発生要因として、ボイド表面の荒れが局部電界を高めることにより放電が発生しやすくなることが考えられたが、ボイド表面の荒れが放電電圧のみに影響を与えるのか、それとも放電面積についても影響を与えているのかはまだはっきりとしていない。従って、放電面積およびボイド表面の荒れを切り離して検討を行い、放電の群小化の要因をさらに明らかにする必要がある。これについては、放電面積を一定とする様に改良した試料をもとに、研究が進行中である<sup>[1]</sup>。
2. 高分子絶縁材料は、様々な環境下で使用される。従って、高磁界下や高温・低温下、放射線下など各種環境下での部分放電



劣化現象を把握する必要がある。高磁界下および放射線下における部分放電特性については、研究が進行中である<sup>[2][3]</sup>。

3. 絶縁材料として高分子材料を用いる上で問題となるのは、寿命の推定である。しかし、機器の故障を予知するための部分放電データの解析には長い経験と優れた判断力が必要である。従って、数多くのデータに対して一貫した判断を行うためには、これまでに蓄えられたデータのデータベース化とともにコンピュータを利用したエキスパートシステムを構築する必要がある。今後は、これまでに蓄積したデータをもとに、さらに画像処理等の新しい手法を加えて、絶縁材料の寿命の推定を行えるようにすることが望まれる。

### 8.3 参考文献

- [1] 石田, 石丸, 劉, 水野, 長尾, 小崎: 「放電の群小化に与える試料表面の荒れの影響」, 電気学会全国大会, 380 p.403 (1992)
- [2] 劉, 石丸, 石田, 水野, 長尾, 小崎: 「内部部分放電特性に及ぼす磁界の影響」, 電気学会全国大会, 381 p.404 (1992)
- [3] 吐合, 石田, 水野, 長尾, 小崎他: 「CIGRE Method-II電極系試料の内部部分放電特性に及ぼす放射線照射の影響」, 電気学会全国大会, 382 p.405 (1992)

### 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始親切なご指導、ご鞭撻を賜った豊橋技術科学大学教授 工学博士 小崎正光先生に心から御礼申し上げます。また、本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始有益なご指導ご鞭撻を賜り、論文作成の細部から公私に至るまでご指導頂いた同大学助教授 工学博士 長尾雅行先生にも厚く御礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり有益なご助言を頂きました豊橋技術科学大学教授 工学博士 榊原建樹先生ならびに同大学助教授 工学博士 石田誠先生に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、数多くのご指導ご鞭撻を賜り、公私ともにご指導頂いた豊橋技術科学大学助手 工学博士 水野幸男先生に心から御礼申し上げます。また、修士研究、卒業研究を通じて多大の協力を頂いた、豊橋技術科学大学元学生 平田啓二氏（現在、住友電工）、藤田俊広氏（現在、中日新聞社）の両氏に心から御礼申し上げます。さらに、本研究に関し種々の有益な御討論を頂いた日本CIGRE国内委員会TF-15-06-01の関係各位に心より感謝致します。

また、本研究の遂行に際して数多くの協力を頂きました豊橋技術科学大学学生 石丸秀雄氏、劉勤民氏、吐合求氏、日置憲隆氏はじめ、豊橋技術科学大学小崎長尾研究室の関係諸氏に御礼申し上げ、謝辞とします。



原著論文		
論文題目	発表機関	著者
群小部分放電現象の解析を目的とした部分放電計測システムの開発と新部分放電パラメータの提案	電気学会論文誌 A 112巻 9月号 pp.768-774, 1992	石田 隆弘 長尾 雅行 水野 幸男 小崎 正光
内部部分放電試料の群小部放電特性とその発生要因	電気学会論文誌 A 113巻1月号 掲載決定	石田 隆弘 長尾 雅行 水野 幸男 小崎 正光
放電の群小化に与えるボイド表面の荒れの影響	素材物性学雑誌  掲載決定	石田 隆弘 長尾 雅行 水野 幸男 小崎 正光

国際会議発表		
論文題目	発表機関	著者
Swarming Pulsive Microdischarges and Internal Partial Discharge Degradation in Epoxy Resin	6th International Symposium on High Voltage Engineering (6th ISH) No.22.21 (Louisiana USA, Aug. 28 - Sep. 1, 1989)	M. Nagao M. Kosaki T. Ishida Y. Mizuno
Development and Application of Partial Discharge Analyzing System for Swarming Pulsive Microdischarges	3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM-91) L-2 (Tokyo Japan, July 8-12, 1991)	T. Ishida Y. Mizuno M. Nagao M. Kosaki
Swarming Pulsive Microdischarge Characteristics in Internal Void of Epoxy Resin	International Conference on Materials Engineering for Resources (ICMR '91) PS-11 (Akita Japan, Nov. 5-7, 1991)	T. Ishida M. Nagao Y. Mizuno M. Kosaki
Factors on Appearance of Swarming Pulsive Microdischarges	8th International Symposium on High Voltage Engineering (8th ISH) (Yokohama Japan, Aug. 23-27, 1993) 投稿中	T. Ishida M. Nagao Y. Mizuno M. Kosaki

シンポジウム発表		
論文題目	発表機関	著者
群小部分放電特性解析用システムの開発とその応用	第22回電気絶縁材料シンポジウム V-6 1989年10月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
群小部分放電特性の解析とその要因について	第23回電気絶縁材料シンポジウム IV-3 1990年10月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
内部部分放電の群小化の要因について	第24回電気絶縁材料シンポジウム P-15 1992年 9月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
γ線照射による絶縁物中のボイド検出に関する基礎的研究	第24回電気絶縁材料シンポジウム II-4 1992年 9月	吐合 求 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 榎本 茂正

学会発表		
論文題目	発表機関	著者
針状ボイド試料における部分放電特性	電気関係学会東海支部連合大会 #186 1987年10月	石田 隆弘 藤田 俊広 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
CIGRE METHOD-II 1mm ボイド試料の部分放電特性	電気関係学会東海支部連合大会 #187 1987年10月	藤田 俊広 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
針状ボイド試料先端からのトリー発生時における部分放電特性の変化	電気学会全国大会 #342 1988年 3月	石田 隆弘 藤田 俊広 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光



部分放電の群小化に及ぼすボイド内のピットの影響	電気学会全国大会 #340 1988年 3月	藤田 俊広 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
エポキシ樹脂の内部部分放電特性におよぼす電極-絶縁体界面の影響	電気関係学会東海支部連合大会 #180 1988年 9月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
開放ボイド試料における部分放電特性と群小部分放電	電気学会全国大会 #271 1989年 4月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
部分放電の群小化におよぼす試料表面の荒れの影響	電気関係学会東海支部連合大会 #212 1989年10月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
放電の群小化に伴う放電面積の変化とボイド表面の荒れについて	電気学会全国大会 #371 1990年 3月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
放電の群小化におよぼす印加電圧周波数の影響	電気関係学会東海支部連合大会 #229 1990年10月	石田 隆弘 劉 勤民 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
放電の群小化におよぼすボイド長の影響	電気学会全国大会 #264 1991年 4月	石田 隆弘 劉 勤民 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
放電の群小化に与える試料表面の荒れの影響(その2)	電気関係学会東海支部連合大会 #224 1991年11月	石田 隆弘 石丸 秀雄 劉 勤民 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光

部分放電劣化試験用並列課電装置の開発	電気関係学会東海支部連合大会 #219 1991年11月	石丸 秀雄 劉 勤民 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 尾崎 多文 梅村 時博
エポキシ樹脂の内部部分放電特性に及ぼす磁界の影響	電気関係学会東海支部連合大会 #223 1991年11月	劉 勤民 石丸 秀雄 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
エポキシ樹脂の内部部分放電特性に及ぼす放射線照射の影響	電気関係学会東海支部連合大会 #222 1991年11月	吐合 求 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 榎本 茂正 佐藤 亘
放電の群小化に与える試料表面の荒れの影響	電気学会全国大会 #380 1992年 3月	石田 隆弘 石丸 秀雄 劉 勤民 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
エポキシ樹脂の内部部分放電劣化現象に及ぼすボイド内湿度の影響	電気学会全国大会 #375 1992年 3月	石丸 秀雄 劉 勤民 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 尾崎 多文 梅村 時博
内部部分放電特性に及ぼす磁界の影響	電気学会全国大会 #382 1992年 3月	劉 勤民 石丸 秀雄 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光



CIGRE Method-II電極系試料の内部部分放電特性に及ぼす放射線照射の影響	電気学会全国大会 #381 1992年 3月	吐合 求 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 榎本 茂正 佐藤 亘
放電の群小化に与える試料表面の荒れの影響 (IV)	電気関係学会東海支部連合大会 #236 1992年10月	石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
針電極試料における部分放電特性に及ぼす絶縁体-絶縁体界面の影響	電気関係学会東海支部連合大会 #233 1992年10月	劉 勤民 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 佐藤 亘
γ線照射時の部分放電特性による絶縁体中のボイド検出に関する基礎的研究	電気関係学会東海支部連合大会 #234 1992年10月	吐合 求 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光 榎本 茂正 佐藤 亘
部分放電劣化現象に及ぼすボイド内湿度の影響 (その2)	電気関係学会東海支部連合大会 #235 1992年10月	石丸 秀雄 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光
γ線照射と部分放電特性のパターンマッチングによるボイド検出の試み	電気関係学会東海支部連合大会 #238 1992年10月	日置 憲隆 吐合 求 石田 隆弘 水野 幸男 長尾 雅行 小崎 正光



