



ボイド含有エポキシ樹脂製電極による部分放電特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-11-02 キーワード (Ja): キーワード (En): Partial discharge, Epoxy resin, Void, Remaining life time 作成者: 小田, 浩史, 迫田, 達也, 相島, 武, 西村, 豪志, Oda, Hiroshi, Aishima, Takeru, Nishimura, Takeshi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/00010082">http://hdl.handle.net/10458/00010082</a>

# ボイド含有エポキシ樹脂製電極による 部分放電特性

小田 浩史<sup>a)</sup>・迫田 達也<sup>b)</sup>・相島 武<sup>c)</sup>・西村 豪志<sup>c)</sup>

## Characteristics of Partial Discharge in Epoxy Resin with a Void

Hiroshi ODA<sup>a)</sup>, Tatsuya SAKODA<sup>b)</sup>  
Takeru AISHIMA<sup>c)</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>c)</sup>

### Abstract

In recent years, insulation deterioration due to partial discharges (PDs) of power equipment molded with epoxy resin is concerned. In a solid insulation device molded with an insulator such as an epoxy resin, bubbles may remain in the resin during the manufacturing process, so that void defects sometimes occur. It is important to clarify the behavior of PD inside the defect from the occurrence to the failure from a viewing point of designing a safe and long-life solid insulation molded device.

In this study, the PD occurrence probability and the PD ignition time were investigated. Also, the life characteristics of epoxy resin owing to PDs until a breakdown occurs was evaluated.

**Keywords:** Partial discharge, Epoxy resin, Void, Remaining life time

### 1. はじめに

固体絶縁機器の絶縁体内部には、製造時の注型作製過程において樹脂内に気泡が残留したり、溶媒が揮発したりすることによってボイド型欠陥が生じてしまうことや、樹脂の硬化時及び使用時の熱サイクルにおいて金属との間に熱応力が発生する。あるいは振動が原因で剥離型欠陥が生じてしまうことがある。このような欠陥が存在していると、絶縁体に高電圧が印加されたときに空気や揮発した溶媒で満たされた欠陥内部で放電開始電圧に達すると、密閉ボイドでは放電時間遅れを伴うこともあるが内部で部分放電が発生。その後、しばらくして樹脂内で電気トリーが発生する。このトリーが成長していくと導体間を導通し、すなわち絶縁破壊を引き起こし故障に至る。

本研究は、エポキシ樹脂でモールドした絶縁機器を研究対象としている。これらの機器は、設置後に数十年に亘って使用されることから、長期に亘る信頼性を確保する必要がある。また、樹脂製の電力機器においてはボイドや剥離状欠陥は偶発的な故障の原因となっており、これら欠陥内部での部分放電の挙動及び発生から故障に至るまでの過程を明らかにすることは、固体絶縁モールド機器の安全・長寿命設計及び小型、軽量化設計を行うために重要となってくる。つまり、固体絶縁機器内で生じるボイドや剥離等の欠陥で生じる部分放電が、絶縁機器の劣化を早めることが報告されており<sup>(1)</sup>、機器寿命と部分放電の関係を明らかにすることは重要である。

本報では、模擬電極を用いた課電試験により、部分放電開始電界の閾値を検討した結果を述べる。次に、この閾値を考慮した上で電界加速劣化試験を行い、部分放電を計測しながら絶縁破壊するまでの長期試験を実施した。同実験をとおして、部分放電現象がエポキシ樹脂に与える影響、寿命評価のための基礎的なデータを取得した。

### 2. 部分放電開始電界の検討

#### 2.1. 実験方法

図1に実験装置の概要を示す。ここでは、直径1mmのボイドを含有するエポキシ樹脂製の電極を2組作製した。具体的に、表1にボイド含有エポキシ樹脂製電極の特徴を示す。高電圧及び接地用の銅製の金属電極は、直径10mm、フィレット半径3mmであり、同電極を対向させて電極間距離16mmと20mmの電極A及び電極Bを作製した。電極間距離は、有限要素法ベースの汎用物理シミュレーションソフトCOMSOLによって算出したボイド内の最大電界強度が2kV/mm前後となるように定めた。直径1mmのボイド内での部分放電開始電界は、先行研究<sup>(2)</sup>によれば2.3kV/mmとなるが、我々は裕度をもたせた電界強度2.0kV/mmをボイド内放電の閾値に定めて電極の作製を行っている。すなわち、電極Aでは容易に部分放電が発生し、電極Bでは発生しない（正確には放電確率が0.01以下）ものと予想した。なお、ボイドは高電圧電極のフィレット部近傍に配し、高電圧電極に商用周波数60Hzの交流電圧17.16kVを印加した。

部分放電電流は、接地側に配したCT(Current Transformer)センサ及び電磁波センサにより検出した。また、課電開始から放電が発生するまでの部分放電開始時間を測定した。

a)電気電子工学専攻大学院生

b)工学教育研究部教授

c)株式会社 戸上電機製作所

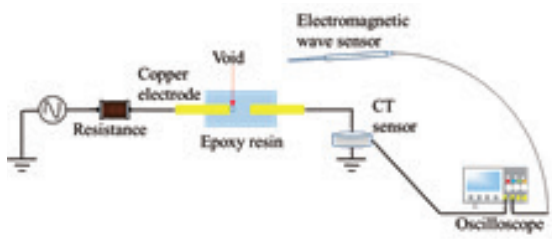


図1. 実験装置の概要

表1. ボイド含有エポキシ樹脂製電極の特性

電極	ボイド直径 [mm]	電極間距離 [mm]	ボイド内最大電界強度 [kV/mm]
A	1	16	2.17
B	1	20	1.81

2.2. 実験結果及び考察

電極 A において部分放電測定を行い、得られた放電電流波形並びに電磁波センサの波形を図 2 に示す。同図から明らかなように、電流波形と電磁波波形の時間変化の特徴はほぼ同様である。また、図 3 に、図 2 の電磁波センサによって取得した波形を周波数解析(FFT)した結果を示す。主な周波数成分は 35 MHz であり、これは 20~40 MHz が主要な周波数成分となる部分放電の特徴<sup>(3)</sup>と一致する。以上のことより、取得した電流及び電磁波波形は部分放電によるものと判断した。同様な試験を 10 回行い、部分放電開始時間と放電電荷量を表 2 にまとめた。最短で 105 min、最長で 1203 min で部分放電は発生し、放電電荷量の平均は 28.5 pC である。

総試験回数  $N_0$  ( $N_0=10$ )、部分放電開始時間が各部分放電開始時間よりも短いもの数を  $N$  として、 $N/N_0$  を縦軸に横軸を放電開始時間としたラウエプロットを図 4 に示す。縦軸の  $N/N_0$  は放電確率に、横軸の放電開始時間は放電遅れに相当する。同図において、 $N/N_0$  が 0.01 になる時の放電開始時間が 2565 分となることから、この時間を放電しないことの確認のための課電試験時間の目安とした。

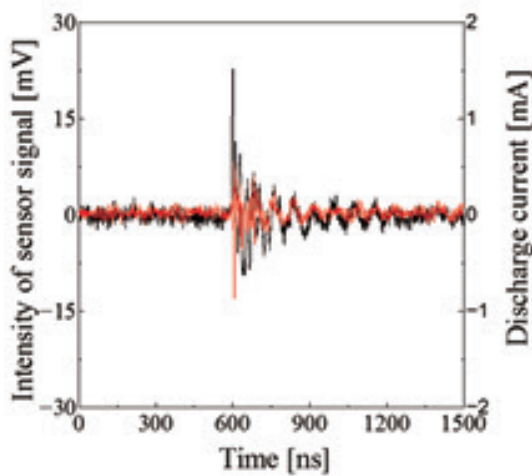


図2. CTセンサ及び電磁波センサにより取得した波形

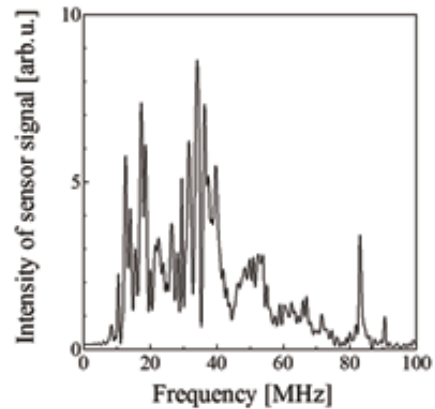


図3. 電磁波センサ取得波形の周波数解析信号

表2. 部分放電開始時間及び放電電荷量

No.	放電開始時間 [min]	放電電荷量 [pC]
1	470	11.7
2	1203	82.7
3	278	17.3
4	337	20.3
5	377	35.3
6	1151	14.8
7	456	29.5
8	105	40.2
9	313	13.5
10	271	19.3

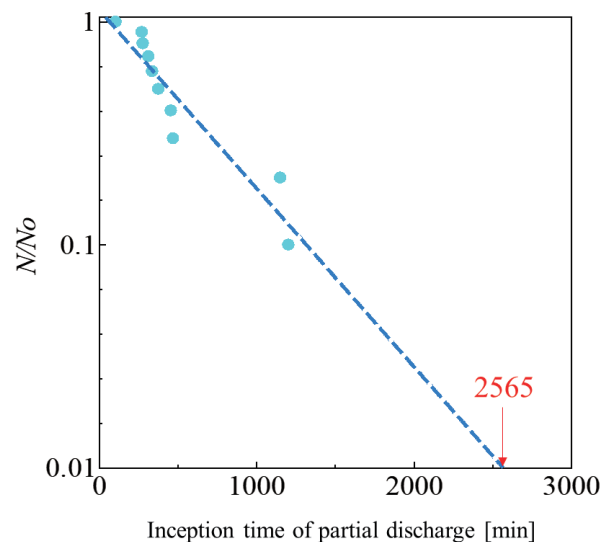


図4. ラウエプロットによる放電遅れ時間の算出

電極 B を用いて、2565 min の課電試験を行った結果、663 min で部分放電が観測された。部分放電が発生しない（正確には放電確率が 0.01 以下）と予想した電極 B において比較的短時間で部分放電が発生した理由として、エポキシ樹脂の硬化過程でボイド内の圧力が低下していることが考えられる。そのため、ボイド内圧を常圧にし、最大電界強度を 1.86 kV/mm で試験したところ、2565 min でも放電が発生しない結果を得た。

### 3. 電界加速劣化試験

#### 3.1. 実験方法

図5に実験装置の概要を示す。ボイド含有エポキシ樹脂製の模擬電極は、コロナ放電を防ぐために、絶縁油に浸した。また、表3に今回用いた試験片の種類と電界計算によって求めた最大電界強度を示している。印加電圧は商用周波数 60 Hz の 17.1 kV とし、絶縁層 1.5 mm 電極の部分放電によるエポキシ樹脂の侵食への影響を調べた。放電により生じた放電電流は接地側に配した CT センサで検出し、オシロスコープ①で 10~30 秒の間隔で放電電流と課電時間を記録した。また、オシロスコープ②で、課電から破壊までに発生した部分放電の総放電回数を記録した。

図6に汎用物理シミュレーションソフト COMSOL Multiphysicsにより電極の電界解析結果を示す。同図より、最大電界部はボイド先端部であることが分かる。

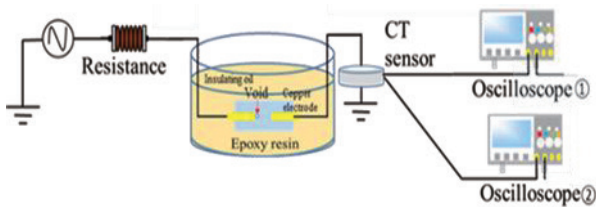


図5. 実験装置の概要

表3 絶縁層 1.5 mm 電極の特性

電極形状	ボイド径 [mm]	印加電圧 [kV]	電極間距離 [mm]	絶縁層厚さ [mm]	最大電界強度 [kV/mm]
フィレット 3R	φ1.0	17.1	2.5	1.5	9.8

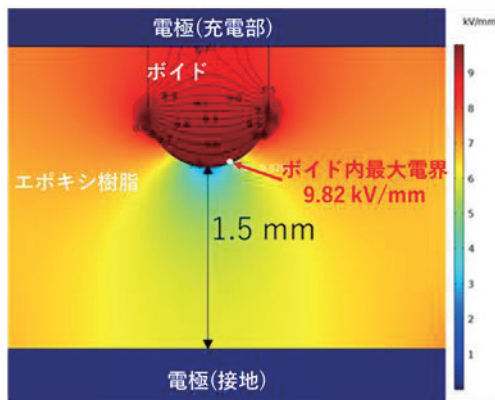


図6. 試験片の電界分布

#### 3.2. 実験結果及び考察

図7(a)~(f)に絶縁層 1.5 mm 試験片の課電から絶縁破壊までのボイドの様子を示す。同図より、課電から36時間後、ボイド内の変色が確認された。96時間でボイド上部すべての領域でピットが散見している。402時間後、ボイド先端部付近でピットの成長が確認できる。このピット位置は図2に示した電界分布の最大電界点と類似する。564時間後にはトリーが進展している。最終的に、577時間28分後に絶縁破壊しており、ボイド先端周辺に鱗状の放電痕が確認された。ここで、ボイド内の変色の理由につい

て、ボイド内部では空気が充填している。そこで部分放電が発生することにより、ボイド内に赤褐色を示すNO<sub>2</sub>などの気体が発生したためではないかと考えられる。また、ピットが形成されるまでの時間に比べてトリーから絶縁破壊までの時間が短い理由としては、トリーが成長する毎に最大電界強度が増加し、一般にエポキシ樹脂の絶縁破壊強度である約16 kV/mmを超えたために早期に破壊したものと考えられる。このように絶縁破壊までの過程には、ボイド変色→ピット形成→トリー形成→トリー進展→絶縁破壊という過程を経ることが示された。なお、絶縁破壊後に黒くボイドが変色しているのはアーク放電の熱によりエポキシ樹脂が焦げたためである。

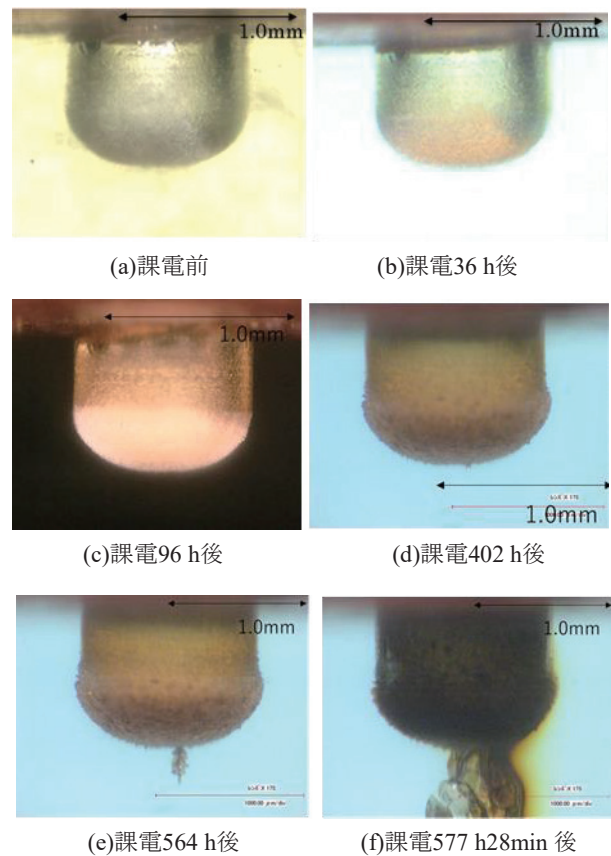


図7. 部分放電によるボイド劣化侵食の様子

図8に、絶縁層 1.5 mm 試験片の放電特性の経時変化を示す。同図より、放電回数とその平均電荷量を評価した。放電回数は0~12 hが最大となり、その後、減少傾向にあった。318h以降ではほとんど発生しなかった。この理由としては、通常観測されるPDパルスが通常のPD測定装置では検出が困難な微小なパルスが多数集合した状態の群小放電に遷移したのではないかと考えられる。また、密閉ボイド内における気体のガス組成や濃度が変化するためであると考えられる。ここで、微小な放電パルスについて今回用いたCTセンサでは検出できなかった。そのため、より感度の高いUHFセンサで検出した放電回数を図9に示す。同図より、図8に示した放電が観測されていない318 h以降でも放電が発生していることが確認される。よって、この期間で群小放電が発生していることが示され、群小放電領域下でもボイドが侵食されていることが確認できる。電荷量に関しては、ばらつきがあり、特徴的な傾向は確認できなかった。



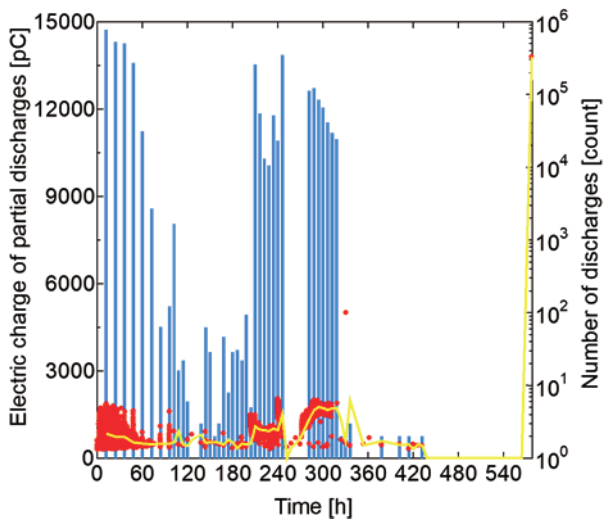


図8. 時間変化に伴う放電特性の変化

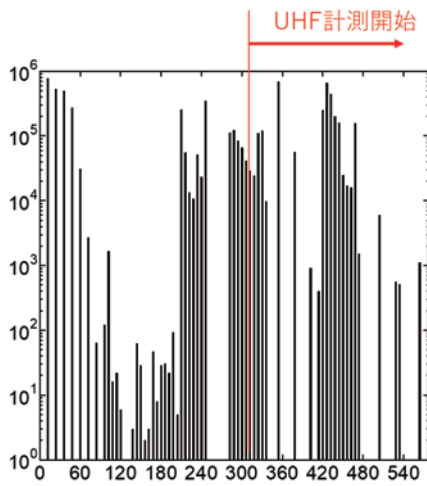
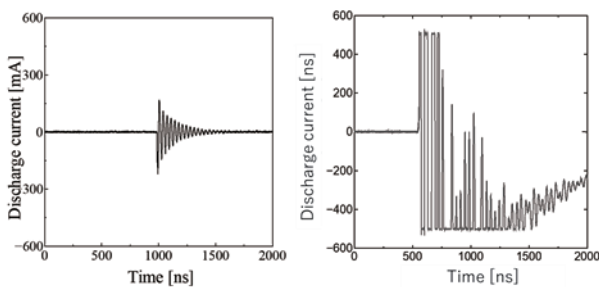


図9. UHFセンサ追加時の放電回数の変化

図10(a)、(b)にCTセンサで取得した絶縁層1.5 mm電極の放電波形を示す。同図より、短絡直前には部分放電と考えられるパルス波形が観測され、短絡時には大電流が流れている。ここで、短絡直前と短絡時の放電電荷量はそれぞれ1716 pC、13789 pCであった。電荷量の観点から短絡時に取得した波形がアーク放電であると考えられる。なお、短絡時の電流波形で方形波とみられる帯域においては記録時にレンジオーバーとなっている。



(a)短絡直前の電流波形 (b)短絡時の電流波形  
図10. 取得した放電電流波形

課電から絶縁破壊まで発生した総放電回数は6320649発観測され、劣化の進行はピット形成・トリー進展等の段階で一様ではないが、単純計算で絶縁層1.5 mm、ボイド内電界9.8 kV/mmでのエッチングレートは約0.23 nm/発と算出された。

#### 4. ボイド含有エポキシ樹脂の寿命指標の検討

表4に電界加速劣化試験で用いた電極の特性及び破壊時間を示す。同表より、9.8~15.0 kV/mmの絶縁破壊試験を実施した。最大電界強度が低くなるにつれ、破壊時間は短くなっている。図11に表2の結果をプロットし、指数近似線をのぼした寿命予測線を示す。同図より、近似線は以下のように表記できる。

$$y = 4 \times 10^7 e^{-1.085x} \quad (1)$$

(1)式より、ボイドによる部分放電のみの劣化が進んだ場合のモールド機器寿命を予測できると考える。

表4. ボイド含有エポキシ樹脂製電極の特性

絶縁厚さ(mm)	0.5	0.5	0.5	0.75	1	1.5
ボイド径(mm)	1	1.5	2	1	1	1
印加電圧(kV)	17.16	23.7	30.1	17.16	17.16	17.16
電界強度(kV/mm)	15	15	15	13.3	11.9	9.8
破壊時間(h)	4.33	3.15	1.43	5.71	445.5	577.46

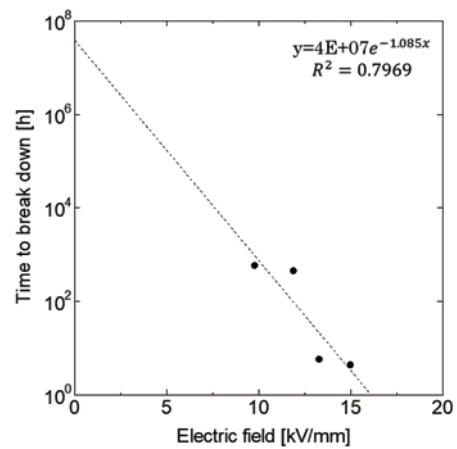


図11. 電界寿命予測指標

#### 5. 結論

直径 1 mm のボイドを有するエポキシ樹脂製電極における部分放電発生確率及び部分放電開始時間を明らかにした。ボイド内最大電界強度が 2.17 kV/mm の試験結果より、ラウエプロットを用いて N/No が 0.01 になる時の放電開始時間は 2565 分と算出された。また、ボイド内最大電界強度が 1.81 kV/mm の場合は、部分放電が発生しない（正確には放電確率が 0.01 以下）と予測していたにもかかわらず比較的短時間で部分放電が発生した。理由として、エポキシ樹脂の硬化過程でボイド内の圧力が低下していることが考えられる。そのため、ボイド内圧を常圧にし、最大電界強度を 1.86 kV/mm で試験したところ、2565 min でも放電が発生しない結果を得た。

また、ボイド含有エポキシ樹脂製電極において、部分放電による侵食を調べた結果について述べた。試験の結果から、部分放電によりボイド内における気体のガス組成が変化したことが考えられ、絶縁層1.5 mm電極では、ボイドの侵食過程で微小な放電パルスである群小放電領域が存在することを示した。また、破壊試験より、エポキシ樹脂の寿命指標を提案した。

## 参考文献

- 1) Hepburn, D.M.Kemp, I.J.Shields, A.J.Cooper, J:“Degradation of epoxy resin by partial discharges”, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings vol.147, p. 97 -104 (2000)
- 2) H. A. Illias, G. Chen, P. L. Lewin: “Partial discharge within a spherical cavity in a dielectric material as a function of cavity size and material temperature”, The Institution of Engineering and Technology, Vol. 6, No. 2, pp. 52-62 (2012)
- 3) Yugo Shirahama, Toshiki Hirashima, Mitsuki Kawakone, Takuma Miyake, Tatsuya Sakoda:” Detection of Partial Discharges in Electric Power Equipment using an Electromagnetic Wave Sensor ” , Joint Conference of IWHV2016 & JK2016 on ED&HVE, pp. 51-54 (2016)