

# エポキシ複合体における 部分放電特性のパターン解析

平成 30 年度

三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

有機エレクトロニクス研究室

学籍番号 417M215

小林 敦

## 目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
第 2 章	放電現象及び絶縁破壊について	4
2.1	はじめに	4
2.2	気中放電現象	4
2.2.1	タウンゼント理論	4
2.2.2	ストリーマ理論	5
2.3	絶縁劣化現象	6
2.3.1	部分放電現象	6
2.3.2	トリーイング	7
2.4	絶縁破壊現象	7
2.5	金属水酸化物の難燃特性	8
第 3 章	実験方法	9
3.1	実験回路構成及び使用機器	9
3.2	各種測定試験 測定手順	13
3.3.1	実験回路 1	13
3.3.2	実験回路 2	13
3.3	使用するエポキシ樹脂と硬化剤	16
3.4	一体型 V-t 試験試料	17
3.4.1	一体型 V-t 試験試料作製手順	18
第 4 章	一体型 V-t 試験試料を用いた各種試験	20
4.1	実験回路 1 における試験結果	20
4.1.1	部分放電測定 結果	20
4.1.2	V-t 試験 結果	27
4.2	実験回路 2 における試験結果	28
4.2.1	部分放電測定 結果	28

4.2.2	V-t 試験 結果	28
4.3	一体型 V-t 試験試料試験結果 考察	29
4.4	一体型 V-t 試験試料試験結果 まとめ	30
第 5 章	V-t 試験結果のパターン解析	
5.1	解析方法	31
5.2	解析結果	33
5.3	放電回数・放電電荷量	33
5.4	極座標表示	37
5.5	放電解析まとめ	40
第 6 章	一体型 V-t 試験試料の熱機械分析評価	
6.1	熱機械分析	41
6.2	熱機械分析条件	42
6.3	測定結果	44
6.4	熱機械分析 考察	49
6.5	熱機械分析 まとめ	49
第 7 章	総括	50
	謝辞	52
	参考文献	53



# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

近年、電力系の技術革新により、電気機器の高電力化、小型化、信頼性の向上が益々求められている<sup>[1][2]</sup>。電気は、図 1-1 の様な過程を経て、発電所（火力・水力・原子力発電所など）から会社・工場・家庭などへ供給されている<sup>[3]</sup>。この送電の過程において欠かす事の出ないものの一つに変圧器（transformer）があり、図 1-2 に示すように送電の各過程（発電・変電・配電）において様々な場所で用いられている<sup>[4]</sup>。

変圧器は送電の過程において様々な場所で用いられている。変圧器には、例として、油を絶縁物として使用し古くから採用されている油入変圧器、ガス（SF<sub>6</sub>（六フッ化硫黄）ガス等）を絶縁物とするガス絶縁変圧器、エポキシ樹脂やブチルゴム等の固体を絶縁物とする固体変圧器などがある。その中でも、固体変圧器は、他の変圧器に比べ絶縁物の絶縁性能が高いためにコンパクトな設計が可能であるといった利点から広く利用されている。また、ガス絶縁変圧器に利用されている SF<sub>6</sub> ガスが温室効果ガスである事から削減が求められており、その代替としての期待が高まってきている<sup>[5]</sup>。

しかし、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空気や揮発した溶媒で満たされた欠陥内部に加わる分担電圧が、空気中での放電開始電圧を示すパッシェン則による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し、その後しばらくして樹脂内で電気トリートが発生する。このトリートが成長しコイル間にわたって成長すると導体間を導通させてしまい、絶縁破壊を引き起こし故障に至る。

従って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調査することは、固体絶縁物モールド変圧器の安全・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>[6]</sup>、機器寿命と部分放電の関係が大きな課題となっている。

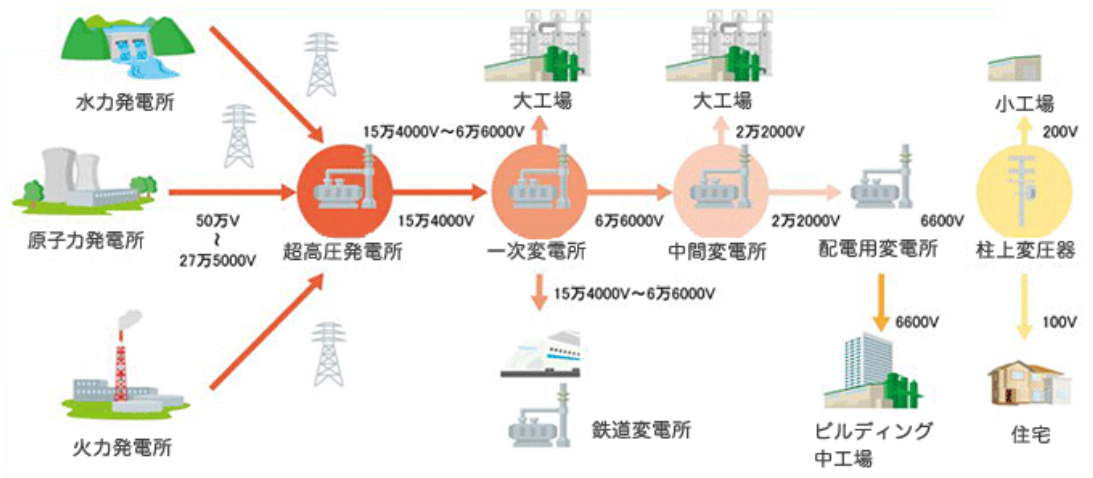


図 1-1: 電気の発電から配電まで<sup>[3]</sup>

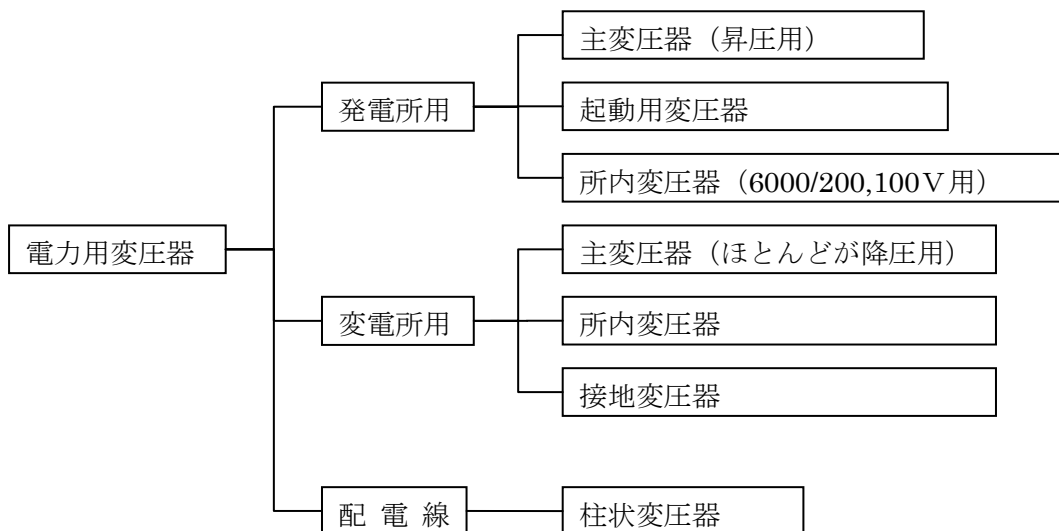


図 1-2: 電力用変圧器とその用途<sup>[4]</sup>

## 1.2 本研究の目的

固体絶縁における導体と絶縁体間の剥離や、絶縁体内に存在するボイドなどの微小空間に生じる部分放電は電力機器の寿命を支配する。本論文ではこのような部分放電現象を単純な電極系モデルを用いて部分放電現象がエポキシ樹脂に与える影響を検討し、課電寿命評価の基礎とすることを目的として、部分放電を計測しながら破壊するまで電圧を印加した。また、部分放電電圧や寿命のばらつきには何が影響しているのか求めるために、熱機械分析を行い様々な要因との関係性を調べた。

本論文の構成は全6章からなっている。

第2章では放電に至る前駆現象や部分放電現象、絶縁破壊に至るまでの理論をまとめた。

第3章では使用した実験回路構成、実験機器や実験条件について説明した。

第4章はV-t試験中の部分放電電荷量測定により放電現象の挙動を調査することを目的とし、欠陥の無い金属-固体絶縁層-金属からなる一体型の試料系を用いて、部分放電試験、破壊試験を行った。

第5章ではV-t試験結果の放電解析及び放電電荷量について検討を行った。

第6章では、第4章で調査した試験値への試料の状態の影響の調査を目的とし、熱機械分析装置(TMA)を用いて測定を行った。

第7章では、第6章までの結果を踏まえた総括を行った。

## 第2章 放電現象及び絶縁破壊について

### 2.1 はじめに

放電とは、気体中の荷電粒子の運動によって運搬電流および変位電流が流れている状態の総称である<sup>[7]</sup>。

- i) 非自続放電：暗流とも呼びならされる。大気中で対向する電極に電圧を印加すると、電極間に形成される電界による、電極からの電子放出やイオン生成が行われない状態であっても、宇宙線や自然放射能由来の放射線などによる外的荷電粒子供給によりきわめて微弱な電流が流れる。
- ii) 自続放電：外的荷電粒子供給を断っても放電電流が通じている状態である。つまり対向する電極に電圧を印加し、電極間に形成される電界による、電極からの電子放出やイオン生成が行われる状態である。

### 2.2 気中放電現象

外来の電離作用（宇宙線や放射線など）によって電極間に僅かながら存在している電子は電界によって陽極側に運ばれる。その途中で気体分子と衝突するが、このとき電界が充分強いと、電子は加速されて気体の電離電圧以上のエネルギーをもって気体分子に衝突するので、そこで電離が行われる。この衝突電離作用により、陽極に到達する電子の数は急増する。これを継続して放電開始に移行させるためには、電離増倍の元になる電子を何らかの過程で再び作り出す機構（二次電子放出機構）が必要になる。この二次電子放出機構として考えられる要因は以下の5つである。

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

(1)~(3)は陰極からの2次電子放出( $\gamma$ 作用)されるタウンゼント理論である。また(4)(5)は気体空間内での2次電子放出であり、ストリーマ理論とされる<sup>[7]</sup>。

#### 2.2.1 タウンゼント理論

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

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

空間に存在する正イオンは、電界ドリフトで陰極方向へ移動する。正イオンは最終的に陰



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

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

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

$$\gamma(e^{ad} - 1) - 1 = 0 \tag{1}$$

と書くことができる。

### 2.2.2 ストリーマ理論

図2-1にストリーマ理論で考えられる放電過程を示す<sup>[10]</sup>。まず、陰極からスタートした初期電子は、衝突電離を繰り返して、電子なだれとして成長する(a)。その先端にある電子群が陽極に到達して陽極に吸収されると、空間に正イオンが残される。その状態で、正イオン群付近から放出される光が周辺の空間にある中性の原子・分子に吸収され、光電離を発生させる(b)。光電離で生じた電子(二次電子)は、陽極及び正イオンが作る電界によって加速され、衝突電離を伴う新たな電子なだれを形成する(c)。これを子なだれと呼ぶ。子なだれの先端の電子が正イオン群に飛び込み、正負電荷が混在するプラズマ状態が生まれる(d)。子なだれが残した正イオン群は、プラズマ化された元の正イオン群の前方(陰極側)に新たな正イオン群を形成する<sup>[10]</sup>。このように陽極側から、子なだれが次々とリレーして、橋絡するのがストリーマ理論である。

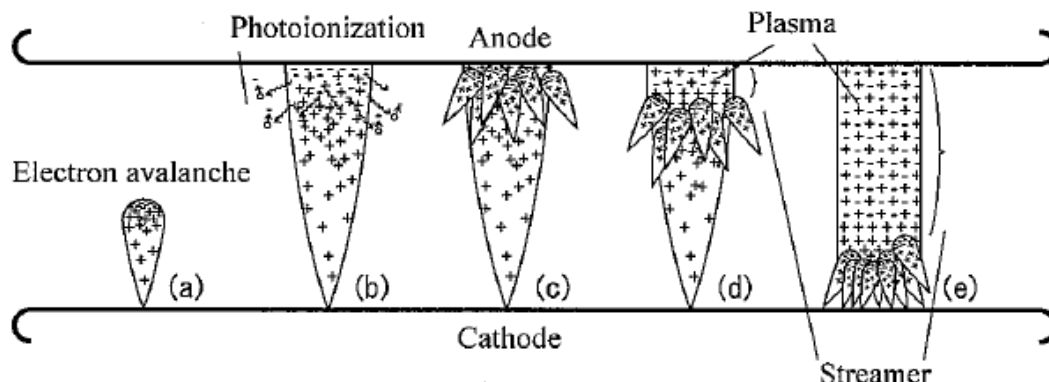


図2-1：電子なだれからストリーマへの進展

## 2.3 絶縁劣化現象

長い年月を経て絶縁性能が低下する絶縁劣化現象は、有極性高分子材料にとって非常に重要である。絶縁劣化現象は主に電氣的劣化、熱劣化、放射的劣化に分類される。この中でも、電氣的劣化とは、試料に高電界を印加することにより、材料の変質が加速され、絶縁性能の低下を引き起こす現象の総称である、主なものには、部分放電劣化、トリッキング劣化、トラッキング劣化、アーク劣化などがある。

### 2.3.1 部分放電現象

部分放電の定義は、IEC規格による定義では次のようである<sup>[11]</sup>。「電極間に電圧を加えた時、その間の絶縁媒体中で部分的に発生する放電をいい、部分放電では全路貫通破壊は起こらない。」このように部分放電が発生すると、電離効果が大きくなり、その部分の電流の集中、空間電荷の密度が大きくなれば、光及び音響の発生、更には絶縁物の侵食が生ずるようになる。このような放電は自続的なものであるが、花火やアーク放電のように全路破壊には至らず、電極間の一部だけに放電を形成するものである。

図2-2に一般的な部分放電の発生モデルで、電極で挟まれた絶縁体が示してある。絶縁体中に気泡、不純物などに起因するボイド(不純物)や電極から接着不足による剥離といった欠陥が存在する。絶縁体と欠陥では誘電率が異なるため、この絶縁体に交流電圧を印加すると、欠陥にかかる電圧は健全な絶縁体にかかる電圧よりも大きくなる。

一般的に欠陥の耐電圧は絶縁体よりも低くそのため欠陥内で放電を起こし短絡を起こす。この短絡により微小な電荷移動が発生しこれを局所的な放電、部分放電と呼ぶ。

要約すると以下のとおりである。

- ① 絶縁体中の部分放電は絶縁強度の低い欠陥(ボイドや剥離)で発生する。
- ② 欠陥の誘電率はその周辺の健全な絶縁体の誘電率よりも低い場合が多いため、欠陥に電界が集中しより絶縁破壊しやすくなる。
- ③ 欠陥中の絶縁強度は欠陥内の気体の種類、圧力、及び欠陥の寸法で決まる。
- ④ 部分放電は絶縁破壊の前駆現象である。
- ⑤ 部分放電は放電電荷量[pC]で評価される。

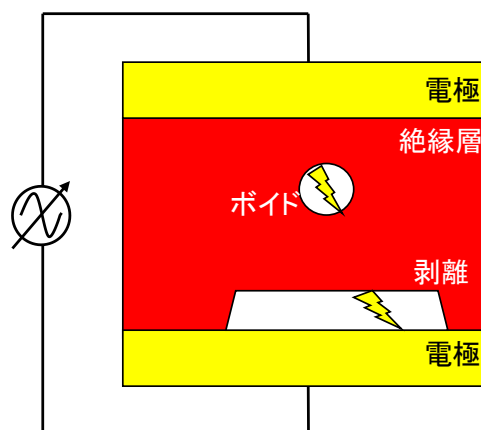


図2-2：部分放電発生モデル

### 2.3.2 トリーイング

トリーとは固体絶縁体中に発生する樹枝状の絶縁破壊部分をいい、トリーの発生、進展現象を含めてトリーイングと呼ぶ。図 2-3 にトリーの一例を示す。トリーの発生に関しては、局所的な高電界の形成による真性破壊や、部分放電によるイオン衝撃が発生原因であるといわれている。

トリーの進展は、放電孔が次の放電の先端となり、次々に放電孔が進展していく。この場合に高分子素材は電子またはイオンの衝撃、高電界での絶縁破壊または熱的作用によって分解ガスを発生する。また、炭化物その他の比較的導電性の高い物質に変性することがある。

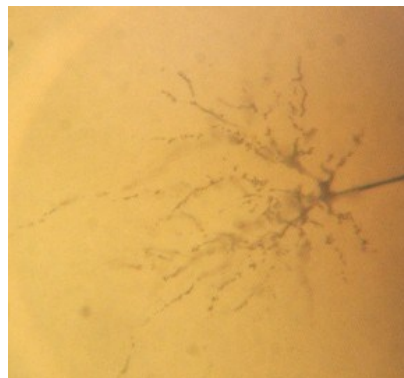


図 2-3 : トリー進展図

### 2.4 絶縁破壊現象

絶縁破壊とは、導体間の絶縁体(非導電性材料や空気層など)が破壊され、絶縁状態が保てなくなる事を指す。電線路や変圧器などの電力機器においては、短絡を防ぐため導体間に一定の空間を確保するために、絶縁被覆を行う。しかし、耐電圧(絶縁耐力)を超える高い電圧が加わると、導体間に放電現象が起こり導通すると共に、絶縁体を破壊して永久に絶縁状態が得られなくなる場合がある。絶縁破壊とは「絶縁状態が破られたこと(可逆的な絶縁破壊)」および「高電圧に耐えられずに機器の絶縁体が破壊されたこと(不可逆的な絶縁破壊)」の両方の意味合いで用いられる<sup>[12]</sup>。

図 2-4 に部分放電と電気トリーによる劣化の経緯を示す<sup>[8]</sup>。厚手の絶縁層では初期には均一な表面侵食から始まり、やがて小さな凸凹が生じる。第二段階は放電が凸凹やふちに集中して細かい溝ができ、そこがより速い速度で成長をはじめ、溝の一部からより深いピットが生じる。第三段階では、ピットより樹枝状の穿孔すなわちトリーが始まる。トリーの先端では電界集中によって、固体の真性絶縁破壊が起こっているといわれる。最終段階では、いったんトリーが発生すれば、ごく短時間で破壊を起こすといわれている。

このため、部分放電からトリーへ移行する場合、その寿命の大部分は摩耗劣化の第一、第二段階が占めていることになる。

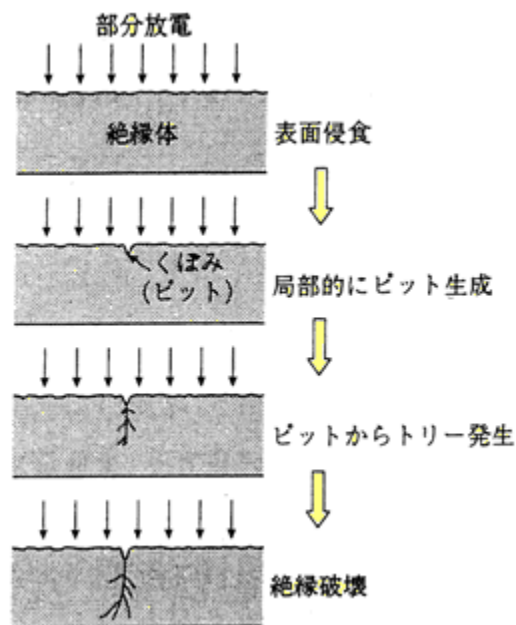


図 2-4 : 部分放電とトリー劣化

## 第3章 実験方法及び試料作製手順

### 3.1 実験回路構成及び使用機器

本実験で使用した二つの実験回路を図 3-1.2 に示す。また本章で用いた機器を表 3-1 でまとめて示す。一つ目、LeCroy Oscillo(WAVE SURFER 454:LeCroy Co.) (以降、オシロスコープ)内に内蔵されたプログラムによって Test electrodes (以降、電極系)に印加する電圧を制御した。まず、オシロスコープ内のプログラム指示より Signal generator (WF1973:NF ELECTRONIC INSTRUMENTS) から  $0\sim 3.3[V]$ ,  $60[Hz]$  の正弦波交流が出力される。次に AC Amplifier (4505 PRECTION POWER AMPLIFILTER: NF ELECTRONIC INSTRUMENT)により 100 倍に昇圧される。次に、変圧器 (VE-6CP:東芝産業機器(株))により 60 倍に昇圧される。以上により、昇圧された電圧が電極系へと印加される。

図 3-1 において、電極系は  $47[k\Omega]$  の制限抵抗を通して、 $1000[pF]$  のコンデンサと  $10[mH]$  のブロッキングコイルからなる Coupling Condenser (DAC-LCC-30:総研電気(株)) (以降、カップリングコンデンサ)と並列に接続されている。

放電開始電圧の測定は、電極系と並列に接続された Detection impedance (DI-21: (株)日本計測器製造所社) (以降、検出インピーダンス)により行っている。検出インピーダンスはカップリングコンデンサに並列に接続され、CD-6(同調式部分放電検出器 (株)日本計測機器)に接続されている。Potential Divider (36kV 検電碍子) (以降、分圧器)を介してオシロスコープに接続されている。このオシロスコープで印加電圧の歪を検出したら、オシロスコープ内のプログラムによってその時点でトリガを掛け、その時の電圧を絶縁破壊電圧として記録する。

二つ目、図 3-2 において、電極系は  $600[pF]$  のコンデンサと  $10[mH]$  のブロッキングコイルからなる Coupling Condenser (DAC-LCC-50:総研電気(株)) (以降、カップリングコンデンサ)と並列に接続されている。放電開始電圧の測定は、電極系と並列に接続された DAC-PDE-6 (総研電気(株))により行っている。検出インピーダンスはカップリングコンデンサに並列に接続され、DAC-PDE-6 (総研電気(株))に接続されている。

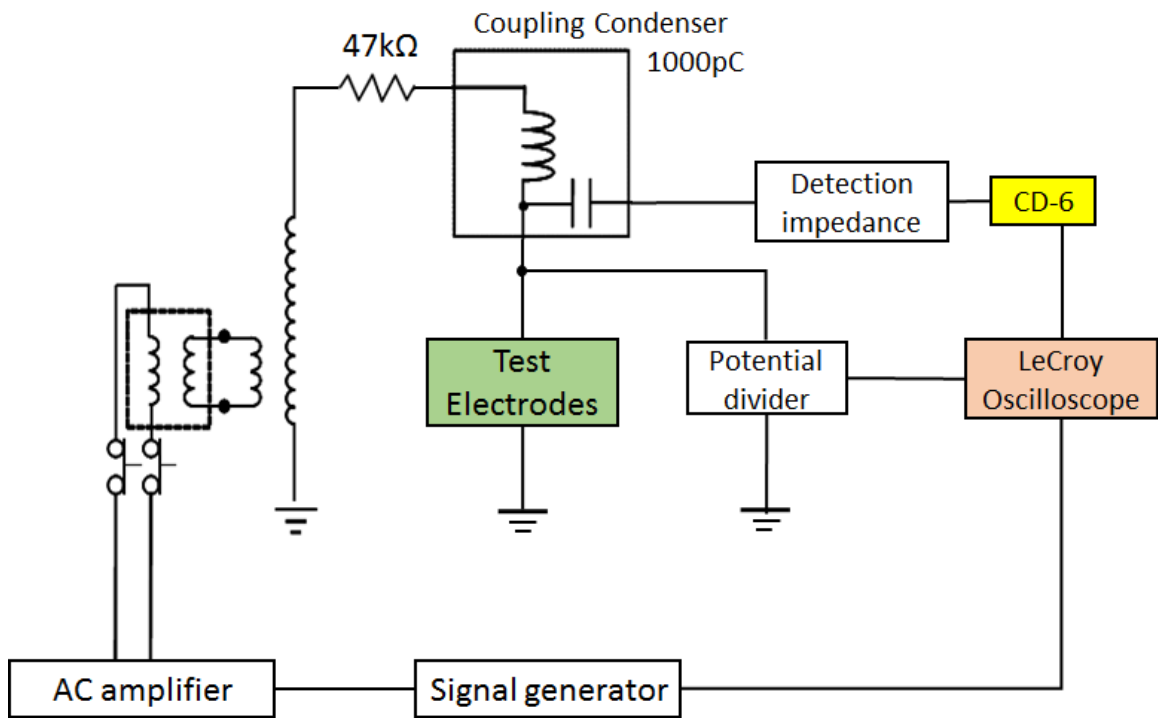


図 3-1 : 実験回路図 1

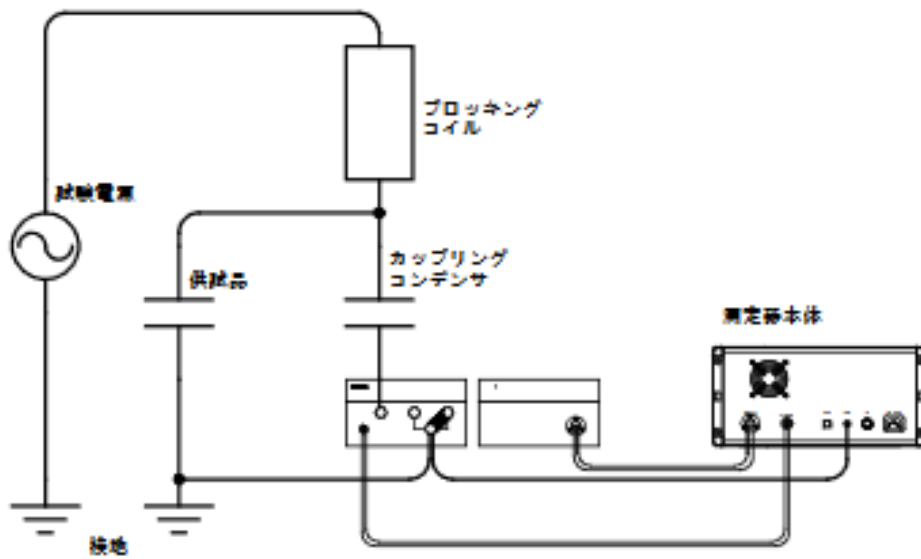


図 3-2 : 実験回路図 2

表 3-1 : 使用機器

機器名	型番	製造会社	備考
Signal generator	WF1973	NF	
AC amplifier	4505	NF	
Test Electrodes		自作	
LeCroy Oscillo.	WAVESURFER 454	LeCroy	周波数帯域 : 500 [MHz]
同調式部分放電測定器	CD-6	(株)日本計測器製造所	同期中心周波数 : 400 [MHz]
Detection impedance	DI-21	(株)日本計測器製造所	
変圧器	VE-3CP VE-6CP	(株)東芝産業機器 (株)東芝産業機器	
Current transformer		CTL-28-S90-05Z-1R1	周波数帯域 2 [kHz]-100 [kHz] 電流測定域 10 [mArms]-10 [Arms]
Potential Divider		明電ケミカル(株)	分圧比 : 1 : 4720
デジタル部分放電アナライザ	DAC-PD-9	総研電気(株)	中心周波数 : 40kHz-40MHz
検出器	DAC-PDE-6	総研電気(株)	使用周波数帯域 : 10kHz-400kHz
カップリングコンデンサ	DAL-LCC-30 DAL-LCC-50	総研電気(株) 総研電気(株)	定格電圧 : 30kV 定格電圧 : 50 k V
耐電圧試験機	YPAS-0150N	京南電気(株)	

図 3-3 に試料周辺の実験装置を示す。配線はカップリングコンデンサから試料に直接結線を施し、配線電線も高圧用の電線に交換し、結線部の突起から発生する部分放電を極力抑えるために、高電圧側にある分圧器や制限抵抗の結線部分に電界緩和シールドを取り付けることにより測定回路の部分放電開始電圧は 23kV にである。

図 3-4 に試料周辺の実験装置を示す。試料外での部分放電の要因をなるべくなくした上

で、更に試料外部での部分放電を防止するために絶縁油に浸漬して部分放電試験を実施した。このとき、試料を外した時の測定回路の部分放電開始電圧は、AC アンプの上限値である 28kV まで発生しなくなった。図 3-5 に試料周辺の実験装置を示す。机上の銅板との放電を防ぐため、プラスチックコンテナの上に置き机上と約 30cm 距離を作った。



図 3-3 : 試料周辺実験装置 1



図 3-4 : 試料周辺実験装置 2



図 3-5 : 試料周辺実験装置 3

## 3.2 各種測定試験 測定手順

### 3.2.1 実験回路 1

図 3-6 に試料内部における部分放電開始電圧及び消滅電圧を測定するための、部分放電測定時の電圧印加手順を示す。印加電圧はオシロスコープ内のプログラムから、60[Hz]の正弦波交流を 60[V/s]で昇圧しながら印加し、CD-6 の示す放電電荷量が 5[pC]となったところを放電開始として、その時の印加電圧を放電開始電圧として記録する。次に、最初の放電を検出したら、同様の昇圧速度でその値の 1.2 倍まで印加電圧を増加させる。その後、1.2 倍に達すると 60[V/s]の速度で印加電圧を減少させ 0[V]まで下げる。これ 10 回繰り返した。

図 3-7 に試料の耐電圧寿命特性を評価するための V-t 試験の印加電圧手順を示す。印加電圧はオシロスコープ内のプログラムから、60[Hz]の正弦波交流をはじめに 1[kVrms/s]で 10[kVrms]まで昇圧する。次に、任意の印加電圧(今回は 20[kVrms])まで 300[Vrms/s]の二段階昇圧で印加していき、任意の印加電圧に昇圧する。この瞬間を電圧印加時間の開始として絶縁破壊までの累積時間を寿命時間と定義した。なお、絶縁破壊の判定は印加電圧が 50%降伏した瞬間を絶縁破壊とした。

連続昇圧試験の印加電圧手順は上記した V-t 試験の印加手順と同様の昇圧条件とし、こちらは絶縁破壊まで昇圧し続ける手順となる。

### 3.2.2 実験回路 2

図 3-8 に試料内部における部分放電開始電圧及び消滅電圧を測定するための、部分放電測定時の電圧印加手順を示す。手動で 60[Hz]の正弦波交流を約 1.5[kV/s]で昇圧しながら印加し、CD-6 の示す放電電荷量が 5[pC]となったところを放電開始として、その時の印加電圧を放電開始電圧として記録する。次に、最初の放電を検出したら、同様の昇圧速度でその値の 1.2 倍まで印加電圧を増加させる。その後、1.2 倍に達すると約 1.5[kV/s]の速度で印加電圧を減少させ 0[V]まで下げる。この間を約 20 秒で行う。これ 3 回繰り返した。

図 3-9 に試料の耐電圧寿命特性を評価するための V-t 試験の印加電圧手順を示す。印加電圧は手動で 60[Hz]の正弦波交流を約 1[kV/s]で任意の印加電圧(今回は 15or17.5[kV])まで昇圧する。任意の出圧になったこの瞬間を電圧印加時間の開始として絶縁破壊までの累積時間を寿命時間と定義した。なお、絶縁破壊の判定は印加電圧が 50%降伏した瞬間を絶縁破壊とした。



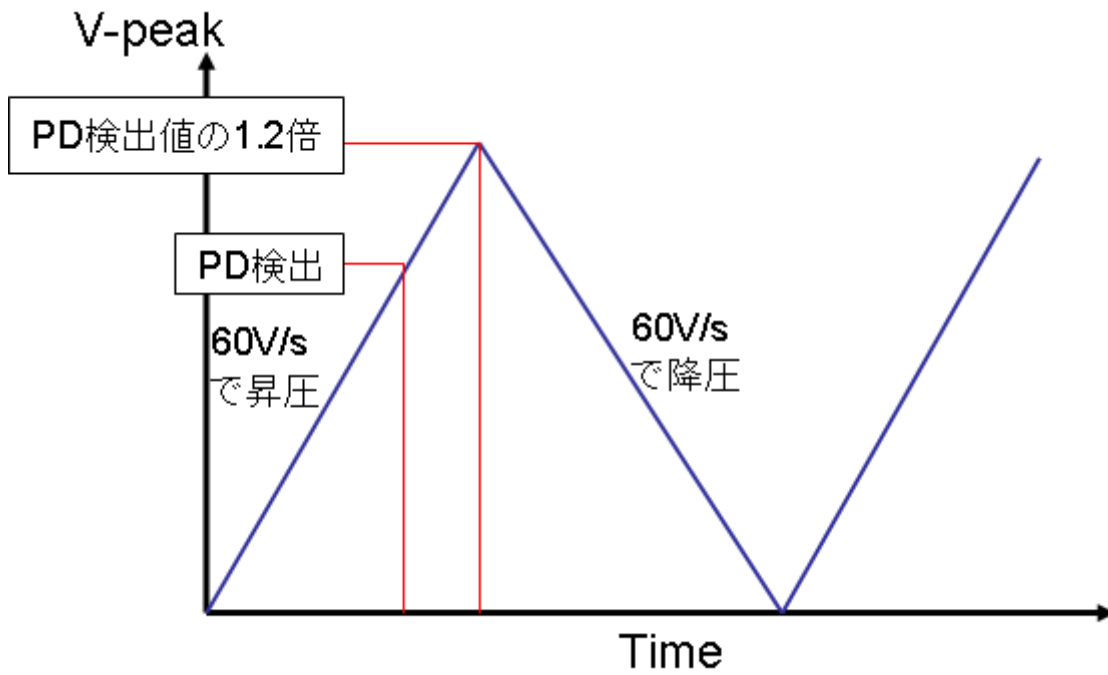


図 3-6 : 部分放電測定時の電圧印加手順

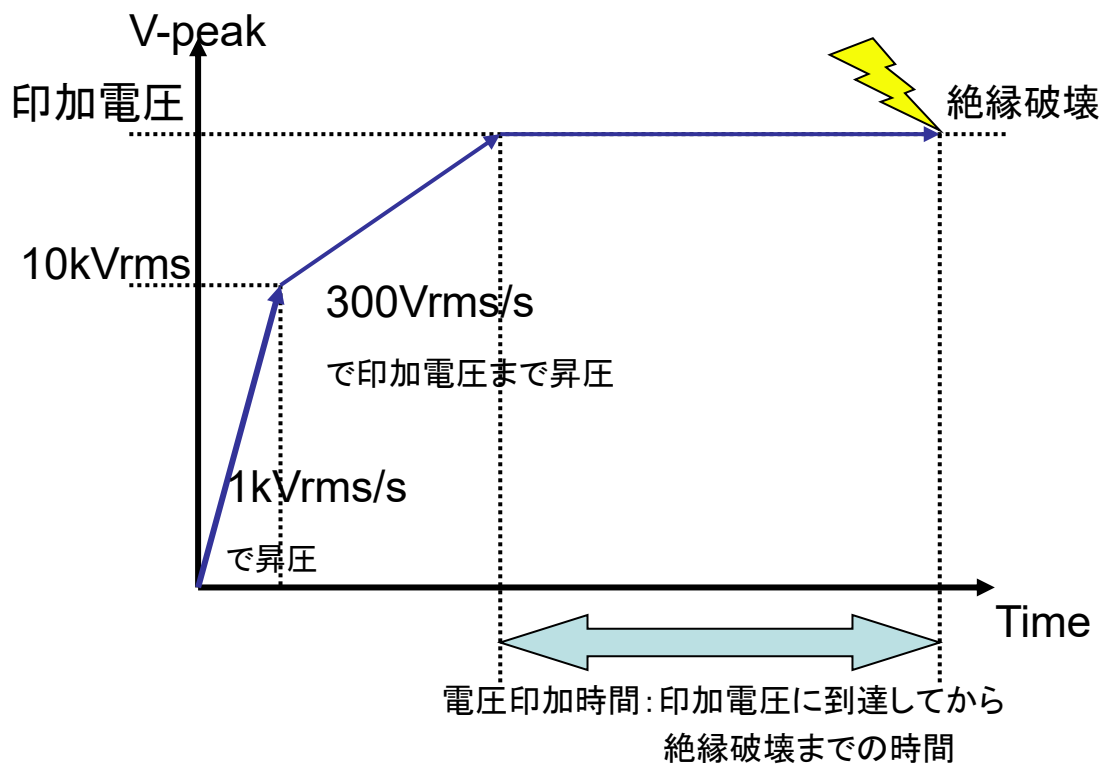


図 3-7 : V-t 試験時の電圧印加手順

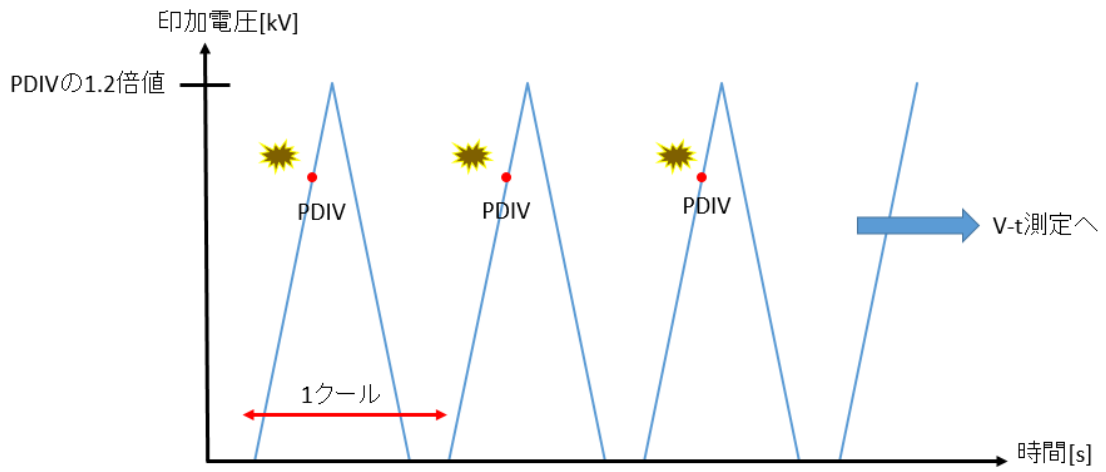


図 3-8 : 部分放電測定時の電圧印加手順

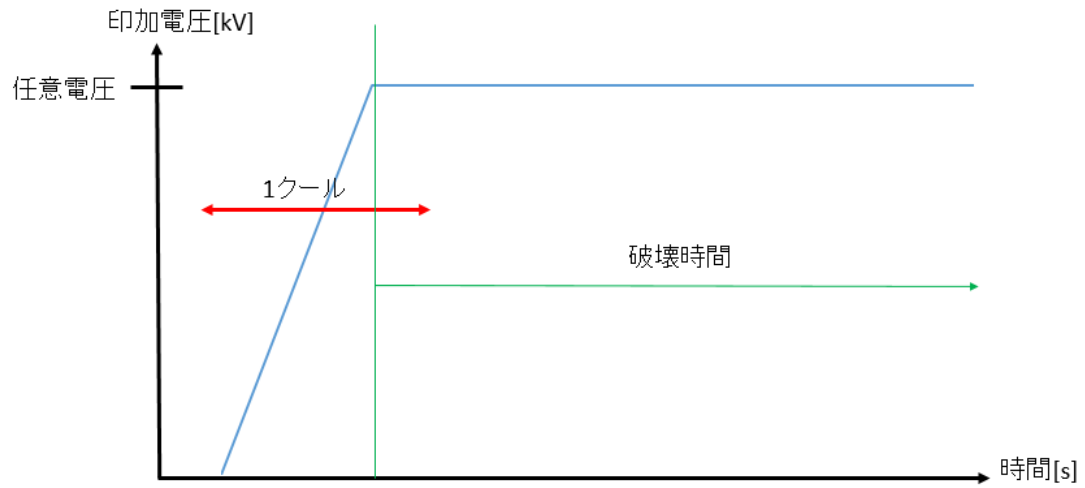


図 3-9 : V-t 試験時の電圧印加手順

### 3.3 使用するエポキシ樹脂と硬化剤

試験試料用の材料として使用しているエポキシ樹脂と硬化剤についての詳細を表 3-2 に示す<sup>[11][14][15][16]</sup>。主剤にビスフェノール A 型エポキシ樹脂を使用しており、硬化剤にはテトラヒドロメチル無水フタル酸を使用している。これらには、重量比 1 : 1 で混合して硬化するようにエポキシ当量を考えて充填剤としてシリカが含まれている。

表 3-2 : エポキシ樹脂及び硬化剤

主剤	
名称	ビスフェノールA型エポキシ樹脂
化学式	$C_{21+18n} H_{24+20n} O_{4+3n}$
分子量	370~400
構造式	
硬化剤	
名称	テトラヒドロメチル無水フタル酸
化学式	$C_9H_{10}O_3$
分子量	166.18
構造式	

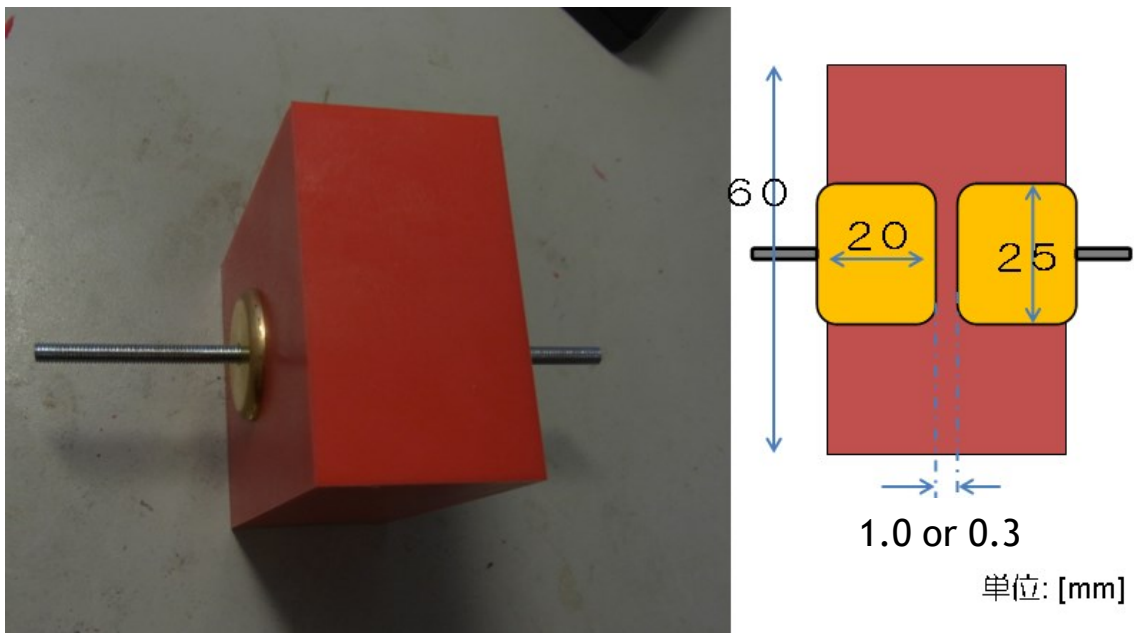
また、主剤と硬化剤は吸水度が高く、空気中の水分等の吸水によってエポキシ樹脂の機械的強度や界面での接着性に影響があるという報告がある<sup>[17]</sup>。また、これまでの試験結果より、試料作製時の湿度が部分放電電圧や寿命のバラつきに影響を与えている可能性があった。

このような背景から、後の試料作成を行う前に、湿度管理のための以下の作業を行った。

1. 小分け用のプラ容器にホットガンで約 200°C の温風を当て、予備乾燥を行う。
2. エポキシ樹脂及び硬化剤を、元のペール缶から大気に触れていないであろう下側から採取し、予備乾燥を行ったプラ容器に小分けを行う。
3. 予備乾燥終了後に、防湿庫 (DRY-CABI、トリーハン) で保管する。防湿庫内には付属のペルチェ除湿器とシリカゲル、塩化カルシウムを設置し、庫内を 20% 程度にコントロールした。

### 3.4 一体型 V-t 試験測定試料

図 3-10 に本研究に用いた一体型 V-t 試験試料を示す。この試料では真鍮製の電極を使用し、治具により電極間距離を 0.3mm に固定し、実機に用いているエポキシ樹脂でモールドを行った並行平板電極となる。ここで、電極間隔 0.3mm は狭く、電極間の欠陥の有無のみに寿命の長さが左右されている可能性があった。このため、試料の劣化が寿命に影響を及ぼすよう、電極間隔を 1mm に広げた試料も各種試験を実施した。



(a) : 一体型 V-t 試験電極概観図

(b) : 一体型 V-t 試験電極概要図

図 3-10 : 一体型 V-t 試験電極

### 3.4.1 一体型 V-t 試験試料作製手順

以下に作製手順を示す。

#### [1] 型の準備

1. 図 3-11 にコーティング金型を示す。離型剤(KS-707、信越シリコーン)をコーティング金型表面全体および側面、裏、ネジ穴に薄く塗り、20 秒以内に拭き取る。表面に離型剤の膜が凹凸にならない様、また塗りむらができないように電極に接する部分は丁寧に塗る。
2. 電極をアセトンで 15 分超音波洗浄し、M4 のネジとナットで型に固定する。固定したら、電極表面に当たらないように慎重に型を組み上げる。
3. 重ね合わせた型をネジで固定する。図 3-12 に組み立てた型を示す。
4. 注型作業時に金型の温度が急速に下がらないようにするために、保温治具として熱容量のある金属板を用意し、恒温槽で 1 時間半の間 100[°C]に予熱しておく。

#### [2] エポキシレジン準備

1. 3.3 節に記載した主材(XNR4153、ナガセケムテックス)と硬化剤(XNH4153、ナガセケムテックス)を 70°Cで 30 分間予熱にかける。
2. 天秤を用いて主材と硬化剤を 1:1 の割合で混合し、攪拌器(TORNADO SM-102、アズワン)を用いて回転数 450rpm 前後で 1 分 30 秒間、混合を行う。
3. 混合した樹脂を 90[°C]に予熱した真空乾燥機(AV0-310N、アズワン)に入れ、真空ポンプ(TSW-300、SATO VAC INC)で脱泡する。脱泡時間は、樹脂内の泡の大半が抜け、脱泡中の樹脂の膨張がなくなり、真空計のメータが下がり始めてから 15 分とした。

#### [3] 一次硬化

1. 真空乾燥機に予熱した金型を置き、エポキシ樹脂を素早く流し込み、再び約 1 時間脱泡する。
2. 型を恒温槽 1(DRX 420DA、Toyo Seisakusho Kaisha, Ltd)の中に入れて 100[°C]で 3 時間一次硬化する。

#### [4.1] 取り出し、二次硬化、保管(No291 まで)

1. 一次硬化した金型を炉から取り出し、素早く固定用ピンを外して、2 次硬化に移った。
2. 型から取り出した電極系を恒温槽 1 の中に戻し、12 時間二次硬化する。ここで、No. 195 以前の試料は 120°Cで、No. 196 以降の試料は 130°Cで二次硬化を行っている。
3. 二次硬化後、130°Cから常温まで 4 時間かけて冷却させる。
4. 冷却後、金型を静かに分解して試料を取り出し、各種測定までデシケータ(HD-115W、トリー・ハン株)にて保管。

#### [4.2] 取り出し、二次硬化、保管(No292 以降)

1. 一次硬化した金型を炉から取り出し、素早く固定用ピンを外して、2 次硬化に移った。
2. 型から取り出した電極系を恒温槽 2(WFO-402W、TOKYOU RIKAKIKAI. CO. LTD)の中に戻し、

プログラミング温度制御で 130℃で 12 時間硬化させる。

3. 二次硬化後、130℃からプログラミング温度制御で常温まで任意時間(基本は 10 時間)かけて冷却させる。
4. 冷却後、金型を静かに分解して試料を取り出し、各種測定までデシケータにて保管。



図 3-11 : 金型

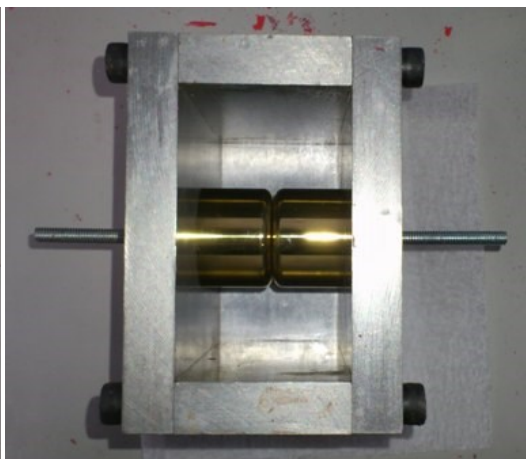


図 3-12 : 組み上げた型

## 第4章 一体型 V-t 試験試料を用いた試験結果

### 4.1 実験回路1における試験結果

#### 4.1.1 部分放電測定 結果

一定速度での昇降圧を繰り返すことで、部分放電開始電圧及び部分放電消滅電圧を調べた。実験手順は3.2.1節に記した通りである。

PDIV に関して、10回の昇圧結果を図4-1<sup>~</sup>2に示す。番号のない試料は1~2回目昇圧または降圧中に破壊に至った試料、グラフの途中で線が消えているものは3~10回目昇圧または降圧中に破壊に至った試料である。試料は2016年10月開缶エポキシを用いて作成した電極間1.0mm試料である。図4-1より、PDIV値が3~8[kV]に値が集中している事に対して、図4-2はPDIV値が20[kV]以上になっていることがあることがわかる。

二次硬化後、各冷却時間ごとのPDIVに関しての昇圧結果を図4-3<sup>~</sup>5に示す。また、恒温槽1内の温度降下グラフを図4-7、恒温槽2内の温度降下グラフを図4-8に示す。試料作成時の冷却時間を変える(1h/4h/12h)ことで、剥離がしやすい/できにくいと思われる状態に近づけるために恒温槽の温度降下を測定したところ図4-7より恒温槽1は温度分布がほぼ変わらなかった。図4-8より恒温槽2では温度分布がほぼ線形であることが分かる(ここでの先行研究は恒温槽1の4hを表す)。図4-3<sup>~</sup>5に示すグラフの試料は恒温槽2で作成したものである。図4-3<sup>~</sup>5より、冷却時間が違っていてもPDIV値が8~13[kV]付近に集中していることがわかる。また各冷却時間の一試料の10回ごとの平均を比較できるように図4-9に示す。図4-9から、わずかながら平均PDIVは上昇していることがわかる。室温にもっていく冷却時間を長くすると剥離ができにくいと予想していた通りには結果がでたが、明確な差がないので裏付けがまだできなかった。

また先行研究より、ロット別のPDIV平均値をまとめたものを図4-10に示す。1試料の10回のPDIV平均値を1プロットとし、それらの値のロット別(橙:2013-4ロット、赤:2013-12ロット、灰:2014-10ロット、緑:2015-5ロット、青:2015-12ロット)の平均値を黒点としている。使う試料のロットによってPDIV値にばらつきが生じている。また、2013-12ロットと2015-12ロットはPDIVの平均値やばらつき方が似ていることがわかる。この2つのロットの試料は開缶時期が同じ(12月)で、使用時期が同じ(12月~8、9月)である。これらのことからPDIVには試料ロットや季節要因、特に湿度の影響を受けていると考えられる。

PDIV平均値と作成時気温・湿度の推移をまとめたグラフを図4-11、12に示す。図4-11は横軸に試料番号をとり、図4-12は横軸に試料作成年月日をとったものである。図4-11から、湿度が高い時期に作成した試料はPDIVのばらつきが特に大きいことがわかる。

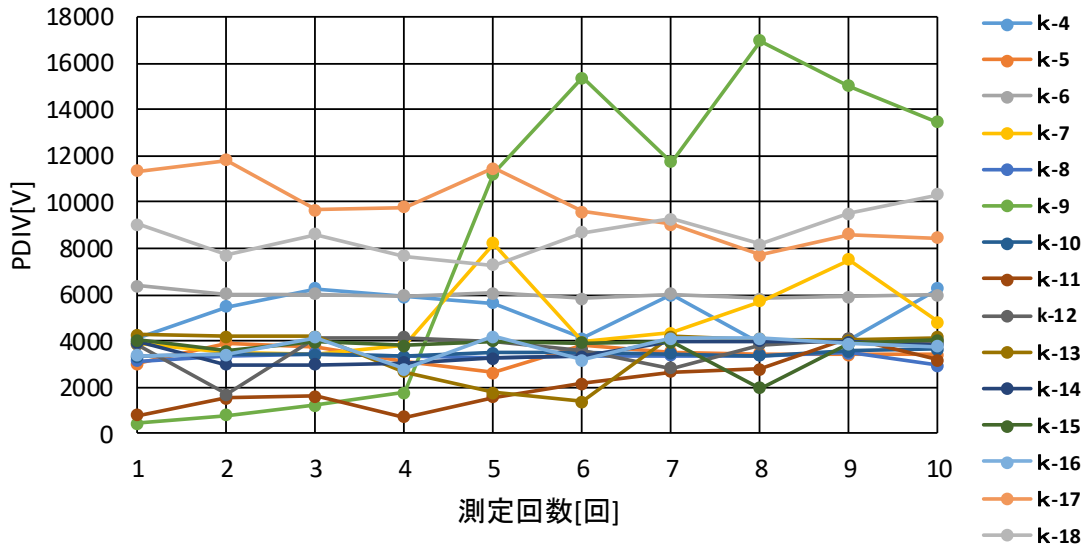


图 4-1 : PDIV 測定値 (k-4~k-18)

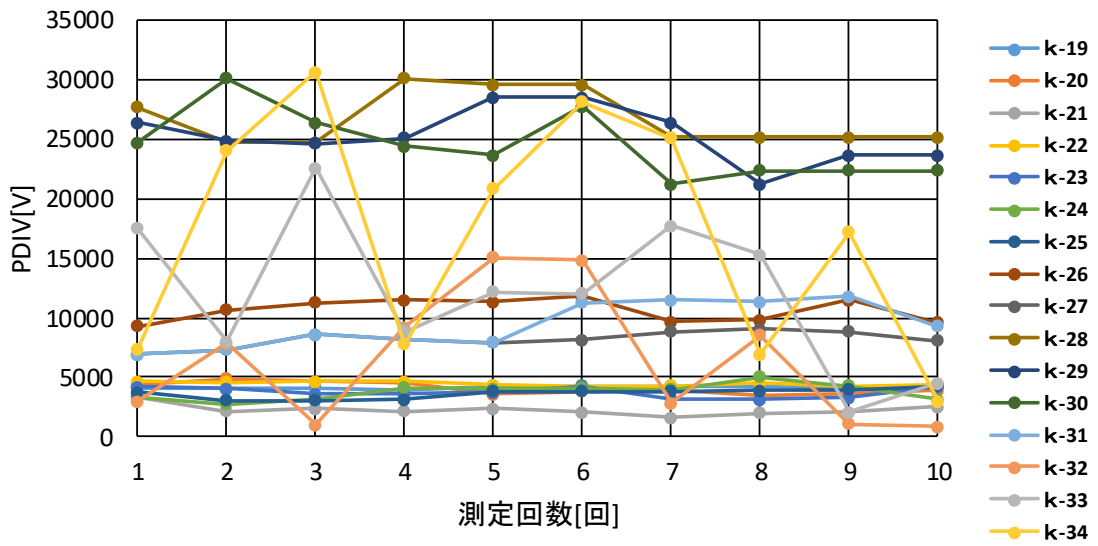


图 4-2 : PDIV 測定値 (k-18~k-34)



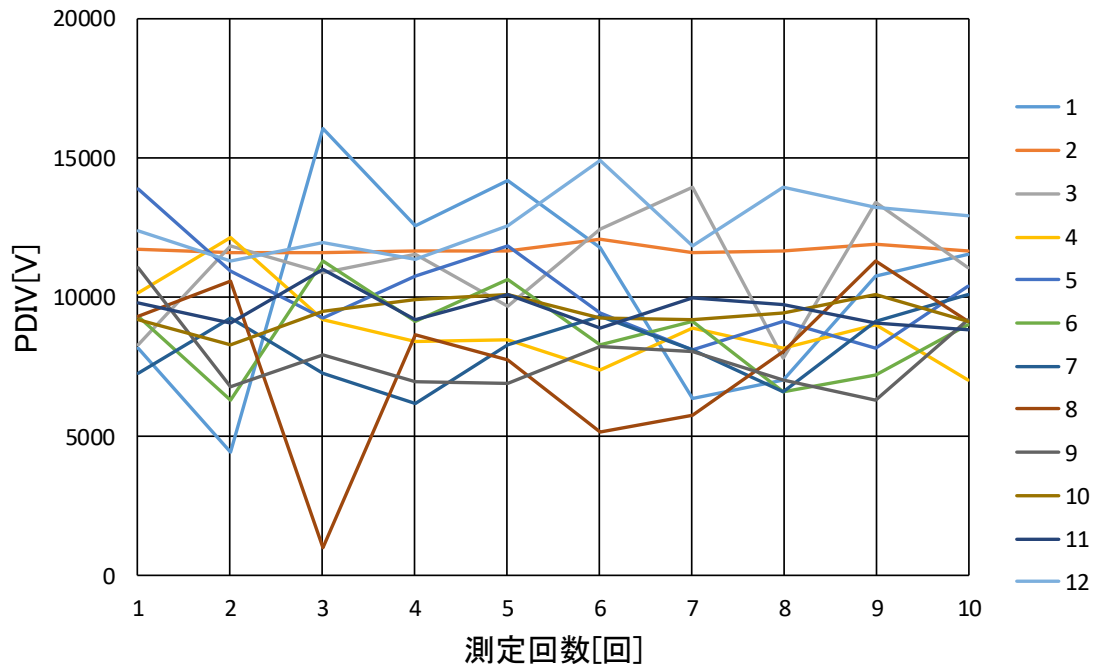


図 4-3 : PDIV 測定値 (冷却時間 1 h)

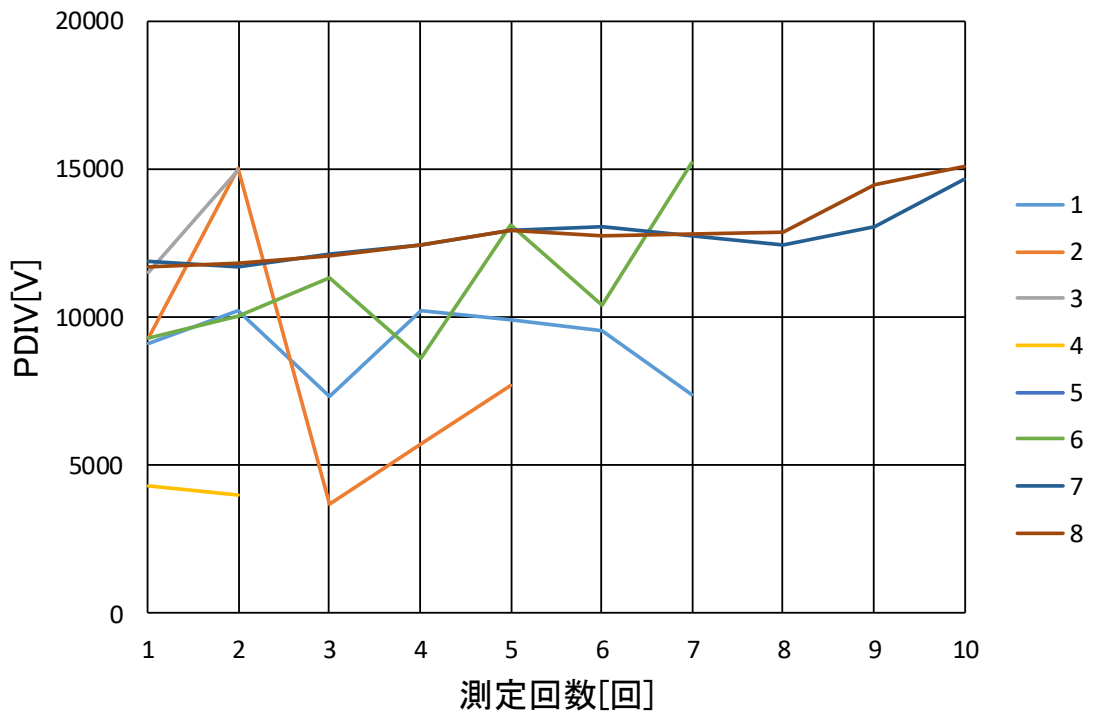


図 4-4 : PDIV 測定値 (冷却時間 4 h)

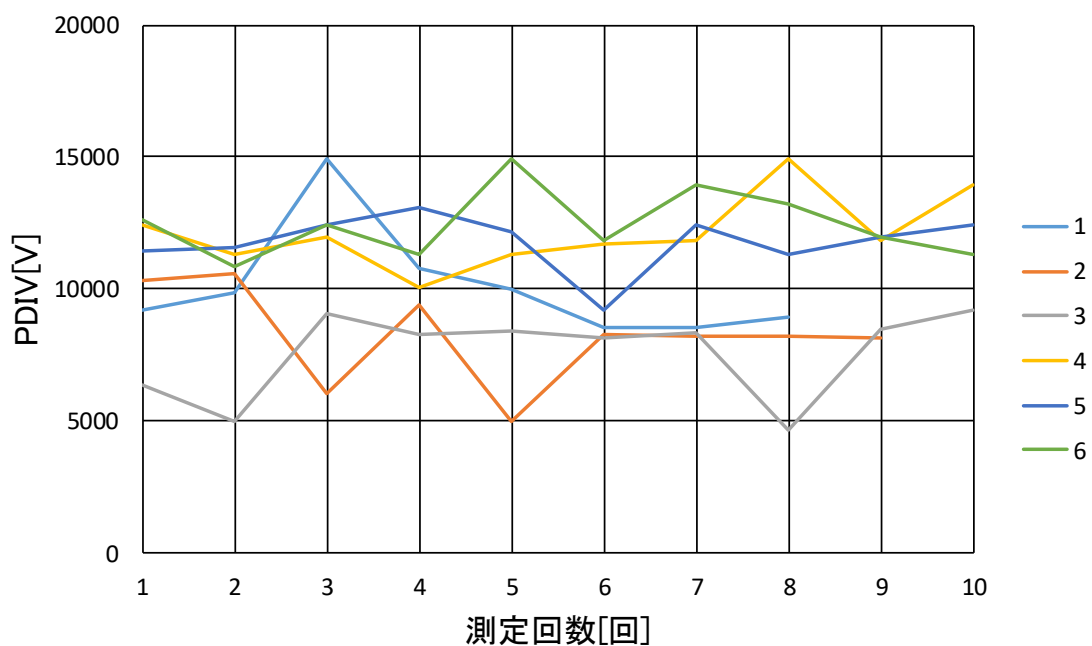


図 4-6 : PDIV 測定値 (冷却時間 12 h)

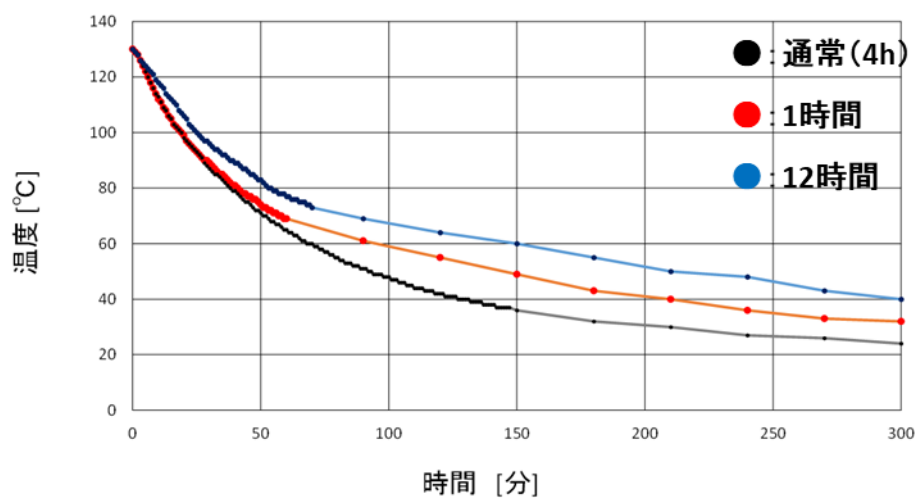


図 4-7 : 恒温槽 1 (DRX 420DA、Toyo Seisakusho Kaisha, Ltd) 冷却温度

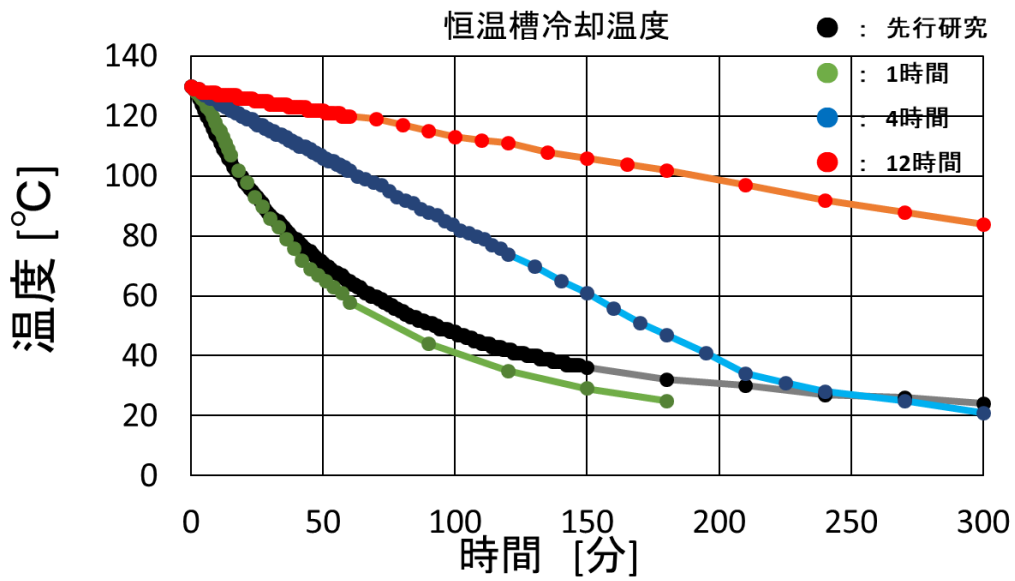


図 4-8 : 恒温槽 2 (WFO-402W、TOKYOU RIKAKIKAI. CO. LTD) 冷却温度

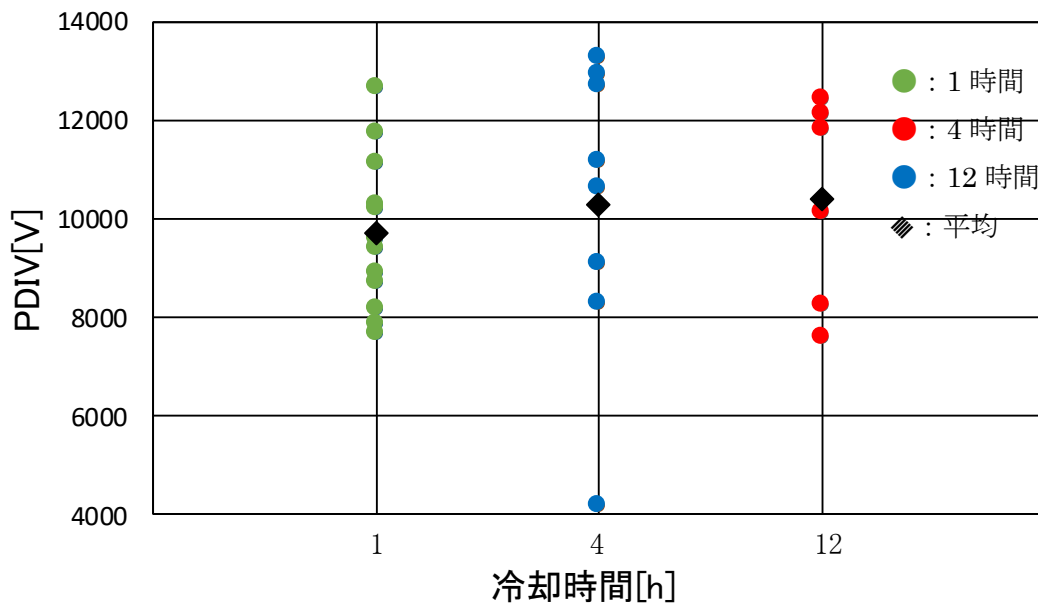


図 4-9 : 0.3mm 試料 各時間の平均 PDIV

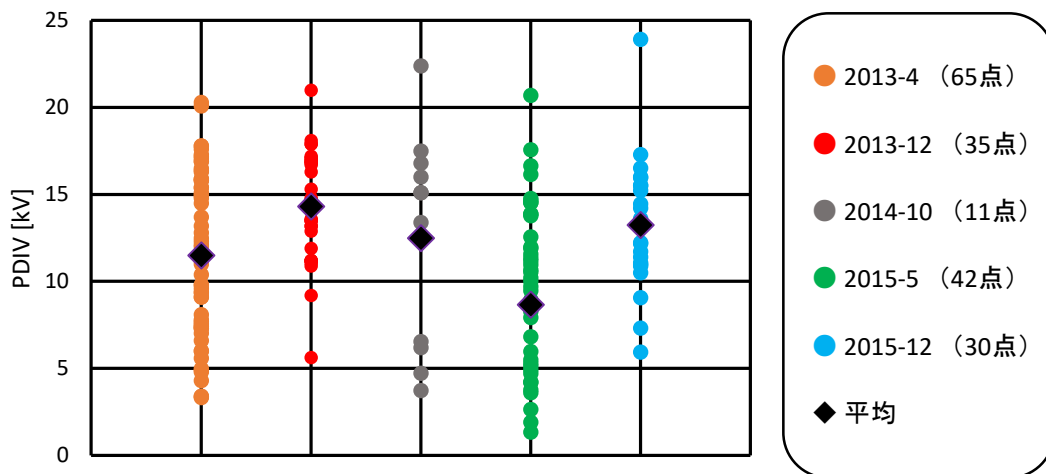


図 4-10 : ロット別 PDIV 平均

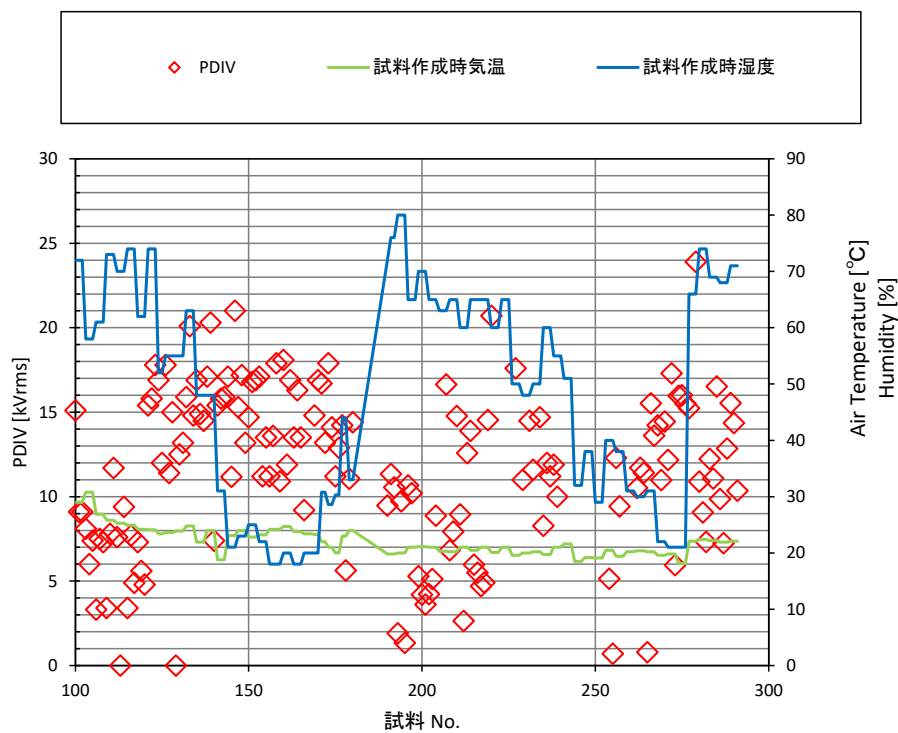


図 4-11 : PDIV・試料作成時の気温・湿度の推移  
(横軸：試料番号)

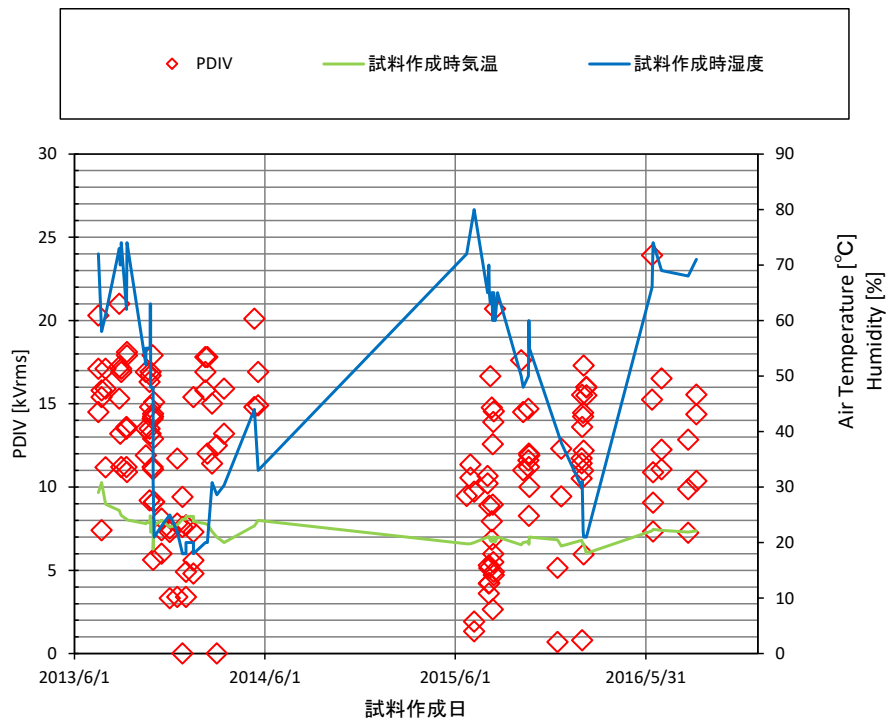


図 4-12 : PDIV・試料作成時の気温・湿度の推移  
(横軸：試料作成年月日)

#### 4.1.2 V-t 試験 結果

任意の電圧を印加し、寿命時間を調べた。実験手順は 3.2.1 節に記した通りである。

横軸に寿命時間、縦軸に破壊電界をとったグラフを図 4-13 に示す。0.01min の時間上のプロットは部分放電電圧測定試験時の昇降圧中または本 V-t 試験時の昇圧中に破壊に至った試料である。また、矢印付きのプロットは未破壊の試料である。本試料系では同じ試験電圧下で測定を行っても寿命時間のばらつきは 4 桁にも及んでおり、先行研究との比較でも関連性が見いだせなかった。

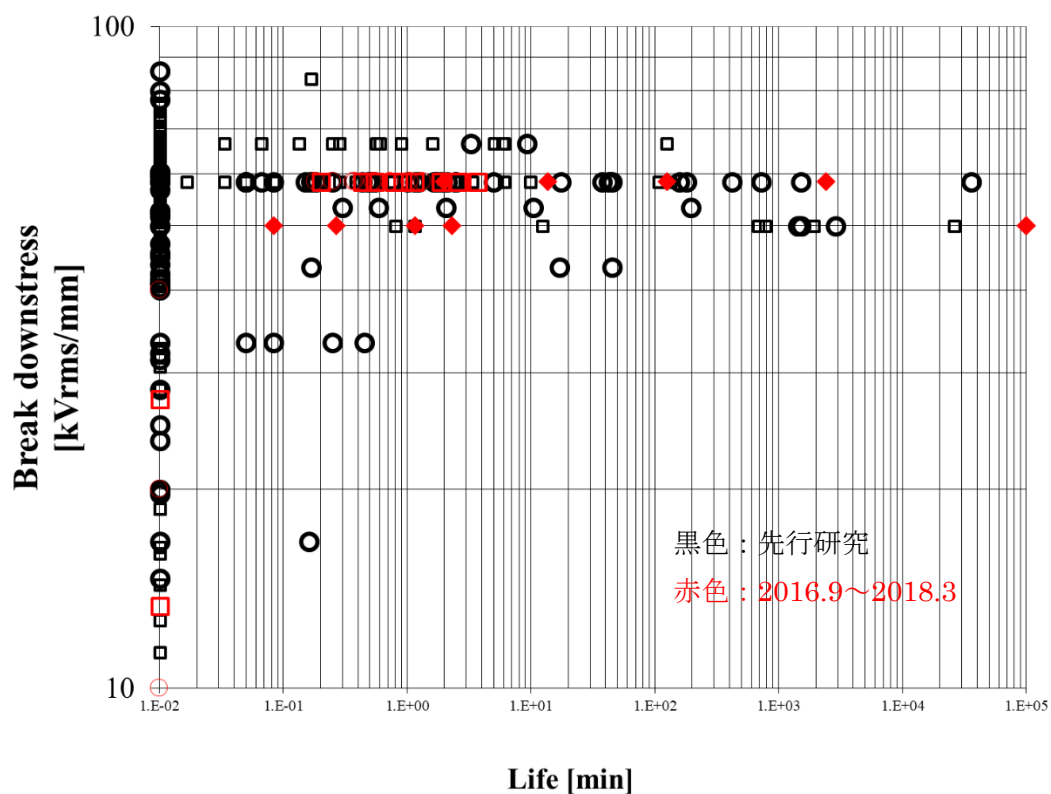


図 4-13 : V-t 試験 結果

## 4.2 実験回路2における試験結果

### 4.2.1 部分放電測定 結果

手動で一定速度の昇降圧を繰り返すことで、部分放電開始電圧及び部分放電消滅電圧を調べた。また同時にV-t測定も行った。実験手順は3.2.2節に記した通りである。

図4-14に昇圧結果を示す。橙色は17.5[kV]においてPDフリーであった。試料は2017年6月・11月開缶したエポキシ樹脂を用いた。また青色の大半は測定中の昇圧破壊であることが多い。実験回路2では実験回路1に比べて17.5[kV]PDフリーになることが多かった。これは3.2.2節より手動かつ目視で確認することによりノイズと思われる放電をPDIVと認識しなくなったからだと考えられる。

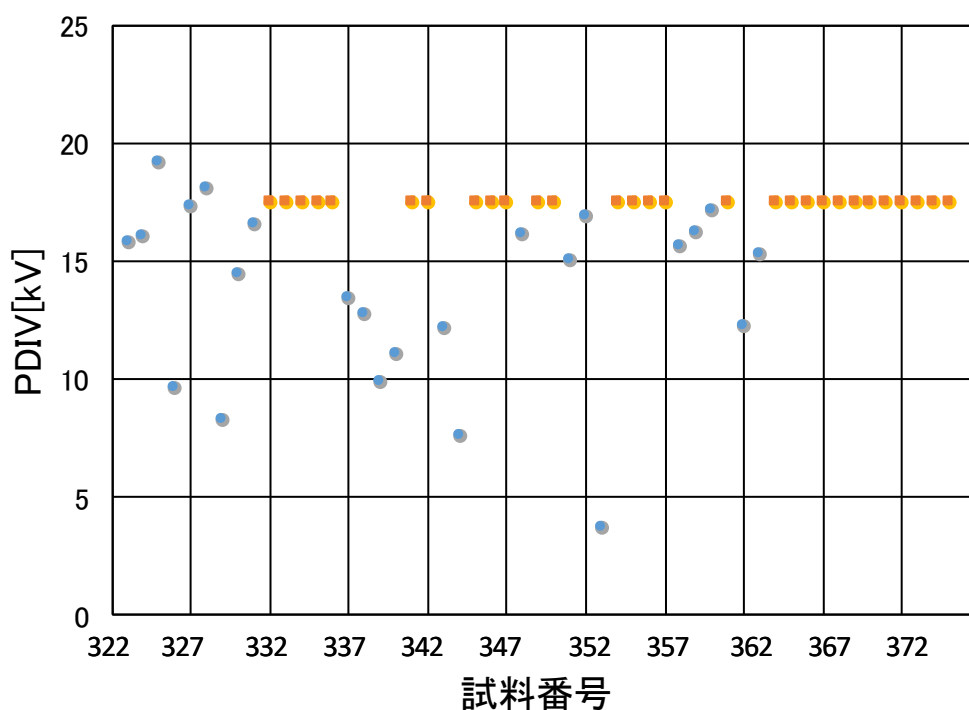


図4-14 : PDIV 測定値

#### 4.2.2 V-t 試験 結果

任意の電圧を印加し、寿命時間を調べた。実験手順は 3.2.2 節に記した通りである。横軸に寿命時間、縦軸に破壊電界をとったグラフは 4.1.2 節の図 4-13 に示す。結果については 4.1.2 節通りである。

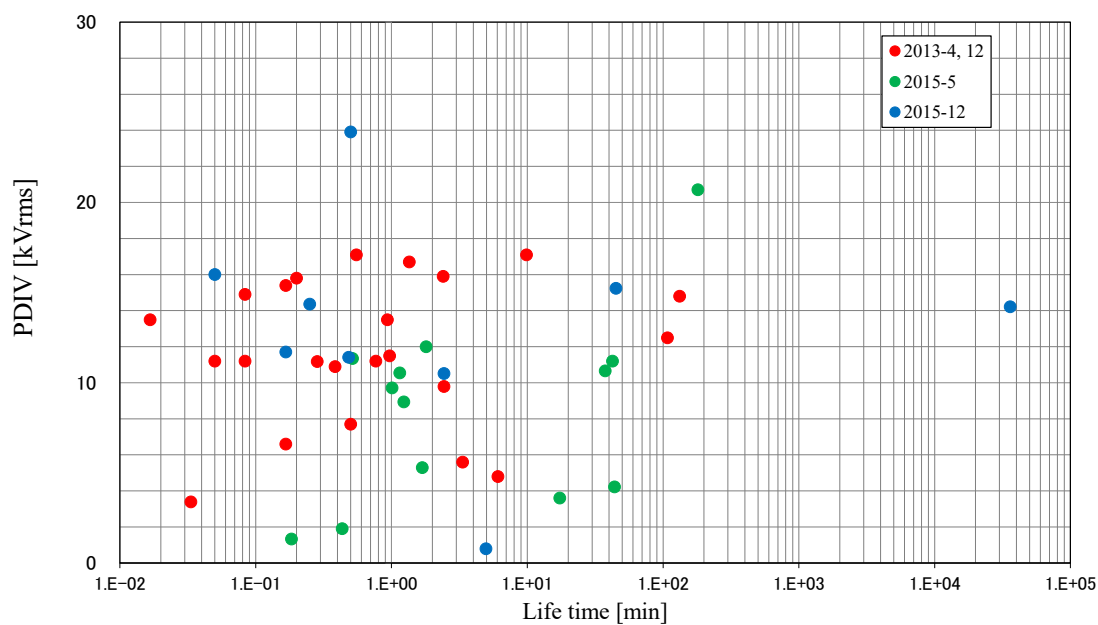
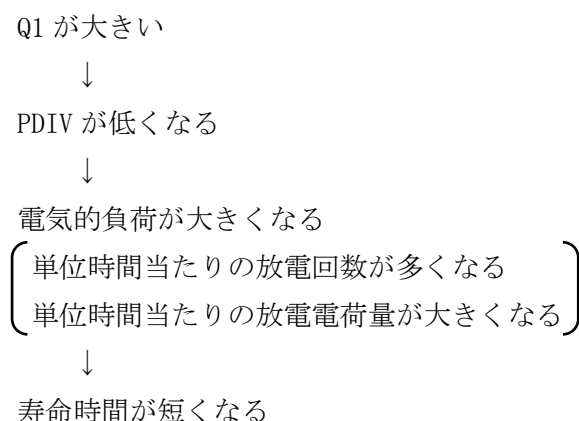


図 4-15 : 寿命時間 - PDIV



### 4.3 一体型 V-t 試験試料試験結果 考察

文献の結果から、『Q1 が大きいと PDIV が低い』、『単位時間当たりの放電回数が多いと寿命時間が短い』、『単位時間当たりの放電電荷量が大きいと寿命時間が短い』ということがわかっており放電と試料寿命の間には



という一連の関係性があると考えられている<sup>[18] [19]</sup>。ここで剥離の起きやすさで Q1 が変わると推測し、あえて剥離の起きやすい/起きにくい試料(冷却時間を変えた試料)を作成した大きな差異が確認できなかった。よって、剥離より試料の内の別の要因が Q1 を変えていると考えられる。2017 年 6 月以降の試料は冷却時間を 10 時間とし測定を行うことにした。

また、本試験では V-t 試験値のばらつきが大きく、PDIV と寿命時間間に直接的な関係性は得られなかった(図 4-15)。

### 4.4 一体型 V-t 試験試料試験結果まとめ

1. 実機レベルのエポキシ樹脂と並行平板電極を用いた試料にて、部分放電電圧測定試験、V-t 試験、放電電荷量測定を行った。
2. 部分放電開始電圧 (PDIV) を調べるため、部分放電電圧測定試験を行った。
  - (a) 部分放電開始電圧 (PDIV) 消滅電圧 (PDEV) の関係は  $PDIV \geq PDEV$  である。
  - (b) PDIV 平均値や季節推移から、エポキシの試料ロット、湿度、季節要因(エポキシ樹脂・硬化剤の開缶時期、使用季節)が PDIV の傾向とばらつきに影響していると考えられた。
  - (c) 特に、湿度の高い時期に作成した試料は PDIV のばらつきが特に大きいことを示した。
  - (d) 冷却時間の変更で剥離をあえて起きやすい/起きにくい状態を作成したが、大きな差異が見つからなかった。
3. 寿命時間を調査するため、V-t 試験を行った。
  - (a) ばらつきが大きく、寿命時間の傾向はつかめなかった。
4. 手動昇圧測定による V-t 試験を行った。

- (a) PDIV が全体的上がった。これは、自動測定時単発の放電のノイズを PDIV と認識している低かった PDIV が手動昇圧で放電を目視で確認しながら測定することでノイズの除去をより正確にできていると考えられる。
- (b) 17.5[kV]までに PDIV が起こる試料は昇圧中に破壊されることが多かった。

## 第5章 V-t 試験結果のパターン解析

### 5.1 解析方法

PD-9 では指定秒で放電を取ることができる。今回、17.5[kV]、検出感度 5[pC]、19 秒データ取得 1 秒インターバルという条件でデータ取得を行った。取得したデータは csv ファイルで保存されるので、それを用いて位相解析を行った。

データ処理ソフト(マクロ)の開発によりデータを以下のように解析することができた。

- 放電電荷量の経時変化(5-1)
- 任意時間の各位相ごとの積算(5-2)
- 各周期の各位相ごと放電の変化(図 5-3)

また解析を行い寿命に至るまでの部分放電特性測定結果を 2 種類に分類した。1 つ目は V-t 放電(大)有(部分放電開始当初から放電電荷量が 80[pC] を超える放電が生じ、寿命を迎える試料。)でもう 1 つは V-t 放電(大)無(散発的に放電は生じるものの大きな放電は持続せず、寿命を迎える試料)。それぞれ図 5-1.4 に示す。

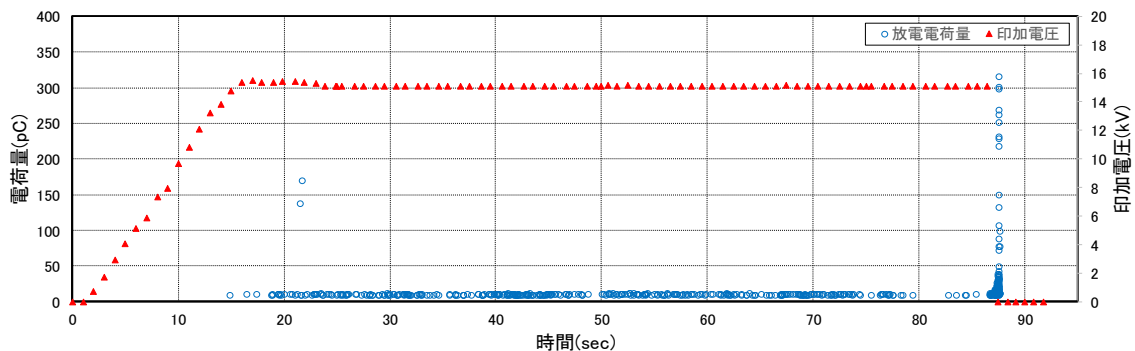


図 5-1. 放電電荷量の経時変化

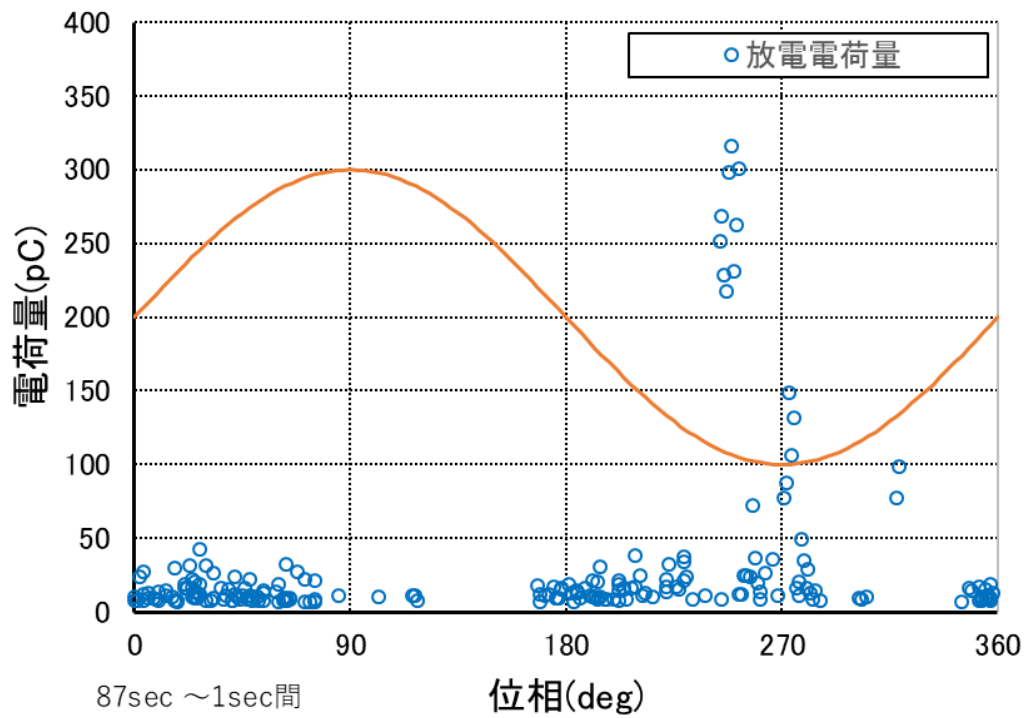


図 5-2. 任意時間の各位相ごとの積算

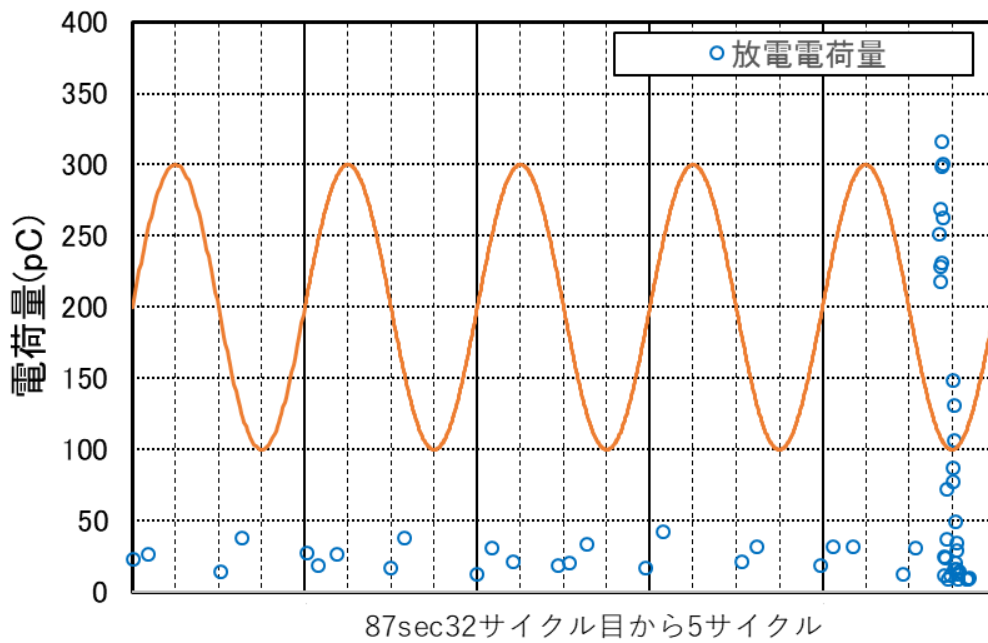


図 5-3. 各周期の各位相ごとの変化

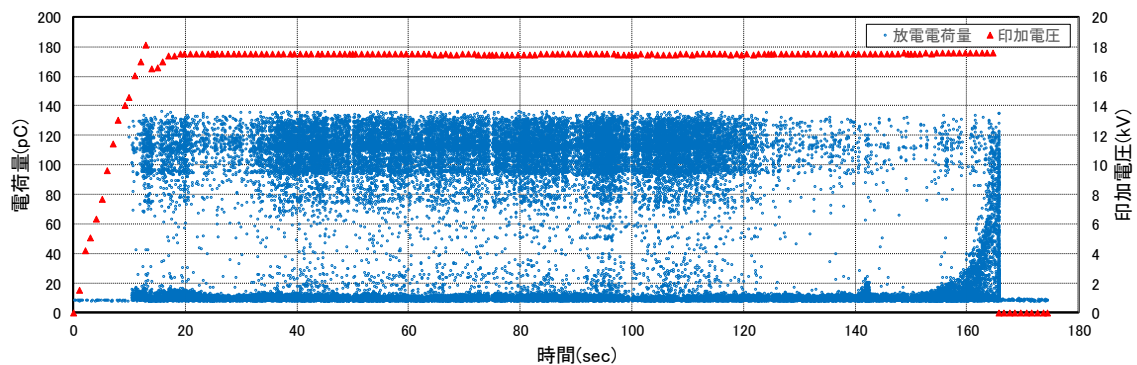


図 5-4. V-t 放電(大)有 例

## 5.2 解析結果

結果の一例を図 5-5 に示す。V-t 放電(大)有・無共に破壊直前には図 5-5 の様に赤の曲線の様に放電電荷量が大きくなるという前駆現象が起きている。試料により前駆現象の起こっている時間・電荷量の大きくなる速さは違うがこの現象に至るまでの要因がわかれば寿命推定ができると考えられる。

この放電指数は初期放電の大きさにかかわらず起きていることから別の要因があると考えられる。破壊直前の半周期から 3 周期までの放電は第一・三象限で主に起き、ピーク電圧付近で大きな放電が生じるとその半周期から 3 周期以内に破壊した。今後は放電電荷量、頻度、放電が起こる位相など放電評価の指数に加えて評価することを検討している。

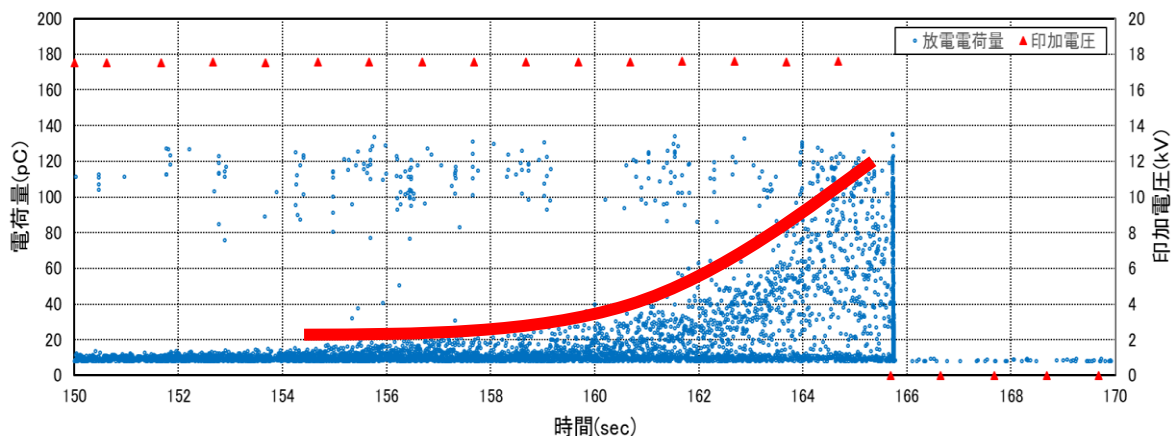


図 5-5 : . 図 5-4 の試料破壊直前経時変化

## 5.3 放電回数・放電電荷量

放電指数を調べるために放電回数・放電電荷量に対する寿命のを図 5-6.7 に示す。また単位時間あたりの放電回数・放電電荷量を図 5-8.9 に示す。また総放電回数について放電電荷量の大きさに関して調べるために、放電電荷量を 5-40、40-80、80-[pC]に分けて寿命時間に対するグラフを図 5-10 示す。単位時間あたりのグラフは図 5-11 に示す。

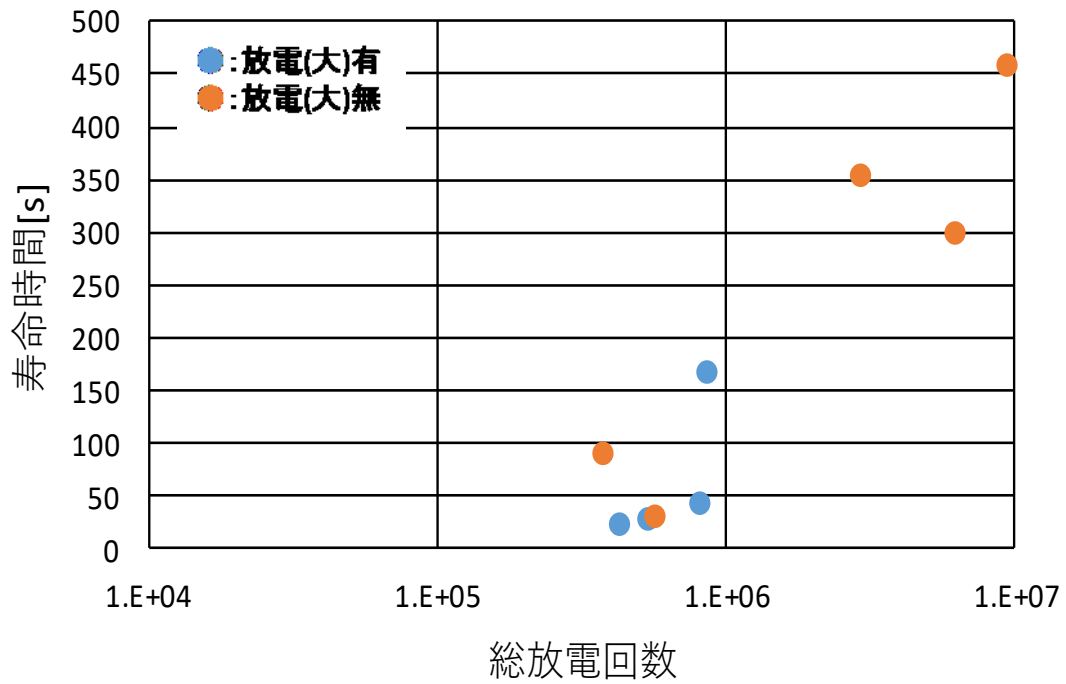


図 5-6. 総放電回数対寿命時間

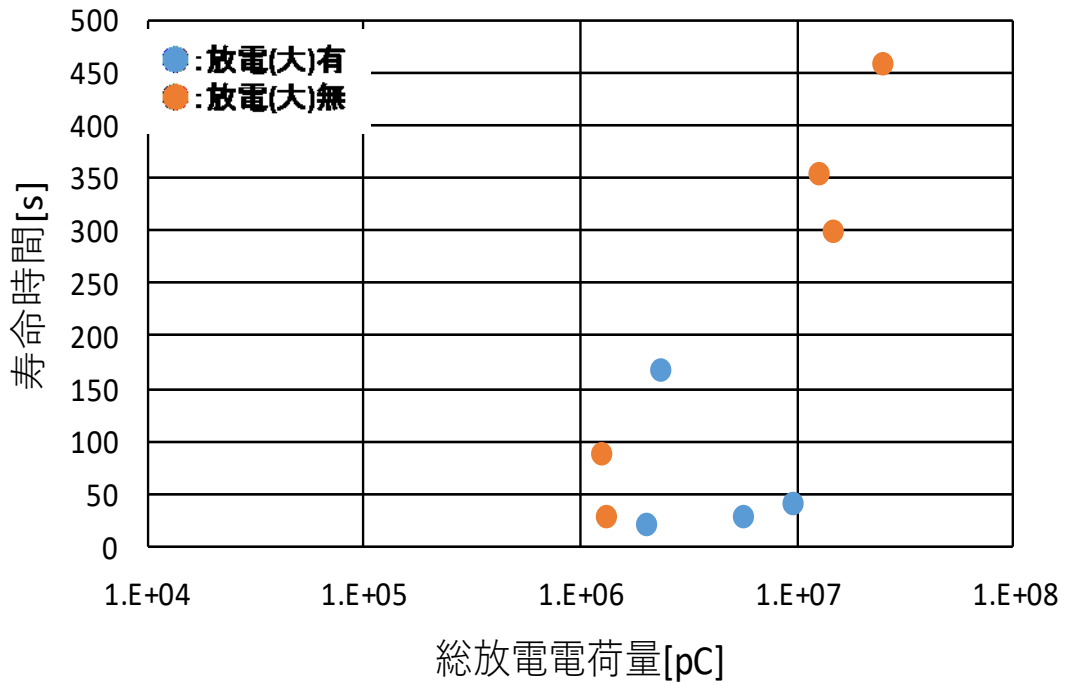


図 5-7. 総放電電荷量対寿命時間

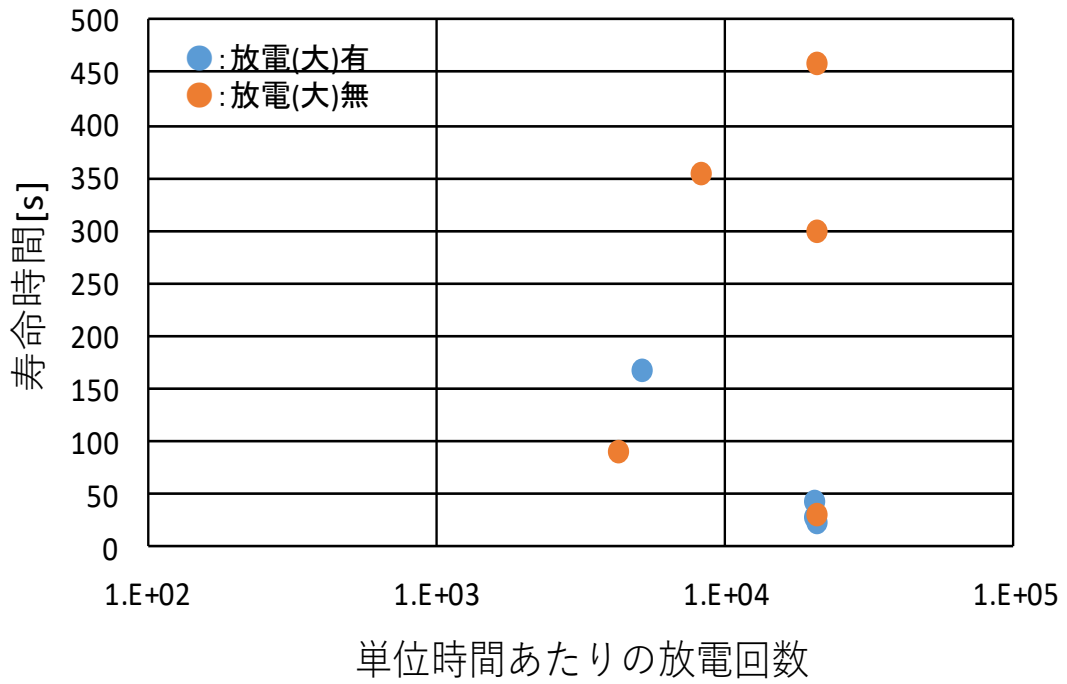


図 5-8. 単位時間あたりの放電回数対寿命時間

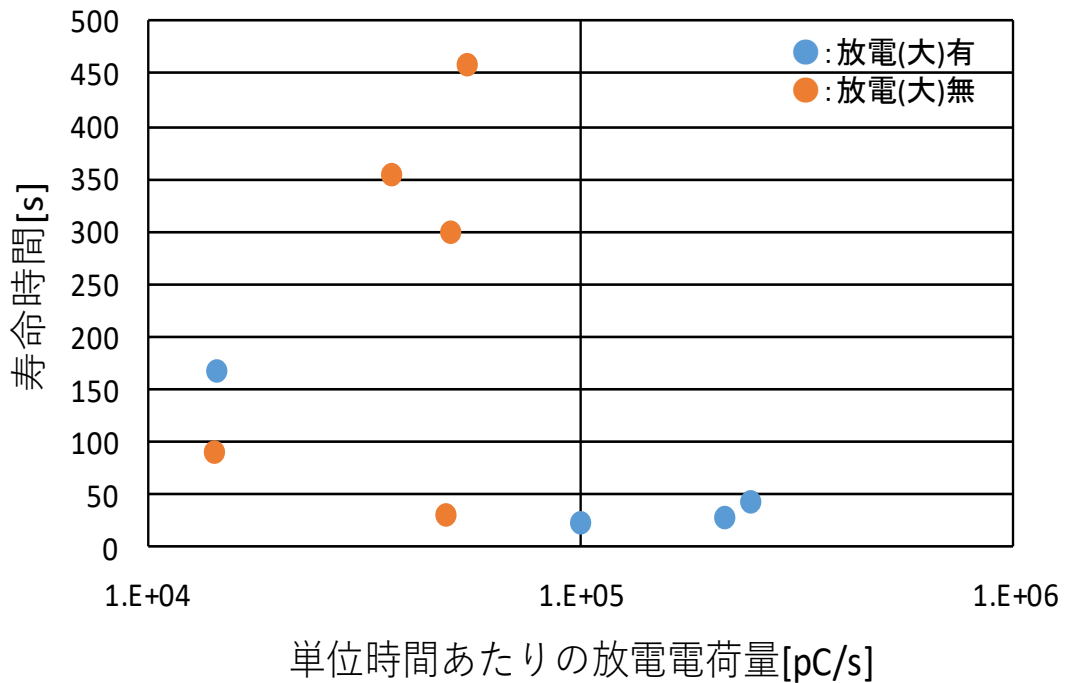


図 5-9. 単位時間当たりの放電電荷量対寿命時間

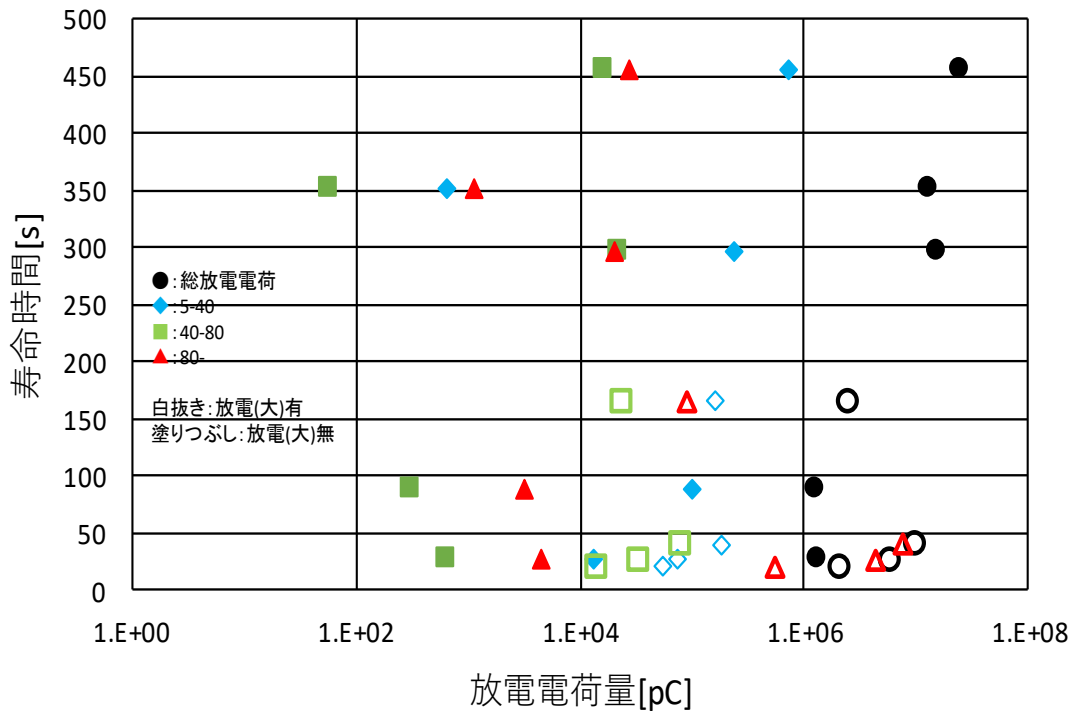


図 5-10. 放電電荷量対寿命時間(放電量分け)

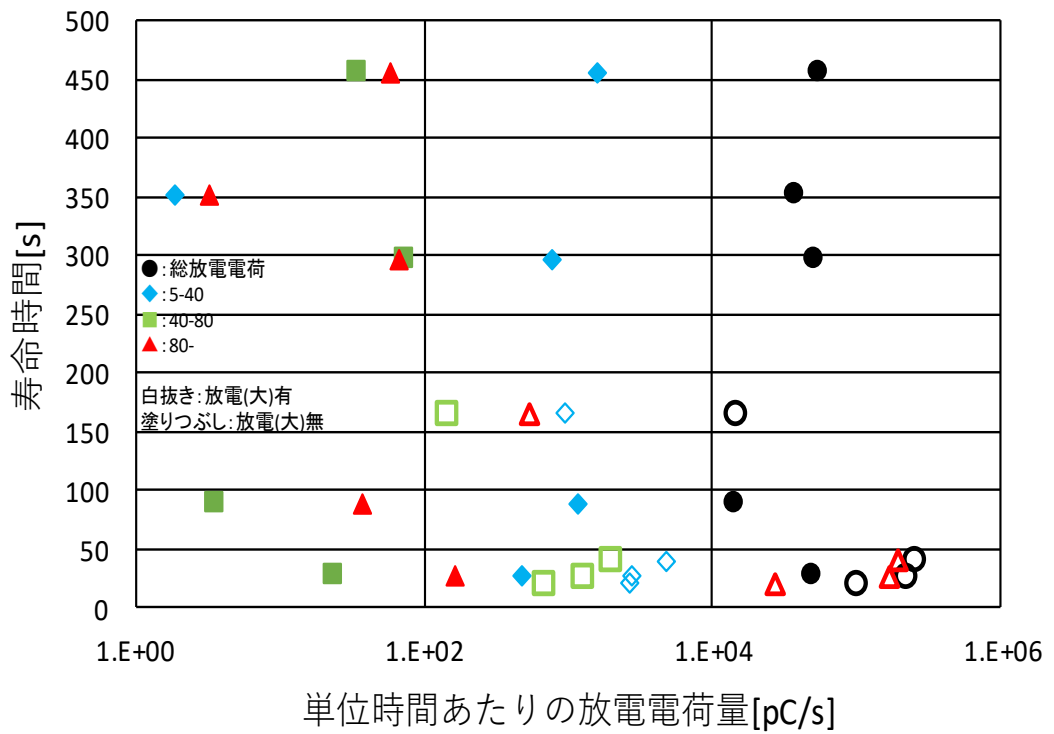


図 5-11. 単位時間あたりの放電電荷量対寿命時間(放電量分け)



図 5-6 より総放電回数が多いほど寿命が長い傾向がある。これは先行研究とも一致している。放電電荷量においては電荷量毎に分けると図 5-11 より度の放電電荷量も全体的に電荷量が小さい試料ほど寿命が長い傾向がある。また短命の試料ほど 80[pC]以上の放電が多く、寿命に特に影響していると考えられる。

#### 5.4 極座標表示

図 5-12 は計測試料の放電電荷量の経時変化を示す。この試料では昇圧中の 11.5[kV]で部分放電が連続的に生じる様になり、昇圧中の放電の大きさは僅かに大きくなったものの大きな変化をせず、ほぼ 17.5[kV]に達した時刻で大きな放電が生じた。その後大きな放電は時間の経過とともに 30 数[pC]程度まで小さくなり、29 秒(一定の課電電圧になってから 12 秒)で突然大きな放電が生じた直後に絶縁破壊に至った。図 5-13 は  $14 \leq t < 20$  秒間の各位相での最大放電電荷の積算の放電分布を示している。ただし、ノイズと見られる 5[pC]以下のデータは削除したものである。この様な放電分布の表示方法はよく行われており放電の状況の検討に使われている。

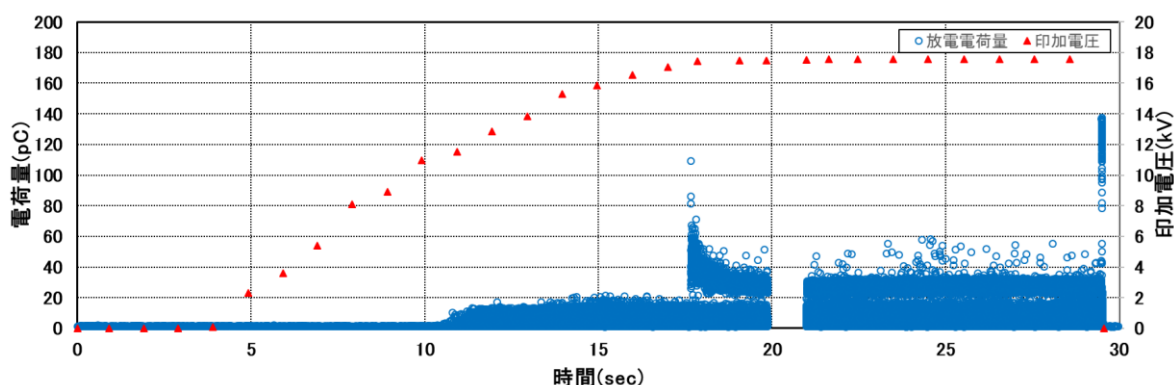


図 5-12：放電電荷量の経時変化

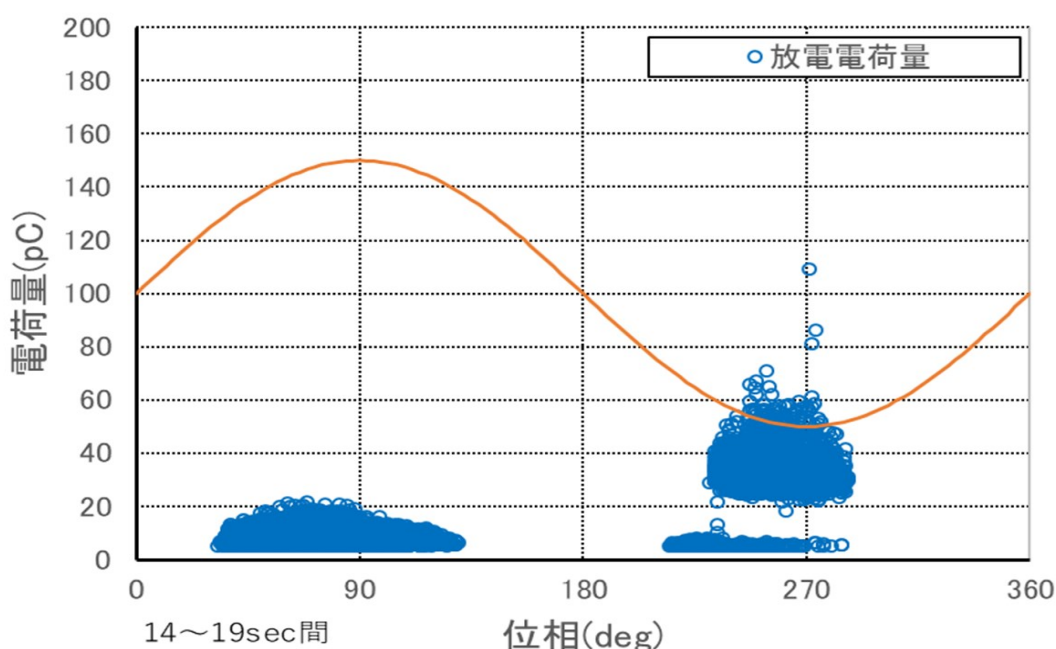
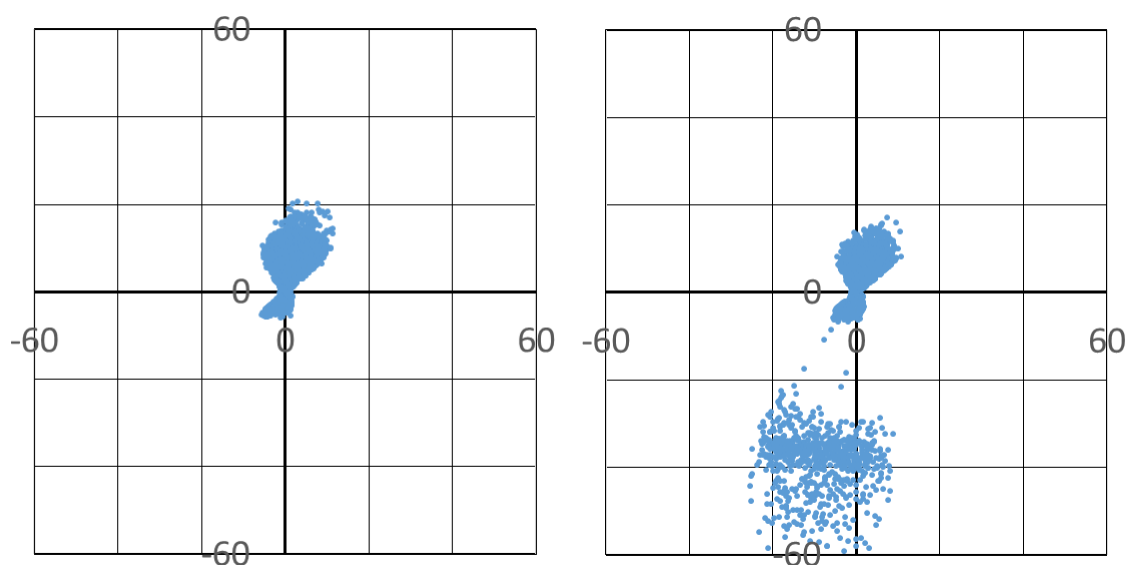


図 5-13：各位相ごとの電荷量積算

しかしながら、この表示方法は電圧の極性に対する対称性の視認性が良くないので、放電位相を  $\phi$  とし  $q\cos\phi$  を X 座標、 $q\sin\phi$  を Y 座標とし、極座標表示の形式を用いた放電のパターンの変化から放電の状況について検討する。

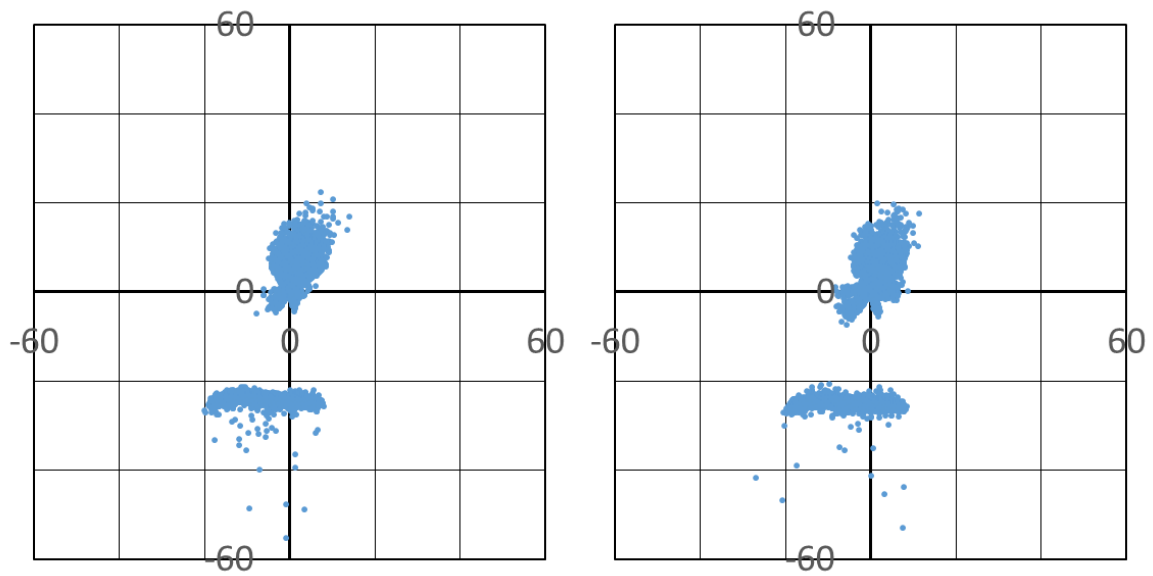
図 5-14(a)～(f)はそれぞれ  $14 \leq t < 17$  秒、 $17 \leq t < 18$  秒、 $23 \leq t < 24$  秒、 $25 \leq t < 26$  秒、 $28 \leq t < 29$  秒、29 秒 29 サイクル目の放電電荷の重畳図の極座標表示で示す。(a)に示すように昇圧途中の 17 秒までは、全体として放電は 20[pC]までの小さな放電で、正極性の放電の方が大きく、負極性では 10[pC]までの放電が生じた。(b)に示すように 17 秒過ぎに 20[pC]を超える負極性の大きな放電が生じたが、その後(c)に示すように大きな放電は 24 秒頃まで次第に小さくなった。また、20[pC]より小さい放電に特段の変化は見られなかった。(c)に示すように 23 秒を過ぎると第 1・3 象限で生じていた小さな放電の発生位相がそれぞれ  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  にまで広がると、(d)に示すように第 1・4 象限、第 2・3 象限の境界での放電が次第に 26 秒頃まで増加した。また、(e)に示すように第 1・3 象限での放電が次第に大きくなり、(f)に示すように 29 秒台の 29 サイクル目で突然第 2 象限全体に広がる 120～140[pC]程度の大きな放電が生じた。同時に、その 1 サイクル前まで生じていた負のピーク付近で 20～30[pC]の放電がなくなり、その直後に絶縁破壊した。

図 5-14 において、(a)は第一・二象限で起こる放電と第三・四に起こる放電の二種類あると考えられる。(b)では第三・四象限にて大きな放電が新たに発生していることが確認できる。(c)～(e)では、(b)で見られた 20～70[pC]程度の大きさ放電が 20～30[pC]に群小化したと考えられる放電の塊がみられる。以上のように極座標表示では放電の様相の把握がしやすくなったと考えられ、破壊に至る過程の把握に有用と考えられる。



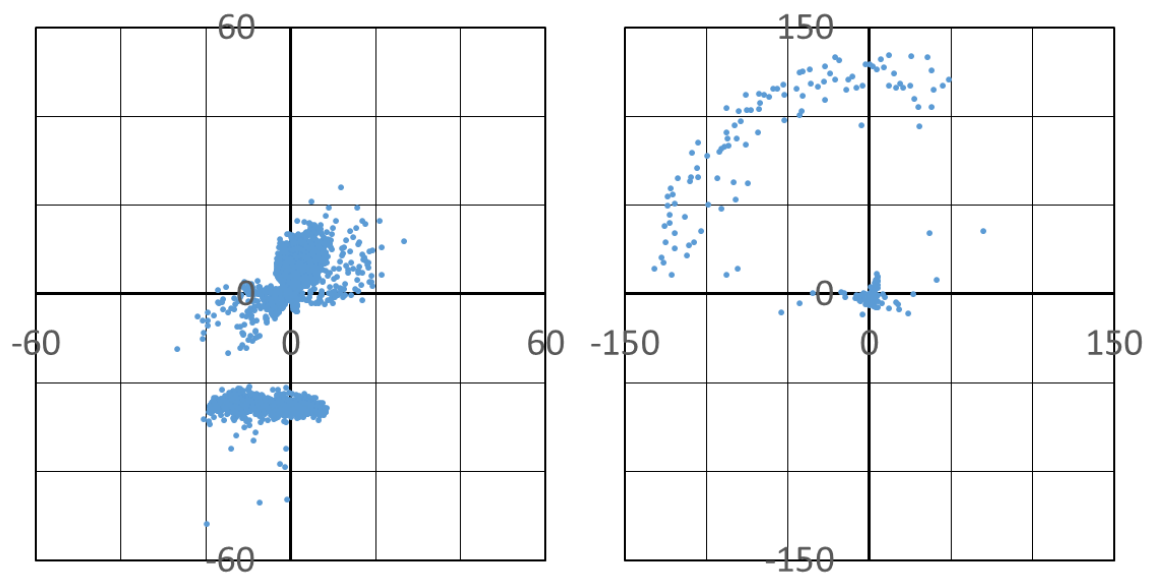
(a)  $14 \leq t < 17$  秒

(b)  $17 \leq t < 18$  秒



(c)  $23 \leq t < 24$  秒

(d)  $25 \leq t < 26$  秒



(e)  $28 \leq t < 29$  秒

(f) 29 秒 29 サイクル目

図 5-14 : 各位相ごとの放電電荷量(極座標表示)

## 5.5 放電解析まとめ

エクセルマクロを用いて、V-t 試験結果の放電解析及び放電電荷量の観点から検討を行った。結果のまとめをいかに示す。

1. 寿命に至るまでの部分放電特性は次の様に分類分けできる。
  - (a) V-t 放電(大)有  
部分放電開始当初から放電電荷量が 80[pC]を超える放電が生じ、寿命を迎える試料
  - (b) V-t 放電(大)無  
散発的に放電は生じるものの大きな放電は持続せず、寿命を迎える試料
2. 大きな放電を伴うか否かにかかわらず、破壊の直前には時間とともに放電電荷量が大きくなるという前駆現象が起きている。試料により前駆現象の起こっている時間・電荷量の大きくなる程度は違うがこの現象に至るまでの要因がわかれば破壊推定ができると考えられる。
3. 部分放電電荷量の絶縁破壊への影響を調べるため、V-t 試験中に部分放電電荷量を測定した。
  - (a) 放電回数に関して、寿命時間が長い試料は総放電回数が多く、単位時間当たりの放電回数は少ない傾向を示した。
  - (b) 放電電荷量に関して、寿命時間が長い試料は総放電電荷量が多く、単位時間当たりの放電電荷量が少ない傾向を示した。
  - (c) 5-40[pC]、40-80[pC]、80[pC]以上の3つに区分けした放電電荷量に関して、80[pC]以上の大きな放電電荷量は寿命の長い試料ほど少ないことを示した。
4. 極座標表示では放電の様相の把握がしやすくなったと考えられ、破壊に至る過程の把握に有用と考えられる。

## 第6章 一体型 V-t 試験試料の熱機械分析評価

4章で用いた試料に関して、熱機械分析機(TMA)を用いてガラス転移点(Tg)と熱膨張率の観点から検討を行った。以下に詳細を報告する。

### 6.1. 熱機械分析

本章では熱機械分析機を用いて試験試料のガラス転移点(Tg)、熱膨張率を測定し、材料特性とPD・Vt試験結果との関係を調査した。その詳細を以下に報告する。

これまで内部ひずみが原因でTg付近の温度で昇温による試料の伸びに影響が生じていた。図6-1-1、6-1-2に時間対膨張率のグラフを示す。室温→200℃→室温→200℃と2回連続で昇温した場合の1回目の昇温(黒)と2回目の昇温(青)を色分けしたものである。1回目の昇温ではグラフのTg部分に内部ひずみ(グラフのTg付近の平坦な部分)が生じていたが、2回目の昇温では内部ひずみが解消されている。この結果から、これまで測定したものを、本測定の直前に予備昇温する方法で再測定した。

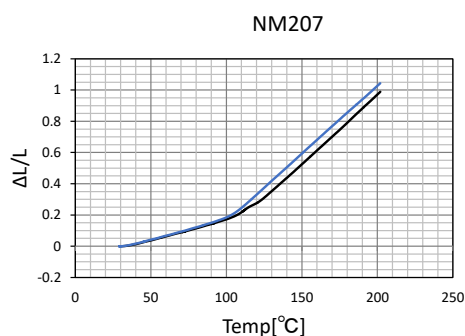


図 6-1-1 : 時間対膨張率

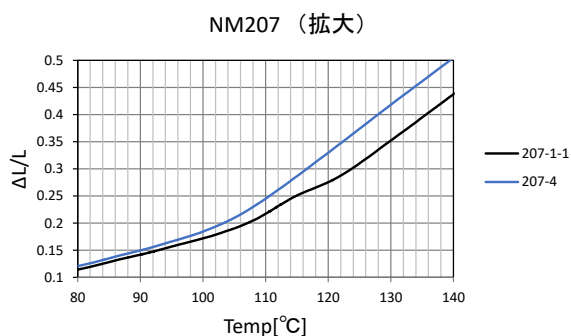


図 6-1-2 : 時間対膨張率 (拡大)

## 6. 2 熱機械分析条件

図 6-2-1 に TMA (TMA-60 : 島津製作所) の概略図を示す。またその原理図を図 6-2-2 に示す。加熱炉で試料を加熱することで試料が膨張する。その膨張量をプローブで検出部に伝え、検出部で移動量を検出することで、熱膨張量を測定することが出来る装置である。まず室温から上限温度 130℃まで 3℃/分の昇温速度で TMA 測定をし、測定後は約 30 分かけて室温まで冷却した。その後、室温から上限温度 200℃まで 3℃/分の昇温速度で TMA 測定をし、測定後は約 40 分かけて室温まで冷却した。2 回目の昇温時の結果から Tg 等のデータを取得した。ここで、加重は常に-50.0g とした。



図 6-2-1 : TMA 分析機

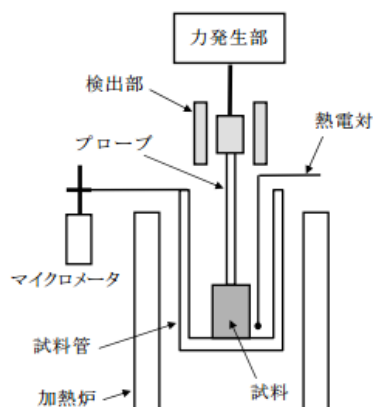


図 6-2-2 : TMA 原理図

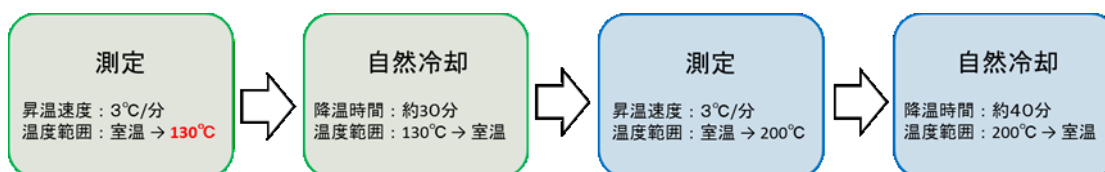


図 6-3 : 測定概要

使用したサンプルを図 6-4 に示す。サンプルは横 4mm、縦 4mm、高さ 15mm の直方体で、一体型 V-t 試験試料から切り出したものとなる。

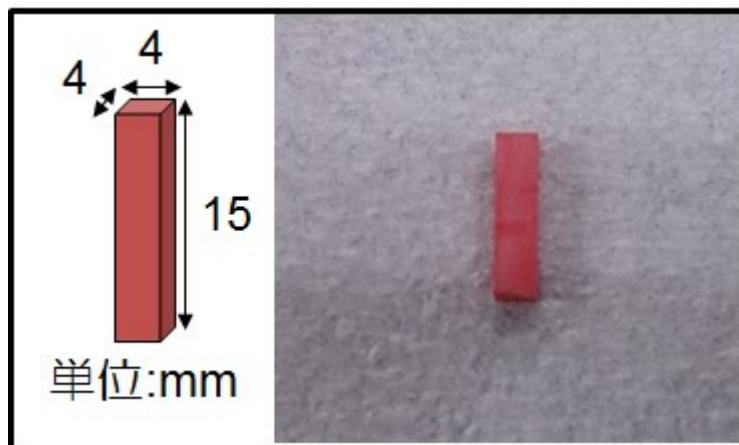


図 6-4 : 測定サンプル概略図

### 6.3 測定結果

先行研究の Tg-PDIV グラフを図 6-5 に示す。図 6-5 から、以前の傾向 (Tg が低いと PDIV も低い) が変わらないことがわかった。また、Tg にも試料ロットによるばらつきが生じていることがわかる。ロットごとに最小二乗法を用いて近似曲線を求め、図 6-6 に示す。またその時のパラメータを表 6-1 に示す。最小二乗法を用いた Tg-PDIV 特性から、2013-4 ロットと 2015-12 ロットが似た傾向となっている。この 2 つの試料群は様々な試料作成方法や試料作成時の環境要因が含まれており、Tg と PDIV の間の関係には作成方法や作成方法は大きく影響しておらず、試料ロットが大きく影響していると考えられる。

同様に Tg - PDEV の関係を図 6-7 に示す。PDIV $\geq$ PDEV なので、Tg-PDEV は Tg-PDIV とほぼ同じ傾向となった。

また、ガラス状態とゴム状態での膨張率を図 6-8 に示す。橙色の点がガラス状態、青色の点がゴム状態での膨張率である。図 6-8 から、膨張率はこれまでと同様に傾向やばらつきは見られなかった。

今回報告分は Tg 対 PDIV、LifeTime で人依存性を加味したグラフを図 6-9, 10 に V-t 測定方法の違いを加味したグラフを図 6-11, 12 に示す。人依存はある程度出たが基本的な傾向は今までと同じであった。V-t 測定回路の違いは Tg 対 PDIV で大きくでた。これは 1F 測定回路において、手動昇圧かつ PDIV 評価の目視によるノイズ削除が理由であると考えられる。

表 6-1 : 先行研究測定結果詳細

試料No.	保管方法	epoxyロット	作成方法	混練方法	二次硬化[°C]	PDIV[kV]	PDEV[kV]	BDV[kV]	BD t [min]	temp[°C]	湿度[%]	熱膨張率 [× 10 <sup>-6</sup> /K]		
												Tg[°C]	ガラス状態	ゴム状態
NM106	通常	2013-4	金型分解	手	120	3.32	3.13	13.5	0	26.9	61	99.66	28.27	85.1
NM107						7.5	6.6	9.5	0	26.9	61	102.86	28.37	84.54
NM109						3.4	2.8	17.5	0.0333	25.8	73	98.83	25.32	78.25
NM111						11.7	9.3	14.7	0	25.8	73	104.22	31.98	85.73
NM116						7.7	6.3	17.5	0.5	24.9	74	102.02	26.17	86.91
NM119						5.6	4.5	17.5	3.33	24.2	62	101.08	27.55	83.33
NM121						15.4	15.2	16.8	0	24.1	74	106.96	25.69	80.21
NM134						14.8	13.8	17.5	132.45	24.8	63	103.5	26.52	78.61
NM138						17.1	16.7	17.5	9.87	24	48	107.62	27.19	84.91
NM154						11.2	9.8	17.5	0.55	23.2	22	105.73	24.83	78.44
NM156						11.2	8.3	17.5	0.05	24.2	18	105.62	27.59	80.87
NM173						17.9		17.9	0	21	28.6	105.84	27.86	81.99
NM185						15.2	13.2	20.7	0			105.12	28.67	87.42
NM196						10.7	10.5	17.5	37.4	21	65	104.49	29.54	85.61
NM201						3.61	3.92	17.5	17.4	21.1	70	102.36	28.25	84.46
NM207	16.6	17.8	18.1	0	20.3	63	108.72	27.57	87.22					
NM220	20.7	19.1	17.5	180	21	65	109.99	26.34	81.64					
NM234	14.7	14	20	3.27	20.2	50	107.55	26.02	81.56					
NM235	8.27	5.13	13.5	0.01	19.7	60	104.95	29.13	84.97					
NM263	11.7	11.7	17.5	0.167	20.4	30	104.03	24.25	80.15					
NM270	14.5	13.7	15	0	19.6	22	108.66	27.64	83.2					
NM279	23.9	24.1	24.9	0.01	22.1	66	109.73	26.88	83.21					
NM287	7.25		10	0.05	21.9	68	101.27	28.19	80.99					



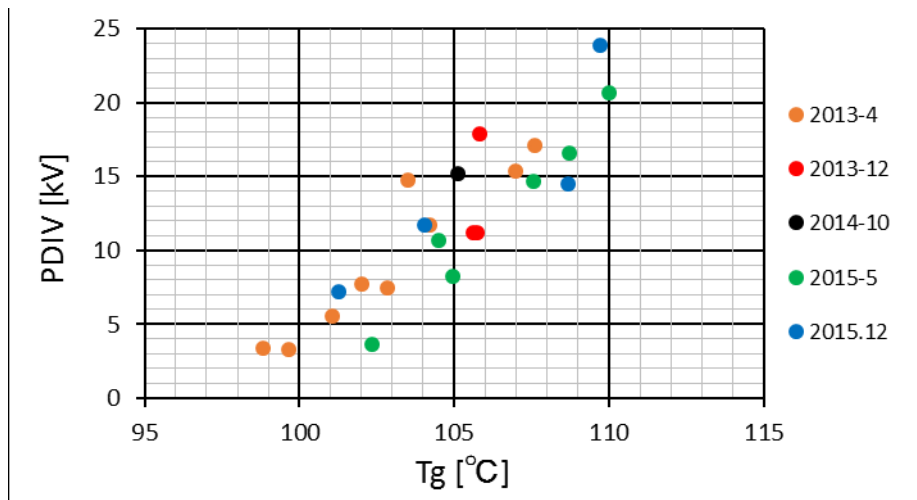
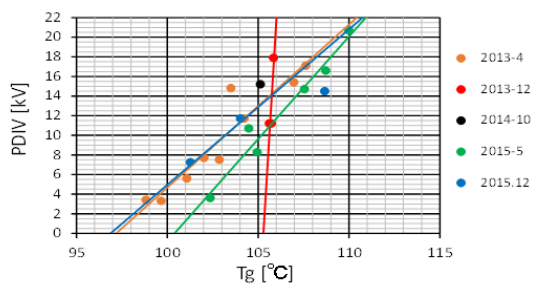


図 6-5 : Tg - PDIV (ロット別)

橙 : 2015-12 ロット、赤 : 2013-12 ロット

青 : 2014-10 ロット、緑 : 2015-5 ロット

表 6-2 : 図 6-6 の近似曲線の傾き



	傾き	サンプル数
● 2013-4	1.66	9
● 2013-12	30.45	3
● 2015-5	2.09	6
● 2015-12	1.58	4

図 6-6 : 最小二乗法を用いた

Tg - PDIV 特性

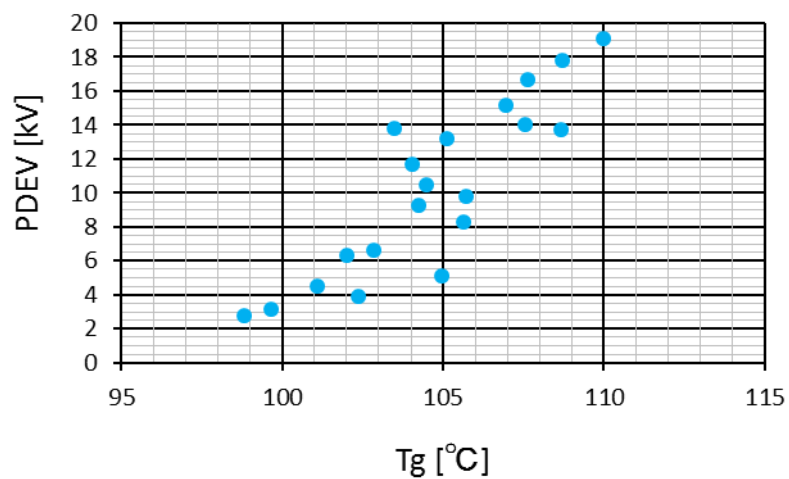


図 6-7 : Tg - PDEV

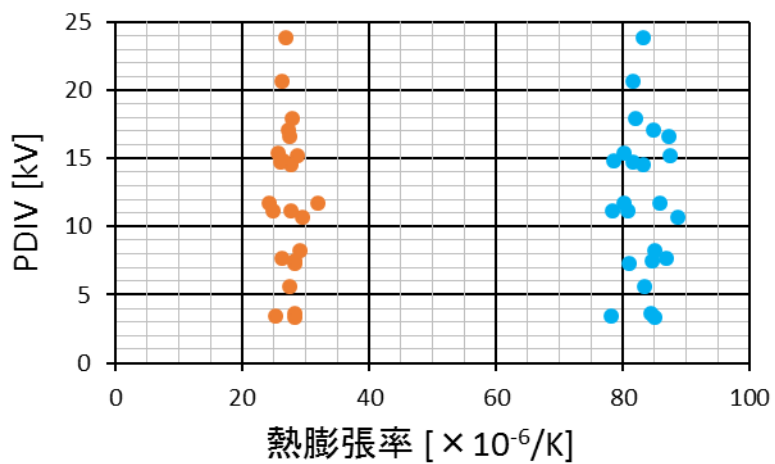


図 6-8 : 膨張率 - PDIV

( 橙 : ガラス状態    青 : ゴム状態 )

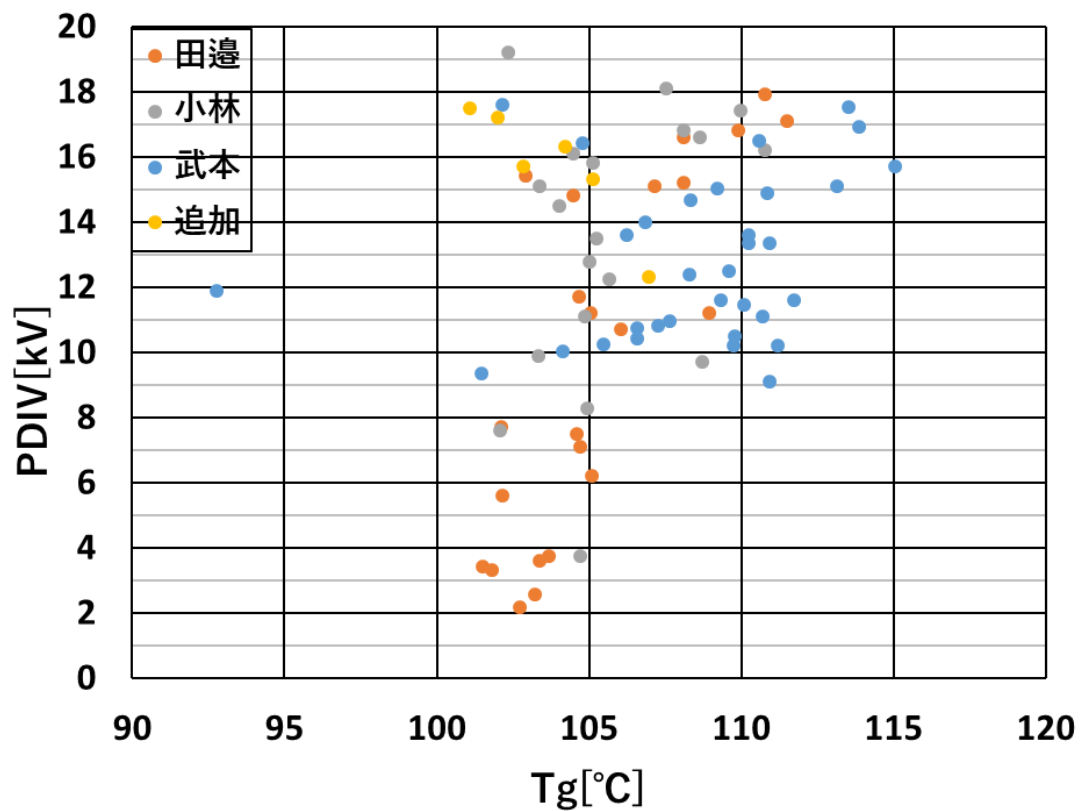


図 6-9 :  $T_g$  - PDI V (人依存別)

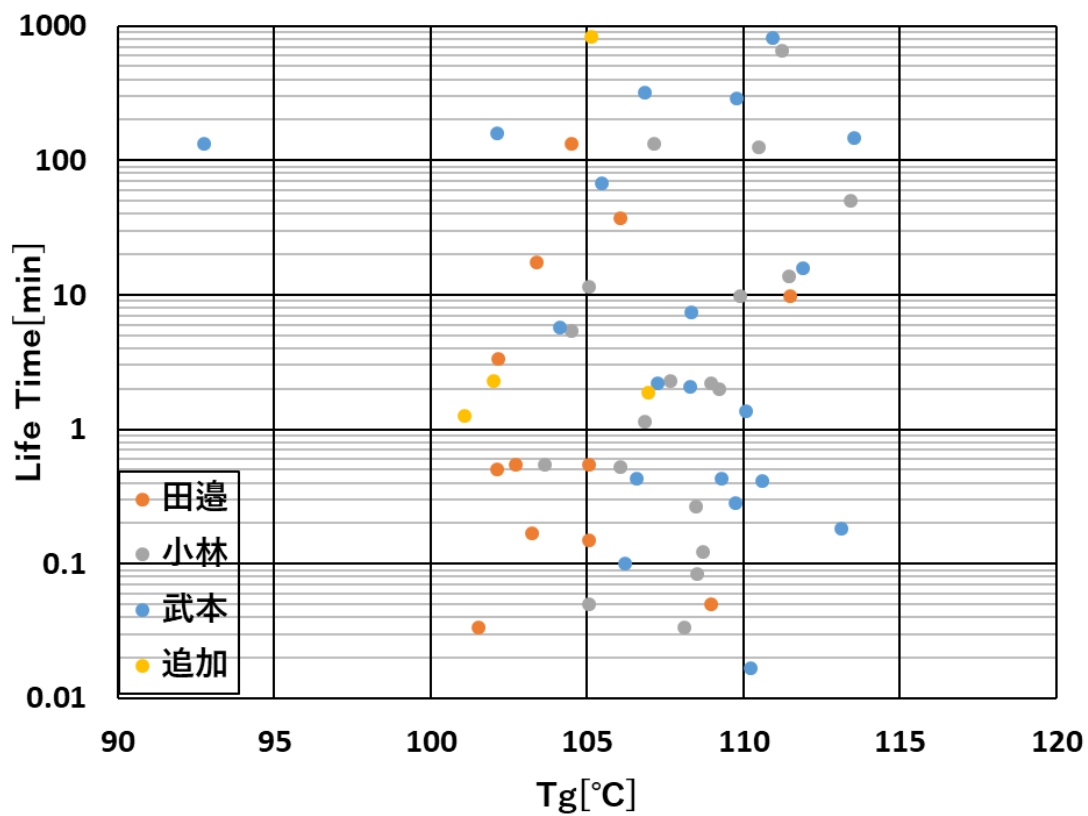


図 6-10 :  $T_g$  - LifeTime (人依存別)

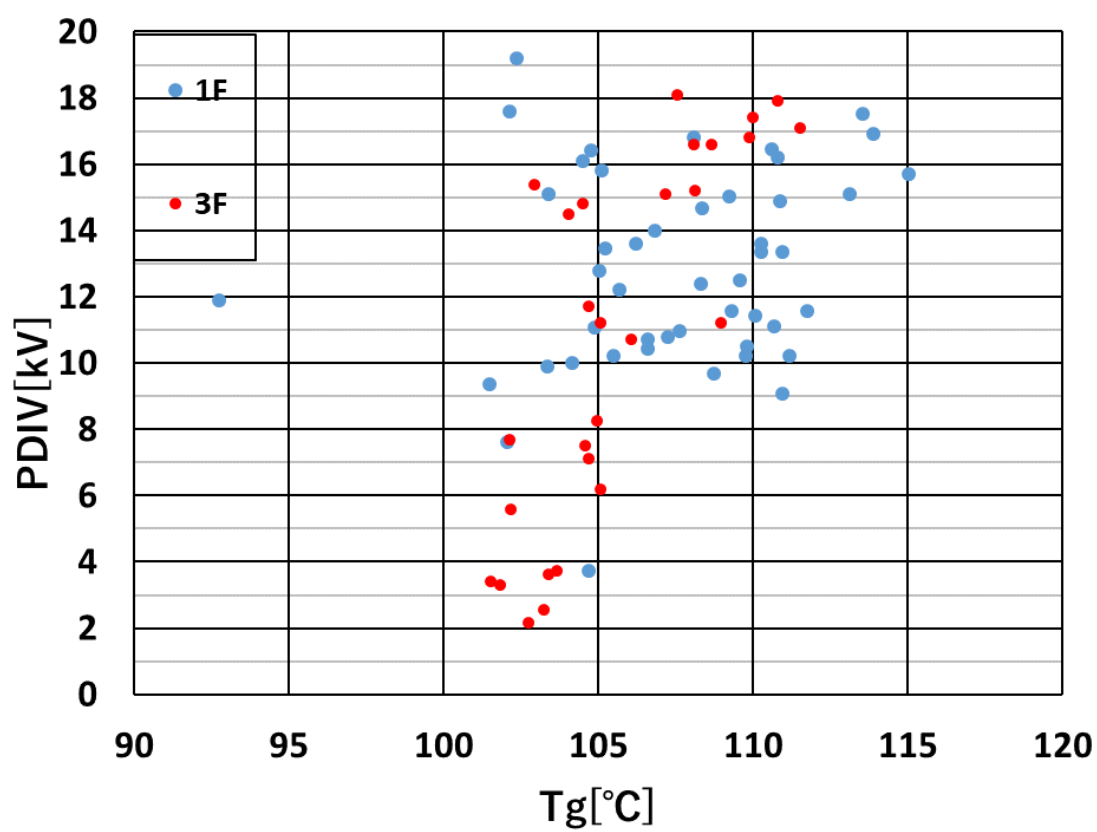


图 6-11 :  $T_g$  - PDIV (測定回路別)

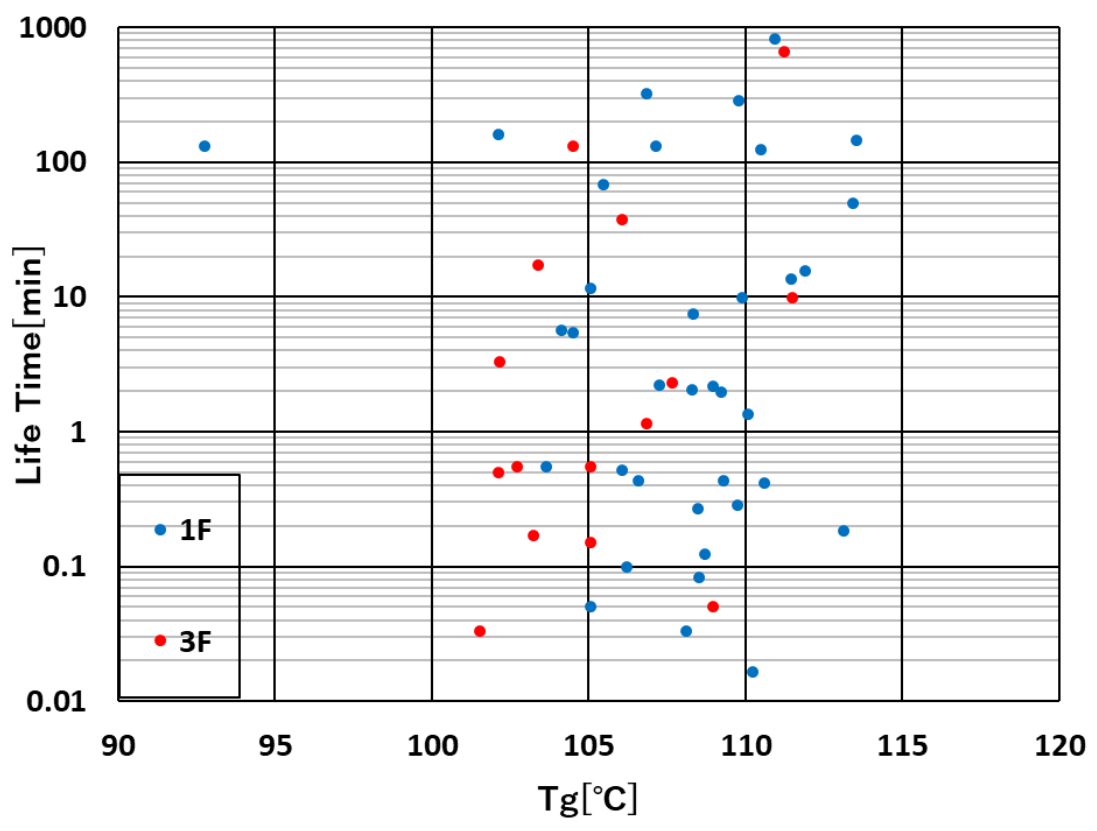


图 6-12 :  $T_g$  - LifeTime (測定回路別)

## 6.4 熱機械分析 考察

ここまでの熱機械分析の結果、『Tg が低いと PDIV が低い』、『ガラス状態・ゴム状態での膨張率に差はない』ということ先行研究の結果をより強める傾向がわかった。人依存に関しては試料作成者によりばらつき方が変わったが概ね過去からの傾向が見られる範疇におさまっている。

## 6.5 熱機械分析まとめ

熱機械分析機(TMA)を用いて、4 章での測定結果をガラス転移点(Tg)と熱膨張率の観点から検討を行った。結果のまとめを以下に記す。

1. Tg 付近の温度での内部ひずみによる影響を避けるため、上限温度を変えてセカンドスキャンした結果を測定結果とした。
2. Tg のばらつきにも PDIV と同様にエポキシ樹脂・硬化剤のロット、湿度が大きく影響していることがわかった。
3. ガラス状態、熱状態での膨張率に差は見られなかった
4. ①Tg が低いと PDIV が低いこと、②ガラス状態・ゴム状態での熱膨張率に差は見られないこと、の 2 点から、Tg が低い（高分子の架橋密度が低い）と温度下降時の収縮が大きくなり、剥離が起きやすくなることで PD の低下や寿命時間の減少につながることを考えられた。
5. 人依存はある程度出たが基本的な傾向は今までと同じであった。
6. V-t 測定回路の違いは Tg 対 PDIV で大きくでた。これは 1F 測定回路において、手動昇圧かつ PDIV 評価の目視によるノイズ削除が理由であると考えられる。

以上のことから、固体絶縁樹脂の状態の差が、部分放電開始電圧や寿命時間に影響を及ぼす。ここまでに、『部分放電が寿命に与える影響の解明』を目的とし、単純化した電極系モデルを用いて部分放電試験、絶縁破壊試験を行うことにより、微小空間における部分放電現象や絶縁破壊、寿命時間の調査を行った。また、エポキシ樹脂の寿命には放電に関する様々な要因が影響しており、放電に関する要因には何が影響しているのかを調べるための 1 つとして、TMA 測定を実施した。

## 第7章 総括

第1章では、序論として背景と、固体絶縁機器における機器寿命に対する部分放電の重要性を述べ、本研究の目的と本論文の概略を述べた。

第2章では、放電現象の基礎理論と、放電から破壊までの流れの理論を追った。

第3章では、実験に使用した回路やそれに付随する使用機器の紹介を行った。また本試験に用いた一体型試料について述べた。

第4章では、本研究の目的である、部分放電が固体絶縁体に与える影響の調査のために一体型 V-t 試験試料を使用して各種試験を行った。以下に結果を要約する。

1. 部分放電電圧測定の結果、PDIV はばらつきが多かったが、試料ロットや季節要因とやや関係性があり、特に湿度に関しては試料作成時の湿度が高いと PDIV のばらつきが大きくなることがわかった。
2. 剝離に関して、冷却時間を1から12時間程度の差では明確な差異が現れなかった。
3. V-t 試験に関して、同一の条件の下、試料の作製を行っていたが、結果に大きなばらつきが生じ、傾向がつかめなかった。

第5章では、V-t 試験結果に放電解析を行った。以下に結果を要約する。

5. 寿命に至るまでの部分放電特性は次の様に分類分けできる。

(a) V-t 放電(大)有

部分放電開始当初から放電電荷量が 80[pC]を超える放電が生じ、寿命を迎える試料

(b) V-t 放電(大)無

散発的に放電は生じるものの大きな放電は持続せず、寿命を迎える試料

6. 大きな放電を伴うか否かにかかわらず、破壊の直前には時間とともに放電電荷量が大きくなるという前駆現象が起きている。試料により前駆現象の起きている時間・電荷量の大きくなる程度は違うがこの現象に至るまでの要因がわかれば破壊推定ができると考えられる。
7. 部分放電電荷量の絶縁破壊への影響を調べるため、V-t 試験中に部分放電電荷量を測定した。
  - (a) 放電回数に関して、寿命時間が長い試料は総放電回数が多く、単位時間当たりの放電回数は少ない傾向を示した。
  - (b) 放電電荷量に関して、寿命時間が長い試料は総放電電荷量が多く、単位時間当たりの放電電荷量が少ない傾向を示した。
  - (c) 5-40[pC]、40-80[pC]、80[pC]以上の3つに区分けした放電電荷量に関して、80[pC]以上の大きな放電電荷量は寿命の長い試料ほど少ないことを示した。

第6章では、TMAによる熱機械分析を行い、ガラス転移点(Tg)と熱膨張率の観点から検討を行った。以下にその結果を記す。

1. TgのばらつきにもPDIVと同様にエポキシ樹脂・硬化剤のロット、湿度が大きく影響していることがわかった。

2. 人依存はある程度出たが基本的な傾向は今までと同じであった。V-t 測定回路の違いは Tg 対 PDIV で大きくでた。これは 1F 測定回路において、手動昇圧かつ PDIV 評価の目視によるノイズ削除が理由であると考えられる。

以上のことから、部分放電の大きさ、発生の仕方が試料の寿命に大きく影響しており、架橋のような試料の状態の差が部分放電開始電圧や寿命時間に影響を及ぼしていることが確認できた。

## 謝辞

本論文の作成にあたり、指導と討論などに非常に多くの貴重な時間を割いていただき、また日常の生活においても多くの助言をいただいた、三重大学工学部 飯田 和生 教授に深く感謝いたします。数々の有益な御助言や、討論における取りまとめをしてくださった三重大学地域イノベーション学研究科 梅村 時博 教授には心から感謝いたします。本論文で用いた実験回路、測定プログラムについて、お忙しい中大変尽力してくださった、研究を進める上で適切な助言をいただき、質問に対して親身に返答していただいた東芝産業機器システム(株) 東山 雅一 氏、前田 照彦 氏、尾崎 多文 氏、中前 哲夫 氏、(株)東芝 中村 勇介 氏、廣瀬 達也 氏、九州工業大学工学部 匹田 政幸 教授、小迫 政裕 准教授に感謝いたします。また日ごろから研究の指導や、助言をしてくださった三重大学工学研究科 田邊 早紀 先輩に深く感謝いたします。協力し合い一緒に研究を進めてきた研究室の仲間に変感謝しております。最後になりましたが、影ながら支えてくださり修士課程まで進学させてくださった両親に深く謝意を申し上げます。



## 参考文献

- (1) 「高分子絶縁材料の絶縁破壊現象」、電気学会技術報告（Ⅱ）第304（1989）
- (2) 小崎正光編著：「高電圧・絶縁工学」、オーム社（1997）
- (3) 関西電気保安協会（2014）：「電気の通り道 発電所から自宅まで」、  
<[www.ksdh.or.jp/information/line.html](http://www.ksdh.or.jp/information/line.html)>（参照 2016-12-9）
- (4) 武藤三郎：「電力用機器」、森北出版、第1刷、p 110（1973）
- (5) 岩本光正：「有機絶縁材料の最先端」、シーエムシー出版、第1刷、p 209（2007）
- (6) 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）
- (7) 武田進：「気体放電の基礎 改訂版」、東京電機大学出版局、第3版、p. 49（1990）
- (8) 電気学会編集：「放電ハンドブック」、オーム社、再版4刷（1982）
- (9) 電気学会編集：「放電ハンドブック 上巻」、オーム社、初版（1990）
- (10) 電気学会編集：「放電ハンドブック 下巻」、オーム社、初版（1990）
- (11) IEC：“Partial Discharge Measurements”，IEC Pub. 270（1963）
- (12) 日高邦彦：「高電圧工学」、数理工学者（2009）
- (13) 西澤仁：「難燃化技術」、工業調査会（2003）
- (14) 垣内弘：「新エポキシ樹脂」、昭晃堂、初版（1985）
- (15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「4,4'-イソプロピリデンジフェノールと1-クロロ-2,3-エポキシプロパンの重縮合物（液状のものに限る。）（別名ビスフェノール A 型エポキシ樹脂（液状のものに限る。）） Polymer of 4,4'-isopropylidenediphenol and 1-chloro-2,3-epoxypropane (liquid) 化学物質排出把握管理促進法政令号番号：1-30 CAS 登録番号：25068-38-6」、財団法人 化学物質評価研究機構・独立行政法人 製品評価技術基盤機構、Ver. 1.0 No. 99
- (16) 財団法人化学物質評価研究機構 安全性評価技術研究所：「CERI 有害性評価書 テトラヒドロ無水フタル酸 CAS 登録番号：11070-44-3」、同編集（2006）
- (17) Yasuhiro NISHIKAWA, Kazuya OKUBO and Toru FUJII, “Effect of Moisture Absorption at Fabrication Stage on Static and Fatigue Properties for Plain-Woven CF/Epoxy Composites”, Department of Mechanical and Systems Engineering, Doshisha University
- (18) 上羽正堯：「モールド絶縁の寿命に対する部分放電の影響」（2015）
- (19) 田邊早紀：「エポキシ樹脂の材料特性が部分放電特性に及ぼす影響」（2017）
- (20) H. Nakanishi：「エポキシ注型絶縁物の交流耐電圧特性」、三菱電機技報 54(3)、pp. 187-191（1980）
- (21) 青柳浩邦：「エポキシ注型品の実用状態における長時間 V-t 特性」、絶縁材料研究会資料、EIM-77-14
- (22) 太田司：「トリー劣化の抑制に関する研究」（2015）