

屋内変電設備用注型絶縁物の劣化度判定を 目的とした現地計測技術の開発

(On-site Degradation Diagnosis of Cast Resin Insulators for Distribution Power Equipment)

芝浦工業大学大学院 理工学研究科
地域環境システム専攻

華表 宏隆

概要

本論文では、屋内変電設備の故障リスク低減を目的に、注型絶縁物の新たな現地劣化評価技術を開発した。注型絶縁物は熱劣化、部分放電劣化、汚損劣化により故障に至る危険性があるが、これらの劣化進展度を据付け状態で評価することは困難であった。熱劣化評価では、熱劣化原因が樹脂表面層の酸化劣化であることを明らかにして、光反射率を用いた熱劣化度の非破壊評価手法を開発した。部分放電劣化評価では、部分放電に伴う電流波形が固有の周波数帯と減衰振動回数を有する減衰余弦波形になることを明らかにして、デジタル信号処理を用いて部分放電信号と外乱ノイズ信号を弁別する手法を開発した。汚損劣化評価では、汚損沿面の部分放電電圧が汚損状態と雰囲気湿度に依存することを明らかにして、高湿度の表面抵抗を現地測定する装置と表面抵抗から部分放電電圧を推定する手法を開発した。本研究成果により、経年注型絶縁物の各種劣化状態を定期監視することを可能にし、設備ユーザが保全予算に合わせて故障リスク低減策（設備更新やメンテナンス）の対象と時期を最適化する一助とした。

In order to reduce the failure risk of distribution power equipment, new on-site degradation diagnostic technique for cast resin insulators has been developed. The cast resin insulators have a risk of failure due to thermal degradation, partial discharge degradation and pollution degradation, but it was difficult to diagnose the degradation progress degree in the installed state. In the thermal degradation diagnosis, the cause of thermal degradation is the oxidation degradation of the resin surface layer and a non-destructive diagnosis method of thermal degradation degree using light reflectance measuring device has been developed. In the partial discharge degradation diagnosis, the current waveform accompanying the partial discharge becomes an attenuated cosine waveform having unique frequency and decay times of damped oscillation and digital signal processing method to distinguish the partial discharge signal from the disturbance noise signal has been developed. In the pollution degradation diagnosis, partial discharge voltage of pollution surface decreases with increase in pollution degree and humidity and apparatus for on-site measuring surface resistance under high humidity and method of estimating partial discharge voltage from surface resistance has been developed. As a result of this research, it has become possible to periodically monitor the degradation progress degree of aged cast resin insulators and facility users can optimize the target and timing of risk reduction plans such as facility renewal and maintenance according to maintenance scheme.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 緒言.....	1
1.2 注型絶縁物の適用事例.....	2
1.2.1 屋内変電設備内の注型絶縁物.....	2
1.2.2 注型絶縁物に適用される材料.....	3
1.3 注型絶縁物の劣化評価技術.....	4
1.3.1 注型絶縁物の劣化メカニズム.....	4
1.3.2 熱劣化モードの評価技術.....	6
1.3.3 部分放電劣化モードの評価技術.....	8
1.3.4 汚損劣化モードの評価技術.....	10
1.4 本研究の目的と論文構成.....	13
1.4.1 研究目的.....	13
1.4.2 論文構成.....	14
第1章の参考文献.....	15
第2章 熱劣化とその現地計測技術.....	17
2.1 緒言.....	17
2.2 熱劣化の模擬方法.....	17
2.2.1 熱劣化の加速方法.....	17
2.2.2 熱劣化の評価特性.....	18
2.2.3 熱劣化試料.....	19
2.3 熱劣化評価.....	20
2.3.1 材料特性の評価.....	20
2.3.2 熱劣化原因の分析.....	23
2.4 熱劣化の現地計測技術.....	27
2.4.1 熱劣化の非破壊検出技術.....	27
2.4.2 現地計測装置の開発.....	34
2.5 結言.....	38
第2章の参考文献.....	39

第3章 部分放電劣化とその現地計測技術	40
3.1 緒言	40
3.2 部分放電の模擬方法	40
3.2.1 部分放電の発生形態	40
3.2.2 部分放電の検出方法	42
3.2.3 部分放電発生試料	43
3.3 部分放電試料の特性評価	44
3.3.1 部分放電特性の測定方法	44
3.3.2 部分放電モードと部分放電特性の関係	45
3.4 部分放電劣化の現地計測技術	52
3.4.1 部分放電信号とノイズ信号の弁別技術	52
3.4.2 現地計測装置の開発	66
3.5 結言	70
第3章の参考文献	71
第4章 汚損劣化とその現地計測技術	73
4.1 緒言	73
4.2 汚損劣化の模擬方法	73
4.2.1 汚損区分	73
4.2.2 汚損方法	75
4.2.3 汚損劣化試料	77
4.3 汚損劣化試料の特性評価	80
4.3.1 部分放電電圧の測定方法	80
4.3.2 汚損状態と部分放電電圧の関係	82
4.4 汚損劣化の現地計測技術	89
4.4.1 汚損状態における部分放電電圧の推定技術	89
4.4.2 現地計測装置の開発	94
4.5 結言	99
第4章の参考文献	100
第5章 結論	101
5.1 本研究により得られた知見	101
5.2 今後の課題	103
研究業績	104
謝辞	106

第1章 序論

1.1 緒言

現代の快適な生活基盤は、道路、鉄道、電力、ガス、上下水道、情報通信等の様々なインフラによって支えられている。これらのインフラは相互依存関係にあり、他インフラへの影響度が最も大きく、全てのインフラを支える存在が電力インフラである^[1-1]。電力インフラとは電気エネルギーを安定供給し続けるためのインフラであり、電気を作る発電インフラ、電気を送る送変電インフラ、電気を配る配電インフラ、に分類される。この中で送変電インフラは、需要家へ高効率に電気エネルギーを供給することを目的に、電流を流す送電線と電圧を変換する変電所で構成される。変電所には、超高圧変電所（500～275kV→154kV）、1次変電所（154kV→66kV）、中間変電所（66kV→22kV）、配電用変電所（22kV→6.6kV）があり、発電所から需要家に向かって徐々に電圧を下げる役割を担っている^[1-2]。これらの変電所は、超高圧変電所や1次変電所が発電所に近い郊外、中間変電所や配電用変電所が需要家に近い人口密集地、に立地されることが多い。人口密集地付近では、接地面積の縮小化と周囲環境との景観調和を目的として、屋内用変電設備が多く採用されている。屋内用変電設備では、内部が日光や風雨に直接曝されないため、耐候性に劣る有機高分子材料を用いた注型絶縁物を高電圧機器に適用することが出来る^[1-3]。この注型絶縁物は固体絶縁であり、理想状態でのバルク絶縁性能（絶縁破壊電界）は気体絶縁（30kV/cm）＜液体絶縁（200kV/cm）＜固体絶縁（1000kV/cm）であり^[1-4]、絶縁媒体自体の厚さを薄くすることができる。また、屋内変電設備は汚損レベルが低い区域として設計することが可能であり、注型絶縁物の沿面距離も短くすることが出来る^[1-5]。この注型絶縁物による絶縁強化技術を使いこなすことで、屋内変電設備の小型化が実現されている。しかしながら、これらの注型絶縁物は高い性能を持つが故に、長期信頼性の観点では性能劣化の見極めが難しいという課題がある。気体絶縁物や液体絶縁物はほとんど劣化が生じず、劣化が生じた場合にも媒体を入れ替えることで特性回復が可能である。固体絶縁物は、初期絶縁特性が高いために経年劣化したとしてもすぐには問題とならないが、信頼性確保のためには機器寿命を迎える前に注型絶縁物ごと交換する必要がある^[1-6]。最近では、老朽化した屋内変電設備における絶縁事故も発生しており^[1-7]、屋内用注型絶縁物の適切な更新時期やメンテナンス周期を見極める技術が求められている。

本章では、屋内変電設備の構成機器と注型絶縁物を説明し、これまで研究されてきた注型絶縁物の劣化モードと劣化評価手法について述べ、最後に本論文の目的と構成について述べる。

1.2 注型絶縁物の適用事例

1.2.1 屋内変電設備内の注型絶縁物

高圧受配電設備は、大きくは開放形とキュービクル式に分類される。開放形とは金属フレームに受配電機器を取り付けた設備、キュービクル式は受配電機器一式を金属箱内に収めた受配電設備である。本論文が対象とする屋内変電設備とは、屋内配置の開放型受配電設備と屋内外に配置されたキュービクル式受配電設備である^[1-8]。

屋内変電設備の主な構成機器には、電線・がいし類、断路器、遮断器、負荷開閉器、変圧器、調相設備、避雷器、計器用変成器、保護機器、がある^[1-9]。これらの機器の絶縁性を担保するために、数多くの注型絶縁物が用いられている。機器全体を注型絶縁物で覆う絶縁構造は、図 1-1 に示すがいし、変圧器（モールド変圧器）、計器用変成器、で採用されている。がいしは充電部を絶縁支持するための器具であり、高圧電線の中継接続端子台となるエポキシ樹脂製がいしや高圧電線を保持するポリプロピレン製クリートなどがある。変圧器は電圧を変換する電気機器であり、注型絶縁物を用いた構造としてモールド変圧器がある。モールド変圧器は導体を全て樹脂モールドしており、絶縁油を使用しないために難燃性にも優れている。計器用変成器には、主に電圧を計測する計器用変圧器と電流を計測する計器用変流器がある。これらの計器用変成器の原理は変圧器と同様であり、導体部が全て樹脂モールドされている。その他の構成機器についても、機器外部で導線を引き入れるブッシング部や機器内部で絶縁距離を確保するための絶縁支持部に数多くの注型絶縁物が使用されている。



図 1-1 注型絶縁物を用いた電気機器

1.2.2 注型絶縁物に適用される材料

注型絶縁物とは、型に液状の樹脂を流し込んで硬化させて成形した絶縁物のことである。この注型絶縁技術は、国内では1950年代から実用化され始め、大型品・複雑形状への適用が進められてきた^[1-10]。その特徴は、液体樹脂を用いるために複雑な形状を製作可能であり、金型による大量生産も可能なことである。ただし注型絶縁物には、液状樹脂が型の細部にまで入り込まずに空隙や気泡が残存する課題があった。この課題に対して、真空注型法や加圧ゲル法^[1-11]といった注型技術の進歩により、高電圧機器に適用可能な注型絶縁物が製造可能になった。

注型絶縁に用いられる樹脂材料は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分類される^[1-12]。熱可塑性樹脂は、過熱することで鎖状高分子が溶けて、冷却すると固まるために、自由に形を成形出来る。熱硬化性樹脂は、過熱により分子が網目状もしくは立体的に結合し、硬くて溶剤に溶けにくい状態になる。一度固化した後は、再び熱しても柔らかくならず、自由に成形することは出来ない。一般的な熱硬化性樹脂の特性は、構造が緻密で硬く、機械強度が高く、化学的に安定で、耐熱性に優れることが多い。ただし、吸湿性があるため、誘電体損が大きいことから、電気特性は熱可塑性樹脂よりも劣るものが多い。本論文では、屋内変電設備用の主な注型絶縁物である熱硬化樹脂(特にエポキシ樹脂)をターゲットにしており、代表的な材料を下記に記述する。

(1) フェノール樹脂：フェノール類とアルデヒド類の縮重合反応で得られる代表的な熱硬化性樹脂で、通称ベークライトと呼ばれる。絶縁抵抗は小さくて誘電正接も大きいですが、絶縁耐力が高いことから絶縁板として広く利用されている。

(2) エポキシ樹脂：エピクロロヒドリンとビスフェノールの縮合反応によって得られる複雑な分子構造の樹脂で、分子鎖の両端にエポキシ基を有する熱硬化性樹脂。硬化の際の収縮が小さいので寸法精度を保ちやすい、金属などとの接着性が良く、耐水性や耐薬品性に優れる、特に電気絶縁性に優れるといった特徴を持つ。そのため、エポキシ樹脂による注型品は、がいし、スペーサ、ブッシングなどに数多く使用される代表的な絶縁材料である。さらに、エポキシ樹脂中にガラス繊維を混ぜ合わせて硬化させたガラス繊維強化エポキシ樹脂は、代表的な有機・無機複合材料として、高電圧機器の絶縁に用いられている。

(3) 不飽和ポリエステル樹脂：主鎖にエステル結合をもつ高分子樹脂で、不飽和基を持つ線状ポリエステルとビニル単量体との共重合によって得られる熱硬化性樹脂。低圧で成形可能であり、注型樹脂やガラス繊維などを分散させて機械強度を向上させる強化プラスチックの原料や絶縁用ワニスとして用いられる。

1.3 注型絶縁物の劣化評価技術

1.3.1 注型絶縁物の劣化メカニズム

注型絶縁物には、運転期間を通して熱・電圧・応力・環境によるストレスが加わっており、これらのストレスが原因となり劣化が進展していく^[1-13,14]。運転時のストレスは、常に発生する定常ストレスと低頻度で発生する突発ストレスがある。定常ストレスは、通常運転時の電圧・設置状態・環境で発生し続けるストレスである。突発ストレスは、熱ストレスが過負荷や過励磁運転での瞬時温度上昇、電圧ストレスは開閉サージや雷サージによる瞬時電圧上昇、応力ストレスは短絡時の電磁力や運転開始/停止に伴う急激な温度変化(ヒートショック)による瞬時応力発生、環境ストレスは気象災害や排気不良に伴う環境変化、である。注型絶縁物の劣化現象では、定常ストレスにより徐々に劣化が進展していき、経年劣化した状態で突発ストレスが発生すると、異常や故障が発生することとなる。この劣化現象には複数のモードがあり、劣化モードごとに機器故障に至るフローがある。この注型絶縁物が各種劣化モードにより故障に至るフローを図1-2に示す。

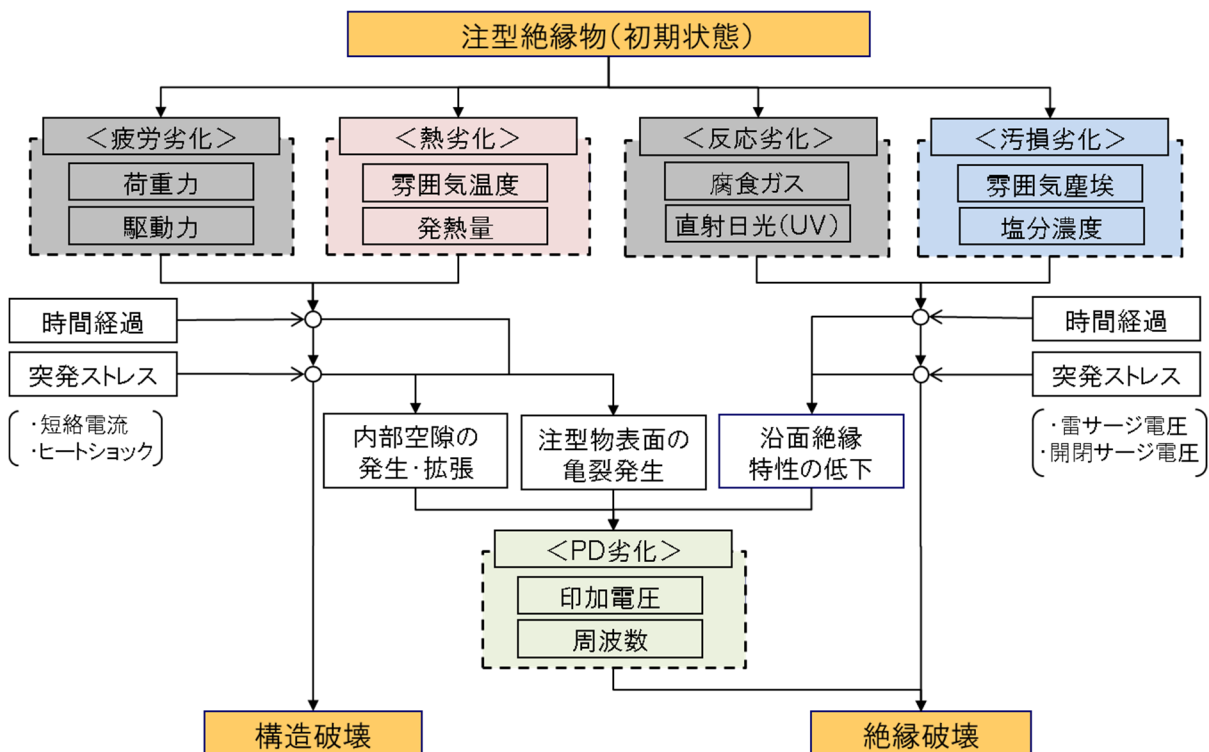


図 1-2 屋内変電設備用注型絶縁物の劣化モード全体

高電圧機器に用いられる注型絶縁物は、出荷試験時に絶縁試験（耐電圧試験、インパルス電圧、部分放電試験、等）^[1-15~18]をクリアしており、初期状態では部分放電は発生していない。部分放電が発生しない状態では電圧印加による劣化は殆ど進展せず^[1-19]、実運用上は無視できるレベルである。よって、使用初期における劣化モードは「疲労劣化」「化学劣化」「汚損劣化」に絞られる。疲労劣化は機械力が加わることによる劣化であり、ストレスは重量物による荷重、揺れによる振動、機構部による駆動、である。化学劣化は、さらに熱劣化と反応劣化に分類した。熱劣化は温度上昇により通常環境で化学反応が促進することによる劣化であり、ストレスは雰囲気温度や発熱量である。反応劣化は特定環境因子が化学反応を引き起こす劣化であり、ストレスは腐食ガスや直射日光である。汚損劣化は汚損物が堆積することによる劣化であり、ストレスは塵埃堆積や高塩分濃度空気である。今回対象とする屋内変電設備の注型絶縁物は、屋内設置環境の静止器がメインであり、疲労劣化と反応劣化は殆ど進展しないと考えられている。

初期劣化モードである熱劣化と汚損劣化は、時間経過に伴い徐々に進展していく。熱劣化が進展すると、外部応力に対して材料内部や表面に空隙欠陥が発生し易くなる。熱劣化状態で、短絡電流やヒートショック（極端な温度変化）といった突発的な応力負荷がかかると、顕著な空隙欠陥の発生や即時の構造破壊（絶縁物の構造・形状が変形）に至る危険性がある。汚損劣化が進展すると、汚損堆積物により沿面絶縁特性が低下していく。汚損劣化状態で、雷サージ電圧や開閉サージ電圧といった突発的な電圧負荷がかかると、即時の絶縁破壊に至る危険性がある。このように熱劣化や汚損劣化は、突発負荷と組み合わせると即時破壊に至る危険性があり、通常負荷においても絶縁欠陥を発生させて部分放電劣化（PD劣化）が開始することとなる。PD劣化は部分放電が発生することによる劣化であり、ストレスは印加電圧の大きさと周波数である。部分放電劣化が進展すると、放電発生源となる絶縁欠陥が拡張していき、やがて絶縁破壊（絶縁物の電気絶縁性が喪失）に至る。

以上より、屋内変電設備用の注型絶縁物では、熱劣化、PD劣化、汚損劣化が主要な劣化モードとなる。同一対象物でも各劣化モードで劣化進展度は異なり、いずれか一つの劣化モードだけでも故障に至る危険性がある。すなわち、注型絶縁物としての劣化度評価では、特定の劣化因子評価だけでは故障を見逃す可能性があり、全ての主要劣化因子の進展度をもとに判断する必要がある。次節からは、各劣化モードの詳細と現行評価技術について述べる。

1.3.2 熱劣化モードの評価技術

熱劣化モードとその評価技術について、コイルを樹脂注型したモデルを題材に説明する。まずは、熱劣化フローを図 1-3 に示す。

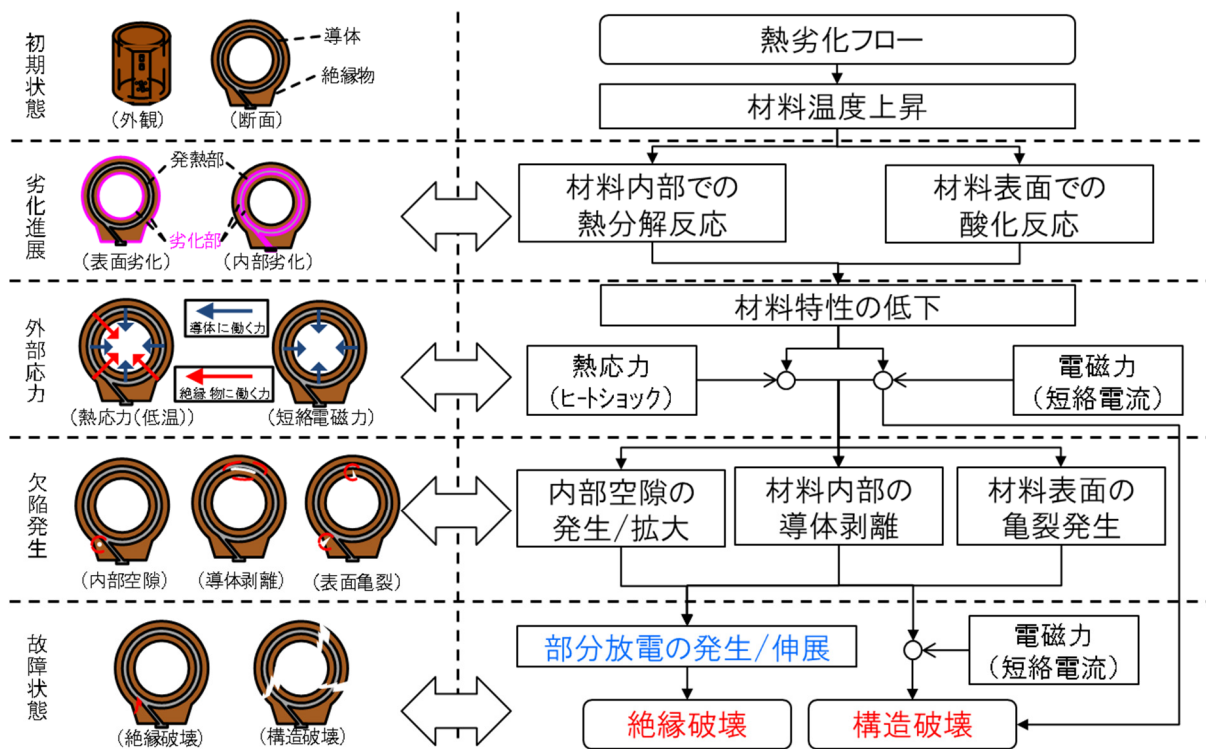


図 1-3 注型絶縁物の熱劣化フロー

稼働時の定常ストレスによって、銅損や誘電損、鉄損などが発熱源となり、注型絶縁物の温度は上昇する。有機高分子材料は、高温雰囲気と晒されると分子鎖の切断や種々の遊離基が生じて、分子構造が変化していく。この分子構造変化には酸素の有無が影響し、酸素が介在しない材料内部の熱分解反応、酸素が介在する材料表面の熱酸化分解反応、に分類される^[1-20]。熱分解反応では、高分子を構成する分子間の結合が熱エネルギーによって乖離し、低分子が生成・拡散することで、重量減少が生じる。熱酸化分解反応では、熱分解で生じた遊離基に酸素分子が反応し、分解反応が促進させられると同時に、連鎖反応で酸化が進展していく。これらの熱劣化反応により、時間経過とともに注型絶縁物の材料特性および内部状態は変化していく。この状態変化に伴い、材料内部の空隙、材料表面の亀裂、異種材料との接着面剥離、といった構造異常が生じやすくなる。これらの異常は通常運転負荷でも発生し得るが、短絡電磁力やヒートショックといった突発的な応力ストレスにより発生することが多い。短絡電磁力は、短絡電流に伴う電磁力で、定格運転時の約 100 倍の電磁力が発生する^[1-21]。ヒートショックは、寒冷環境下で電源を投入・遮断した際に生じる急激な温度変化で、樹脂材と金属材の線膨張係数の差異で応力が生じる。特に短絡

電流に伴う短絡電磁力は強力で、熱劣化状態および構造異常を有した状態では即座に構造破壊（座屈）を引き起こすこともある。構造破壊に至らなくても、構造異常が発生した部位で部分放電が発生する危険性もある。部分放電が発生した場合は、熱劣化と並行して部分放電劣化も伸展してゆき、最終的には絶縁破壊に至る。

次に、上記熱劣化フローに対応して、実用化されている熱劣化度評価技術を図 1-4 に示す。

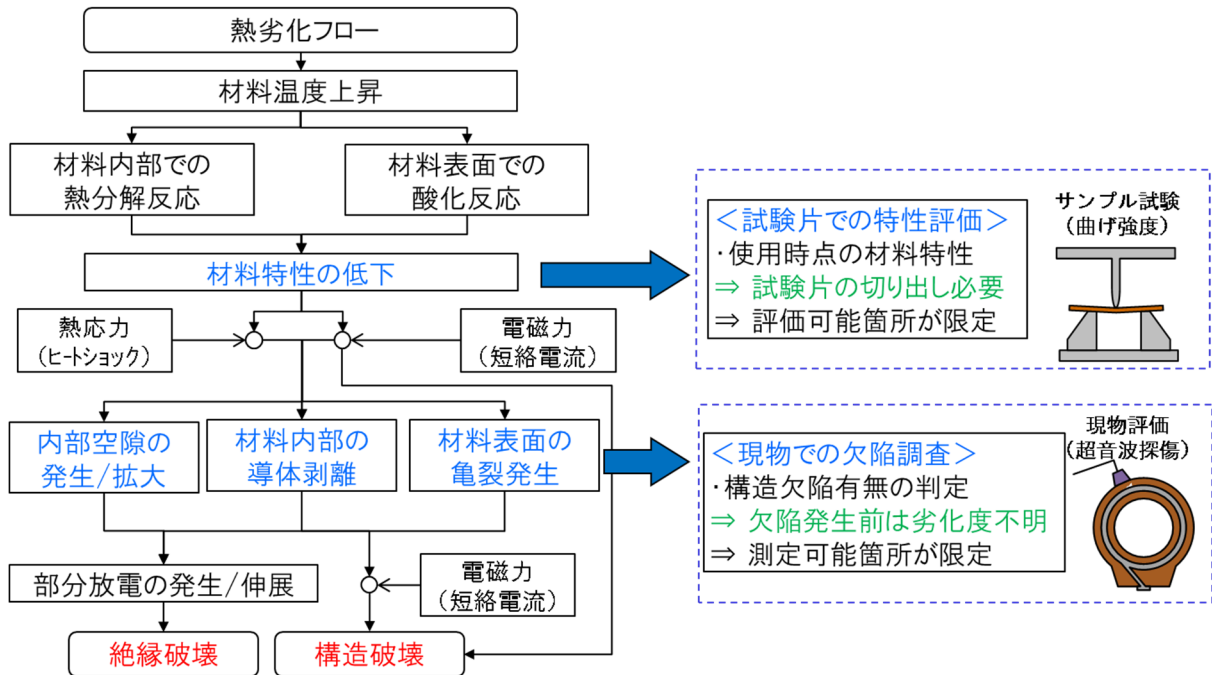


図 1-4 熱劣化フローと現行劣化評価手法

現行の熱劣化評価方法としては、試験片を採取して特性評価する切り出し評価、絶縁物外部から内部欠陥を調査する構造異常検査^[1-22]、がある。切り出し評価では、切り出した試験片で機械特性（曲げ強度や硬度）や物性変化（熱量分析や元素分析）を評価する。この手法は、使用時点の劣化度を評価できるという利点はあるが、試験片の切り出し時に絶縁物を傷つける点が問題である。構造異常検査は、浸透探傷試験や超音波探傷試験により、注型絶縁物の空隙欠陥有無を検査する。浸透探傷試験は、検査用の浸透液を樹脂表面に塗布して、目視により表面クラックの有無や状態を検査する手法である。超音波探傷試験は、高周波（通常 1～5MHz）の音波を樹脂内部に入射して、反射信号から内部欠陥の有無・位置・大きさを検査する手法である。この手法は、現時点での構造欠陥の有無を判定出来るという効果はあるが、欠陥発生前には劣化度を評価できない点が問題である。

1.3.3 部分放電劣化モードの評価技術

部分放電劣化モードとその評価技術について、金属導体を樹脂注型したモデルを題材に説明する。まずは、部分放電劣化フローを図 1-5 に示す。

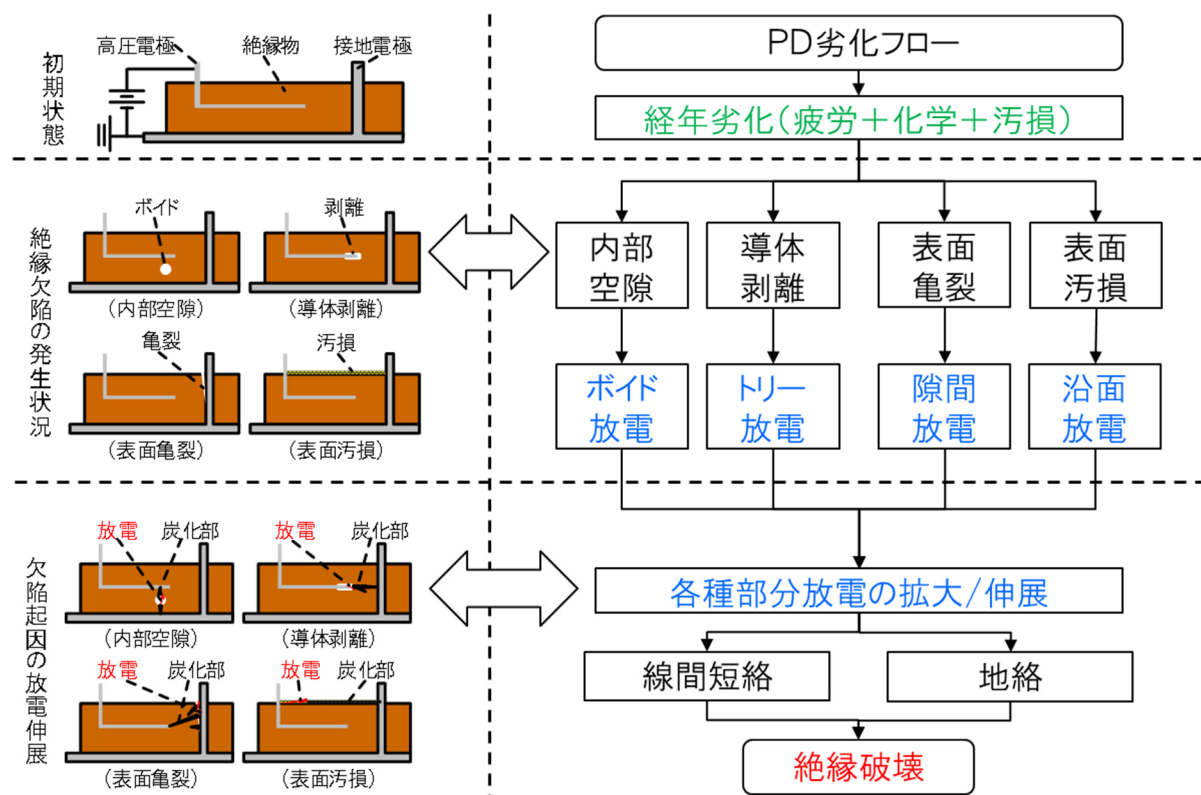


図 1-5 注型絶縁物の部分放電劣化フロー

初期状態の注型絶縁物では部分放電は発生しておらず、他劣化モード（疲労・化学・汚損）が進展した結果として、ある時点から部分放電が発生し始める。部分放電が発生する原因は、各種劣化モード進展による絶縁欠陥の発生である。絶縁欠陥とは、絶縁物内部の空隙、絶縁物表面の亀裂、絶縁物と異種材料との接触部剥離、絶縁物沿面の汚損堆積、のことである。空隙・亀裂・剥離部の絶縁媒体は空気であり、絶縁物内に局所的な空気部が発生することになる。空気絶縁は固体絶縁に対して、絶縁破壊電界が低く、比誘電率も低いことから、誘電率分担により絶縁性能が低い空気部に電界が集中することになる。この電界集中の結果として、空気部で局所的な放電（部分放電）が発生する。また、汚損堆積で部分放電が発生するメカニズムについては、次節にて詳しく説明する。部分放電が発生している状態においても、系全体の絶縁は周囲の注型絶縁物により保持されている。しかし、部分放電に伴う荷電粒子の衝突効果、熱効果および化学効果によって絶縁物は徐々に変質されてゆき、最終的には絶縁破壊に至る。部分放電発生から絶縁破壊に至る時間は、絶縁欠陥のモード・形状・発生位置に大きく依存するため^[1-13]、基本的には部分放電が発生しない状態で使用することが推奨されている^[1-6]。

次に、上記部分放電劣化フローに対応して、実用化されている評価技術を図 1-6 に示す。

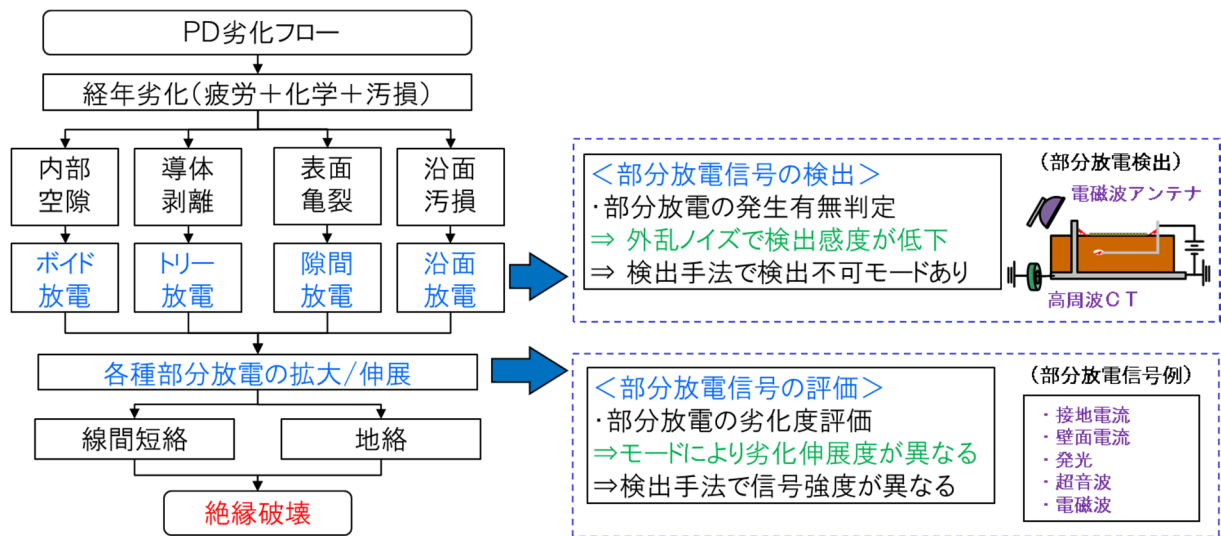


図 1-6 部分放電劣化フローと現行劣化評価手法

現行の部分放電評価方法として、部分放電信号の検知と部分放電信号の評価、がある。部分放電信号の現地検出手法として、主に電気的手法・電磁波的手法・超音波手法がある。電気的手法では、部分放電に伴い電気回路に流れるパルス電流を検出しており、センシング方法で3つに分類される。1つ目は対象物と並列に結合コンデンサとインピーダンスを取り付ける検出インピーダンス方式^[1-23]、2つ目は接地線に高周波 CT を取り付ける接地線 CT 方式^[1-24]、3つ目は高压端子に絶縁式の高周波 CT を取り付ける高压端子 CT 方式^[1-25]、である。電磁波的手法は、部分放電に伴い絶縁物の周辺空間に伝搬する電磁波^[1-26]を電磁波アンテナにより検出する手法である。超音波手法は、部分放電に伴い絶縁物の周辺空間に伝搬する音波を超音波マイクにより検出する手法である^[1-27]。その他にも光学手法や化学手法があるが、絶縁物内部の部分放電検出には適していない。これらの手法は、部分放電信号の発生有無を判定できるという利点はあるが、現地測定では外乱ノイズにより検出感度が低下するという問題がある。部分放電信号の評価では、検出信号強度から部分放電レベルを評価し^[1-28]、電源電圧位相-電荷量特性 (Φ - Q 特性) による部分放電モードを推定する^[1-29]。部分放電レベルは、同一の部分放電現象でもセンシング方式 (電気 or 電磁波 or 超音波) によって検出値が異なり、センシング手法固有の部分放電レベルを評価している。工場試験で用いる部分放電レベルは、部分放電電荷量という電気量を用いており、同様の評価基準を用いるのであればセンシング手法も電気的手法を用いる必要がある。部分放電モードは、代表的な PD モードの模擬欠陥試料で Φ - Q 特性データを蓄積して、統計的処理により部分放電モードを評定している。これらの手法は、部分放電信号の発生レベルを相対評価できるという効果はあるが、現地計測では複数信号モードが混在した際には部分放電モードの評定が困難であるという問題がある。

1.3.4 汚損劣化モードの評価技術

汚損劣化モードとその評価技術について、金属端子を有する注型絶縁物モデルを題材に説明する。まずは、汚損劣化フローを図 1-7 に示す。

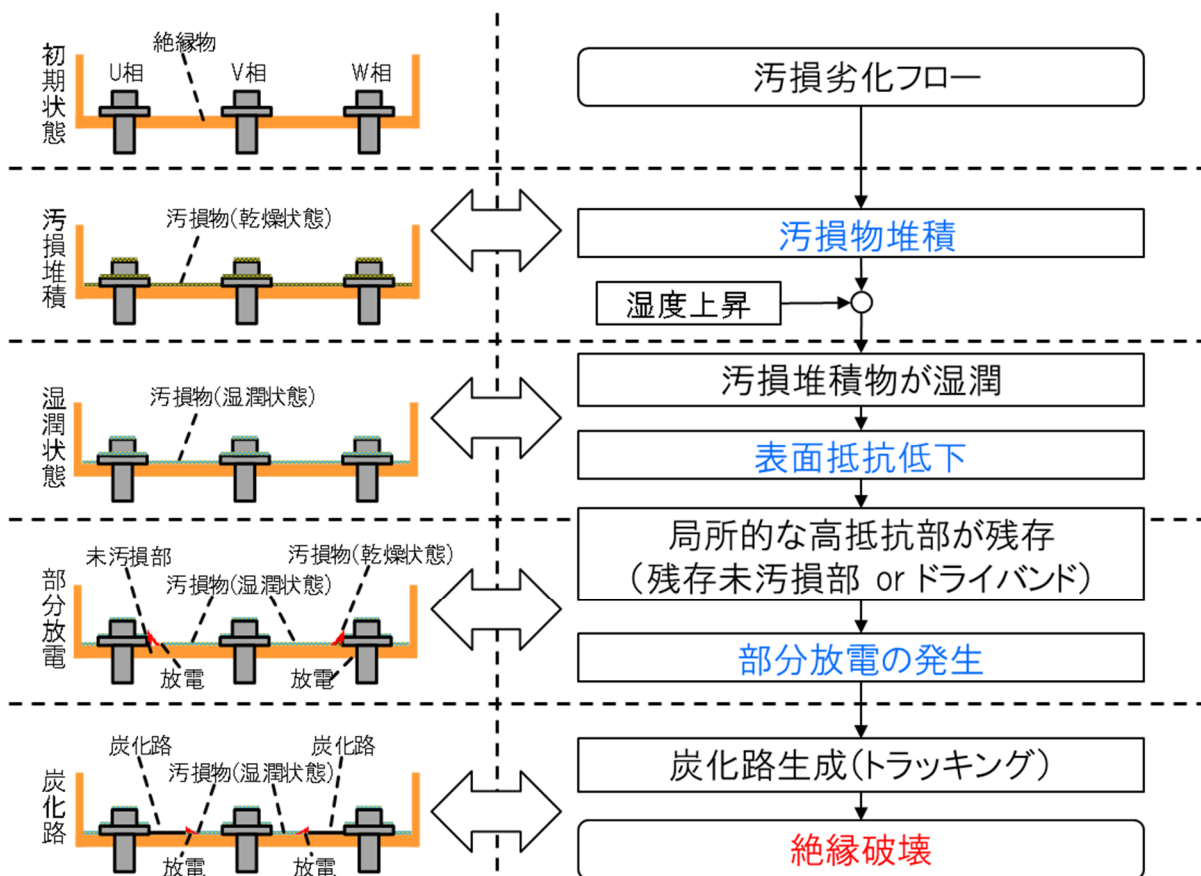


図 1-7 注型絶縁物の汚損劣化フロー

汚損劣化フローでは、注型絶縁物が塵埃や潮風に晒されることで、絶縁物表面に汚損物が堆積していく。さらに雰囲気湿度により汚損堆積物が湿潤すると、表面抵抗が大幅に低下する。表面抵抗が低下した状態で、絶縁物表面に局所的な高抵抗部が残存していると、その高抵抗部に電圧分担が集中することになる。この高抵抗部を発端として、通常運転電圧では部分放電が発生し、雷サージ電圧や開閉サージ電圧では絶縁破壊が生じる危険性がある。この局所的な高抵抗部の原因として、ドライバンドの発生^[1-30]と未汚損部の残存^[1-31]が想定される。ドライバンドとは、漏れ電流によるジュール熱で生じる局所的に汚損堆積物が乾燥した帯域(バンド)のことである。主に屋外用絶縁物で生じる現象であり、表面が完全に濡れた状態にならない場合でも、同様の現象が生じるかどうかは明らかではない。ドライバンド部は、汚損堆積レベルは他部位と同程度であるが、汚損物が乾燥した分だけ抵抗値が上昇する。未汚損部とは、遮蔽物や異物によって汚損物が局所的に蓄積しなかった部分のことである。例えば、髪の毛のような数百 μm オーダの繊維

状異物が長期間付着して、その異物が脱落することで生じる未汚損部を想定している。未汚損部は、雰囲気湿度条件は同じだが、汚損物が付着していない分だけ抵抗値が上昇する。これらの高抵抗部を原因に絶縁物表面で部分放電が発生すると、放電箇所は放電エネルギーにより局部的に炭化する。炭化部位を導電路と捉えると、炭化部先端に電界が集中することで、部分放電発生と炭化部形成（トラッキング）を繰り返すことになり、最終的には絶縁破壊に至る。

次に、上記汚損劣化フローに対応して、実用化されている評価技術を図 1-8 に示す。

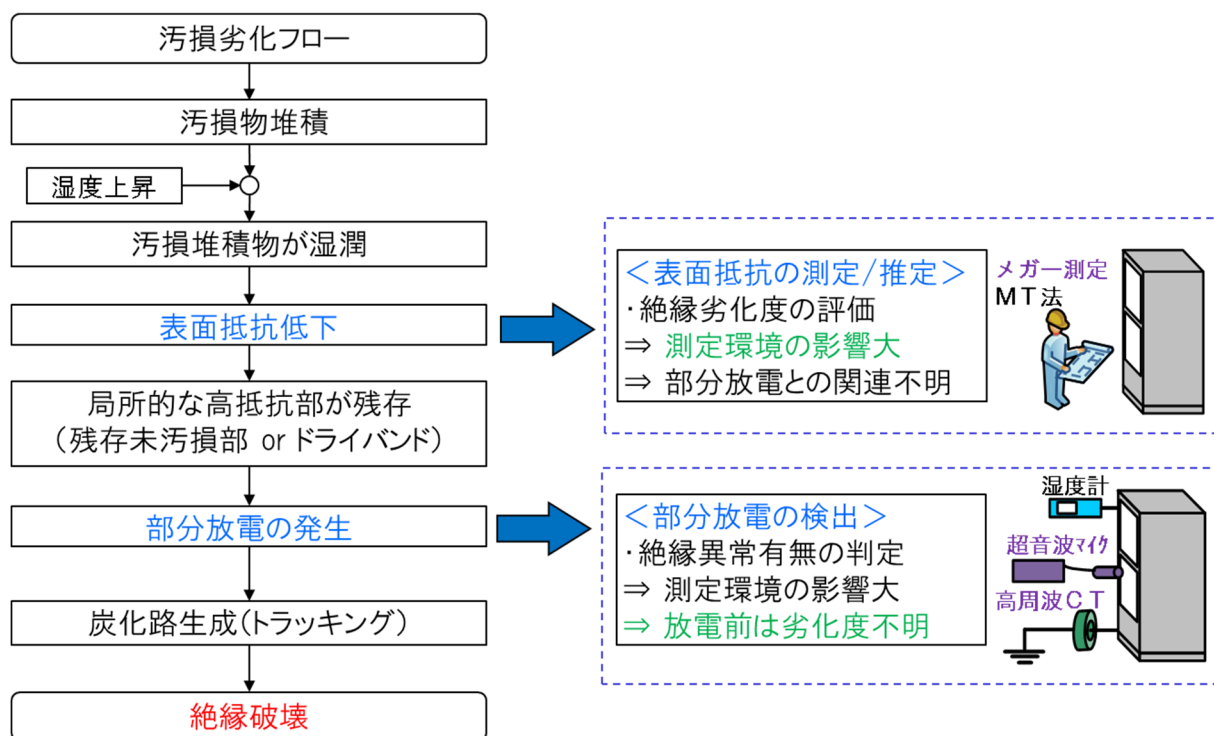


図 1-8 汚損劣化フローと現行評価手法

現行の汚損劣化評価方法として、表面抵抗を測定/推定する手法と部分放電信号を検出する手法がある。表面抵抗の測定手法には、直流電圧源を用いたメガー測定がある^[1-23]。メガー測定では、対象物に直流電圧を印加し、その時に流れる電流から換算される絶縁抵抗、およびそれらの時間特性・温度特性・電圧特性などを測定するものである。最近の絶縁抵抗計では様々なセンサ電極が準備されており^[1-32]、対地間抵抗だけでなくピン端子により絶縁物表面の絶縁抵抗も測定可能である。本手法では、測定時雰囲気における表面抵抗値を実測することが出来るが、最悪条件である高湿度状態の表面抵抗を評価できない点が問題である。表面抵抗の推定手法には、多変量解析手法の一種である MT 法（マハラノビス・タグチ法）^[1-33]を用いて、絶縁物の表面状態分析データから高湿度状態での表面抵抗値を推定する手法がある^[1-34]。本手法では、対象部材や設置環境や運転履歴の情報収集と、絶縁物表面の外観分析（光沢や色差）と付着した堆積汚損物のイオン分析、を実施する。これらの収集データから、統計的に確からしい表面抵抗値を推定して

いる。表面抵抗値の推定には、正常なサンプルデータから構成された診断基準となるデータ群（基準空間）が必要となり、この基準空間からの乖離度（マハラノビス距離）で表面抵抗値を推定している。推定した表面抵抗値は相対湿度 50%の状態であり、湿度と表面抵抗の関係をガウシアン曲線で近似して高湿度状態の表面抵抗を求めている。本手法では、高湿度状態の表面抵抗値を推定することは出来るが、マスターデータがある対象物しか評価することができず、統計近似でどの程度の推定誤差が生じるかが不明な点が問題である。また両手法共通の問題として、高湿度表面抵抗値と部分放電電圧に相関性は認められるが^[1-35]、高湿度表面抵抗値から部分放電電圧を推定する計算手法が確立されていない点がある。MT 法では部分放電（シンチレーション）開始電圧の計算式が記載されているが^[1-33]、絶縁物沿面の固有容量と寸法を入力する必要があり、現地計測結果だけで計算を行うことは困難である。汚損沿面の部分放電を検出する手法は、前節に述べた電気的手法と電磁的手法に加えて、放電箇所を目視で確認するために光学的な手法が良く用いられている。光学的な手法では、部分放電に伴う微小な発光を電子増倍管やイメージンテンシファイアで検出して、その発光箇所を評定している。本手法は、現時点での部分放電発生有無と発生箇所を判定できるという効果はあるが、部分放電発生前には汚損劣化度を評価できない点が問題である。

1.4 本研究の目的と論文構成

1.4.1 研究目的

前節までで述べたように屋内注型絶縁物は広く適用されているが、長期運用においては経年劣化の問題がある。これまでの研究や経験により、どのような劣化モードがあるかは明らかになっているが、その劣化度を稼働中設備で現地評価する技術はまだ確立されていない。本論文では、屋内注型絶縁物の劣化診断技術の一助とするため、下記の4項目を研究目的に設定した。

<目的1：熱劣化評価>

モールド変圧器用の注型絶縁樹脂を用いて、モデル実験と分光分析により熱劣化に伴う特性変化と劣化原因と劣化部位を明らかにして、その熱劣化部位の特性低下度合いを非破壊かつ現地測定する技術を開発すること。

<目的2：部分放電劣化評価>

各種PDモードを模擬した試料を用いて、 Φ - Q 特性(電圧位相-電荷量特性)とパルス電流波形を取得して、計算ソフトウェアによりPD電流波形とノイズ信号波形を弁別検出するデジタル信号処理手法を開発すること。

<目的3：汚損劣化評価>

汚損沿面を模擬した試料を用いて、汚損条件と湿度条件に対する部分放電電圧を取得して、等価回路モデルを用いて高湿度表面抵抗から部分放電電圧を推定する計算式と高湿度表面抵抗を現地計測する技術を開発すること。

<目的4：注型絶縁物の劣化監視手法>

製品ライフサイクルに合わせて熱劣化評価と部分放電劣化評価と汚損劣化評価を使い分けて、故障リスクの経済的かつ効率的な監視手法を提案すること。

1.4.2 論文構成

本論文の構成は次の通りである。

第1章では、研究対象である屋内変電設備の注型絶縁物について述べ、その劣化モードと劣化検出価技術に関する既存研究と本論文の目的について述べた。

第2章では、熱劣化を模擬した試料の材料特性を評価して、光学的手法により熱劣化度を非破壊で現地計測する技術を考案し、現地計測装置を製作した結果について述べる。

第3章では、絶縁欠陥を模擬した試料の部分放電電流を取得して、デジタル信号処理により部分放電信号を外乱ノイズ信号と弁別検出する技術を考案し、現地計測装置を製作した結果について述べる。

第4章では、汚損劣化を模擬した試料の部分放電開始電圧を評価して、等価回路モデルとパッシェン近似式から部分放電電圧を推定する手法を考案し、現地計測装置を製作した結果について述べる。

第5章では、第2章から第4章で開発した各種劣化診断技術の成果をまとめて、推奨する注型絶縁物の故障リスク監視手法について述べる。

第1章の参考文献

- [1-1] 片岡正次郎, 鶴田舞, 小路泰広, “重要インフラ間の相互依存構造のモデル化と地震被害波及シミュレーション”, 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No. 510, (2009)
- [1-2] “電気事業のデータベース (INFOBASE)”, 電気事業連合会(2016)
- [1-3] “架空送電用有機がいしの現状と今後の展望”, 電気協同研究, Vol. 56, No. 1 (2000)
- [1-4] 日高邦彦, “高電圧工学”, 数理工学社 (2012)
- [1-5] “変電設備の耐塩設計”, 電気協同研究, Vol. 35, No. 3 (2000)
- [1-6] 電気学会・工場電気設備更新実施方法調査専門委員会, “工場電気設備一設備診断・余寿命推定から更新へ”, オーム社 (2006)
- [1-7] 森下正志, “電気設備のトラブルレスキュー”, オーム社 (2015)
- [1-8] “高圧受電設備等設計・施工要領 (改定2版)”, オーム社(2012)
- [1-9] 田沼和夫, “高圧受電設備 - 施設標準と構成器材の基本解説 -”, オーム社 (2017)
- [1-10] 横野中, 長沢栄治, “電気絶縁用注型樹脂”, 電気学会誌, Vol. 97, No. 12, pp. 1075-1085, (1977)
- [1-11] 磯部昭二, 他 “新新版 電気機器絶縁の実際”, 開発社 (1994)
- [1-12] 大木義路, 他 “電気電子材料 - 基礎から試験法まで -”, 電気学会 (2006)
- [1-13] “電力設備の運転中絶縁診断技術”, 電気学会技術報告 (II部), No. 402 (1992)
- [1-14] 夏目文夫, “モールド絶縁の劣化現象”, 電気学会絶縁材料研究会資料, Vol. EIM-84, No. 10-17, pp. 15-24 (1984)
- [1-15] “計器用変成器 - (標準用及び一般計測用) 第一部: 変流器”, 日本工業規格, JIS C 1731-1(1998)
- [1-16] “計器用変成器 - (標準用及び一般計測用) 第一部: 計器用変圧器”, 日本工業規格, JIS C 1731-2(1998)
- [1-17] “屋内用樹脂ポストがいし”, 日本工業規格, JIS C 3851(2012)
- [1-18] “配電用 6 k Vモールド変圧器”, 日本工業規格, (2012)
- [1-19] 夏目文夫, 他 “固体絶縁の電圧劣化と V-t 特性”, 電気学会絶縁材料研究会資料, Vol. EIM-76-42 (1976)
- [1-20] “絶縁材料技術開発の歴史的展開”, 電気学会技術報告, No. 464 (1993)

- [1-21] “短絡時における変圧器巻線の機械的強度について” , 電気学会技術報告 (I部) , No. 89 (1969)
- [1-22] 大岡 紀一, “詳解非破壊検査ガイドブック” , 日本規格協会 (2012)
- [1-23] “高電圧試験ハンドブック” , 電気学会 (1983)
- [1-24] P. Werle, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach, “A new protection and monitoring system for dry type transformers based on innovative sensor technologies” , Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation(2000)
- [1-25] 吉川哲司, 中村清隆, 山海敏弘, “変圧器の現地劣化診断” , 電気学会全国大会講演論文集, Vol.1994, No. 5, pp.8.28 (1994)
- [1-26] 上野秀樹, 長町峰志, 中村正樹, 中山博史, 柿花邦彦, “エポキシ樹脂中のトリ一進展と放射電磁波 “ , 電学論 A, Vol.129, No. 12, pp.915-921 (2009)
- [1-27] 吉川哲司, 中村清隆, 斉郷晃, “乾式変圧器用絶縁診断装置” , 電気学会全国大会講演論文集, Vol.1995, No. 5, pp.5.220 (1995)
- [1-28] “ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術の最新動向” , 電気学会技術報告, No.982 (2004)
- [1-29] 岡本達希, 田中祀捷 “部分放電のサイクル平均 $\phi-q$ 特性 6 種類の電極形状による実験 “ , 電学論 A, Vol.102, No. 7, pp.381-388 (1982)
- [1-30] 西田真, 吉村昇, 能登文敏, “有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程” , 電学論 A, Vol.103, No.11, pp.593-600 (1983)
- [1-31] Hocine Terrab, Abdelhafid Bayadi, “Experimental study using design of experiment of pollution layer effect on insulator performance taking into account the presence of dry bands” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.21, No. 6, pp.2486-2495(2014)
- [1-32] 製品カタログ “超絶縁計 SM-8200 シリーズ” , HIOKI
- [1-33] 田口玄一, 兼高達貳, “MT システムにおける技術開発” , 日本規格協会 (2002)
- [1-34] 三木伸介, 岡澤周, 長谷川敏, 角田誠, 犬島浩, “受配電設備絶縁物の余寿命診断技術” , 電学論 B, Vol.127, No. 7, pp.863-869 (2007)
- [1-35] 河村達雄, 井坂勝生 “がいし汚損面の吸湿密度, 漏れ電流およびフラッシュオーバ電圧の湿度依存性” , 電気学会論文誌 B, Vol.93-B, No. 9, pp. 426-433 (1973)

第2章 熱劣化とその現地計測技術

2.1 緒言

注型絶縁物の主要な劣化モードである「熱劣化」「部分放電劣化」「汚損劣化」に対して、本章では熱劣化の現地計測技術について述べる。

第1章で述べた熱劣化モードとは、時間経過に伴う化学変化で注型絶縁物の材料特性が低下し、外部応力により空隙欠陥や構造破壊が生じ易くなることである。注型絶縁物を使用する限り熱劣化は不可逆的に進展していくため、設備運用の観点では熱劣化がどこまで進展したら使用不可状態（寿命状態）と判定するかを定義する必要がある。寿命状態の考え方は様々あるが、本論文では製品の規格認証試験に相当する突発的な応力ストレス（短絡試験やヒートサイクル試験）が課されたときに、顕著な空隙欠陥が発生（部分放電が発生）し得る状態を寿命状態と定義した。この規格認証試験に耐えられない状態とは、電気機器を構成する絶縁材料が使用限界を迎えた状態であり、その材料使用限界状態は材料規格の数値に準拠することとした。

本章では、注型絶縁物の熱劣化を促進させた試料を製作して、材料寿命を決定する特性（寿命特性）と熱劣化が生じる原因と部位を評価した結果を述べる。この熱劣化部位の状態を非破壊評価手法で測定して、寿命特性を間接的に評価する手法を提案する。また、提案した熱劣化評価手法に基づいて、現地計測装置を製作した結果についても述べる。

2.2 熱劣化の模擬方法

2.2.1 熱劣化の加速方法

注型絶縁物は高分子材料であり、高温雰囲気には晒されると分子鎖の切断や種々の遊離基が生じて、分子構造が変化していく。この分子構造の変化と各種材料特性の変化に一義的な相関関係があるとの前提に基づいて、絶対温度の逆数と材料寿命の対数が直線関係になることが理論的に導かれている^[2-1,2]。この関係は、アレニウス則と呼ばれ、絶対温度 T において材料特性が寿命となる時間 t_1 は下記式 (2.1) で表される。

$$\log(t_1) = A + \frac{\Delta E}{RT} \quad (2.1)$$

(A : 定数、 ΔE : 活性化エネルギー、 R : 気体定数)

この関係を用いて、材料寿命評価では、実用温度よりも十分に高い温度を数点選んで、それぞれの温度における寿命を測定する。測定結果の評価温度と寿命時間をプロットして、アレニウス則から寿命の対数と絶対温度の逆数を直線近似する。この近似直線の傾きが劣化速度であり、一般に8℃半減則（8℃上昇で寿命が半減）や10℃半減速（10℃上昇で寿命が半減）と呼ばれる経験則も用いられている。また IEC の熱的耐久性の指標では、アレニウスプロットにより 20,000 時間使用可能な温度を耐熱温度としている。

上記のアレニウス則と IEC の耐熱指標に基づいて、熱加速方法では劣化温度を耐熱温度よりも最大 50 度上昇させることとし、その熱加速時間は最長 1,000 時間とした。

2.2.2 熱劣化の評価特性

熱劣化の評価特性は IEC 規格^[2-3]に準拠することとした。本論文で評価するモールド変圧器用のエポキシ樹脂は無機フィラー入りであり、構造強化用の粉末充填材を含む熱硬化性高分子材料に分類される。IEC 規格で寿命を判定する特性値は絶縁破壊電圧、曲げ強度、質量減少量の三項目であり、いずれか一つでも基準値を下回れば材料寿命と判定する^[2-4]。寿命判定基準は、絶縁破壊電圧が 50%低下、曲げ強度が 50%低下、質量減少量が有機成分の 3%減少、である。質量減少量の寿命基準については、評価対象試料の有機成分比率から、計測可能な全質量に対する質量減少量で再定義した。今回用いたエポキシ樹脂は有機成分と無機成分の比が 4 : 6 であり、無機成分は熱による質量減少が無視できると考えて、全質量の 1.2% (=3×0.4) が減少した時点材料寿命と定義した。このモールド変圧器用の注型絶縁材料の寿命特性を表 1-1 にまとめて示す。

表 1-1 モールド変圧器用エポキシ樹脂の寿命特性

指標項目	寿命判定基準(%) <初期特性に対して>	
	エポキシ樹脂 IEC60216-2 (2005年)	モールド変圧器 富士電機の基準値
曲げ強度の低下	50%	50%
絶縁破壊電圧の低下	50%	50%
質量の減少量	有機成分の3%	有機成分の3% (≒全質量の1.2%)

2.2.3 熱劣化試料

熱劣化試料には、富士電機製モールド変圧器で過去に使用していたエポキシ樹脂を用いた。このエポキシ樹脂は耐熱区分がB種で、使用年代が異なる3種類を採用した。これらの樹脂から試験試料を製作して、B種許容温度の130℃よりも高く、かつクラックが生じない温度の150℃～180℃で熱加速劣化させた。熱劣化は恒温槽内で実施し、雰囲気ガスは空気とした。この熱劣化試料外観を図2-1に示す。

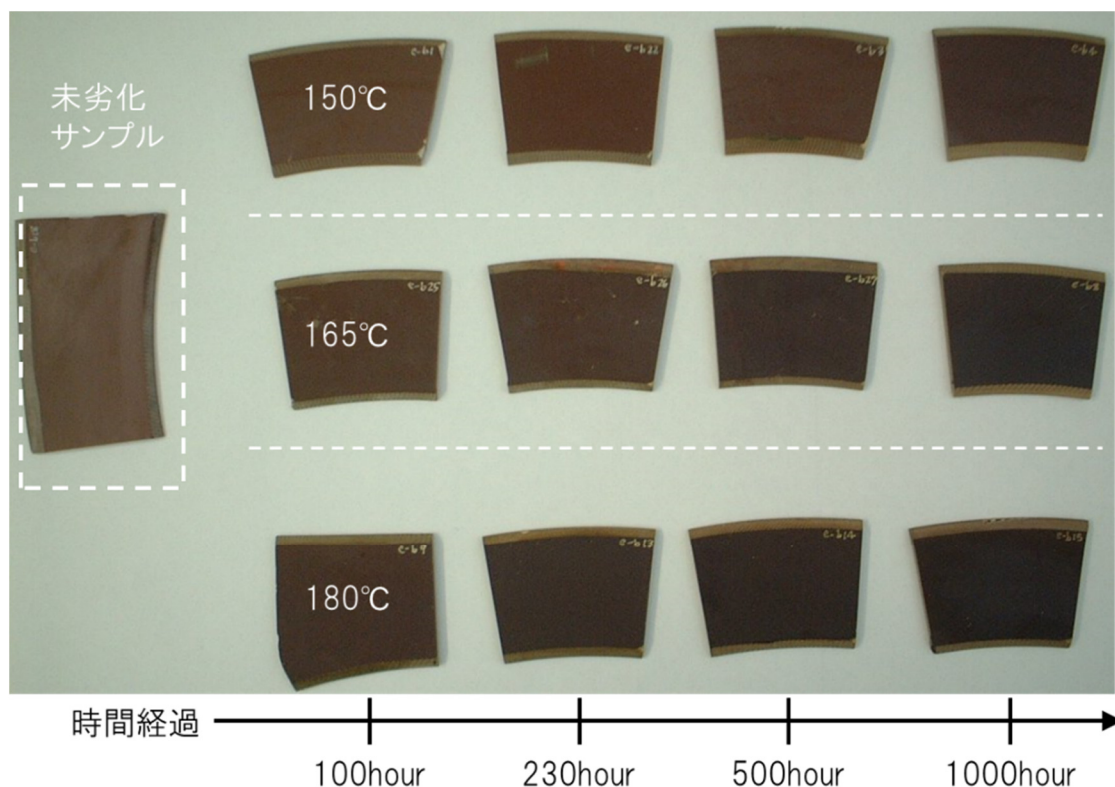


図 2-1 エポキシ熱劣化試料の外観

図 2-1 の熱劣化試料では、下側ほど熱劣化時の雰囲気温度が高く、右側ほど熱劣化の時間が長い。目視による熱劣化条件と試料外観の関係評価では、雰囲気温度が高く、劣化時間が長い条件ほど、表面が黒色化していた。

2.3 熱劣化評価

2.3.1 材料特性の評価

熱劣化試料の絶縁破壊電圧、曲げ強度、質量減少量の評価結果を示す。

(1) 絶縁破壊電圧

絶縁破壊電圧の測定は、IEC 60243-1 に準拠して、試験試料形状が 100×100×t1mm、試験電極がΦ25mm 円柱において、絶縁油中で試料を試験電極で挟んで絶縁破壊した電圧を測定した。絶縁破壊した後には、試料状態を目視で観察して、試料内部で絶縁破壊が生じていることを確認した。試験結果として、初期状態の絶縁破壊電圧を 100% として、熱劣化による絶縁破壊電圧の変化を図 2-2 に示す。

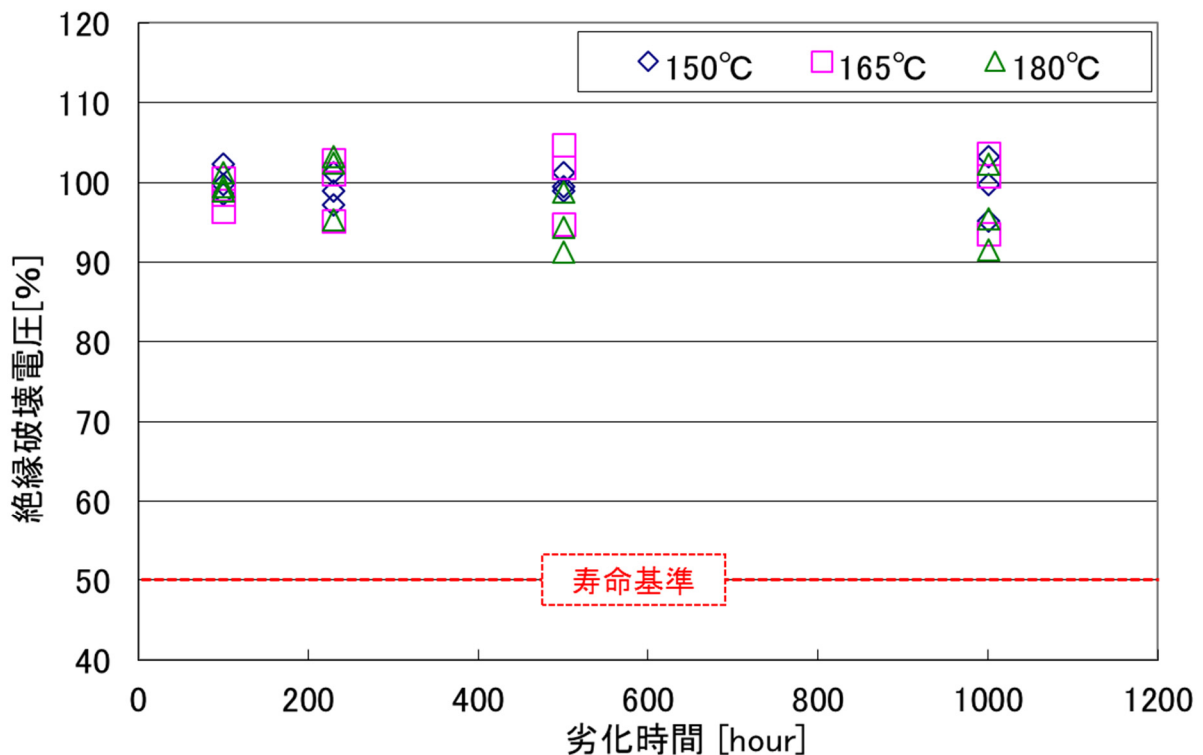


図 2-2 熱劣化に伴う絶縁破壊電圧の変化

図 2-2 より、最も熱劣化させた条件でも絶縁破壊電圧は約 90% 残存しており、今回の劣化条件では試料は寿命基準に達していない。雰囲気温度 180°C における劣化時間と絶縁破壊電圧下限値の関係を直線近似すると、式(2.2)となる。

$$\text{絶縁破壊電圧}[\%] = -0.01 \times \text{劣化時間}[\text{hour}] + 100 \quad (2.2)$$

式(2.2)より、本試料の絶縁破壊電圧寿命は 180°C 使用で約 5,000 時間となる。

(2) 曲げ強度

曲げ強度の測定は、JIS K7171 に準拠した 3 点曲げ試験で測定した。試料形状は縦 60～70mm ×横 6mm×厚さ 4mm として、40mm 間隔の支持材で試料を保持した状態で、ピン状の圧子を試料中心に速度 10mm/min で押しつけていき、曲げ強度を測定した。樹脂材料の曲げ試験は、材料表面の亀裂発生が破断起点となり、同一形状の曲げ強度を相対評価することで亀裂の発生し易さを評価している。初期状態の曲げ強度を 100% として、熱劣化による曲げ強度変化を図 2-3 に示す。

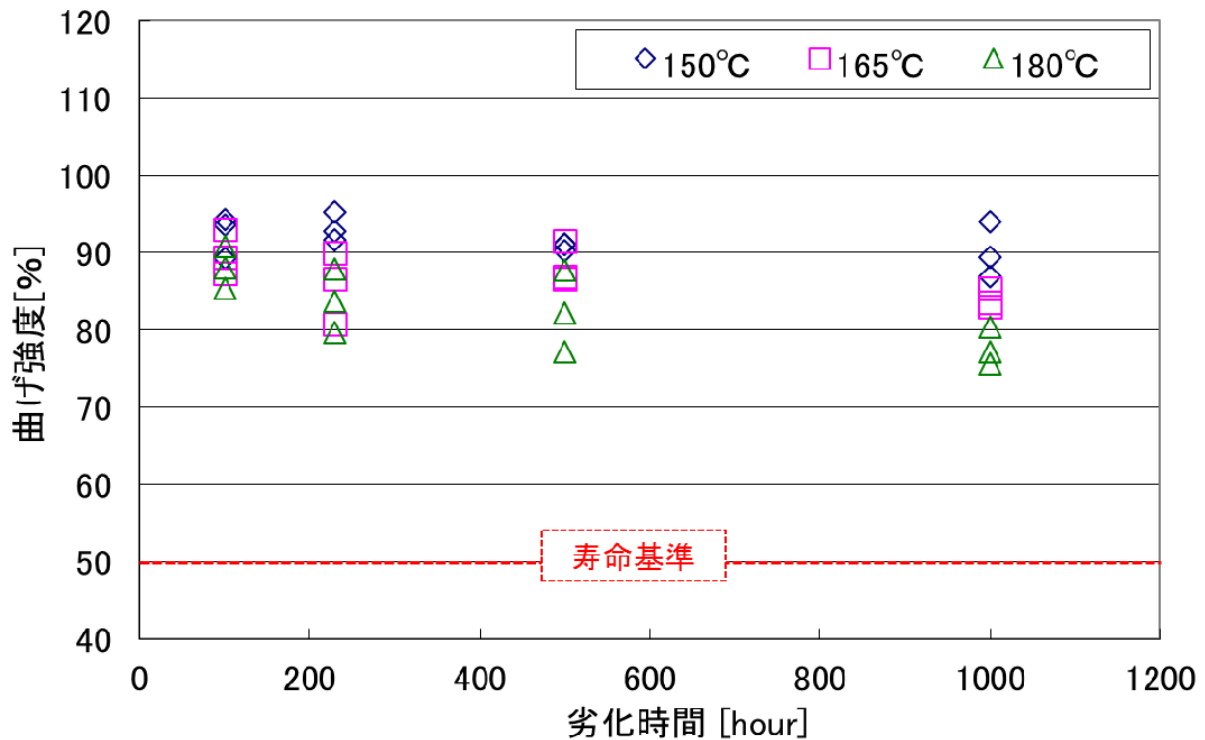


図 2-3 熱劣化に伴う曲げ強度の変化

図 2-3 より、最も熱劣化させた条件でも曲げ強度は約 75% 残存しており、今回の劣化条件では試料は寿命基準に達していない。雰囲気時間 180°C における劣化時間と曲げ強度の関係を直線近似すると、式 (2.3) となる。

$$\text{曲げ強度}[\%] = -0.25 \times \text{劣化時間}[\text{hour}] + 100 \quad (2.3)$$

式(2.3)より、本試料の曲げ強度寿命は 180°C 使用で約 2,000 時間となる。

(3) 質量減少量

質量減少量の測定は、曲げ強度試験試料と同じ試料形状として、熱劣化前後の重量を電子天秤で計測することで求めた。初期状態の質量減少量を 0% として、熱劣化による質量減少量の変化を図 2-4 に示す。

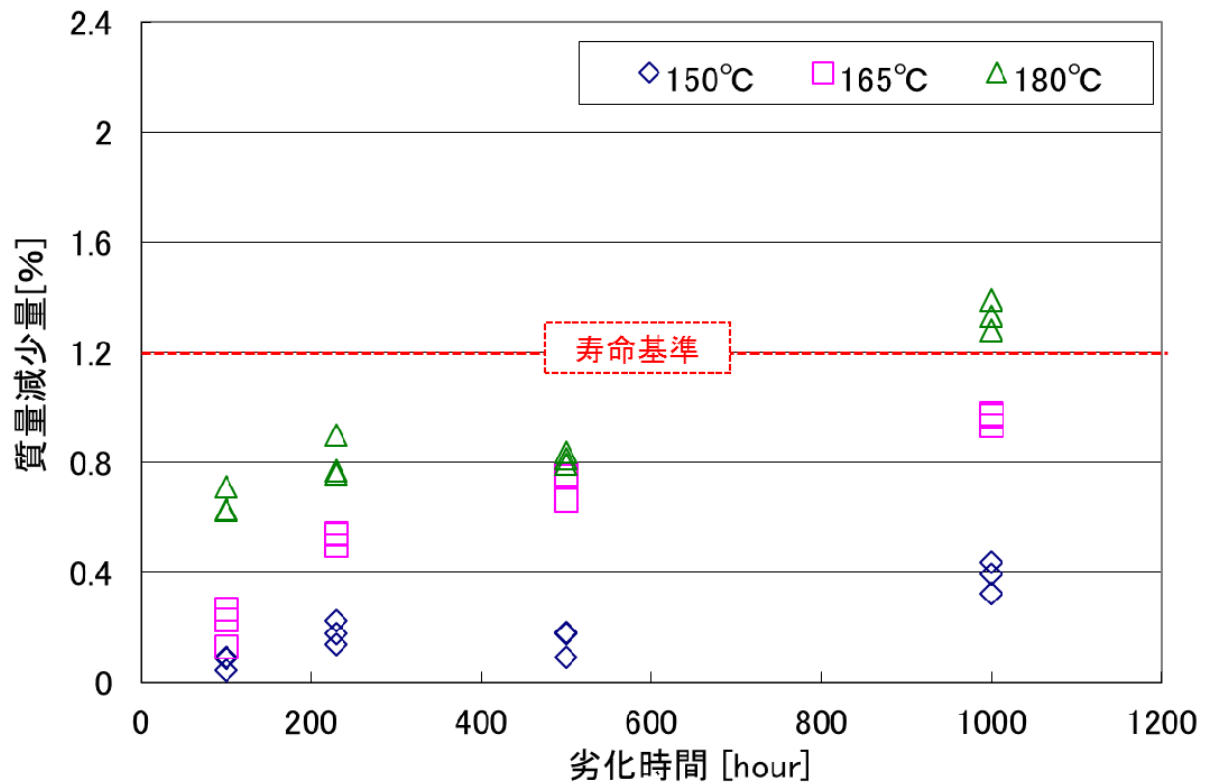


図 2-4 熱劣化に伴う質量減少量の変化

図 2-4 より、最も熱劣化させた条件の質量減少量は 1.4% 程度であり、今回の劣化条件で既に寿命に達している。すなわち、本試料の質量減少寿命は 180°C 使用では 1,000 時間未満である。

以上の評価結果から、モールド変圧器用のエポキシ樹脂は材料寿命評価特性の中で質量減少量が最も早く寿命を迎えることがわかった。よって、本試料の寿命特性は質量減少量で判定することとした。

2.3.2 熱劣化原因の分析

(1) 熱劣化現象の原因調査

熱劣化により生じる質量減少が、どのような原因で、どの程度の範囲で発生しているかを調査した。熱劣化の原因は、樹脂自体の反応促進と樹脂表面での酸化反応に分類できる。これらの反応のどちらが支配的であるかを評価するため、酸化反応が生じない窒素パーズ環境で熱劣化試料を作成・評価することとした。その方法として、試験試料を窒素パーズした恒温槽内にて220℃で熱劣化させて、質量減少量と曲げ強度を測定した。その試験結果を図2-5に示す。

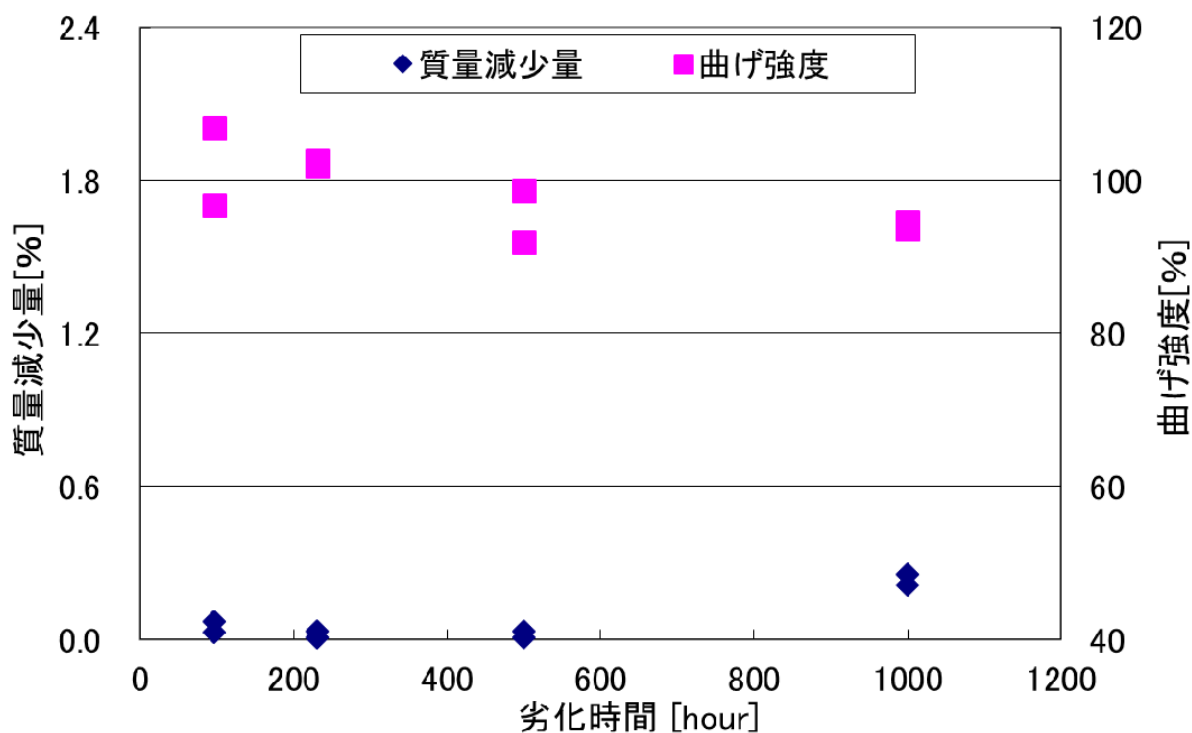


図2-5 熱劣化による質量減少量と曲げ強度の変化（窒素パーズ下）

図2-5より、窒素パーズ下220℃で1,000時間熱劣化させた試料は、質量減少が約0.25%で曲げ強度が約95%であった。図2-3,4より、通常雰囲気下180℃で1000時間劣化させた試料は、質量減少が約1.4%で曲げ強度が約75%であった。酸素が介在しない環境では材料の特性低下が殆ど生じていないことから、熱劣化現象の主要因は樹脂表面で生じる酸化反応であると判断した。

(2) 熱劣化現象の進展度評価

次に、この試料表面の酸化劣化が、どの程度まで内部に進展しているかを調査した。調査方法として、試料表面の乾式研磨を併用したフーリエ変換赤外分光の減衰全反射測定法 (FTIR-ATR 法: Fourier Transform Infrared Spectroscopy Attenuated Total Reflection) による深さ方向分析を行った^[2-5]。ATR 法とは、屈折率の高い結晶を試料表面に圧着し、全反射条件を用いて表面を高感度に測定する手法である。透過法を適用することが難しい試料 (表面極薄膜、プラスチック成型品、繊維、ゴム、液体など) についても、透過法と類似のスペクトルを簡便に取得することが出来る。FTIR-ATR 法における測定深度には波数依存性があり、低波数ほど測定深度が深く、吸収強度が大きくなるため、透過スペクトルとの比較を行うための補正を行っている。ATR 法による測定では、測定装置に Varian7000 (Varian 社製) を用いて、光源が高輝度セラミックス、検知器が MCT (Hg-Cd-Te)、パージが窒素ガス、分解能が 4cm^{-1} 、積算回数が 256 回、ATR 結晶が Ge、入射角が 45° 、とした。この分析手法を用いて、寿命状態の試験試料における樹脂内層部の FTIR-ATR スペクトルを測定した結果を図 2-6 に示す。

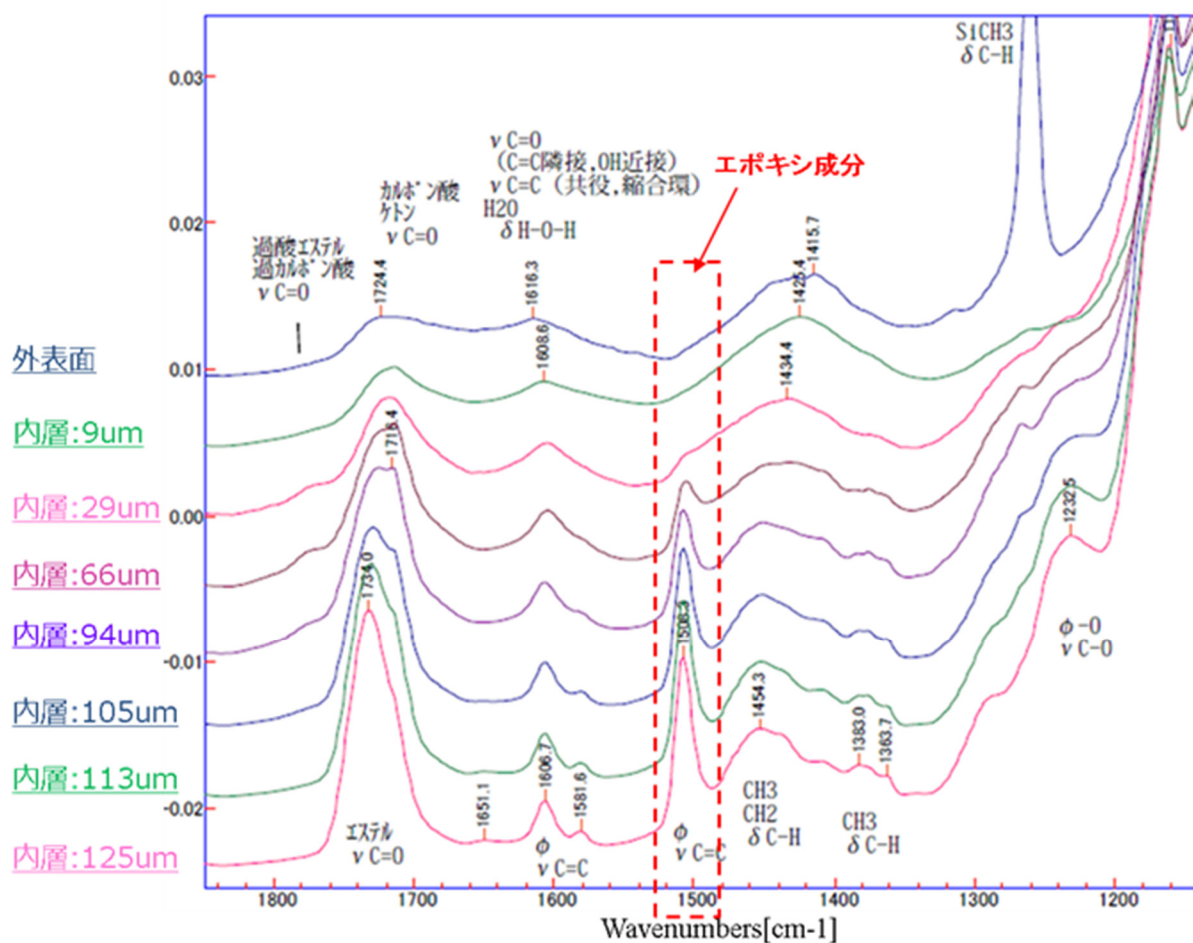


図 2-6 熱劣化樹脂内層部の FTIR-ATR スペクトル

図 2-6 で検出された主な吸収帯と帰属は、波数 1820-1760 cm^{-1} 付近の帰属が C=O 伸縮振動（過酸エステル, 過カルボン酸, 等）、波数 1734 cm^{-1} の帰属が C=O 伸縮振動（エステル）、波数 1700 cm^{-1} 付近の帰属が C-H 伸縮振動（芳香環）、波数 1650 cm^{-1} の帰属が C=O 伸縮振動（C=C 隣接 or OH 近接 C=O, 等）、波数 1608, 1583, 1510 cm^{-1} の帰属が C=C（芳香環）、波数 1454 cm^{-1} の帰属が C-H 変角振動（CH₃ 基, CH₂ 基）、波数 1379 cm^{-1} の帰属が C-H 変角振動（CH₃ 基）、波数 1234 cm^{-1} の帰属が C-O 伸縮振動（芳香族系エーテル）、波数 1180 cm^{-1} の帰属が CH 面内変角振動（p-置換ベンゼン）、である。エポキシ樹脂に起因する波数は、エポキシ樹脂由来の波数 1608, 1583, 1510 cm^{-1} （C=C（芳香環））、酸無水物とエポキシ基による硬化反応で生成した波数 1734 cm^{-1} （C=O 伸縮振動（エステル））がある。これらの波数では、樹脂内層ほど強いスペクトル強度が得られた。また、樹脂表面では含酸素官能基（波数 1820-1760, 1700 付近, 1600 cm^{-1} ）が強く検出され、その原因はエポキシ基が大気中の H₂O と反応して開環して OH 基を生成したものと推定される。内層部への酸化劣化度を定量的に評価するため、強度変化が少ないと予想される 879 cm^{-1} （臭素化エポキシ樹脂の芳香環）の検出強度を基準に、エポキシ樹脂の代表的な吸収帯である 1510 cm^{-1} の検出強度比の変化を求めた。未劣化樹脂の検出強度比を 100% として、樹脂表層から深さ毎に吸収強度比を求めた結果を図 2-7 に示す。

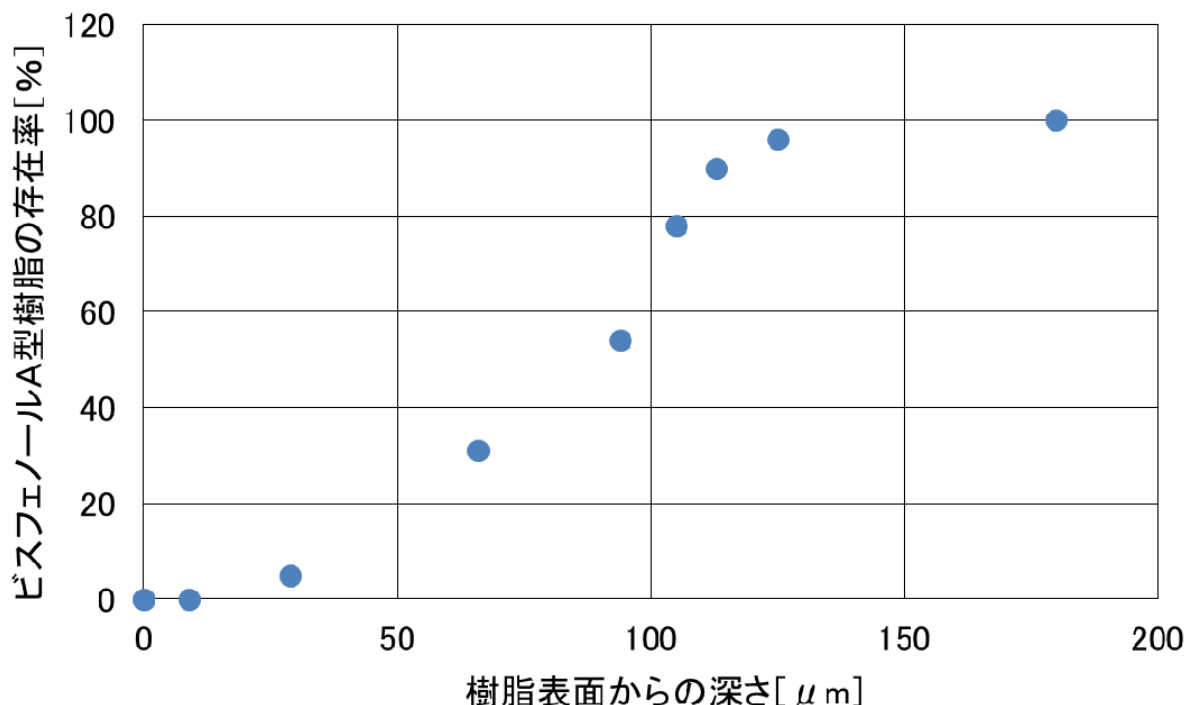


図 2-7 熱劣化樹脂の深さ方向での劣化進展度

図 2-7 より、試料深さ $30\ \mu\text{m}$ 程度から元の樹脂成分が検出され始め、約 $125\ \mu\text{m}$ の深さでは未劣化樹脂とほぼ同じ状態であることが分かる。すなわち、酸化劣化による劣化範囲は樹脂深さ $100\ \mu\text{m}$ 程度までの表層部であり、最も劣化が進展している部位は最表面であることが分かった。このように樹脂の表層面が酸化劣化することで、樹脂表面だけが局所的に硬く脆い状態となり、外部応力による亀裂発生の起点となることが予測される。

2.4 熱劣化の現地計測技術

2.4.1 熱劣化の非破壊検出技術

(1) 熱劣化度の非破壊検出手法

熱劣化度の現地計測手法を開発するにあたり、対象絶縁物は非破壊で評価する必要がある。現地で質量減少を直接測定することは不可能であり、質量減少を引き起こす高次構造変化から間接的に評価せざるを得ない。樹脂の高次構造変化と非破壊診断指標の関係を図 2-8 に示す^[2-6]。

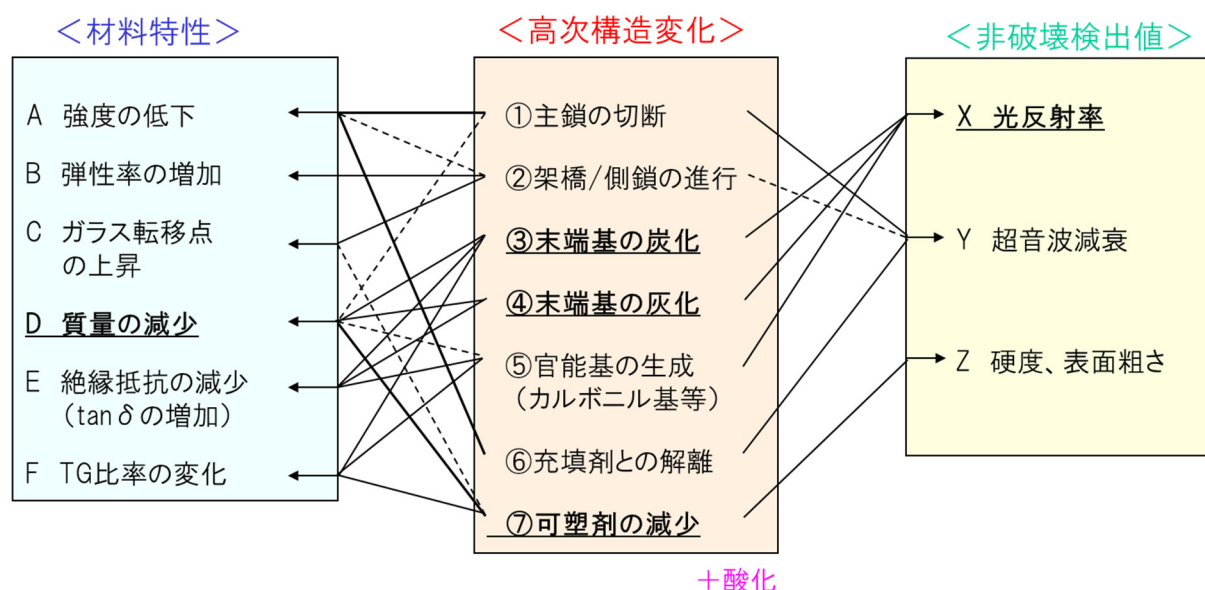


図 2-8 材料特性と高次構造変化と非破壊検出値の関係

図 2-8 より、本試料の寿命特性とした質量減少量は、末端基の炭化および灰化、可塑剤の減少、主鎖の切断による末端基の生成、官能基の生成、の結果として生じている。それに対して各非破壊検出手法は、光反射率が末端基の炭化・灰化、超音波減衰が主鎖の切断や充填剤の解離、硬度が可塑剤の減少、と相関することが期待できる。また、主要な劣化因子は酸化反応であり、酸化反応とも相関性を持つ非破壊検出手法が望ましい。

次に、これらの非破壊検出値と質量減少量の相関性を評価した。

(2) 光反射率

光反射スペクトル特性として^[2-7]、図 2-9 に示す計測装置で光反射率を測定した。

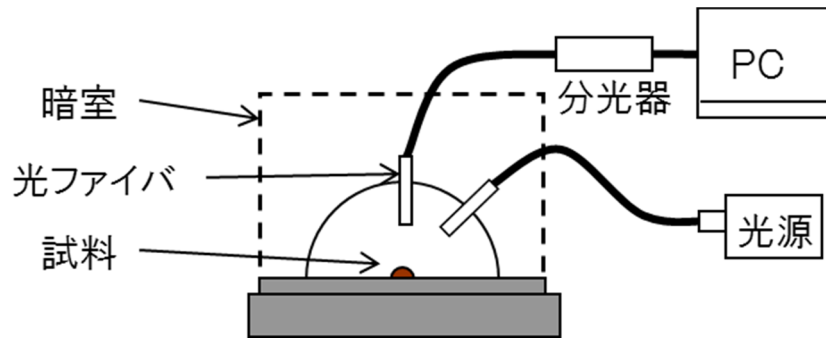


図 2-9 光反射率の測定装置

測定方法は、光源からエポキシ試料に光線を 45° で入射し、角度 0° の反射光強度を光ファイバ経由で分光器にて検出した。光源には HOYA 製 Cold Light HLS2100、分光器は大塚電子製ポリクロメータ IMUC7000 を用いた。入射光はカラーフィルタにより波長域を限定し、その波長域はスペクトル特性に高い再現性が得られた $500\sim 900\text{nm}$ とした。反射光強度を光反射率に変換するために、光反射率 100%の反射光強度を白色標準拡散板（エドモンド製 No. 54302-F）で取得して、この値の比として光反射率を測定した。この測定結果として、光反射率と質量減少の関係について短波長成分を図 2-10、長波長成分を図 2-11 に示す。

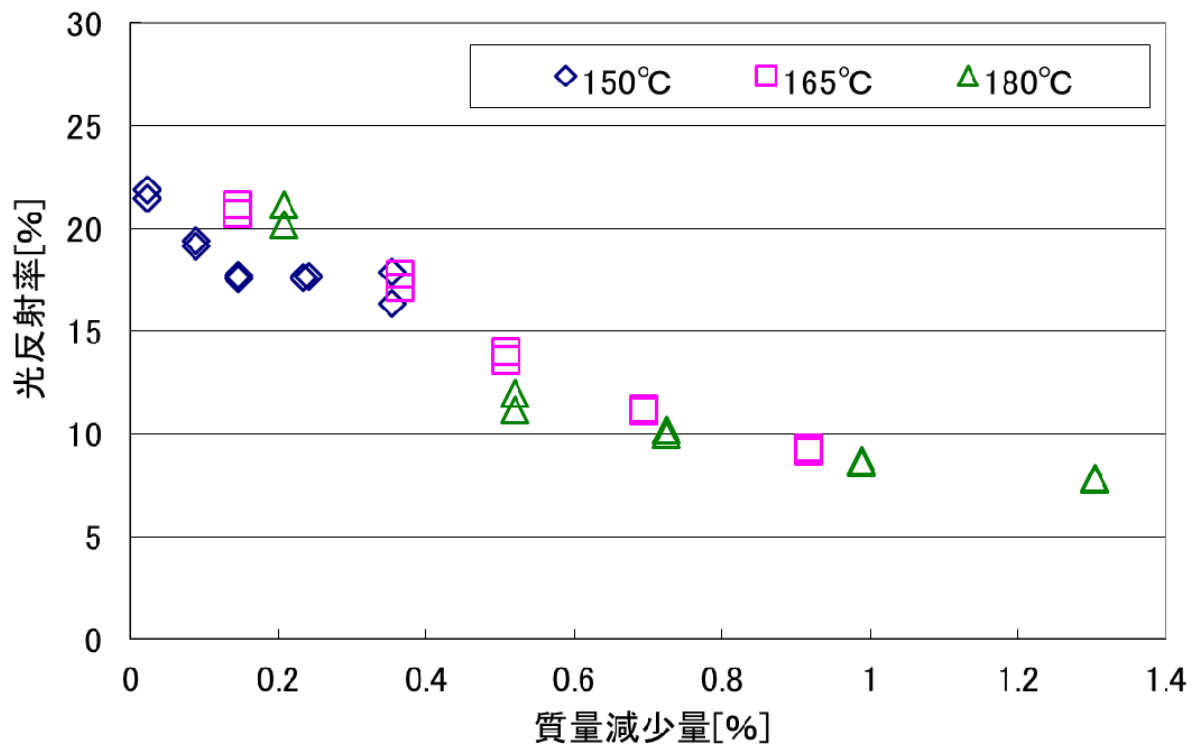


図 2-10 光反射率と質量減少の関係(短波長域:600nm)

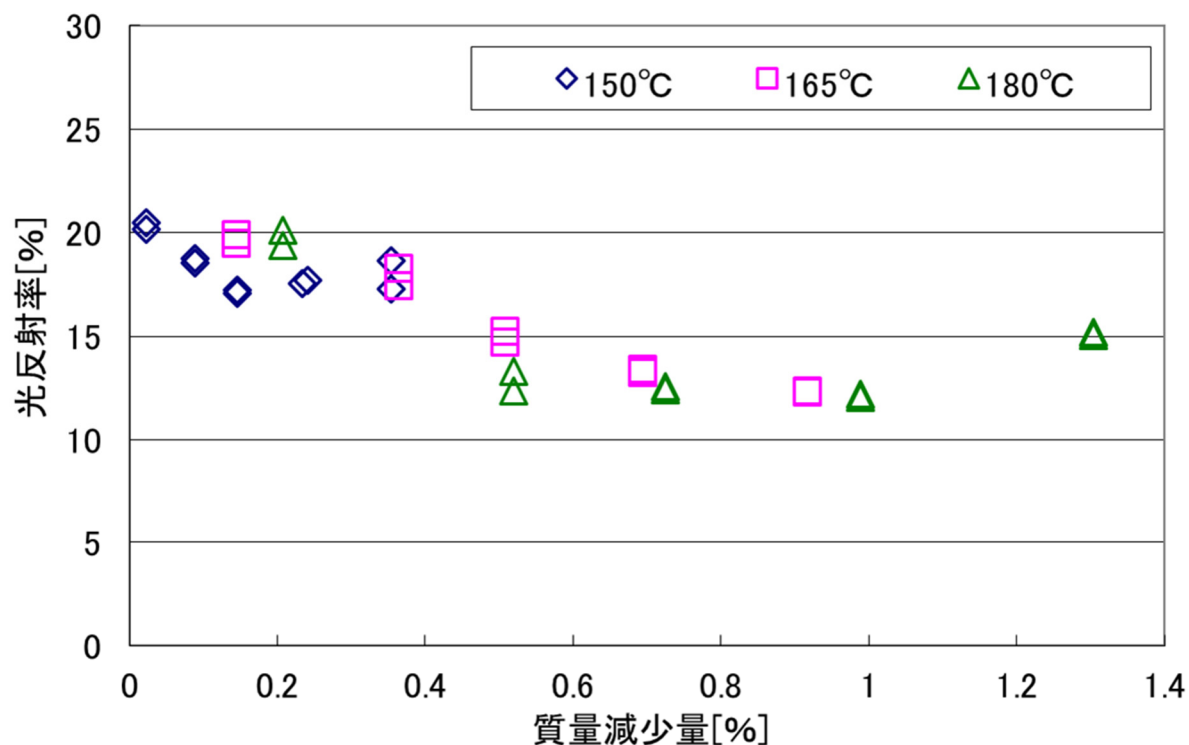


図 2-11 光反射率と質量減少の関係(長波長域:900nm)

光反射率は、短波長領域では質量減少に伴い一律に低下し、長波長領域では質量減少に伴い一定レベルまで低下したあとに再び上昇した。これは、樹脂表面が酸化・炭化して黒色化する傾向を短波長領域の直線的な光反射率低下、炭化後の表面組成変化を長波長領域の極小値を持つ曲線的な反射率低下、で捉えている。そのため、質量減少と長波長領域反射率の関係は、樹脂組成により個別の特徴を持つ。以上より、光反射率は質量減少と明確な相関があり、複数波長成分の光反射率を用いることで初期から寿命末期までの期間で質量減少を推定できる可能性がある。

(3) 超音波減衰

超音波減衰特性として^[2-8]、図 2-12 に示す計測装置で超音波の減衰時間と出力強度を測定した。

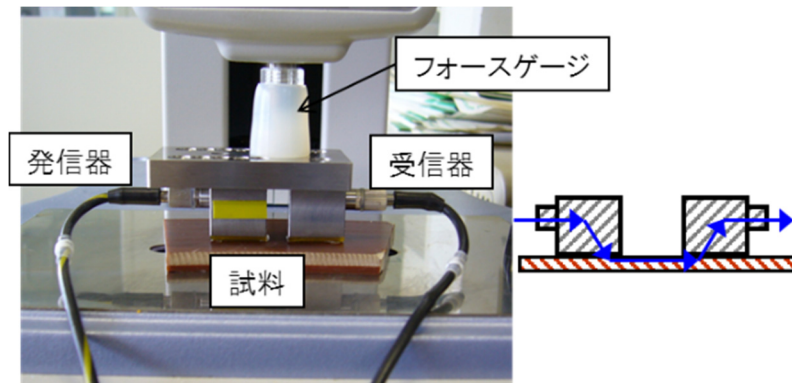


図 2-12 超音波減衰特性の測定装置

図 2-12 の測定装置では、対象試料に超音波の発信器と受信器をフォースゲージで一定荷重 5kg として押し付けて、超音波伝搬特性を測定した。超音波伝搬特性の種類として、波の種類に縦波と横波、伝搬方向に水平と垂直、がある。波の種類は、粒子の振動方向と波の振動方向の違いを示しており、今回は対象材料の表面状態による影響が小さい縦波を採用した。伝搬方向は、超音波発生源から対象物内部を伝搬する方向を示しており、今回は材料厚さの影響が小さい水平伝搬を採用した。この縦波水平伝搬波について、超音波伝搬特性として伝搬時間と出力強度を評価した。超音波センサにはジャパンプローブ株式会社製 2K5 (2MHz 斜角縦波)、発信器と受信器にはジャパンプローブ株式会社製 PR-100 を用いた。対向距離は 6.9mm として、発信器設定は電圧 100V のパルス幅 250nsec、受信器の周波数フィルタ範囲は 0.5~5.5MHz とした。測定結果として、伝搬時間と質量減少の関係を図 2-13 に、出力強度と質量減少の関係を図 2-14 に示す。

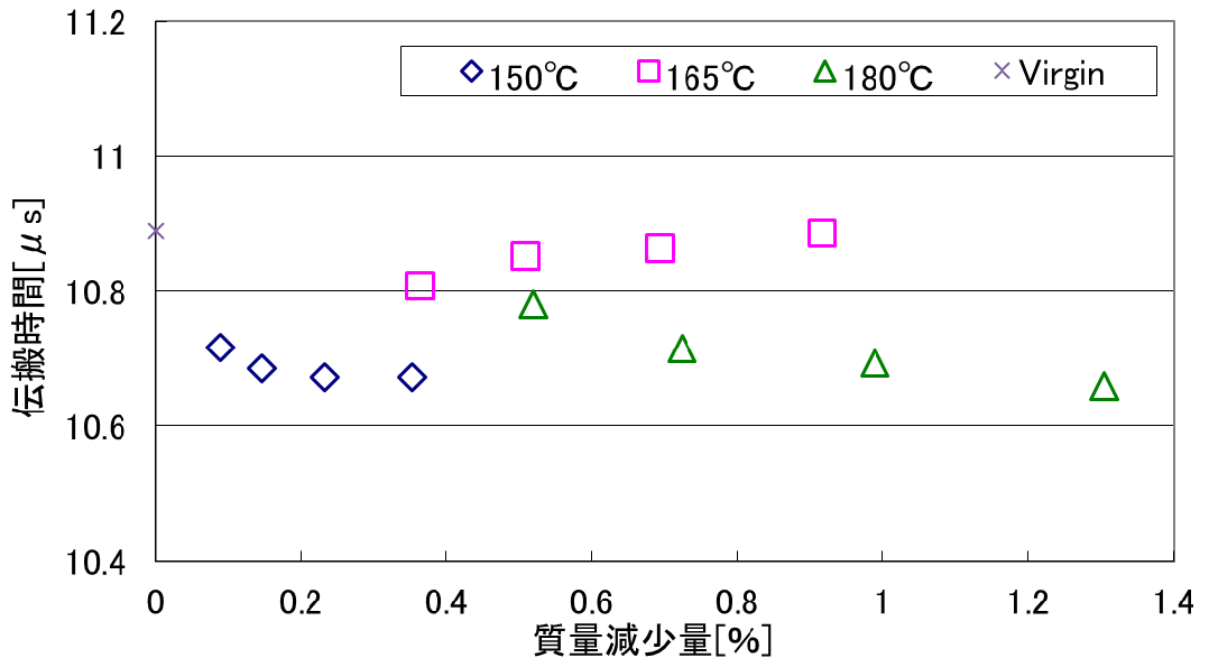


図 2-13 超音波伝搬時間と質量減少の関係

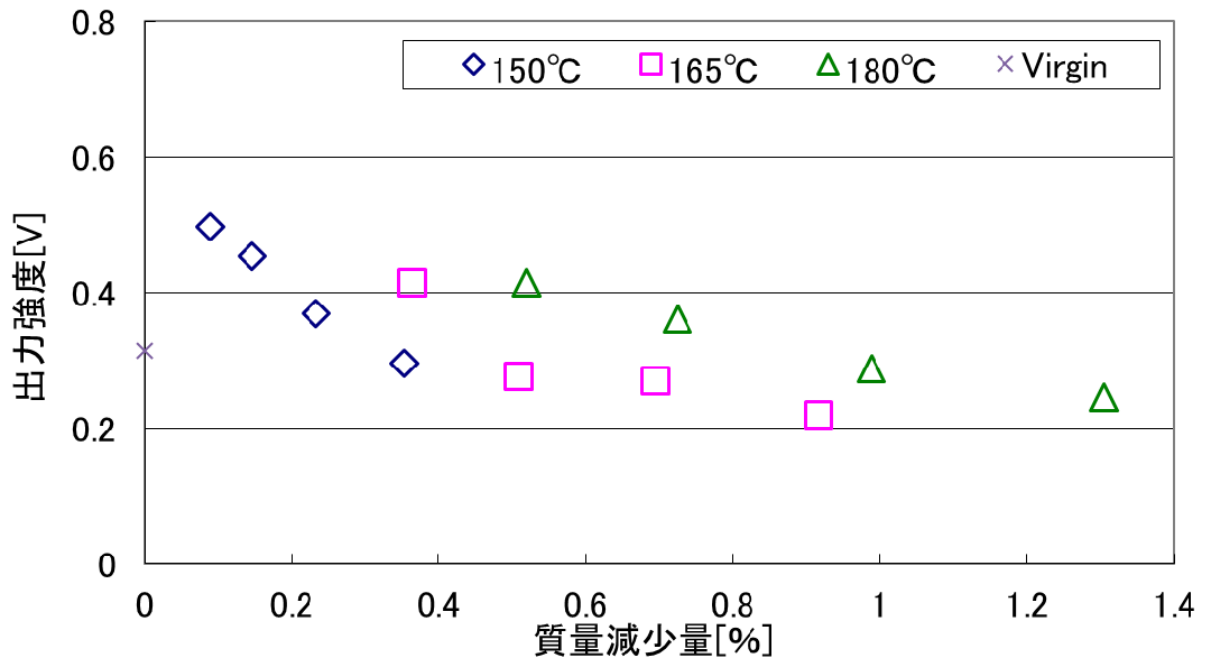


図 2-14 超音波出力強度と質量減少の関係

図 2-13 より、質量減少に依存して伝搬速度は変化しない。図 2-14 より、質量減少に伴い超音波減衰が大きくなる傾向を示した。しかし、劣化温度が異なる条件では質量減少と出力強度の関係性は一致しない。一致しない理由は、超音波信号は樹脂表面の酸化反応層よりも深い範囲にも伝搬しており、樹脂内部の硬化反応にも影響を受けたためと推測した。よって、超音波を用いた手法による劣化診断は困難と判断した。

(4) 硬度

硬度は、JIS 規格に準拠して、ビッカース硬度とショア硬度を測定した。ビッカース硬度と質量減少の関係を図 2-15、ショア硬度と質量減少の関係を図 2-16 に示す。

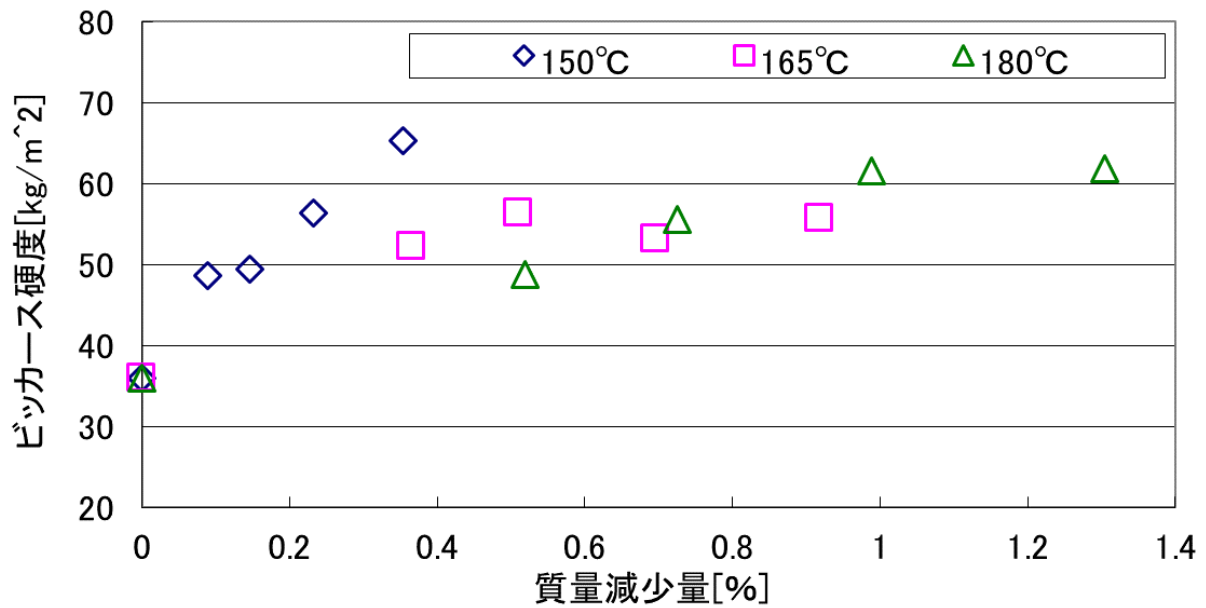


図 2-15 ビッカース硬度と質量減少の関係

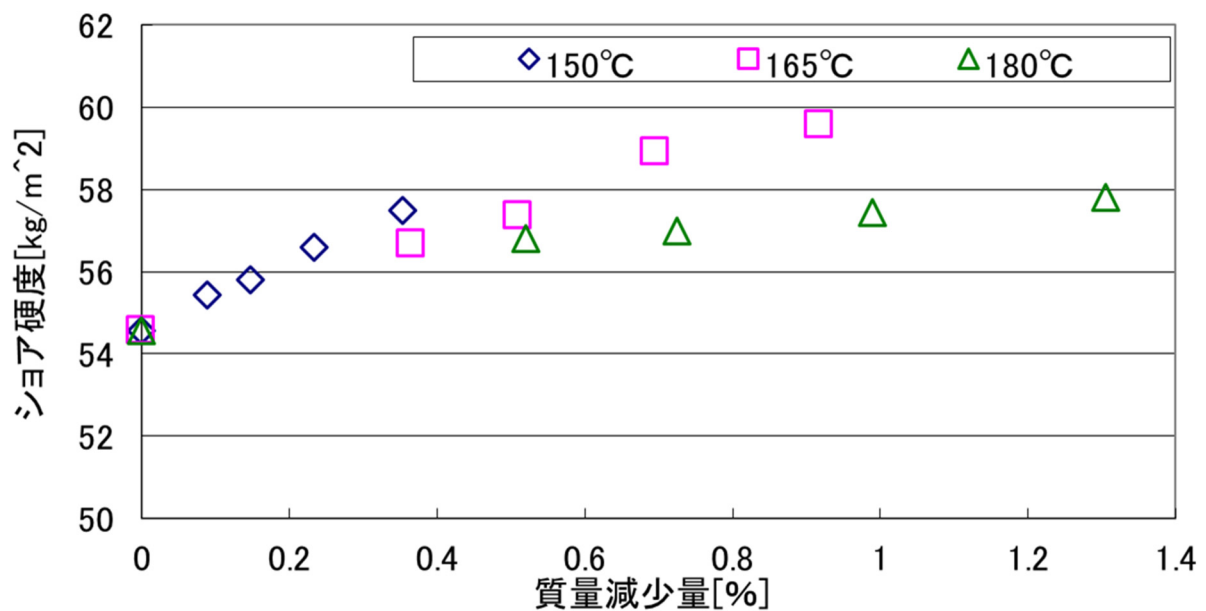


図 2-16 ショア硬度と質量減少の関係

図 2-15, 16 より、質量減少に伴い硬度は上昇す傾向を示したが、劣化温度が異なる条件では質量減少と硬度の関係は一致しない。一致しない理由は、硬度測定では樹脂全体の硬度を測定しており、樹脂表面の酸化反応に加えて樹脂内部の硬化反応の影響も受けるためと推測した。よって、硬度波を用いた手法による劣化診断は困難と判断した。

以上の検討結果から、質量減少量（熱劣化度）の非破壊評価には光反射率を用いることとした。まず、現地計測した光反射率から対象樹脂材の質量減少量を推定する式を作成するため、各樹脂における質量減少量と光反射率（500～900nm の複数波長成分）の相関データを取得した。この相関データを用いて、各年代のモールド変圧器用樹脂について光反射率から質量減少を算出する数式を作成した。ここで、実測した質量減少量と光反射率から推定した質量減少量の関係を図 2-17 に示す。

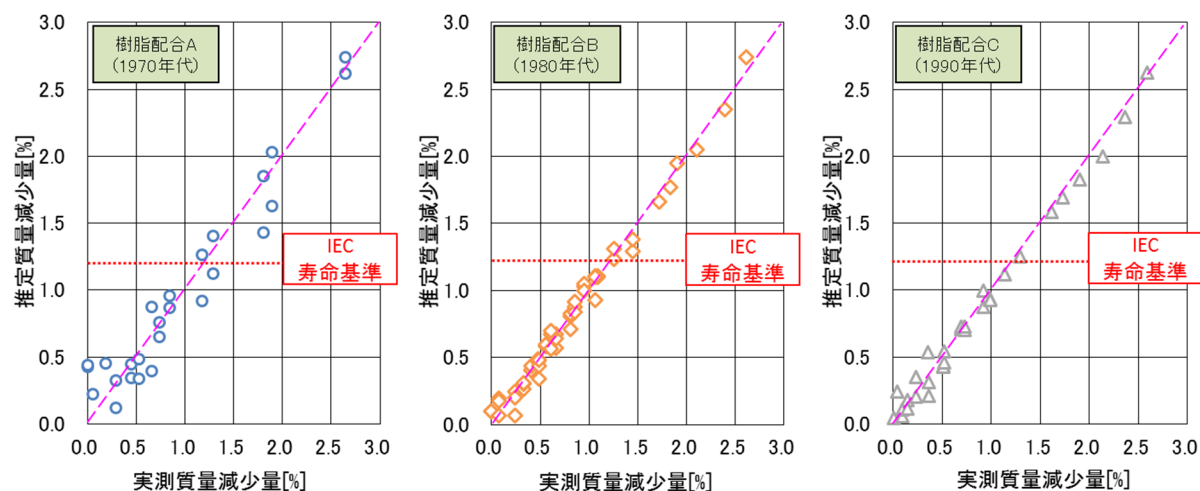


図 2-17 実測質量減少量と推定質量減少量の比較

図 2-17 より、どの年代の樹脂においても、質量減少量が小さい未劣化領域では多少の誤差があるが、質量減少量大きい劣化進展領域では誤差が小さくなる。未劣化領域の誤差は、繰返し測定による平均化処理で改善でき、未劣化品を劣化状態と誤検出する危険性は回避できる。また、劣化診断の主目的は事故を未然に防止することであり、より重要である劣化進展領域に対しては高い劣化診断精度を確保できている。

2.4.2 現地計測装置の開発

熱劣化度の計測装置として、図 2-18 に示す計測システムを開発した。

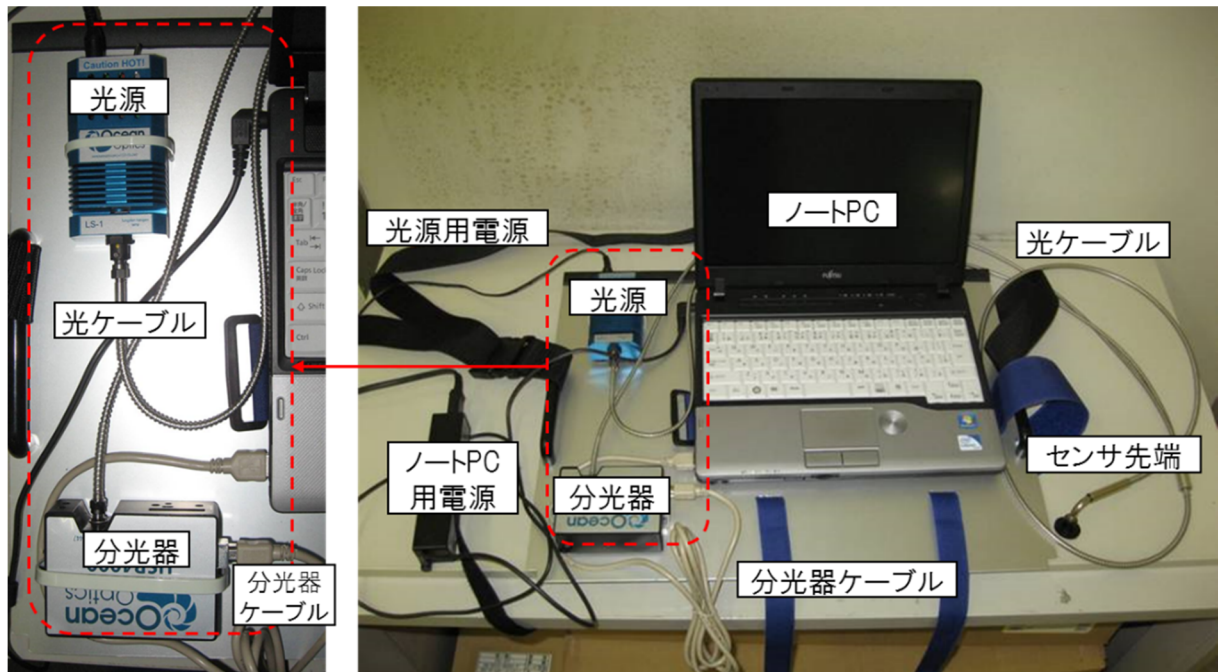
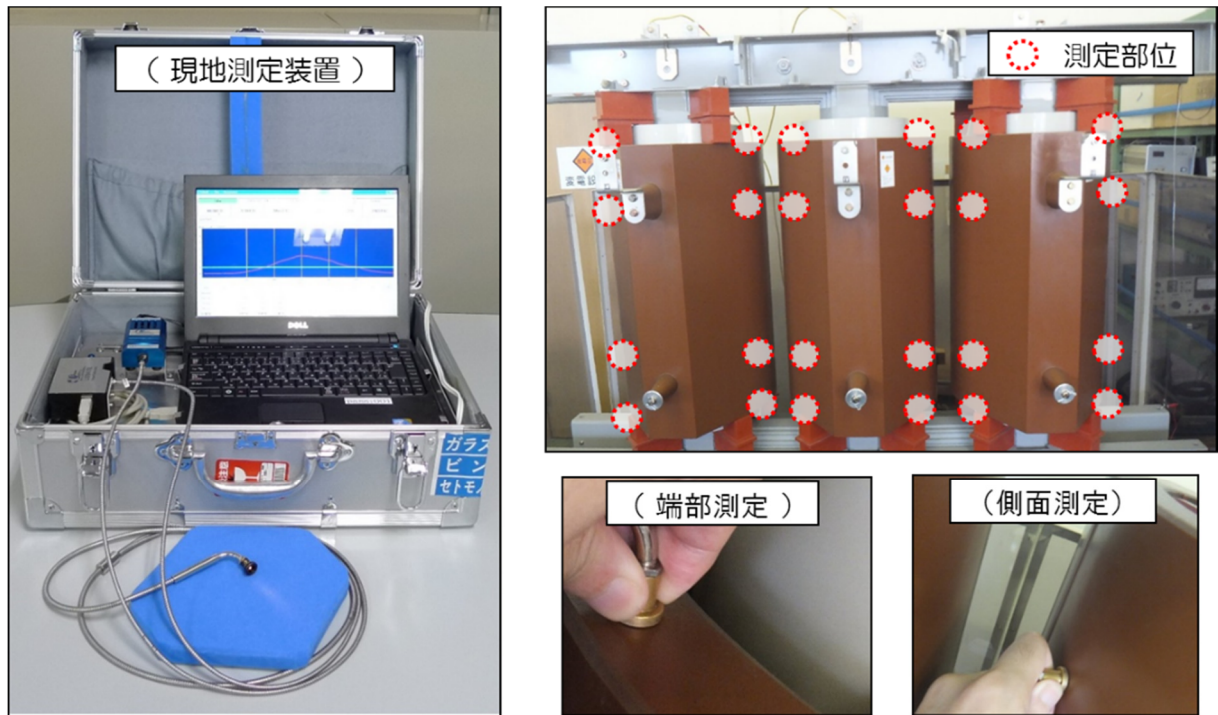


図 2-18 熱劣化度の計測システム

図 2-18 の計測システムでは、光源（オーシャンオプティクス社：LS-1 Tungsten Halogen Light Source）からの光線を光ケーブル経由でセンサ先端から出力し、その反射光を光ケーブル経由で分光器（オーシャンオプティクス社：USB4000 小型ファイバ光学分光器）に入射させる。分光器内で各波長（500, 600, 700, 800, 900nm）での光量を計測し、その計測結果からノート PC 内で各波長域の光反射率を算出する。ノート PC には、各種樹脂材での光反射率と質量減少量の相関式が入力されており、樹脂材を選択することで質量減少量が自動計算される。この計測システムをモールド変圧器用に改良して、実用化した現地計測装置とモールド変圧器に対する測定箇所を図 2-19 に示す。



(現地計測装置)

(モールド変圧器の計測箇所)

図 2-19 現地計測装置とモールド変圧器の測定箇所

図 2-19 の現地計測器は、アタッシュケースに組み込んで現場での持ち運び性を向上させている。モールド変圧器での測定箇所は、モールドコイルの両側面を上下方向に 4 分割とした。測定センサは、コイル相間のような狭いところでも測定できるように、L 字型に改良している。実際のモールド変圧器の測定事例を図 2-20 に示す。

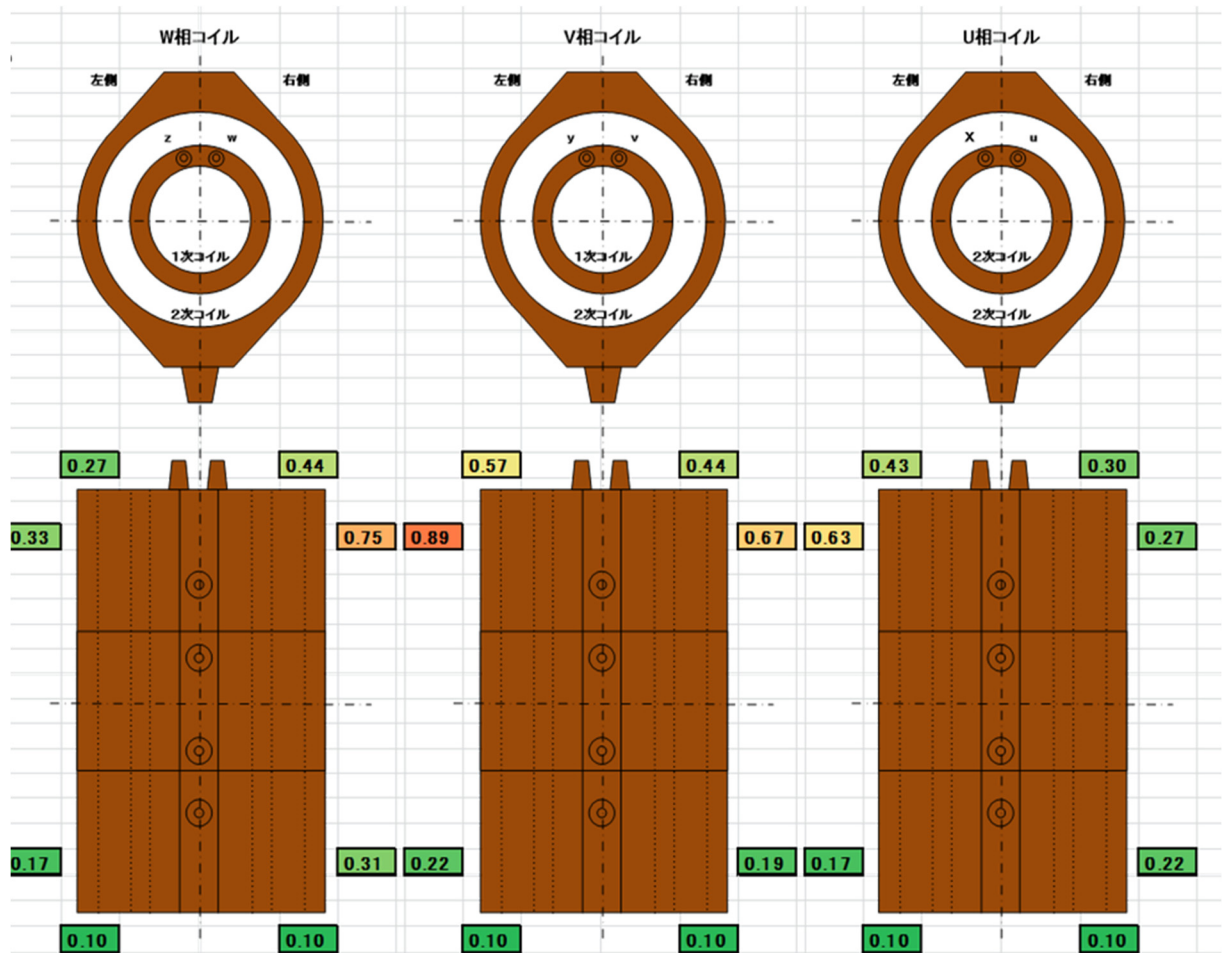


図 2-20 モールド変圧器の熱劣化度（質量減少量）の診断結果例

図 2-20 の測定結果では、モールドコイルの簡略化した上面図と側面図を示し、側面図の近傍には質量減少量の測定値 [%] を表記している。質量減少量を表記したセルの色は、初期状態の質量減少量 0.0% が緑色、寿命判定基準である質量減少量 1.2% が赤色で、カラーバー表示している。質量減少が大きい部位（セルの色が赤色に近い部位）は、基本的にコイル樹脂温度が高いところである。コイル横方向では、質量減少はコイル端部よりも熱がこもり易いコイル相間の方が大きくなる。コイル上下方向では、質量減少は熱が逃げにくいコイル上部の方が大きい傾向にある。ただし、強制風冷の場合には冷却流路によって、質量減少が大きい部位は変化する。

この光反射率を用いたモールド変圧器の樹脂劣化診断は、実フィールドで 600 件以上の診断実績がある。2017 年末時点において、診断したモールド変圧器の運転年数と質量減少量の関係を図 2-21 に示す。

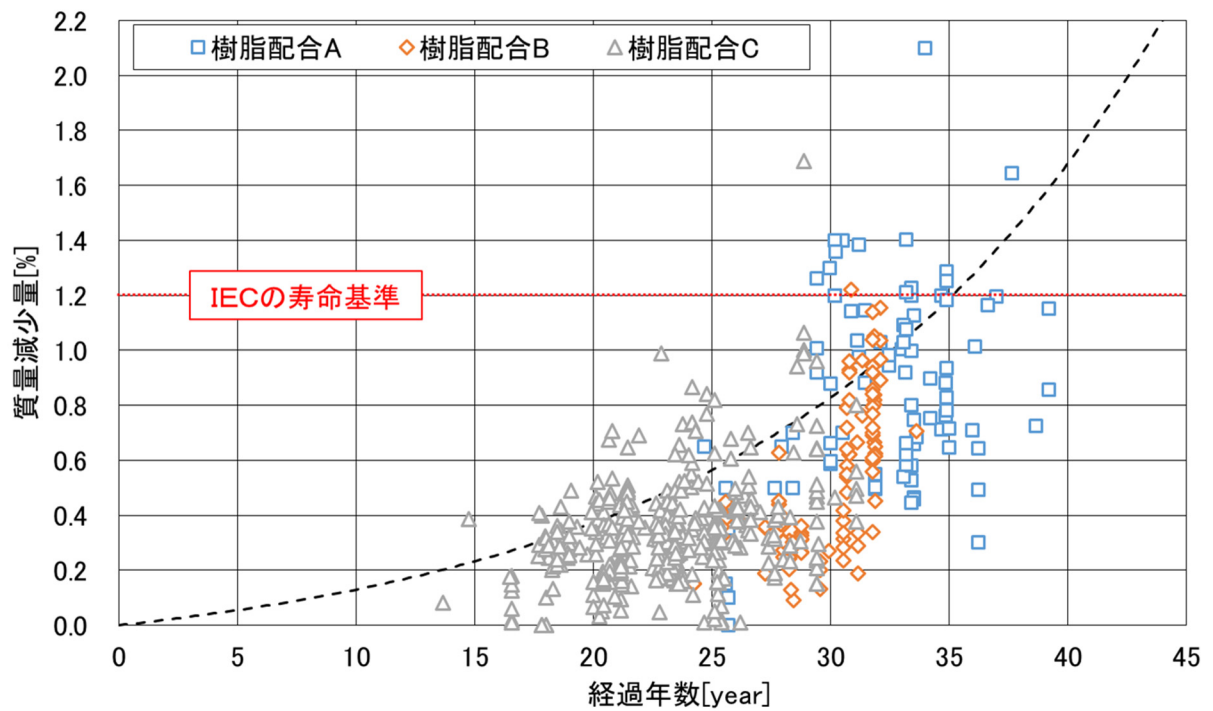


図 2-21 経過年数と質量減少量の関係

図 2-21 より、経過年数に伴い質量減少量は上昇していく傾向にあることがわかる。ただし、運転年数が同じでも質量減少量には大きな差があり、使用条件（樹脂温度）により熱劣化寿命は異なる。すなわち、本計測器で熱劣化度を監視することで、劣化が進んでいない設備は使用期間延長、劣化が進んでいる設備は故障防止対策、といった劣化状態に合わせた経済的な設備運用を提案することができる。

2.5 結言

熱劣化評価では、熱劣化原因が樹脂表面層の酸化劣化であることを明らかにして、光反射率を用いた熱劣化度の非破壊評価手法を開発した。熱劣化が樹脂内部に進展していないという知見は、構造設計や解析モデルにおける熱劣化部位は表層のみに設定すべきであることを示しており、構造の長期信頼性向上に関する製品開発に反映されることが期待できる。熱劣化原因が酸化劣化であるという知見は、樹脂表面層の酸化反応を抑制することで熱劣化が防げることを示しており、熱劣化対策の材料開発およびコーティング材開発に反映されることが期待できる。光反射率により熱劣化度を現地評価する装置を開発したことは、実フィールドで稼働中設備の熱劣化度を据え付け状態で評価することが可能となり、設備ユーザが劣化の進んでいない設備は使用期間延長、劣化の進んでいる設備は故障防止対策、といった劣化状態に合わせた経済的な設備運用を行うことに貢献できる。また、高経年機器における熱劣化部位と熱劣化度合いを把握することも可能となり、製造メーカーによる熱劣化耐性に優れた製品開発に反映されることが期待できる。

最後に、本章で得られた知見を下記にまとめた。

- (1) 注型絶縁物の熱劣化寿命は、IEC 基準により絶縁破壊電圧 50%低下と曲げ強度 50%低下と有機成分の質量減少 3%と規定した。モールド変圧器用注型樹脂で最も早く寿命を迎える特性は、熱加速劣化評価により質量減少量であることを明らかにした。
- (2) 窒素ページ下の熱加速劣化評価では質量減少量がほとんど変化しないことを明らかにして、熱劣化原因は絶縁物表面の酸化劣化であることを示した。
- (3) 材料表面研磨と FTIR-ATR 分析により材料深さと各吸収帯のスペクトル強度の関係を明らかにして、未劣化樹脂を示すスペクトル吸収帯 (1510^{-1}nm) の検出強度が残存する割合から熱劣化寿命時点の酸化進展度は表層 100 μm 程度であることを示した。
- (4) 絶縁物表面の非破壊検出手法として、質量減少量に伴う光反射率と超音波特性と硬度の変化を明らかにして、強い相関性を得た光反射率のスペクトル帯 (500~900nm) から質量減少量を推定することが可能であることを示した。
- (5) 光プローブと光源と分光器とノート PC を組み込んだ熱劣化評価装置を開発して、モールド変圧器各部の質量減少量を現地計測することを可能にした。現地計測結果として、温度上昇が高い部位で熱劣化度が大きく、同一樹脂で同一稼働年数の機体でも使用条件により熱劣化度は大きく変化することを示した。

第2章の参考文献

- [2-1] Tsunetaro Kujirai, Takeo Akahira “Effect of temperature on the deterioration of fibrous insulating materials”, Sci Papers Inst Phys Chem Res Tokyo, Vol.2, No.21, pp.223-252 (1925)
- [2-2] Thomas W. Dakin, “Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon” Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Vol.67(1) , pp.113-122 (1948)
- [2-3] “IEC 60216-2:2005 (Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials - Choice of test criteria) ” , (2005),
- [2-4] 柴野貴, “エポキシ樹脂の劣化とその対策”, 電気評論, Vol.63, No.11, pp.944-947 (1978)
- [2-5] 平石 次郎, “フーリエ変換赤外分光法 -化学者のためのFT-IR”, 学会出版センター(1985)
- [2-6] 大澤善次郎, 成澤郁夫, “高分子の寿命予測と長寿命化技術”, (株) エヌ・ティー・エヌ, (2002)
- [2-7] 片桐, 竹澤, 山中 “モールド変圧器の光診断法による熱劣化診断技術” ” 電気学会論文誌 A, Vol.123, No.7, pp67-662 (2003)
- [2-8] Mikio Fukuhara, Yoshiyuki Kuwano and Misao Oguri, “Determination of Thermal Degradation of Heated Polyvinyl Chloride using Diffracted SH Ultrasonic Waves” ,J.Appl.Phys, Vol.35-1, No.5B, pp.3088-3092 (1996)

第3章 部分放電劣化とその現地計測技術

3.1 緒言

注型絶縁物の主要な劣化モードである「熱劣化」「部分放電劣化」「汚損劣化」に対して、本章では部分放電劣化の現地計測技術について述べる。

第1章で解説した部分放電劣化モードとは、熱劣化や汚損劣化により絶縁欠陥が生じた後に、その絶縁欠陥部で部分放電が発生して、部分放電により周辺絶縁物が侵食されていくことである。注型絶縁物においては、出荷試験において部分放電試験が課されており、運転中での部分放電発生は基本的に許容されていない。厳密には、部分放電発生から絶縁破壊に至るまでにはある程度の時間を要するが、絶縁欠陥状態や部分放電モードによっては短時間で絶縁破壊に至る危険性もあり、本論文では運転電圧で部分放電が発生した時点を寿命状態として評価することとした。この部分放電発生有無を現地で正確に判定するためには、部分放電信号を外乱ノイズ信号と弁別して検出する必要がある。また、部分放電信号自体も発生源や発生原因ごとに弁別することが出来れば、設備保全対象を最小限に絞り込むことが可能となる。

本章では、各種部分放電モードを模擬した試料を製作し、部分放電発生に伴う電圧位相-電荷量特性 (Φ - Q 特性) と電流波形を評価した結果を述べる。この部分放電電流信号と外乱ノイズ信号の模擬波形をシミュレーションソフト上で再現して、ノイズ弁別に最適な計測条件およびデジタル信号処理手法を提案する。また、提案した部分放電信号のノイズ弁別手法に基づいて、現地計測装置を製作した結果についても述べる。

3.2 部分放電の模擬方法

3.2.1 部分放電の発生形態

部分放電とは、電極間を橋絡しない局所的な放電のことであり、複合絶縁システムにおける部分放電モードは「気中放電」「沿面放電」「内部放電」に分類される^[3-1,2]。部分放電の電極系は、部分放電空間の構成材料と物理的障壁で分類される^[3-3]。部分放電空間の構成材料の分類は、金属材料-放電空間-金属材料(Metal-Gas-Metal:MGM)、絶縁材料-放電空間-絶縁材料(Insulator-Gas-Insulator:IGI)、金属材料-放電空間-絶縁材料(MGI)、である。絶縁空間の物理障壁の分類は、密閉型と開放形である。以下に各部分放電の形態を説明する。

気中の部分放電とは、電極間空間が不平等電界である場合に、局所的な電界集中空間だけで生じる放電である。標準的な試験電極系は、針電極と平板電極を対向させた針-平板電極であり、変化させるパラメータは針電極の先端径や電極間距離や誘電体被覆有無である。最も一般的な開放空間での被覆なし針-平板電極であれば、開放型 MGM 電極に分類される。気中放電による劣化は、部分放電が開放空間であれば、絶縁媒体が循環するために殆ど発生しない。ただし、絶縁ガス（六フッ化硫黄(SF₆)など)を密閉した空間で気中部分放電が生じた場合には、分解ガスにより絶縁ガス組成が変化するという形態で、部分放電劣化が進展することとなる。

沿面の部分放電とは、異なる絶縁媒体間の境界面に沿って発生する放電である。試験電極系は、電気力線の向きと背後電極有無で分類される^[3-4]。電気力線の向きは、沿面放電進展方向に対して垂直型と平行型がある。背後電極の有無とは、沿面放電が進展する誘電体の裏面にある電極の有無である。代表的な電極系として、電気力線垂直型の背後電極ありは針-平板電極間に薄い誘電体を挟んだ電極系（IEC(b)電極）、電気力線平行型の背後電極無しは平板-平板電極間に一定の厚さを有する柱体の誘電体を挟んだ電極系、がある。この針-絶縁体-平板電極型は開放型 MGI 電極、平板-絶縁体-平板型は開放型 MGM 電極、に分類される。沿面放電による劣化は、部分放電が絶縁物表面に接触することで絶縁物を変質させていく^[3-5]。絶縁物を変質すると、沿面方向では放電が進展し易くなり(疑似トラッキング)、貫通方向へも放電が発生し始めていくこととなり(トリーイング)、最終的には絶縁破壊に至る。

内部の部分放電とは、固体もしくは液体の絶縁媒体で囲まれた空間で発生する放電である。試験電極系は、放電空間を構成する材料と放電発生部の空気循環有無で分類される。構成材料とは金属材料 or 絶縁材料、空気循環有無とは放電空間が外気から開放 or 密閉、を示している。代表的な電極系としては、内部にボイド状空隙を有する絶縁体を平板-平板電極間に挟んだ電極系、絶縁体の上面に針電極を挿入して下面に平板電極を取り付けた電極系（CIGRE Method I 電極）、がある。この内部空隙型は密閉型 IGI 電極、針電極挿入型は密閉型 MGI 電極、に分類される。内部放電による劣化は、部分放電が絶縁物と接触することで絶縁物を変質させていく^[3-6]。絶縁物を変質すると、空隙ボイドにピット状の侵食孔が形成され、一部ピットから電気トリーが発生・進展していき、最終的には絶縁破壊に至る。また、密閉型の内部放電の場合には、密閉内部の気体媒質も変質していく。空気などの酸素を含むガス中の放電では、オゾンや活性酸素原子や酸化窒素等が生成され、絶縁材料の酸化に伴って CO₂ や H₂O が発生することとなる。

3.2.2 部分放電の検出方法

部分放電検出手法として、大きく電気的手法と非電気的手法がある^[3-1]。電気的手法は部分放電電流に伴う電気的变化を捉える手法であり、非電気的手法は部分放電現象に伴う光・熱・音響・電磁波・圧力・化学変化を捉える手法である。電気的手法の一般的な特徴は、長所が全ての部分放電モードを検出可能で放電レベルを評価可能である点、短所が放電発生箇所の特特定が困難で外乱ノイズ信号の影響を受け易いという点、である。非電気的手法の一般的な特徴は、長所が外乱ノイズの影響を受け難い点と放電発生箇所を直接特定できる場合がある点、短所が検出出来ない部分放電モードがある点、放電レベルを間接的にしか評価できない点、である。本論文における部分放電検出の主目的は、部分放電発生有無を高感度に評価することであり、全ての放電モードが検出可能で、放電レベルを直接評価可能な電気的検出手法を採用することとした。

電気的手法による部分放電信号の検出は、一般的には下記の手順となる^[3-2]。

- ① 絶縁欠陥で部分放電が発生
- ② 放電発生箇所から部分放電電流が周囲に伝搬
- ③ 伝搬した部分放電電流をセンサで検出
- ④ 検出信号を A/D 変換してデジタル信号として記録
- ⑤ 記録したデジタル信号からノイズ信号を除去
- ⑥ ノイズを除去した信号から部分放電信号の特徴量を抽出

検出法の検討項目は、センサ、データ計測器、部分放電特徴量である。部分放電特徴量の主な項目には、放電電荷量 Q 、放電発生位相 Φ 、放電発生頻度 n がある。これらの特徴量を抽出するためには、部分放電電流波形を高感度かつ高分解能で計測する必要がある。放電に伴うパルス電流波形は、立ち上がり時間が数十 psec～数十 nsec であることが知られている^[3-7,8]。この立ち上がり電流波形を計測するためには SHF 帯域 (3～30GHz) の計測器が必要であるが、現在の計測技術では現地測定器には適用困難である。よって今回測定する放電電流波形は、立ち上がり波形以降の振動電流波形とした。この振動電流波形の周波数帯域は、放電電流の伝搬経路に依存しており、経験上は VHF 帯 (3～30MHz) あたりに落ち着くことが知られている^[3-9]。実験に用いるデータ計測器は、放電パルス電流波形の周波数帯域から、3dB 上限周波数は 100MHz 以上で、サンプリング周波数は 0.9GHz 以上、を要求仕様とした。センサは、電流計測用の広域高周波 CT と、電圧計測用の電圧プローブを用いた。CT の周波数特性は、部分放電電流波形の周波数帯域から、3dB 下限周波数は 30kHz 以下で、3dB 上限周波数は 300MHz 以上、を要求仕様とした。

3.2.3 部分放電発生試料

前節までの検討結果を元に、図 3-1 に示す各種部分放電モードを模擬した試料を製作した。

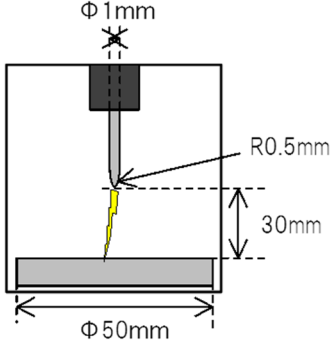
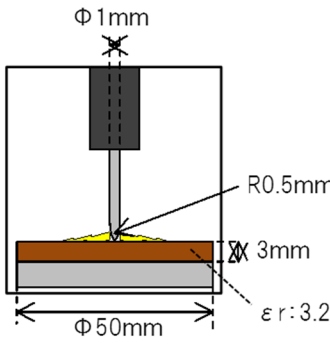
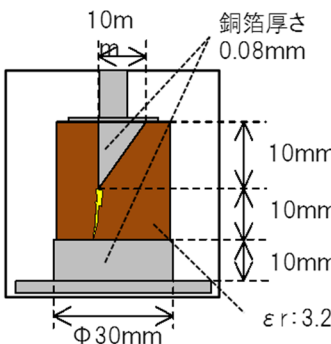
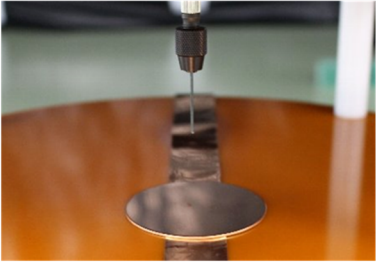
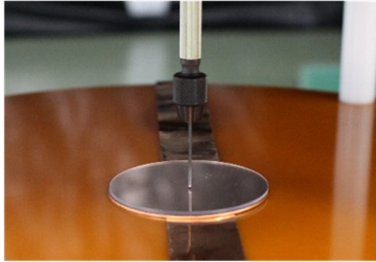
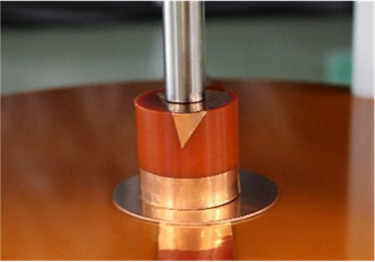
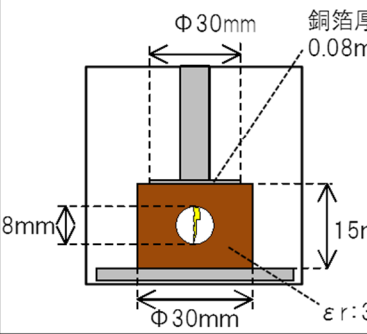
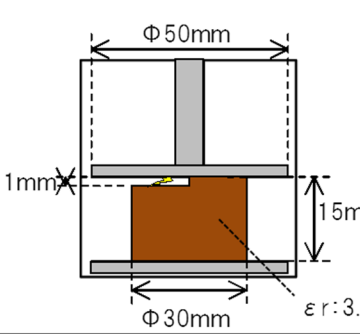
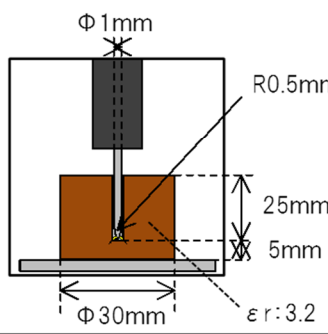
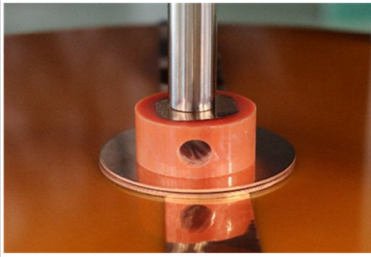
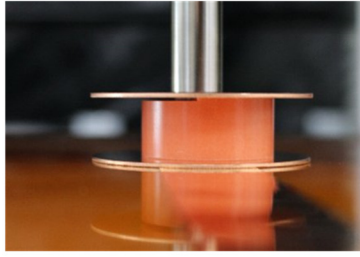
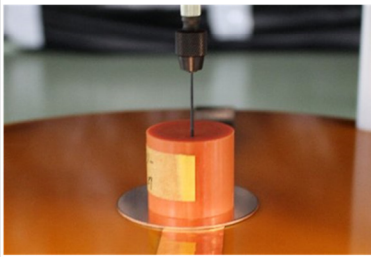
<p><PD試料1></p>	<p><PD試料2></p>	<p><PD試料3></p>
<p>気中放電_針-平板</p>	<p>沿面放電1_針-平板</p>	<p>沿面放電2_(円筒側面)</p>
		
		
<p><PD試料4></p>	<p><PD試料5></p>	<p><PD試料6></p>
<p>ボイド放電</p>	<p>剥離放電</p>	<p>トリ-放電</p>
		
		

図 3-1 各種部分放電モード試料の寸法と外観写真

PD 模擬試料の構成部材は、針電極はタングステン鋼、その他電極は銅、誘電体材料はエポキシ樹脂（比誘電率 3.2）を使用した。各試料の寸法は、印加電圧 6.6kVrms 以下で安定した部分放電が発生するように調整した。これらの PD 試料の詳細と電極分類を下記にまとめて示す。

PD 試料 1: 気中放電を模擬した針-平板モデル(開放型 MGM 電極)

PD 試料 2: 沿面放電を模擬した針-被覆平板モデル(開放型 MGI 電極)

PD 試料 3: 沿面放電を模擬した円筒絶縁物表面に箔導体を貼り付けたモデル(開放型 MGM 電極)

PD 試料 4: ボイド放電を模擬した円筒絶縁物に内部空隙を設けたモデル(密閉型 IGI 電極)

PD 試料 5: 剥離放電を模擬した平板電極と円筒絶縁物に隙間を設けたモデル(開放型 MGI 電極)

PD 試料 6: トリー放電を模擬した円筒絶縁物に針電極を埋め込んだモデル(密閉型 MGI 電極)

3.3 部分放電試料の特性評価

3.3.1 部分放電特性の測定方法

部分放電測定の実験回路を図 3-2、試験状況を図 3-3 に示す。

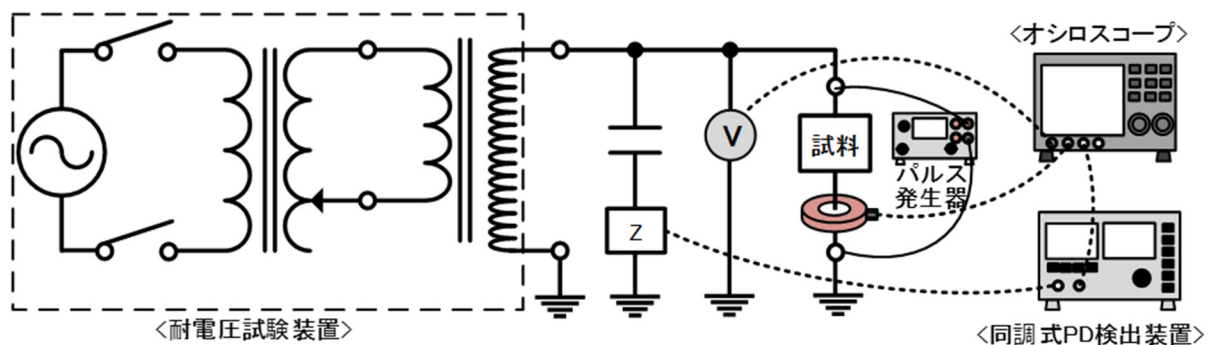


図 3-2 部分放電測定回路

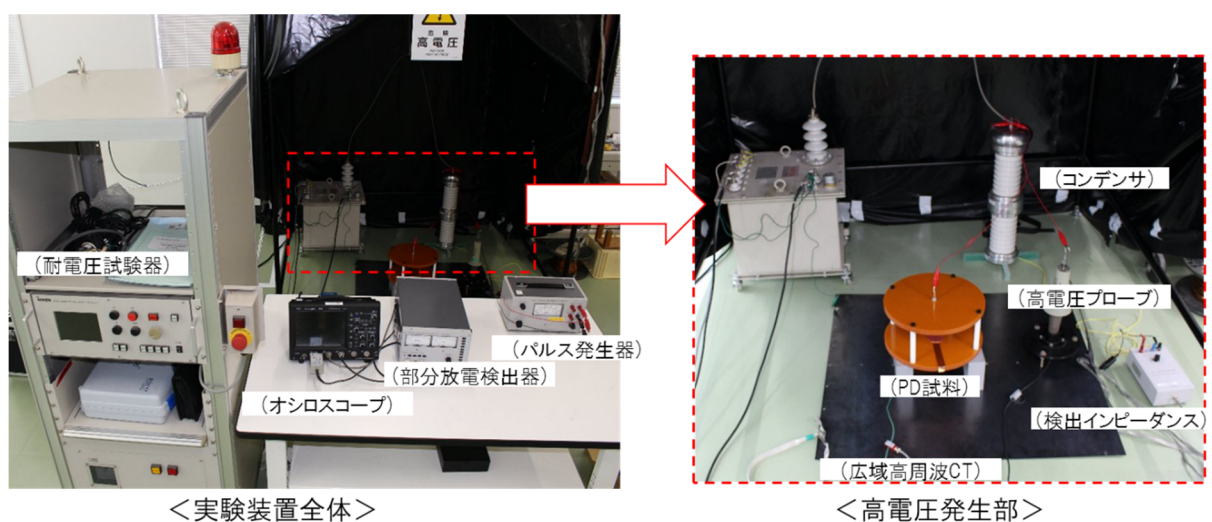


図 3-3 部分放電測定状況

部分放電試験を行う前に、同調式 PD 検出装置（日本計測器製作所製、品名：CD-6）とパルス発生装置（日本計測器製作所製、品名：NPG-2、仕様：電流立ち上がり時間 30nsec）を用いて、本測定系の電荷量校正を実施した。そのあとに、耐圧試験装置（総研電機製、品名：DAC-WTC-1、仕様：15kV-1kV）で試験試料に電圧を印加して、同調式 PD 検出装置の出力をトリガとして、試験試料から接地線に流れる部分放電電流を検出した。電圧波形は、試験試料と並列に結合コンデンサ（仕様：静電容量 1000pF、電圧 DC40kV）と電圧プローブ（Tektronix 製、品名：P6015A、仕様：帯域 DC~7.5MHz、静電容量 3.0pF、電圧 40kVpeak）を取り付けて検出した。電流波形は、試験試料と直列に広域高周波 CT（MagneLab 社製、品名：CT-C5.0-BNC、仕様：帯域 4.8k~400MHz）を取り付けて検出した。検出波形は、オシロスコープ（LECROY 社製、品名：Wavejet324A、仕様：帯域 200MHz 以下、最高サンプリング周波数：2GHz）にて記録した。オシロスコープの設定は、 Φ -Q 特性測定時は Peak-hold 検出モード/サンプリング周波数 1.0GHz、部分放電電流測定時は Normal 検出モード/サンプリング周波数 1.0GHz として、各試験試料で部分放電発生時の電圧波形と電流波形を計測した。

3.3.2 部分放電モードと部分放電特性の関係

(1) 部分放電信号の計測結果

パルス発生装置と各種 PD 模擬試料について、印加電圧-放電電荷量特性（ Φ -Q 特性）と部分放電電流波形を図 3-4~10 に示す。

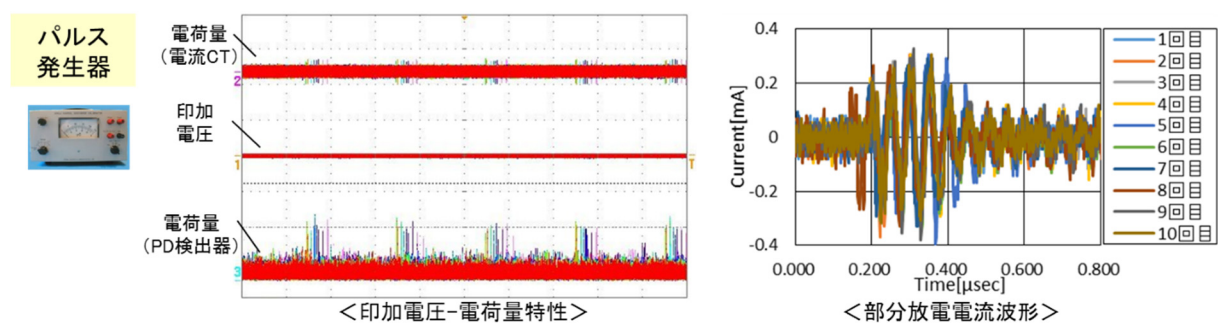


図 3-4 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（パルス発生器）

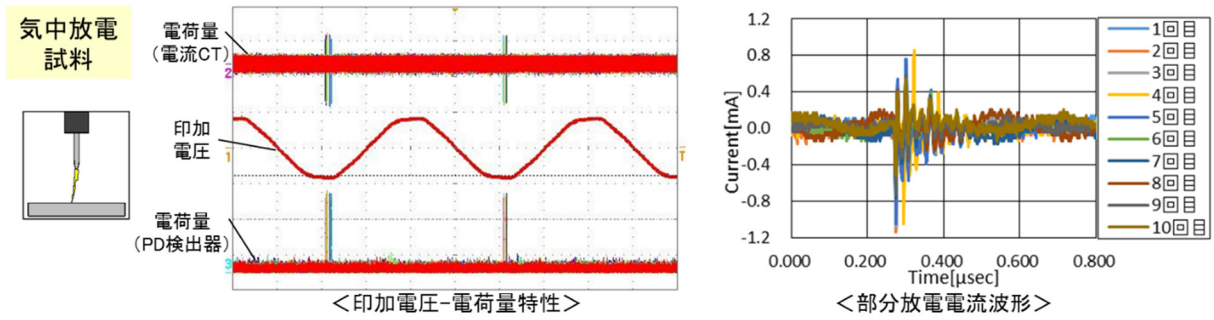


図 3-5 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（気中放電試料）

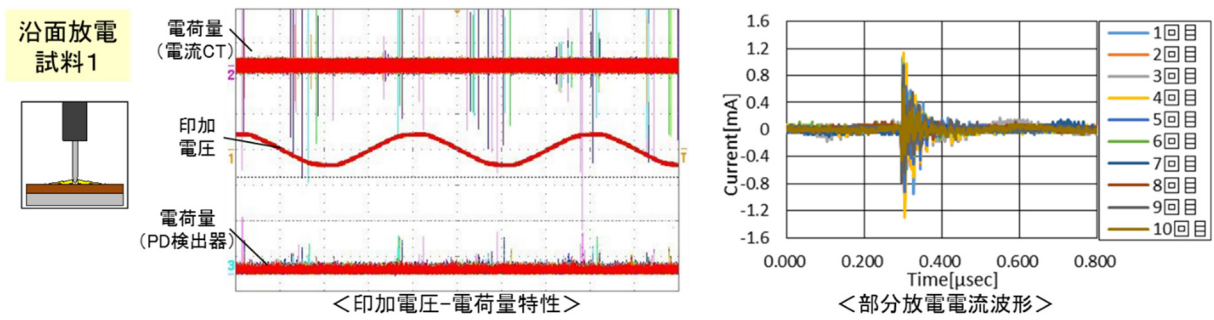


図 3-6 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（沿面放電試料 1）

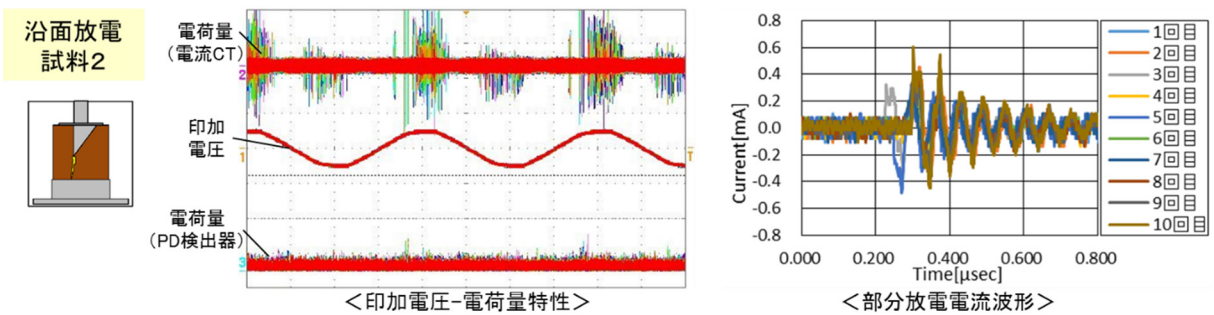


図 3-7 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（沿面放電試料 2）

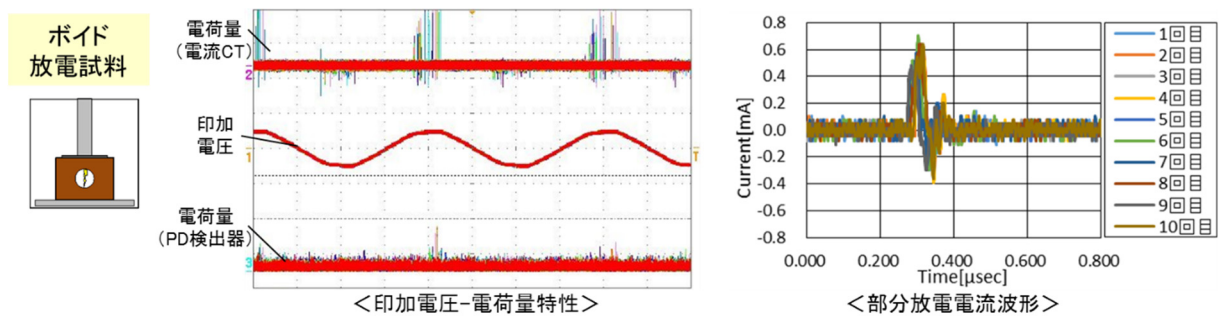


図 3-8 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（ボイド放電試料）

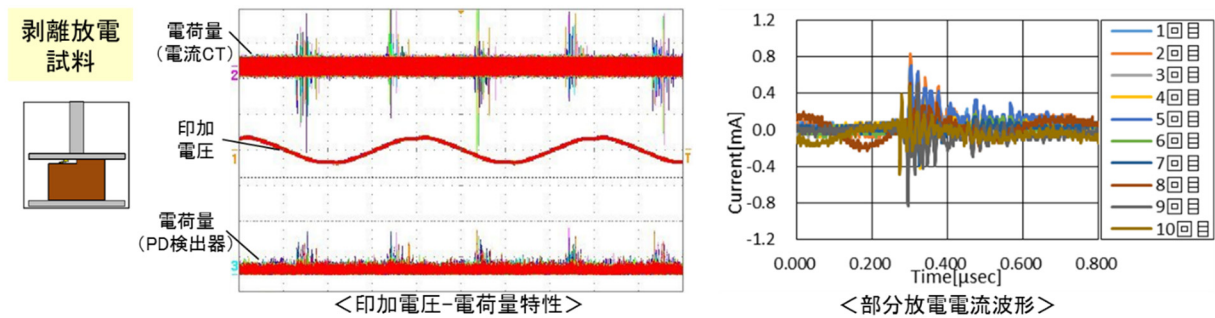


図 3-9 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（剥離放電試料）

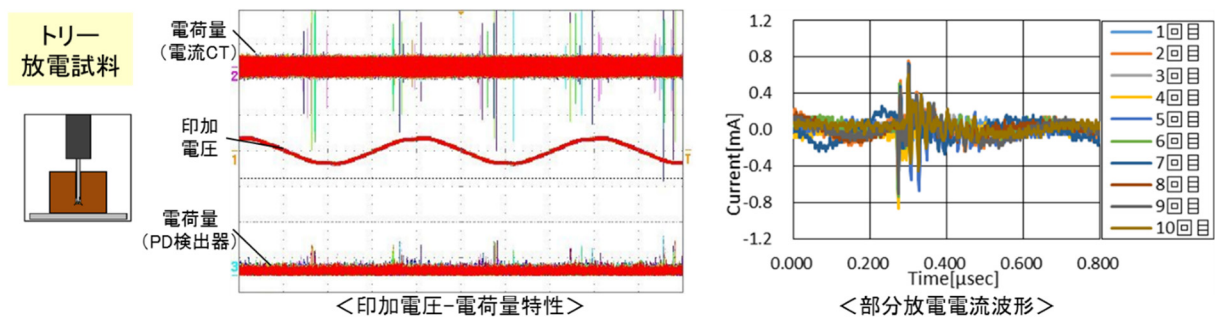


図 3-10 電圧位相-電荷量特性と部分放電電流波形（トリー放電試料）

図 3-4～10 の<印加電圧-電荷量特性>において、上段が高周波 CT で電流を検出した電荷量信号、中段が高電圧プローブで電圧を検出した印加電圧信号、下段が同調式 PD 検出器でパルス電流を検出した電荷量信号、である。表示波形は 2 秒間のパーシタンスモードで重ね書きしたものであり、周期的に発生して頻度が高い信号は赤色、頻度が低い信号は青色、で表示されている。全てのモードで、同調式 PD 検出器と同期して高周波 CT で高周波電流が検出されており、本高周波 CT にて部分放電電流が計測可能と判断した。また、電圧位相に対して部分放電が発生するタイミングは、基本的には電圧ピーク付近である。ただし、各 PD 模擬試料によって部分放電が発生する位相には特徴があり、その特徴はパーシタンス波形からも繰り返し再現性があることがわかる。

図 3-4～10 の<部分放電電流波形>においては、同調式 PD 検出器と同期検出した電流波形を 10 回分表示した。部分放電に伴う電流波形は全て減衰余弦波波形であり、各 PD モードで繰り返し再現性のある波形であるという特徴を有した。

(2) 部分放電信号の識別方法

部分放電の発生モード識別手法として、従来の Φ -Q 特性^[3-3,10]を用いた識別と部分放電電流波形を用いた識別^[3-11~13]を検討した。

(a) Φ -Q 特性による弁別

Φ -Q 特性とは、印加電圧位相 Φ と部分放電電荷量 Q の関係性を示したもので、部分放電モードによって異なることが知られている。各種 PD 試料の標準 Φ -Q 特性として、実測した Φ -Q 特性の 2,500 周期分(1 測定あたり 25 周期で 100 回測定)を重ね書きして、各位相での最大電荷量を正規化プロットした図を図 3-11 に示す。

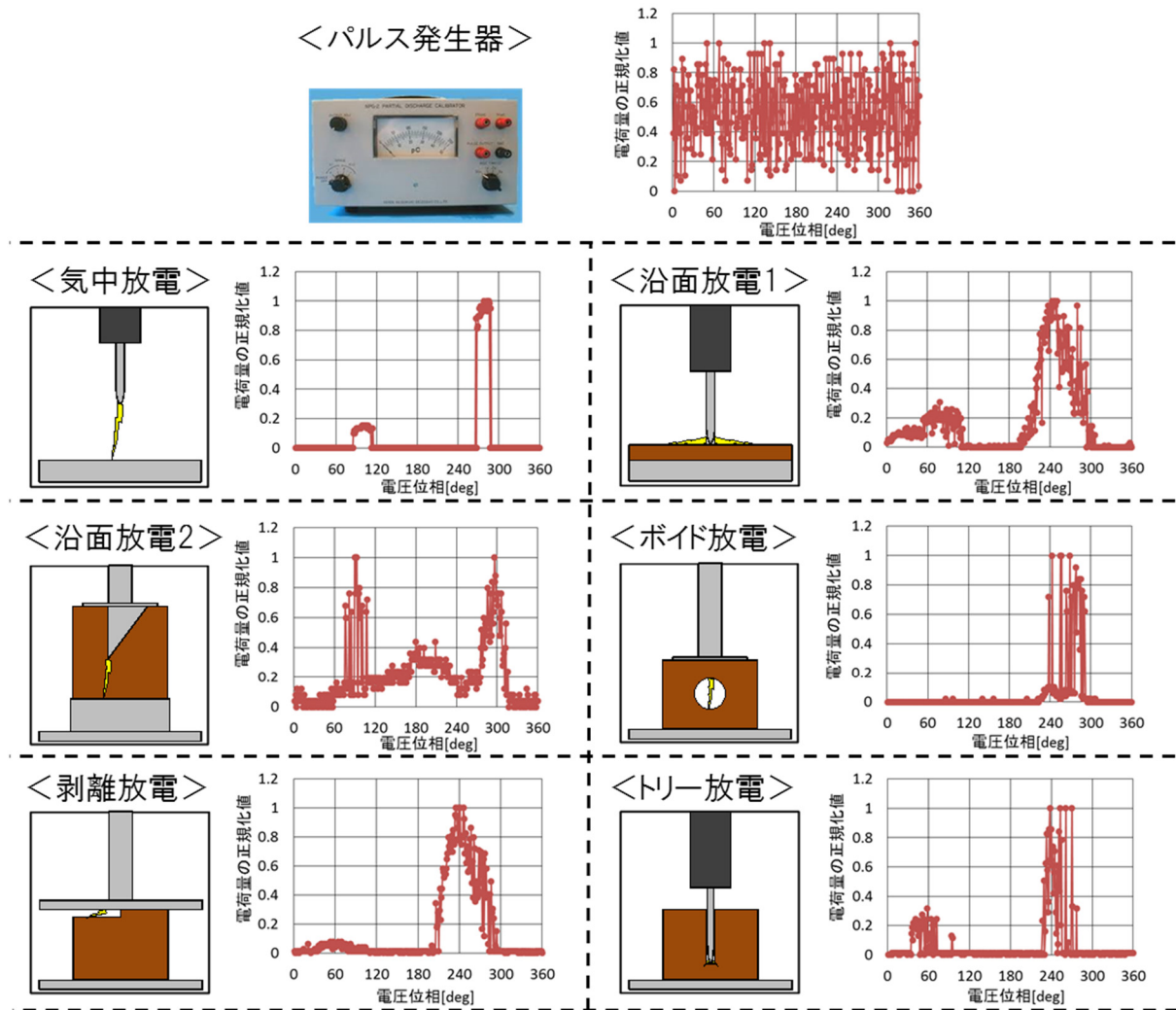


図 3-11 各種 PD 試料の Φ -Q 特性の標準形状

部分放電信号ではないパルス発生器の Φ -Q 特性は、電圧位相に対して極大値を持たないパターンとなる。部分放電信号の Φ -Q 特性は、電圧ピーク位相（正のピークは 90deg、負のピークは 270deg）の周辺で極大値を持つパターンとなる。この Φ -Q パターンの違いを用いて、ノイズ信号と部分放電信号を弁別している。部分放電モードの弁別では、 Φ -Q 特性で電荷量が最大となる位相や電荷量が検出させる位相範囲を基に判断している。ここで、図 3-11 の Φ -Q 特性を辞書データとして、異なる部分放電モードとの一致度を各位相での絶対値差分総和で評価した結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 Φ-Q 特性の辞書データを用いた PD モード間の一致度評価結果

	パルス発生器	気中放電	沿面放電1	沿面放電2	ボイド放電	剥離放電	トリー放電
パルス発生器	0.00	8.45	5.85	4.60	6.30	5.68	7.08
気中放電	8.45	0.00	2.65	3.99	2.64	2.81	1.61
沿面放電1	5.85	2.65	0.00	2.76	1.60	0.73	1.32
沿面放電2	4.60	3.99	2.76	0.00	3.13	2.78	4.07
ボイド放電	6.30	2.64	1.60	3.13	0.00	1.83	1.91
剥離放電	5.68	2.81	0.73	2.78	1.83	0.00	1.54
トリー放電	7.08	1.61	1.32	4.07	1.91	1.54	0.00

表 3-1 より、同一信号源は完全一致のため 0 となり、異なる信号源間では Φ-Q 特性パターンが近いほど値が 0 に近づく。電圧位相に対してランダム信号となるパルス発生器に対しては、全ての部分放電モードで値が 4.5 以上となり、明確に識別できる。部分放電モードも数値上は判別できており、Φ-Q 特性パターンの辞書データを蓄積することにより、部分放電モードを統計的に識別できる可能性がある。

(b) PD 電流波形

各種 PD モードで実測した標準的な部分放電電流波形を図 3-12 に示す。

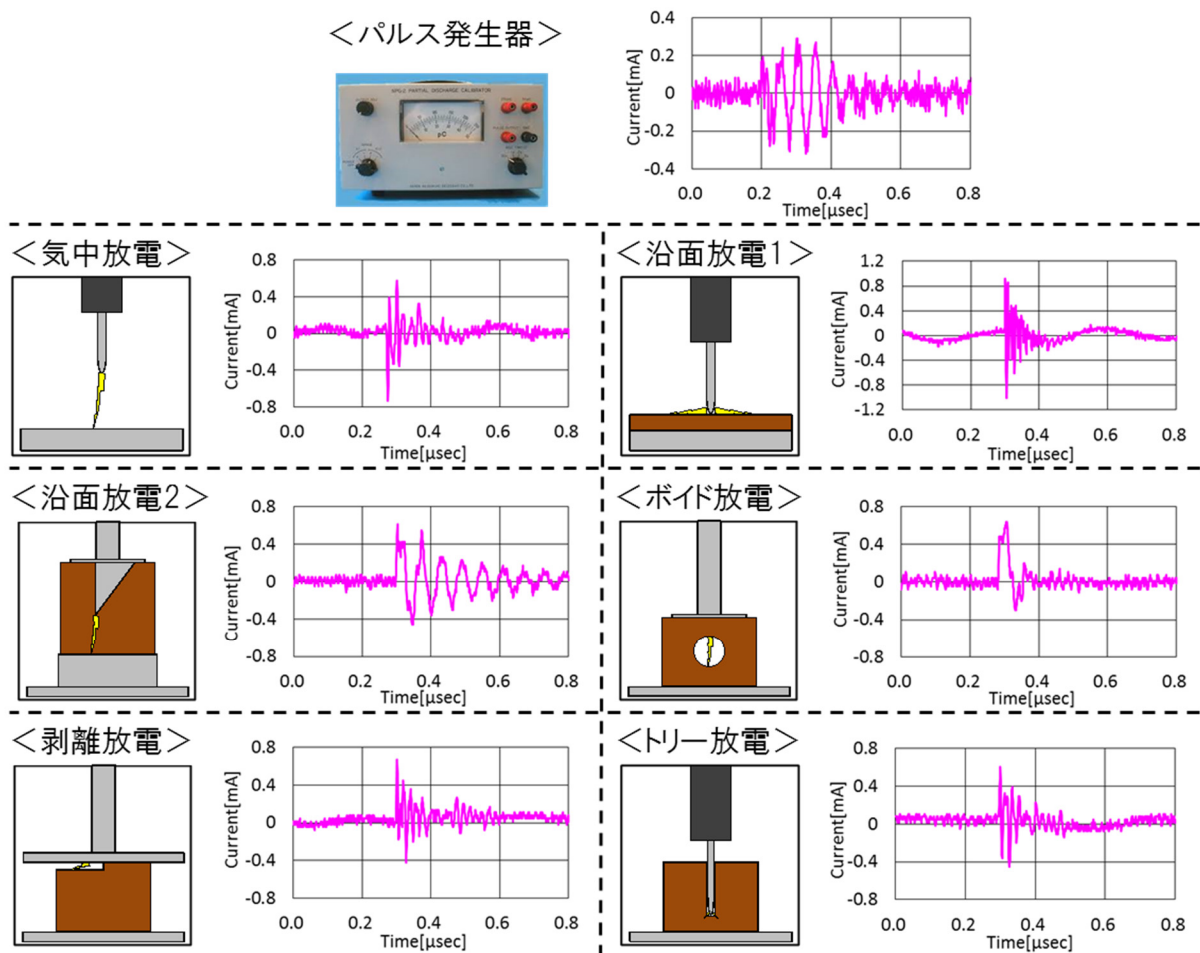


図 3-12 各種 PD モードの部分放電電流波形

図 3-12 に示した通り、PD 電流波形は余弦波減衰波形となることがわかった。この PD 電流波形を考察するため、図 3-13 に示す PD 現象の等価回路モデル (Whitehead モデル) を用いた。

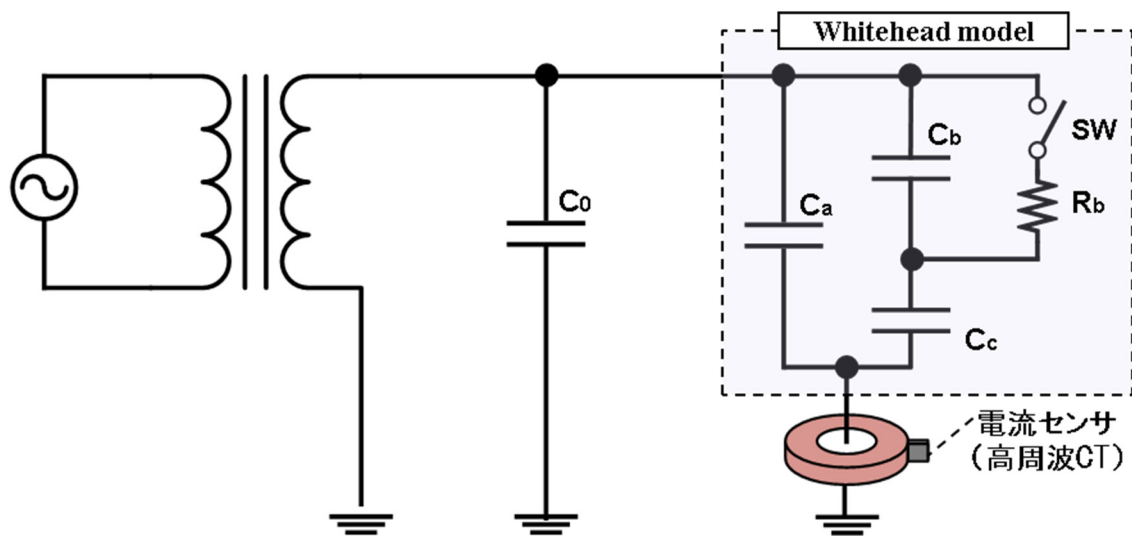


図 3-13 PD 現象の等価回路モデル

Whitehead モデルでは、部分放電が発生する試料を 3 つのキャパシタンスでモデル化する。各キャパシタンスは、 C_b は放電発生部位のキャパシタンス、 C_c は C_b と直列成分のキャパシタンス、 C_a は C_c 、 C_c と並列なキャパシタンス、である。このモデルでは、PD 発生はスイッチ SW が ON になることで表現され、 C_b に蓄えられた電荷が放出される。放出された電荷は、試料内部では放電発生部の抵抗 R_b と C_a 、 C_c での閉回路電流となり、試料外部では試料自身および試料周辺の L との RLC 共振電流となる。電流センサではこの RLC 共振電流を検出しており、PD 電流波形はスイッチ SW による急峻な立ち上がりを持つ余弦波状の減衰振動波形になったと考察した。この PD 電流波形が PD モードにより異なるのは、PD 試料の回路定数 C_a 、 C_b 、 C_c 、 R_b が異なるためである。そこで、PD 電流波形の特徴量として、周波数帯域と減衰振動回数に着目した。周波数帯域は LC 共振周波数となるため、主に配線の L と試験試料の C に依存する。減衰振動回数は減衰時間 ÷ 振動周期となり、減衰時間は主に振幅値と抵抗成分 R に依存する。よって、周波数帯域と減衰振動回数は PD 試料の等価回路定数と相関があり、PD モードを分類できる可能性があると考えた。ここで各 PD モードの部分放電電流波形について、周波数帯域と振動回数の関係を図 3-14 に示す。

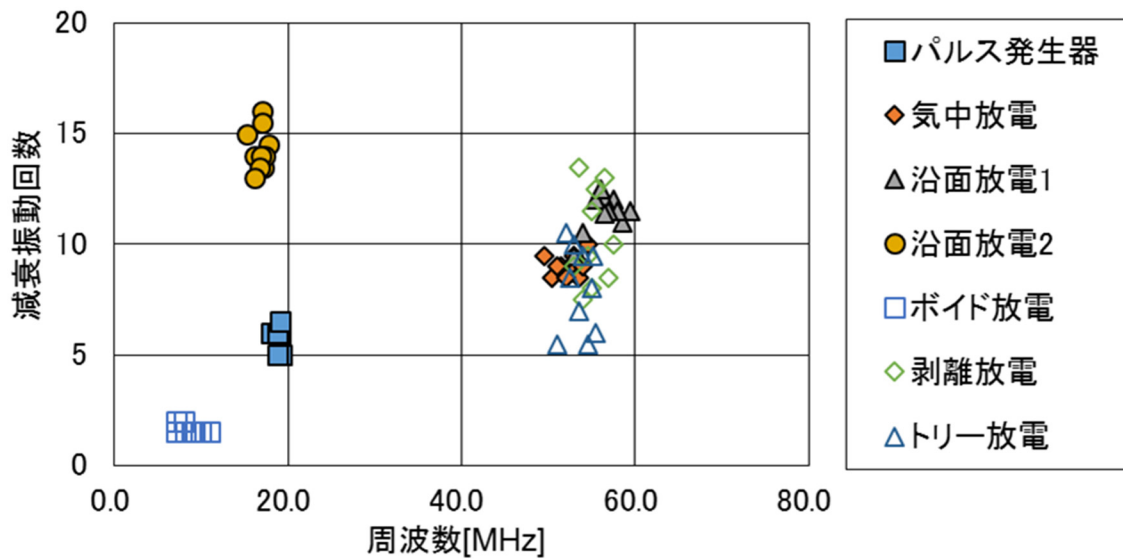


図 3-14 部分放電電流波形の周波数帯域と振動回数

周波数帯域は、8～11MHz 帯がボイド放電、15～17MHz 帯が沿面放電 2、19MHz がパルス発生器、48～61MHz 帯がその他放電、となった。パルス発生器は、配線を追加した影響で L 成分が増加して低周波数帯域になったと推測する。沿面放電 2 とボイド放電は、電極の表面積が大きいため C 成分が増加して低周波数帯域になったと推測する。同様に高压電極の表面積が大きい剥離放電で周波数帯域が低くならなかったのは、高压電極-エポキシ樹脂間に隙間が生じて、C 成分が理想形状ほど大きくならなかったためと推測する。よって周波数帯域が低いほど、放電部位の C 成分が大きい条件（電極表面積が大きくてギャップ長が短い）を示していると推察した。減衰振動回数は、1.5～2 回がボイド放電、13～16 回が沿面放電 2、5～13 回がパルス発生器とその他放電、であった。沿面放電 2 は減衰時間が顕著に長く、放電経路である円筒絶縁物沿面の抵抗値が小さかったと推測する。沿面放電 1 は、放電経路が電界方向と直交しており、同じ沿面放電でも抵抗値は低くならなかったと推測する。ボイド放電は、減衰時間はその他 PD モードと同程度であるが、周波数帯が非常に低いために振動回数が少なくなった。よって部分放電の振動回数に周波数の逆数（波長）を乗じた値が小さいほど、放電経路の R 成分が高い条件（放電領域が高抵抗率）を示していると考察した。

以上より、今回の PD 試料については、最も低周波帯域で振動回数が少ないボイド放電、低周波帯域で振動回数が多い沿面放電 2、高周波帯域である程度振動するその他放電、については PD 電流波形のみでも識別可能であった。この PD 電流波形の特徴量を細分化して、特徴量データを蓄積していくことで、PD 電流波形だけでも PD モードやその進展度を識別できる可能性がある。

3.4 部分放電劣化の現地計測技術

3.4.1 部分放電信号とノイズ信号の弁別技術

部分放電信号を現地で高感度に検出するためには、測定対象周辺で発生する外乱ノイズを弁別する必要がある。この外乱ノイズ弁別技術を確立するために、ソフトウェア（LabVIEW）上で部分放電信号と外乱ノイズ信号の模擬波形を生成して、各種計測条件およびデジタル信号処理手法におけるノイズ弁別性能を評価した。このPD発生と計測を模擬したパラメータを表3-2に示す。

表3-2 PD信号とノイズ信号と計測方法の評価パラメータ

項目	条件	パラメータ				
PD 信号	波形形状	固定	減衰余弦波形			
	周波数	固定	20MHz			
	振幅値	3種	0.5	1.0	2.0	
	振動回数	4種	1回	2回	5回	10回
ノイズ 信号	振幅値	固定	1.0			
	波形形状	4種	正弦波	一様ホワイト	ガウスホワイト	インバースf
計測 方法	記録長	固定	10usec			
	サンプリング周波数	4種	0.2GHz	0.5GHz	1.0GHz	2.0GHz
	A/D変換	4種	なし	8bit	10bit	12bit
	平均化処理	3種	なし	9点平均		23点平均

(1) PD信号

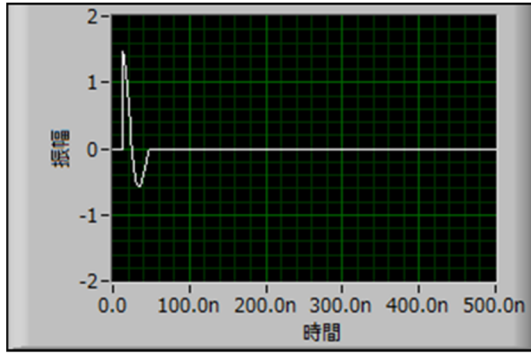
PD電流の模擬波形は、従来はインパルス波形^[3-14]やガウス関数^[3-15]として取り扱われていたが、前節の測定結果から減衰余弦波形とすることが適切と判断した。よってPD模擬波形 $f(t)$ はコサイン波形に三角波を乗じた下記式 (3.1) とした。

$$f(t) = A \cos(2\pi ft) \times h(t) \dots (3.1)$$

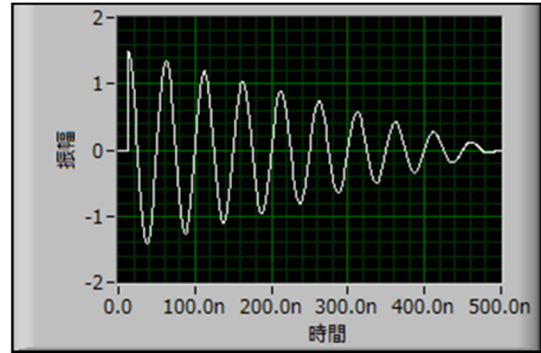
(※1 $h(t) = (D-t)/D$ 、ただし $D > 0$ かつ $t < D$ と $t > D$ のときに $h(t) = 0$)

(※2 t : 時間、 A : 振幅、 f : 周波数、 D : 減衰時間)

PD模擬信号は、波形形状は減衰余弦波形、周波数 f は20MHzに固定し、振幅値と振動回数を変数とした。各変数は、振幅値は3条件(0.5, 1.0, 2.0)、振動回数は4条件(1回, 2回, 5回, 10回)、とした。振動回数は減衰時間 D を用いて調整し、そのPD模擬電流波形を図3-15に示す。



(振動回数：1回)

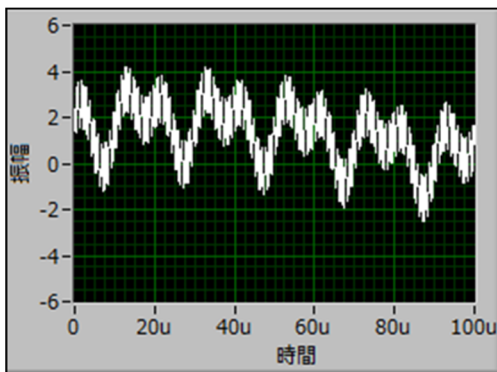


(振動回数：10回)

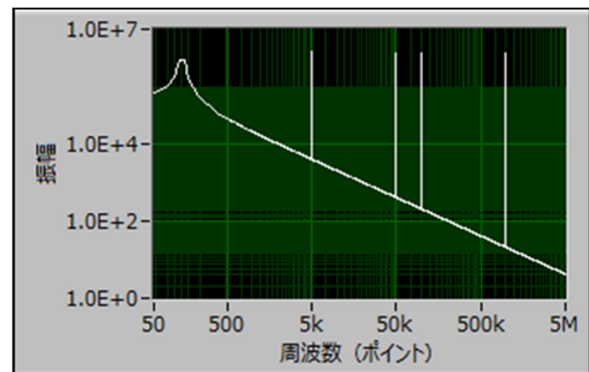
図 3-15 PD 電流を模擬した減衰余弦波形

(2) 外乱ノイズ信号

外乱ノイズ波形は、工場の製造現場で各種電気機器から発生する伝導および輻射ノイズを想定している。製造現場では様々なノイズ信号が混在しており、ノイズ波形形状は4条件（正弦波ノイズ、一様ホワイトノイズ、ガウスホワイトノイズ、インバース f ノイズ）を評価した。正弦波ノイズは5つの周波数（150Hz，5kHz，50kHz，100kHz，1MHz）の正弦波が重畳した信号、一様ホワイトノイズは一定振幅範囲で均一分布となる乱数信号、ガウスホワイトノイズは一定振幅範囲で標準偏差一定としたガウス分布乱数信号、インバース f ノイズは特定周波数範囲を超えた周波数に反比例したパワースペクトルを持つ連続信号である。これらのノイズ信号波形の時間波形と周波数特性を図 3-16～19 に示す。

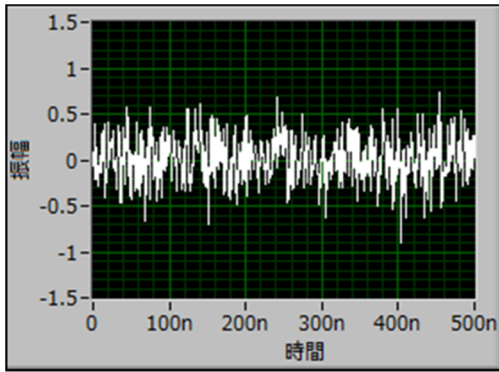


(時間波形)

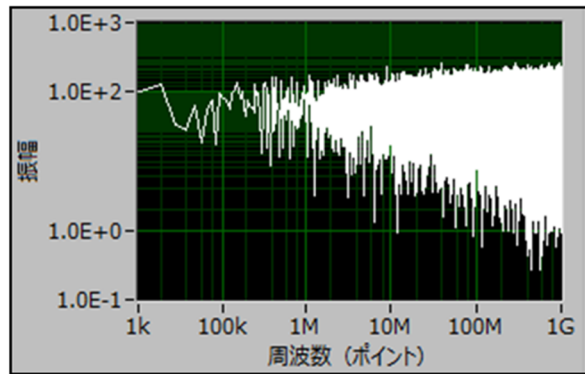


(周波数特性)

図 3-16 正弦波ノイズの時間波形と周波数特性

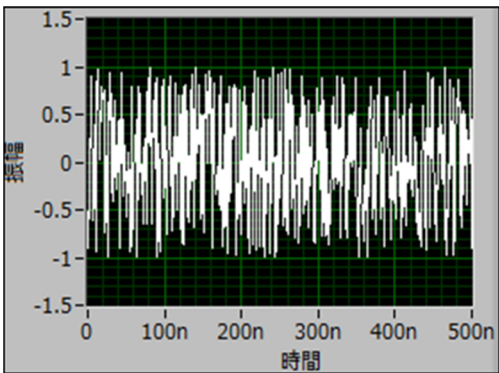


(時間波形)

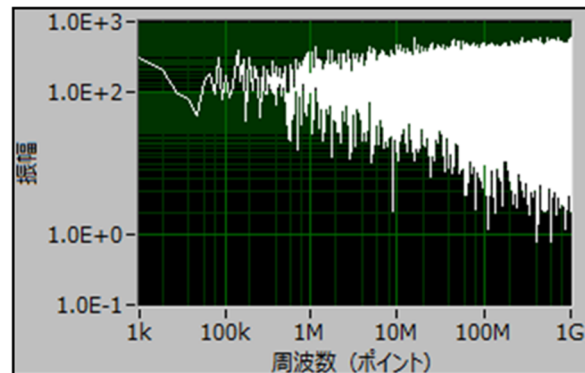


(周波数特性)

図 3-17 ガウスホワイトノイズの時間波形と周波数特性

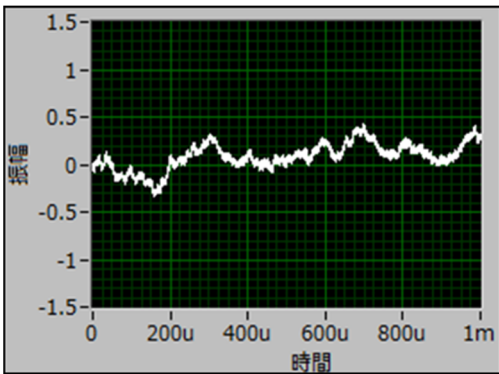


(時間波形)

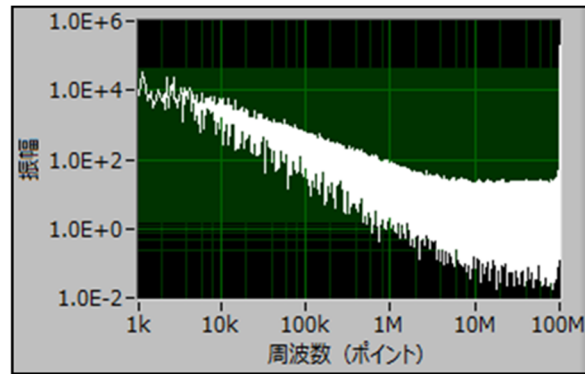


(周波数特性)

図 3-18 一様ホワイトノイズの時間波形と周波数特性



(時間波形)



(周波数特性)

図 3-19 インバース f ノイズの時間波形と周波数特性

正弦波ノイズ信号は特定周波数成分でしか振幅を持たないが、その他のノイズ信号は広い周波数領域に渡って振幅を持つ。高周波域における振幅レベルの大きさは、一様ホワイトノイズ、ガウスホワイトノイズ、インバース f ノイズの順番である。

(3) 計測方法

PD 信号の計測方法として、サンプリング周波数と A/D 変換分解能と平均化処理点数を変数とした。サンプリング周波数は 0.2、0.5、1.0、2.0GHz、A/D 変換分解能は 8、10、12bit、平均化処理はなし、9 点平均、23 点平均、とした。これらの計測条件による PD 検出波形の違いを図 3-20～22 に示す。

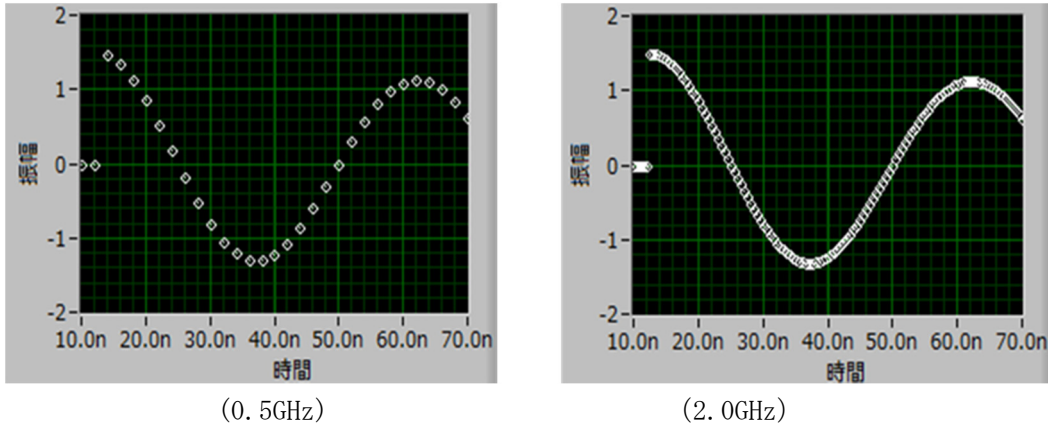


図 3-20 サンプリング周波数と PD 検出波形の関係

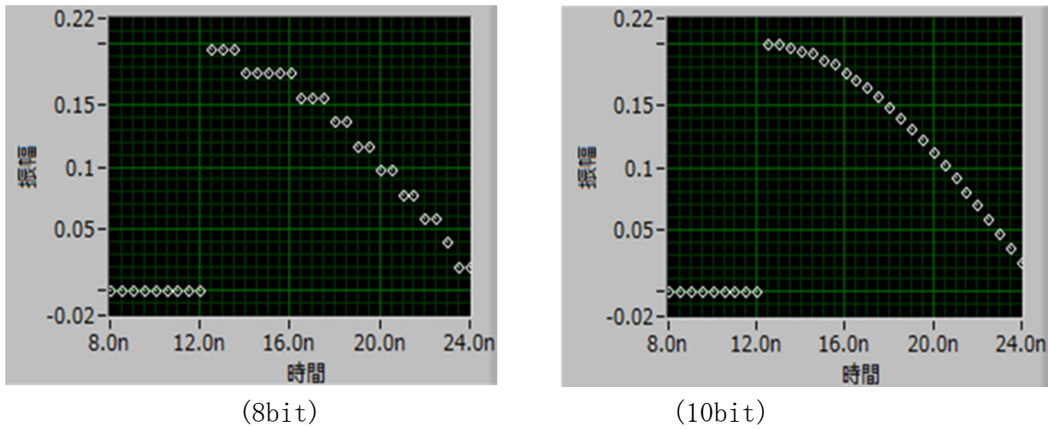


図 3-21 A/D 変換分解能と PD 検出波形の関係

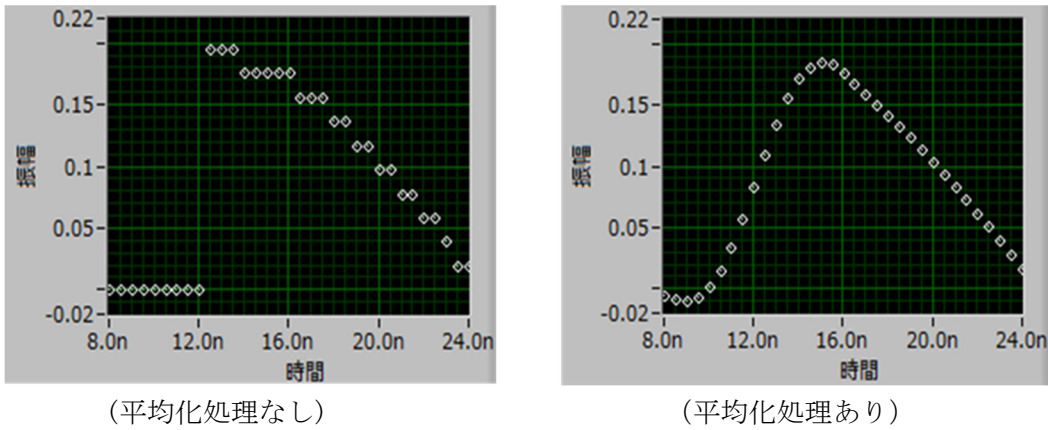


図 3-22 平均化処理と PD 検出波形の関係

図 3-20 より、サンプリング周波数が高いほど、PD 電流波形は横軸（時間軸）方向に細かくデータを取得できる。図 3-21 より、A/D 変換分解能が高いほど、PD 電流波形は縦軸（振幅軸）方向に細かくデータを取得できる。図 3-22 より、平均化処理を行うことで、A/D 変換により生じる PD 電流波形の凹凸を平滑化できる。

(4) デジタル信号処理方法

デジタル信号処理方法には、高速フーリエ変換 (FFT)、短期間フーリエ変換 (STFT)、Wavelet 変換、を用いた。各信号処理方法の評価パラメータを表 3-3 に示す。

表 3-3 PD 電流波形に用いるデジタル信号処理方法

項目	条件		パラメータ			
FFT	-	-	-			
STFT	窓関数	3種	矩形	ハミング	ブラックマン	
	時間幅	4種	64点	128点	256点	
Wavelet	基底波形	4種	Morlet	Daubechies6	Daubechies12	Biorthogonal3.7

FFT とは、時間信号全域をフーリエ変換して周波数特性を抽出する手法である。今回は窓関数を用いないため、設定パラメータは無い。STFT とは、時間信号全域を短い区間に区切って、各区間に窓関数を掛けて周波数特性を抽出する手法である。設定パラメータは、窓関数 3 種（矩形、ハミング、ブラックマン）と区切り時間幅 3 種（32, 64, 128 点）とした。窓関数の特徴は、メインローブの狭さ（周波数分解能の良さ）は矩形<ハミング<ブラックマンで、サイドローブの低さ（ダイナミックレンジが広さ）はブラックマン>ハミング>矩形、となる。区切り時間幅は、フーリエ変換範囲が 2 の累乗数をベースとするから、64 ($=2^6$)、128 ($=2^7$)、256 ($=2^8$)、とした。Wavelet とは、時間信号に対して任意の Wavelet（小さな局在波）を平行移動・拡大・縮小してフィッティングすることで、各時間点の周波数特性を抽出する手法である。その特性上、間欠発生する非定常信号検出に威力を発揮し、異常検知やノイズ弁別等で産業応用が進んでいる^[3-16,17]。設定パラメータは、基底 Wavelet 4 種（Morlet, Db06, Db12, Bior3.7）とした。基底 Wavelet は、LabVIEW 内蔵の 43 種（Mexican-Hat, Meyer, Morlet, Daubechies02~14, Haar, Biorthogonal1.3~6.8, Coiflets1~5, Symlet2~8）から減衰余弦波形に近いものを選定した。これらのデジタル信号処理手法を用いて、PD 電流波形を信号処理した例を図 3-23 に示す。

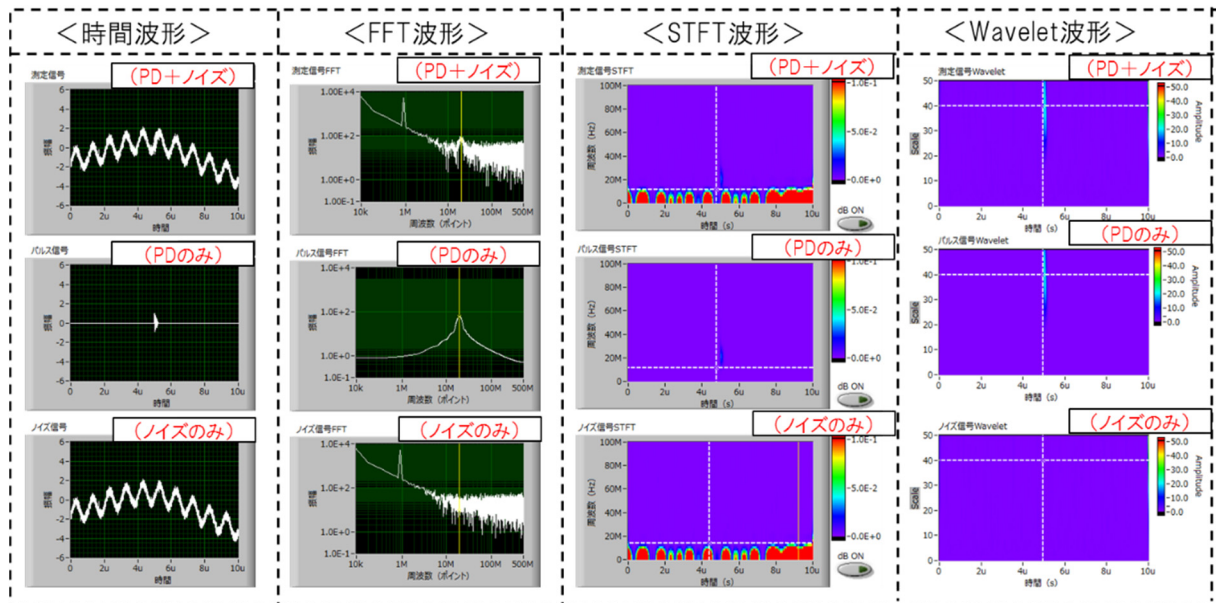


図 3-23 PD 信号とノイズ信号に対するデジタル信号処理結果

図 3-23 では、上から<PD 信号+ノイズ信号><PD 信号のみ><ノイズ信号のみ>、左から<時間波形><FFT 波形><STFT 波形><Wavelet 波形>を示している。<時間波形>では、PD 信号はノイズ信号に埋もれて目視では確認できない状態にある。<FFT 波形>では、部分放電信号の周波数帯域に極大値が確認できる。<STFT 波形>と<Wavelet 波形>では、部分放電が生じた時間域でのみ部分放電周波数帯の信号強度が上昇することが確認できる。このように信号処理を行うことで、測定した波形から PD 信号成分のみを強調して抽出することができる。

(5) ノイズ弁別性能の評価方法

各種信号処理法のノイズ弁別性能は、信号処理後の S/N 比上昇率と定義した。S (信号) は PD 信号成分の振幅値、N (ノイズ) は PD 信号成分が含まれるノイズ信号成分の振幅値である。本論文で目標とするノイズ弁別性能は「部分放電信号とノイズ信号の振幅値が同等レベル(S/N=1.0)の時間波形に対して、信号処理後波形は明確に弁別可能 (S/N=5.0) な状態にすること」とし、目標ノイズ弁別性能=S/N 比 5.0 とした。ここで PD 発生有無の時間波形、FFT 波形、STFT 波形、Wavelet 波形を図 3-24~27 に示す。

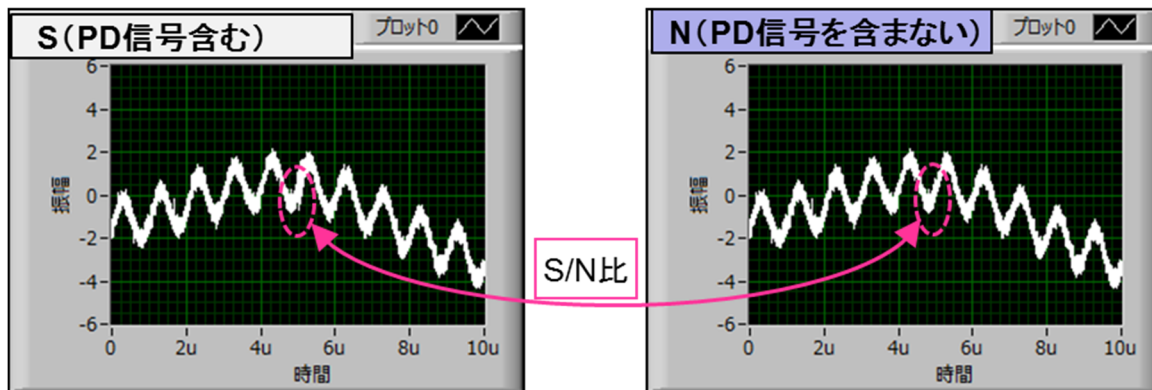


図 3-24 PD 発生有無での時間波形

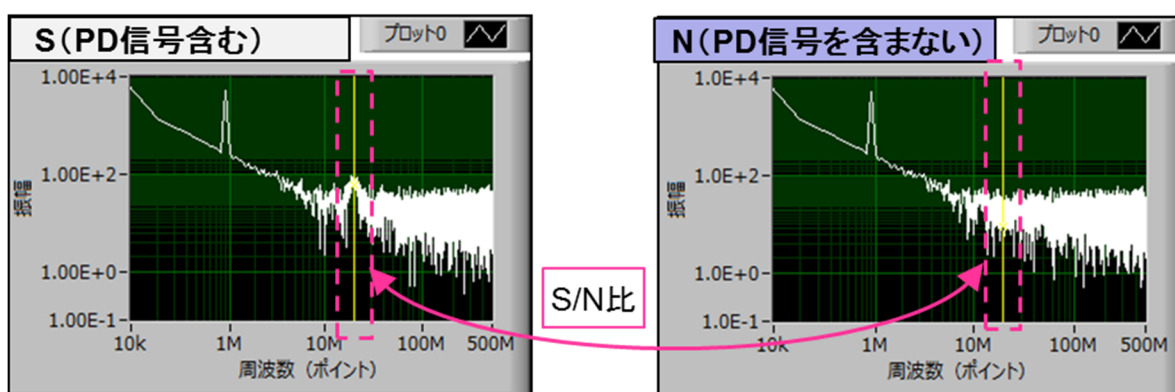


図 3-25 PD 発生有無での FFT 波形

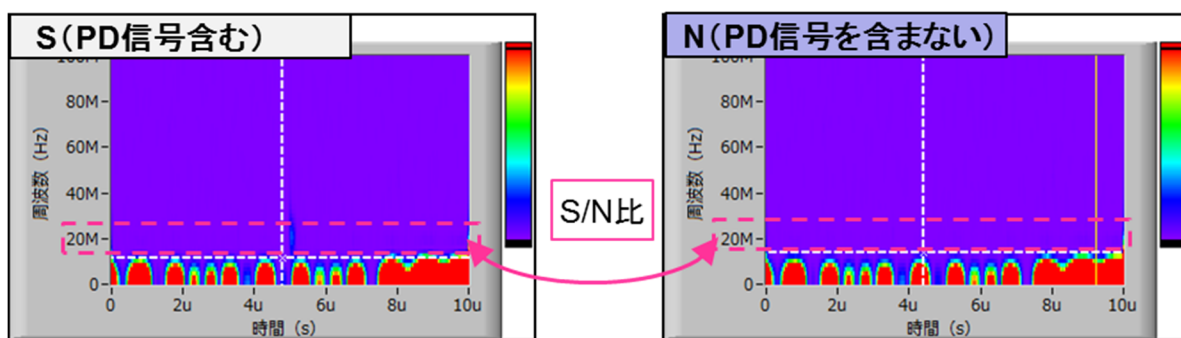


図 3-26 PD 発生有無での STFT 波形

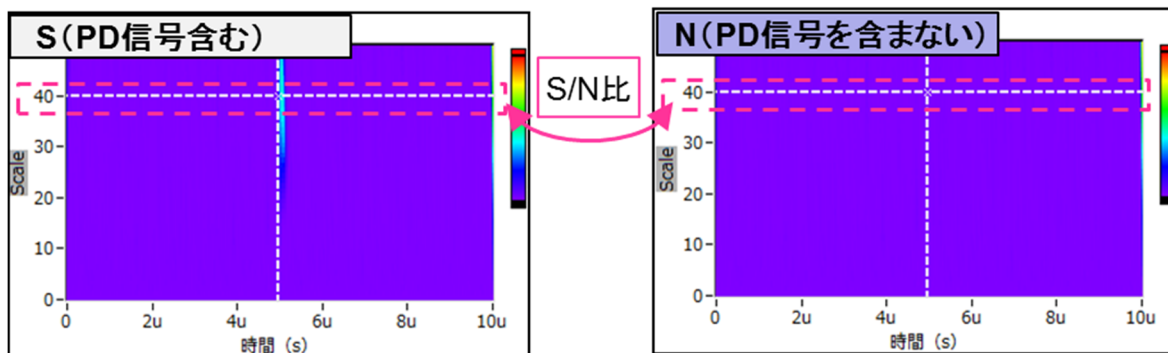


図 3-27 PD 発生有無での Wavelet 波形

図 3-24 の時間波形では、S が PD 信号の振幅値、N がノイズ信号の振幅値である。この時間波形の S/N 比が、信号処理前の S/N 比である。図 3-25～27 の FFT 波形と STFT 波形と Wavelet 波形では、PD 信号の周波数帯である 20MHz±10%において、S が PD 信号+ノイズ信号の振幅値、N がノイズ信号のみの振幅値である。この S/N 比が、信号処理後の S/N 比である。

(6) ノイズ弁別性能の評価結果

ノイズ弁別性能評価として、S/N 比と PD 信号波形, ノイズ信号波形, 計測方法, 信号処理方法の関係を評価した。各パラメータを個別に評価するため、評価対象以外のパラメータは表 3-4 に示す標準設定とした。

表 3-4 PD 信号波形, ノイズ信号波形, 計測方法, 信号処理方法の標準設定

項目	条件		標準設定
PD信号	波形形状		減衰余弦波形
	周波数		20MHz
	振幅値		1.0
	振動回数		5回
ノイズ信号	振幅値		1.0
	波形形状		正弦波+ガウスホワイト
計測方法	記録長		10usec
	サンプリング周波数		1.0GHz
	A/D変換		8bit
	平均化処理		なし
信号処理	FFT	なし	なし
	STFT	窓関数	ハミング
		時間幅	128点
	Wavelet	基底関数	Morlet

(a) PD 信号の振幅値

PD 信号の振幅値と S/N 比の関係を図 3-28 に示す。

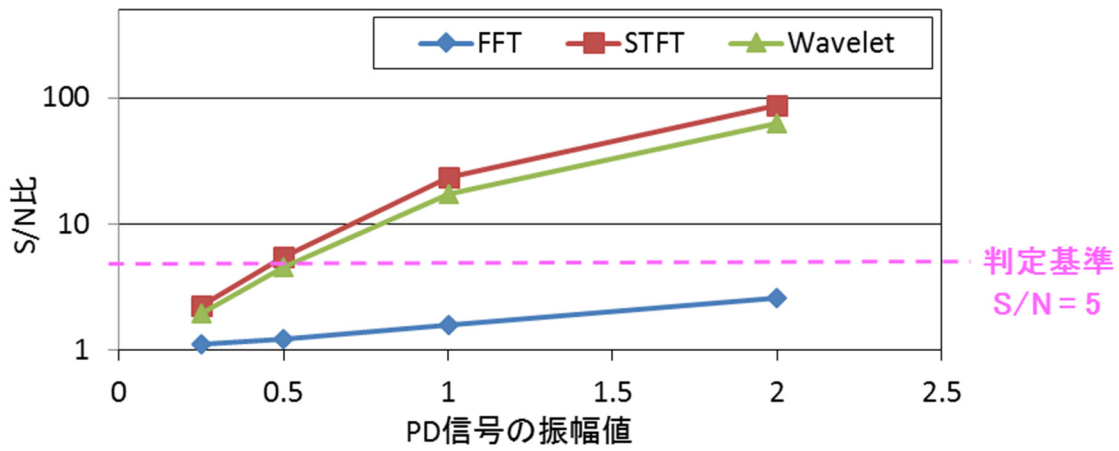


図 3-28 PD 信号の振幅値と S/N 比の関係

PD 信号の振幅値が大きいほど、信号処理後の S/N 比は高くなる。これは信号処理前の S/N 比が高いことに加えて、PD 信号の振幅値が大きい方が重畳するノイズ信号により波形が乱されにくいと推察した。

(b) PD 信号の減衰振動回数

PD 信号の減衰振動回数と S/N 比の関係を図 3-29 に示す。

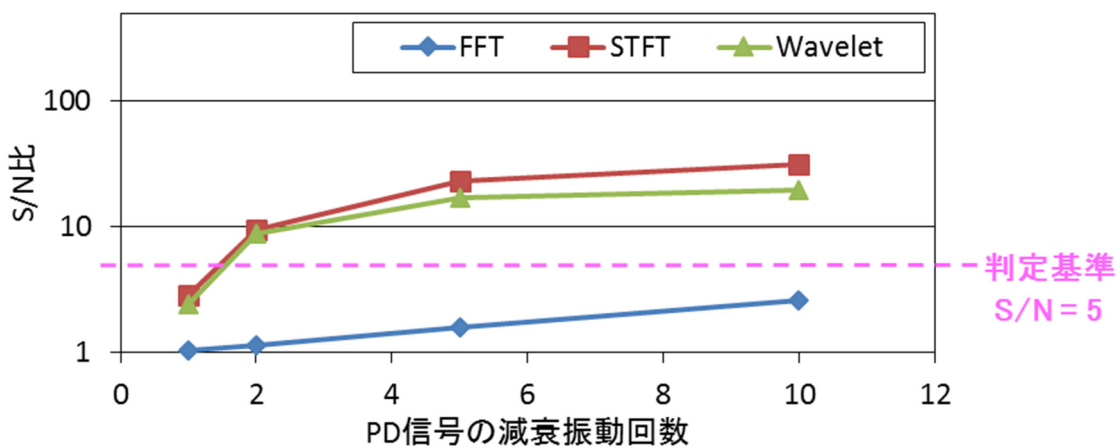


図 3-29 PD 信号の減衰振動回数と S/N 比の関係

PD 信号の減衰振動回数が多いほど、信号処理後の S/N 比は高くなる。これは PD 信号波形が長くなると、信号処理により強調される波形範囲が広がるためであると推察した。

(c) ノイズの信号パターン

PD 信号の減衰振動回数と S/N 比の関係を図 3-30 に示す。

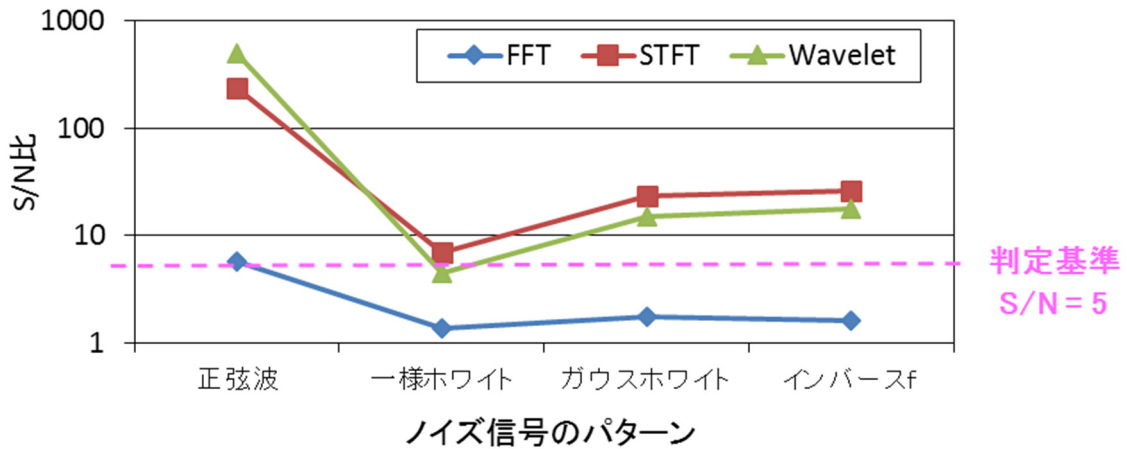


図 3-30 ノイズ信号パターンと S/N 比の関係

ノイズの信号パターンは、正弦波ノイズのような特定周波数信号は除去し易く、広範囲の周波数帯を持つノイズ信号は除去し難い。すなわち、PD 信号波形と共通の周波数帯で高い振幅を有するノイズ信号ほど、信号処理後の S/N 比が高くないと推察した。

(d) サンプリング周波数

サンプリング周波数と S/N 比の関係を図 3-31 に示す。

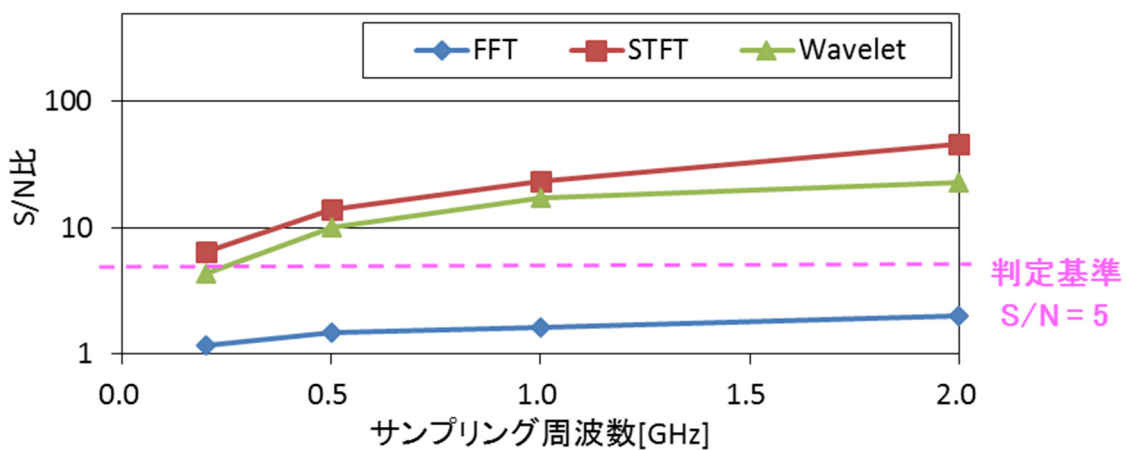


図 3-31 サンプリング周波数と S/N 比の関係

サンプリング周波数が高いほど、信号処理後の S/N 比は高くなる。これはサンプリング周波数が高くなると、PD 信号波形に対する取得データ点数が増えて、周波数領域での分解能も高くなるためであると推察した。

(e) A/D 変換

A/D 変換と S/N 比の関係を図 3-32 に示す。

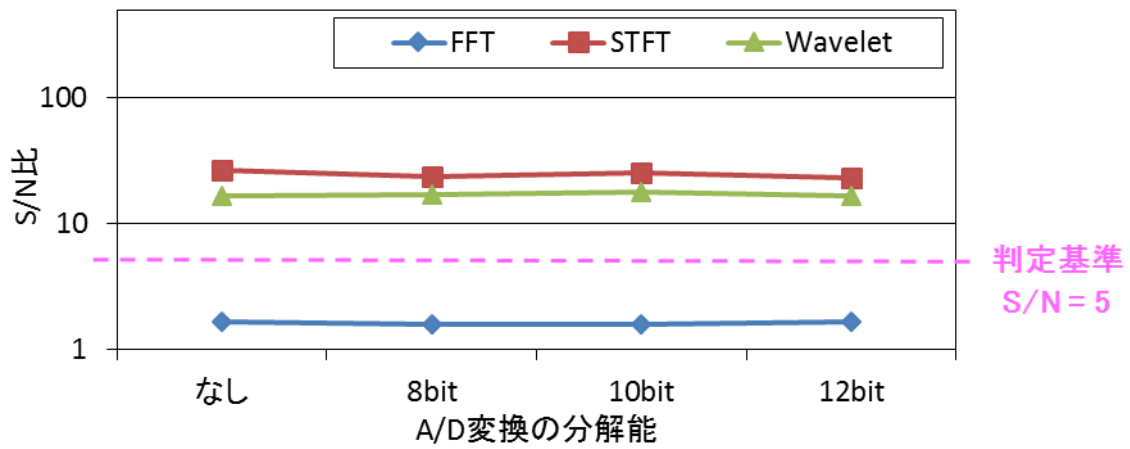


図 3-32 A/D 変換分解能と S/N 比の関係

A/D 変換の分解能は、信号処理後の S/N 比にほとんど影響しない。これは A/D 変換によって PD 信号波形はデジタル信号となるが、その分解能の影響が生じるほど信号処理前の S/N 比が小さくないためであると推察した。

(f) 平均化処理

平均化処理と S/N 比の関係を図 3-33 に示す。

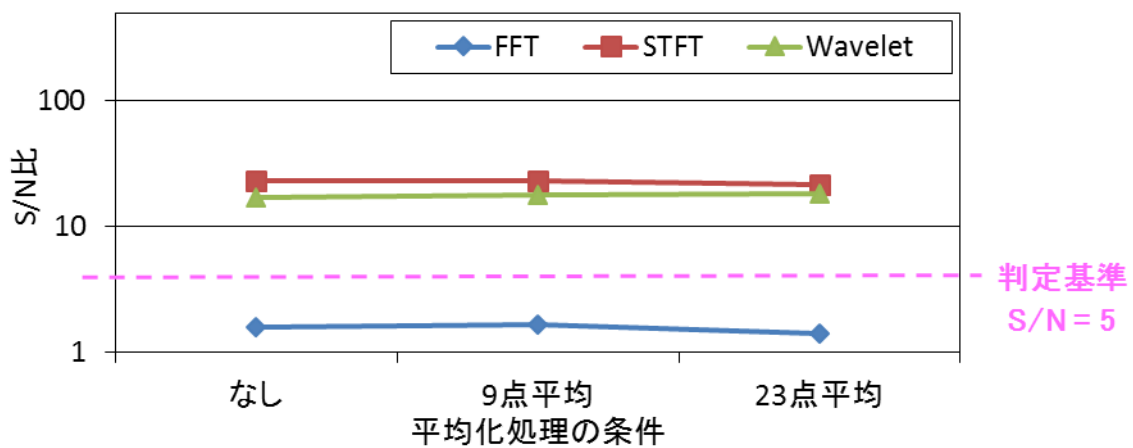


図 3-33 平均化処理条件と S/N 比の関係

平均化処理の有無は、信号処理後の S/N 比にほとんど影響しない。これは平均化処理によって PD 信号波形は平滑な波形となるが、A/D 変換分解能と同様に、デジタル化の影響がでるほど信号処理前の S/N 比が小さくないためであると推察した。

(g) デジタル信号処理手法

デジタル信号処理手法と S/N 比の関係を図 3-34 に示す。

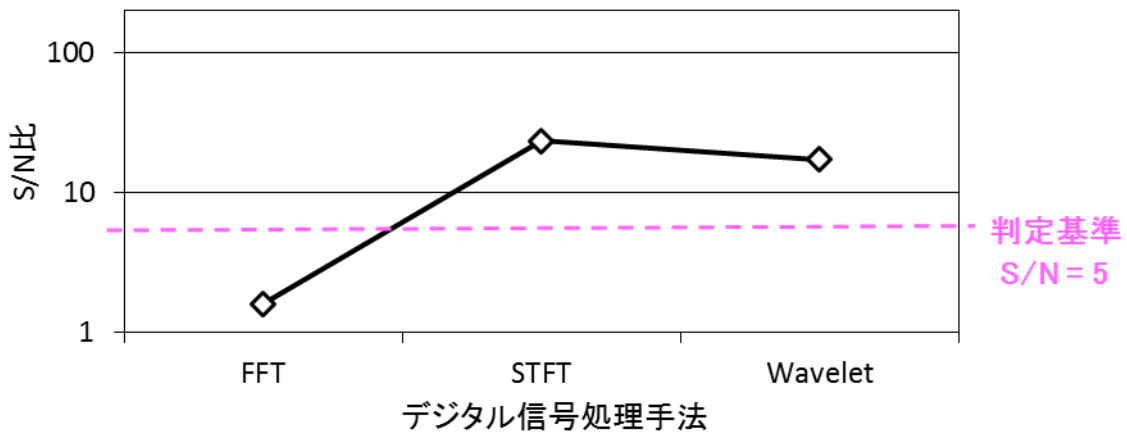


図 3-34 STFT の窓関数と S/N 比の関係

信号処理手法では、FFT だけでは S/N 比をほとんど上昇されないが、STFT もしくは Wavelet を用いることで S/N 比は 10 倍以上に上昇した。これは、測定データ範囲に対して PD 信号波形が含まれる範囲はわずかであり、PD 発生領域に絞り込んだ信号処理が必要なためと推察した。図 3-28～34 で示した条件でも、S/N 比の大きさは $FFT < Wavelet \approx STFT$ となっている。

(h) STFT の窓関数

STFT の窓関数と S/N 比の関係を図 3-35 に示す。

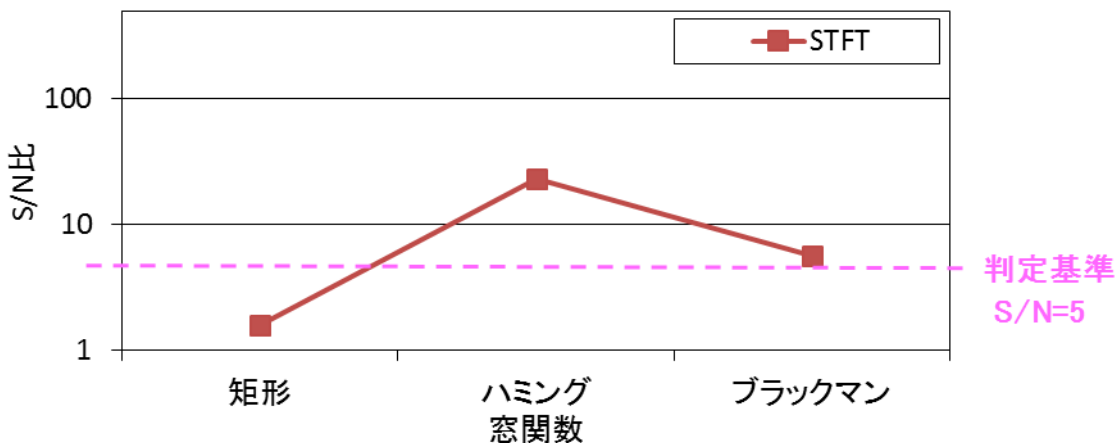


図 3-35 STFT の窓関数と S/N 比の関係

STFT の窓関数により、S/N 比に違いが見られた。S/N 比の大きさは $ハミング > ブラックマン > 矩形$ の順番となり、今回の PD 信号波形に対してはメインローブ（周波数分解能）とサイドローブ（ダイナミックレンジの幅）のバランスが取れた窓関数が適していた。

(i) STFT の区切り時間幅

STFT の区切り時間幅と S/N 比の関係を図 3-36 に示す。

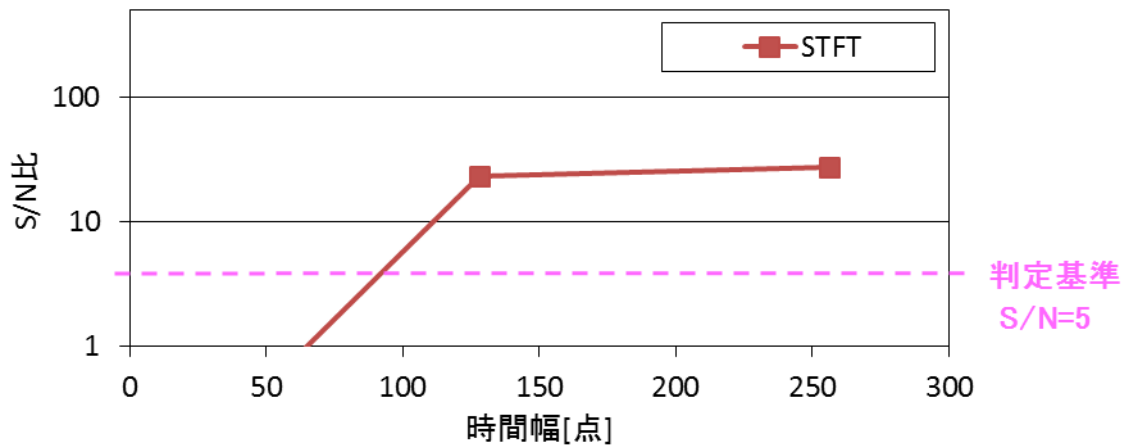


図 3-36 STFT の区切り時間幅と S/N 比の関係

STFT の区切り時間幅は、短すぎると S/N 比が急激に低下する。これは STFT を実行する時間幅に、PD 信号波形全体を含むことが必要であるためであると推察した。

(j) Wavelet の基底既定関数

Wavelet の基底関数と S/N 比の関係を図 3-37 に示す。

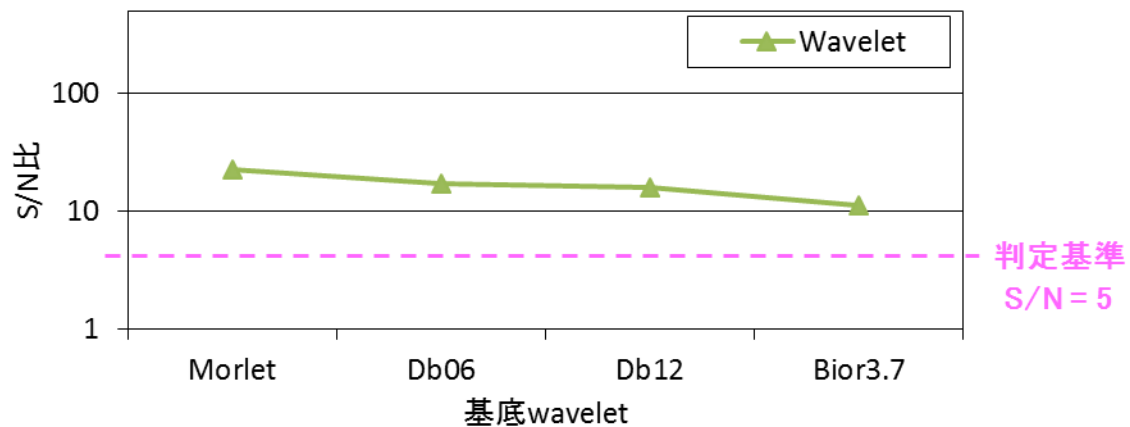


図 3-37 Wavelet の基底 wavelet と S/N 比の関係

Wavelet の基底関数は、S/N 比が Morlet > Db06 > Db12 > Bior3.7 の順番となる。これは、今回選定した Wavelet の基底関数の中では、Morlet が最も PD 信号波形に近いためであると推察した。

(7) ノイズ弁別可能な PD 信号と計測条件

(6) より S/N 比に影響する条件は、PD 信号の幅値と減衰振動回数、ノイズ信号のパターン、計測条件のサンプリング周波数、であった。信号処理手法は、適切な条件設定で STFT もしくは Wavelet を用いることで、十分なノイズ弁別性能が得られた。ここで、目標ノイズ性能を満たす計測条件を明らかにするため、PD 信号の振幅値を 1.0、ノイズ信号パターンを正弦波+ガウスホワイトに固定して、PD 減衰振動回数とサンプリング周波数が S/N 比上昇率に及ぼす影響を表 3-5, 3-6 にまとめた。

表 3-5 減衰信号回数とサンプリング周波数が S/N 比に及ぼす影響 (STFT)

<STFT>		減衰振動回数									
		1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	9回	10回
サンプリング周波数	0.1GHz	0.2	0.8	1.5	3.1	3.4	3.6	3.8	4.2	4.4	5.1
	0.2GHz	0.5	2.1	2.7	4.7	6.4	6.8	7.3	7.9	8.1	8.3
	0.3GHz	1.0	3.2	6.0	7.3	8.8	10.5	11.3	11.7	12.9	13.7
	0.4GHz	1.1	4.4	7.5	9.5	10.8	11.3	11.5	12.2	13.5	14.2
	0.5GHz	1.8	6.7	9.2	10.8	13.9	14.3	14.4	16.6	17.7	17.9
	1.0GHz	2.9	9.5	16.0	20.6	23.4	24.2	24.6	28.4	29.1	31.3
	1.5GHz	3.0	13.4	17.1	25.4	30.7	38.8	41.1	42.3	48.2	50.3
	2.0GHz	3.7	20.1	31.5	41.3	46.3	47.1	48.9	49.2	49.5	50.8

表 3-6 減衰信号回数とサンプリング周波数が S/N 比に及ぼす影響 (Wavelet)

<Wavelet>		減衰振動回数									
		1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	9回	10回
サンプリング周波数	0.1GHz	0.2	0.6	1.4	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	3.0
	0.2GHz	0.5	1.8	2.2	3.5	4.4	4.8	5.5	5.7	6.0	6.2
	0.3GHz	1.0	3.2	5.1	6.0	6.2	7.3	8.0	8.4	8.9	9.2
	0.4GHz	1.2	3.8	6.1	7.3	9.0	9.1	9.3	9.5	9.9	10.3
	0.5GHz	1.3	6.0	8.0	9.1	10.1	11.1	11.8	14.8	15.3	15.5
	1.0GHz	2.4	8.9	12.8	15.4	17.2	17.4	18.1	18.4	19.3	19.5
	1.5GHz	3.3	9.8	15.6	19.8	21.1	22.1	23.8	24.4	26.1	27.2
	2.0GHz	4.3	11.1	16.5	19.7	22.6	23.4	25.1	26.3	26.5	27.4

表 3-5 と表 3-6 より、減衰振動回数が 2 回以上の部分放電信号に対して目標ノイズ弁別性能を得るためには、サンプリング周波数 0.5GHz 以上で測定し、“STFT” もしくは “Wavelet” による適切な信号処理が必要である。この必要なサンプリング周波数とは、PD 波長に対して必要なサンプリング数のことであり、対象とする PD 信号の周波数により異なる。今回の PD 信号の周波数は 20MHz であり、サンプリング周波 0.5GHz であれば、1 周期当たりのサンプリング数は 25 点 (=0.5GHz÷20MHz) となる。よって、対象とする PD 信号の周波数に対して、サンプリング周波数は 25 倍以上に設定することで、目標ノイズ弁別性能が得られると判断した。

3.4.2 現地計測装置の開発

部分放電信号の現地計測装置として、3.4.1 節のデジタル信号処理によるノイズ弁別技術を組み込んだ計測システムを開発した。その測定システムを図 3-38 に示す。

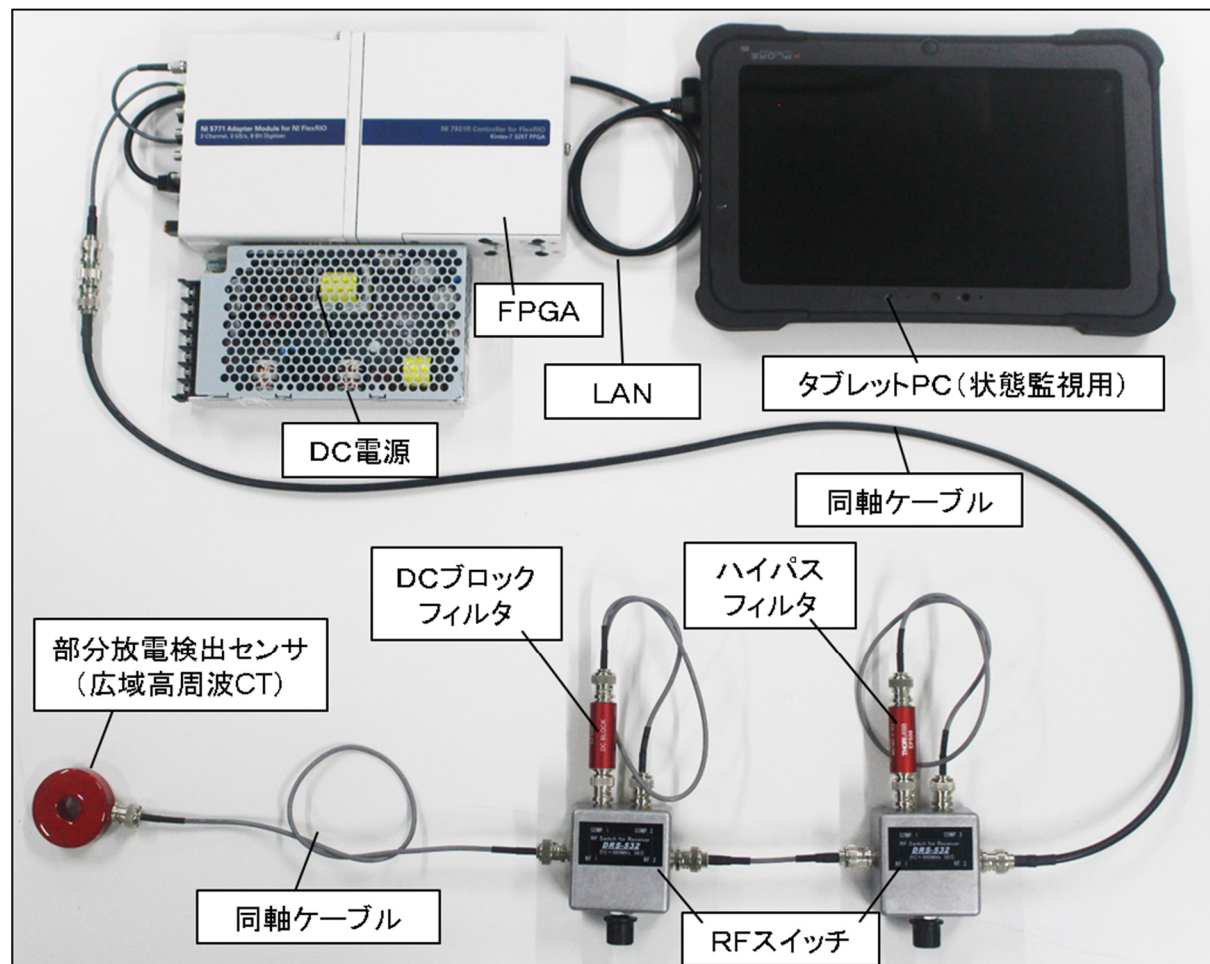


図 3-38 部分放電信号の現地計測システム

本計測システムでは、HF 帯(3~30MHz)の部分放電信号を検出することを目的としたことから、センサの周波数帯域は 0.3~300MHz、計測器のサンプリング周波数は 750MHz 以上を要求仕様とした。まず、部分放電電流を検出する広域高周波 CT として、MagneLab 社製 CT-C5.0-BN(-3dB 帯域:4.8k~400MHz)を選定した。CT で検出した信号は、DC ブロックフィルタ (THORLABS 社製 EF500) とハイパスフィルタ (THORLABS 社製 EF509) にて、周波数 1.8MHz 以下の信号成分を減衰させる。アナログフィルタを介して、部分放電信号は FPGA ユニット (NI 社製 NI-7931&NI-5771、仕様: 帯域 900MHz, 最大サンプリング周波数 1.5GHz、A/D 変換分解能 8bit) にて計測する。FPGA 内では、データ取得と並列してデジタル信号処理を行い、本装置ではサンプリング周波数 1.0GHz でデータ点数 256 点 (256nsec) ごとに FFT を行っている。このデータ点数を区切った FFT 処理は、

3.4.1 節で述べた STFT と同じ信号処理であり、STFT の代わりにデータ点数を変更して Wavelet を行うことも可能である。FPGA で計測したデータは、LAN 経由でタブレット PC から参照でき、PD 信号の発生やレベル変化を監視できる。本現地 PD 計測装置を用いて、各種 PD 試料の部分放電電流のノイズ除去を行った結果を図 3-39～45 に示す。

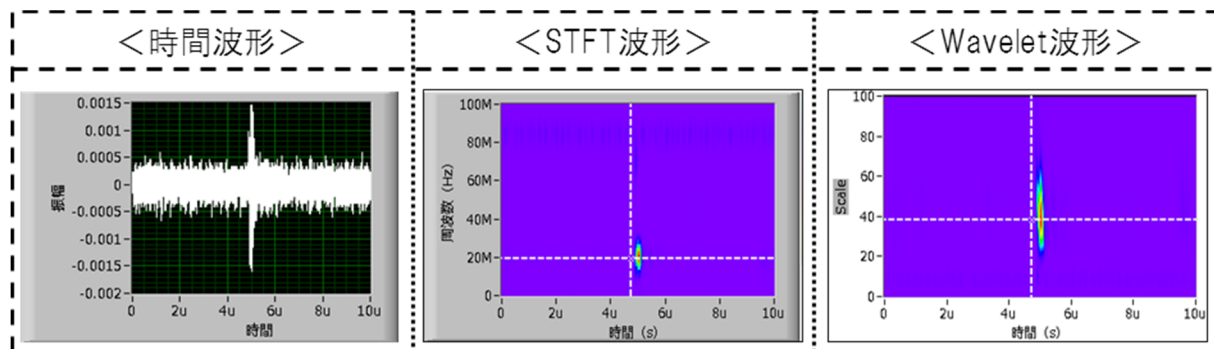


図 3-39 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（パルス発生器）

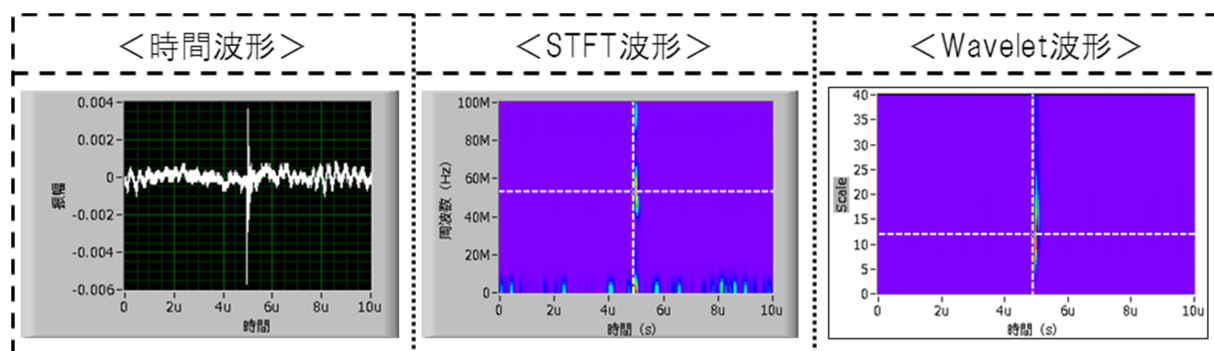


図 3-40 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（気中放電試料）

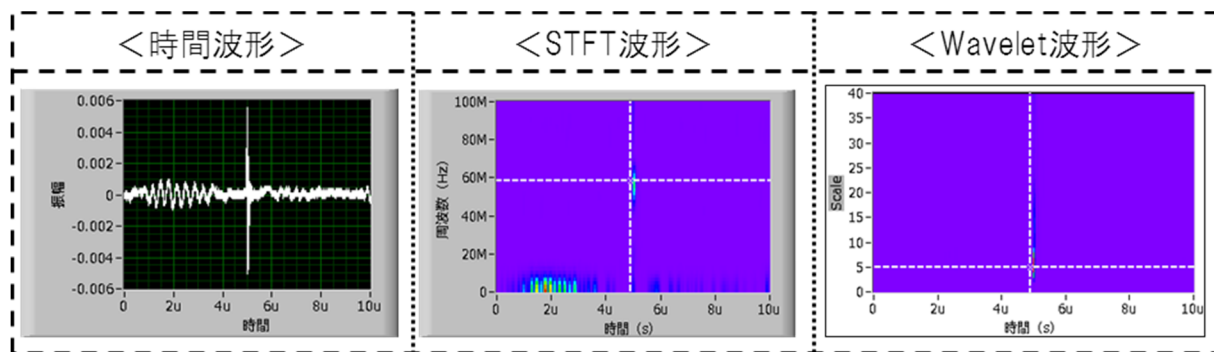


図 3-41 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（沿面放電試料 1）

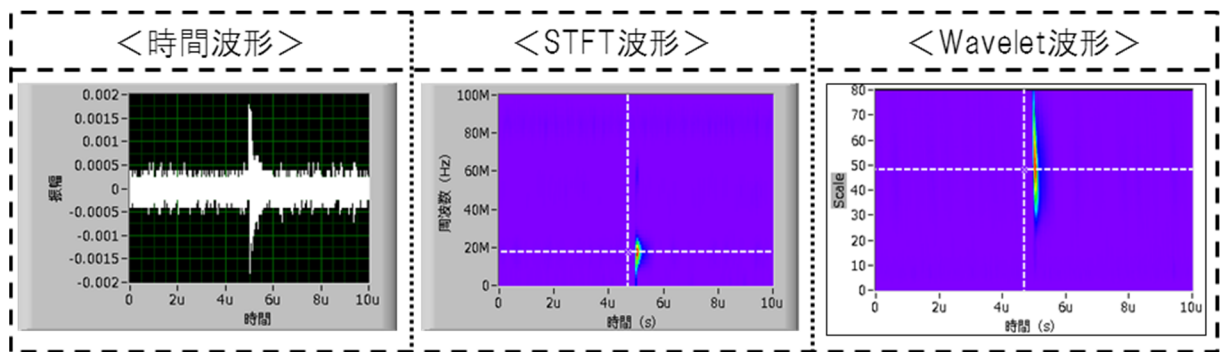


図 3-42 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（沿面放電試料 2）

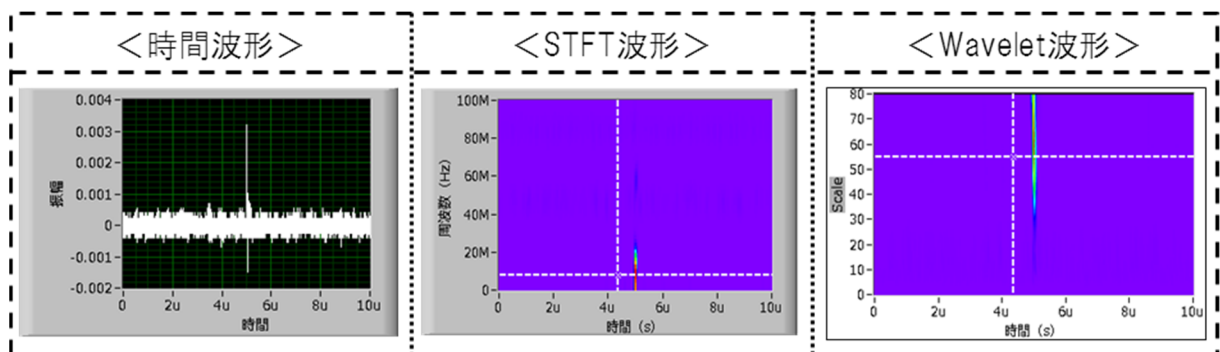


図 3-43 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（ボイド放電試料）

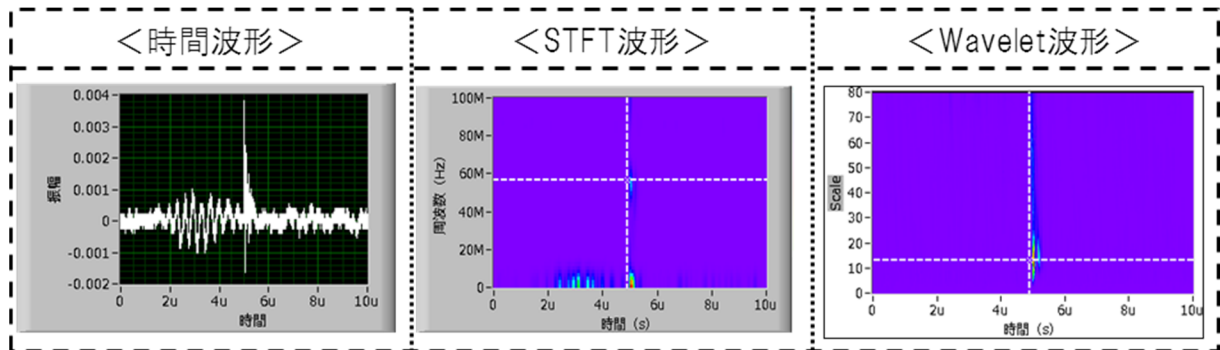


図 3-44 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（剥離放電試料）

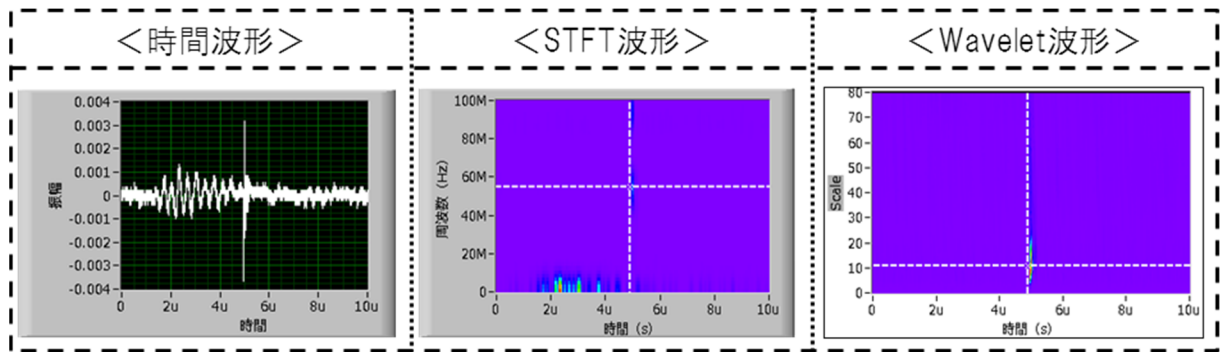


図 3-45 部分放電電流に対するノイズ弁別結果（トリー放電試料）

図 3-39~45 より、全 PD モードに対して、PD 電流波形の時間波形を STFT 波形や Wavelet 波形に変換することが出来る。この信号処理による S/N 比変化として、時間波形の S/N 比と信号処理後の S/N 比の関係を図 3-46, 3-47 に示す。

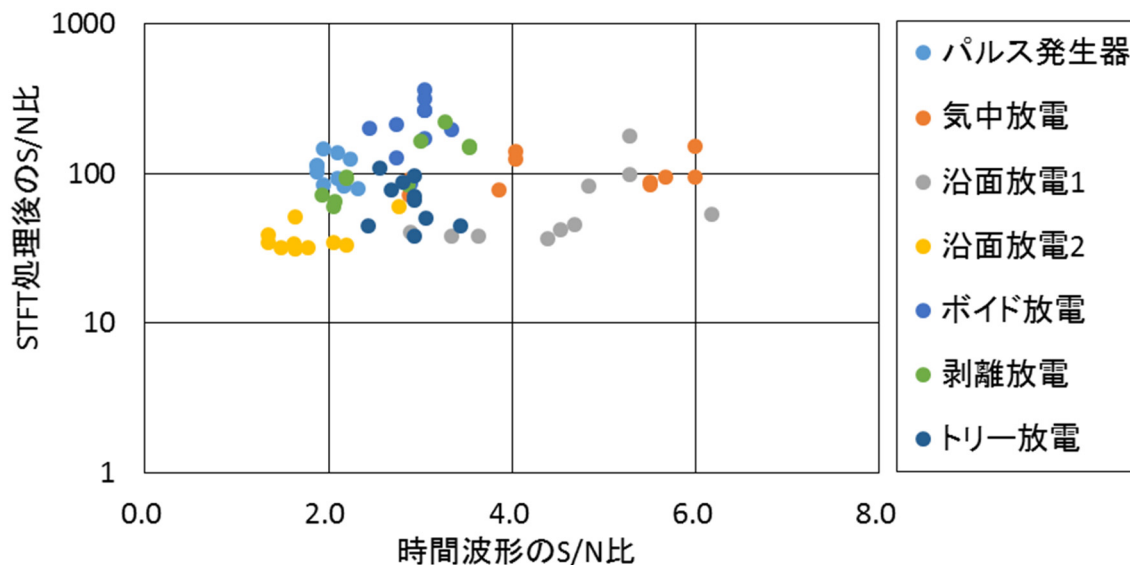


図 3-46 時間波形の S/N 比と STFT 処理後の S/N 比の関係

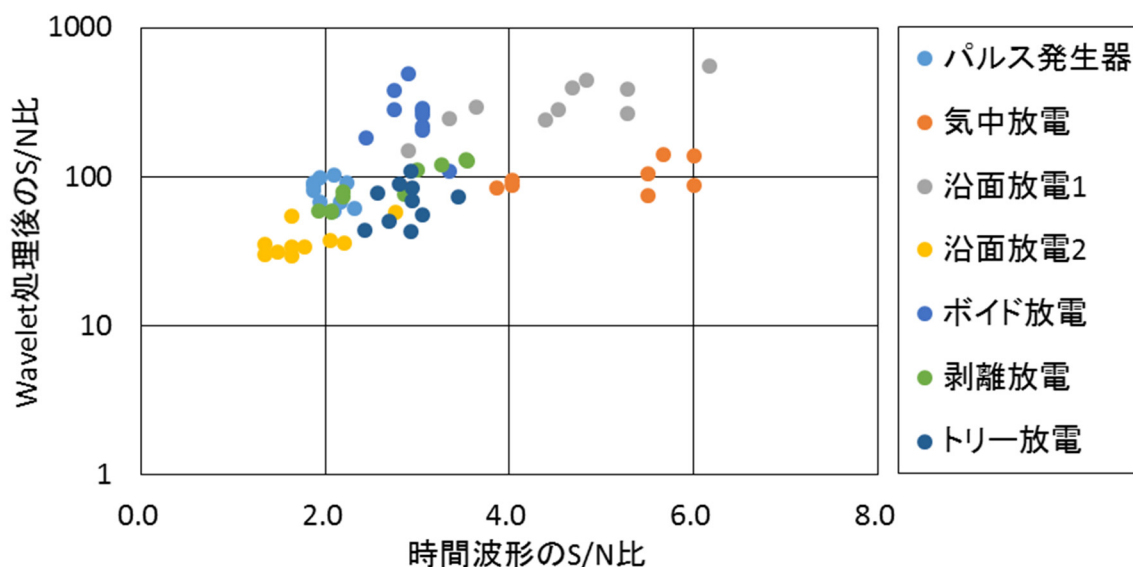


図 3-47 時間波形の S/N 比と Wavelet 処理後の S/N 比の関係

図 3-46, 3-47 より、時間波形での S/N 比が 1.3~6.2 に対して、STFT もしくは Wavelet 処理により S/N 比は 29.2~547.2 まで上昇した。この S/N 比上昇率は、LabVIEW による机上検討結果と一致しており、期待通りのノイズ弁別性能を実現できたと判断した。

3.5 結言

部分放電劣化評価では、部分放電に伴う電流波形が固有の周波数帯と減衰振動回数を有する減衰余弦波形になることを明らかにして、デジタル信号処理を用いて部分放電信号と外乱ノイズ信号を弁別する手法を開発した。部分放電電流が減衰余弦波波形になるという知見は、部分放電電流の波形形状を定義することが可能となり、波形形状を用いたノイズ信号との弁別検出技術向上に貢献することが期待できる。部分放電モードにより電流波形形状（周波数帯と減衰振動回数）が異なるという知見は、部分放電モードごとに放電発生時の等価回路定数が異なることを示しており、電流波形だけで簡易に部分放電モードを識別する技術開発に貢献することが期待できる。デジタル信号処理により部分放電信号を弁別検出する装置を開発したことは、稼働中設備における部分放電発生有無を高感度に評価することを可能として、設備ユーザが部分放電発生を早期に検知して保有設備の絶縁故障リスクを低減させることに貢献できる。また、実フィールドで様々な部分放電波形やノイズ波形を蓄積していくことも可能となり、デジタル信号処理による更なるノイズ弁別性能の向上に寄与することも期待できる。

最後に、本章で得られた知見を下記にまとめた。

- (1) 部分放電評価として、部分放電モードを6種類（気中放電、沿面放電（電気力線垂直型）、沿面放電（電気力線垂直型）、ボイド放電、剥離放電、トリー放電）に分類し、各モードの部分放電が6kV以下で安定的に発生する試料形状を示した。
- (2) 部分放電に伴う Φ -Q特性は、各モードの Φ -Q特性形状をパターンマッチングすることで、ノイズと部分放電および部分放電の各モードを識別できることを示した。
- (3) 部分放電に伴う電流波形は、実験および等価回路モデルから減衰余弦波波形になることを明らかにして、電流波形の周波数帯域と減衰振動回数で部分放電モードを識別できることを示した。
- (4) 部分放電信号を減衰余弦波波形で模擬して、計算ソフトによりノイズ弁別に必要な計測条件とデジタル信号処理法を明らかにした。減衰振動する部分放電信号に対して、計測条件はサンプリング周波数が部分放電信号の25倍以上、デジタル信号処理はSTFTもしくはWaveletにて十分なノイズ弁別性能が得られることを示した。
- (5) 広域高周波CTとアナログフィルタとRFスイッチとFPGAを組み込んだ部分放電検出装置を開発して、部分放電信号をノイズ信号と弁別して現地計測することを可能とした。各種モードの部分放電電流に対して、本計測装置によりS/N比を25～100倍に上昇できることを示した。

第3章の参考文献

- [3-1] F. H. Kreuger, “部分放電検出”, コロナ社 (1968)
- [3-2] 小崎正光, 他 “高電圧・絶縁工学”, オーム社 (1997)
- [3-3] 岡本 達希, 田中 祀捷, “ボイド欠陥と部分放電パルス群の統計的性質の相関々係 (I) - 絶縁体に囲まれたボイドの場合 -”, 電力中央研究所報告, No. 179030 (1980)
- [3-4] “沿面放電に関する最新の研究と絶縁技術”, 電気学会技術報告, No. 892, (2002)
- [3-5] 大木 義路, 大塚 重信, 矢作 吉之助, “真空中における固体誘電体のインパルス沿面フラッシュオーバーについて”, 電気学会論文誌 A, Vol. 95, No. 1, pp. 41-47, (1975)
- [3-6] 北村洋一, 平林庄司 “エポキシ樹脂中の電極近傍に形成されたピットにおけるトリ-発生条件”, 電気学会論文誌 A, Vol. 106 巻, No. 4 号, pp. 164-170 (1986)
- [3-7] 匹田 政幸, 鈴木 淳史, 加藤 達朗, 早川 直樹, 大久保 仁, “部分放電特性のコンピュータ計測と周波数依存性”, 電気学会論文誌 B, Vol. 115, No. 10, pp. 1215-1220, (1995)
- [3-8] Keisuke Yoshida, Takuya Matsumoto, Wataru Tomoeda, Shinya Ohtsuka, “SUPER HIGH FREQUENCY COMPONENTS OF PARTIAL DISCHARGE CURRENT PULSE WAVEFORMS AND THE EMITTED ELECTROMAGNETIC WAVES MEASURED WITH THE SHF_PDPW SYSTEM”, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, (2015)
- [3-9] IEC TS 60034-27-2:2012 _Rotating electrical machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines” (2012)
- [3-10] 岡本 達希, 田中 祀捷 “ボイド欠陥と部分放電パルス群の統計的性質の相関々係 (II) - 金属に接するボイドの場合 -”, 電力中央研究所報告, No. 180005 (1980)
- [3-11] G.C. Stone, H.G. Sedding, N. Fujimoto, J.M. Braun, “Practical implementation of ultrawideband partial discharge detectors”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 27, No. 1, pp. 70-81 (1992)
- [3-12] F. Álvarez, J. Ortego, F. Garnacho and M.A. Sánchez-Uran “A Clustering Technique for Partial Discharge and Noise Sources

- Identification in Power Cables by Means of Waveform Parameters” ,
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23,
No.1, pp.469-481 (2016)
- [3-13] M. Tozzi, A. Salsi, M. Busi, G. C. Montanari, A. Cavallini and P. M.
Hart, “Permanent PD Monitoring for Generators: Smart Alarm
Managemen” , Innovative Smart Grid Technologies Asia, (2011)
- [3-14] J. M. Martínez-Tarifa, J. A. Ardila-Rey, G. Robles, “Automatic
Selection of Frequency Bands for the Power Ratios Separation
Technique in Partial Discharge Measurements: Part I, Fundamentals and
Noise Rejection in Simple Test Objects” , IEEE Transactions on
Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.22, No.4, pp2284-2292
(2015)
- [3-15] Yoshikazu Shibuya, Satoshi Matsumoto, Masayoshi Tanaka, Hirotaka Muto,
Yoshiharu Kaneda, “Electromagnetic Waves from Partial Discharges and
their Detection using Patch Antenna” , IEEE Transactions on
Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No.3, pp.862-871
(2010)
- [3-16] 新 誠一, 中野一志, 田原 哲也, “ウェーブレット解析の産業応用” , 朝倉書
店, (2005)
- [3-17] Bingsheng Wu, Chaozhi Cai, “Wavelet Denoising and Its Implementation
in LabVIEW” , 2nd International Congress on Image and Signal
Processing (2009)

第4章 汚損劣化とその現地計測技術

4.1 緒言

注型絶縁物の主要な劣化モードである「熱劣化」「部分放電劣化」「汚損劣化」に対して、本章では汚損劣化の現地計測技術について述べる。

第1章で述べた汚損劣化モードとは、時間経過に伴って汚損物が注型絶縁物表面に付着・堆積することで、絶縁物の沿面絶縁性能が低下して、部分放電が発生し易くなることである。汚損劣化は、洗浄作業によりある程度回復可能な可逆的劣化モードであり、設備運用の観点では汚損劣化がどこまで進展したら清掃 or 更新が必要な状態（寿命状態）と判定するかを定義する必要がある。寿命定義は第3章で述べた部分放電発生時点という基準を踏襲して、仕様範囲の最高湿度条件かつ運転電圧で部分放電が発生し得る状態を寿命状態と定義した。

本章では、注型絶縁物沿面の各種汚損状態を模擬した試料を製作して、部分放電電圧を評価する。この汚損状態と部分放電電圧の相関性から、現地計測可能な値を用いて部分放電電圧を算出する手法を提案する。また、提案した汚損劣化評価手法に基づいて、現地計測装置を製作した結果についても述べる。

4.2 汚損劣化の模擬方法

4.2.1 汚損区分

汚損劣化レベルは、絶縁物表面に汚損堆積物が付着した度合いで区分されている。基本的に汚損物が付着すると沿面絶縁性能が低下するため、汚損付着量が多いほど汚損レベルが高いことになる。この汚損付着量を評価する指標として、等価塩分付着密度 $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ (ESDD) と不溶性物質付着密度 $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ (NSDD) がある^[4-1]。ESDD は付着した溶解性物質の導電率を全て NaCl に換算した場合の付着密度、NSDD は付着した塵埃等の不溶性物質の付着密度を示している。汚損レベル分類としては、従来は表面抵抗低下に直結する ESDD を中心に検討されてきたが、近年は NSDD も加味した検討が行われている。代表的な汚損区分として、日本国内基準と IEC 基準を記述する。日本国内基準は変電所の設計基準を基に体系づけられ^[4-2]、塩分付着密度別により 6 区分に分類されている。国内区分の ESDD 値は、一般地区が 0.01 以下、軽汚損地区が 0.01~0.03、中汚損地区が 0.03~0.06、重汚損地区が 0.06~0.12、超重汚損地区が 0.12~0.35、特殊地区が

0.35 超過、となる。この時の NSDD 値は、汚損区分に関わらず $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ （絶縁物表面にこの粉が一樣付着したとする換算値）としている。これに対して IEC 規格では、碍子の汚損設計ガイドを規定した IEC60815 が 2008 年に改定され、NSDD の影響も考慮した区分がなされている。基本的な考え方としては、従来の ESDD 値による汚損区分に対して、NSDD が大きい場合に汚損区分のレベルを上げる、というものである。NSDD 値が十分に小さい条件における IEC 区分の ESDD 値は、「a:Very light」が 0.01 以下、「b:Light」が 0.01~0.03、「C:Medium」が 0.03~0.1、「d:Heavy」が 0.1~0.35、「e:very Heavy」が 0.35 超過、となる。ここで、代表的な受配電盤の使用環境について、日本国内の汚損区分と使用環境で分類したグラフを図 4-1 に示す。

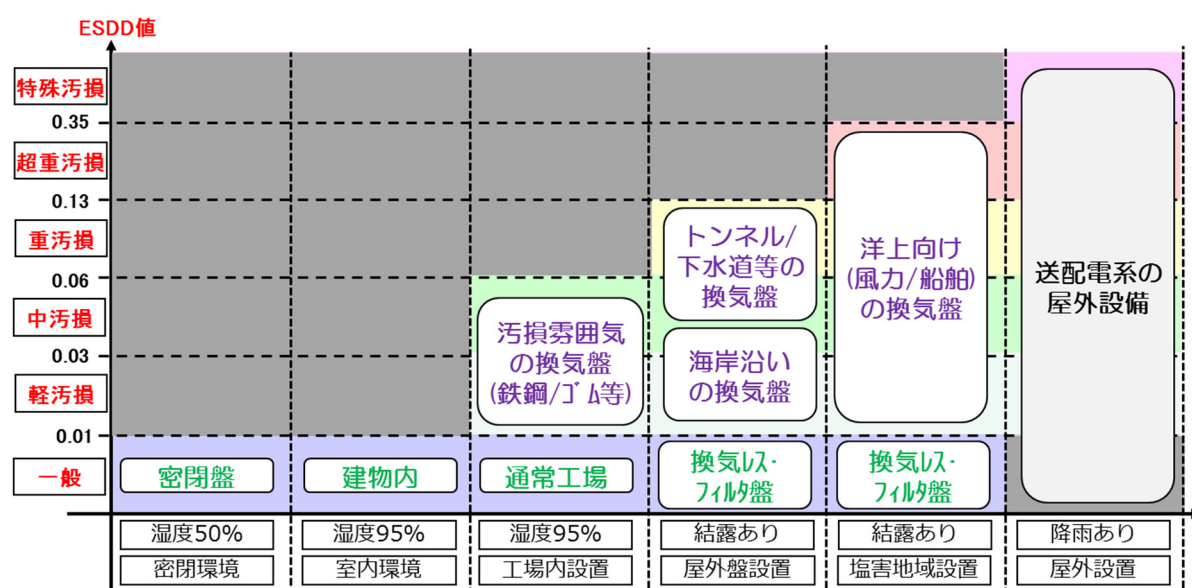


図 4-1 代表的な受配電盤使用環境の汚損区分

屋内設置環境の汚損区分は、基本的には一般地区（ESDD ≤ 0.01）であり、屋内配電盤は一般地区仕様で製作されている。しかし屋内設置であっても、汚損が厳しい雰囲気や海岸沿いの立地の場合には軽汚損～超重汚損となることがある。このような場合は、ユーザ側が汚損区分の要求仕様を設定して、製造メーカーはその汚損区分に合わせた盤設計を行う。今回模擬する汚損レベルは、通常使用される一般地区の最高値である ESDD = 0.01、通常使用よりも汚損レベルが一段階高い軽汚損区分の最高値である ESDD = 0.03、とした。また参考として、最悪汚損レベルを模擬した評価を行うため、導電性物質（銀塗料）を塗布した試料も評価することとした。

4.2.2 汚損方法

主な人口汚損試験方法には、等価霧中法・定印霧中法・霧中定印繰り返し法・煙霧法・珪素土法がある^[4-3]。各汚損試験法では、汚損物質と耐圧試験手順が規定されている。汚損物質は、等価霧中法がとの粉+食塩、定印霧中法がとの粉+石膏+食塩、霧中定印繰り返し法がとの粉+石膏+食塩、煙霧法が食塩水、珪素土法が珪藻土+シリカ+食塩、である。試験方法は、等価霧中法が「汚損付着させた状態で電圧印加」、定印霧中法・霧中定印繰り返し法・珪素土法が「汚損付着された状態（撥水性を抑制した状態）で霧室内に置いて電圧印加」、煙霧法は「圧縮空気で塩水を直接噴霧しながら電圧印加」、である。今回想定している屋内汚損に関しては、湿度が100%となる霧室や水が直接かかる塩水噴霧は過酷すぎる汚損条件であり、等価霧中法を採用することとした。また、汚損劣化の寿命条件は最高湿度条件における部分放電発生と定義したため、一定湿度環境での部分放電電圧を測定することとした。

汚損レベルの調整方法として、対象試料が所定のESDD値となる汚損液を複数作製することとした。対象とする絶縁材料は、汎用的な絶縁材料であるベークライト（紙系）とガラスエポキシとし、その代表的な絶縁特性を表4-1に示す。

表 4-1 ベークライト（紙系）とガラスエポキシの絶縁特性

材料	比誘電率	表面抵抗 [MΩ]	体積抵抗率 [MΩ・cm]	絶縁抵抗 [MΩ]	貫通破壊電圧 [kV/mm]
ベークライト（紙系）	5.6	8.7×10^3	4.0×10^4	1.5×10^4	20~28
ガラスエポキシ	4.6	1.3×10^9	1.7×10^8	2.1×10^9	20~30

両材料の比較では、比誘電率はベークライトがガラスエポキシの約1.2倍、各種抵抗値はガラスエポキシがベークライトの約4,000~150,000倍、貫通破壊電圧は両材料ではほぼ同じである。

次に汚損レベル評価手法には筆洗い法を用いて^[4-3]、各材料で縦100mm×横100mm×厚さ3mmの板材を作製して、ESDD値を評価した。この絶縁板材は、汚損液中に1分間浸した後に、引き揚げて前後左右に傾けて表面の汚損液を落として、角度5度に固定して恒温槽にて80℃で30分間乾燥させた。乾燥後の絶縁物上面に付着した汚損物質を筆で拭き取って、その筆を100gの純水中で洗う。付着した汚損物質を溶かした純水の導電率を計測し、その導電率値からESDD値を算出した。各種汚損液条件（純水+食塩+との粉）に対するベークライトとガラスエポキシの汚損レベル（ESDD値）の関係を表4-2、汚損前後の材料表面状態を図4-2に示す。

表 4-2 汚損液と汚損レベルの関係

条件	汚損液			ベークライト		ガラスエポキシ	
	純水[m]	との粉[g]	食塩[g]	ESDD[mg/cm ²]	汚損区分	ESDD[mg/cm ²]	汚損区分
A	1000	200	5.0	0.0090	一般	0.0098	一般
B	1000	300	7.5	0.0141	軽汚損	0.0148	軽汚損
C	1000	400	10.0	0.0207	軽汚損	0.0216	軽汚損
D	1000	500	12.5	0.0273	軽汚損	0.0283	軽汚損

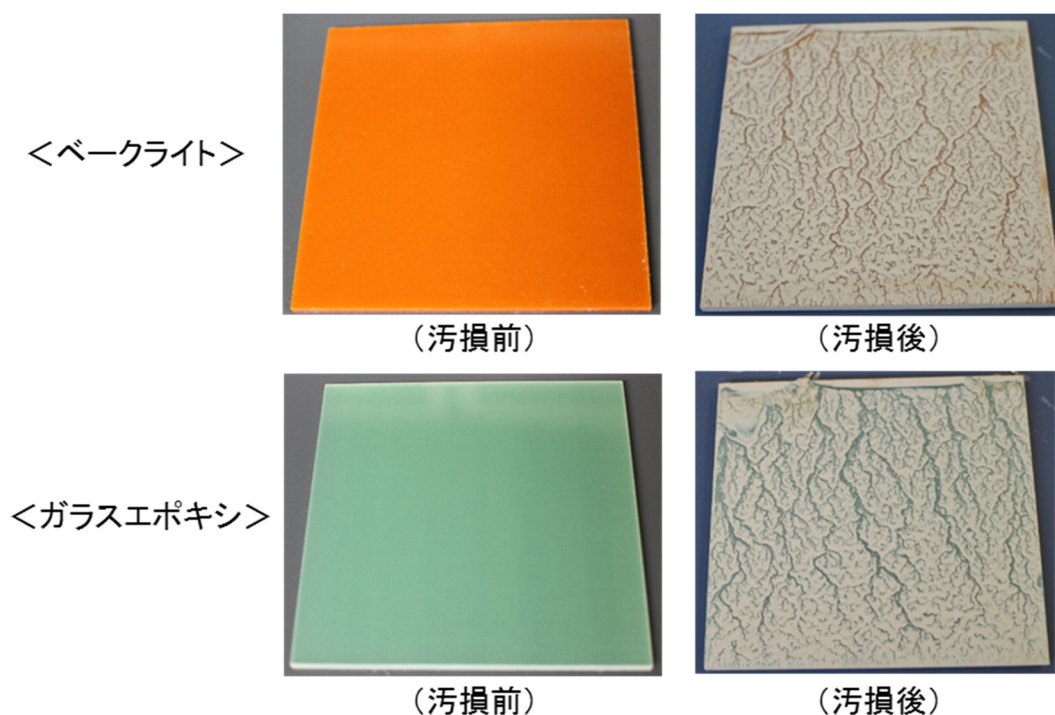


図 4-2 汚損前後の材料表面外観

作製した汚損液は、との粉と食塩の比率と純水の量を固定値として、食塩量を変化させた 4 条件を評価した。ESDD 値は、食塩量が多い汚損液ほど高くなり、材料比較ではガラスエポキシの方がベークライトよりもわずかに高くなった。図 4-2 の表面汚損状態からも、両材料で汚損付着状態に大きな差は無く、材料による付着量の差は無視できると判断した。よって今回使用する汚損液は、ESDD ≒ 0.01 の条件を汚損液条件 A、ESDD ≒ 0.03 の条件を汚損液条件 D、とした。また、導電性汚損に使用する塗布材料は、銀ペースト（タムラ製作所 VL-10）とした。

4.2.3 汚損劣化試料

汚損模擬試料の母材形状を図 4-3、外観写真を図 4-4 に示す。

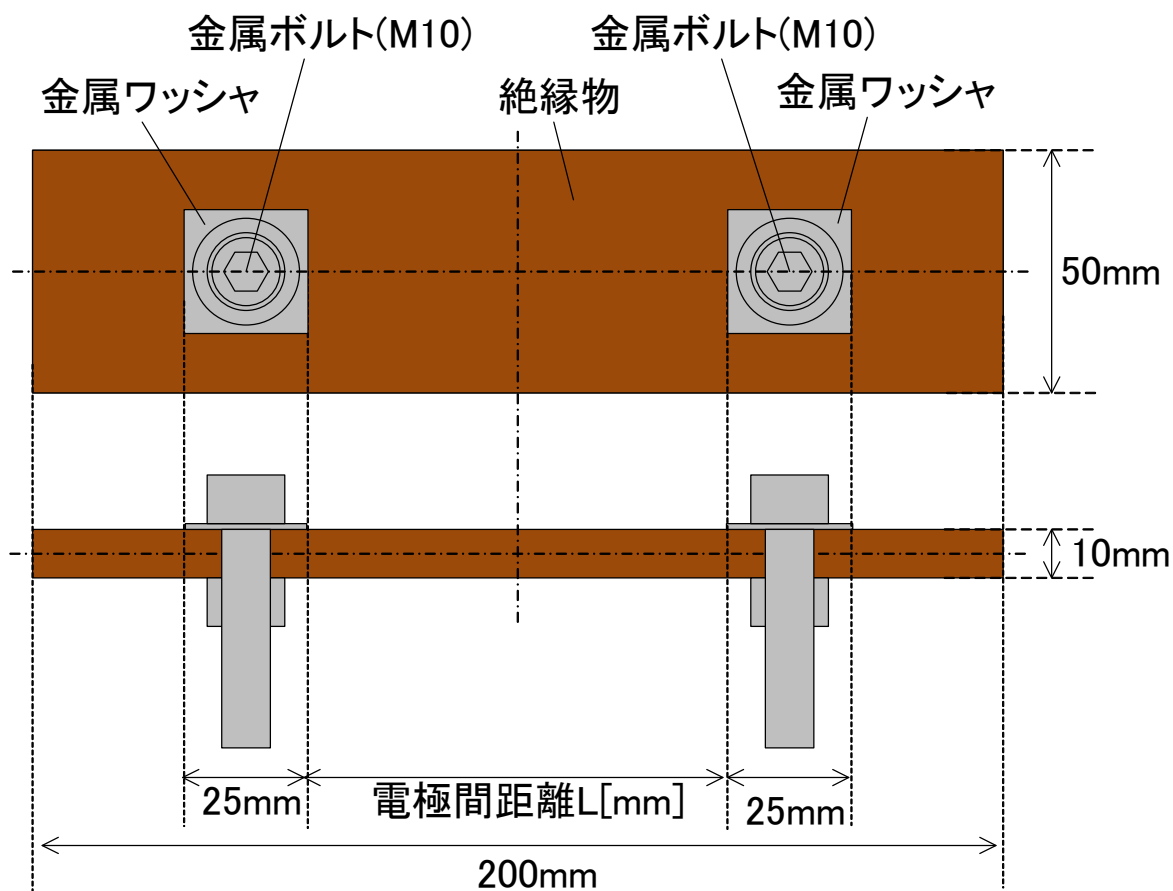


図 4-3 汚損模擬試料の母材形状

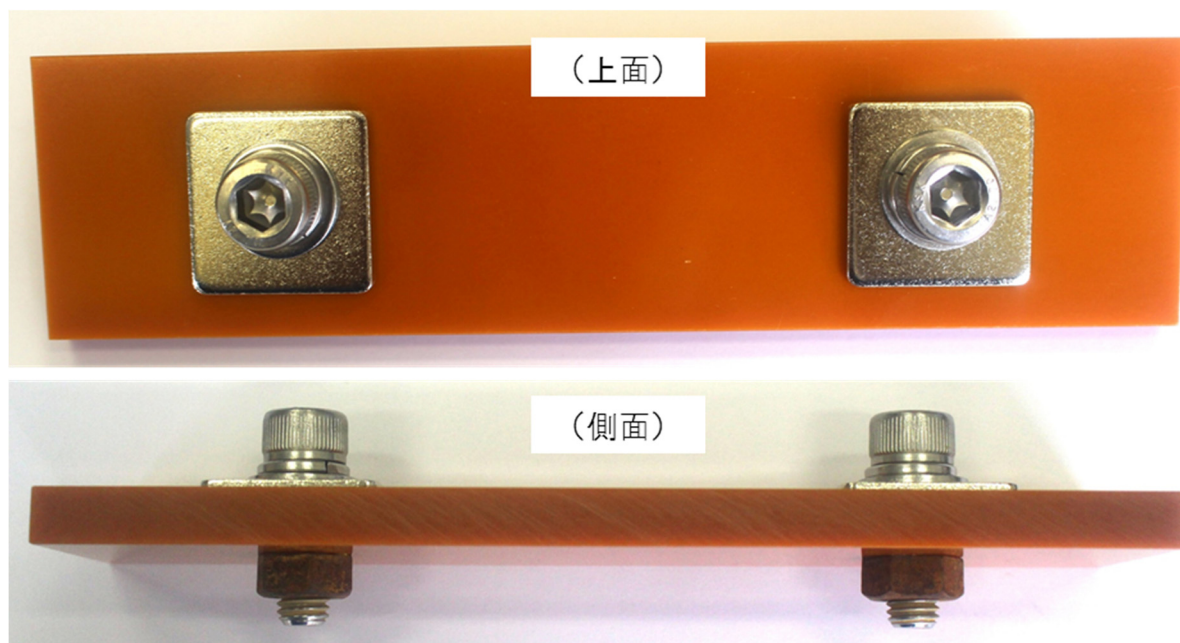


図 4-4 汚損模擬試料母材の外観写真

汚損模擬試料の母材は、縦 50mm×横 200mm×厚さ 10mm の絶縁プレートに、M10 貫通穴を 2 箇所設けた形状とした。貫通穴の中心位置は、プレート中心から横方向対称に電極間距離 $L+25$ [mm] 離れた位置である。貫通穴には、上側から M10 の金属ボルト（ステンレス）に角ワッシャ（縦 25mm×横 25mm×厚さ 2.0mm で角部が $R=3.0$ mm）を嵌めて挿入し、下側からナットで固定した。この試料の形状パラメータは電極間距離 L とし、JEM1103「制御機器の絶縁距離」を基準に寸法を設定した。JEM1103 規格より、使用頻度が最も高い 6.6kV クラスの最小沿面距離 90mm である。この 90mm を基準 L 値として、沿面距離が 50%減の 60mm と 50%増の 120mm の計 3 条件を選定した。

汚損模擬試料の汚損分布を図 4-5、外観写真を図 4-6 に示す。

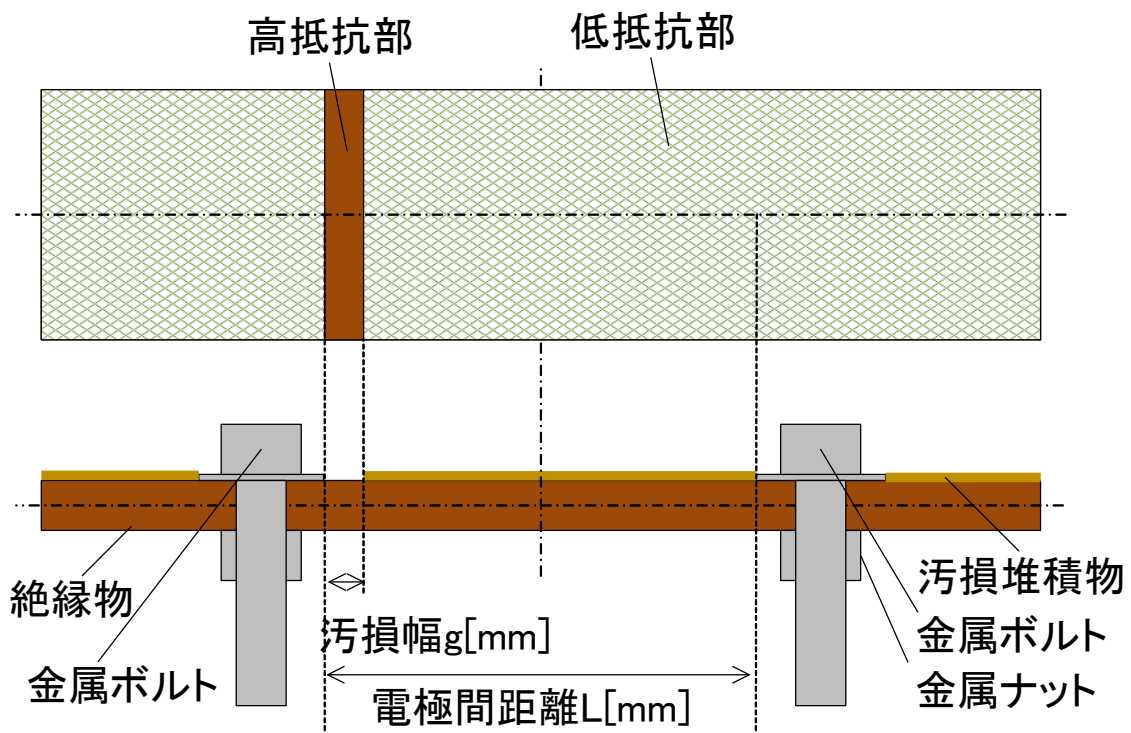


図 4-5 汚損模擬試料の汚損分布

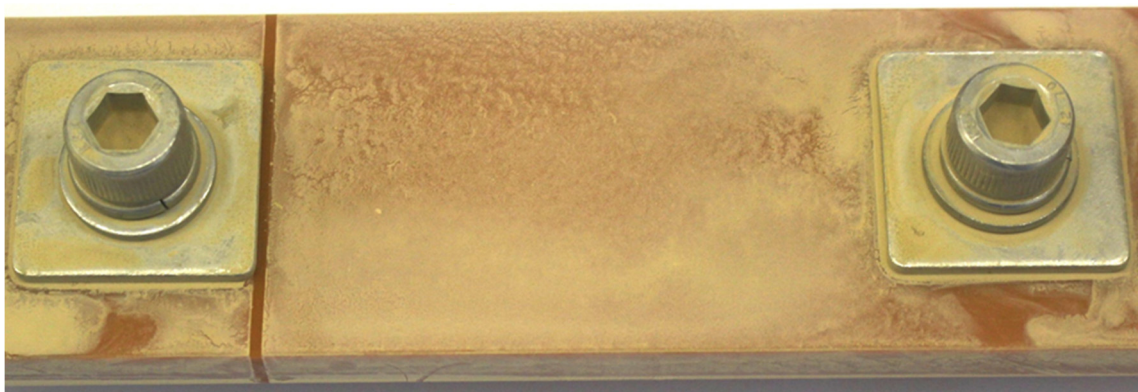


図 4-6 汚損分布の外観写真

図 4-5, 6 に示した通り、汚損模擬試料では局所的に未汚損部を設けている。未汚損部は、片側の金属ワッシャに沿った線條帯とした。この未汚損部作成には、マスキングテープを用いた。マスキングテープを貼った状態で汚損液に漬けて、汚損堆積物が乾燥した後にマスキングテープを剥がして未汚損部を生成した。未汚損部の幅 g は、一様な汚損分布として $g=0\text{mm}$ 、未汚損部が残存する汚損分布として $g=0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ の計 4 条件とした。

以上より、全ての試験条件をまとめると下記表 4-3 になる。

表 4-3 汚損模擬試料の条件一覧

<パラメータ>	<条件数>	<内容>			
絶縁材料	2	ベークライト		ガラスエポキシ	
電極間距離:L	3	60mm	90mm	120mm	
汚損レベル	3	一般汚損	軽汚損	導電汚損	
未汚損部幅:g	4	0mm	0.5mm	1.0mm	1.5mm
雰囲気湿度	2	43%		84%	

表 4-3 の条件において、標準条件は絶縁材料がベークライト、電極間距離が 90mm、汚損レベルが軽汚損、汚損分布が未汚損幅 1.0mm、とした。

4.3 汚損劣化試料の特性評価

4.3.1 部分放電電圧の測定方法

汚損模擬試料の部分放電電圧測定方法として、部分放電の試験回路と試験手順を記述する。
まず、試験回路を図 4-7、試験装置写真を図 4-8 に示す。

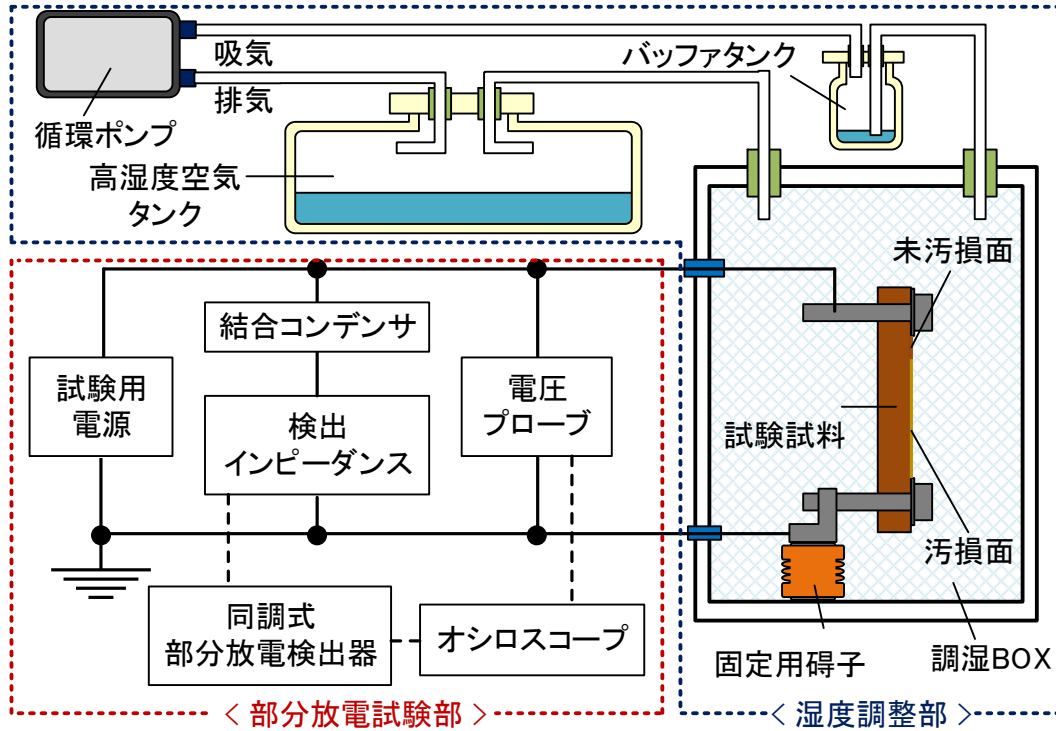
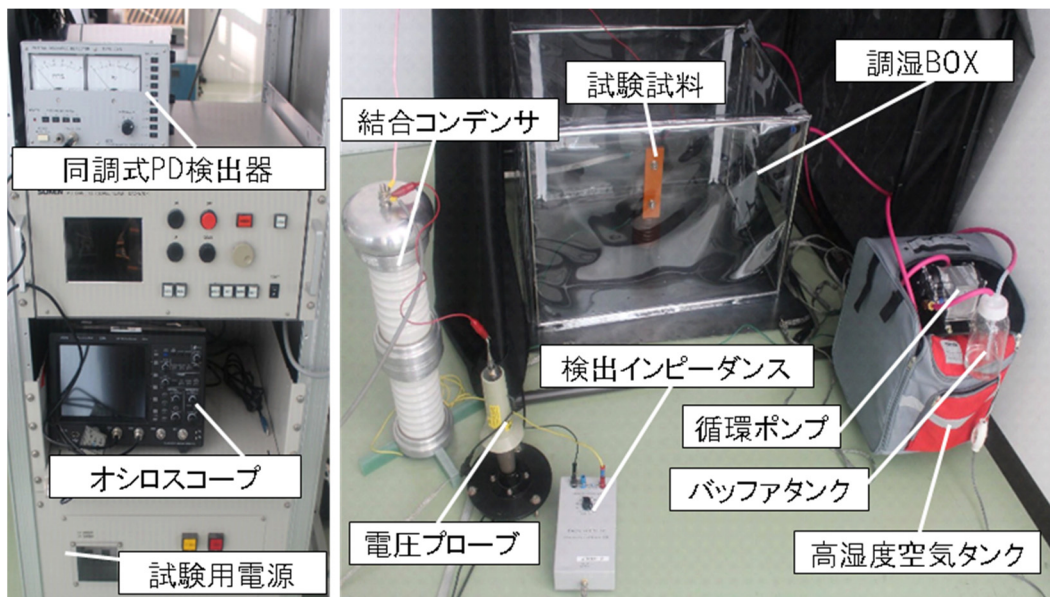


図 4-7 汚損模擬試料の部分放電試験回路



(電圧制御／測定装置部)

(部分放電測定部)

図 4-8 汚損模擬試料の部分放電試験状況

部分放電試験装置の構成は、湿度調整部と部分放電測定部に大別される。湿度調整部で試験試料の湿度を一定に保ち、部分放電試験部ではその湿度状態における部分放電電圧を測定する。この調湿方法と部分放電試験法について、以下に説明する。

調湿方法では、まず試験試料を固定用碍子（6kV 屋内用）に取り付けて、調湿 BOX（サイズ 700×500×500mm）の中に配置する。調湿 BOX は、塩化ビニル樹脂製のフード構造で、空気用と電圧用の貫通孔が各 2 箇所設けられている。この空気循環孔で調湿空気を循環させて、調湿 BOX 内を一定湿度に保つ。調湿空気は、高湿度空気タンク内で飽和塩法による一定湿度空気を生成し、ダイヤフラムポンプで高湿度空気タンクと調湿 BOX 間を循環させる。飽和塩法とは、「塩類の飽和水溶液と熱平衡状態にある空気の相対湿度は塩の種類と溶液の温度により定まる」という原理を用いて、一定湿度の空気を生成する方法である。今回の試験条件である湿度 43%と湿度 84%には、炭酸カリウムと塩化カリウムを用いた。温度 30℃における相対湿度は、炭酸カリウムが 43.2%で塩化カリウムが 84.2%である。湿度 84.2%の条件に関しては、湿度上昇に時間を要することから、調湿 BOX からポンプの区間にバッファタンクを設けている。このバッファタンクには純水が入っており、調湿 BOX から排出された空気を純水内に一旦吐き出させて、そのバッファタンク内の空気をポンプに送っている。この調湿方法を用いることで、10 分以内に目標湿度に到達し、その湿度を±1.0%範囲で 30 分以上保持することが出来る。

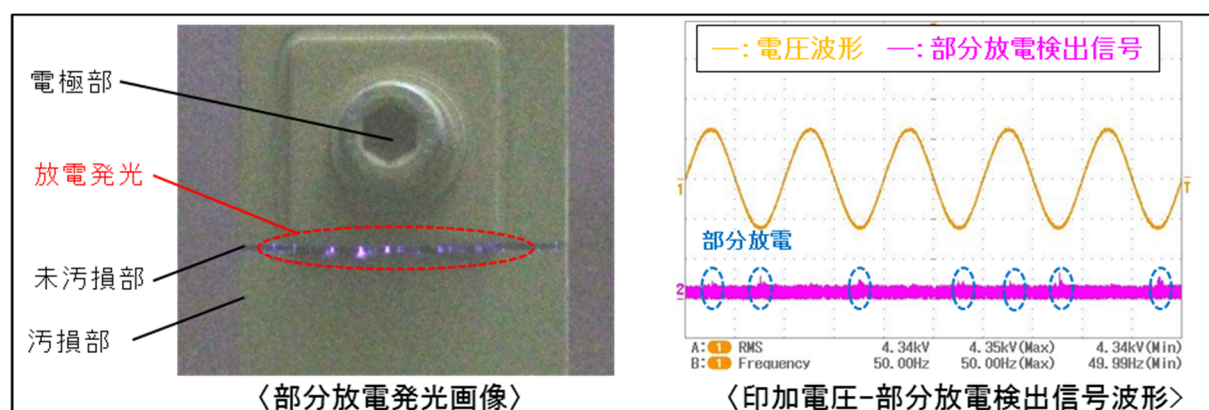
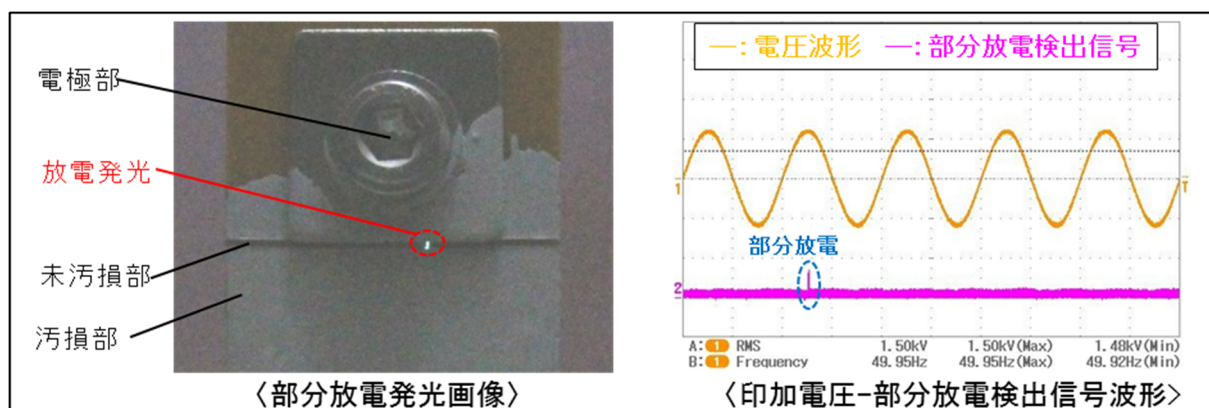
部分放電試験方法は、調湿 BOX 内に固定された試験試料に対して、部分放電が発生する電圧を測定する。試験電源には交流試験電源（15kV/5kVA）を用いて、試験試料と並列に結合コンデンサ（2000pF）と電圧プローブ（3pF）を接続する。部分放電測定には同調式を用いて、結合コンデンサと接地ライン間に検出用インピーダンス（キャパシタンス値は 100～10,000pF で任意設定）を接続し、その出力を同調式部分放電検出器（CD-6）で検出した。この印加電圧と部分放電信号をオシロスコープで測定し、部分放電が発生した電圧を評価した。部分放電の検出感度は、試験環境によるノイズレベルに影響され、今回の試験設備ではノイズレベルが 0.5pC であった。そこで、明確に部分放電を判別できる基準を 1.0pC と判断し、1.0pC 以上のパルス信号が繰り返し発生した電圧を部分放電電圧とした。また、部分放電の発生箇所を確認するため、一部条件では放電発光画像も撮像した。（なお、試験電圧上限の 15kV で部分放電が発生しなかった条件については、試験用電源、結合コンデンサ、電圧プローブを 100kV 用に変更して再実験した。）

4.3.2 汚損状態と部分放電電圧の関係

各条件で部分放電電圧を 10 回ずつ測定して平均値を求めた。全条件の部分放電電圧値を表 4-4、代表的な条件の放電発光画像と印加電圧-部分放電波形を図 4-9~12 に示す。

表 4-4 全試験条件における部分放電電圧値 (kVpeak)

母材	電極間距離	未汚損幅	湿度43%			湿度84%		
			一般汚損	軽汚損	導電汚損	一般汚損	軽汚損	導電汚損
ベークライト	60mm	0.0mm	23.05	20.79	0.00	9.31	5.02	0.00
		0.5mm	7.23	4.20	1.57	3.38	1.85	1.67
		1.0mm	9.59	5.97	2.06	4.88	2.35	1.99
		1.5mm	12.28	7.91	2.36	5.81	3.89	2.35
	90mm	0.0mm	26.59	23.62	0.00	10.62	7.92	0.00
		0.5mm	10.86	5.18	1.58	3.90	1.90	1.60
		1.0mm	12.42	6.65	2.05	5.36	2.43	2.08
		1.5mm	14.13	8.91	2.38	6.28	4.24	2.45
	120mm	0.0mm	33.23	29.42	0.00	12.56	11.06	0.00
		0.5mm	10.28	6.10	1.60	4.29	1.88	1.57
		1.0mm	13.80	9.28	2.09	5.76	2.43	2.05
		1.5mm	16.12	12.43	2.47	6.80	4.62	2.43
ガラスエポキシ	90mm	0.0mm	21.35	17.11	0.00	8.29	5.37	0.00
		0.5mm	7.07	3.83	1.63	4.43	1.88	1.61
		1.0mm	8.32	5.13	2.02	4.71	2.26	2.11
		1.5mm	9.79	6.01	2.43	5.70	3.32	2.39



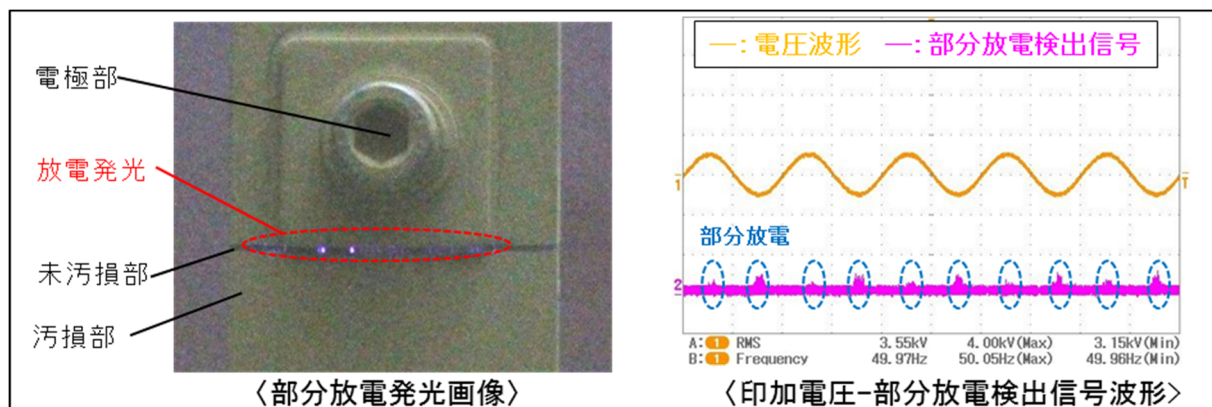


図 4-11 部分放電特性（条件：ガラスエポキシ、L=90mm、軽汚損、g=1.0mm、湿度 43%）

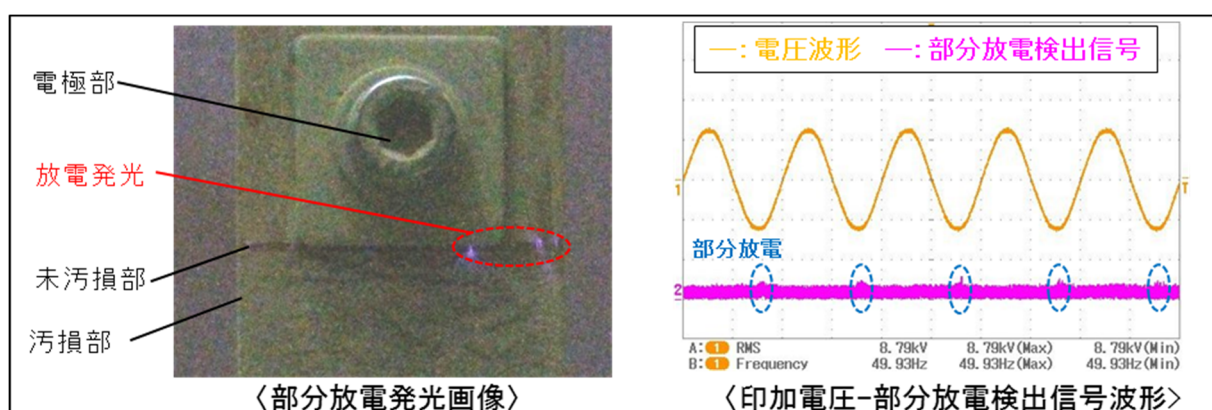


図 4-12 部分放電特性（条件：ベークライト、L=90mm、一般汚損、g=1.0mm、湿度 43%）
 （※ 部分放電発光画像は、数 100pC レベルの部分放電が発生した状態で撮像）

図 4-9～12 では、電極間距離 $L=90\text{mm}$ と未汚損幅 $g=1.0\text{mm}$ と湿度=43%を一定として、母材と汚損レベルが異なる条件での試験結果を示した。放電発光画像より、母材や汚損レベルに関係なく放電発生箇所は未汚損部であり、未汚損部にかかる電位差が大きくなることで放電が発生したと推察する。未汚損部を設定していない条件では、表 4-4 より部分放電電圧は非常に高くなり、明確な放電発光画像も撮像できなかった。このようにほぼ均一な汚損分布の場合は、局所的に電位分担が集中する部位が微小なために、放電が発生し難く、放電発光も小さかったと推察する。印加電圧-部分放電波形より、部分放電信号は電圧ピーク付近で検出され、部分放電電荷量は $1\sim 3\text{pC}$ であった。この電荷量レベルは本試験系の検出限界とほぼ同等であり、さらに低い電圧で 1pC 未満の部分放電が発生していた可能性もある。今回は 1pC 未満の部分放電は無視して、汚損条件と部分放電電圧の関係を評価することとした。

次に汚損条件と部分放電電圧の関係として、(a) 絶縁材料の影響、(b) 電極間距離の影響、(c) 未汚損幅の影響、(d) 汚損レベルの影響、(e) 湿度の影響、でまとめた。

(a) 絶縁材料の影響

絶縁材料のベークライトとガラスエポキシについて、横軸に絶縁材料以外の条件、縦軸に部分放電電圧、としたグラフを図 4-13 に示す。

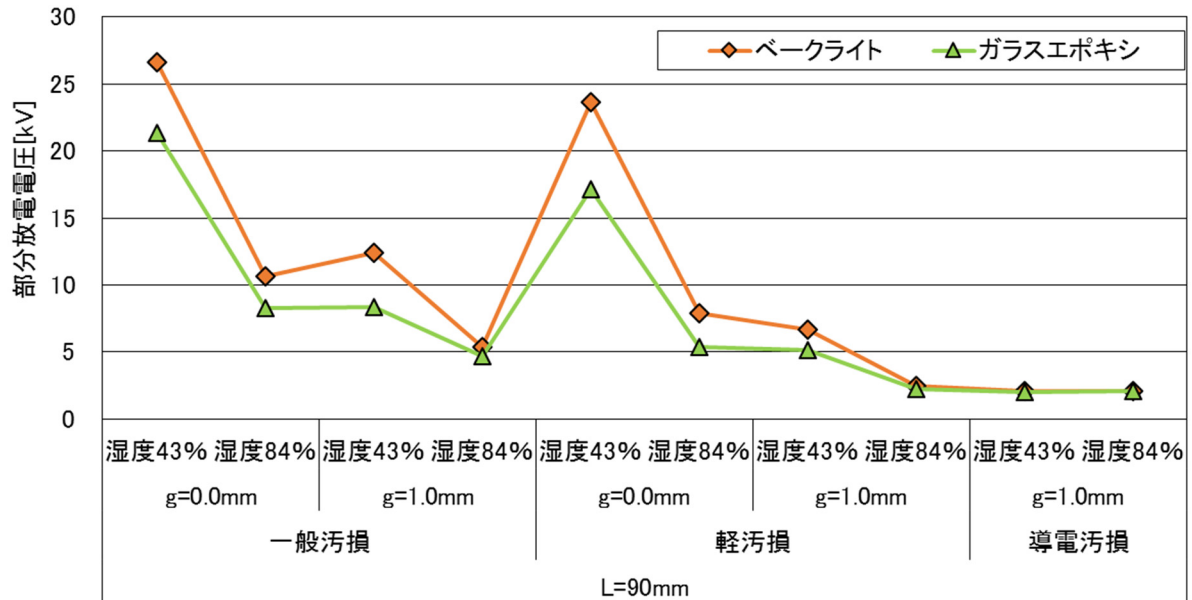


図 4-13 絶縁材料と部分放電電圧の関係

全ての条件で、ベークライトの方がガラスエポキシよりも部分放電電圧が高い。材料特性の比較では、ベークライトの方がガラスエポキシよりも未汚損時の表面抵抗が低い。放電発生箇所は未汚損部であることから、未汚損部の表面抵抗が低い方がその分担電圧も小さくなり、部分放電電圧が高くなったと推察する。

(b) 電極間距離 L の影響

電極間距離 L=60, 90, 120mm について、横軸に電極間距離 L 以外の条件、縦軸に部分放電電圧、としたグラフを図 4-14 に示す。

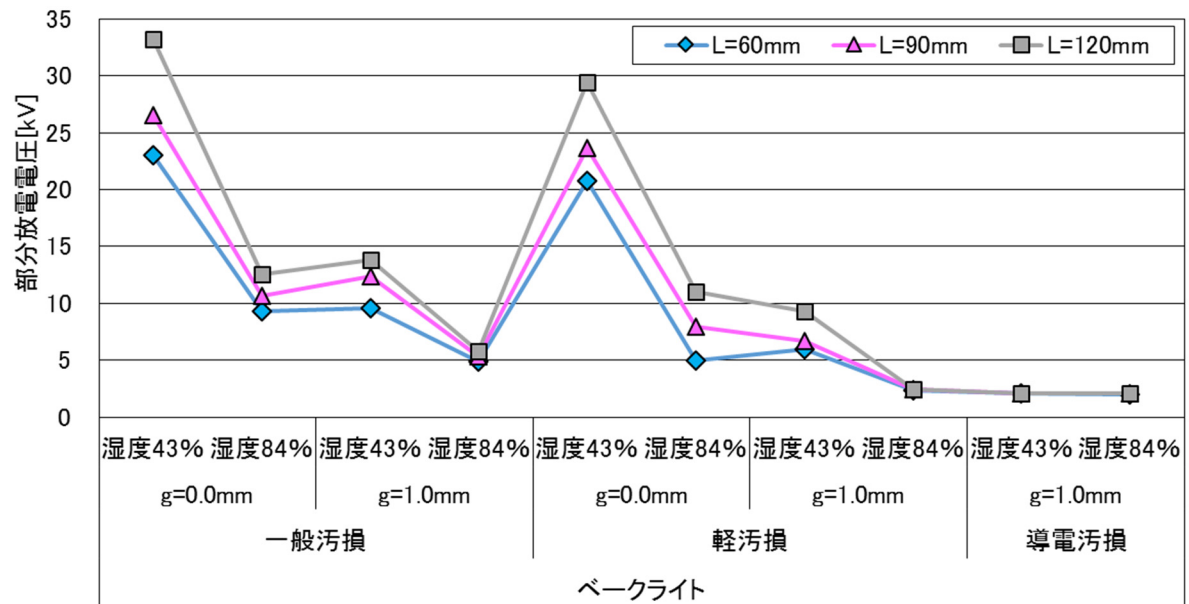


図 4-14 電極間距離 L と部分放電電圧の関係

全ての条件で、電極間距離が長いほど部分放電電圧は高い。この理由は、電極間距離が長いほど汚損部全長の表面抵抗が高くなり、未汚損部に分担する電位差が小さくなるためと推察する。

(c) 未汚損幅 g の影響

未汚損幅 $g=0.0, 0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ について、横軸に未汚損幅 g 以外の条件、縦軸に部分放電電圧、としたグラフを図 4-15 に示す。

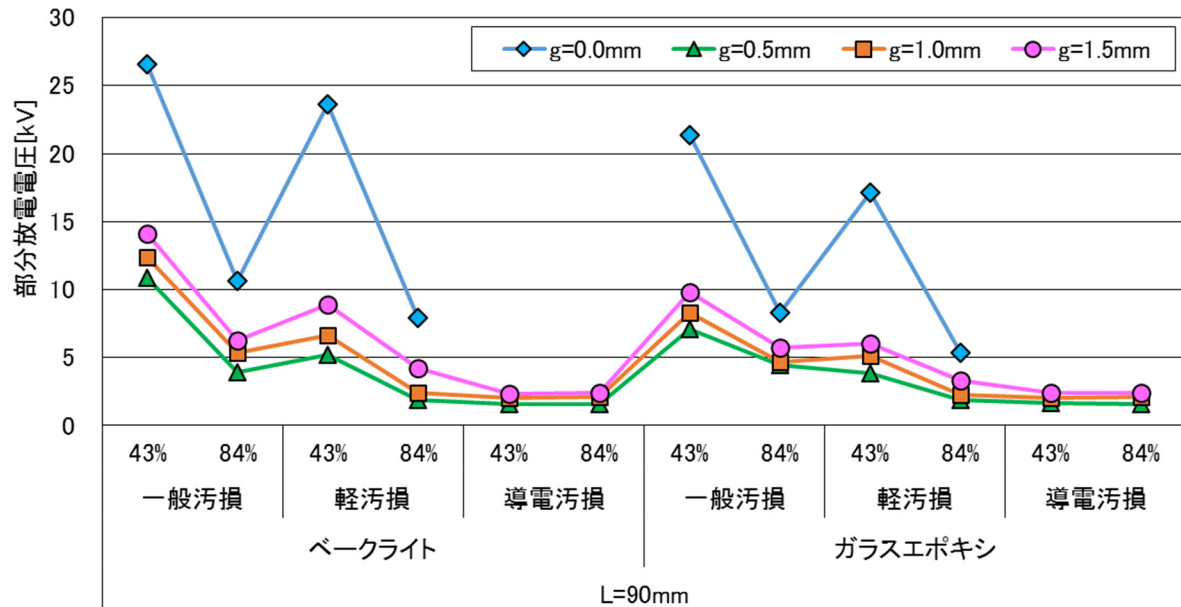


図 4-15 未汚損幅 g と部分放電電圧の関係

未汚損幅 $g=0.5, g=1.0, g=1.5, g=0.0$ の順番で、部分放電電圧は高くなる。未汚損部がある条件では、「未汚損部の分担電圧」が「未汚損部を放電させるのに必要な電圧」に至ることで部分放電が発生する。未汚損部の分担電圧は、未汚損幅が短くなることにより低下していく。未汚損部を放電させるのに必要な電圧は、未汚損幅が短くなることにより低下していくが、ある幅以下になれば一定値となる。これは、ギャップ長×圧力と放電電圧の関係曲線であるパッシェンカーブにて、パッシェンミニマム以下にギャップ長を短くした場合には放電電圧が低下しなくなることで知られている^[4-4]。よって、未汚損幅が一定以下になれば、未汚損部の分担電圧だけが低下することになるので、部分放電電圧は上昇していくこととなる。今回の条件では、未汚損幅 $g=0.5\sim 1.5\text{mm}$ はパッシェンミニマム ($\approx 0.007\text{mm}$) よりも十分に大きく、未汚損幅が短いほど部分放電電圧が低くなったと推察する。未汚損部が無い条件では、局所的に汚損レベルが低い微小領域で部分放電が発生したと推定する。この放電発生部は、未汚損部ほどは表面抵抗が高くなく、その放電ギャップも非常に小さいため、部分放電電圧が高くなったと推察する。

(d) 汚損レベルの影響

汚損レベルが一般汚損，軽汚損，導電汚損について、横軸に汚損レベル以外の条件、縦軸に部分放電電圧、としたグラフを図 4-16 に示す。

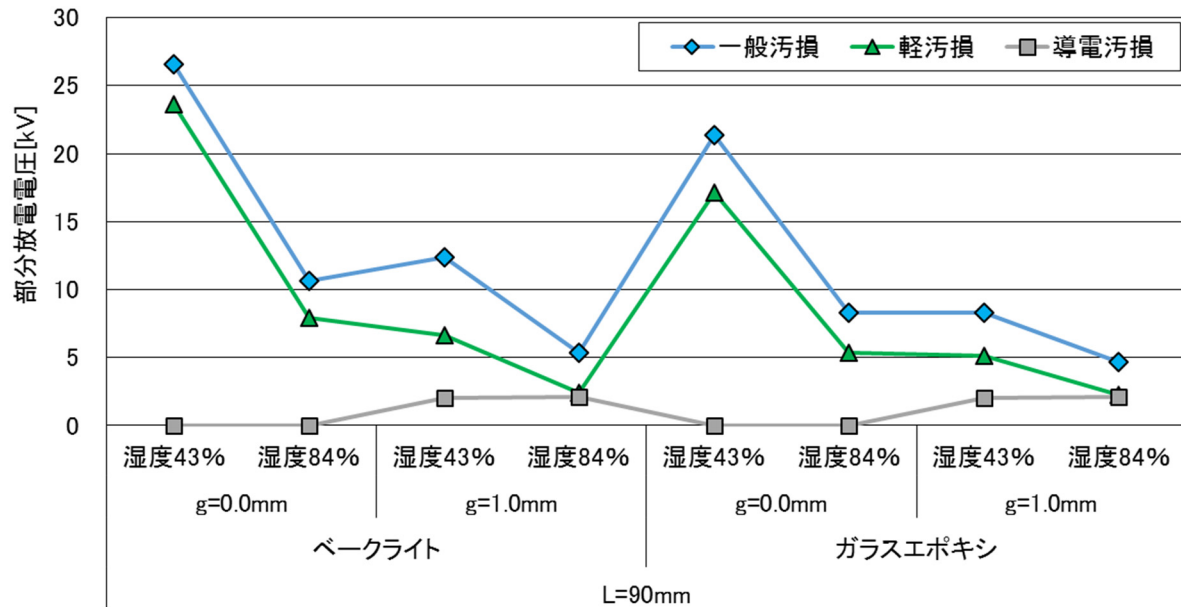


図 4-16 汚損レベルと部分放電電圧の関係

全ての条件で、汚損レベルが低いほど部分放電電圧は高い。この理由は、汚損レベルが低いほど汚損部全長の表面抵抗が高くなり、未汚損部に分担する電位差が小さくなるためだと推察する。

(e) 湿度の影響

雰囲気湿度が43%, 84%について、横軸に湿度以外の条件、縦軸に部分放電電圧、としたグラフを図4-17に示す。

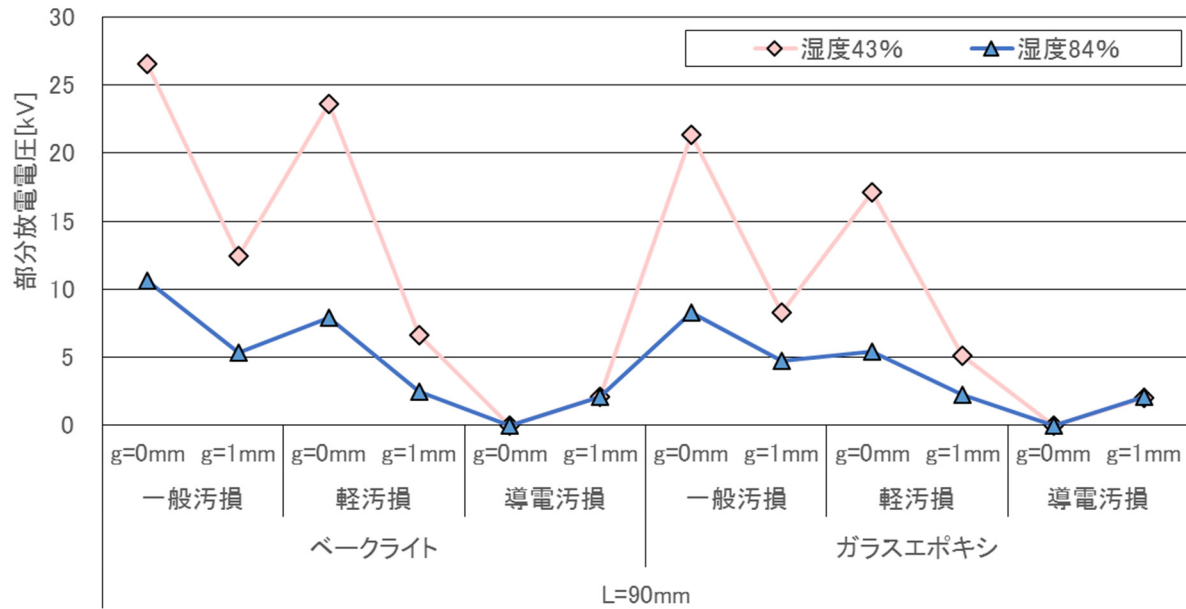


図4-17 相对湿度と部分放電電圧の関係

全ての条件で、湿度が低いほど部分放電電圧は高い。この理由は、未汚損部よりも汚損部の方が湿度上昇に伴う表面抵抗低下率が大きいために、湿度上昇に伴い未汚損部の分担電圧が上昇するためだと推察する。汚損部の方が表面抵抗の湿度依存性が高い理由は、汚損堆積物が吸湿し易いためである。

4.4 汚損劣化の現地計測技術

4.4.1 汚損状態における部分放電電圧の推定技術

4.3 節より、屋内汚損沿面の部分放電は局所的な未汚損部（高抵抗帯）で発生し、その部分放電電圧は(a)絶縁材料の未汚損時表面抵抗値、(b)電極間距離、(c)未汚損幅、(d)汚損レベル、(e)湿度、の全てに依存することが分かった。これらのパラメータの中で、現地評価時に顧客から入手可能な項目と安全の観点で最悪条件の値を設定すべき項目は、固定値とすることにした。顧客から入手可能な情報として、(b)電極間距離は使用電圧と絶縁寸法規格から最小値を設定可能と判断した。最悪条件とすべき項目として、(e)湿度は設置条件の許容最高湿度に設定すべきと判断した。また(c)未汚損幅についても、どのような幅の未汚損幅も残存し得る可能性があるため、最悪条件の未汚損幅を設定すべきと判断した。最悪条件の未汚損幅は一意的には決まらないうが、図 4-15 の結果から部分放電電圧は未汚損幅が 0.0mm~0.5mm の間で極小値を持つと推測される。残った項目は(a)絶縁材料の未汚損時表面抵抗と(d)汚損レベルであり、この項目は現地測定を行わないと評価することができない。ここで、(a)は未汚損時の表面抵抗値、(d)は汚損時の表面抵抗値について、これらの抵抗値と部分放電電圧の関係を評価することとした。まずは、最も一般的なメガ等で計測される電極間抵抗値と部分放電電圧の関係を評価した。本実験で用いた試験試料の電極間抵抗値は、下記式(4.1)で算出することとした。

$$\begin{aligned} \text{電極間抵抗値} = & \text{汚損部の表面抵抗率} \times (\text{電極間距離} - \text{未汚損幅}) \\ & + \text{未汚損部の表面抵抗率} \times \text{未汚損幅} \end{aligned} \quad (4.1)$$

式(4.1)で求めた各汚損条件の電極間抵抗値と部分放電電圧の関係を図 4-18 に示す。

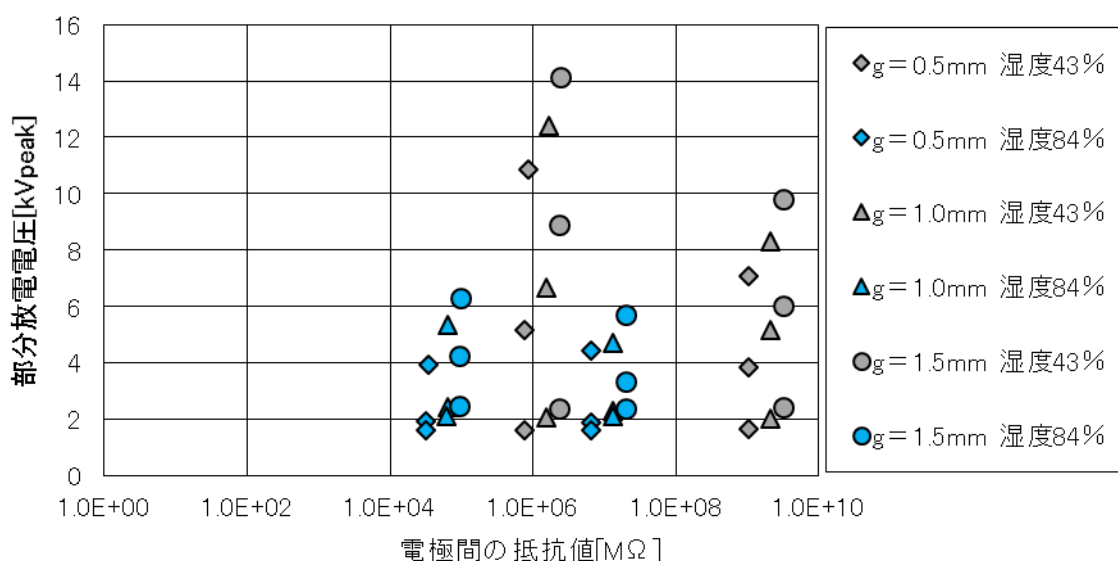


図 4-18 電極間抵抗値と部分放電電圧の関係（電極間距離 L=90mm）

図 4-18 より、電極間抵抗値と部分放電電圧にはほとんど相関がみられない。汚損沿面の電極間抵抗は、汚損部の表面抵抗と未汚損部の表面抵抗の和である。この汚損部と未汚損部の表面抵抗率の差が $10^3 \sim 10^7$ 倍もあるため、数 mm 程度でも未汚損部が残存していれば、汚損レベルが変化しても電極間抵抗は殆ど低下しない。すなわち、電極間のメガー測定では汚損レベルを十分に評価できていない可能性があり、絶縁抵抗値が十分に高くても部分放電が発生しないことは保証できない。

次に、汚損部と未汚損部の抵抗比と部分放電電圧の関係を図 4-19 に示す。

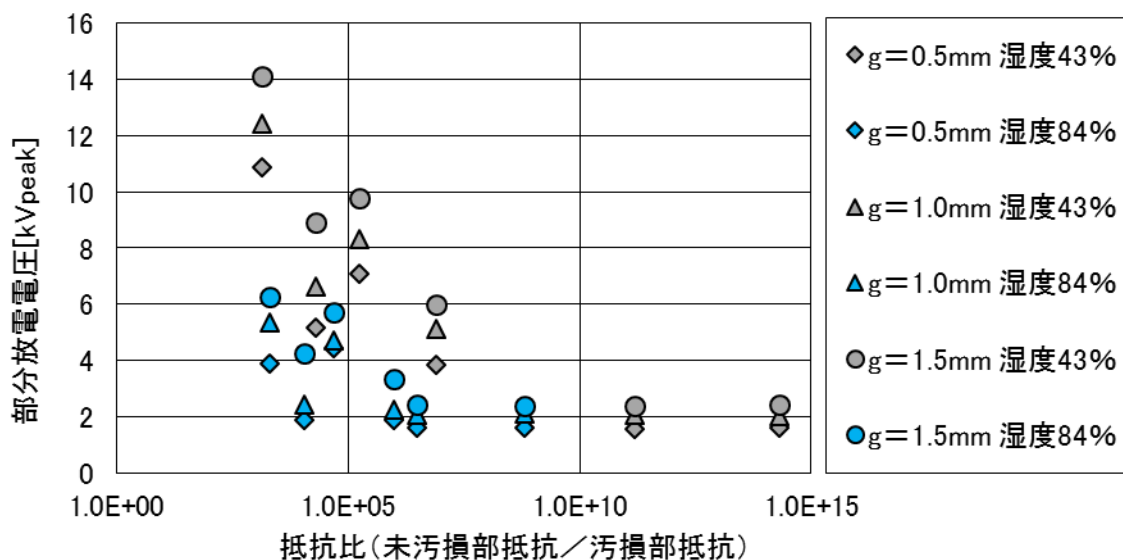


図 4-19 抵抗比(未汚損部/汚損部)と部分放電電圧の関係 (電極間距離 L=90mm)

図 4-19 より、抵抗比の上昇に伴い部分放電電圧は低下していき、その低下傾向は飽和する傾向にあることがわかった。飽和状態 (抵抗比が一定値以上) になれば、ほぼ全ての電圧を未汚損部で分担することになるため、未汚損幅 g だけで部分放電電圧が決定される。未汚損幅と電極間距離が一定であれば、部分放電電圧は抵抗比と湿度に依存することがわかった。抵抗比だけでなく湿度にも依存する原因は、電極間の表面抵抗が低下すること、汚損堆積部が湿潤して汚損分布が均一化されること、が影響していると推察した。電極間の表面抵抗が低下することは、材料内部の固有容量成分が電位分担に影響しにくくなることを示しており、未汚損幅に分担する電位が大きくなる。電極間の汚損分布が均一化することは、汚損面内に局所的な高抵抗帯が残存しにくくなることを示しており、未汚損幅に分担する電位差が大きくなる。

上記検討結果から、汚損沿面の等価回路モデルは図 4-20 に示す抵抗分担回路に近似できると考えた。

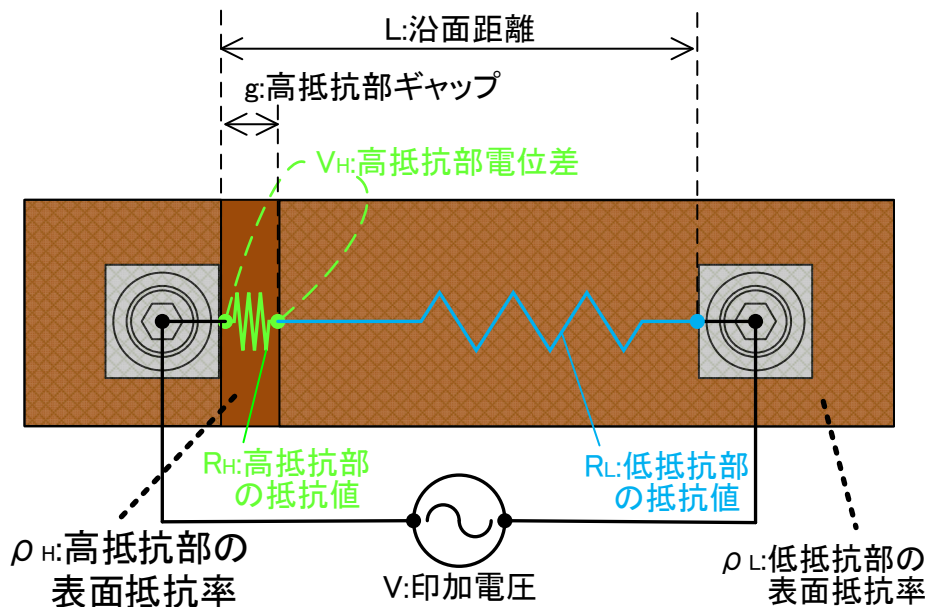


図 4-20 汚損沿面の等価回路モデル

この等価回路は、高抵抗部の抵抗値 R_H と低抵抗部の抵抗値 R_L の直列回路である。各抵抗値は、 $R_H = \text{高抵抗部の表面抵抗率 } \rho_H \times \text{高抵抗部ギャップ長 } g$ 、 $R_L = \text{低抵抗部の表面抵抗率 } \rho_L \times (\text{沿面距離 } L - \text{高抵抗部ギャップ長 } g)$ 、で求める。この絶縁物に電圧 V を印加することで、抵抗比分担で高抵抗部に電位差 V_H が発生する。この高抵抗部に発生する電位差 V_H は、下記式 (4.2) で求められる。

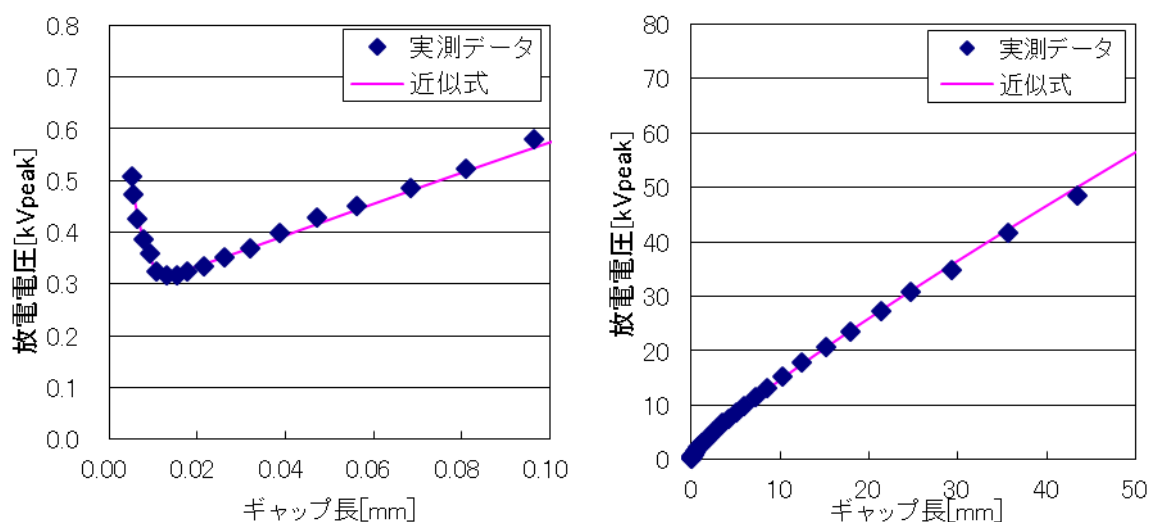
$$V_H = \frac{V}{1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_H}\right)^m \times \frac{(L-g)}{g}} \quad (4.2)$$

式 (4.2) の係数 m は、湿度に依存して 0.1~1.0 の値を持つ変数とした。湿度が高くなることで、汚損面の抵抗分布は均一となり、抵抗値が下がることで等価回路も固有容量の影響が無視できる完全な抵抗場に近づくと考えて、 m 値は湿度が高いほど 1 に近づくと仮定した。ここで、高抵抗部の分担電圧と印加電圧の比 (V_H/V) を電圧分担率 α と定義しておく。

高抵抗部で放電が生じる電位差の推定には、パッシェン則の近似式^[4-4]を用いた。パッシェン則とは、雰囲気圧力 \times ギャップ長と放電電圧の関係を示す実験則である。このパッシェン則で、雰囲気圧力 P のギャップ長 g を放電させるのに必要な電位差 V_{H-F_0} を求める近似式 (4.3) を作成した。

$$V_{H-F_0} = f(P \times g) = \frac{C \times (P \times g + A)}{D + B \times \ln(P \times g + A)} \quad (4.3)$$

式 (4.3) の A, B, C, D は、 $P \times g$ の値によって設定した定数である。パッシェンカーブは極小値を持つ曲線であり、極小値左側と極小値近傍と極小値右側の 3 つに区分けして、それぞれ異なる定数を設定している。ここで参考として、雰囲気圧力を大気圧に固定した条件で、ギャップ長 g と放電電圧の関係グラフを図 4-21 に示し、大気圧雰囲気下でのパッシェン曲線に関する補足説明を行う。



(ギャップ長 0.1mm 以下の範囲)

(ギャップ長 0~50mm の範囲)

図 4-21 大気圧雰囲気におけるギャップ長と放電電圧の関係

図 4-21 より、ギャップ長 g が 0.007mm 以上においては、ギャップ長が短いほど放電に必要な電圧は小さくなる。この極小値となるギャップ長をパッシェンミニマムギャップと呼び、この左側領域はギャップ長が短くなるほど放電電圧は上昇していく。ただし、パッシェン曲線左側領域における実測データは、基本的に雰囲気圧力を下げて取得したものである。最近の研究では、大気圧雰囲気下ではパッシェン曲線左側領域でギャップ長を短くしても放電電圧は上昇せず、一定値もしくは徐々に低下していく傾向を示すことが分かっている^[4-5]。

ここで部分放電電圧 V_{F0} とは、高抵抗部の電位差 V_H がパッシェン放電電圧と一致するときの印加電圧であり、式 (4.2) と式 (4.3) の連立式を解くことで部分放電の推定式 (4.4) が得られる。

$$V_{F0} = \frac{V_{H-F0}}{\alpha} = \left[\frac{C \times (P \times g + A)}{D + B \times \ln(P \times g + A)} \right] \times \left[1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_H} \right)^m \times \frac{(L-g)}{g} \right] \quad (4.4)$$

この式 (4.4) で求めた部分放電電圧の計算値と実測値の関係を図 4-22 に示す。

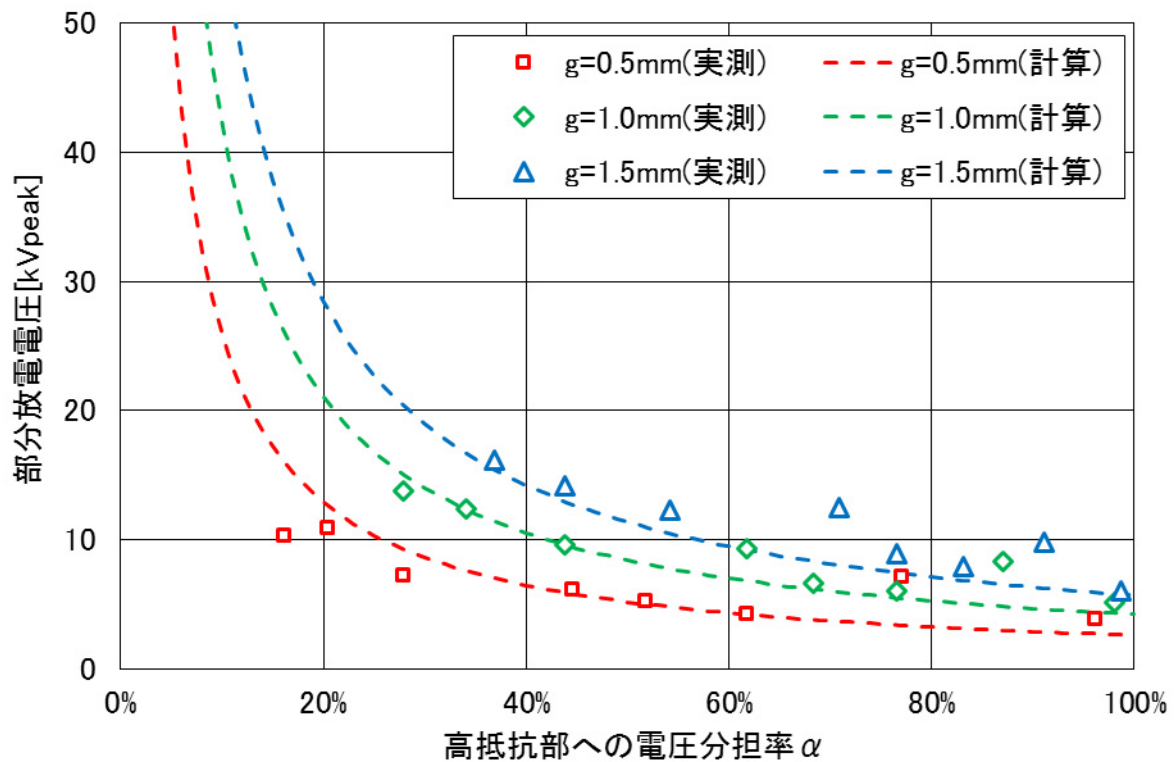


図 4-22 高抵抗部への電圧分担率と部分放電電圧の関係

図 4-22 は、横軸を高抵抗部の電圧分担率 α 、縦軸を部分放電電圧として、計算結果を点線、実測結果をプロットで表示した。電圧分担率 α の上昇に伴い、部分放電電圧が低下していく傾向は、計算値と実測値でよく一致している。ただし電圧分担率 $\alpha = 70 \sim 90\%$ では誤差も生じており、誤差が大きいのは汚損レベルが高くて湿度が低い条件である。この条件では、汚損面に局所的な高抵抗帯が残存しているために、汚損沿面の表面抵抗値が JIS 標準電極で測定した値よりも大きくなったと推察する。よって、計算に用いた表面抵抗値が実試料よりも低いために、部分放電電圧も過小評価したと考える。実運用上で問題となるのは最悪環境（高湿度状態）での部分放電電圧であり、この計算誤差については許容できると判断して、計算式 (4.4) で汚損沿面の部分放電電圧を表面抵抗比と湿度条件から算出することとした。

4.4.2 現地計測装置の開発

4.4.1 節で示した手法で汚損劣化度を評価するために、現地で高湿度表面抵抗を計測する装置を開発した。この高湿度表面抵抗の現地測定装置の装置写真を図 4-23、装置構成を図 4-24 に示す。

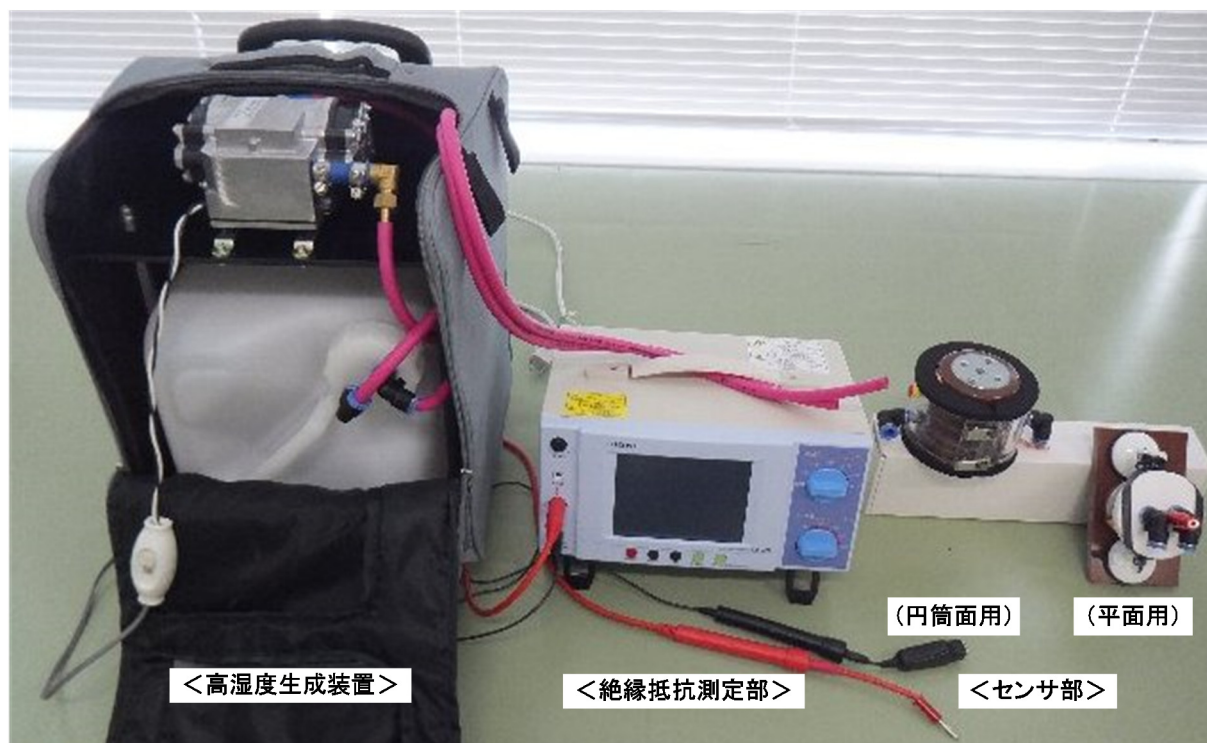


図 4-23 高湿度表面抵抗の現地測定装置写真

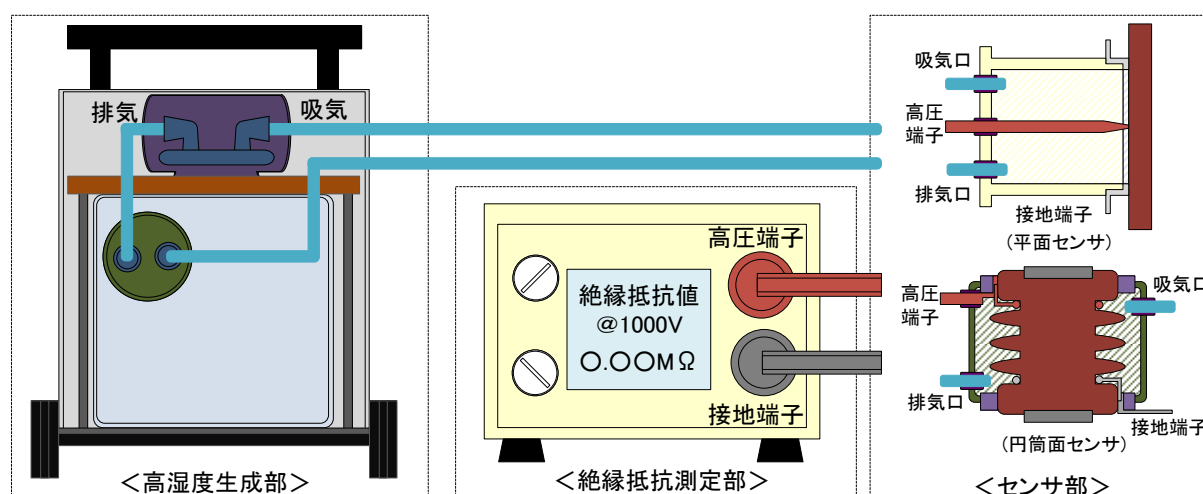


図 4-24 高湿度表面抵抗の現地測定装置構成

本測定装置は、高湿度生成部と絶縁抵抗測定部とセンサ部で構成した。

高湿度生成部は、市販品の可搬キャリア（幅 300mm，高さ 370mm，奥行 300mm）の内部に高湿度空気容器（10L 用 PE タンク幅 230mm，高さ 230mm，奥行 280mm）と循環ポンプ（ダイアフロム式、排出空気量 25L/min 幅 115mm，高さ 93mm，奥行 115mm）を組み込んだ。可搬キャリア内部は、4本の支柱（高さ 280mm）を底面にねじ止めし、その上に架台（エポキシプレート幅 280mm，高さ 50mm，奥行 230mm）を取り付けた。架台の下に高湿度空気容器を配置し、架台の上に循環ポンプを固定した。高湿度空気容器の内部は、純水 1L と硫酸カリウム 500g を封入しておくことで、高湿度一定（≒97%）に保っている。容器外への吸排口は、キャップにΦ10の穴を二つ開けて、その穴に長さ 100mm 程度の形状保持ホース（Φ10）を挿入して接着し、L 字型ワンタッチ継手（Φ10）を取り付けた。吸排口は一方をセンサ部品、もう一方を循環ポンプへ、とフレキシブルホース（Φ10）にて接続した。循環ポンプの吸排気口には、ゴムチューブと金属固定バンドを取り付けた。ポンプの排気口は高湿度空気容器へ、吸気口はセンサ部品へ、とフレキシブルホース（Φ10）にて接続した。

絶縁抵抗測定部は、市販品のデジタル絶縁抵抗計（HIOKI 社製 SM-8220:最大電圧 1000V, 測定レンジ 5MΩ～20TΩ）を用いて、測定端子の接続部のみを改造した。市販の接続端子は、スティック形状のためにセンサへの固定が困難であるため、高圧端子先端にはバナナプラグ、接地端子先端にはバッテリークリップを取り付けた。

センサ部は、平面用と円筒面用の 2 種類を製作した。まず、平面測定用センサの構成を図 4-25 に示す。

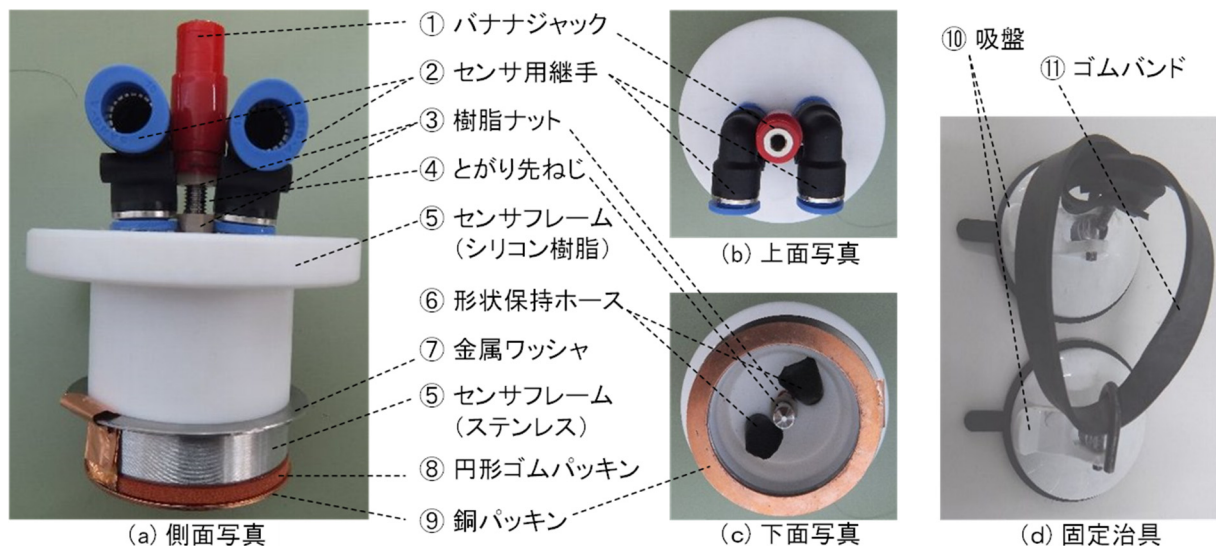


図 4-25 平面用測定センサの構成

表面用センサは、キャップ形状のシリコンフレームを外注して、空気循環機構と電極構造と固定機構を追加した。シリコンフレームは、外部形状が上面外径 $\Phi 80$, 下面外径 $\Phi 50$ とし、内部形状が下面内径42mm, 高さ45mmの円筒空間になっている。上面には吸排口用に $\Phi 10$ の貫通穴2つと、中心に高圧電極用の $\Phi 6$ の貫通穴が開いている。下面はヘリサート加工しており、ステンレス金属の円環を嵌め込んだ構造とした。空気循環機構は、吸排口に長さ30mm程度の形状保持ホース($\Phi 10$)を挿入して接着し、L字型ワンタッチ継手($\Phi 10$)を取り付けた。センサの内側は、測定対象面に排出空気が直接当たらないように、先端部を壁面側に折り曲げている。電極構造は、上面中心の高圧導体と下面外周の接地導体を製作した。高圧導体は、中心穴にM6の尖り先ねじを挿入して、センサ上面の上下から樹脂ナットで固定した。尖り先ねじの根元にはバナナジャックを固定し、絶縁抵抗計の高圧端子を取り付け可能とした。接地電極は、ステンレス金属円環の下面に円形ゴムパッキンと銅パッキンを接着して、金属ワッシャ($\Phi 60-48$)を挟み込む形でヘリサートに取り付けた。銅パッキンと金属ワッシャを銅箔とはんだ付けにより接合することで、金属ワッシャ部にて接地端子を取り付け可能とした。センサ固定構造は、ゲル状吸盤とゴムバンドを使用した。吸盤は上部つまみ部分にフック状の金属棒を挿入し、ゴムバンドを取り付け可能に改造した。センサ周辺に吸盤を二つ貼り付け、吸盤に取り付けたゴムバンドでセンサを対象平面へ押し付けることにより、センサ固定を可能にした。この平面用センサの取り付け手順を図4-26に示す。



図 4-26 平面用測定センサの取り付け状況

取り付け手順は、(手順1)でセンサを対象平面に接触させる。(手順2)で、センサ周辺の対象平面に吸盤を二つ貼り付け、吸盤間にゴムバンドを張ることでセンサを下面に押し付ける。この際に、接地電極と対象平面が隙間なく接触していることを確認する。(手順3)で、エアホースを二つ接続し、高電圧端子と接地端子を取り付ける。この状態で、センサが対象物に固定されたことを確認して、測定を実施する。

次に、円筒面測定用センサの構成を図 4-27 に示す。

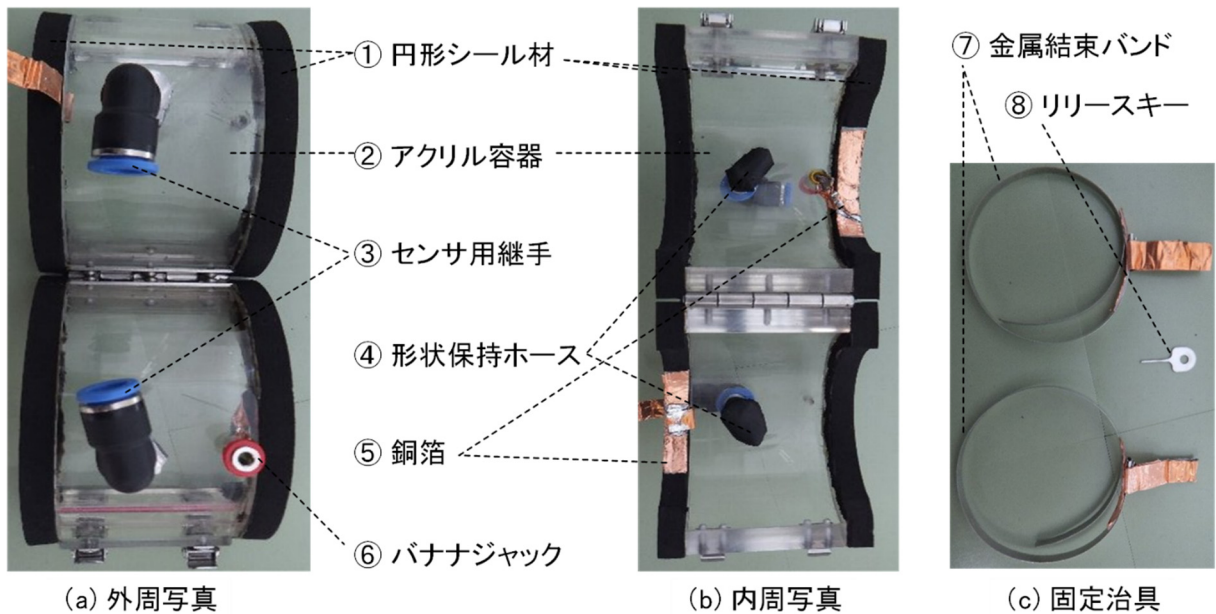


図 4-27 円筒面用測定センサの構成

円筒面用センサは、パイプ形状のアクリルフレームを外注して、密閉構造と空気循環機構と電極構造を追加した。アクリルフレームは、外部形状が外径 $\Phi 110\text{mm}$ 、内径 $\Phi 86\text{mm}$ 、高さ 66mm のパイプを径方向に 2 分割した構造になっている。各側面には吸排口用に $\Phi 10$ の貫通穴を設け、分割部は片側を蝶番で固定し、もう片方はスナップ錠を着脱可能にした。密閉構造として、アクリルフレームの上下には円形シール材（スポンジ材は外径 $\Phi 110\text{mm}$ 、内径 $\Phi 70\text{mm}$ 、厚さ 10mm ）を接着した。この構造により、アクリルフレームと対象円筒物の上下隙間をシールして、アクリルフレームと円筒対象物間を密閉空間にすることができる。空気循環機構は、吸排口に長さ 30mm 程度の形状保持ホース（ $\Phi 10$ ）を挿入して接着し、L 字型ワンタッチ継手（ $\Phi 10$ ）を取り付けた。センサの内側は、測定対象平面に排出空気が直接当たらないこととホースが対象物に接触しないことのために、先端部を加工して壁面側に折り曲げている。電極構造は、円筒対象物に金属結束バンドを締め付ける構造とした。この金属結束バンドは、使用後はリリースキーにより結束を解除することができる。金属結束バンドは長さ 30mm 程度の短冊状の銅箔をはんだ付けし、この銅箔と円形シール材の内周に張り付けた銅箔シールを密着させて導通を得ている。円形シール材内周の銅箔は、アクリルフレーム外周の接地端子用の短冊状銅箔と高圧端子用のバナナジャックにそれぞれ導通させて、絶縁抵抗計の接続端子と取り付け可能とした。この円筒面用センサの取り付け手順を図 4-28 に示す。



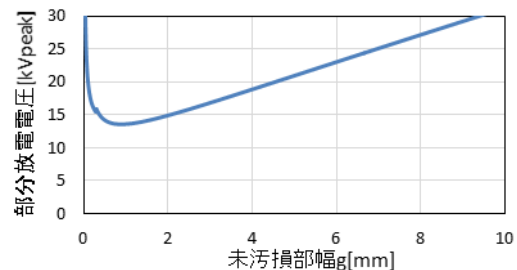
図 4-28 円筒面用測定センサの取り付け状況

取り付け手順は、(手順 1) で電極となる金属結束バンドを対象円筒物の上下に取り付ける。電極の引き出し端子は測定対象となる電極間やアクリルフレームに接触しないように、上下へ折り曲げておく。(手順 2) で、アクリルフレームで対象円筒物を挟み、スナップ錠で固定する。この時に、円形シール材内周の銅箔と電極引き出し端子が接触していること、対象円筒物の測定対象部に接触物がないこと、円形シール上下に隙間がないこと、を確認する。(手順 3) で、エアホースを二つ接続し、高電圧端子と接地端子を取り付ける。この状態で、センサが対象物に固定されたことを確認して、測定を開始する。測定終了後は、スナップ錠でアクリルフレームを取り外し、金属結束バンドはリリースキーを用いて取り外す。

最後に、本装置で測定した高湿度表面抵抗値を用いて、汚損沿面の部分放電電圧を推定した例を図 4-29 に示す。

設定値	⇒	運転電圧	9.33	kVpeak
		雰囲気湿度	95	%
		沿面距離	90	mm
		運転年数	15	year
測定値	⇒	汚損時抵抗率	1.00E+03	$\Omega \cdot \text{mm}$
		清掃後の抵抗率	1.00E+05	$\Omega \cdot \text{mm}$
評価結果	⇒	部分放電電圧	13.6	kVpeak

(a) 数値入力画面



(b) 未汚損幅 g に対する部分放電電圧

図 4-29 汚損沿面における部分放電電圧の推定例

図 4-29(a) より、初期条件として運転電圧、湿度条件 (=湿度係数 m)、絶縁沿面距離 L 、運転年数を設定する。現地測定結果として、汚損状態での表面抵抗率 ρ_L と清掃後 (未汚損状態) の表面抵抗率 ρ_H を入力する。これらの値を用いて、図 4-29(b) の未汚損幅 g と部分放電電圧との関係曲線が算出できる。未汚損幅は最悪条件を想定するため、図 4-29(b) の極小値を汚損沿面の部分放電電圧として評価する。汚損劣化度の評価として、この部分放電電圧値が運転電圧に達していれば寿命状態と判定し、まだ達していない場合は運転年数を加味して適切な保全・更新時期を提案することになる。

4.5 結言

汚損劣化評価では、汚損沿面の部分放電電圧が汚損状態と雰囲気湿度に依存することを明らかにして、高湿度の表面抵抗を現地測定する装置と表面抵抗から部分放電電圧を推定する手法を開発した。部分放電電圧と汚損状態に関する知見は、汚損沿面に微小な未汚損幅が残存すると部分放電電圧が大幅に低下することを示しており、未汚損部残存に対する対策を行うことで屋内汚損環境での絶縁信頼性を向上させることが期待できる。部分放電電圧と湿度に関する知見は、湿度上昇により部分放電電圧が大幅に低下することを示しており、高湿度基準で絶縁設計および劣化評価を行うことで屋内汚損環境での絶縁信頼性を向上させることが期待できる。現地測定により汚損沿面の部分放電電圧を推定する手法を開発したことは、稼働中設備における汚損劣化度を部分放電電圧という定量的な値で評価することが可能となり、設備ユーザが適切な汚損対策（清掃やフィルタ）を講じて絶縁故障リスクを低減させることに貢献できる。また、実フィールドで様々設置環境の汚損劣化度を蓄積していくことが可能となり、製造メーカーでも設置環境に合わせた耐汚損性の製品開発に反映することが期待できる。

最後に、本章で得られた知見を下記にまとめた。

- (1) 汚損劣化評価として、汚損沿面のパラメータ（絶縁材料、電極間距離、汚損レベル、汚損分布、雰囲気湿度）と部分放電電圧の関係を実験により明らかにした。部分放電電圧が低下する条件は、絶縁材料の初期表面抵抗が高く、電極間距離が短く、汚損レベルが高く、局所的な未汚損部が残存し、雰囲気湿度が高い、であることを示した。
- (2) 部分放電の発生部位は、放電発光観測により未汚損部であることを明らかにし、未汚損幅がない条件では部分放電電圧が非常に高くなることを示した。この結果から、屋内設置環境では漏れ電流によるドライバンド発生モードよりも、異物付着や遮蔽物により未汚損部が残存するモードの方が部分放電発生の危険性が高いことを示した。
- (3) 部分放電電圧の推定方法として、未汚損部の分担電圧を等価回路モデルから算出する式と未汚損部が放電に至る電位差をパッシェン近似式から推定する式を考案して、両計算式を連立することで汚損沿面の部分放電電圧を推定できることを示した。
- (4) 高湿度発生装置と絶縁抵抗計と表面抵抗センサを組み込んだ汚損劣化評価装置を開発して、汚損沿面の部分放電電圧を現地計測結果から推定することを可能とした。本現地計測装置では、高湿度状態における汚損状態の表面抵抗値と未汚損状態（清掃後）の表面抵抗値を計測して、両抵抗値の比から汚損沿面の部分放電電圧を算出することができることを示した。

第4章の参考文献

- [4-1] “ポリマーがい管の設計基準・試験法の標準化”，電気協同研究，Vol.72, No.4 (2016)
- [4-2] “変電設備の耐塩設計”，電気協同研究，Vol.35, No.3 (1979)
- [4-3] 黒川 正明，松本 隆宇，“人工汚損がいしの筆洗い抵抗法によるESDD測定精度”，電気学会論文誌B，Vol.118, No.10, pp.1208-1209 (1998)
- [4-4] H. Torii, S. Matsumoto, “A study on the pressure dependence of wedge air-gap discharge voltage in Insulated coating Conductors”，South east asian technical university consortium symposium (10th SEATUC, Tokyo, Japan), No.OS10-06, pp.1-4 (2015)
- [4-5] 岩淵 大行，渡邊 惇，松岡 成居，熊田 亜紀子，日高 邦彦，“アルミニウム電極を用いたマイクロ浴面ギャップにおける絶縁破壊特性”，電気学会論文誌A，Vol.134, No.8, pp.456-486 (2014)

第5章 結論

5.1 本研究により得られた知見

本研究の目的に沿って、得られた知見の要約を示す。

<目的1：熱劣化評価>

モールド変圧器用の注型絶縁樹脂について熱加速劣化評価を行い、熱劣化寿命を決める特性が質量減少量であることを示した。熱劣化原因は、窒素パージ下の熱加速劣化評価では質量減少量がほとんど変化しないことから、絶縁物表面の酸化劣化であることを示した。熱劣化部位は、材料表面研磨と FTIR-ATR 分析により材料深さと各吸収帯のスペクトル強度の関係を明らかにして、未劣化樹脂を示すスペクトル吸収帯 (1510cm^{-1}) の検出強度が残存する割合から熱劣化寿命時点の酸化進展度は表層 $100\mu\text{m}$ 程度であることを示した。熱劣化の非破壊検出手法として、特定スペクトル帯 ($500\sim 900\text{nm}$) の光反射率を用いて質量減少量を推定する技術を確立した。現地計測装置として、光プローブと光源と分光器とノート PC を組み込んだ熱劣化評価装置を開発して、モールド変圧器各部の質量減少量を現地計測することを可能にした。

<目的2：部分放電劣化評価>

部分放電モードを6種類（気中放電、沿面放電（電気力線垂直型）、沿面放電（電気力線垂直型）、ポイド放電、剥離放電、トリー放電）に分類し、各モードの部分放電が 6kV 以下で安定的に発生する試料を作製した。部分放電に伴う Φ - Q 特性は、各モードの Φ - Q 特性形状をパターンマッチングすることで、ノイズと部分放電および部分放電の各モードを識別できることを示した。部分放電に伴う電流波形は、実験および等価回路モデルから減衰余弦波波形になることを明らかにして、電流波形の周波数帯域と減衰振動回数で部分放電モードを識別できることを示した。部分放電信号とノイズ信号を弁別検出する手法として、計算ソフトウェア上で部分放電信号を減衰余弦波波形に模擬したパラメトリック評価を行い、減衰振動する部分放電信号に対しては、計測条件はサンプリング周波数が部分放電信号の25倍以上、デジタル信号処理は STFT もしくは Wavelet、にて十分なノイズ弁別性能が得られることを示した。現地計測装置として、広域高周波 CT とアナログフィルタと RF スイッチと FPGA を組み込んだ部分放電検出装置を開発して、各種モードの部分放電電流に対して十分な S/N 比向上効果が得られることを確認した。

<目的 3：汚損劣化評価>

汚損沿面を模擬した試料を作製して、各種パラメータ（絶縁材料、電極間距離、汚損レベル、汚損分布、雰囲気湿度）と部分放電電圧の関係を実験により明らかにした。部分放電電圧が低下する条件は、絶縁材料の初期表面抵抗が高く、電極間距離が短く、汚損レベルが高く、局所的な未汚損部が残存し、雰囲気湿度が高い、ことを示した。部分放電の発生部位は、放電発光観測により未汚損部であることを明らかにし、未汚損幅がない条件では部分放電電圧が非常に高くなることを示した。この結果から、屋内設置環境では漏れ電流によるドライバンド発生モードよりも、異物付着や遮蔽物により未汚損部が残存するモードの方が部分放電発生の危険性が高いことを示した。部分放電電圧の推定方法として、未汚損部の分担電圧を等価回路モデルから算出する式と未汚損部が放電に至る電位差をパッシェン近似式から推定する式を考案して、両計算式を連立することで汚損沿面の部分放電電圧を推定できることを示した。現地計測装置として、高湿度発生装置と絶縁抵抗計と表面抵抗センサを組み込んだ高湿度状態の表面抵抗を現地計測する装置を開発して、現地計測結果から汚損沿面の部分放電電圧を推定することを可能とした。

<目的 4：注型絶縁物の劣化監視手法>

本論文で評価した“熱劣化”“部分放電劣化”“汚損劣化”は、劣化開始時期と劣化不可逆性で分類できる。劣化開始時期は、熱劣化と汚損劣化は運転初期から発生し、部分放電劣化は経年使用で絶縁欠陥が生じてから発生する。劣化不可逆性は、熱劣化と部分放電劣化は非破壊で特性回復することは困難だが、汚損劣化は清掃により特性回復できる。よって推奨する劣化監視手法は、まず運転開始数年で汚損劣化評価を行い、汚損劣化による部分放電発生電圧が運転電圧まで低下しないように清掃頻度を定める。この清掃を実施するタイミングで、汚損劣化評価も並行して実施して、汚損劣化傾向に変化がないことを定期的に監視する。次に運転開始 15 年程度で熱劣化評価を行い、熱劣化度が寿命に達するであろう年数と期待寿命年数を比較して、期待寿命年数に達しない場合は負荷率低減や冷却強化を検討する。熱劣化は急速に進展しないため、5 年程度の間隔で熱劣化進展度に急激な変化がないことを長期的に監視する。最後に運転開始 20 年以内で短絡事故や雷サージや天災等の突発的な負荷が発生した場合には、その直後に部分放電評価を行って部分放電レスを確認する。運転年数 20 年を超える場合には、熱劣化や清掃できない部位の汚損劣化が進展している可能性が高く、少なくとも 3 年程度の周期で部分放電発生有無を定期的に監視する。このように“熱劣化”“部分放電劣化”“汚損劣化”の総合的な劣化評価を実現することで、設備ユーザが保全予算に合わせて故障リスク低減策（設備更新やメンテナンス）の対象と時期を最適化する一助とした。

5.2 今後の課題

注型絶縁物の劣化診断において、更なる改善が要求される点を今後の課題として列挙する。

<課題1：熱劣化評価>

光反射率による熱劣化度評価は間接的手法であり、事前に光反射率と熱劣化度のデータベースを準備する必要がある。表面分析等により直接的に表面劣化度（酸化度）を現地計測する技術を確立して、未知の注型材料についても熱劣化評価を可能にすることが課題である。

質量減少量により材料自体の寿命を評価することはできたが、寿命状態の材料を使用することで絶縁機器全体としての耐クラック性がどの程度低下するかは明らかではない。材料の熱劣化現象と機器の耐クラック性の関係を明らかにして、耐クラック性という観点で熱劣化の寿命判定値を最適化することが課題である。

<課題2：部分放電劣化評価>

同一部分放電モードにおいても、雰囲気湿度や印加電圧や絶縁材料や試料寸法によって部分放電特性が変化する可能性がある。今回取得した部分放電特性の適用限界を明らかにして、各種条件が変化した場合にも部分放電モードを識別可能にすることが課題である。

実験室環境にて部分放電信号とノイズ信号を弁別できたが、実フィールドにて長い伝搬経路を経た部分放電信号や複雑化したノイズ信号も弁別可能にすることが課題である。

<課題3：汚損劣化評価>

表面抵抗から部分放電電圧を推定する計算式には湿度の変数が設定されており、湿度により部分放電電圧が変化するメカニズムを解明して、そのメカニズムを反映した新たな汚損沿面の部分放電電圧計算式を作成することが課題である。

任意湿度の表面抵抗を現地計測するセンサにおいて、複雑な形状の絶縁物でも高湿度表面抵抗を測定することができるセンサを開発することが課題である。

<課題4：注型絶縁物の劣化監視手法>

高頻度開閉を行う電気機器に関しては、今回評価対象外とした疲労劣化による故障事例も報告されており、注型絶縁物の疲労劣化評価技術を開発することが課題である。

各種劣化モードの進展度および発生可否を評価することは可能にしたが、劣化状態と故障リスクの関係が不明である。劣化状態から故障リスクを算定する技術を確立して、経済的な観点で最適な設備保全提案を実施可能にすることが課題である。

研究業績

1. 本研究に関する学術論文

- (1) 華表宏隆, 高野哲美, 占部昇, 渡辺賢治: 「モールド変圧器の光学式エポキシ樹脂劣化診断技術」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol.132, No.11, pp.972-977 (2012)
- (2) 華表宏隆, 早瀬悠二, 山城啓輔, 松本聡: 「部分放電電流の減衰振動波形を用いたノイズ弁別手法」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol.138, No.2, pp.64-70 (2018)

2. 本研究に関する国際会議 (査読付)

- (1) H. Torii, N. Urabe, K. Watanabe and T. Takano : “On-site diagnostic method for the degradation of cast resin transformer using optical reflectance”, International Symposium on High Voltage Engineering (19th ISH, Pilsen, Czech Republic) , No.236, pp.1-6 (2015)
- (2) H. Torii, S. Matsumoto : “A study on the pressure dependence of wedge air-gap discharge voltage in Insulated coating Conductors”, South east asian technical university consortium symposium (10thSEATUC, Tokyo, Japan), No.OS10-06, pp.1-4 (2016)

3. 本研究に関する国内学会発表

- (1) 華表宏隆, 渋谷義一, 梅津潔: 「インパルスによる巻線試験」, 電気学会全国大会, No.2, pp.91-92 (2005)
- (2) 華表宏隆, 渋谷義一, 梅津潔: 「インパルスによる巻線の絶縁試験」, 誘電・絶縁材料研究会, Vol.DEI-05, No.115-123, pp.35-40 (2005)
- (3) 華表宏隆, 渋谷義一, 梅津潔: 「MOSFET によるインパルス巻線試験」, 電気学会全国大会, No.2, pp.38-39 (2006)
- (4) 華表宏隆, 須崎哲哉, 渋谷義一, 梅津潔: 「インパルス印加による巻線の部分放電検出方法」, 放電/開閉保護/高電圧合同研究会, Vol.ED-07, No.1.3-12, pp.12-18 (2007)
- (5) 華表宏隆, 高野哲美: 「H/N₂ 混合気体中短ギャップのインパルスフラッシュオーバー特性」, 放電学会年次大会 Vol.53, No.P-7, pp.92 (2010)
- (6) 華表宏隆, 高野哲美, 占部昇, 渡辺賢治: 「モールド変圧器の光学式エポキシ樹脂劣化診断技術」, 放電/開閉保護/高電圧合同研究会, Vol.ED-12, No.16-28, pp.37-42 (2012)
- (7) 華表宏隆, 占部昇, 高野哲美: 「高湿度下の絶縁特性測定による余寿命診断技術の開発」, 電気学会全国大会, No.4-205, pp.345-346 (2015)
- (8) 華表宏隆, 占部昇, 松本聡: 「高湿度下の絶縁特性測定による余寿命診断技術の開発」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.335, pp.8-6-5 – 8-6-6 (2016)

4. 本研究に関する特許

- (1) 発明者：華表宏隆, 高野哲美, 占部昇
名称：絶縁特性測定装置、及びそれを用いた絶縁特性の測定方法、並びに、余寿命診断方法
公開番号：2016-151466
- (2) 発明者：華表宏隆
名称：絶縁特性測定装置、及びそれを用いた絶縁特性の測定方法、並びに、余寿命診断方法
公開番号：2017-106750
- (3) 発明者：華表宏隆
名称：放電監視装置及び放電監視方法
登録番号：6320596
- (4) 発明者：華表宏隆
名称：絶縁特性測定装置及び絶縁特性測定装置の固定方法
出願番号：2017-153853
- (5) 発明者：華表宏隆
名称：絶縁物の劣化診断方法及び劣化診断装置
出願番号：2017-238703
- (6) 発明者：華表宏隆
名称：特徴量取得装置、放電監視システム、放電監視装置、及び放電監視方法
出願番号：2018-015023

謝辞

本論文の執筆にあたり、懇切丁寧なご指導と的確なご助言を賜りました芝浦工業大学大学院理工学研究科 地域環境システム専攻 松本 聡教授に心より感謝の意を表します。先生には、社会人である筆者を研究室に温かく迎え入れて頂いた上、遅々として進まない研究活動に対しても、優しいお心遣いにより最新の研究論文や新しい研究視点をご提案頂き、博士論文という形で研究成果をまとめることができました。本当にありがとうございました。

また、副査を務めて頂いた東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 熊田 亜紀子教授、芝浦工業大学大学院 理工学研究科 機能制御システム専攻 本間 哲哉教授、芝浦工業大学大学院 理工学研究科 地域環境システム専攻 西川 宏之教授、芝浦工業大学大学院 理工学研究科 地域環境システム専攻 藤田 吾郎教授には大変お世話になりました。先生方からは、論文構成から実験細部にわたって様々な御指導と御助言を賜り、学術的な視点で研究成果を見直すことができました。厚く御礼申し上げます。

芝浦工業大学の渋谷 義一名誉教授には、筆者の学部生および修士学生時代から絶縁研究のいろはを教えて頂き、今日に至るまで温かいご指導を賜りました。先生の実験結果に対して真摯に向き合い、常にディスカッションを欠かさない研究姿勢を目標に研究活動を続けてまいりました。改めて、心より感謝申し上げます。

なお、本研究の着手にあたり、勤務先である富士電機株式会社より芝浦工業大学大学院博士課程への進学のを機会を頂きました。進学を全面的に支援していただき、常に温かい叱咤激励を頂いた富士電機株式会社 技術開発本部 エネルギー研究センター 外山 健太郎センター長、恩地 俊行部長、山城 啓輔マネージャーに深く感謝申し上げます。

本研究の実行において、本研究の基礎理論および実験設備の土台を築き、惜しみなく絶縁技術をご教示頂いた富士電機株式会社 電気エネルギー研究部 高野 哲美氏に深く感謝申し上げます。高野氏には、絶縁分野を超えた幅広い知見と常に新しいアイデアを実現させる実行力で、本研究を大きく発展させて頂きました。

本研究の絶縁試験において、自動計測および汚損実験にご協力頂いた富士電機株式会社 電気エネルギー研究部 早瀬 悠二氏に深く感謝申し上げます。早瀬氏には、計測技術を教えて頂くとともに、最も身近な博士学位保有者として研究活動の参考にさせて頂きました。

本研究の熱劣化評価において、モールド変圧器の樹脂試料および製品情報をご提供頂いた富士電機株式会社 千葉工場 渡辺 賢治課長（元モルトラ課長）、森谷 廣氏（元モルトラ部長）に深く感謝申し上げます。モルトラ課の方々のご協力により、本研究をここまで継続することができました。

本研究の現地劣化評価において、劣化診断装置の製作および現地検証にご協力頂いた富士電機株式会社 フィールドサービス統括部 占部 昇氏に深く感謝申し上げます。占部氏とフィールド評価を繰り返したことで、本研究を現地計測技術という成果に昇華できました。

最後に、筆者の博士課程進学というわがまを許し、いつも暖かく見守ってくれた両親と妻子に感謝の意を捧げます。