

部分放電による放射電磁波の特徴とその要因解明
ならびに新しい絶縁劣化診断手法の開発

2014年

兵庫県立大学大学院工学研究科

電気系工学専攻

牟田 神東 達也

内容梗概

電力設備の老朽化により絶縁性能が低下したり、絶縁材料中にボイドなどの異物が混在したりすると部分放電が発生する。この部分放電が進展すると全路破壊へと至り、停電といった事故を引き起こすため社会に大規模な支障をきたす。よって事故を未然に防ぎ電力の安定供給を確保するため、部分放電に関する研究が各所で行われている。

筆者は部分放電発生時に放射される電磁波に着目し、放電発生源によって電磁波の周波数成分に特徴が見られるとの知見を過去に得ている。しかし放射電磁波の周波数成分において、特徴が見られる原因は解明されていない。よってこのメカニズム解明は学術的に興味深いだけでなく、絶縁劣化を診断する技術の高度化にも資すると考えられる。そこで筆者は、特徴的な周波数成分が生じる原因の解明を目指すとともに、さらに特徴的な周波数成分に着目した部分放電の診断手法を開発した。本論文はそれらの成果をまとめたものである。

第1章では序論として、絶縁劣化診断が社会で必要とされている背景について述べた。現在の高度情報化社会にとって、電力の安定供給は必要不可欠なものであり、その実現には絶縁劣化診断が重要である旨を説明している。

第2章では部分放電現象について説明するとともに、部分放電を検出する各種手法について調査した結果を整理した。絶縁劣化診断として、部分放電の検出が有効なことが知られている。部分放電の発生時には電流や超音波、光といった様々な現象が伴うが、各現象を検出する様々な手法がこれまでに開発されており、それぞれの特徴について説明を行った。また筆者らは以前より、部分放電に伴い放射される電磁波に注目しており、部分放電がどの絶縁材料で発生しているかによって、放射電磁波の周波数成分に特徴が表われることを実験的に見出していた。具体的には空気中のコロナ放電や沿面放電の場合、放射される電磁波の周波数成分は20~40 MHzが主となるのに対し、絶縁油中で部分放電が発生した場合には数十 MHzの帯域に加え、100 MHz以上の帯域でも周波数成分が表われる。またエポキシ樹脂や架橋ポリエチレンといった固体絶縁材料の内部で部分放電が発生すると、放射電磁波に200 MHz以上の帯域でも周波数成分が含まれるようになる。これらの特徴についても実測結果を元に説明を行っている。

第3章では周波数成分に特徴が見られる原因の解明として、文献による調査や実験を行った結果を述べている。部分放電の発生時において、放電発生箇所の局所的な電界強度は絶縁材料によって異なる。また同一の絶縁材料であっても、部分放電発生時の電界強度を

変化させることで、放電電流波形の立ち上がり部分が変化することが実験により分かった。さらに電流波形の立ち上がりが急峻になると、それに伴い放射される電磁波に高い周波数成分が含まれることも実験によって判明した。なお周波数成分の分析には、従来から高速フーリエ変換（FFT）が一般的に用いられている。前章で述べた周波数成分の特徴も、FFTで得られた周波数スペクトルにより見出したものである。これに対し本研究では、新たにウェーブレット解析による周波数分析も試みた。FFTでは、解析対象の波形全体に含まれている周波数成分の割合が分析される。これに対しウェーブレット解析では、時系列に沿った周波数成分の変化を分析することができる。そこでウェーブレット解析を実験データに適用した結果、部分放電発生時の周波数成分が電界強度によって変化する様相が明らかになった。これらの結果から、絶縁材料毎に見られる放射電磁波の周波数成分における特徴は、部分放電発生時の電界強度で決定されると分かった。ここで解明したメカニズムが理論的な背景となり、次章以降に述べる部分放電診断手法の開発は行われている。

第4章では絶縁油中で発生する部分放電に見られる周波数成分の特徴を元に、油入りブッシング内部で発生する部分放電を診断する手法を開発したので、その結果について述べている。絶縁油中で発生する部分放電では、空気中の場合と比べ放電電流の立ち上がり部分が急峻になる。そのため放射電磁波には100 MHzを超える帯域の周波数成分が含まれるが、特に顕著に表れる150 MHz前後の周波数成分に筆者らは着目し、この帯域を検出することで油入りブッシング内部の絶縁劣化を診断する手法を開発した。開発した手法では部分放電の放射電磁波をアンテナで検出するが、その電磁波に150 MHz付近の周波数成分が含まれているか否かで、部分放電が油入りブッシング内部で発生しているかどうかを判別できる。また複数のアンテナで同時に電磁波を検出し、信号の到達時間差を求めることで部分放電発生源の位置を特定することが可能である、またさらに、電磁波強度から放電電荷量の推定も可能である。この診断結果の妥当性については、ブッシング内部の絶縁油における溶存ガスを別途分析することで確認できている。開発した手法は診断時に対象設備の停電が不要なことから、非常に有用な診断手法であると考えられる。

第5章ではエポキシ樹脂で発生する部分放電の放射電磁波に見られる特徴的な周波数成分を検出し、エポキシ製機器の絶縁劣化を診断する装置を開発した結果を述べている。エポキシ樹脂内部で発生するボイド放電において、電気トリー進展時にはトリー先端の電界によって200 MHzを越える高い周波数成分を含む電磁波が放射される。これは前述した電界強度の変化に関係しており、ボイド放電でも電気トリーの進展を伴わない場合には、200 MHzを超える高い帯域の周波数成分は検出されない。そこで事故に至る可能性が高い電気トリー進展を伴う部分放電を検出対象とし、200 MHzから450 MHzの周波数成分を含

む放射電磁波を常時観測することで、対象設備の絶縁劣化状態を監視できる装置を開発した。この装置は検出される電磁波の強度から放電電荷量の推定や、単位時間あたりの放電発生回数が記録でき、キュービクル内に配置されたエポキシ製機器の絶縁劣化診断が可能である。実フィールドでこの装置の実証試験を実施したところ、診断対象設備の実稼動中に、エポキシ製貫通ブッシングで発生する部分放電を検出することができた。またその貫通ブッシングを現場から持ち帰り、JIS規格に則った従来からの手法で部分放電の診断結果を検証した。その結果、実フィールドで運用中に推定された放電電荷量と同レベルの部分放電が発生していることが確認され、開発品による診断結果の妥当性を確認することができた。

第6章は総括として本論文全体をまとめ、本研究により得られた成果や課題等を述べている。

目次

第1章 序論	1
文献	4
第2章 絶縁劣化に伴い生じる部分放電とその診断方法	5
2.1 はじめに	5
2.2 部分放電現象	6
2.2.1 気体中の部分放電	6
2.2.2 液体中の部分放電	7
2.2.3 固体中の部分放電	7
2.3 部分放電の検出手法	9
2.4 部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分	11
2.4.1 放射電磁波における特徴的な周波数成分	11
2.4.2 部分放電の測定	11
2.4.3 周波数成分の解析手法	13
2.4.4 高速フーリエ変換による周波数解析	17
2.4.5 ウェーブレット変換による周波数解析	19
文献	22
第3章 放射電磁波における周波数成分の発生要因	24
3.1 はじめに	24
3.2 各種絶縁材料の物性	24
3.3 電流波形の立ち上がりと電界強度の関係	26
3.3.1 電流波形と電磁波波形の比較	26
3.3.2 電流波形の立ち上がり時間	30
3.3.3 電極への印加電圧と電界強度の関係	34
3.4 部分放電の電流波形と放射電磁波の関係	35
3.5 電気トリートの進展と放射電磁波の関係	40
3.5.1 エポキシ樹脂の絶縁破壊試験	40
3.5.2 試料および電極構成	43
3.5.3 試験方法	43

3. 5. 4	試験結果	44
3. 6	放射電磁波の周波数成分に特徴が見られる要因	49
3. 7	周波数成分の定量的評価	52
3. 7. 1	測定器による影響確認	52
3. 7. 2	電源電圧の周波数による影響確認	58
	文 献	63
第4章	油入りブッシングの内部部分放電診断手法の開発	65
4. 1	はじめに	65
4. 2	油入りブッシングの内部部分放電診断手法	66
4. 2. 1	実器撤去品による測定試験	66
4. 2. 2	油入りブッシングの診断フロー	68
4. 2. 3	簡易型部分放電診断	70
4. 2. 4	精密型部分放電診断	71
4. 3	実フィールドへの適用	76
	文 献	79
第5章	エポキシ絶縁用部分放電診断手法の開発	81
5. 1	はじめに	81
5. 2	エポキシ絶縁用部分放電診断手法	82
5. 2. 1	エポキシ樹脂の部分放電特性試験	82
5. 2. 2	部分放電監視装置の開発	85
5. 3	実フィールドへの適用	87
5. 3. 1	模擬回路での性能評価試験	87
5. 3. 2	実フィールドでの性能評価試験	89
5. 3. 3	診断結果の妥当性確認	92
	文 献	94
第6章	総 括	96
	謝 辞	99
	研 究 業 績	100

第1章 序論

1960年代後半から1970年代後半にかけての高度経済成長期において、我が国では電気エネルギーに対する需要は右肩上がり増加していった。それに応える形でこの時期に電力事業者も多数の電力設備を建設しており、それは図1.1に一例として示す運用中の22kV以上の変圧器における経年分布を見ても明らかである。これら図中の丸印で囲まれた時期に設置された多くの機器は、運用期間が現在では40年を超え更新時期を迎えている⁽¹⁾。これに対し従来は、所定の期間使用した設備に対し、順次新しいものに取り替える時間計画保全（Time Based Maintenance: TBM）を行うことが一般的であった。しかし近年では、使用期間によらず設備の劣化状態によって取り替え実施を判断し、不必要な取り替え工事を控える状態監視保全（Condition Based Maintenance: CBM）が適用されるようになった⁽²⁾。この傾向は、電力自由化に伴いコスト削減が電力事業者にとって急務となり、設備投資費が抑制されたことで、より顕著に表れてきている。また2011年に東日本大震災が発生して以後、原子力発電所の運転が軒並み停止されたことで電力需給が逼迫している。そのため老朽化した発電設備の再稼動が必要な場合も生じるようになり、益々経年設備の継続使用が望まれるようになっている。

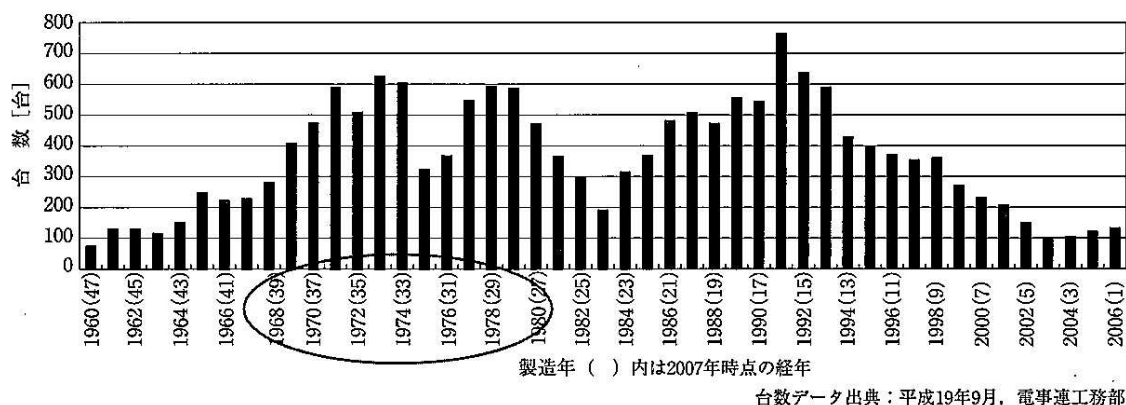


図 1.1 22kV 以上の変圧器における経年分布様相⁽¹⁾

今日の高度情報化社会では、電力事業者にとって高品質な電力を安定して供給し続けることが、極めて重要な役割となっている。至るところで情報技術（Information Technology: IT）が用いられるようになり、その機能維持には電気の供給が必要不可欠である。そのため需要家側においても、無停電電源装置を配備するなど対策が施される場合が多く見られ

る。また万が一にも長時間の停電となれば、社会に与える影響は甚大であることから、電力事業者には停電事故を未然に防ぐ万全の対策が求められている。

電力設備の延命化と高い電力品質の維持といった両方の要求を満たすには、経年によって電力設備の絶縁性能が劣化するのを早期に発見し、事故を未然に防ぐことが重要である。電力設備を劣化させる要因としては、熱、機械および電気の3つが主として挙げられ、それぞれ異なるメカニズムで絶縁性能を低下させる。熱劣化は周囲の環境や設備運転中に生じる局所的な過熱により、絶縁材料の分子構造が変化し絶縁性能を低下させる現象である。また機械的劣化とは、設備の絶縁材料が圧力や振動といった機械的な力を外部から受け、絶縁性能が劣化する現象である。また電氣的劣化とは、電気化学反応や放電現象によって絶縁材料の分子構造が変化し、絶縁性能が劣化する現象である⁽³⁾⁽⁴⁾。これらによる劣化兆候を検出するには、絶縁性能を評価することが必要となる。

絶縁性能を評価する試験としては、絶縁耐力試験と絶縁特性試験の2種類が挙げられる。このうち絶縁耐力試験では、工場出荷前に絶縁が実際に破壊するまでの電圧を印加して同型機器の絶縁性能を確認したり、要求される耐電圧を対象機器に一定時間印加し、機器の安全性を確認したりする。また一方の絶縁特性試験とは、一般的に設備の運用開始時に初期データを取得しておき、設備の運転期間中に取得したデータとの差異を見るものである。このデータの差異から劣化を検出するもので、絶縁特性試験の種類としては絶縁抵抗試験や漏れ電流試験、誘電正接試験や部分放電試験などがある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この絶縁特性試験により、設備の絶縁劣化診断を行うことができるが、前述した通り電力設備における絶縁劣化の早期発見は事故の未然防止にとって重要である。そのため、絶縁劣化診断が社会に対し果たす役割は極めて大きい。

絶縁劣化診断については、その重要性から様々な技術が開発されている。その中でも部分放電の検出は、微小な変化を捉えることが出来る上、適用できる設備も多岐にわたるため特に有効な手法と考えられている。また部分放電は、それ自体が絶縁材料の劣化を進展させる。そのため部分放電に関する現象解明も、絶縁劣化診断にとって非常に重要な課題である⁽⁷⁾。

本研究では部分放電の診断技術向上を目的として、部分放電に伴う放射電磁波の特徴について各種試験や検討を行っている。部分放電に伴い電磁波が放射されるが、放電が発生する絶縁材料によって、電磁波の周波数成分に特徴が見られることを筆者は見出している。この周波数成分に見られる特徴の要因解明を目指し、文献調査や特性試験により検討した結果について本論文では述べている。また周波数成分に関する知見を活かし、筆者らは新しい絶縁劣化診断手法を開発している。絶縁油中で発生する部分放電の放射電磁波には、

150 MHz 前後の周波数成分が含まれる。開発した1つ目の絶縁劣化診断手法は、この帯域の電磁波を検出することで油入りブッシング内部の部分放電を診断するものである。この手法を用いることで、従来では停電が必要であった油入りブッシング内部の絶縁診断が、非接触かつ無停電で実施できるようになった。さらに開発した2つ目の手法としては、エポキシ樹脂内部で発生する部分放電の周波数成分に着目し、放射電磁波の特徴的な周波数成分を検出してエポキシ絶縁機器の部分放電を診断する装置を開発している。この開発した装置を用いることで、キュービクル内に配置された計器用変圧器や貫通ブッシングといったエポキシ製機器の絶縁劣化が、非接触かつ無停電で診断可能となった。本論文では開発したこれら診断手法の概要と、実フィールドで行った検証試験の結果を述べ、その有用性についても示している。

文 献

- (1) 電気協同研究会：「高経年期を迎える電力流通設備の円滑な取替えに備えて～高度成長期に建設された設備のアセットマネジメント～」，電協研，第 63 卷，第 5 号 (2007)
- (2) 加藤丈佳：「ライフサイクルコストから見た電力ケーブル診断の経済性」，電気学会誌，Vol.130, No.2, pp.88-90 (2010)
- (3) 吉田勝美，小野田光宣，中山博史，上野秀樹：「高電圧・絶縁システム入門」，森北出版 (2007)
- (4) 小崎正光：「高電圧・絶縁工学」，オーム社 (1997)
- (5) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会：「電力設備の絶縁余寿命推定法」，電気学会技術報告，No.502 (1994)
- (6) 工場電気設備の診断・更新に関する課題と将来展望調査専門委員会：「工場電気設備の診断・更新に関する課題と将来展望」，電気学会技術報告，No.1238 (2011)
- (7) 匹田政幸：「電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術の動向」，電学論 B, Vol.121, No.6, pp.695-698 (2001)

第2章 絶縁劣化に伴い生じる部分放電と

その診断方法

2.1 はじめに

高電圧機器のコンパクト化が進むことで、機器の電界設計に対する要求は厳しいものとなっている。部分放電の発生を抑制するため設計時には、局所的な高電界部が生じないよう電界緩和が考慮される⁽¹⁾。そして高電圧機器は放電電荷量が規格で定められた基準値以下であることを確認された上で、工場から出荷されることになる⁽²⁾。また絶縁材料中において、空隙や異物といった微小欠陥が含まれないよう注意を払うことも極めて重要である。それは絶縁材料中に異物や空隙といった微小欠陥が存在すると、その部分で局所的な絶縁破壊となり、部分放電現象が発生する可能性があるためである。この場合、欠陥部の誘電率が絶縁材料に比べて低いために分担電圧が大きくなり、電界強度が絶縁破壊レベルを上回ることで部分放電が発生する。

部分放電の発生はそれ自体が有害である。絶縁油中で部分放電が発生すると、水素やアセチレンといった可燃性ガスが発生することが知られている。油入変圧器などの機器内部で放電が発生している場合、部分放電をそのまま放置すると機器内部のガス圧が上昇し、絶縁油の暴発や火災といった事故に至る可能性がある⁽³⁾。また、固体絶縁内部の空隙やクラック等で部分放電が発生した場合、そこから固体絶縁材料が浸食され樹枝状の電気トリリー生成につながる。この電気トリリーが進展すると最終的に絶縁部は橋絡して全路破壊となり、地絡事故へ至る恐れがある。そのため電気トリリー進展を伴う部分放電の発生は、固体絶縁の性能低下に直結する問題である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このように部分放電は、絶縁性能を低下させる要因であり、全路破壊事故の予兆現象と考えることもできる。つまり、部分放電の発生を初期段階で高感度に検出することができれば、設備事故の未然防止につながると考えられる。そのため部分放電の検出に関する研究開発は、電力設備の信頼性維持にとって極めて重要である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

部分放電に関する研究自体の歴史は古く、始まりは1800年代にダーウィンが名づけた「セントエルモの光」まで遡るとされる。これは船のマスト先端における帯電で発生した放電を観測したもので、この様な気中で発生する部分放電は特にコロナ放電と呼ばれる。その後、物理学者らによって多数のコロナ放電に関する研究成果が発表されてきたが、工学の世界においても1898年に、Westinghouse社のCharles F. Scottが高電圧線のコロナ損

に関する報告を行っている。またさらに、液体中や固体中で発生する部分放電に関する研究成果も報告されるようになり、現在の絶縁劣化診断技術の開発へ繋がっていった⁽⁸⁾。

2. 2 部分放電現象

2. 2. 1 気体中の部分放電

気体中において、針・線-平板，同心円筒電極，小球-平板あるいは球-球電極配置で印加電圧が上昇し，局部的に高電界部の電界が破壊電界に達すると，その部分で電離が始まる。この場合，電離は高電界となる局所に限られることから，全路破壊には進展しない。このように，電離が局所的に限られた局部放電を部分放電またはコロナ放電と呼ぶ。部分放電は電界の不平等性に起因していることから，その特性は電極ギャップ間の電極構造や不純物の含有などによって異なる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

また部分放電の特性は印加電圧の極性によっても異なり，針-平板電極の場合で考えると，針電極に正極の電圧を課電した時に生じる部分放電は正極性コロナ，負極電圧を印加した時に生じる部分放電は負極性コロナと呼ばれる。極性によるコロナ形状の違いを図 2.1 に示すが，針電極が正の場合に印加電圧を増加させていくと，針端全体がかすかな光で覆われた状態となる。この状態をグローコロナという。コロナによって流れる電流は数 μ A 程度であり，かつ脈動は極めて少ない。さらに印加電圧を増加させるとブラシ状のコロナが現れる。電流は脈動を伴い，かつ高い周波数成分を持った特有のコロナ音を発する。この状態のコロナをブラシコロナという。さらに増加させると，電極間が細い線條で結ばれるような状態になる。このような状態をストリーマコロナというが，これよりさらに印加電圧を増加させると，ついには火花放電に移行する。

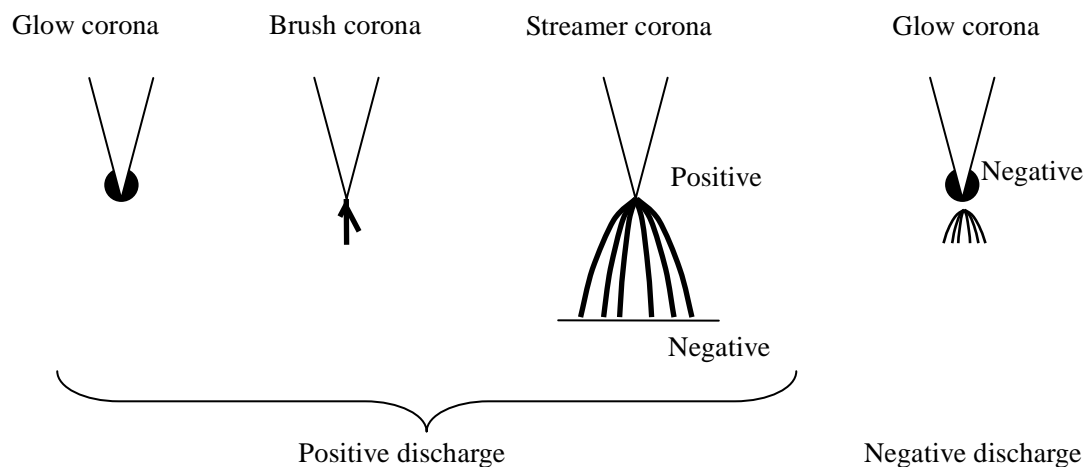


図 2.1 コロナ放電の形状変化

一方で負極性コロナの場合は、印加電圧が低い時には規則正しい間欠的なパルス電流を伴ったトリチェルコロナが観測される。そして印加電圧を上昇させるとグローコロナが観測されるようになる⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。

2. 2. 2 液体中の部分放電

液体の絶縁材料中においても、強い不平等電界が形成されると気体中と同様に、高電界領域で部分放電現象が見られる。液体の絶縁材料としては絶縁油が一般的であるが、その絶縁性能は絶縁油中の水分、溶解ガス、塵埃などの不純物に強く影響される。そのため部分放電の開始電圧や火花放電に移行する電圧も、ばらつきが大きく再現性が乏しい。また絶縁油中で部分放電が発生すると、油の分子が分解して水素ガスが発生するとともに、縮重合や炭素の遊離などが生じて絶縁耐力が著しく低下する。

印加電圧の極性によっても特徴が見られ、針-平板電極で針側に正極性の電圧を印加した場合、針先端に青白い光が見られ極めて不安定な明滅が繰り返される。そして電圧を上昇させると、これが発達してブラシ状コロナから火花放電へと至る。また針電極に負極性の電圧を印加した場合には、針先端に赤みを帯びた発光が見られ、電圧の上昇とともに青白いブラシ状に変わり、さらに電圧を上昇させると樹枝状に発達して火花放電に至る⁽¹⁰⁾。

2. 2. 3 固体中の部分放電

固体絶縁材料において、電極表面に微小な凹凸や突起があると、その先端では局所的な高電界が形成されて部分放電が発生する。また固体絶縁材料の内部に微小なボイド（空隙）がある場合にも、誘電率が周囲と異なるためボイド中の気体で部分放電が発生する。これら部分放電の段階では、局所的に絶縁破壊が起こっているだけで全路破壊には至っていない。しかし固体絶縁材料中で部分放電が繰り返して発生すると、絶縁材料は樹枝状に侵食されて絶縁耐力が低下し、最終的には全路破壊へと至る。この樹枝状に侵食された痕跡はトリーと呼ばれ、その形状によって樹枝状トリー、ブッシュ状トリー、扇状トリーなどに分類される⁽¹⁰⁾。

また絶縁材料中に図 2.2(a)で示すようなボイドの存在を仮定した場合、ボイド放電の検討には従来から図 2.2(b)のようなモデルがその等価回路として用いられてきた。等価回路における C_0 はボイドの存在しない領域の静電容量、 C_v はボイドの静電容量、 C_s はボイドに直列な領域の静電容量であり、 C_v に並列で設けられたギャップ g は、ボイドで放電が発生した際のボイド部分における短絡を表している⁽⁵⁾。しかし実際の機器の場合には、ボイ

ド放電をコンデンサ回路で模擬することが難しい場合がある。そこで固体絶縁内のボイド放電に対し、物理現象から理論的な説明を試みる図 2.3 のような物理モデルも近年では提唱されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

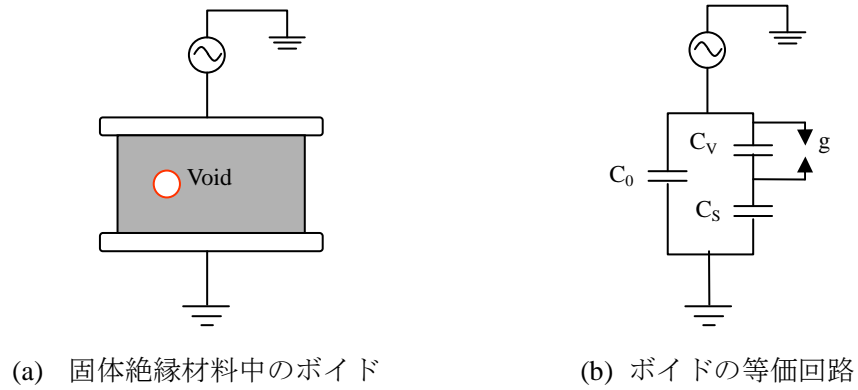


図 2.2 固体絶縁材料中のボイドと等価回路

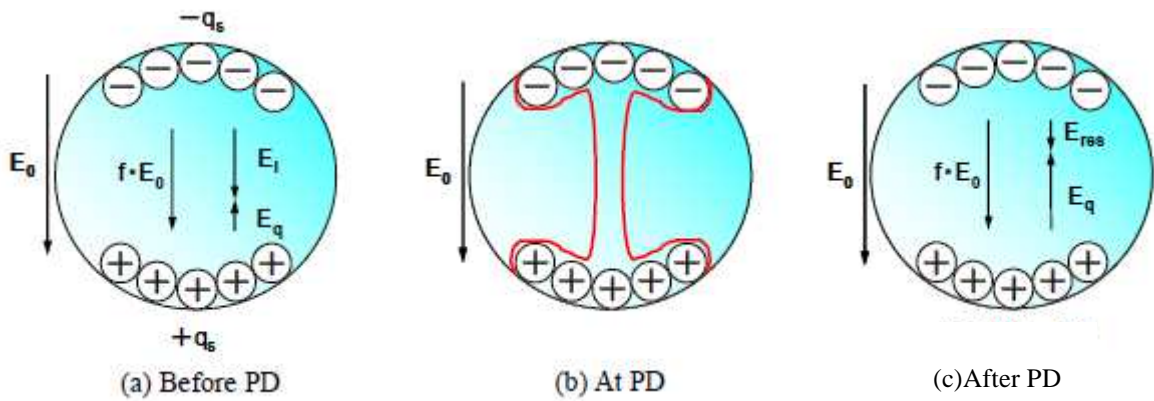


図 2.3 ボイド放電に対する物理モデル

2. 3 部分放電の検出手法

部分放電の発生に伴い、高周波電流や電磁波、光、超音波などが生じることが知られている。それらを検出し、絶縁の劣化状態を診断する様々な手法が開発されているが⁽¹³⁾⁻⁽²²⁾、検出対象の物理現象によって適用されるセンサは異なり、それぞれ表 2.1 で示すような特徴を有している。

表 2.1 部分放電検出手法の特徴

検出対象	適用センサ	感度	特徴
高周波電流	カップリングコンデンサ 高周波CT	高	高感度での検出が可。 設備への接触や停電作業が必要。
電磁波	アンテナ	高～中	非接触での検出が可。 外部ノイズの影響を受け易い。
光	紫外線カメラ	低	視認性に優れている。 目視できる範囲に診断対象が限定。
超音波	AEセンサ	中	筐体内でも検出が可。 信号の距離減衰が大。

高周波電流を対象とした場合は、図 2.4 で示す回路のように対象設備にカップリングコンデンサを並列に接続し、高周波のパルス電流を検出する方法が一般的である⁽⁸⁾。この手法は高感度で部分放電を検出できるが、対象設備に検出回路を接続する必要があるため、停電が必要となり作業性に難がある。

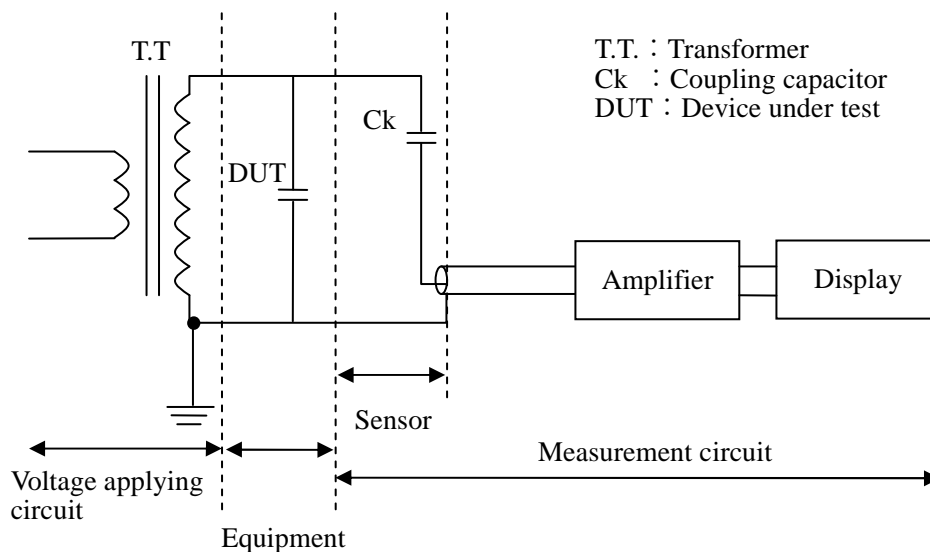


図 2.4 部分放電に伴う高周波電流の一般的な測定回路

そのため、分割型の高周波 CT (Current Transformer) を対象設備の接地線に接続し、部分放電電流を検出する手法も実用化されている。

その一方で電磁波を検出する場合は、充電部に対し非接触で、かつ比較的高感度で診断が可能といった長所を有している。そのため特に有効な診断手段と考えられるが、外部ノイズの影響を受け易いといった欠点も有している。この対策としては検出する周波数帯域を選定し、ノイズを除去する必要があるが、部分放電診断として現在実用化されている手法の多くはガス絶縁機器を対象としたものである。これは図 2.5 で示すようにタンク内部に予めアンテナを配置しておき、GHz 帯まで含んだ広帯域の電磁波を検出するものである。アンテナを対象設備内部に配置する手法が一般的であることから、対象機器のメーカーや機種毎に個別で開発されているのが現状である。

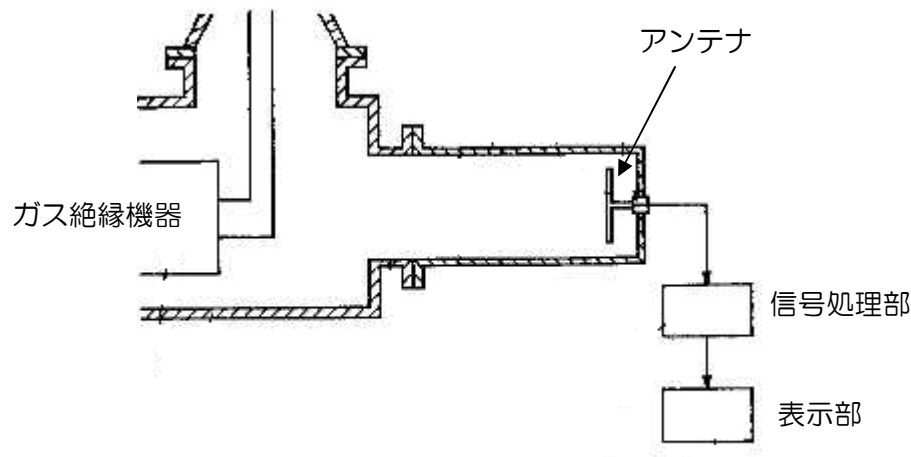


図 2.5 部分放電に伴う電磁波の一般的な測定回路

また紫外線に代表される光を検出する手法があるが、放電の発生箇所を画像として直接捉えることができるため、視認性に優れている。図 2.6 に部分放電に伴う発光の撮影例を示す。この様に発光の検出では、放電の発生箇所を明確に示すことができる。しかし放電発生箇所を直接撮影する必要があるため、適用範囲が限られるといった欠点を有している。

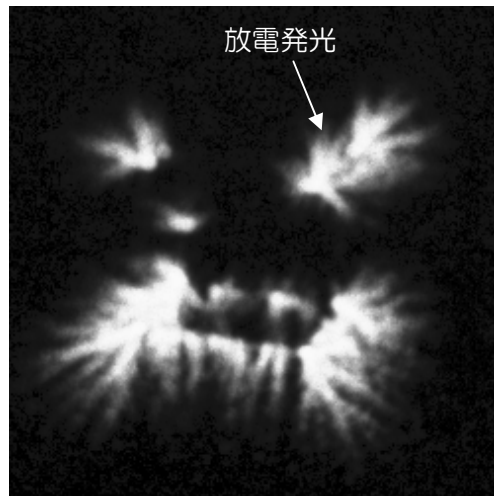


図 2.6 部分放電に伴う発光の撮影例

また超音波の場合は，AE(Acoustic Emission)センサや超音波用のマイクロフォンを用い，部分放電に伴い放射される超音波を検出する。この手法では放電発生源が筐体で覆われていても，AE センサを筐体表面に接触させることで部分放電の検出が可能である。しかし信号の距離減衰が比較的大きく，監視できる範囲に制約があるといった欠点を有している。

2. 4 部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分

2. 4. 1 放射電磁波における特徴的な周波数成分

筆者らは部分放電に伴う放射電磁波に関する研究に取り組んでおり，放電の発生源によって電磁波の周波数成分に特徴が表われることを見出した。具体的には大気中で発生する部分放電に伴う放射電磁波において，周波数スペクトルが 100 MHz 以下のみで見られる。それに対し絶縁油中の部分放電では，気中の部分放電では見られない 150 MHz 付近にも特徴的な周波数スペクトルが見られるというものである⁽²³⁾。またエポキシ樹脂やポリエチレンといった固体絶縁材料では，200 MHz を越える帯域で特徴的なスペクトルが見られることが分かっている⁽²⁴⁾。これらについて，本研究においても実測による確認を行った。

2. 4. 2 部分放電の測定

空气中，絶縁油中およびエポキシ樹脂中で部分放電を発生させ，それに伴い放射される電磁波をオシロスコープ（Tektronix 製 DPO7254C, 2.5 GHz）で同時測定した⁽²⁵⁾。試験環境を図 2.7 に示すが，電磁波測定用のアンテナは放電発生源から 1.0 m 離れた箇所に配置し

ていた。将来的に実フィールドへ診断業務として適用する際の操作性を考慮し、アンテナには小型モバイルアンテナ（第一電波工業性 RH707, 120-900 MHz）を適用したが、これは 1/4 波長が 144 MHz および 430 MHz のモノポール型である。なお試験室の壁や床面で電磁波は反射するが、反射経路が最短となる床面の反射波と直接波では、伝搬距離に約 1 m の差がある。よって直接波から 3.3 ns 遅れて反射波もアンテナに到達するが、反射によって電磁波の周波数自体は変化しないことから、周波数解析に与える影響は小さいと考えられる。

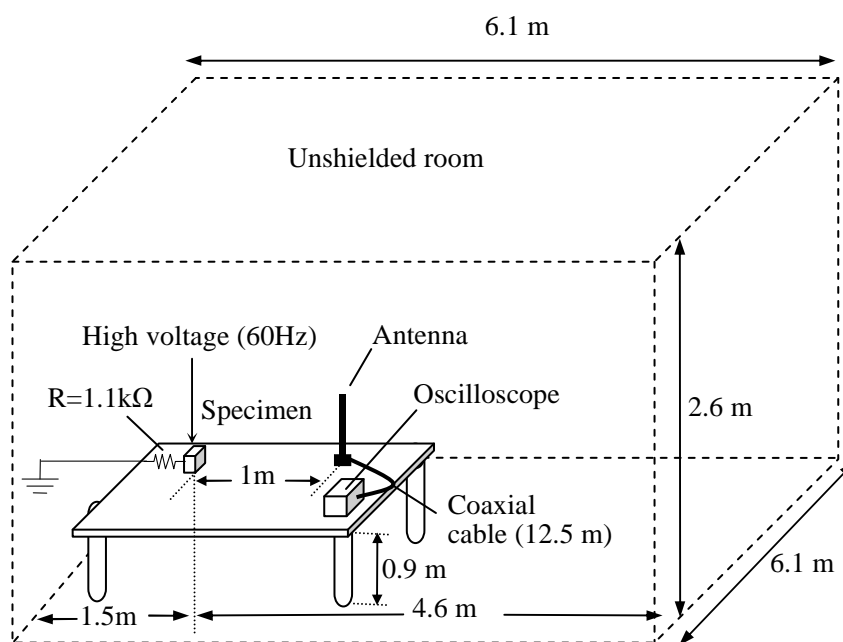


図 2.7 試験環境

放電発生源には針－平板電極を用いた。空気中と絶縁油中の場合には、それぞれ図 2.8 で示す容器を用いて部分放電を発生させた。容器内部に何も入れずに空にした場合と、絶縁油（かんでんエンジニアリング製，サンオームオイル MU）を封入した場合で比較を行っており，針電極への印加電圧は空気の場合が 60 Hz の交流電圧 3,400 V とし，絶縁油の場合は同じく 60 Hz の交流電圧で 12,000 V とした。ただし平板電極の上部には，どちらの場合も厚さ 3 mm のガラス板をせん絡防止のため配置した。

エポキシ樹脂の場合は，図 2.9 に示す放電用試料で部分放電を発生させた。エポキシ樹脂（スリーボンド製，ビスフェノール系）に突き刺した 0.71 mmφ の針を僅かに引き抜き，曲率半径が 20 μm である針先端には 0.5 mm 程度の空隙（ボイド）がある状態とした。またボイド内部のガスが抜けないようにするため，針の根元は接着剤で封止した。試料の底

面には導電性銀ペイント(D-362, 藤倉化成㈱)を塗布し, アルミニウム板を接触させて均一に電圧が加わるようにした。なお印加電圧は 60 Hz の交流電圧で 13,000 V であったが, エポキシ樹脂沿面での放電を防ぐため, この試料を絶縁油に浸した状態で測定は行った。

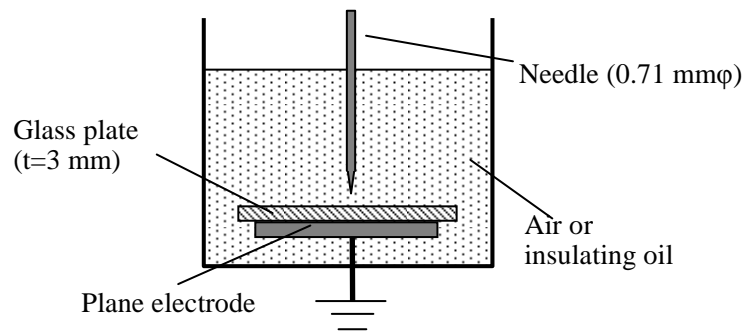


図 2.8 空気および絶縁油中の場合の放電発生源

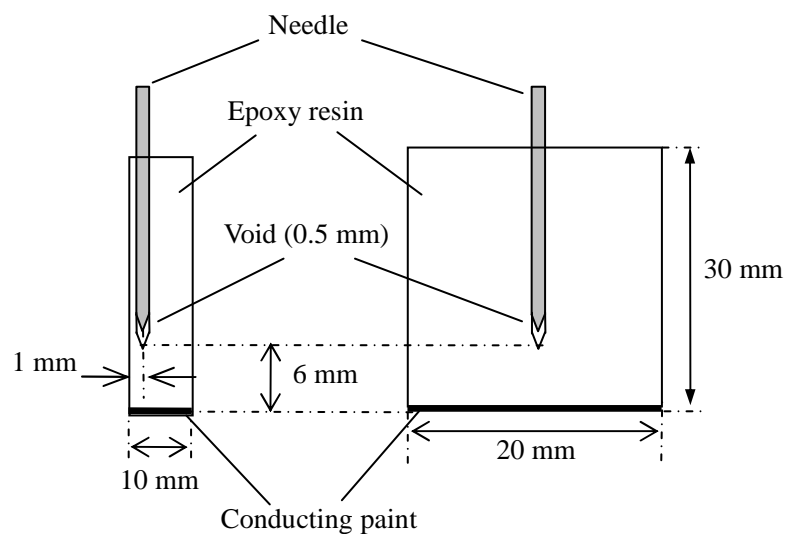


図 2.9 エポキシ樹脂中の場合の放電発生源

2. 4. 3 周波数成分の解析手法

本研究は, 部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分に着目したものであり, 放射電磁波の周波数分析結果が研究成果に与える影響は大きい。本研究では後述するように, 周波数成分を分析するために高速フーリエ変換やウェーブレット変換を適用しており, 以下に各手法の概要を述べる。

(1) 高速フーリエ変換⁽²⁶⁾

周波数成分を解析する手法として、フーリエ変換が一般的に知られている。フランスの数学者フーリエ (Fourier, 1764-1830) は「任意の周期関数は三角関数の和で表される」という仮定の下、三角関数を使って周期関数を級数展開する方法(フーリエ級数展開)を考案した。これを非周期関数に拡張したものがフーリエ変換であり、(2.1)式で表される。ここで $F_{(j\omega)}$ は、 ω の成分の複素振幅を表すもので、これを図示したものが周波数スペクトルである。

$$F_{(j\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(t)} e^{-j\omega t} dt \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

一例として以下で、図 2.10 に示す方形波のフーリエ変換を求めるが、この方形波は(2.2)式で表される。

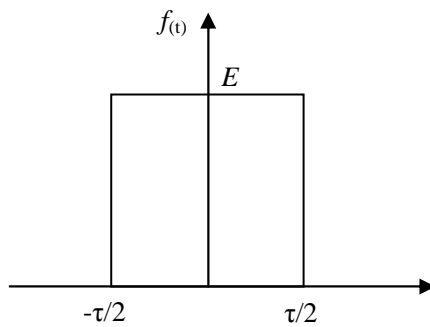


図 2.10 方形波パルス $f(t)$

$$f_{(t)} = \begin{cases} E & -\tau/2 < t < \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases} \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

よってこれをフーリエ変換すると(2.3)式のようになる。

$$\begin{aligned} F_{(j\omega)} &= E \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j\omega t} dt \\ &= E \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f} = E \tau \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \quad \dots \dots \dots (2.3) \end{aligned}$$

ここで $E\tau$ は方形波の面積に等しく、また $\pi f\tau = x$ とおくと、 $S_{(x)} = \sin x/x$ は $S_{(0)} = 1$, $S_{(n\pi)} = 0$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ となり、 $F_{(j\omega)}$ は図 2.11 のようになる。

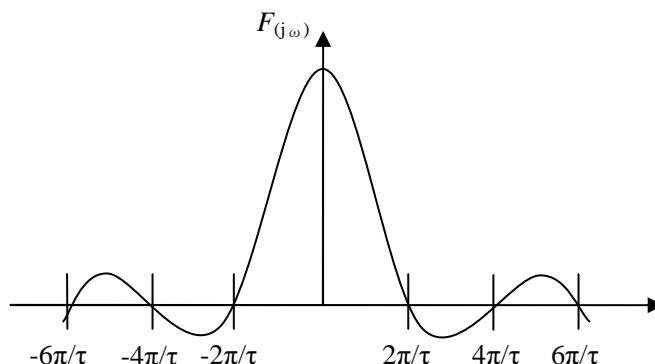


図 2.11 方形波パルス $f(t)$ の周波数スペクトル $F(j\omega)$

コンピューターを用いてフーリエ変換を実行する場合には、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) が一般的に用いられる。これはフーリエ変換の対称性に注目して演算量を減らし、高速に変換を行う手法であるが、1965 年に Cooley と Tukey により発表されたものである。

(2) ウェーブレット変換⁽²⁷⁾⁻⁽²⁹⁾

ウェーブレット (Wavelet) 変換は、小さい波の欠片を拡大縮小および平行移動して適用することで、与えられた入力波形を表現しようとする周波数解析の手法である。フーリエ変換と比較して、周波数特性を求める際に時間領域の情報を残すことができるといった利点がある。入力波形を一定間隔の時間で切り出し、次々とフーリエ変換していく短時間フーリエ変換 (short-time Fourier Transform) を用いても時間領域の情報を残すことはできるが、この短時間フーリエ変換では解析する時間幅が一定に固定されているため、ウェーブレット変換の方が解析できる周波数領域が広いといった利点がある。

ウェーブレット変換は大きく分類すると 2 種類あり、その 1 つは連続ウェーブレット変換であり、もう 1 つが離散ウェーブレット変換である。このうち連続ウェーブレット変換では、ウェーブレットの縮尺 (変数 a) を連続的に変化させ、時間軸方向にも連続的に平行移動 (変数 b) したものを $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ と信号 $x(t)$ の内積として、(2.4) 式を計算する。

$$X_a(f,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

ここで(2.4) 式中の $\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ は、 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ の複素共役を表しており、 $x(t)$ と $\Psi(t)$ の似ている度合いが、積分計算することによって数値化されることになる。なおパラメータ $a (>0)$ は、ウェーブレット $\Psi(t)$ を拡大/縮小する倍率でスケーリング係数と呼ばれ、パラメータ b は時間シフト（時間軸上のずれ）である。これらのパラメータ a および b を離散化し、高速処理を実現したものが離散ウェーブレットである。

また $1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数で、特に $a=1$ （拡大/縮小なし）、 $b=0$ （時間シフトなし）に対するウェーブレットは、“マザーウェーブレット”あるいは“基本ウェーブレット”というが、マザーウェーブレットとして有名な関数として、Haar, Meyer, Mexican, Gabor の4種がある。それらの特徴は表 2.2 に示す通りである。

表 2.2 マザーウェーブレット関数の特徴

マザーウェーブレット	特 徴
Haar	計算処理速度が速い。 波形の分析開始時刻付近での影響が見られない。※
Meyer	周波数成分の周波数的な分離性が良い。 周波数の値が真値と一致する。
Mexican	周波数成分の時間的な分離性が良い。 周波数成分の発生時刻が真値と一致する。
Gabor	周波数成分の周波数的な分離性が良い。 周波数の値が真値と一致する。

※他の関数では、分析開始時刻付近での低周波部分に実際には含まれない周波数成分が見られる。

データ量が膨大で、計算速度の短縮化が必要なときには Haar を使い、周波数情報を重視したいときには Meyer を用いれば良い。また時間情報を重視したいときには Mexican を使い、時間と周波数両方の情報を得たいときには Gabor を用いれば良いと言える。

2. 4. 4 高速フーリエ変換による周波数解析

電磁波の周波数成分を解析する際には、スペクトラムアナライザやフーリエ変換によって周波数スペクトルを求め、その波形によって解析するのが一般的である。本論文では部分放電に伴う放射電磁波を研究対象としているが、オシロスコープで部分放電の放射電磁波を測定し、得られた放射電磁波の波形にまず高速フーリエ変換を適用することで周波数分析を行うこととした。その理由としては、スペクトラムアナライザでは所定の分解能帯域幅 (RBW) で測定する帯域を順次スイープし、各周波数成分の強度が計測される。そのため常時発生し続けている無線通信や放送波の測定では問題ないと思われるが、パルス性である部分放電をスペクトラムアナライザで検出した場合、放電信号の取りこぼしが懸念された。よってスペクトラムアナライザは部分放電の測定に不向きと判断し、前述した方法でオシロスコープによる部分放電測定を実施した。

部分放電の測定に先立ち、試験室のバックグラウンドノイズを測定した。アンテナの受信電圧波形を高速フーリエ変換で周波数分析した結果を図 2.12 に示すが、携帯電話で使用されている 870 MHz 帯の電磁波が、常時レベルを変動させながら検出されていた。

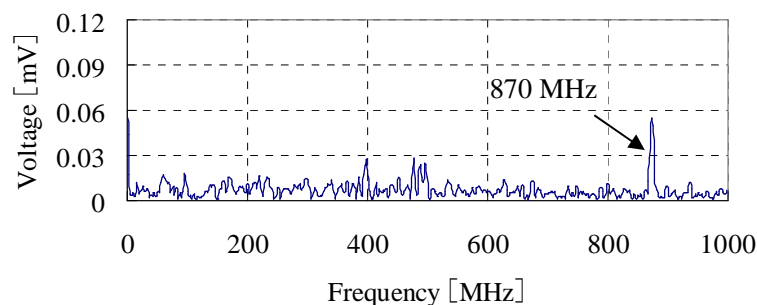


図 2.12 試験室のバックグラウンドノイズ

この試験環境で部分放電をそれぞれ発生させ、アンテナの受信電圧波形を高速フーリエ変換した結果を図 2.13～図 2.15 に示す。図 2.13 は空気中における部分放電の周波数スペクトルであるが、これによるとスペクトルは 20 MHz 付近でのみ見られ、100 MHz 以上の周波数成分は検出されなかった。図 2.14 は絶縁油中の場合であるが、空気中での放電とは異なり 150 MHz 付近でスペクトルのピークが見られることが分かる。またその他に 50 MHz 付近でもスペクトルが見られ、100 MHz 以下の周波数成分も含まれていた。図 2.15 はエポキシ樹脂中の場合であるが、他のケースでは見られない 300 MHz 程度の高い周波数成分が含まれていることが分かる。また別途で架橋ポリエチレンでも同様の測定を実施したところ、同じ固体絶縁材料であるエポキシ樹脂の周波数スペクトルと同じ様相を示すことが確

認できた。

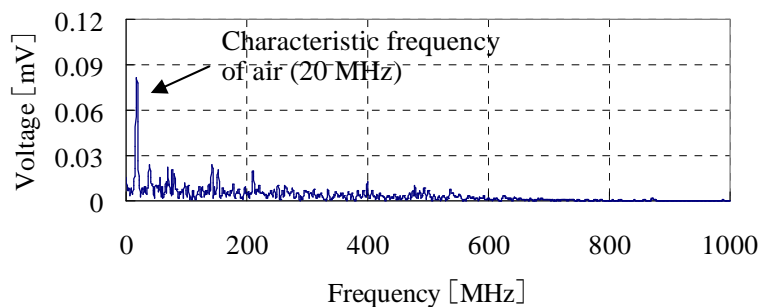


図 2.13 空気中での部分放電電磁波の周波数スペクトル

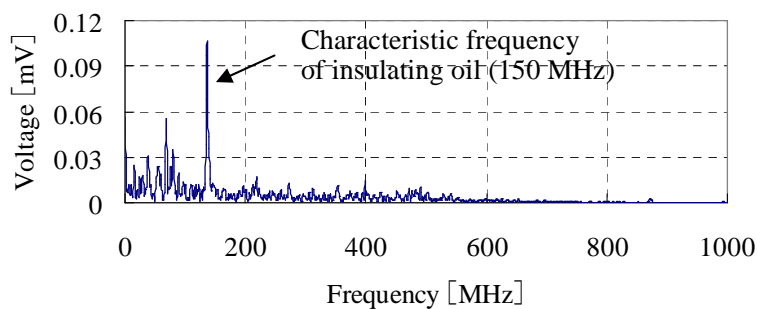


図 2.14 絶縁油中での部分放電電磁波の周波数スペクトル

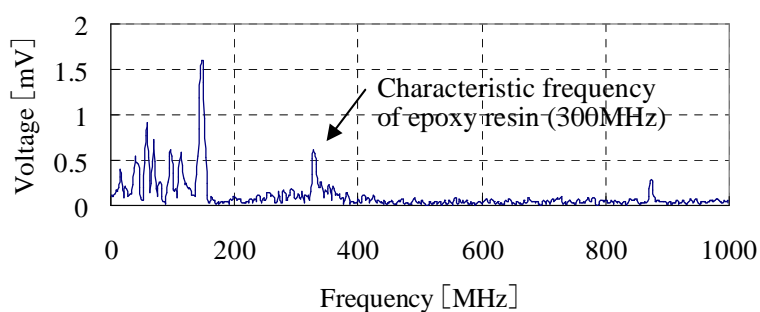


図 2.15 エポキシ樹脂中での部分放電電磁波の周波数スペクトル

確認として図 2.7 に示した試験環境を空洞共振器とみなし⁽³⁰⁾、低次の共振周波数を求めたところ 35 MHz や 63 MHz といった値になり、試験時に検出された周波数帯とは一致しない。また第 4 章や第 5 章で後述するが、実フィールドにて各絶縁材料中で発生する部分放電の放射電磁波を測定したところ、周波数スペクトルの様相は試験室での結果と同じに

なることを確認している。そのため放射電磁波の測定結果は、試験環境の影響を受けていないと判断される。また仕様が異なる他のアンテナを用いても、同様の周波数成分が検出されることも確認している。以上のことから検出された周波数スペクトルは、材料毎の特徴を捉えていると考えられる。

2. 4. 5 ウェーブレット変換による周波数解析

前掲の周波数スペクトルは、検出されたパルス性の放電波形全体に含まれる周波数成分を分析したものであった。そのため放射電磁波における周波数成分が、時間とともにどのような変化をするかは把握できない。そこで、周波数成分の時間的変化を分析可能なウェーブレット変換を適用し、詳細な周波数分析を試みた。ただし前述の解析結果において、周波数成分の特徴はどの場合でも 500 MHz 以下に表れていた。そこでここでは、500 MHz 以下を解析範囲とした。また解析には Vallen-Systeme 社製のフリーウェア AGU-Vallen Wavelet を使用したが、このソフトウェアのマザーウェーブレットには、周波数成分の局所的な変化を捉えることに適した Gabor が適用されている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。

図 2.16 は空気中での放電信号をウェーブレット変換した結果であるが、図の上段はアンテナの受信電圧波形であり、下段がウェーブレット変換の結果である。コンター図において色の濃さで信号強度は表されているが、100 MHz を超える帯域では信号がほとんど検出されていないことが分かる。ただしこれらのデータは、前項とは異なるオシロスコープ (Tektronix 製 TDS3054B, 500 MHz) で測定したものである。また図 2.17 は絶縁油の場合であるが、図 2.14 で示した周波数スペクトルの場合と同様に、150 MHz 付近に周波数成分が見られることが分かる。さらにエポキシ樹脂の場合は図 2.18 のようになったが、この場合も周波数スペクトルと同様に、300 MHz 以上の周波数成分が含まれることが確認できた。なおその現象は、架橋ポリエチレンにおいても同様であった。

これらの解析結果を見ると特徴的な周波数成分は共通して、受信電圧波形が最大となるパルスのピーク時に見られることが分かる。これは特徴的な周波数成分が、放電の発生した瞬間に表われることを示しており、絶縁材料毎に放電現象の特徴が表われたものと考えられる。

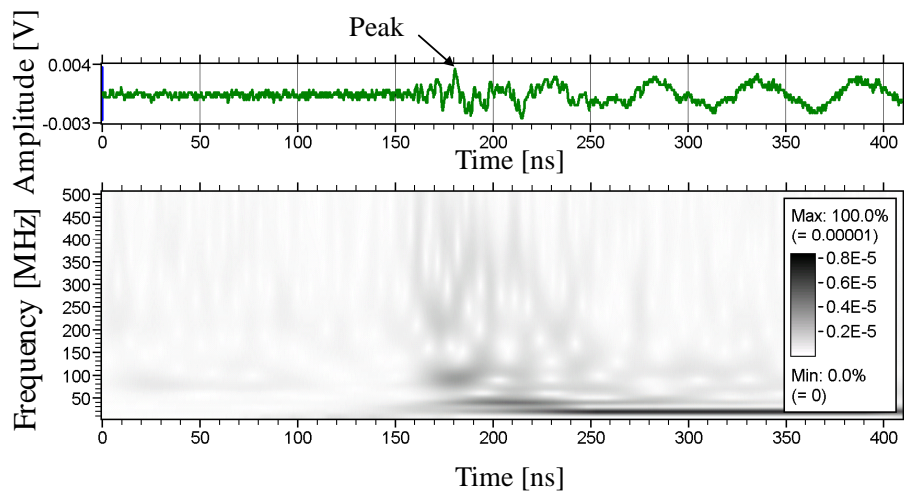


図 2.16 空気中の部分放電電磁波のウェーブレット変換

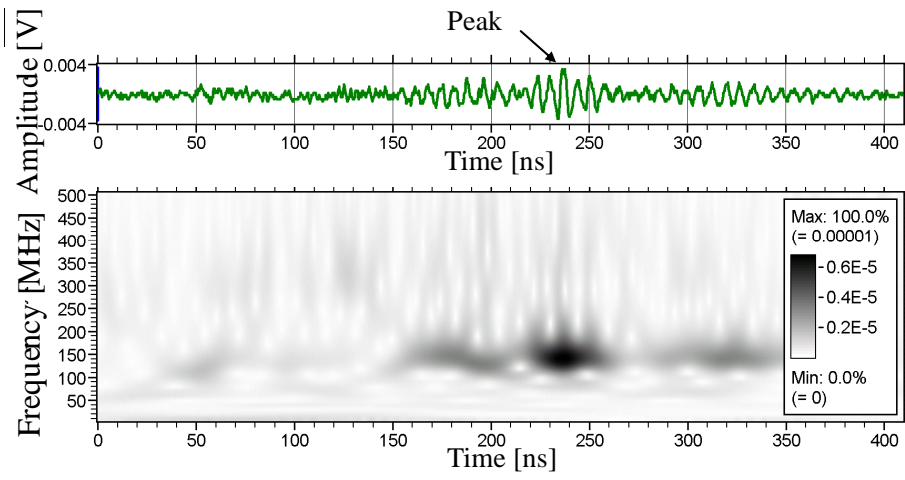


図 2.17 絶縁油中の部分放電電磁波のウェーブレット変換

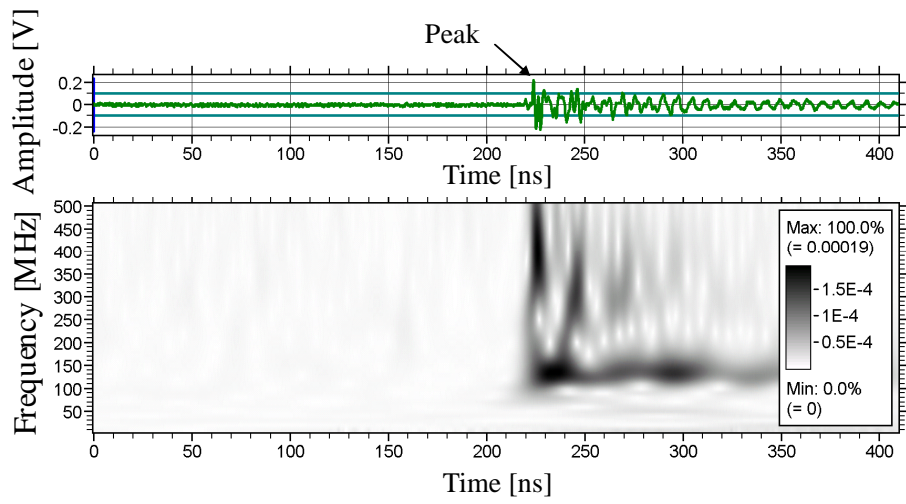


図 2.18 エポキシ樹脂中の部分放電電磁波のウェーブレット変換

文 献

- (1) 岡本達希：「最近の部分放電診断技術」，電学論 B, Vol.115, No.10, pp.1136-1139 (1995)
- (2) 電気学会電気規格調査会：「JEC211(1981) エポキシ樹脂ブッシング (屋内用)」 (1982)
- (3) 電気協同研究会：「電力用変圧器改修ガイドライン」，電協研，第 65 卷，第 1 号 (2009)
- (4) 小崎正光：「高電圧・絶縁工学」，オーム社 (1997)
- (5) 吉田勝美，小野田光宣，中山博史，上野秀樹：「高電圧・絶縁システム入門」，森北出版 (2007)
- (6) 大久保仁：「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」，電学論 B, Vol.119, No.4, pp.434-437 (1999)
- (7) H.Okubo: “Recent Progress and Future Perspective on Condition Monitoring and Diagnostic Techniques for Power Equipment in Japan”, Proc. Int. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis, 2008(CMD2008), pp.13-18 (2008)
- (8) 電気学会放電ハンドブック出版委員会：「放電ハンドブック」 (2003)
- (9) 河村達雄，河野照哉，柳父悟：「電気学会大学講座高電圧工学 (第 3 次改訂版)」，電気学会 (2005)
- (10) 花岡良一：「高電圧工学」，森北出版 (2007)
- (11) 大久保仁：「高電界現象論 -基礎と応用-」，オーム社 (2011)
- (12) 高田一，林昌幸，小迫雅裕，匹田政幸，中村修平，梅村時博，中村勇介，広瀬達也，東山雅一：「エポキシモールド絶縁システム中の人工ボイド内部分放電現象の検討」，電学論 A, Vol.131, No.9, pp785-791 (2011)
- (13) 山下敬彦，石原剛，川口将志，藤島友之，松尾寿夫，古田正数：「コロナ放電による絶縁電線の劣化」，電学論 B, Vol.126, No.12, pp.1261-1266 (2006)
- (14) 大塚信也，竹中賢司，小迫雅裕，趙孟佑，松久孝司，匹田政幸：「UHF 法で測定された電磁波第一波の振幅比に基づく GIS 絶縁異常の診断」，電学論 B, Vol.122, No.6, pp.769-775 (2002)
- (15) 大塚信也，尾野本道雄，手嶋隆志，金子周平，岡部成光，匹田政幸：「リスクアセスメントの PD 放射電磁波第一波に及ぼす GIS タンクサイズとセンサ位置の影響」，電学論 B, Vol.124, No.11, pp.1365-1372 (2004)
- (16) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」，電学論 B, Vol.118, No.2, pp.157-163 (1998)

- (17) 門脇一則, 西本栄, 木谷勇: 「ポリエチレン中での電気トリ成長過程における圧力波の時間周波数特性の推移」, 電学論 A, Vol.123, No.6, pp.587-592 (2003)
- (18) 小迫雅裕, 大塚信也, 松久高士, 匹田政幸: 「GIS 内の部分放電およびフリー異物により発生するラム波の時間周波数解析」, 電学論 B, Vol.122, No.6, pp.719 -724 (2002)
- (19) 牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人: 「エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発」, 電学論 B, Vol.131, No.8, pp.687-692 (2011)
- (20) Y.Tian, P.L.Lewin, D.Pommerenke, J.S.Wilkinson, and S.J.Sutton: “Partial Discharge On-line Monitoring for HV Cable Systems Using Electrooptic Modulators”, IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.11, No.5, pp.861-869 (2004)
- (21) Xu.Yang, Yu.Ming, Cao.Xiaolong, Qiu.Changrong and Chen,G: “Comparison Between Optical and Electrical Methods for Partial Discharge Measurement”, Proc. the 6th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol.1, pp.300-303 (2000)
- (22) Qi.Bo, Chengrong.Li, Zhen.Hao, Bibo.Geng, Dangguo.Xu, Shaoyu.Liu and Chun.Deng: “Partial Discharge Detection for GIS: A Comparison Between UHF and Acoustic Methods”, Proc. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp.1-5 (2010)
- (23) 長町峰志, 平田智之, 仲井邦幸, 上野秀樹, 中山博史, 柿花邦彦: 「部分放電による電磁波の周波数解析」, 電気学会放電研究会資料, ED-07-158, pp.75-80 (2007)
- (24) 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伸展開と放射電磁波」, 電学論 A, Vol.129, No.12, pp.915-921 (2009)
- (25) 牟田神東達也, 岡田翔, 上野秀樹: 「各種絶縁材料の劣化に伴う部分放電信号のウェーブレット解析」, 電設学誌, Vol.33, No.5, pp.344-350 (2013)
- (26) 武部幹: 「回路の応答」, コロナ社 (1981)
- (27) 三谷政昭: 「やり直しのための通信数学」, CQ 出版社 (2008)
- (28) 高山和敏, 東恒人, 中川紀美雄: 「ウェーブレット変換に及ぼすマザーウェーブレット関数の特徴」, 岡山理科大学紀要.A, 自然科学 32, pp.173-186 (1996)
- (29) M.F.Faisal and A.Mohamed: “Comparing the performance of various mother wavelet functions in detecting actual 3-phase voltage sags”, Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Power and Energy (PECon 08), pp.657-661 (2008)
- (30) Tetsuya Murayama, Masatake Kawada, Katsuo Isaka: “Effect of spectrum analyzer's impulse bandwidth on the measurement of EM waves emitted from partial discharges in multipath-rich environment”, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.6, No.3, pp.193-199 (2011)

第3章 放射電磁波における周波数成分の発生要因

3.1 はじめに

部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分には、放電が発生する絶縁材料毎で特徴が見られることが分かった。しかしこれらの特徴は、実測結果から求めたものであり、特徴が生じる要因について理論的には解明されていない。この放電メカニズムの解明は、学術的に興味深いだけでなく、絶縁劣化診断技術の高度化にも寄与すると考えられる。そこで本章では、部分放電に伴い放射される電磁波の周波数成分において、絶縁材料毎に特徴を生じさせるメカニズムの解明を目指し、各種検討を行った結果について述べる。

3.2 各種絶縁材料の物性

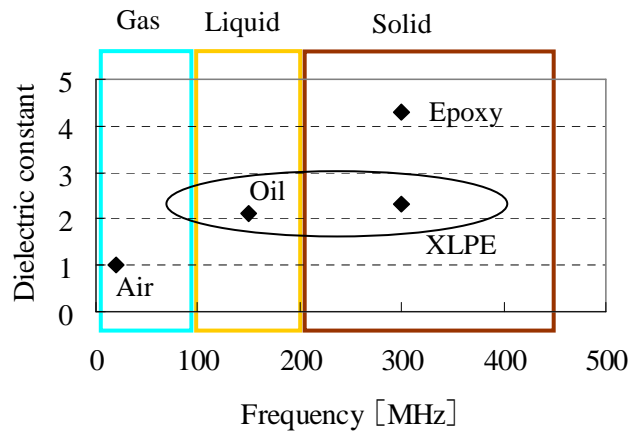
雷やスイッチングなどで生じるサージ波形が伝搬する際、その経路で高周波成分が減衰し、波形の立ち上がりが鈍ることが知られている⁽¹⁾。これは伝搬経路の浮遊容量やリアクタンス成分が影響しているが、部分放電の電流波形においても同様に、これらの物性が影響している可能性が考えられた。そこで空気、絶縁油、エポキシ樹脂ならびに架橋ポリエチレンの電気物性と放射電磁波の周波数成分の関係について調べた。

表 3.1 および図 3.1 に調査した結果を示すが、特徴的な周波数成分には 2.4 節で示した周波数を適用している。

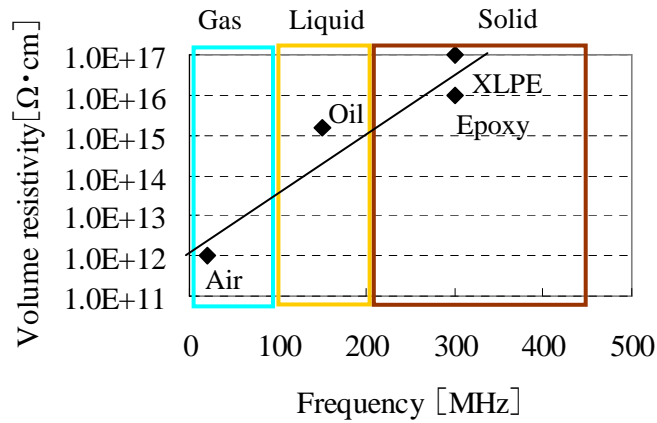
これらの中からまず比誘電率に着目すると、絶縁油の比誘電率とポリエチレンの比誘電率の値はほぼ一致しており、特徴周波数と比誘電率に相関性を見出すのは難しい。また誘電正接の場合も数値が散らばっており、相関性は見られない。しかし体積抵抗率の場合は、放射電磁波の周波数が高い材料ほど体積抵抗率は大きいといった傾向が見られた。

表 3.1 電気的パラメータの調査結果

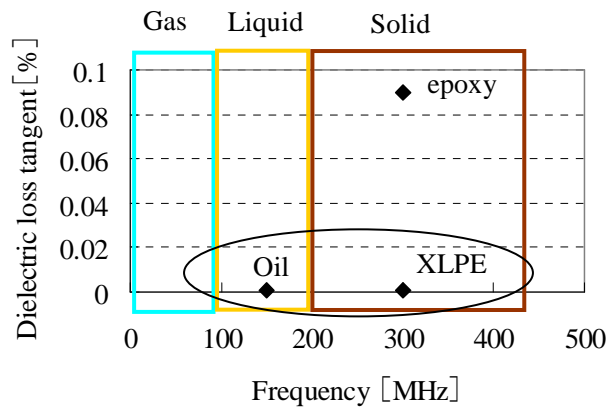
Insulation	Characteristic frequency of EM [MHz]	ϵ_r	$\rho_v [\Omega \cdot \text{cm}]$	$\tan\delta$
Air	20 MHz	1.0	1.0×10^{12}	-
Insulating Oil	150 MHz	2.1	1.5×10^{15}	$<10^{-3}$
Epoxy Resin	300 MHz	4.3	1.0×10^{16}	9×10^{-2}
XLPE	300 MHz	2.3	$>10^{17}$	$<5 \times 10^{-4}$



(a)比誘電率



(b)体積抵抗率



(c)誘電正接

図 3.1 周波数成分の特徴と電気的パラメータの関係

体積抵抗率を変化させる分子レベルでの物性調査が必要であるが、体積抵抗率と部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分には、何らかの相関性がある可能性が示された。これに対し、大小関係が必ずしも一致する訳ではないが、体積抵抗率の高い物質は一般的に絶縁破壊電界も高い傾向にある。そこで電界強度が部分放電の放射電磁波に対し、どのような影響を与えるかを検討した結果を以後に述べる。

3. 3 電流波形の立ち上がりと電界強度の関係

3. 3. 1 電流波形と電磁波波形の比較

部分放電に伴い放射される電磁波は、放電電流によって発生すると考えられる。そのため、まず放射電磁波と放電電流の波形を比較した。測定回路を図 3.2 に示すが、図 2.7 で示した試験環境と同じ配置となっている。ただし接地線に直列接続した抵抗素子は 55Ω のカーボン抵抗であり、この抵抗に電圧プローブ（横河電機製 700988, 400 MHz）を取り付けることで放電電流の検出を行った。またアンテナ（第一電波工業性 RH707, 120-900 MHz）は前述の測定で使用した物と同じである。電流および電磁波の波形測定には前述と異なるオシロスコープ（Tektronix 製 TDS3054B, 500 MHz）を用いた。

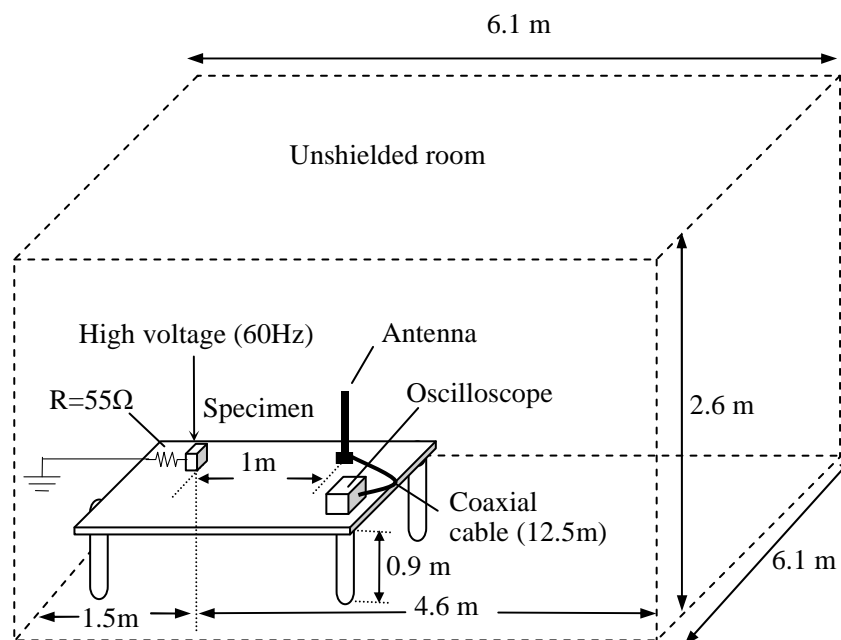
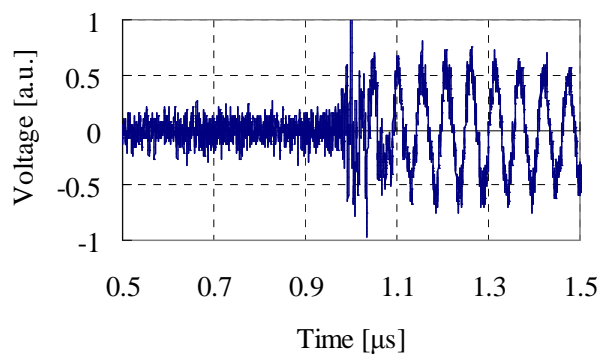


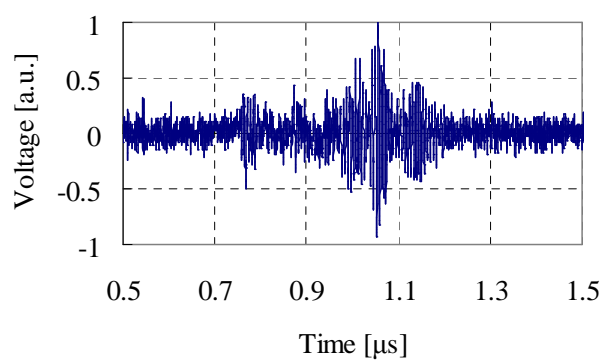
図 3.2 部分放電の測定回路

空気、絶縁油およびエポキシ樹脂における測定結果の一例を図 3.3 および図 3.4 に示すが、これらの波形はいずれも最大値で規格化したものである。各材料とも前章で示した放

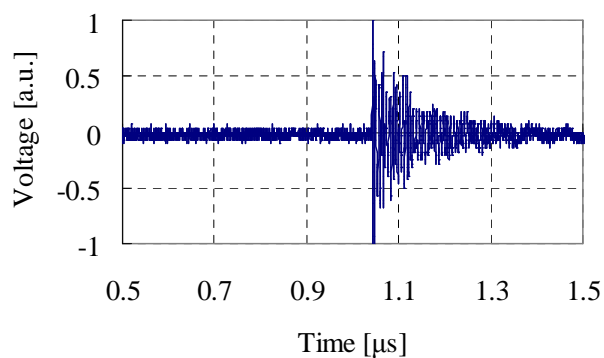
電発生源による部分放電を測定したものであり、部分放電発生時の印加電圧はそれぞれ60Hzの交流電圧で、空気が1,500 V、絶縁油が6,000 V、エポキシ樹脂が13,000 Vであった。



(a) 空気

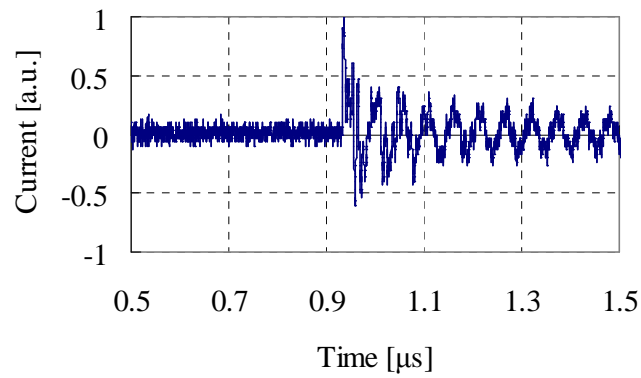


(b) 絶縁油

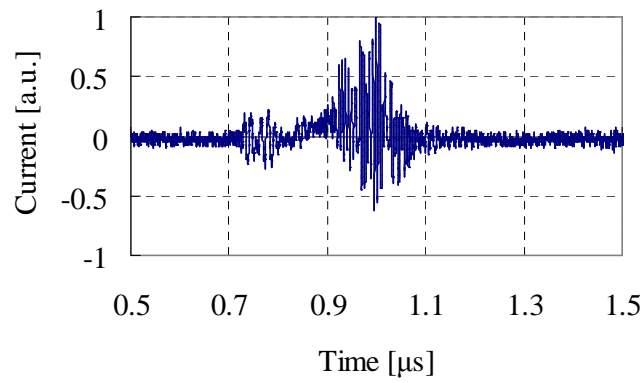


(c) エポキシ樹脂

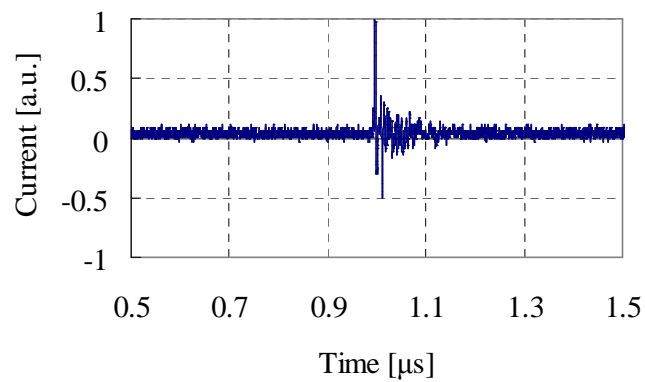
図 3.3 アンテナ受信電圧波形の比較



(a) 空気



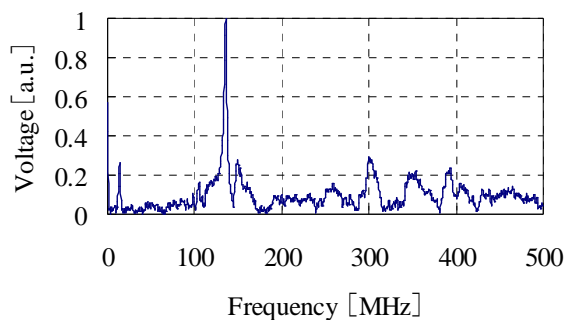
(b) 絶縁油



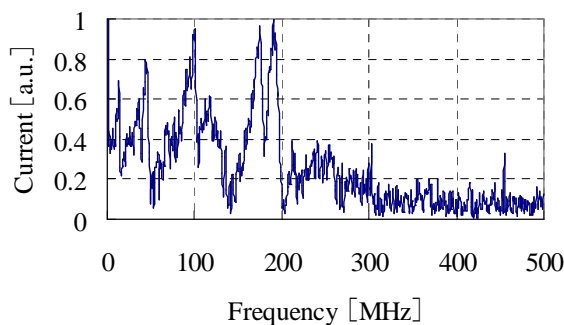
(c) エポキシ樹脂

図 3.4 放電電流波形の比較

どのケースにおいても、アンテナの受信電圧と放電電流の波形は似通ってはいるものの、一致はしていない。また一例として、エポキシ樹脂におけるアンテナの受信電圧波形と、放電電流波形をそれぞれ高速フーリエ変換した結果を図 3.5 に示す。



(a) アンテナ受信電圧



(b) 電流

図 3.5 電磁波と電流波形における周波数分析結果の一例

放射電磁波の波形は、放電電流の微分波形に比例することが知られている⁽²⁾。そのため時間変化が緩やかな低周波成分は、電磁波として現れにくいことになる。図 3.5 においても電磁波では低周波領域が検出されていないが、これについては上記の理由に加え、使用したアンテナの周波数特性も影響していると考えられる。図 3.6 に使用したアンテナ（第一電波工業性 RH707, 120-900 MHz）のアンテナファクタを示す。アンテナファクタとは、アンテナが受ける電界強度とアンテナが出力する電圧との比を表した係数であり、値が大きいほど受信感度は低いことになる。図 3.6 を見ると測定に使用したアンテナは、100 MHz 以下の帯域で感度が悪いことが確認できる。よってアンテナを用いて検出された電磁波は、物理的な特性とアンテナ性能の両方の理由により、低周波成分のレベルが実際より減衰し

た波形となる。

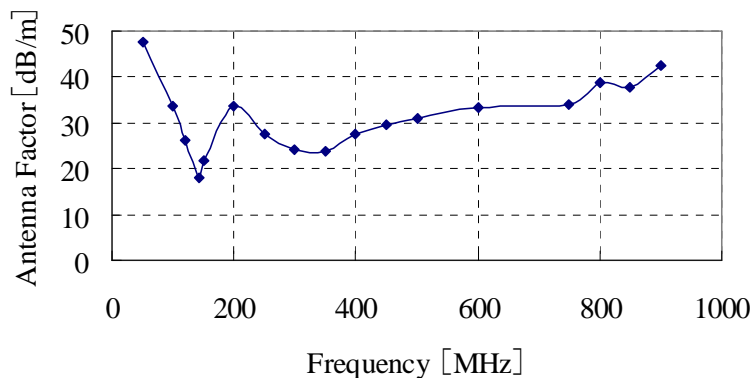


図 3.6 使用アンテナの特性 (アンテナファクタ)

また一方で電流は、伝搬経路の表皮効果や浮遊容量の影響によって、高周波成分が減衰し易い特性を持つ。そのため部分放電の電流波形を正確に測定するには、減衰の影響を抑えるために放電発生箇所と測定箇所を極力近づける必要がある。そこで本研究では、電流波形を測定する際はどのケースにおいても、放電発生源の接地電極と電流検出用の抵抗素子の間を極力短くするよう配慮した。

3. 3. 2 電流波形の立ち上がり時間

空気中と絶縁油中における部分放電に対し、電流波形を測定し比較を行った。ただし放電電流波形の立ち上がりは非常に急峻である。そこで立ち上がり部分を精度良く測定するために、接地線に直列接続した電流検出用の抵抗素子に $1.1 \text{ k}\Omega$ のカーボン抵抗を用い、時定数が小さくなるよう配慮した。また高周波帯域まで測定できる電圧プローブ (Tektronix 製 TAP2500, 2.5 GHz) を用い、電流波形の測定は行った。図 3.7 に測定結果の一例を示すが、ここで示した負極性放電の電流波形は、前章の図 2.13 や図 2.14 で示した放射電磁波と同時に検出されたものである。よって電極への印加電圧は、空気の場合に $3,400 \text{ V}$ 、絶縁油の場合は $12,000 \text{ V}$ であった。

波形の様相を比較し易くするため、縦軸をそれぞれ最大値で規格化した両波形を比較すると、ピーク値に到達するまでの立ち上がり時間は絶縁油の方が速く、急峻なことが分かる。またどちらの場合も、パルスの立ち上がり後に振動波形が見られる。図 2.14 で示した絶縁油の放射電磁波において、 50 MHz 付近に周波数スペクトルが見られた原因は、この振動成分が影響したものと考えられる。

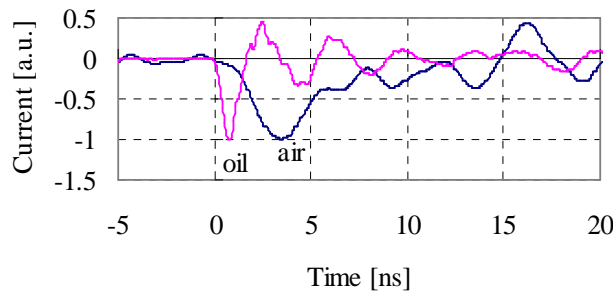


図 3.7 部分放電の電流波形比較例

放電電流は電子とイオンで構成されるが、電子とイオンでは移動速度に大幅な差がある。そのため、放電電流波形のパルス部分は電子で占められることになる⁽³⁾。放電のパルス波形は電子なだれの速度や進展距離によって決まるが⁽⁴⁾、これらは絶縁破壊電界から得られるエネルギーで変化するので絶縁材料によって異なる。また電磁波の波形は前述のとおり電流の微分波形に比例するため、電流波形で最も変化が大きいパルスの立ち上がり部分が電磁波に強く影響すると考えられる。そこでまず始めに、電極への印加電圧レベルと放電電流波形の立ち上がり時間の関係を調べた。ただし測定は電流波形の変動が正極性より小さい負極性の部分放電を対象とした。また立ち上がり時間は、放電開始で波形が立ち上がり始め、電流レベルがピーク値に対し 10%から 90%になるまでの間としている。図 3.8 は空気中の場合であり、図 3.9 が絶縁油中の場合である。また図 3.10 はエポキシ樹脂中の場合における試験結果であるが、これらは各電圧レベルで 5 回ずつ測定した結果の平均値をプロットしている。これらの結果から、各ケースとも印加電圧が大きくなるに伴い、放電電流波形の立ち上がり時間が短くなることが明らかになった。

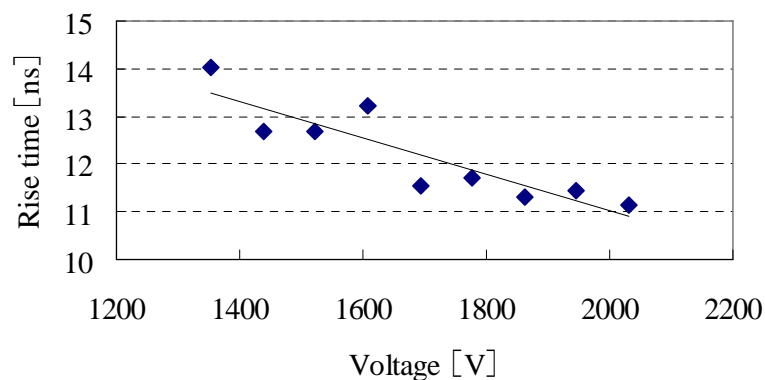


図 3.8 印加電圧と電流波形の立ち上がり時間の関係（空気中の場合）

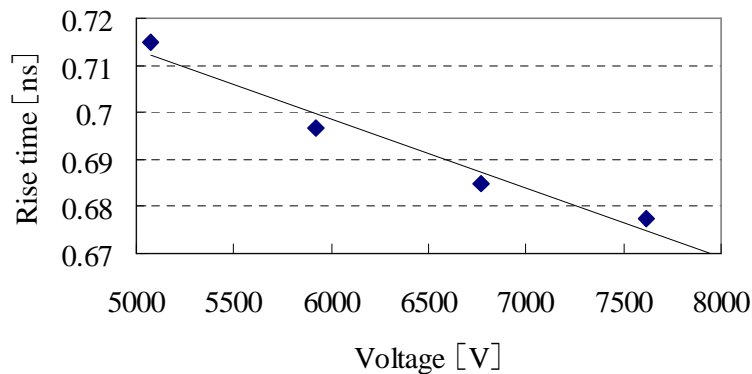


図 3.9 印加電圧と電流波形の立ち上がり時間の関係（絶縁油中の場合）

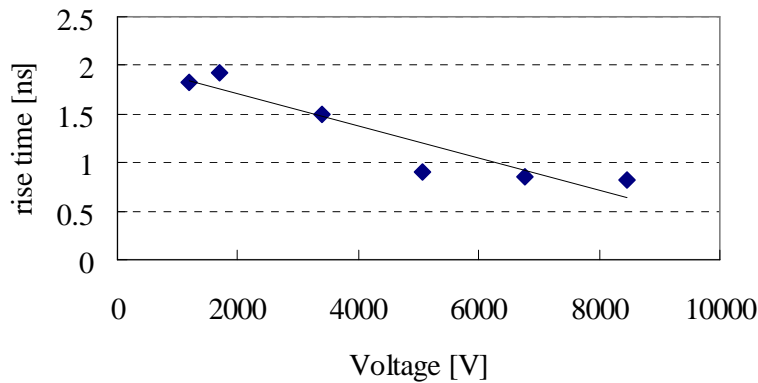


図 3.10 印加電圧と電流波形の立ち上がり時間の関係（エポキシ樹脂中の場合）

次に、電流波形の立ち上がり部分における傾度を表すには、立ち上がり時間よりも峻度の方が、実態を捉えているため適切と考えられる。そこで図 3.8～図 3.10 で用いたデータから電流波形の立ち上がり峻度 di/dt を求め、印加電圧との関係を示した結果を図 3.11～図 3.13 に示す。ただしこれらは負極性の放電電流が対象であったため、峻度の値がそれぞれ負となっている。これらの結果を見ても、各ケースとも印加電圧の上昇に伴い立ち上がり峻度 di/dt の値は大きくなっている。よって、電界強度の上昇に伴い電流波形の立ち上がりが急峻になっていく傾向が明確になった。

針電極への印加電圧と針先端における電界強度の関係は後述するが、印加電圧と電界強度には比例の関係がある。そのため印加電圧の上昇は、電界強度の上昇と同義である。よって部分放電発生時において、電界強度と放電電流波形の立ち上がり部分には、相関性があることが試験結果から示された。

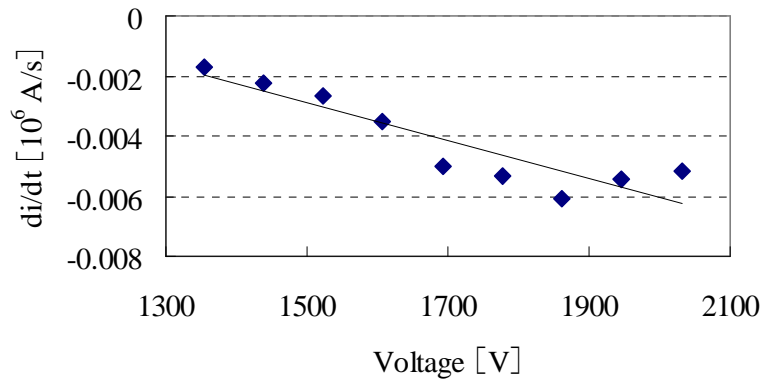


図 3.11 印加電圧と電流波形の峻度との関係（空気中の場合）

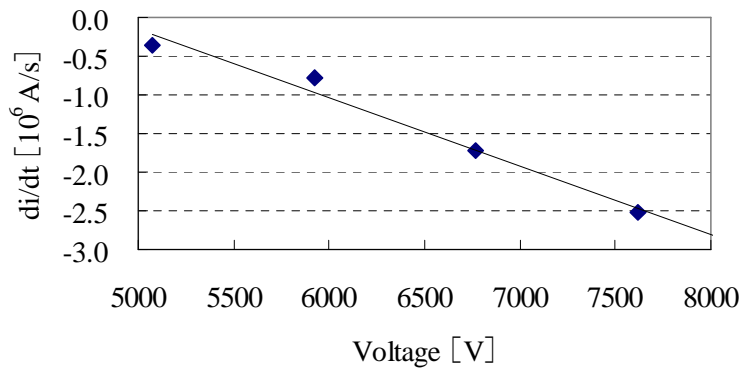


図 3.12 印加電圧と電流波形の峻度との関係（絶縁油中の場合）

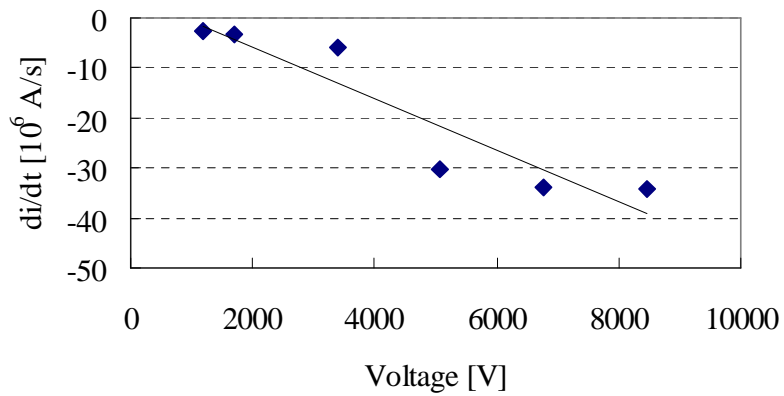


図 3.13 印加電圧と電流波形の峻度との関係（エポキシ樹脂中の場合）

3. 3. 3 電極への印加電圧と電界強度の関係

前述したように、本研究で用いた針電極への印加電圧と、部分放電が発生する針先の電界強度とは比例関係にある。針先端を回転双曲面で近似し、針-平板電極を図 3.14 のように模擬すると、針先端の電界強度 E は(3.1)式で表される⁽⁵⁾。ここで V : 印加電圧, r : 針先端の曲率半径, d : 針先端と平板間の距離を示す。

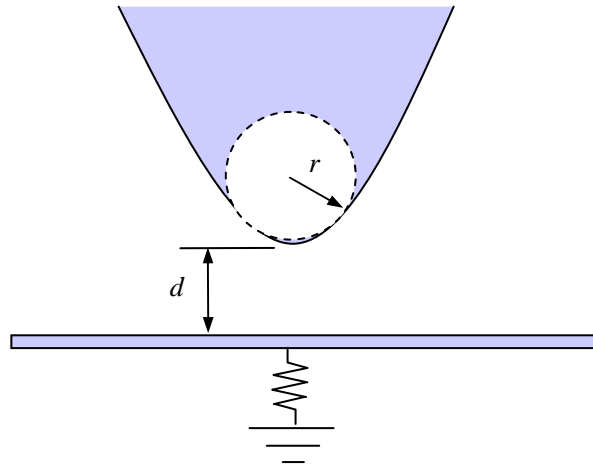


図 3.14 針-平板電極の構成図

$$E = \frac{2V}{r \cdot \log_e \left(1 + \frac{4d}{r} \right)} \dots \dots \dots (3.1)$$

(3.1)式を用い、各絶縁材料で部分放電が発生させた際における電界強度の計算を試みた。計算に用いたパラメータおよび計算結果は表 3.2 に示すとおりであるが、エポキシ樹脂の場合においてボイドの存在は考慮していない。

表 3.2 電界強度の計算条件とその結果

	Air	Insulating oil	Epoxy resin
V [V]	3,400	12,000	13,500
r [μm]	20	20	20
d [mm]	5	5	6
Calculation results [kV/cm]	490	1,740	1,900

文献調査の結果によると、エポキシ樹脂の短時間交流絶縁破壊電界の強度は 3,500－4,200 kV/cm とあったが⁽⁶⁾、この値は曲率半径が 5 μm の針によって形成されたピットで電気トリートが形成され始める電界強度の値であった。計算により得られた結果と文献値を比較すると、同程度であるが一致はしていない。この差異については、計算条件が原因であると考えられた。表 3.2 で示した電界強度の計算結果は、針先端における値となるが、本研究で使用した針先端の曲率半径は 20μm であった。しかし実際には、電気トリートは針先端ではなくボイド壁面に生じたピットから進展する。ピットの方が針先端より微細なことから、ピットにおける電界強度は針先端の電界強度よりも大きいと考えられる。そのため本研究で実施した試験において、部分放電発生時の電界強度は表 3.2 に示した計算値より大きかったと推測される。

また、空気と絶縁油の場合における絶縁破壊電界の一般値はそれぞれ 31.2 kV/cm⁽⁷⁾および 304 kV/cm⁽⁸⁾である。これらは平等電界での値であるため単純な比較は出来ないが、放電検出感度の都合から、試験時の印加電圧レベルが放電開始電圧を大きく上回っていたものと考えられる。

3. 4 部分放電の電流波形と放射電磁波の関係

前節において、部分放電発生時の電界強度と放電電流の立ち上がりに関連があることを示した。そこで次に、電界強度と放射電磁波の相関について確認する試験を行った。前節の試験において、放電電流の発生と同時に放射される電磁波の計測も行っており、その中の一例として絶縁油中の部分放電に伴う放射電磁波に対し、ウェーブレット変換した結果を図 3.15～図 3.18 に示す。それぞれの分析結果を比較すると、印加電圧が図 3.15 で示す 5,080V と低い時には 150 MHz 付近の周波数成分が最も強く表われるが、印加電圧が上がっていくに伴い最も強く表われる周波数成分は高周波側に変化していき、図 3.18 で示すように印加電圧が 7,620 V の時には、最も信号強度の大きい周波数帯域は 500 MHz 以上に推移していた。

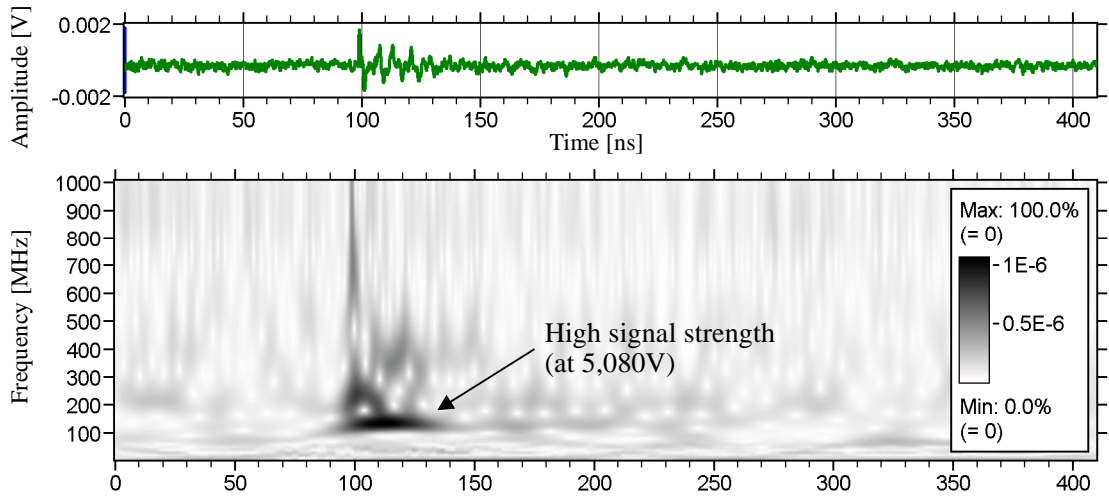


図 3.15 絶縁油中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(5,080 V 課電)

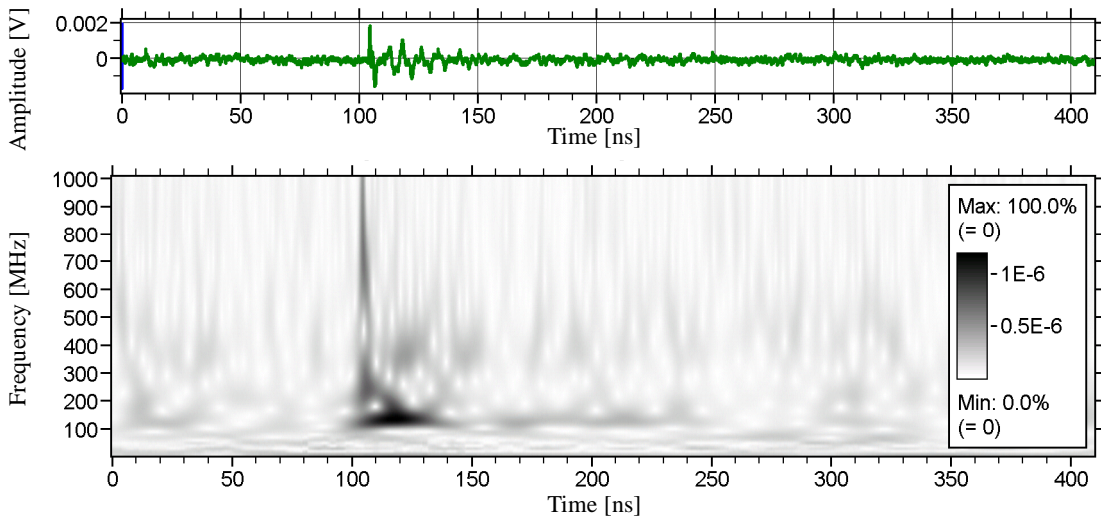


図 3.16 絶縁油中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(5,920 V 課電)

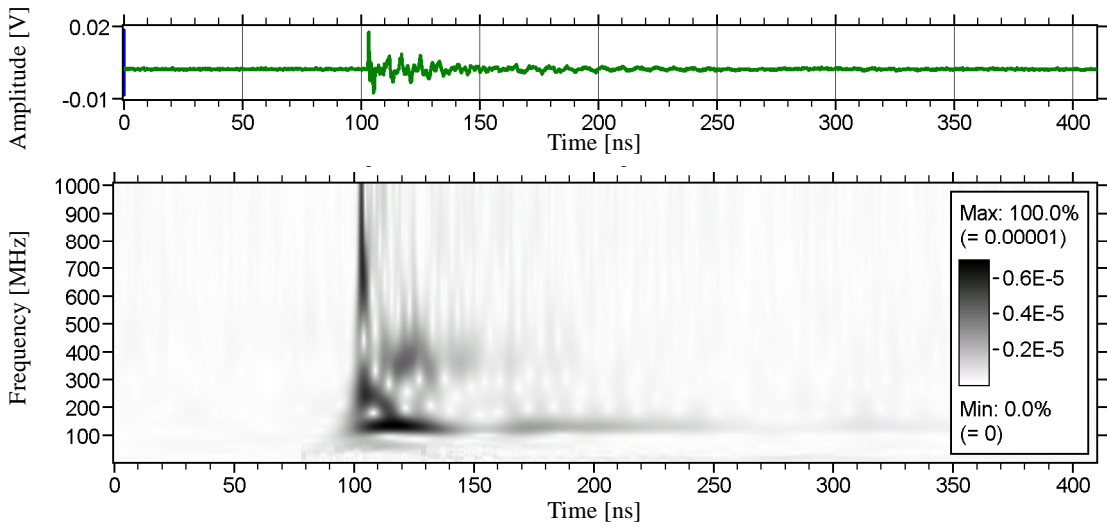


図 3.17 絶縁油中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(6,770 V 課電)

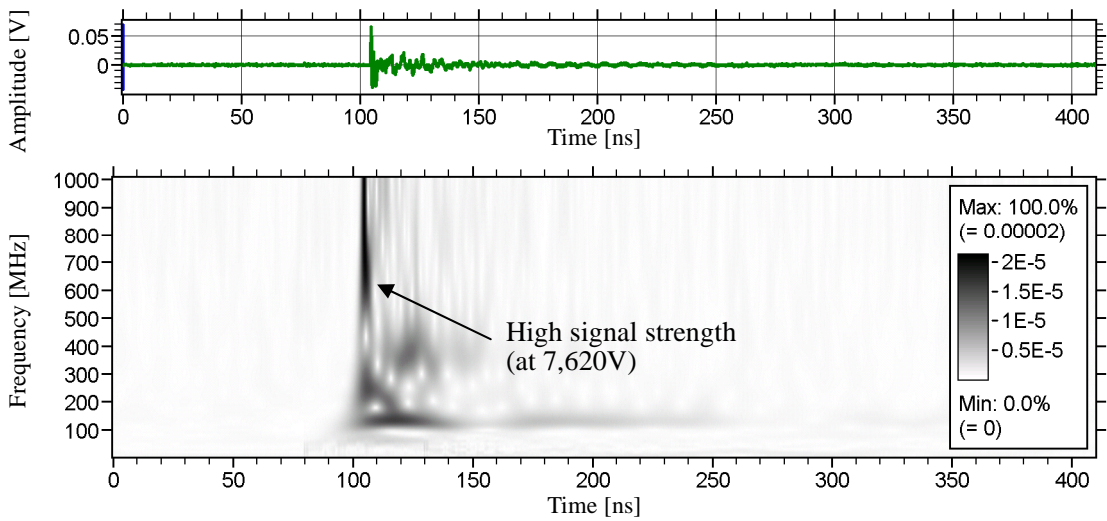


図 3.18 絶縁油中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(7,620 V 課電)

この様に印加電圧の上昇に伴い、放電発生時に検出される放射電磁波の周波数成分は高くなったが、この現象は他の空気やエポキシ樹脂の部分放電でも確認された。

空気の場合の周波数分析結果の例を図 3.19 と図 3.20 に示すが、これらは図 2.8 に示した気中放電用の電極において、60Hz の交流電圧 1,400 V と 6,800 V を印加した時に検出された放射電磁波に対し、それぞれウェーブレット変換した結果である。受信電圧波形のピーク時における周波数成分に着目すると、1,400 V 印加時には 20 MHz 程度の周波数成分しか

見られないのに対し、6,800 V 印加時には 100 MHz 程度の電磁波が検出されていたことが分かる。

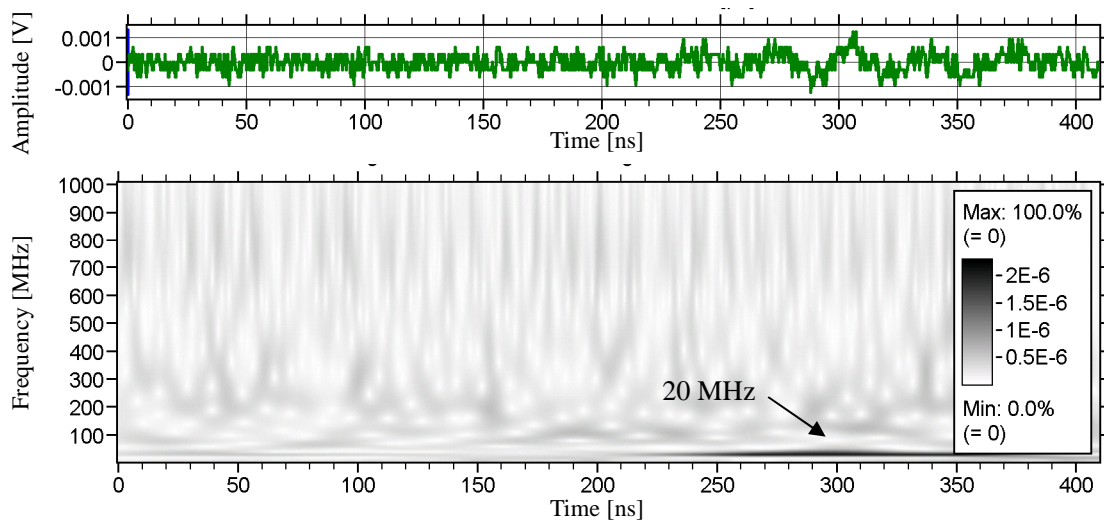


図 3.19 空気中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(1,400 V 課電)

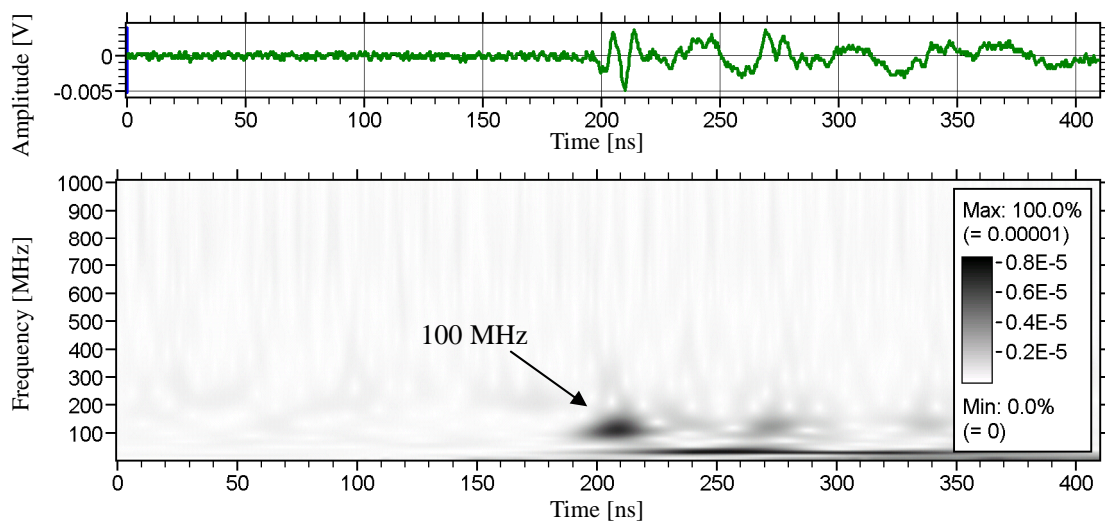


図 3.20 空気中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(6,800 V 課電)

また図 2.9 で示したエポキシ樹脂の放電発生源に対し、3,400 V 課電した時と 10,200 V 課電した時に検出された放射電磁波のウェーブレット変換結果を図 3.21 と図 3.22 に示す。図 3.21 で示した 3,400 V 課電時において、受信電圧波形のピーク時に 150 MHz 程度の周波数成分しか検出されなかったのに対し、図 3.22 の 10,200 V 課電時には 300 MHz を超える帯域で周波数成分が検出されている。

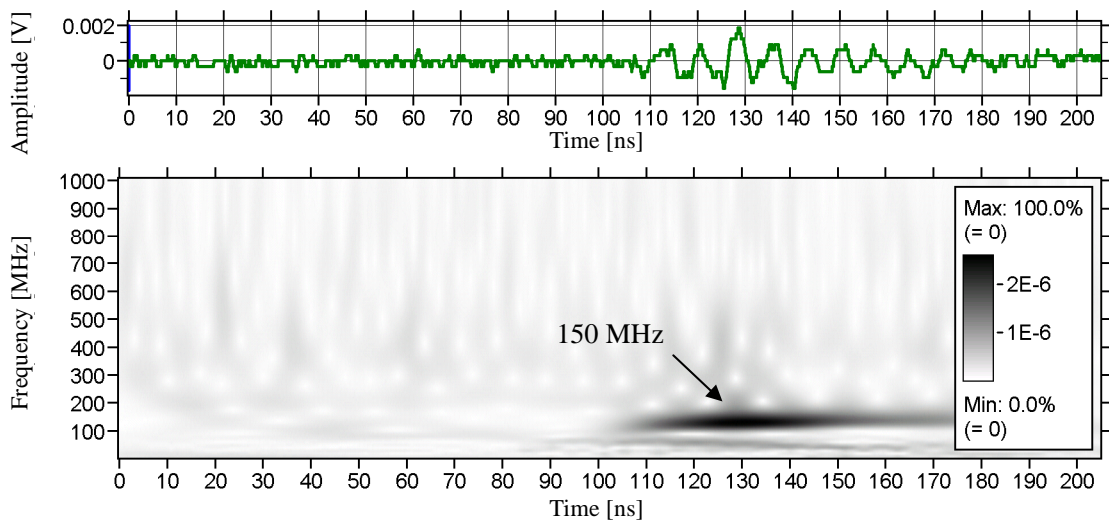


図 3.21 エポキシ樹脂中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(3,400 V 課電)

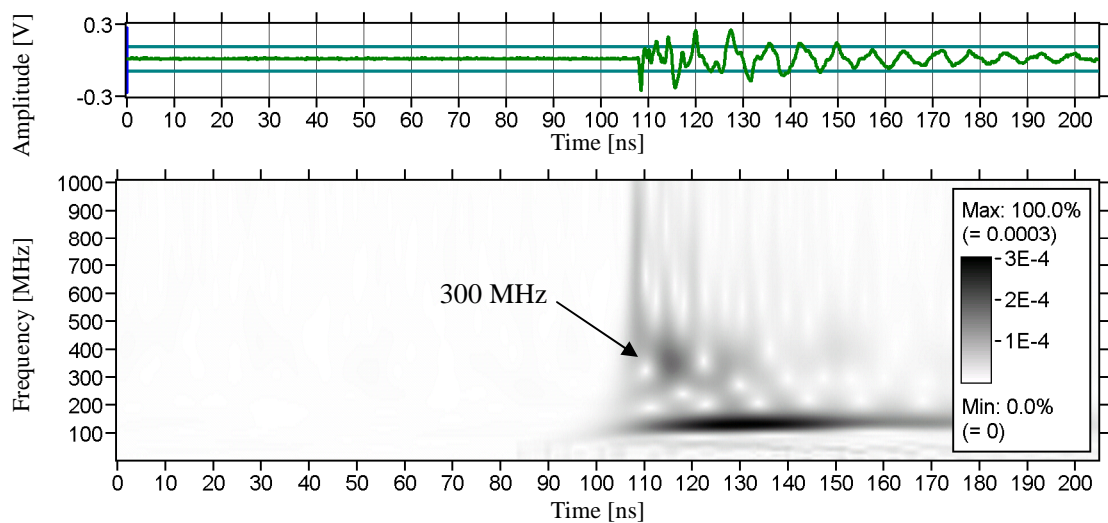


図 3.22 エポキシ樹脂中の部分放電における放射電磁波のウェーブレット変換結果(10,200 V 課電)

以上の結果から、印加電圧の上昇に伴い放電電流の立ち上がりが急峻になるが、それに併せて放射電磁波の周波数成分も高くなることが確認できた。

3. 5 電気トリーの進展と放射電磁波の関係

3. 5. 1 エポキシ樹脂の絶縁破壊試験

これまでに用いてきたエポキシ樹脂の放電発生源を用い、この試料が絶縁破壊に至るまでの部分放電を観察したところ、印加電圧が一定であっても電磁波強度が変化する様相が現れたので、以下にその結果を述べる。

図 3.2 と同様の測定回路を用い、エポキシ樹脂の放電発生源に課電した直後と課電から 20 分経過後における部分放電に伴う放射電磁波を測定した。検出された波形を高速フーリエ変換により周波数分析し、得られた周波数スペクトルを比較した結果を図 3.23 に示す。どちらの場合も 300 MHz から 400 MHz の範囲に特徴的な周波数スペクトルが見られるが、これは前述したとおりエポキシ樹脂特有の周波数成分であるので、観測された電磁波はエポキシ樹脂内部の部分放電に伴う放射電磁波であると判断される。また課電直後において、周波数スペクトルのレベルは 30 μV 程度であるのに対し、課電開始から 20 分後では 150 μV 程度まで全体的にレベルが上昇していた。劣化の進展により部分放電の放電電荷量が増加するが、それに伴い放射電磁波の強度も増加したことが、レベル変化の原因と考えられる。

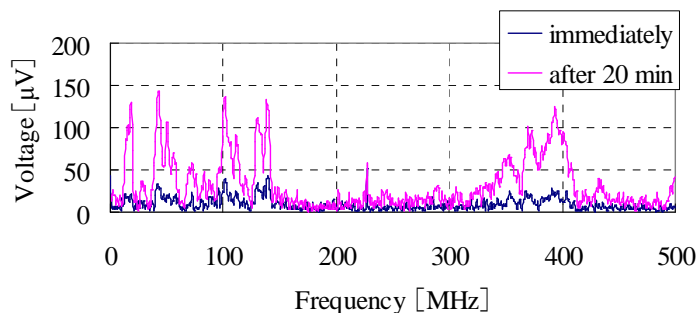


図 3.23 課電時間による周波数スペクトルの比較

前述した通り周波数スペクトルは、波形全体に含まれる周波数成分を表したものであり、周波数成分の時間的変化を分析することは困難である。そこで、この絶縁破壊試験のデータについてもウェーブレット変換の適用を試みた。

図 3.24 と図 3.25 は、課電直後および 20 分経過後の部分放電に伴う放射電磁波の波形を

ウェーブレット変換した結果である。ウェーブレット変換によるコンター図は似た様相を示しているが、放電発生時における図中の矢印で示した 400 MHz 付近を比較すると、信号強度は 20 分後の方が強く表われていると分かる。

ここで着目した 400 MHz 付近の帯域は、エポキシ樹脂で発生する部分放電に特有の周波数成分であるが、放射電磁波にこの周波数成分が見られる時に電気トリーは進展する。電気トリーの進展に伴い電磁波強度も増大するとの知見が、過去の研究成果からも得られており⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、ウェーブレット変換結果における 400 MHz 付近の信号強度の変化は、電気トリーの変化によって表れたと考えられる。そこで固体絶縁材料であるエポキシ樹脂と架橋ポリエチレンを対象とし、電気トリーの進展と放射電磁波の関係について試験を行った結果を次項で述べる。

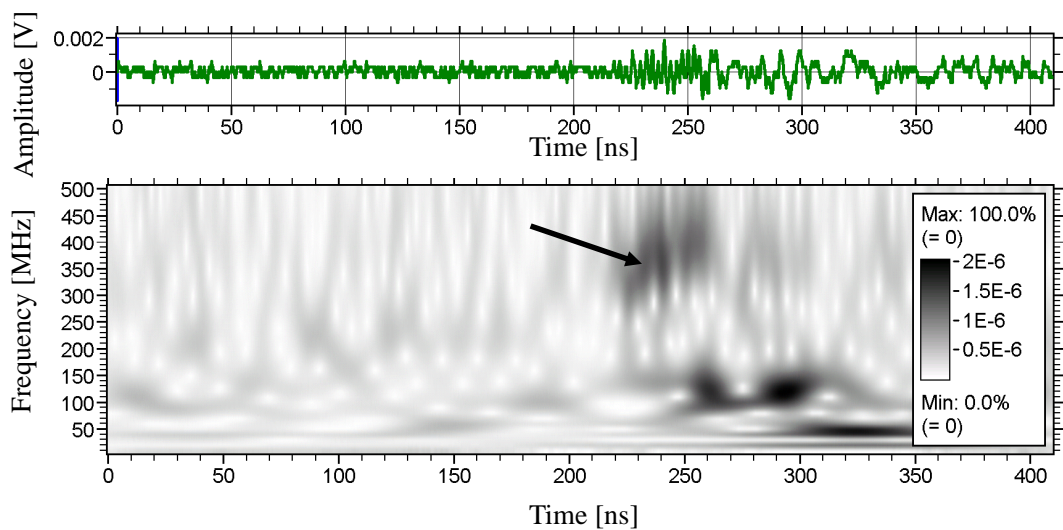


図 3.24 エポキシ樹脂への課電直後における放射電磁波のウェーブレット変換

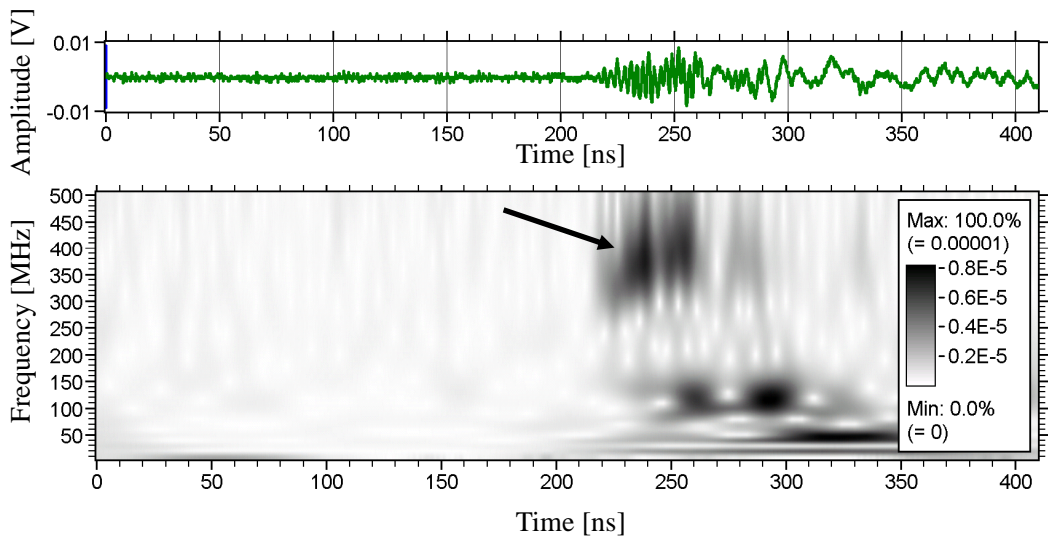


図 3.25 エポキシ樹脂への課電 20 分後における放射電磁波のウェーブレット変換

3. 5. 2 試料および電極構成

本試験において、エポキシ樹脂および架橋ポリエチレンを用いた試料の構成を図 3.26 に示す。樹脂中に針電極（先端曲率半径約 $35 \mu\text{m}$ ，鋼製，Ni メッキ）を埋め込んでおり，針を僅かに引き抜くことで内部にボイドを模擬している。またボイド内部のガスが抜けないうようにするため，針の根元は接着剤で封止している。各試料には導電性銀ペイント(D-362, 藤倉化成株)を底部に塗布して均一に電圧が加わるようにし，この課電試料を直径 50 mm，厚み 1 mm の黄銅製円板の平板電極上部に配置した。エポキシ樹脂には充填剤としてシリカ粉が 50 wt% 配合されており，樹脂の硬化後に厚さ 5 mm の直方体に加工している。一方の架橋ポリエチレンでは，厚さ 1 mm の市販シートを適当な大きさに切り出し，試験用の試料とした。なおポリエチレンに関しては厚さ 3 mm の市販シートでも同様の実験を行い，エポキシでは厚さや外形の異なる樹脂でも実験を行ったが，検出される電磁波の周波数に差異が生じないことを確認している。また沿面放電を防ぐため，これらの試料を絶縁油(新日本石油株製，高圧絶縁油 K)に浸漬させた状態で電極に課電を行ったが，絶縁油の有無によって部分放電の様相が変化しないことも事前に確認した。

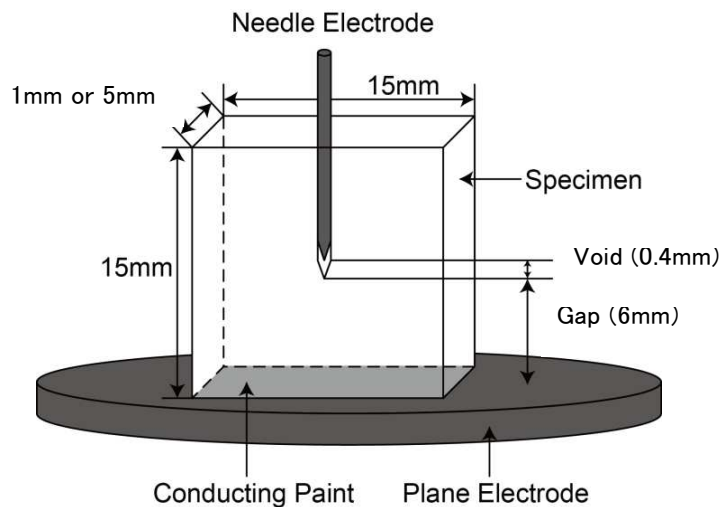


図 3.26 固体絶縁の試料構成

3. 5. 3 試験方法

部分放電の測定回路を図 3.27 に示す。計器用変圧器（三菱電機株，22,000 V/130 V）により商用電圧を 16,000 V まで昇圧し，ブロッキングコイル(10.1 mH) を介して試料に印加した。印加電圧波形の測定は試料に並列に接続したコンデンサ分圧器を用い，電流波形の測定には 50Ω の検出抵抗を介してデジタルオシロスコープ(横河電機製 DL6154，周波数

帯域 1.5 GHz)を用いた。電気トリ一進展に伴う電磁波は、試料から水平距離約 0.4 m の位置に設置したアンテナ（第一電波工業製 D130，周波数帯域 25～1300MHz）で受信し，正負両極の放電に伴う放射電磁波のスペクトルを測定した。なお試験は室内で実施しており，観測される電磁波には壁面からの反射波も含まれる。しかし前述したように，電磁波の周波数成分が反射によって変化するわけではないため，測定結果の評価には影響しないと考えられる。また部分放電の電荷量は，測定した部分放電電流波形で最初の 1 パルス分を積算して求め，電気トリ一進展の様子は顕微鏡(Carton(株)製 M-936，倍率×40)とデジタルカメラ(Canon(株)製 EOS D30)を組み合わせで撮影した。

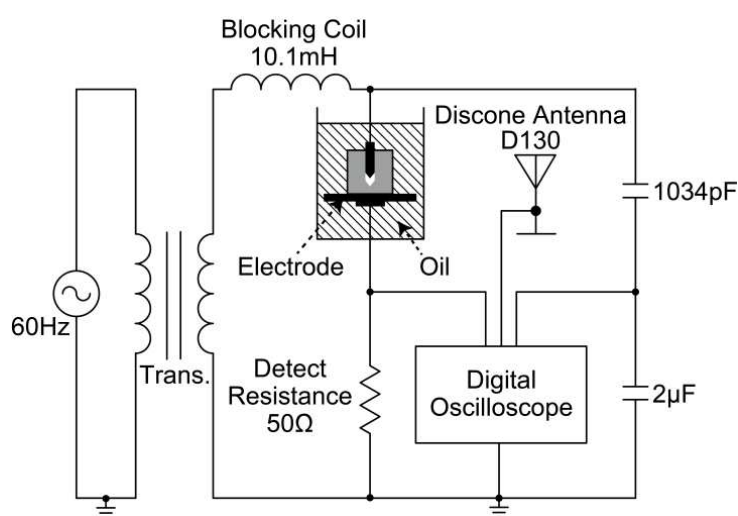


図 3.27 電気トリ一進展に伴う放射電磁波の測定回路

3. 5. 4 試験結果

エポキシ樹脂および架橋ポリエチレンから放射された放射電磁波の周波数スペクトルと，電気トリ一の観察結果の一例を図 3.28 および図 3.29 に示す。これらは電圧印加後 $t=20$ min の結果であり，周波数スペクトルは正・負極それぞれで最大の部分放電電流が検出された際の電磁波受信信号を高速フーリエ変換したものである。なおエポキシ側の電気トリ一写真が不明瞭であるが，これは充填剤が配合されたことで光学的に不透明になるためである。一方でポリエチレン側の写真は鮮明に写っており，針先のように見える三角形の黒い部分は，針先端により作製されたボイドである。

周波数スペクトルを見るとどちらも 40-300 MHz で周波数成分が検出され，電圧を印加したことで電気トリ一が進展し始めた様子も確認している。検出された 40-300 MHz の電磁波は異なる試験環境および測定器を用いても確認されているため⁽¹¹⁾⁽¹²⁾，共振や測定器の

周波数特性とは関係なく樹脂中で発生する部分放電の特徴と考えられる。

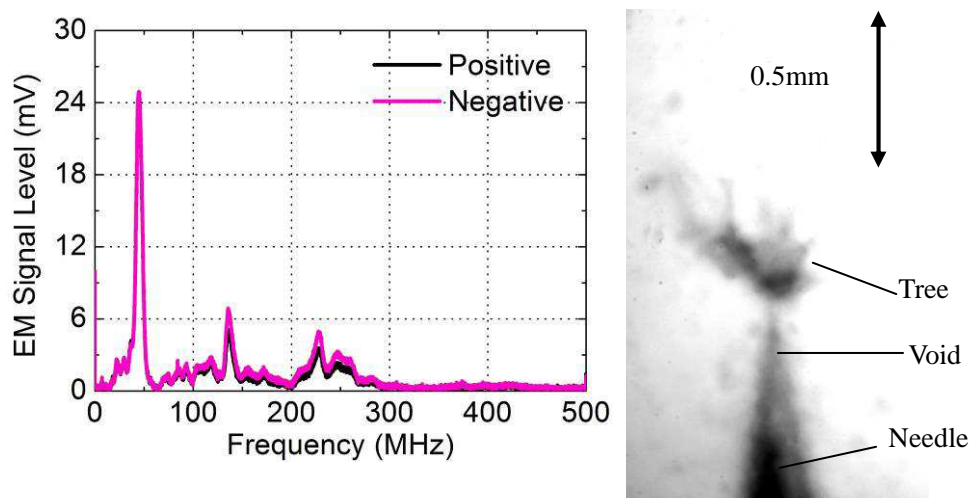


図 3.28 エポキシ樹脂における放射電磁波の周波数スペクトルと電気トリー観察例

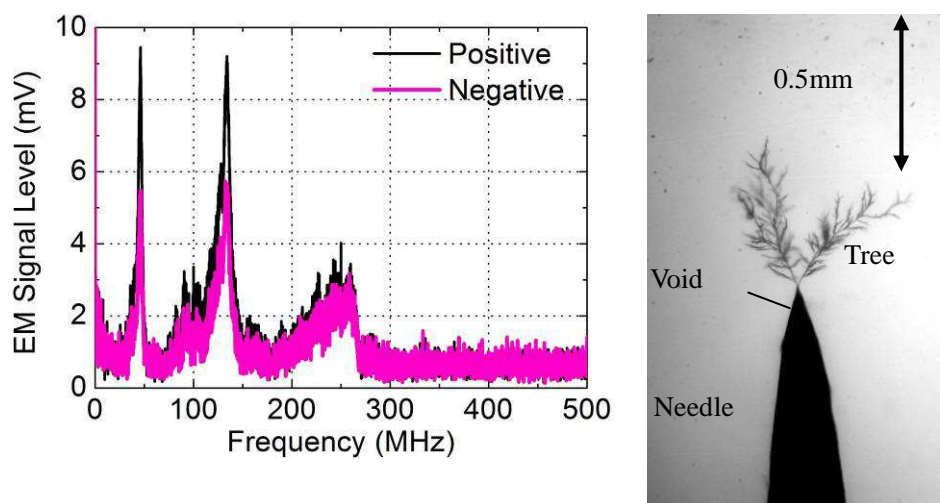


図 3.29 架橋ポリエチレンにおける放射電磁波の周波数スペクトルと電気トリー観察例

また、エポキシ樹脂における放射電磁波の周波数スペクトルを 40-100 MHz, 100-200 MHz, 200-300 MHz の帯域で分割し、それぞれの帯域におけるピーク値の時間変化と電気トリーの進展状況を図 3.30, 図 3.31 に示すが、各数値は 3 回ずつ行った測定結果の平均である。これによると電圧印加直後の $t=0$ min から $t=30$ min までは、電気トリー進展に伴い放射電磁波強度が増加する傾向が見られたが、 $t=30$ min から 40 min では進展速度が低下すると

もに、電磁波強度が増加する割合も低下した。その後、 $t=40 \text{ min}$ から 50 min では再びトリーの進展速度が増加し、電磁波強度が増加する割合も上昇する傾向が見られた。これらの結果から、電気トリーの進展と放射電磁波強度の変化には一定の相関関係が認められた。

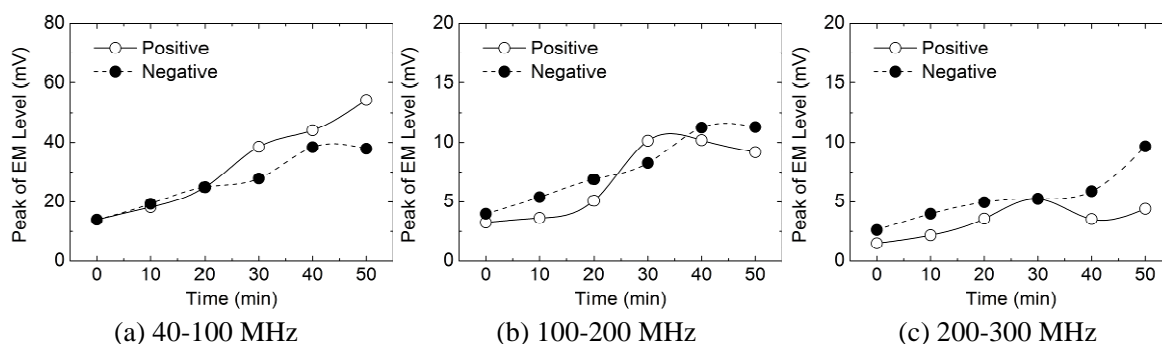


図 3.30 エポキシ樹脂中からの放射電磁波における周波数成分のピーク値

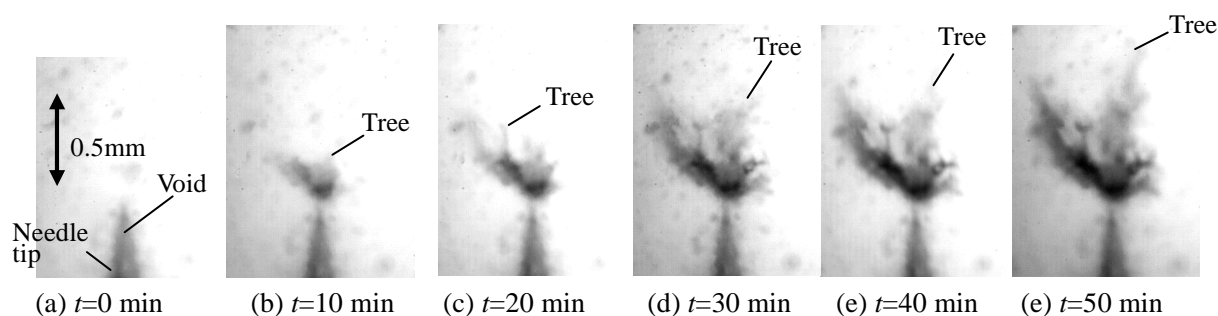


図 3.31 エポキシ樹脂中における電気トリーの進展状況

次に架橋ポリエチレンの場合において、40-100 MHz、100-200 MHz、200-300 MHz の帯域における放射電磁波強度の時間変化と電気トリーの進展状況を図 3.32、図 3.33 に示すが、各数値はエポキシ樹脂の場合と同様で測定結果の平均を表している。電圧印加直後の $t=0 \text{ min}$ から $t=20 \text{ min}$ までは電気トリーの進展に伴い放射電磁波強度が増加したが、 $t=20-40 \text{ min}$ では進展速度の低下とともに放射電磁波の強度も減少した。その後 $t=40-50 \text{ min}$ では再び進展速度が上昇し、放射電磁波強度も増加する傾向が見られた。このように架橋ポリエチレンの場合は $t=20 \text{ min}$ で電磁波強度が最大となり、図 3.30 で示したエポキシ樹脂のように時間の経過とともに電磁波強度が増加する傾向を示していない。これは電磁波強度の変化が電気トリーの進展速度と関係するものの、トリー長の変化と単純には一致しないことを示唆している。

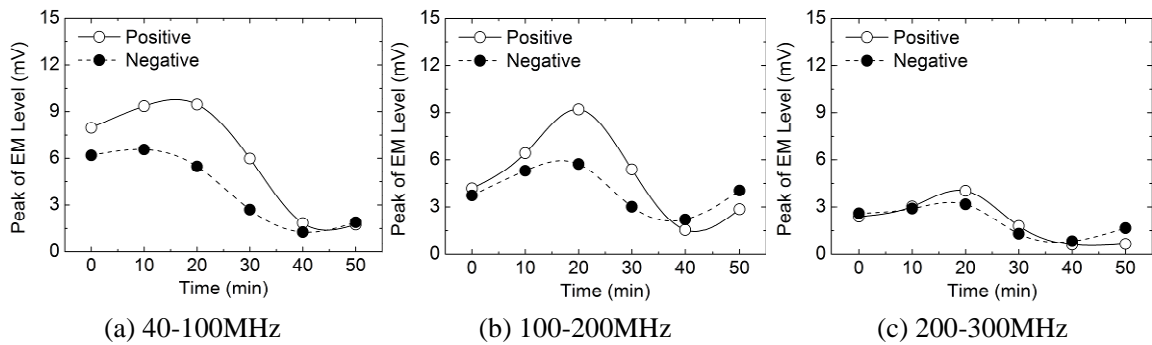


図 3.32 架橋ポリエチレンからの放射電磁波における周波数成分のピーク値

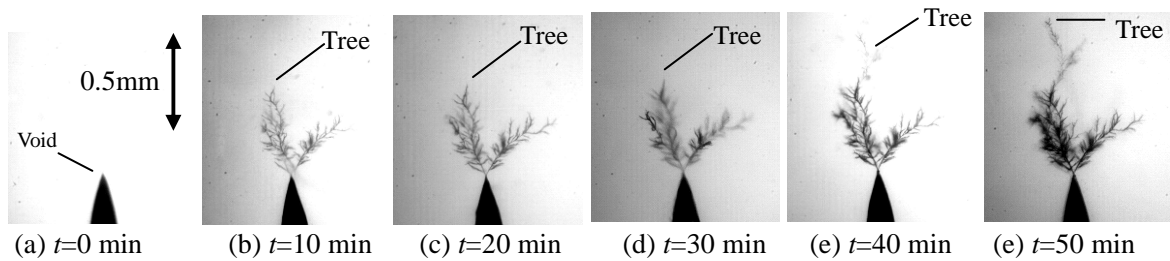


図 3.33 架橋ポリエチレン中における電気トリーの進展状況

次にエポキシ樹脂を対象に、放電電荷量、放電電流のピーク値、半値幅(full width at half maximum, FWHM)および立ち上がり時間の時間変化について調べた結果を図 3.34～図 3.37 に示す。これらは各時間で 3 回測定した結果の平均であるが、放電電荷量および放電電流ピーク値と図 3.31 で示した電気トリーの進展には、一定の相関があると考えられる。また放電電荷量と放電電流ピーク値が変化する様相は近似しているが、半値幅は概ね一定で変化が無かった。よって、放電電荷量の変化は放電電流のピーク値に依存し、パルス幅は影響しないことがわかった。

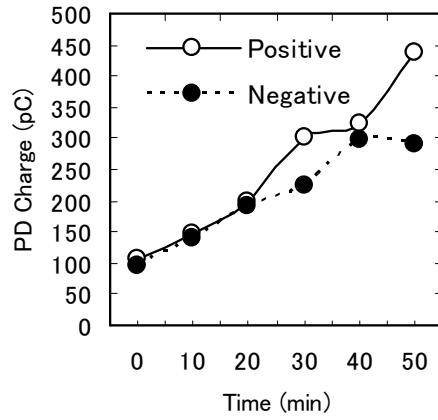


図 3.34 エポキシ樹脂における放電電荷量の推移

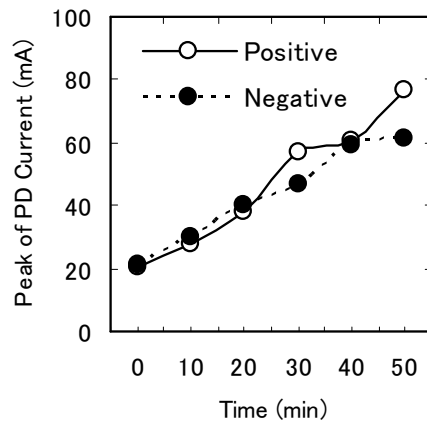


図 3.35 エポキシ樹脂における放電電流ピーク値の推移

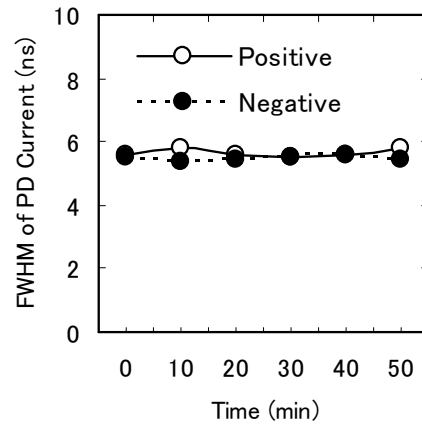


図 3.36 エポキシ樹脂における放電電流の半値幅

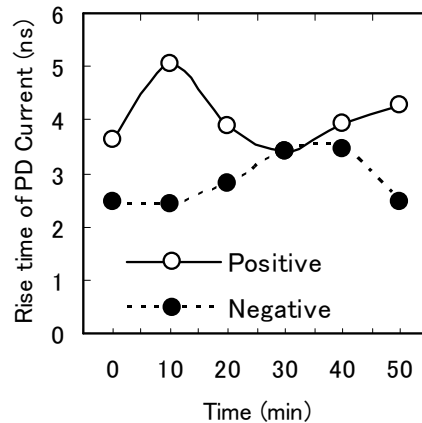


図 3.37 エポキシ樹脂における放電電流の立ち上がり時間

エポキシ樹脂や架橋ポリエチレンで同様の測定を繰り返し、放射電磁波強度を正負の放電極性で比較した。その結果、低い帯域で検出される放射電磁波強度は正極性の方が大きく、高い帯域の電磁波強度は逆に負極性の方が大きくなる傾向が見られた。極性によってこのような傾向が見られる原因は、電流波形の立ち上がり時間が影響していると考えられる。図 3.37 で示した放電電流における立ち上がり時間の推移では、負極性の方が立ち上がり時間は短く急峻になっていた。電流波形が急峻であれば、含まれる周波数成分も高くなることは前述した通りである。この立ち上がり時間の差異によって、負極性では放射電磁波における高周波成分が大きくなったと考えられる。また負極性の電流波形では、電気トリー進展中は立ち上がりが急峻となり、進展速度が低下した $t=30-40$ min では緩やかになっていた。このことから電気トリーの進展速度は、負極性放電の立ち上がり時間と相関があると考えられた。

3. 6 放射電磁波の周波数成分に特徴が見られる要因

部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分において、絶縁材料や放電の極性によって特徴が見られる原因について検討する。部分放電に伴う放射電磁波は、前述したとおり放電電流の微分波形に比例する。また放電電流の波形において、時間変化が最も大きいのは放電発生時の立ち上がり部分である。そのため立ち上がり部分における特徴が、放射電磁波の周波数成分に表れていると推測される。これは 3.4 節で述べた試験において、電界強度が上昇すると電流波形が急峻になるのに伴い、放射電磁波の周波数成分が高くなったことから確認できる。さらに 3.5 節で示した試験結果において、負極性の方が電流波形の立ち上がりは急峻で、高い周波数成分の電磁波強度が大きかった事象とも一致する。

ここで放電電流波形の立ち上がり時間 t_r と放射電磁波の周波数成分の関係について検証を試みる。立ち上がり時間 t_r の波形を測定する際に必要な測定器の周波数帯域は、一般的に(3.2)式で表される⁽¹³⁾。

$$f = 0.35/t_r \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

この(3.2)式に図 3.8～図 3.10 で示した各材料における部分放電電流の立ち上がり時間を当てはめ、周波数を算出したところ表 3.3 のような結果になった。ただし周波数の実測値は、図 3.1 で用いた周波数と同じ値とした。

表 3.3 周波数成分上限の算出結果

	立ち上がり 時間 [ns]	周波数 [MHz]	
		計算	実測
空気	11~14	25~32	20
絶縁油	0.68~0.72	490~510	150
エポキシ	0.7~1.8	190~500	300

これによると、空気の場合は計算値が 30 MHz 前後となるので、実測値と概ね一致する結果となり、放電電流波形の立ち上がり時間と放射電磁波の周波数成分の関係性が示された。

またエポキシ樹脂の場合は計算値が 190MHz～500 MHz と範囲が広がっているが、これは電気トリートの進展有無によって放電電流の立ち上がり時間と放射電磁波の周波数成分が変化するためと考えられる。電気トリートの進展を伴わない低電界時には、放射電磁波の周波数成分は低くなる。しかし高電界時で電気トリートが進展する際には、電流波形の立ち上がりは急峻になり放射電磁波にも高い周波数成分が含まれるようになる。この放電様相の変化が立ち上がり時間の測定結果に表われたと考えられるが、実測結果として記した 300 MHz もこの帯域内であることから、計算値と実測値は概ね一致していると考えられる。

その一方で絶縁油においては、放電電流の立ち上がり時間から計算した周波数と実測値では異なる結果となった。ただし図 3.15～図 3.18 で示したウェーブレット変換結果において、絶縁油中で部分放電が発生した際には放射電磁波に 500 MHz を超える周波数成分が含まれていた。よって立ち上がり時間と周波数成分の関係性は、絶縁油においても他と同様に一致したと考えられる。ただし部分放電発生時の電界強度が低い場合には、放電電流が立ち上がる際に放射される高い周波数帯の電磁波よりも、その後継続して表われる 150

MHz 付近の電磁波の方が波形全体に占める割合が大きい。そのため、周波数スペクトルでは強調される結果になったと考えられる。

放電電流の立ち上がり時間は電子なだれの進展距離と速度によって決まるが⁽⁴⁾、このうち進展距離は平均自由行程に影響される⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。E.O.Forster の研究報告⁽¹⁶⁾によると、放電が発生している際の平均自由行程は気体・液体・固体の物質の三態どの場合でも 5~10 nm となり、材料による差がほとんど無い状態となる。標準気温および気圧下で気体の場合における電子の平均自由行程は 10~30 nm で、液体や固体の平均自由行程は 1~3 分子半径程度の 0.5~2.0 nm であるが、これが電子の衝突によって Tree 状の低密度エリアが形成され、各材料で平均自由行程が同程度になる。これにより、放電時における電子なだれの進展距離は、電子の持つエネルギーに差が無ければ各材質で同程度になると考えられる。

次に、電子なだれの速度は(3.3)式に示す移動度 μ ⁽¹⁷⁾と電界強度との積で求められる⁽¹⁸⁾。

$$\mu = \left(\frac{e\lambda}{m} \right)^{1/2} \cdot E^{-1/2} \dots \dots \dots (3.3)$$

ここで e , λ , m , E はそれぞれ電荷量, 平均自由行程, 電子質量および電界強度を表す。電子質量は定数であるので、電荷量を一定とすると移動度を変化させるパラメータは平均自由行程と電界強度の 2 つになるが、放電発生時の平均自由行程は先ほど述べたとおり各材料で同程度となる。よってパラメータとしては電界強度のみとなり、結果として部分放電の電流波形における立ち上がり時間は、電界強度だけで決定すると推測される。

エポキシ樹脂や架橋ポリエチレン内部で発生する部分放電において、初期のボイド放電は空隙で発生している。そのためパッシェン曲線で表される内圧の影響は受けるが、気中放電と同等の電界が生じていると考えられる。しかし放電が継続することでボイド壁面が浸食され、樹脂の絶縁破壊レベルを上回る高電界が局所的に発生するようになると、電気トリーが進展していき、放射電磁波に高い周波数成分が含まれてくると推測される。これは電気トリーが発生する前のボイド放電では概ね 40~150 MHz の放射電磁波が検出され⁽⁹⁾⁽¹¹⁾、空気中での部分放電の周波数特性と類似していることから推測される。また液体中においても熱によって気泡が発生する場合には、気泡部分で部分放電が発生することからボイド放電と同様で、放射電磁波の周波数成分は比較的低くなると考えられる。しかし欠陥が存在しない場合には、その材料特有の絶縁破壊レベル以上の電界で放電が発生するため、絶縁耐力の大きい材料ほど部分放電の放射電磁波に伴う周波数成分は高くなると考えられる。この様に部分放電の周波数成分は、放電発生時の電界強度によって決定されると分かった。

3. 7 周波数成分の定量的評価

3. 7. 1 測定器による影響確認

部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分は、放電発生時の電界強度によって変化するが、その周波数は放電電流波形の立ち上がり時間から導出できることを前節で述べた。また立ち上がり時間の測定結果から導出した周波数成分は、実測した電磁波の周波数分析結果と概ね一致していることが確認されている。

部分放電は非常に速い現象であり、一般的に立ち上がり時間はマイクロ秒からサブナノ秒となる。そのため部分放電の信号には、GHz 帯の周波数成分が含まれることになる⁽¹⁹⁾。これに対し本研究では、主として 1 GHz 以下の帯域で放射電磁波が検出されているが、これは放電電流波形の立ち上がり時間から導出した結果とも一致している。また本研究における測定結果では、絶縁材料による特徴的な周波数成分を相対的に捉えることが出来ているが、定量的に判断するにはアンテナを含めた測定器の影響についても考慮する必要がある。そこで放射電磁波の周波数成分を定量的に評価するため、これまでより高い周波数帯域を持つオシロスコープ (Tektronix 製 DSA70604, 6.0 GHz) とアンテナ (ETS-LINDGREN 製 3142C, 26-3000 MHz) を用い、同様の試験を実施して測定結果の比較を行った。またウェーブレット変換による周波数解析も実施したが、周波数を解析する範囲の上限は、これまでの 1 GHz から 3 GHz に引き上げている。

図 3.38 と図 3.39 は、空気中の部分放電に伴い放射された電磁波信号をウェーブレット変換した結果であるが、図 3.38 はオシロスコープに DPO7254C (周波数帯域 2.5 GHz) を用い、アンテナに RH707 (周波数帯域 120-900 MHz) を用いた場合の結果である。また図 3.39 はオシロスコープに DSA70604 (周波数帯域 6.0 GHz)、アンテナに 3142C (周波数帯域 26-3000 MHz) を用いた場合の結果であるが、気中放電用の電極に印加した電圧はともに交流 60 Hz で 1,600V であった。周波数特性の異なるアンテナを用いた比較であるため、周波数成分の強弱を比較するには注意が必要であるが、どちらの場合も放射電磁波の主成分は 100 MHz 以下であった。よって測定器の周波数帯域に関係なく、60 Hz の高電界によって空気中で発生する部分放電では、放射電磁波の周波数成分はこれまでに述べたとおり、100 MHz 以下になることが定量的に確認された。

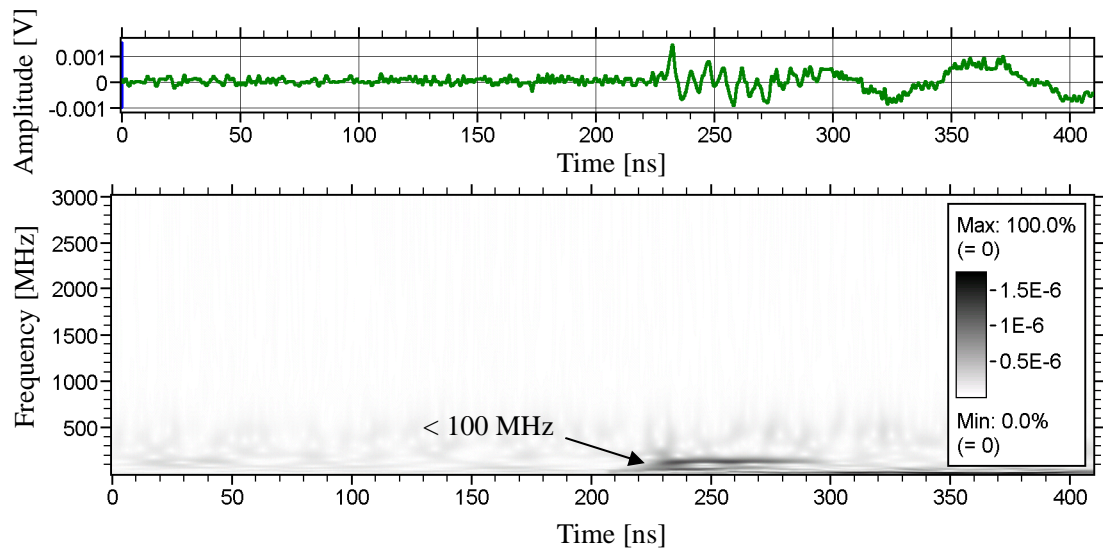


図 3.38 空気中の部分放電（オシロスコープ帯域 2.5 GHz，アンテナ帯域 120-900 MHz）

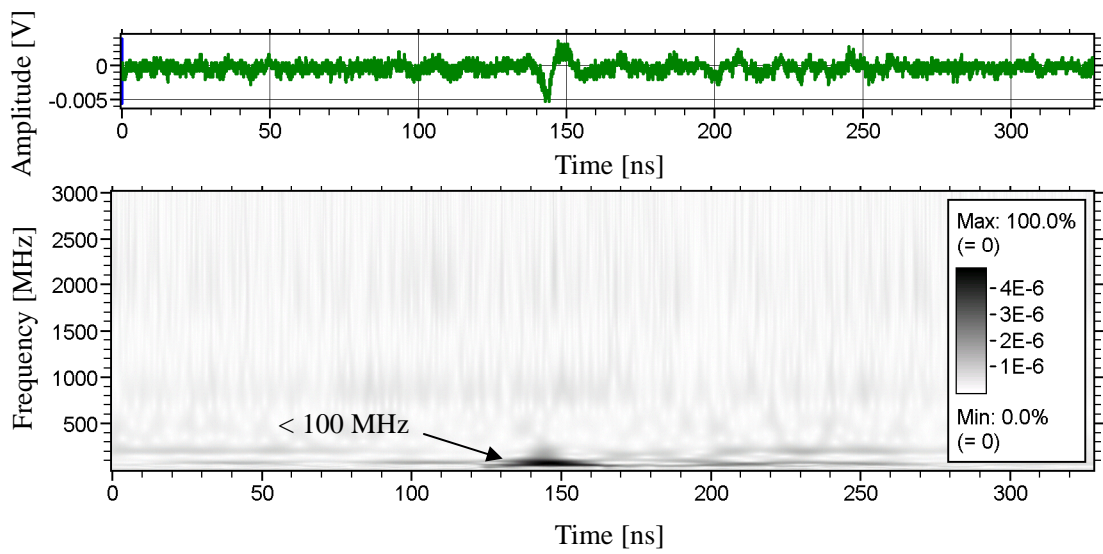


図 3.39 空気中の部分放電（オシロスコープ帯域 6.0 GHz，アンテナ帯域 26-3000 MHz）

次に絶縁油中の部分放電に伴う放射電磁波をウェーブレット変換した結果を図 3.40 と図 3.41 に示す。これらは使用したアンテナがどちらも RH707（周波数帯域 120-900 MHz）であったが、オシロスコープが DPO7254C（周波数帯域 2.5 GHz）と DSA70604（周波数帯域 6.0 GHz）で異なっている。また印加電圧は図 3.40 の場合が 7,600 V で、図 3.41 の場合は 8,000 V で若干異なっているが同程度の 60Hz 交流電圧を印加している。これらを比較すると、表示している時間軸のスケールが異なるので一見すると周波数様相が異なって見えるが、どちらも部分放電発生時に 800 MHz 程度を主とした周波数成分が検出されている。

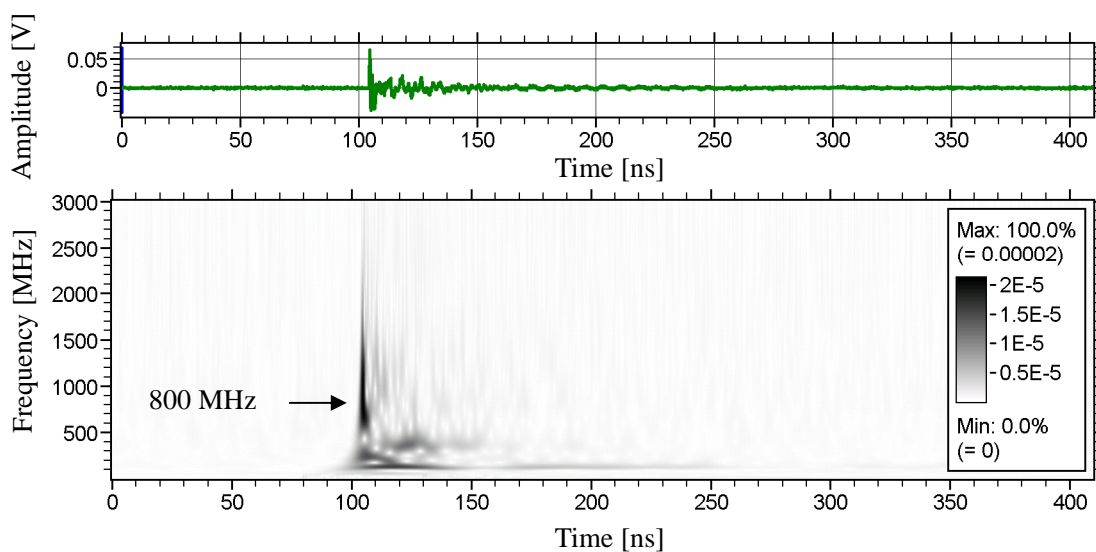


図 3.40 絶縁油中の部分放電（オシロスコープ帯域 2.5 GHz，アンテナ帯域 120-900 MHz）

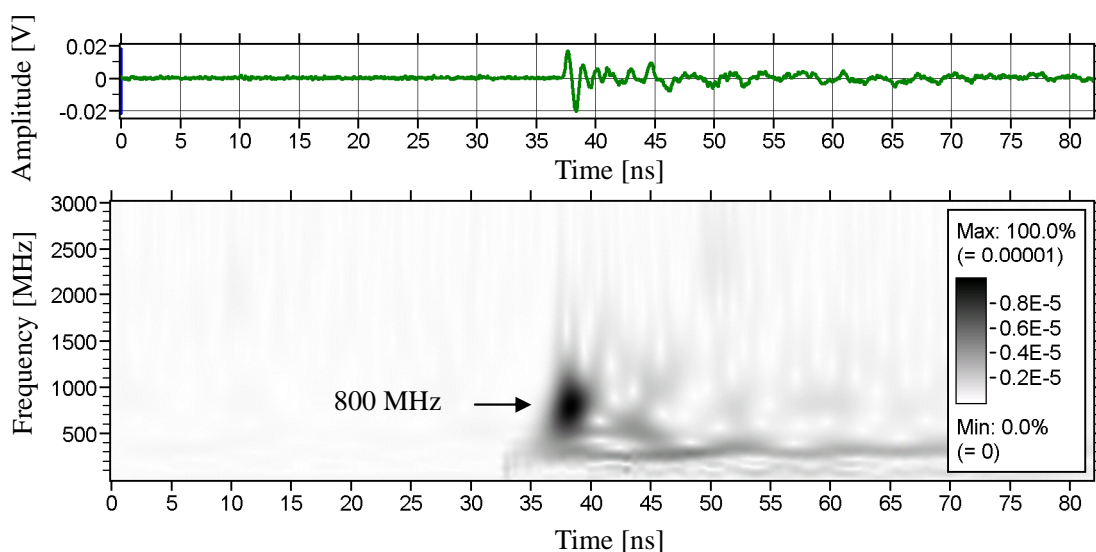


図 3.41 絶縁油中の部分放電（オシロスコープ帯域 6.0 GHz，アンテナ帯域 120-900 MHz）

また図 3.42 は図 3.41 で示した放射電磁波に対し、オシロスコープは同じ DSA70604（周波数帯域 6.0 GHz）を用い、アンテナに 3142C（周波数帯域 26-3000 MHz）を用いて同時測定した結果である。図 3.41 と図 3.42 を比較すると、放電発生時に検出された放射電磁波の周波数成分が異なっており、RH707（周波数帯域 120-900 MHz）を用いた時は 800 MHz 程度であったのに対し 3142C（周波数帯域 26-3000 MHz）を用いた時には 1,250 MHz 程度となった。この様にアンテナの周波数帯域が高くなることで、検出される電磁波の周波数成分も高くなることが示された。さらに広帯域の測定が出来る電圧プローブ（Tektronix 製 P7380A, 8GHz）とオシロスコープ DSA70604（周波数帯域 6.0 GHz）を用い、併せて放電電流波形の立ち上がり時間を測定したところ、DPO7254C（周波数帯域 2.5 GHz）と TAP2500（周波数帯域 2.5 GHz）を用いて測定した場合に比べ、立ち上がり時間が 50%程度短くなることを確認した。絶縁油中で発生する部分放電では、測定器の周波数帯域が広帯域になることで、測定結果も高周波側に変化することから、放射電磁波の周波数成分は測定器の影響を受けている可能性が高い。そのため絶縁油中の部分放電に伴い放射される電磁波には、GHz 帯の周波数成分が実際には含まれていると推測される。

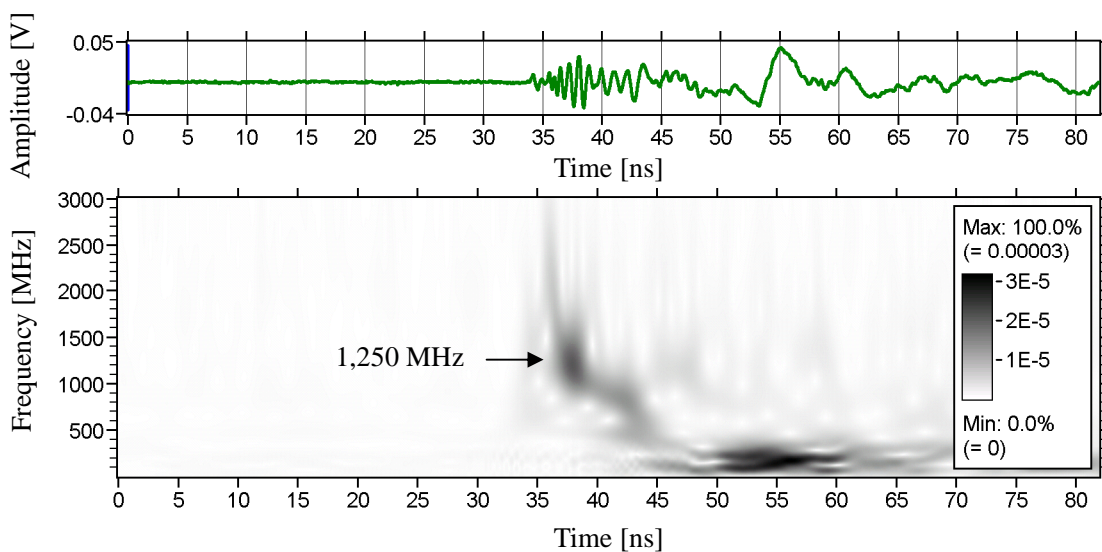


図 3.42 絶縁油中の部分放電（オシロスコープ帯域 6.0 GHz，アンテナ帯域 26-3000 MHz）

次にエポキシ樹脂の場合における測定結果を図 3.43 と図 3.44 に示すが、図 3.43 はオシロスコープに DPO7254C (周波数帯域 2.5 GHz), アンテナに RH707 (周波数帯域 120-900 MHz) を用いた場合の結果である。一方の図 3.44 はオシロスコープに DSA70604 (周波数帯域 6.0 GHz) を用い、アンテナに 3142C (周波数帯域 26-3000 MHz) を用いた場合の結果である。なおエポキシ樹脂への印加電圧は、どちらも 5,100 V であった。時間軸のスケールが異なっている点に注意が必要であるが、これらを比較すると放電発生時に強く検出される周波数成分は 400 MHz もしくは 300 MHz 程度であり、同等の帯域であることが分かる。

また図 3.45 にポリエチレンの部分放電に伴う放射電磁波をウェーブレット変換した結果を示すが、放電発生時にはエポキシ樹脂の場合と同様に 400 MHz 付近の周波数成分が強く検出されていた。ただしこれはオシロスコープに DSA70604 (周波数帯域 6.0 GHz) を用い、アンテナには 3142C (周波数帯域 26-3000 MHz) を用いた結果である。

以上の結果から、本論文で述べたエポキシ樹脂もしくはポリエチレンといった固体絶縁材料における周波数成分の特徴は、測定器の影響を受けていなかったことが示され、300 ~ 400 MHz といった帯域であることを定量的に示すことができたと考える。

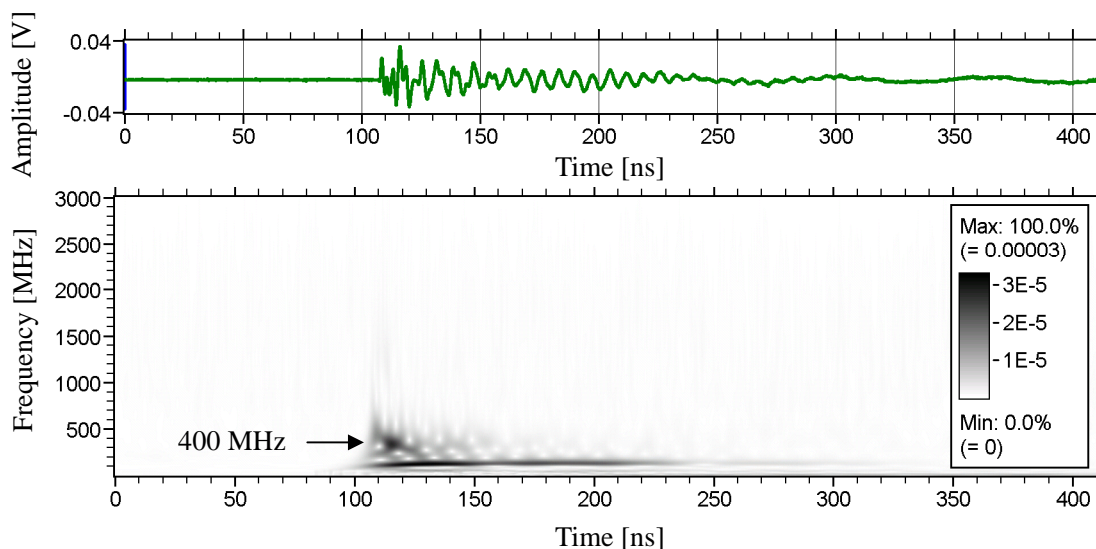


図 3.43 エポキシ樹脂中の部分放電 (オシロスコープ帯域 2.5 GHz, アンテナ帯域 120-900 MHz)

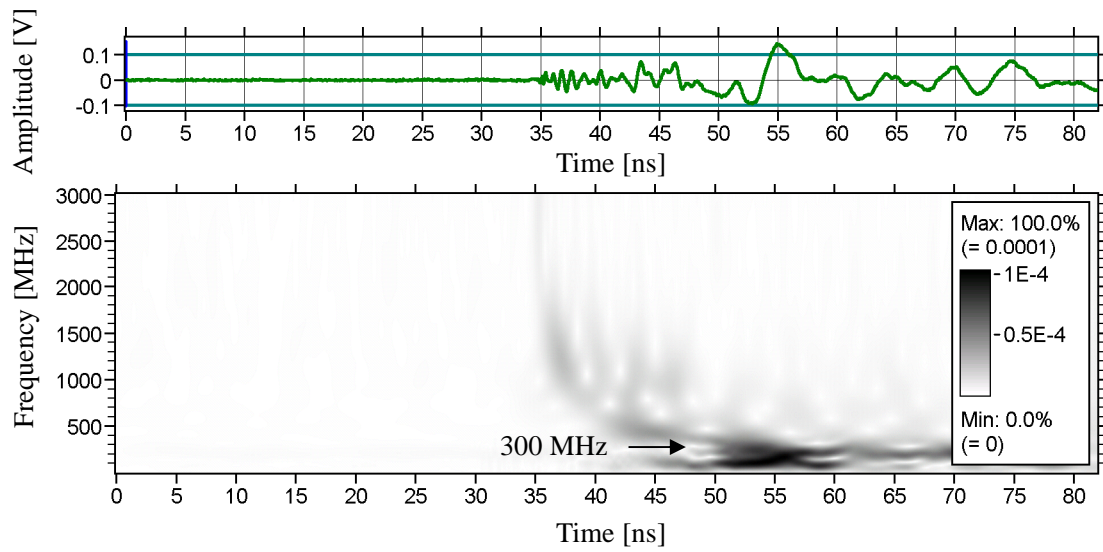


図 3.44 エポキシ樹脂中の部分放電 (オシロスコープ帯域 6.0 GHz,
アンテナ帯域 26-3000 MHz)

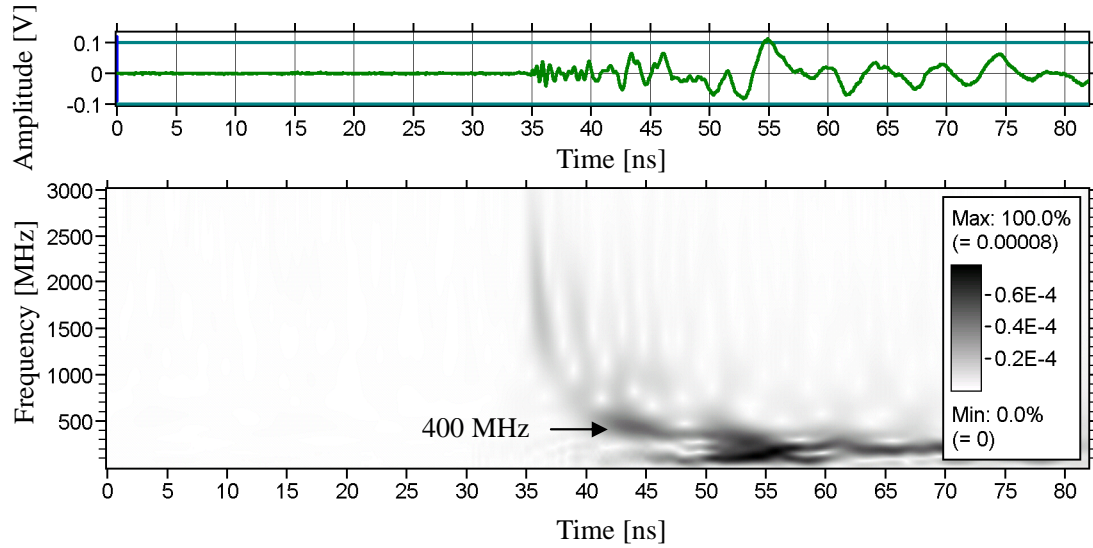


図 3.45 ポリエチレン中の部分放電 (オシロスコープ帯域 6.0 GHz,
アンテナ帯域 26-3000 MHz)

3. 7. 2 電源電圧の周波数による影響確認

本研究の目的は前述したように、商用周波数で運用されている電力設備への絶縁劣化診断技術の向上である。そのため、これまでの検証試験で部分放電の発生には、関西圏の商用周波数である 60 Hz の電圧を用いてきた。しかし東日本では商用周波数が 50 Hz となり、条件が異なっている。電圧の周波数が異なると、電圧レベルが同じであっても変化率は異なるため、電子なだれに何らかの影響を与える可能性が考えられた。そこで確認として、60 Hz とは異なる周波数の電圧を電極に印加して、部分放電の周波数成分がどのように変化するかを検証した。ただし変化を顕著に現すため、比較に用いた電圧の周波数には 60 Hz とは大きく異なる 999.9 Hz を選定した。

試験回路を図 3.46 に示すが、印加電圧が 60 Hz の場合は計器用変圧器（三菱電機製、22 kV/130 V）を昇圧トランスとして使い、スライダックで調整した電圧を入力して高電圧を発生させた。また 999.9 Hz の場合は 1000 Hz 用の高周波高圧トランス（玉置電子工業製 60 kVp-p,1000 Hz）を用い、低圧側に高機能安定化電源（菊水電子工業製 PCR4000LE, 1~999.9 Hz）でレベル調整した 999.9 Hz の電圧を入力し、放電発生源に高電圧を印加した。

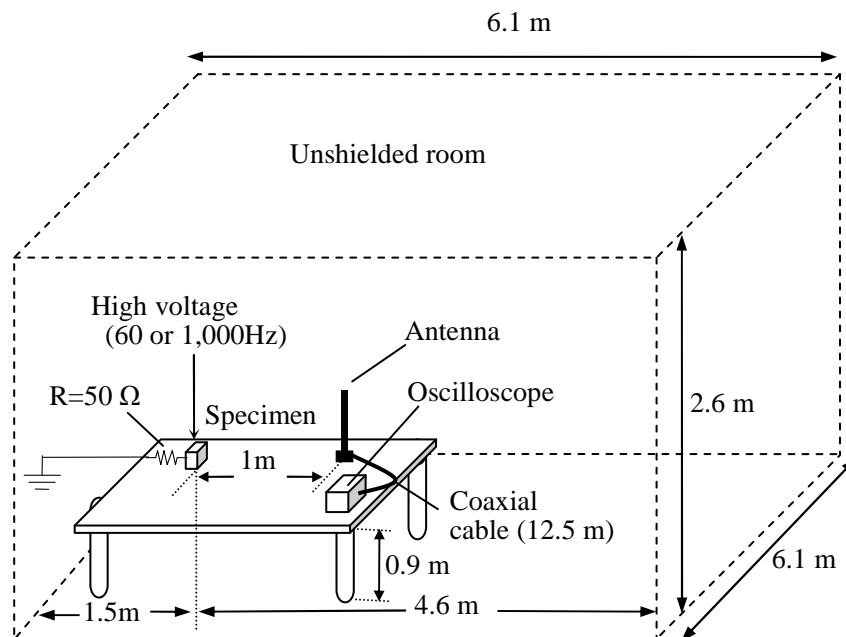


図 3.46 電圧周波数による影響確認用の部分放電測定回路

放電発生源に図 2.8 として前述した針-平板電極を用い、1,700 V~6,800V の電圧を印加して空気中で部分放電を発生させた。そしてその際に放射された電磁波を、小型モービル

アンテナ（第一電波工業性 RH707, 120-900 MHz）とデジタルオシロスコープ（Tektronix 製 DPO7254C, 2.5 GHz）で測定した。得られた波形をウェーブレット変換した結果を図 3.47～図 3.54 に示すが，図 3.47～図 3.50 は印加電圧の周波数が 60 Hz の場合である。また図 3.51～図 3.54 は，印加電圧の周波数が 999.9Hz の場合の分析結果例である。

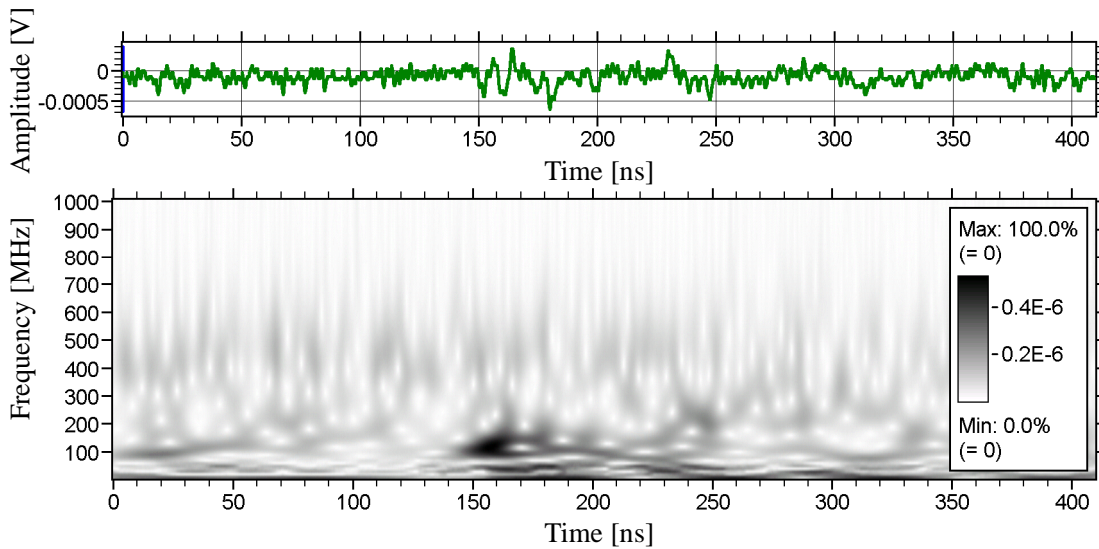


図 3.47 空気中の部分放電に伴う放射電磁波（60 Hz，1,700 V 印加）

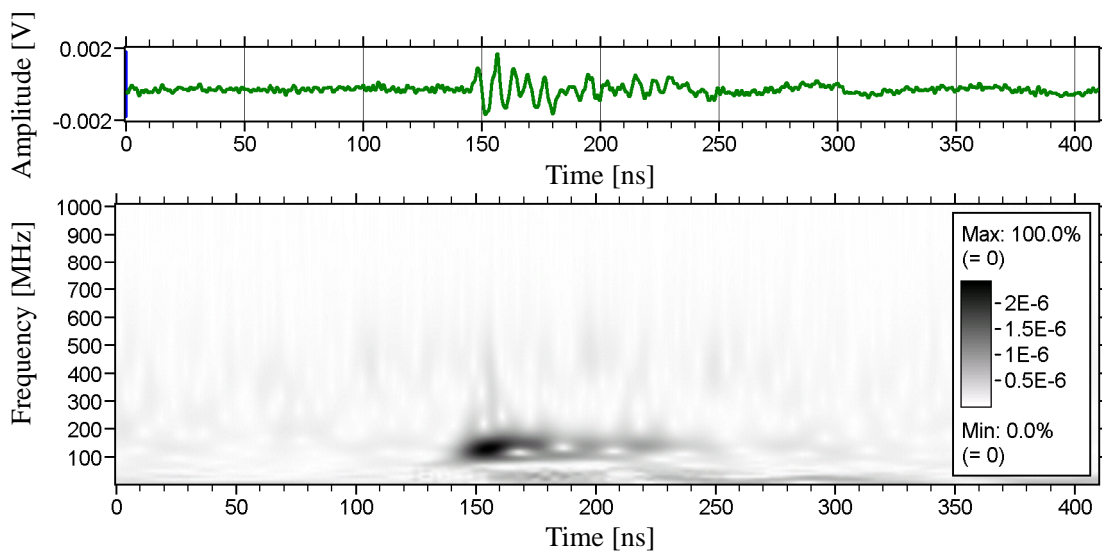


図 3.48 空気中の部分放電に伴う放射電磁波（60 Hz，3,400 V 印加）

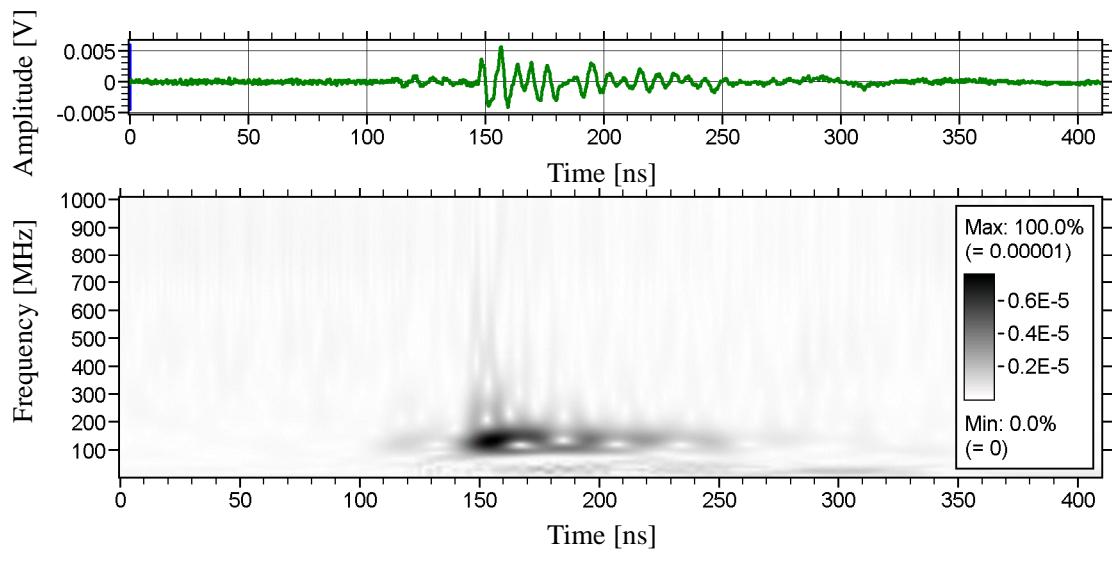


図 3.49 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (60 Hz, 5,100 V 印加)

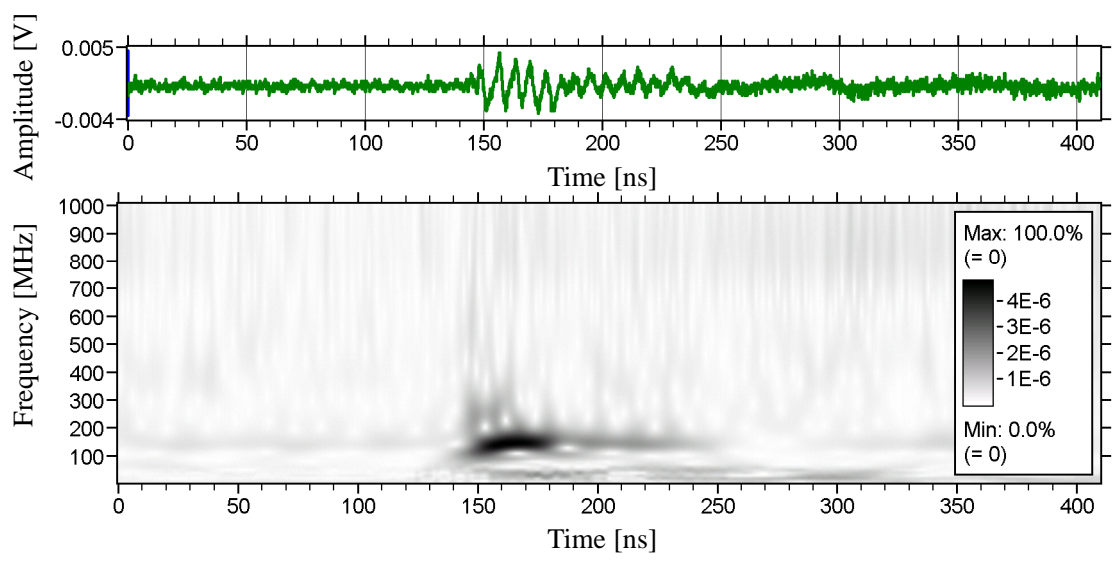


図 3.50 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (60 Hz, 6,800 V 印加)

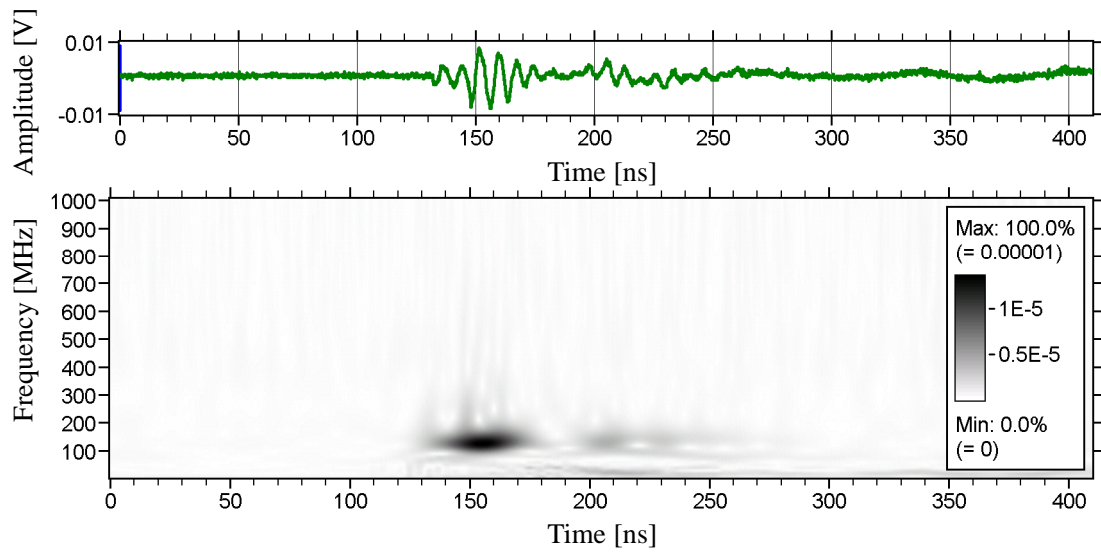


図 3.51 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (999.9 Hz, 1,700 V 印加)

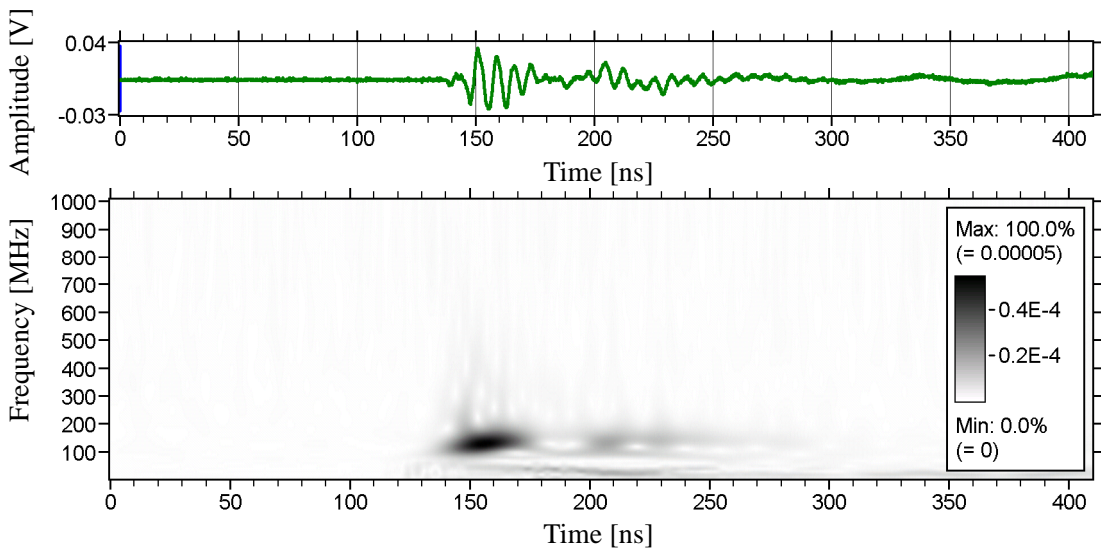


図 3.52 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (999.9 Hz, 3,400 V 印加)

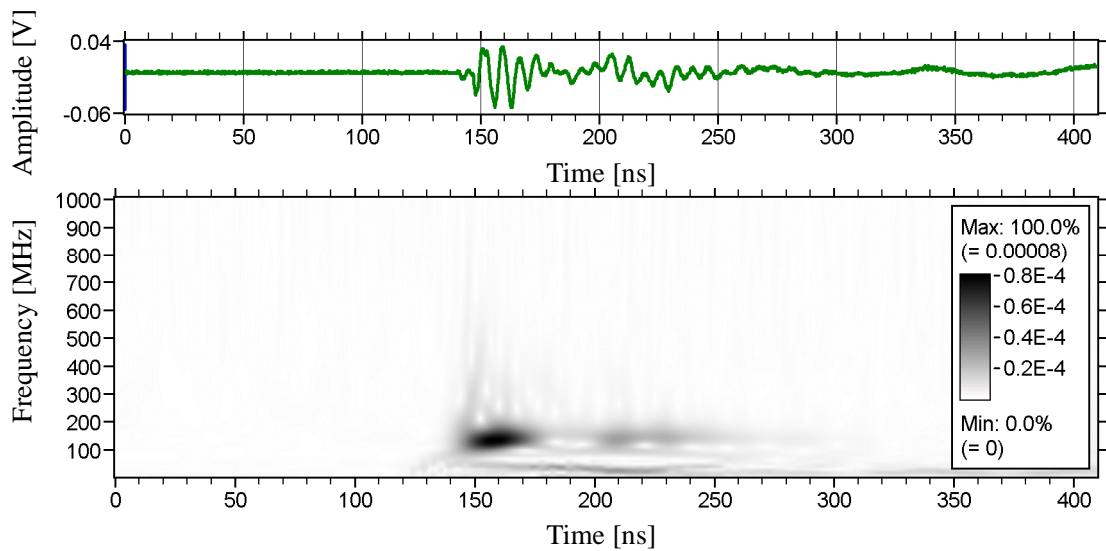


図 3.53 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (999.9 Hz, 5,100 V 印加)

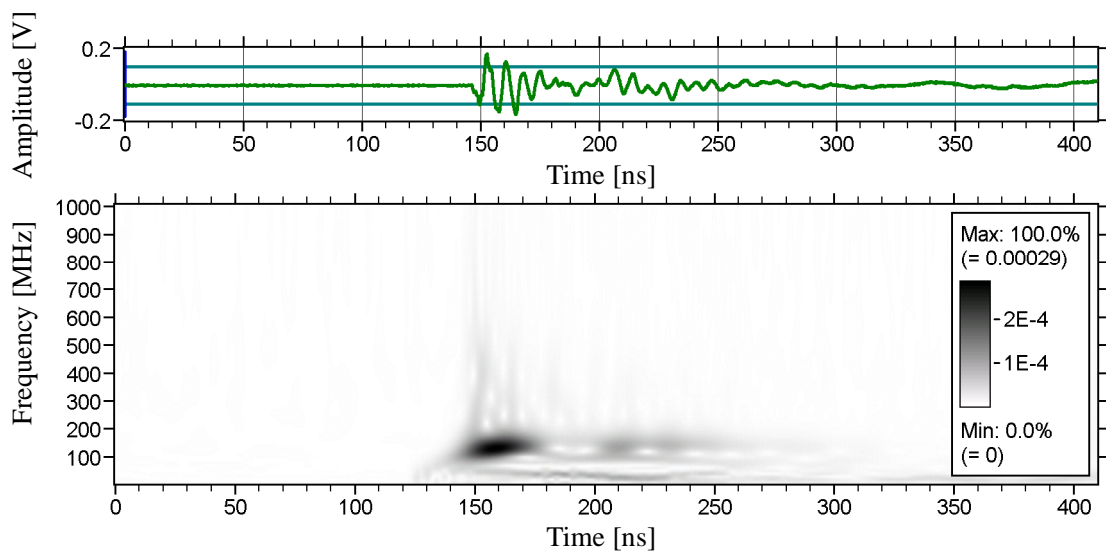


図 3.54 空気中の部分放電に伴う放射電磁波 (999.9 Hz, 6,800 V 印加)

これらの結果を見ると、印加電圧の周波数を 60 Hz から 999.9 Hz に変更しても放射電磁波の周波数成分に差異が見られないことが分かる。また同様の試験を絶縁油およびエポキシ樹脂でも実施したが、どの場合でも、印加電圧の周波数によって放射電磁波の周波数成分は変化しなかった。以上の結果から放射電磁波の周波数成分は、部分放電発生時の電界強度では変化するが、周波数には依存しないものと推測される。

文 献

- (1) 雨谷昭弘：「ガス絶縁ケーブルにおけるサージ伝搬特性」，電学論 B, Vol.101, No.8, pp.491-497 (1981)
- (2) 藤原修：「静電気放電の発生電磁界と F D T D シミュレーション」，信学論(B), Vol.J94-B, No.11, pp.1452-1460 (2011)
- (3) I.Herbst, R.Pietsch: “Fast and Slow Signal Components of Partial Discharges in SF₆ Measurements of the Electron and Ion Contributions to PD-Signal” ,Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.283-287 (1994)
- (4) H.Okubo, N.Hayakawa and A.Matsushita: “The Relationship Between Partial Discharge Current Pulse Waveforms and Physical Mechanisms” , IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.18, No.3, pp.38-45 (2002)
- (5) 石田春雄, 本田昌人, 木村千秋, 上田克彦：「ポリエチレンのトリーの進展と部分放電について」，電学論 A, Vol.92, No.7, pp.317-326 (1972)
- (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ー発生条件」，電学論 A, Vol.106, No.4, pp.164-170 (1986)
- (7) 林宗明, 安藤順夫：「火花放電および絶縁破壊の成立条件」，電学誌, Vol.86, No.929, pp.298-306 (1966)
- (8) かねでんエンジニアリング, サンオームオイル MU 製品カタログ
- (9) H.Ueno, Y.Kuroishi and Y.Hashiba, “Detection of Partial Discharge and Electrical Tree Development in Solid Dielectric Insulators by Radiated Electro-Magnetic Waves.”, Proc. XVII International Symposium on High Voltage Engineering, F-034 (2011)
- (10) 黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也：「固体絶縁材料中の部分放電による放射電磁波特性の極性変化」，電気学会放電研究会資料, ED-11-77, pp.25-30 (2011)
- (11) 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ー伸展と放射電磁波」，電学論 A, Vol.129, No.12, pp.915-921 (2009)
- (12) 牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人：「エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発」，電学論 B, Vol.131, No.8, pp.687-692 (2011)
- (13) KEITHLEY：「高感度測定ハンドブック 第6版」 (2004)
- (14) 電気学会放電ハンドブック出版委員会：「放電ハンドブック」 (2003)
- (15) 豊田裕之, 溝渕隆, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦：「ストリーマ進展モデルと等

- 面積則による V-t 特性の推定」, 電学論 A, Vol.126, No.8, pp.789-794 (2006)
- (16) E. O. Forster: “The Search for Universal Features of Electrical Breakdown in Solids, Liquids and Gases”, IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol.17, No.6, pp.517-521 (1982)
- (17) 吉村昇, 西田真, 藤田成隆, 能登文敏, 田村昌靖: 「衝撃電圧によるアルミナ充てんエポキシ樹脂の絶縁破壊特性」, 電学論 A, Vol.101, No.11, pp.567-574 (1981)
- (18) 水谷照吉: 「高分子絶縁材料の高電界電気伝導と絶縁破壊研究の現状と課題」 電学論 A, Vol.112, No3, pp.166-172 (1992)
- (19) G.Robles, J.M.Martinez-Tarifa, M.V.Rojas-Moreno, R.Albarracin and J.Ardila-Rey: “Antenna selection and frequency response study for UHF detection of partial discharges”, Conference Record of the 2012 IEEE Int. Conf. on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC), pp.1496-1499 (2012)

第4章 油入りブッシングの内部部分放電診断手法 の開発

4.1 はじめに

機器やケーブル内に異物やボイド等の欠陥が存在すると、部分放電が発生し故障や事故の原因になる。部分放電は光、音波、放電電流、放射電磁波等の様々な物理現象を伴うため、多くの検出方式が提案されているが⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾、このうち放射電磁波を検出する方法は広範囲の場所を一度に測定でき、放電発生箇所の特特定が可能といった利点から特に有効な手法と考えられる。しかし放射電磁波の検出に関しては、ガス絶縁機器を対象とした研究報告⁽²⁾⁽³⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が幾つか見られるのに比べ、筆者の調べた限りでは油絶縁機器を対象としたものは少ない。

油絶縁機器の診断には油中ガス分析が一般的であるが、油入りブッシングを診断する場合には採油時に停電が必要となり、診断実施が困難なことがある。しかし関西電力をはじめとする電力会社の変電所において、油入りブッシングの絶縁破壊による事故が発生しており、ブッシングに対する診断技術の確立が望まれている。

事故が発生したブッシングを解体し、その原因を解明する調査が電力会社によって行われたが、事故の発生要因としては水分の混入や、絶縁部材の劣化により発生した部分放電が進展することで事故に至ったと推測されている。そのため油入りブッシング内で発生する部分放電を伴った不具合は、何か発端があってから即事故へと至るわけではないので、定期的な内部診断等で予防は可能と考えられる。

そこで筆者らは、油入りブッシング内部で発生する部分放電の放射電磁波を検出し、ブッシング内部の絶縁劣化を診断する新しい手法を開発した。この手法は第2章や第3章で得られた研究成果を活用したものであり、検出される電磁波に絶縁油特有の周波数成分が含まれるか否かによって放電発生箇所が識別できる。つまり、部分放電が油入りブッシングの内部で発生しているのか、もしくは沿面で発生しているのかの判別が可能となった。また放射電磁波の検出にはアンテナを用いるため、対象ブッシングを非接触かつ無停電で診断できるようになった。

部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分に着目することで、従来手法とは全く異なる新しい油入りブッシング用の絶縁劣化診断手法を開発することができたので、本章ではその内容について説明する。

4. 2 油入りブッシングの内部部分放電診断手法

4. 2. 1 実器撤去品による測定試験

A変電所から撤去してきた 154 kV/77 kV 変圧器 2 次側の油入りブッシングに課電し、部分放電に伴う放射電磁波を測定する試験を試験室で実施した。使用されたこのブッシングは、変電所での実運用中に部分放電が原因と思われる電磁波が検出されたものであり、測定回路および測定風景写真を図 4.1～図 4.2 に示す。フランジ部分にボルトで接地線を接続し、この接地線に直列接続した抵抗素子に電圧プローブ（横河電機製 700988, 400MHz）を装着して部分放電電流を検出している。検出された電流の波形は、オシロスコープ（Tektronix 製 TDS3054B, 500MHz）で測定を行った。またアンテナ（第一電波工業製 D220, 周波数帯域 100～1600MHz）を用いて放射電磁波を測定したが、放電電流と電磁波の発生が同期していることを確認しながら試験を実施した。

アンテナの受信電圧波形を高速フーリエ変換した結果の一例を図 4.3 に示すが、第 2 章で示した絶縁油中における部分放電の周波数スペクトルと同様に、150 MHz 付近に特徴的な周波数成分が含まれることを確認した。

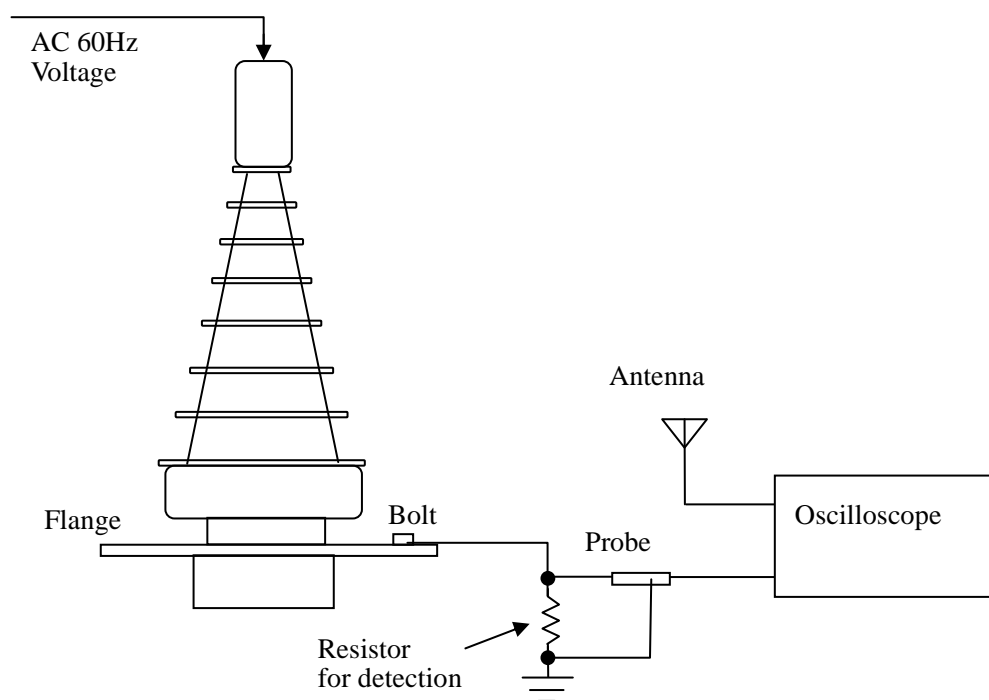


図 4.1 油入りブッシング除却品を用いた試験回路



図 4.2 油入りブッシング除却品を用いた試験回路風景

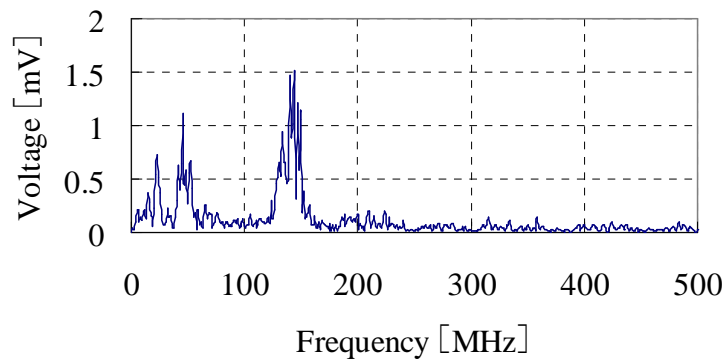


図 4.3 油入りブッシング除却品からの放射電磁波周波数スペクトル

また試験で用いた油入りブッシングでは、印加電圧が一定であっても様々な電荷量の部分放電が発生していた。そのうち電荷量が 400 pC, 2000 pC, 5000 pC の部分放電による放射電磁波のデータを抽出し、それぞれ高速フーリエ変換した結果を図 4.4 に示す。ただし放射電磁波の周波数スペクトルは、それぞれ最大値で規格化している。電荷量の増加に伴

い放射電磁波の強度は上昇していたが、この図から分かるように周波数スペクトルの様相にほとんど変化は無かった。これは前章で得た知見から判断すると、印加電圧が一定であったために周波数成分の差異が見られなかったと考えられる。なおこれらのスペクトル中に見られる 40 MHz 付近の周波数成分は、パルス発生後の振動成分によるものと考えられ、140 MHz 付近のスペクトルが絶縁油中の部分放電における特徴である。また電磁波強度の距離減衰特性もこの測定試験で併せて把握しており、放電発生箇所が特定されれば、逆算により任意の発生箇所における放電電荷量も推定できる。

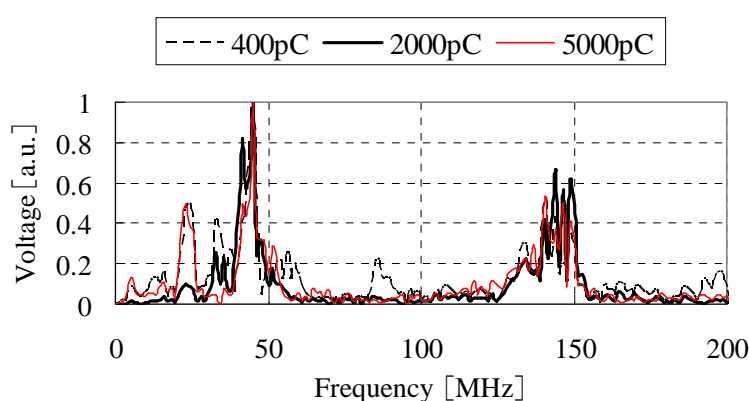


図 4.4 電荷量による周波数スペクトルの比較

以上の結果から、部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分に着目すれば、気中で発生する架線等のノイズから油入りブッシング内部の放電を識別でき、放電電荷量の推定も可能であることを示した。

4. 2. 2 油入りブッシングの診断フロー

各種試験結果をもとに、考案された油入りブッシングに対する診断の業務フローを図 4.5 に示すが、この診断フロー実行のために「簡易型部分放電診断⁽¹²⁾」と「精密型部分放電診断⁽¹³⁾」の 2 種類の診断手法を開発している。診断の第 1 段階では、簡易型部分放電診断により部分放電に伴う放射電磁波を検出し、油中放電の特徴である 150 MHz 帯に周波数成分が含まれているか否かを判断する。ここで検出された電磁波が油中放電によるものと判断されれば、第 2 段階として精密型部分放電診断を行い、部分放電の発生箇所を標定するとともに放電電荷量の推定を行う。油入りブッシング内部における部分放電電荷量の異常レベルは 10,000 pC 以上⁽¹⁴⁾であるので、このレベルを超える部分放電が発生していると判定されれば、油中ガス分析等で部分放電の発生を再確認した上で対策が検討される。なお、

放電電荷量がそれ以下の場合でも、トレンド監視の結果を見て必要に応じ対策を講じることになる。

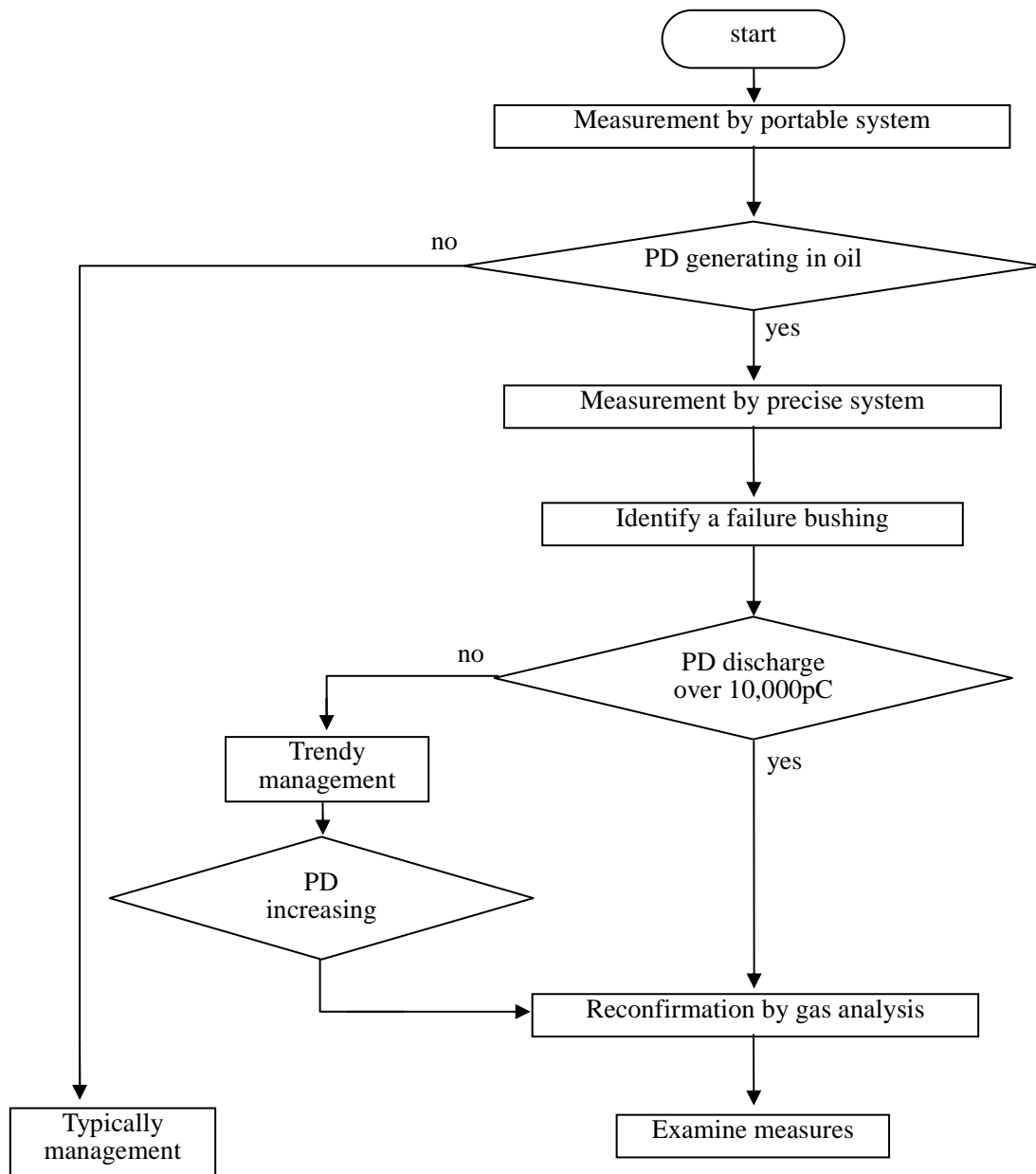


図 4.5 油入りブッシングの診断フロー

4. 2. 3 簡易型部分放電診断

油中放電の発生有無について判定することを目的に開発された、簡易型部分放電診断手法についてまず説明する。この手法は、小型で持ち運びが容易なアンテナ（第一電波工業性 RH707, 120-900 MHz）と、バッテリー駆動が可能なデジタルオシロスコープ（Tektronix 製 TDS3054C, 500 MHz）を組み合わせ、部分放電に伴う放射電磁波を測定するものである。アンテナの受信電圧波形を高速フーリエ変換した結果をデジタルオシロスコープの画面に表示させ、油中放電に特有の周波数成分が含まれているか否かを画面に表示された周波数スペクトルを見て判断する。また部分放電と推測される電磁波が検出された場合、電磁波の強度は距離が離れると減衰することから、対象機器からの距離によってアンテナの受信電圧レベルが変動するかも確認する。これにより、部分放電がその機器で発生しているか否かを大まかに判断することが出来る。図 4.6 および図 4.7 に診断時の風景写真とデジタルオシロスコープでの測定画面の一例を示す。



図 4.6 簡易型部分放電診断の作業風景写真

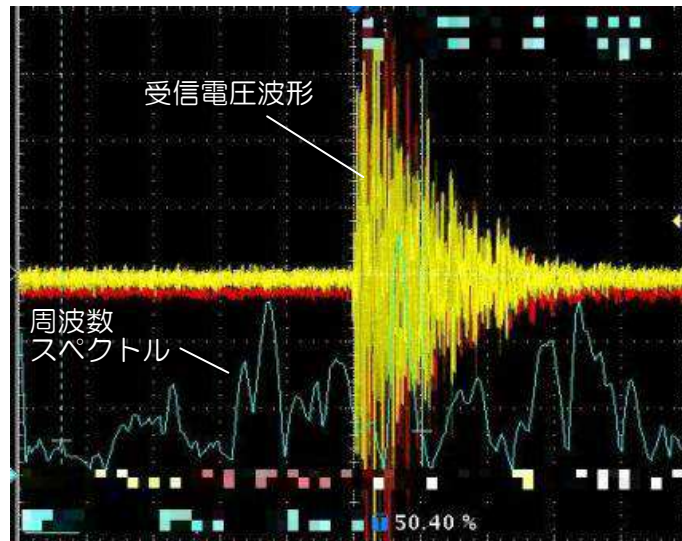


図 4.7 簡易型部分放電診断の測定画面例

4. 2. 4 精密型部分放電診断

次に、部分放電発生箇所の標定および放電電荷量の推定を目的に開発された、精密型部分放電診断手法について説明する。これは 150 MHz 帯に周波数特性を合わせた専用のアンテナ計 4 本とデジタルオシロスコープ（Tektronix 製 TDS3054C, 500 MHz）を用い、部分放電の放射電磁波を同時測定し、図 4.8 で示すような信号の到達時間差から放電発生箇所を標定する手法である。なお、オシロスコープに入力される信号の時間差を正確に捉える必要があるため、アンテナとオシロスコープ間の接続に用いる同軸ケーブルは同じ長さに揃えられている。

平面上の 2 定点からの距離差が一定値である点全体の集まりは双曲線となるが、位置標定にはこの双曲線の原理を適用する。図 4.9 に示すように、1 対のアンテナへの放射電磁波の到達時間差が一定となる点は 1 つの双曲線上に位置しており、2 対のアンテナによる双曲線の交点を放電発生箇所とするものである。なお到達時間差と放電発生箇所の関係は、(4.1)式および(4.2)式を解くことで(4.3)式および(4.4)式のように表されるが⁽¹⁵⁾、この原理を応用して 3 次元で位置標定を行っている。

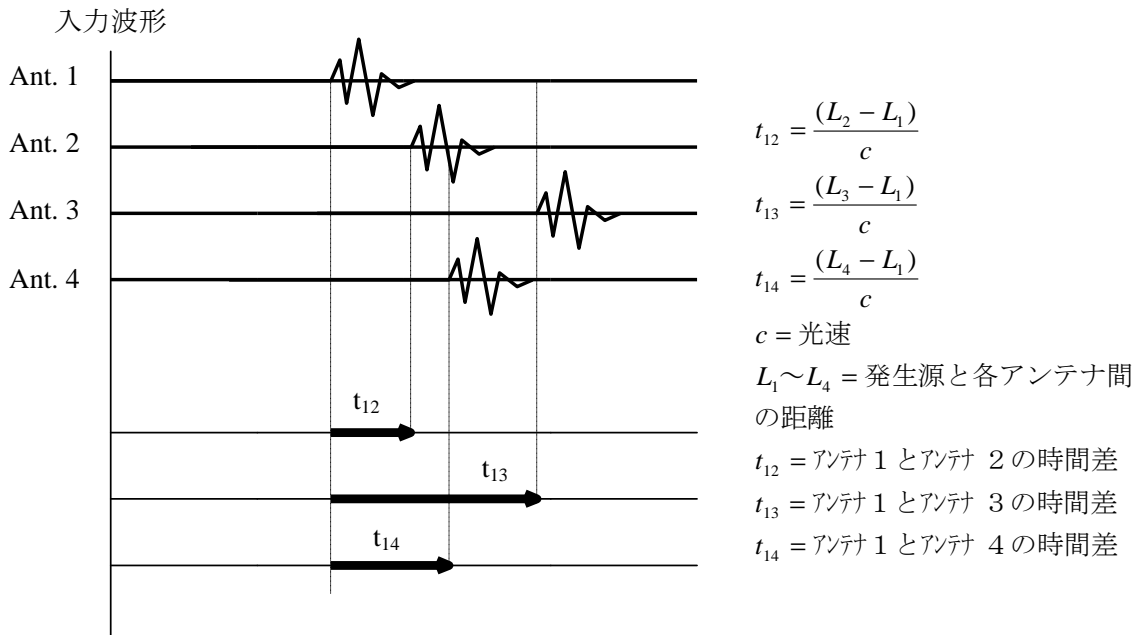


図 4.8 信号の到達時間差

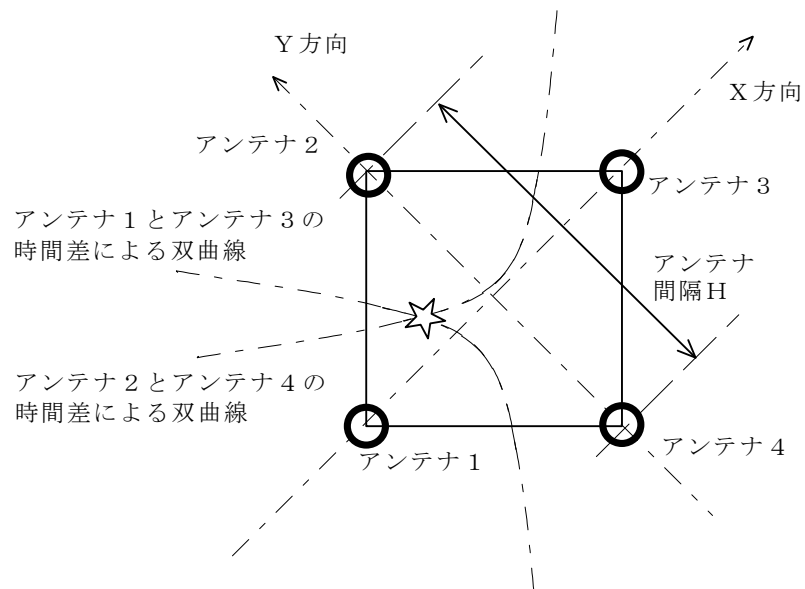


図 4.9 双曲線法の概要

$$1 = \frac{X^2}{\left(\frac{CT_{13}}{2}\right)^2} + \frac{Y^2}{\left(\frac{CT_{13}}{2}\right)^2 - H^2} \dots \dots \dots (4.1)$$

$$1 = \frac{X^2}{\left(\frac{CT_{24}}{2}\right)^2 - H^2} + \frac{Y^2}{\left(\frac{CT_{24}}{2}\right)^2} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$X = \pm \frac{1}{4} CT_{13} \sqrt{\frac{16H^4 - 4C^2H^2T_{13}^2 + C^4T_{13}^2T_{24}^2 - C^4T_{24}^4}{4H^4 - C^2H^2T_{13}^2 - C^2H^2T_{24}^2}} \dots \dots \dots (4.3)$$

$$Y = \pm \frac{1}{4} CT_{24} \sqrt{\frac{16H^4 - 4C^2H^2T_{24}^2 + C^4T_{13}^2T_{24}^2 - C^4T_{13}^4}{4H^4 - C^2H^2T_{13}^2 - C^2H^2T_{24}^2}} \dots \dots \dots (4.4)$$

ただし X と Y は発生源の座標であり、 C は光速である。また T_{13} および T_{24} は、それぞれアンテナ 1 と 3 ならびにアンテナ 2 と 4 の時間差である。さらに H はアンテナの間隔を表している。

発生源の位置を特定する場合に重要である各アンテナ間の時間差は、図 4.10 に示す電磁波空間位相差法⁽¹⁶⁾によって求めている。電磁波空間位相差法は、部分放電発生源から放射される電磁波を複数本のアンテナによって任意の時間幅で受信した際の、空間周波数領域における位相差、すなわち空間位相差を求めることで時間差を求める手法である。

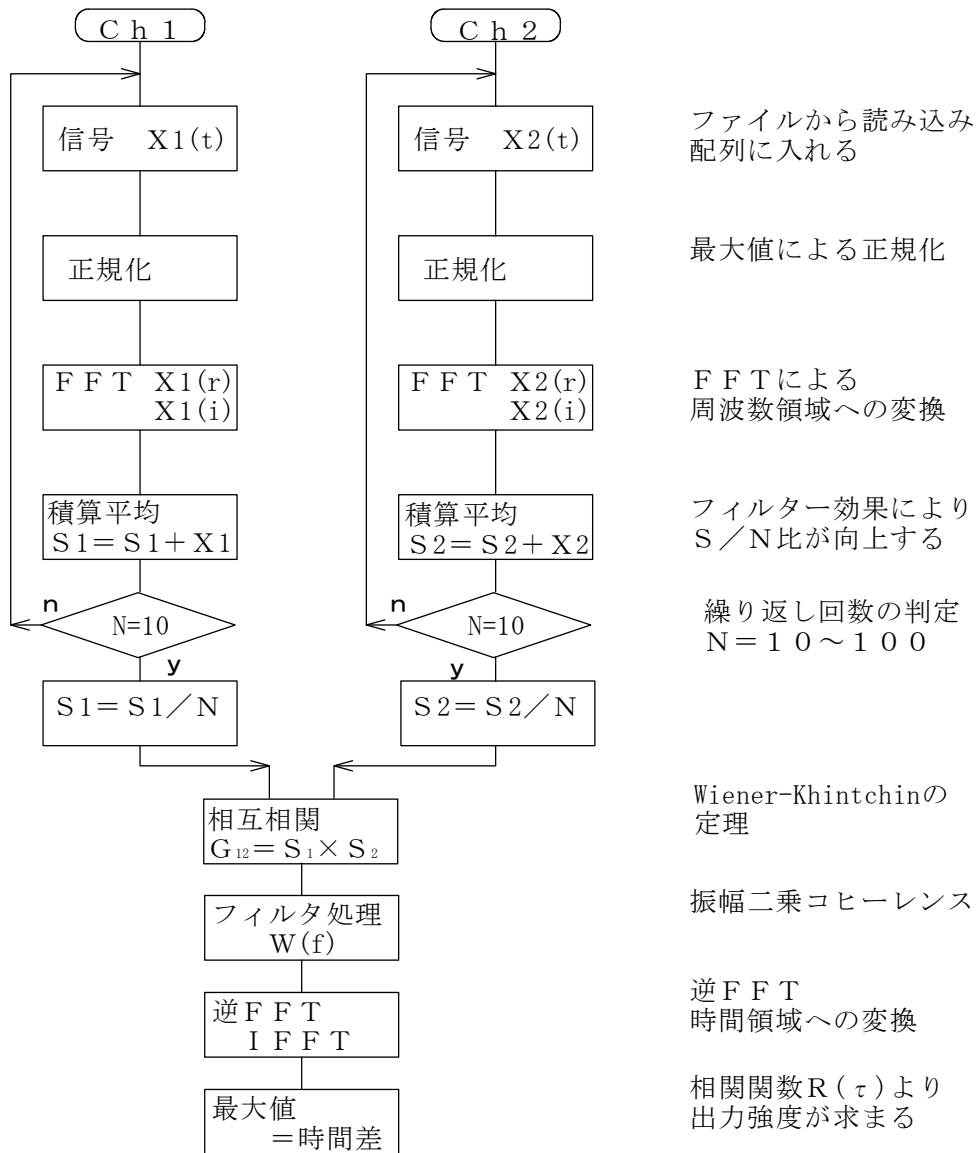


図 4.10 電磁波空間位相差法概要

アンテナにより受信された2つの信号は標準化され、高速フーリエ変換により周波数領域に変換される。そして周波数領域での相関関係を求めるが、その際には適応フィルタを通過させる。一方、放射される電磁波信号の空間位相差の相対性を考慮すると、放射源が移動しない場合、放射電磁波の2つのアンテナへの到達時間差は不変である。すなわち、「到達位相差(時間差)信号」が同期性を持つことになる。よって、ランダム性のある背景雑音を有効に抑制する平均加算(Ensemble Average)法を用いることが可能となり、上記の処理に対して平均加算法をデータ数分だけ繰り返す。この処理によって高いS/N比が実現さ

れ、微小信号の検出が可能となる。そしてフーリエ逆変換によって相関関数を時間領域に変換し、アンテナ間の到達時間差を求める。なお、この処理を2対のアンテナに対し行うことで、部分放電の発生位置を求めることが可能となる。

また前述の測定試験によって導出した電磁波強度と放電電荷量の関係式を用い、放電電荷量もアンテナの受信電圧から推定可能であるが、これらはデジタルオシロスコープと GPIB インターフェースで接続したノートパソコン内の専用プログラムにより導出される。

開発した精密型部分放電診断手法の専用プログラム画面と、診断実施時の風景写真を図 4.11 と図 4.12 に示す。

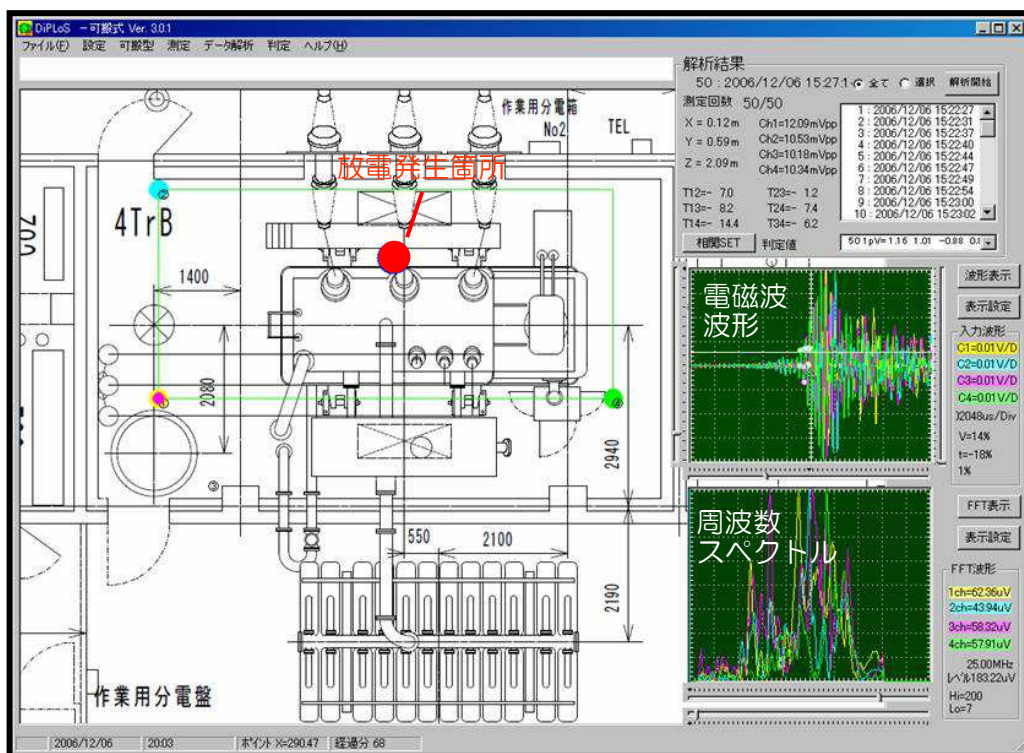


図 4.11 精密型部分放電診断手法の専用プログラム画面



図 4.12 精密型部分放電診断手法の実施風景

4. 3 実フィールドへの適用

A変電所の 275 kV 変圧器に対し簡易型部分放電診断を実施したところ，図 4.13 で示すように油中放電の特徴である 150 MHz 帯に周波数成分を持つパルス性の放射電磁波が検出された。

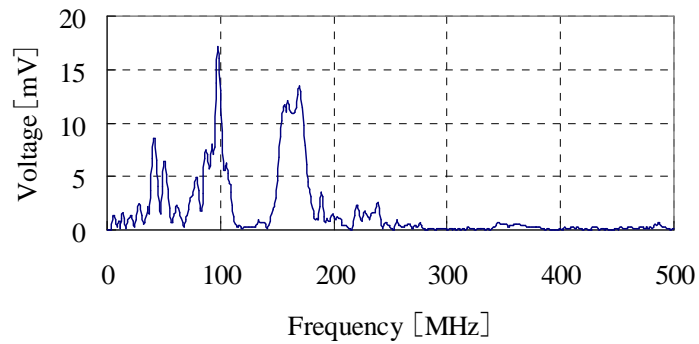


図 4.13 A変電所で検出された電磁波の周波数スペクトル

この結果を受け精密型部分放電診断を実施したところ、4,000 から 6,000 pC の部分放電が変圧器の 3 次ブッシングから発生していると標定された。図 4.14 は精密型部分放電診断による部分放電発生箇所の標定画面であるが、機器の平面配置図をプログラムに取り込み重ねて表示させることで、この様に図面上で放電発生箇所を示すことができる。

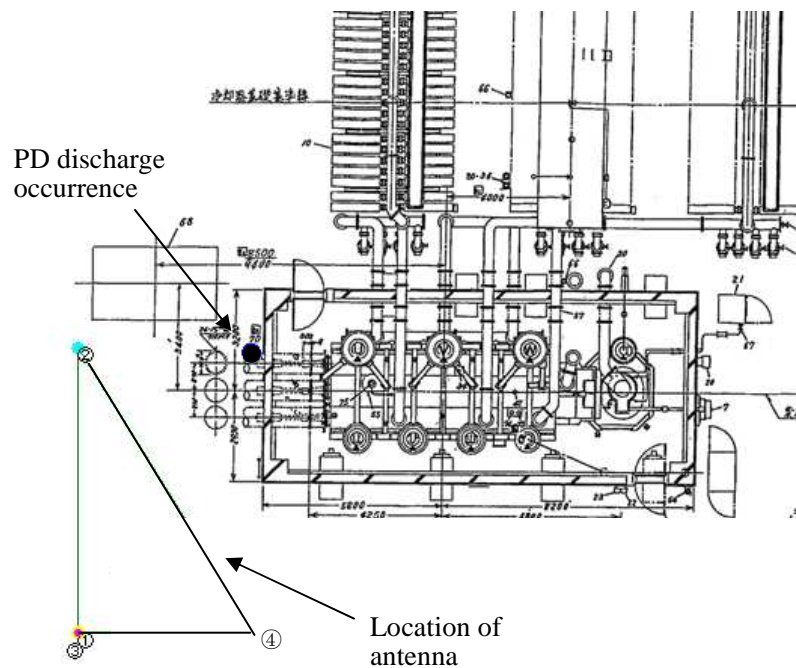


図 4.14 A 変電所で実施した精密型部分放電診断での標定画面

この対象変圧器が停電している間に同様の部分放電診断を実施したところ、部分放電に伴う放射電磁波は検出されなかった。この結果により、対象変圧器から部分放電が発生していたことが改めて確認された。

また B 変電所で同様の診断を実施したところ、450 pC 程度の部分放電が 2 次ブッシング内で発生していると標定された。このブッシング内部の絶縁油を採取し、溶存ガスを分析した結果を表 4.1 に示すが、放電に伴う異常過熱の可能性を示す水素やアセチレンが検出された⁽¹⁷⁾。これにより、電磁波による診断と絶縁油の溶存ガス分析による診断との整合が確認され、筆者らの開発した油入りブッシングの内部部分放電診断手法の有効性が示されたと考える。

表 4.1 絶縁油中の溶存ガス分析結果

Gas	Analysis result (ppm)	Attention level ⁽¹⁷⁾ (ppm)
hydrogen	3,622	400
methane	50	100
ethane	59	150
ethylene	64	10
acetylene	3.91	0.5
carbon monoxide	52	300

文 献

- (1) 山下敬彦, 石原剛, 川口将志, 藤島友之, 松尾寿夫, 古田正数: 「コロナ放電による絶縁電線の劣化」, 電学論 B, Vol.126, No.12, pp.1261-1266 (2006)
- (2) 大塚信也, 竹中賢司, 小迫雅裕, 趙孟佑, 松久孝司, 匹田政幸: 「UHF 法で測定された電磁波第一波の振幅比に基づく GIS 絶縁異常の診断」, 電学論 B, Vol.122, No.6, pp.769-775 (2002)
- (3) 大塚信也, 尾野本道雄, 手嶋隆志, 金子周平, 岡部成光, 匹田政幸: 「リスクアセスメントの PD 放射電磁波第一波に及ぼす GIS タンクサイズとセンサ位置の影響」, 電学論 B, Vol.124, No.11, pp.1365-1372 (2004)
- (4) 鈴木雄一, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠: 「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」, 電学論 B, Vol.118, No.2, pp.157-163 (1998)
- (5) 門脇一則, 西本栄, 木谷勇: 「ポリエチレン中での電気トリー成長過程における圧力波の時間周波数特性の推移」, 電学論 A, Vol.123, No.6, pp.587-592 (2003)
- (6) 小迫雅裕, 大塚信也, 松久高士, 匹田政幸: 「GIS 内の部分放電およびフリー異物により発生するラム波の時間周波数解析」, 電学論 B, Vol.122, No.6, pp.719-724 (2002)
- (7) 牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人: 「エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発」, 電学論 B, Vol.131, No.8, pp.687-692 (2011)
- (8) Y.Tian, P.L.Lewin, D.Pommerenke, J.S.Wilkinson, and S.J.Sutton: “Partial Discharge On-line Monitoring for HV Cable Systems Using Electrooptic Modulators”, IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.11, No.5, pp.861-869 (2004)
- (9) Xu.Yang, Yu.Ming, Cao.Xiaolong, Qiu.Changrong and Chen,G: “Comparison Between Optical and Electrical Methods for Partial Discharge Measurement”, Proc. the 6th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol.1, pp.300-303 (2000)
- (10) Qi.Bo, Chengrong.Li, Zhen.Hao, Bibo.Geng, Dangguo.Xu, Shaoyu.Liu and Chun.Deng: “Partial Discharge Detection for GIS: A Comparison Between UHF and Acoustic Methods”, Proc. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp.1-5 (2010)
- (11) I.Herbst, R.Pietsch: “Fast and Slow Signal Components of Partial Discharges in SF₆ Measurements of the Electron and Ion Contributions to PD-Signal”, Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.283-287 (1994)

- (12) 糸谷亮祐, 米沢比呂志, 高山大輔, 宮本良治, 川崎誠 : 「巡回型油入ブッシング外部診断装置の開発について」, 平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 299 (2006)
- (13) 米沢比呂志, 高山大輔, 糸谷亮祐, 宮本良治, 川崎誠 : 「油入ブッシングの外部診断に関する実用化研究」, 平成 18 年電気学会全国大会, 5-204 (2006)
- (14) 電気協同研究会 : 「密閉形変電設備の劣化保全技術高度化」, 電協研, 第 61 巻, 第 3 号 (2006)
- (15) 鈴木雄一, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠 : 「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」, 電学論 B, Vol.118, No.2, pp.157-163 (1998)
- (16) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠 : 「電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法」, 電学論 B, Vol.115, No.10, pp.1168-1173 (1995)
- (17) 電気協同研究会 : 「電力用変圧器改修ガイドライン」, 電協研, 第 65 巻, 第 1 号 (2009)

第5章 エポキシ絶縁用部分放電診断手法の開発

5.1 はじめに

電力ケーブルや電力機器の絶縁材料として、固体の高分子絶縁材料が広く用いられている。この固体絶縁材料の内部または導体との界面にボイドやクラックなどの欠陥が存在すると、その部位で部分放電(Partial Discharge: PD)が発生し、いわゆるボイド放電劣化やトリリーング劣化を経て、ついには全路破壊に至る。

近年、高分子絶縁材料における絶縁劣化の一つである電気トリリーについては、その発生や進展のメカニズムに関する研究が多く行われている⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。また電力機器の延命化という観点からも、長年の熱的、機械的ストレス等によって絶縁材料に生じた欠陥中での部分放電により、電気トリリーが進行するメカニズムを明らかにする必要がある。

部分放電の検出技術は、電気機器の絶縁劣化診断にとって重要である。そのため様々な手法が開発されているが、筆者は絶縁油中で発生する部分放電の放射電磁波に特徴的な周波数成分が含まれることを見出し、その知見を活用した全く新しい絶縁診断手法を開発している⁽¹¹⁾。これについては前章で述べているが、絶縁油中で発生する部分放電の放射電磁波には150 MHz前後の周波数成分が顕著に表れる。開発した手法は、検出される放射電磁波に150 MHz前後の周波数成分が含まれるか否かによって、油入りブッシング内部で発生する部分放電を診断するものであった。

また一方で、絶縁材料としてエポキシ樹脂が様々な箇所で用いられている。しかしエポキシ樹脂中で発生するボイドやトリリーに起因する部分放電において、それに伴う放射電磁波の検出に関する報告は殆ど見当たらない状況である。

以上の背景から筆者らのグループでは、エポキシ絶縁材料中で生じる部分放電の放射電磁波を検出する研究にも取り組み、電気トリリーの進展前後で放射電磁波に特徴が見られる事を見出している⁽³⁾⁽¹²⁾。これについては本論文の第3章でも述べたが、電気トリリーの進展を伴う部分放電では、放射電磁波の周波数成分に200 MHz以上の帯域が含まれるといった特徴を有している。よってこの帯域の周波数成分が含まれているかどうかによって、電気トリリーの進展を伴う樹脂中の部分放電かどうかを判別することができる。

またエポキシ樹脂中では、部分放電が発生しても直ぐには全路破壊に至らず、トリリーの進展に伴い絶縁劣化が徐々に進んでいくと考えられる。そのためエポキシ樹脂の絶縁劣化を診断するには、常時監視が有用と考えられる。そこで筆者は、主として22~33kVキュービクルのエポキシ製ブッシングを対象に、部分放電に伴う放射電磁波に含まれる特徴的

な周波数成分のレベルから放電電荷量を推定し、部分放電の発生回数を連続計測することができる監視装置を開発した⁽¹³⁾。本章はその内容について述べたものである。

5. 2 エポキシ絶縁用部分放電診断手法

5. 2. 1 エポキシ樹脂の部分放電特性試験

エポキシ樹脂で発生する部分放電を診断する手法を開発するにあたり、エポキシ樹脂中における部分放電の放電電荷量と電磁波強度の関係を求める特性試験を行った。部分放電の発生源としては、図 5.1 で示すような直方体のビスフェノールA型エポキシ樹脂試料を用いる事とし、熱硬化性であるこのエポキシ樹脂にシリカ粒子（粒径 30~40 μm ）を充填させている。針電極として先端曲率半径が約 35 μm の市販品の針（鋼製，Ni メッキ）を硬化時に埋め込んでおき、硬化後に針電極を僅かに引き抜く事で針先端部に約 0.5mm の針状ボイドを作製している。このボイド内のガス漏出を防ぐため、針の根元にはエポキシ製接着剤を塗布して封をした。なお試料底面には導電性塗料（藤倉化成，D-362）を塗布し、アルミ板と接着させて平板電極としていた。

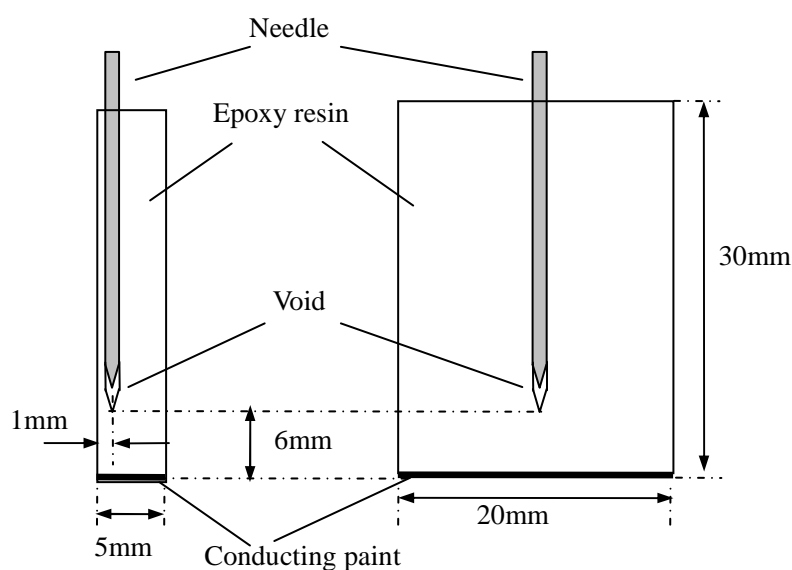


図 5.1 エポキシ樹脂の部分放電用試料

この試料を用いてエポキシ製ブッシング内における導体表面のボイド放電を模擬しているが、沿面放電を防ぐために試料は絶縁油中に浸した。図 5.2 の試験回路でこの試料に対し、60 Hz の交流電圧を印加してエポキシ樹脂中で部分放電を発生させ、それに伴う放射電磁波と放電電流を同時測定した。

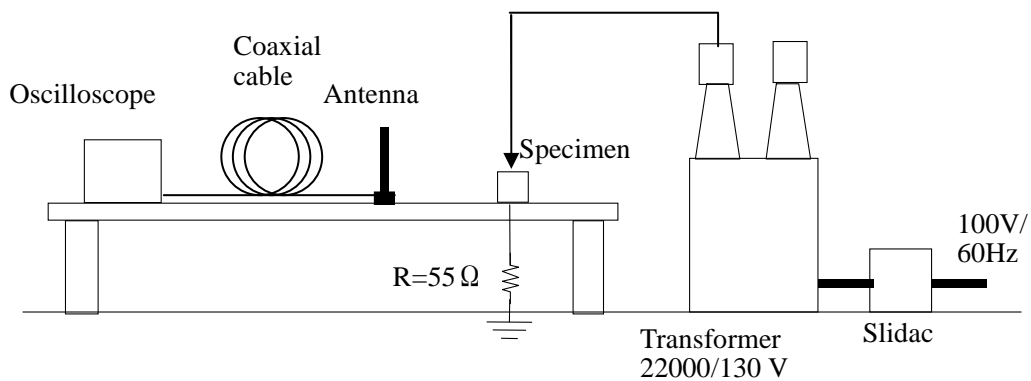


図 5.2 部分放電の測定回路

電磁波強度の測定では、市販の小型モービルアンテナ（第一電波工業製 RH707, 120-900 MHz）からの受信電圧をデジタルオシロスコープ（Tektronix 製 TDS3054B, 500 MHz）で取り込み、図 5.3 に示すデータ例のように高速フーリエ変換した後 200MHz から 450MHz までの間でスペクトルピーク値を読み取った。

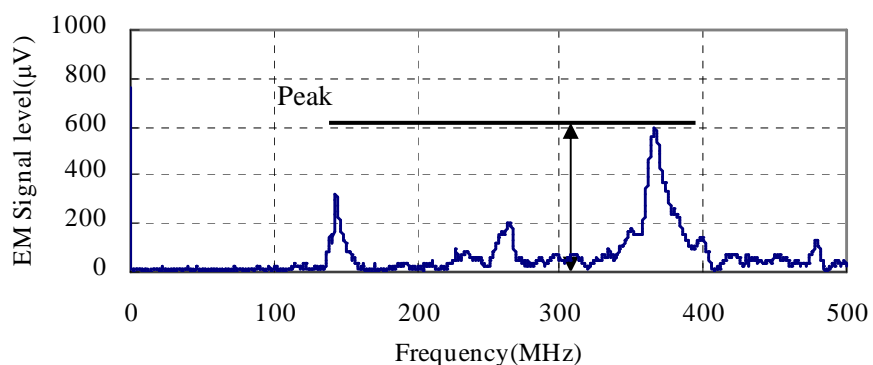


図 5.3 部分放電に伴う放射電磁波強度の読み取り

この周波数帯域は、前述したようにエポキシ樹脂に特有の周波数成分であり、絶縁油中や空気中の放電では見られない帯域である。

また放電電荷量については、接地線に直列接続した 55Ω の抵抗素子に電圧プローブを接続し、オシロスコープで測定した電流波形の第 1 波を時間積分することで導出している。この電荷量と放射電磁波の関係をプロットした結果を図 5.4 と図 5.5 に示す。相関データは放電の極性別に示すが、極性によって分布の傾きが異なっている。これは負極と比べ正極放電の方が、トリーの進展長に強い影響を与える極性効果の表れであり⁽¹⁴⁾、正極性の方がトリー進展時の放電電流も大きくなる事が原因と考えられる。

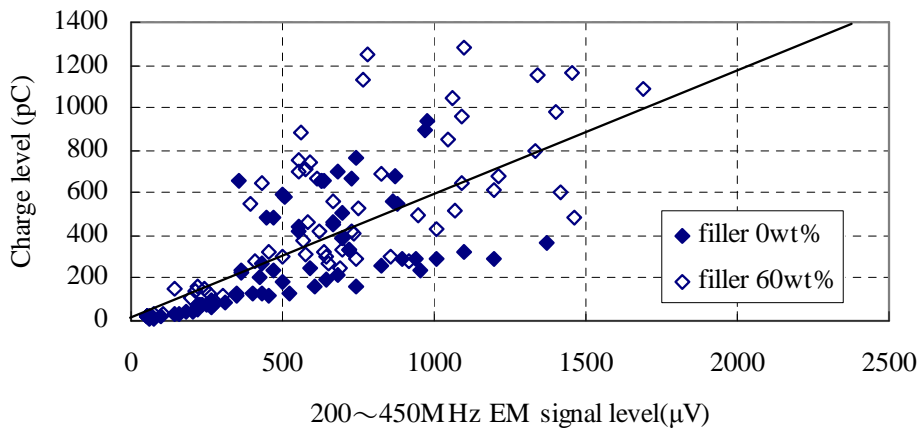


図 5.4 エポキシ樹脂における放射電磁波強度と放電電荷量の関係（正極）

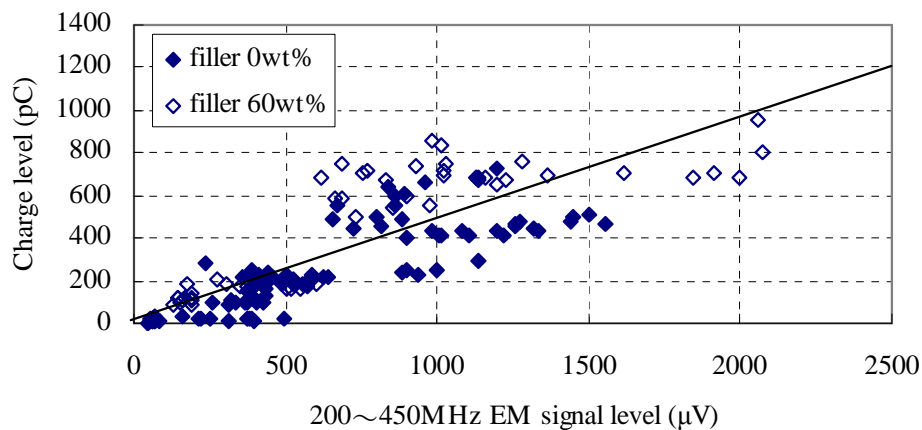


図 5.5 エポキシ樹脂における放射電磁波強度と放電電荷量の関係（負極）

またこの試験において、エポキシ樹脂中の充填材（シリカ）有無による部分放電特性の変化についても比較する為、充填材を混入していない場合(filler 0wt%)と、60wt%混入した場合(filler 60wt%)の試料を用意し、それぞれのデータを取得している。これらと比較したところ、充填剤の有無に係わらず、検出されるエポキシ樹脂の特徴周波数帯域に差異が無いことがわかった。ただし散布図から平均を求めると、両極性とも充填剤を混入した方が電荷量は高くなる傾向が見られた。この原因については不明であるが、今後検討を進める予定である。

上記の基礎試験結果をもとに、エポキシ樹脂中の部分放電に伴う放射電磁波を検出し、放電電荷量の推定および放電回数の計測を行う新しい絶縁診断システムの開発を行った。

5. 2. 2 部分放電監視装置の開発

キュービクル内部にあるエポキシ樹脂製ブッシングを主な対象とし、絶縁劣化を常時監視する装置を開発するにあたって以下の事項を主な仕様とした。なお本装置は、アンテナの受信電圧レベルから部分放電の放電電荷量を推定する手法をとっており、その推定には別途実施したキュービクル筐体内における電磁波伝搬試験の結果を適用している。

〈3・1〉測定可能箱数 1装置/バンクとするが、標準的なキュービクル箱数を考慮しキュービクル10箱が測定可能な形態とする。

〈3・2〉装置の構成 アンテナはキュービクル内に配置する事とし、キュービクルの表・裏の両面に1本ずつ配置する。その為、10箱を観測する場合はアンテナを20本用いることになる。各アンテナは図5.6で示すようにアンテナ切替器に接続するが、任意の時間間隔でチャンネルは切り替わり、各チャンネルのデータは装置本体に集約される。

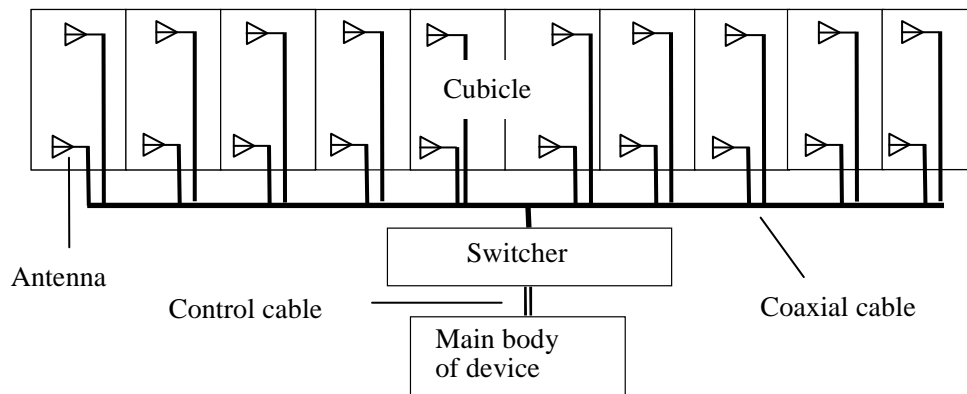


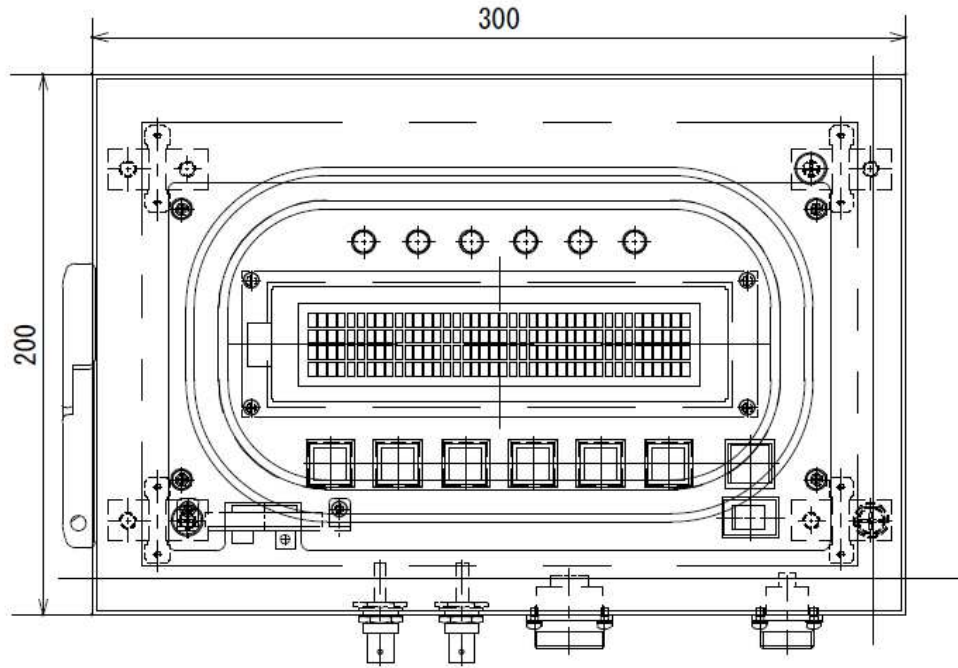
図 5.6 エポキシ絶縁用部分放電監視装置の概要

〈3・3〉検出周波数帯域 エポキシ絶縁材料中の部分放電発生有無は、200～450MHzの各周波数帯域の受信波強度により判定する方式とする為、検出可能周波数帯域は200～450MHzとした。ただし4MHz間隔の自動スイープ機能を付与した為、検出する周波数帯域の上限は452MHzである。

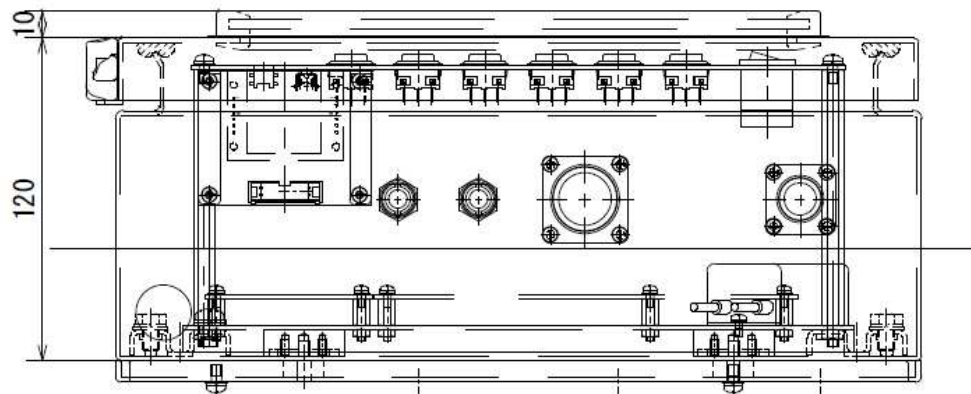
〈3・4〉放電電荷量の標定 受信波強度によって11区分の放電電荷量によるカテゴリに分類し、カテゴリ毎に設定時間内の放電発生回数を記録させる。なお検出可能な放電電荷量の範囲は、使用箇所の電磁環境によって大きく影響されるが、25～500pCを基本的な電荷量標定範囲とした。

〈3・5〉装置の外観 開発した装置の外観を図5.7および図5.8に示すが、アンテナ切替器および装置本体については屋外設置も想定し、防滴・防塵仕様とした。また据付作業の

簡便化を図るため、磁石によりキュービクル壁面や天井面に簡易に取り付け可能な形態となっている。なおこの装置の設置、撤去および記録データの確認は、キュービクルが充電中であっても実施可能である。

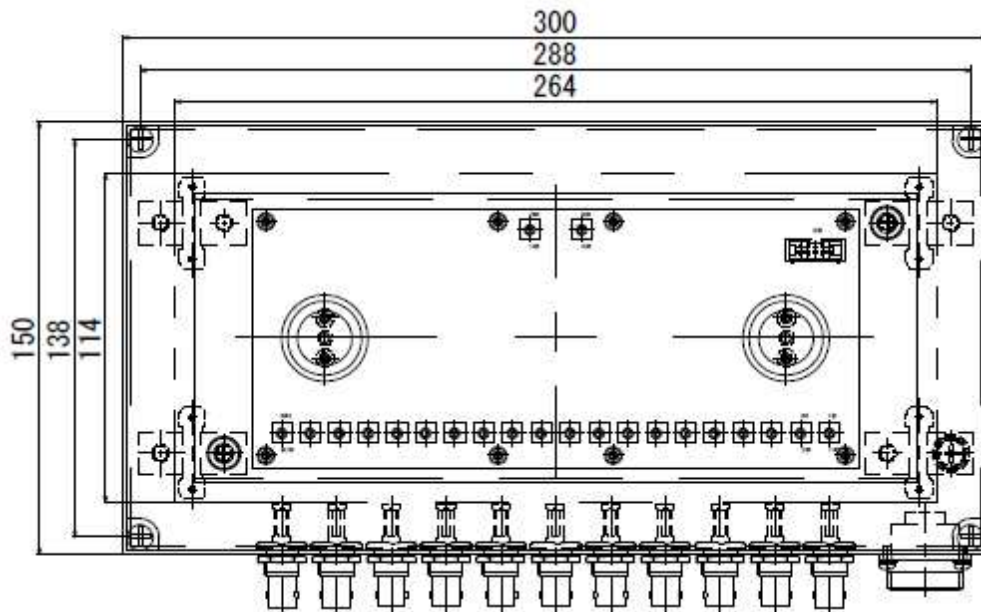


(a) 正面

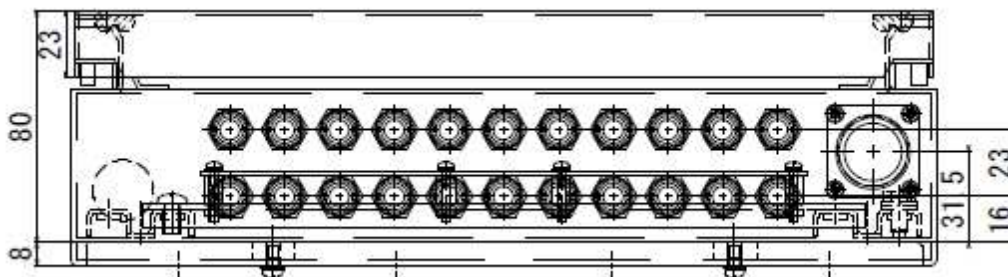


(b) 側面

図 5.7 エポキシ絶縁用部分放電監視装置の本体



(a) 正面



(b) 側面

図 5.8 エポキシ絶縁用部分放電監視装置のアンテナ切替器

5. 3 実フィールドへの適用

5. 3. 1 模擬回路での性能評価試験

試作した装置の性能検証を行うため、図 5.9 に示す実験回路とエポキシ樹脂試料を用い、訓練用の実規模キュービクル内部でエポキシ樹脂の部分放電を発生させ、開発した装置での検出を試みた。なおエポキシ樹脂の試料は、エポキシ製ブッシングでの放電を模擬するため、図で示すようにキュービクル内のエポキシ貫通ブッシング上に配置した。また放電

発生用の試料沿面での部分放電発生を防止するため、試料を絶縁油中に浸した状態で課電しており、樹脂内部でのみ放電が発生するよう調整しながら試験は行った。

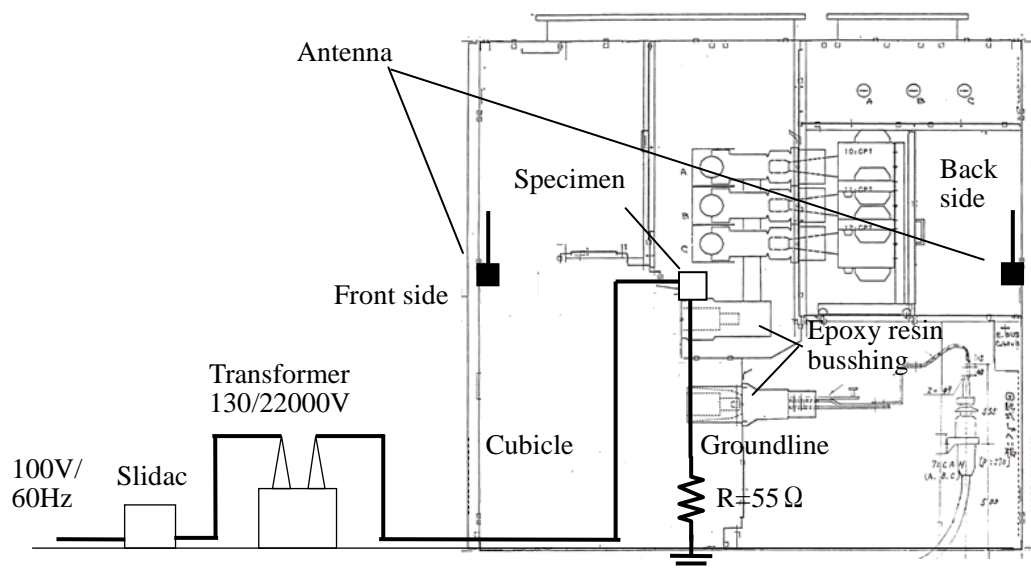


図 5.9 訓練用キュービクルを用いた試験回路

パルス校正器（三菱電線工業製 PG-1B）を用い、30pC および 500pC 程度の部分放電が発生する事を確認した試料を模擬放電用の試料として用意し、それぞれで部分放電を発生させて検出様相の確認を行った。計測結果の一例として、30 pC 程度の部分放電を発生させた場合で、キュービクル表面における 25~50 pC の放電カテゴリでの計測結果を図 5.10 に示す。ただしこれは計測結果のうち、400 MHz のデータを代表し抽出したものである。計測開始から 2 分後に試料への課電を開始し、6 分後に課電を停止させているが、その間に計測箇所をキュービクルの表、裏で 30 秒毎に切り替えるよう設定していた。そのため、計測結果は毎分 30 秒間の検出回数となっている。なお課電中は試料の接地線を通る放電電流を監視しており、30 pC 程度の放電が発生している事を確認しながら観測装置による計測を行っている。

この計測結果によると、課電開始以降に 25 pC~50 pC のカテゴリで放電が検出された事が分かる。また 500 pC 程度の部分放電が発生する試料を用いた場合には、500pC 以上の放電カテゴリにて放電が検出される事を確認した。課電操作に対応した検出の有無、および部分放電電荷量に該当するカテゴリでの検出が確認された事から、放電電荷量の推定性能について検証が出来たものとする。

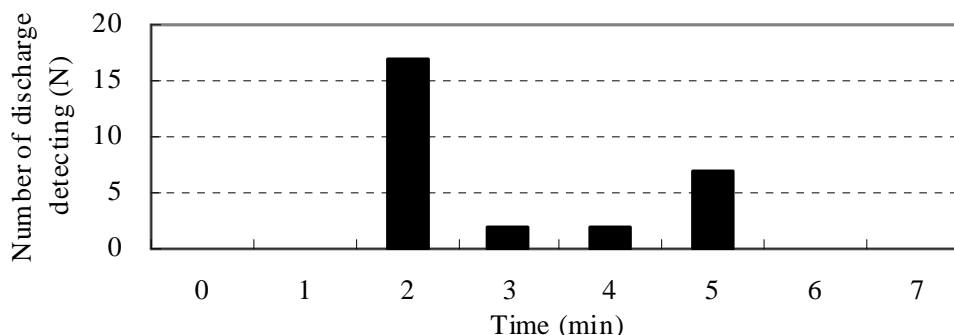


図 5.10 観測装置による計測結果例 (25~50 pC)

また信号発生器（アジレントテクノロジー製 E4421B）のパルス変調機能を用い，エポキシ絶縁用部分放電監視装置の信号処理速度を確認したところ，1秒間あたり5000回以上の放電パルス进行处理できる能力を有していることを確認した。これらの結果から，開発した装置は実フィールドでの使用に十分な性能を有していることが確認できた。

5. 3. 2 実フィールドでの性能評価試験

開発したエポキシ絶縁用部分放電監視装置を実際の変電所に配置し，実フィールド環境下で数ヶ月間の連続使用に耐えうるか性能検証試験を行った。なお装置の配置箇所を選定するにあたっては，20箇所の変電所で高経年の22kV~33kVキュービクル合計214箱をまず選定し，事前にキュービクル内の電磁波測定を実施した。そして測定した内から，エポキシ樹脂中の部分放電発生を特徴付ける200~450MHzの周波数を含む放射電磁波が検出された設備を監視装置の配置対象とし，部分放電の継続監視を兼ねた性能検証を行った。

図 5.11 に監視装置による計測結果の一例を示す。これは関西電力管内にあるC変電所の22 kV キュービクルでの測定結果である。前述した通り，エポキシ絶縁用部分放電監視装置は200MHz~452MHzの間を4MHz刻みでスイープし，検出されるパルス数を計測している。ここではこの内，放電様相が顕著に現れていた348MHzにおける3分間あたりのパルス検出回数の推移を表す。この計測結果を見ると，25pC以上の放電カテゴリでパルスが検出されているが，11月11日以降は全くパルスが検出されていないことが分かる。

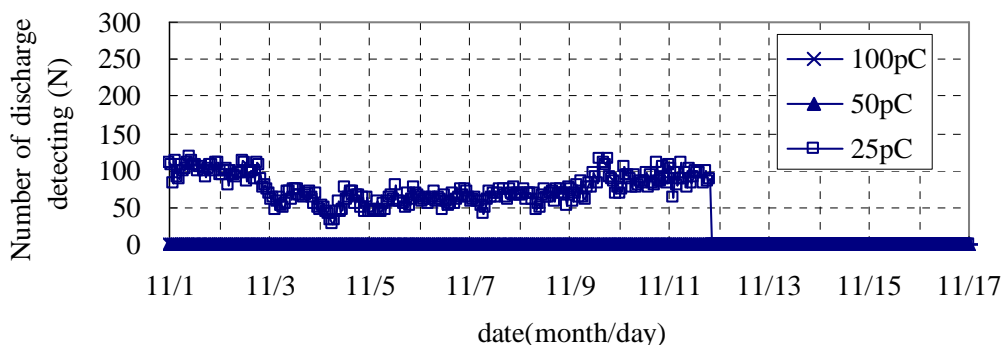


図 5.11 実フィールドにおけるエポキシ絶縁用部分放電監視装置の計測結果例(1)

調査したところこの変電所では、継続監視の期間中である 11 月 11 日に、遮断器開放による線路停止操作が実施されていた事が判明した。これは図 5.11 において、部分放電パルスが検出されなくなった日と一致している。この結果から判断し、遮断器が開放されたことで負荷側のエポキシ製貫通ブッシングに課電されなくなり、負荷側のブッシング内部における部分放電が発生しなくなったと推測される。

また、性能検証試験の開始直後である 8 月 21 日から 8 月 31 日までのエポキシ絶縁用部分放電監視装置の計測結果を図 5.12 に示す。これも図 5.11 と同様に、放電様相が顕著であった 348MHz の 3 分間あたりのパルス発生数推移を表している。8 月 21 日や 30 日に検出回数が急増しているが、ボイドやトリの放電は間欠的に観測される事がしばしばあり、この検出回数の急増も同じ現象と推測される。またキュービクルは金属の筐体で覆われ遮蔽されているため、外部ノイズは侵入し難い環境である。よってこれらは、キュービクル内における部分放電の変化を捉えたものと考えられる。以上の結果からこのキュービクルでは、25pC 以上の放電カテゴリでパルスが継続的に検出される様子が確認できた。

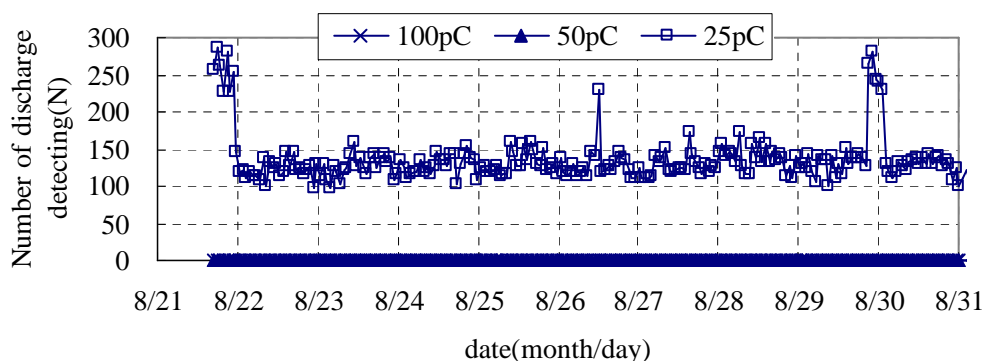


図 5.12 実フィールドにおけるエポキシ絶縁用部分放電監視装置の計測結果例(2)

次に参考として、前節の基礎試験でも用いたオシロスコープ (Tektronix 製 TDS3054B, 500 MHz) と小型モービルアンテナ (第一電波工業製 RH707, 120-900 MHz) によって、対象キュービクル内の電磁環境を測定した結果を述べる。計測開始日の 8 月 21 日に検出された電磁波の波形を周波数分析したところ、図 5.13 に示すような周波数スペクトルとなった。これによると、エポキシ樹脂中における部分放電の特徴である 300 MHz 帯に周波数成分が含まれている事が分かる。

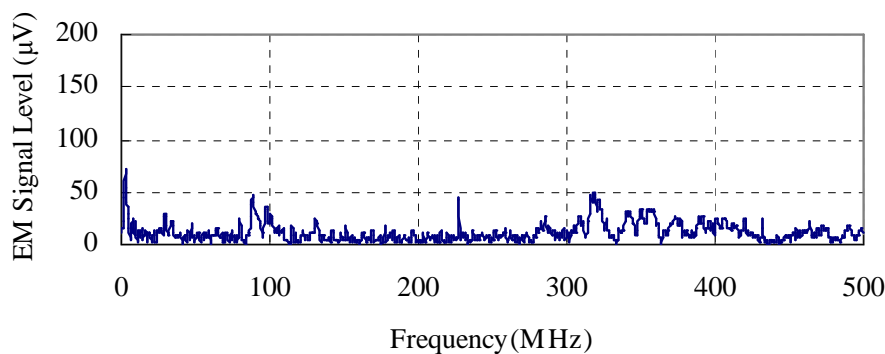


図 5.13 エポキシ絶縁用部分放電監視装置で部分放電を検出していた際の放射電磁波周波数スペクトル

これに対し、開発した監視装置で 348MHz のパルスが検出されていない 11 月 17 日に検出された電磁波の周波数分析結果を図 5.14 に示す。測定方法は同様であったが、この時に検出された電磁波には、エポキシ樹脂中の部分放電における特徴的な周波数スペクトルが見られなかった。本研究で開発した検出装置は、200MHz～452MHz の間を計測している。そのため図 5.14 のような電磁環境が継続していたのであれば、パルスが検出されなかった結果も妥当と言える。これらの結果から本装置では、キュービクル内部におけるエポキシ樹脂中の部分放電検出が可能であることを確認した。

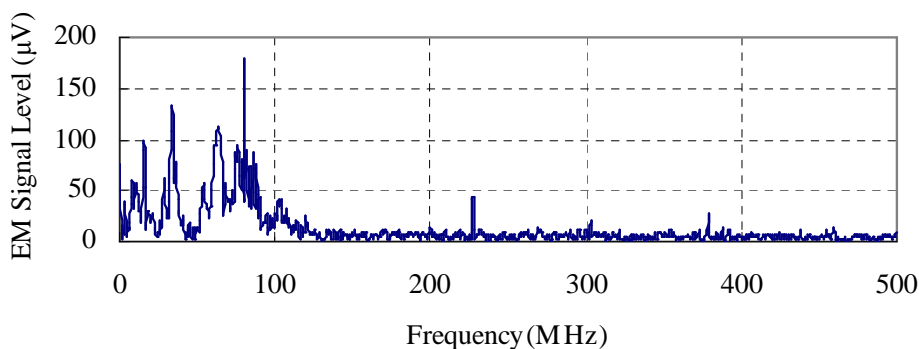


図 5.14 エポキシ絶縁用部分放電監視装置で部分放電の検出が無い時の放射電磁波周波数スペクトル

5. 3. 3 診断結果の妥当性確認

前述の部分放電が検出されていたC変電所の当該キュービクルが除去される事となり、電磁波以外の手法でも部分放電を測定する機会が得られた。部分放電の発生源と推定された負荷側のエポキシ製貫通ブッシング3相分を取り外し、部分放電測定器（かねでんエンジニアリング製 EIC-D1）を用いて図 5.15 のようにして部分放電電荷量の測定を行った。なお測定にあたっては、パルス校正器（三菱電線工業製 PG-1B）を図中の PG として用い、25～50pC の部分放電を正確に測定できる事を事前に確認しており、部分放電測定規格に沿った手法を適用した⁽¹⁵⁾。

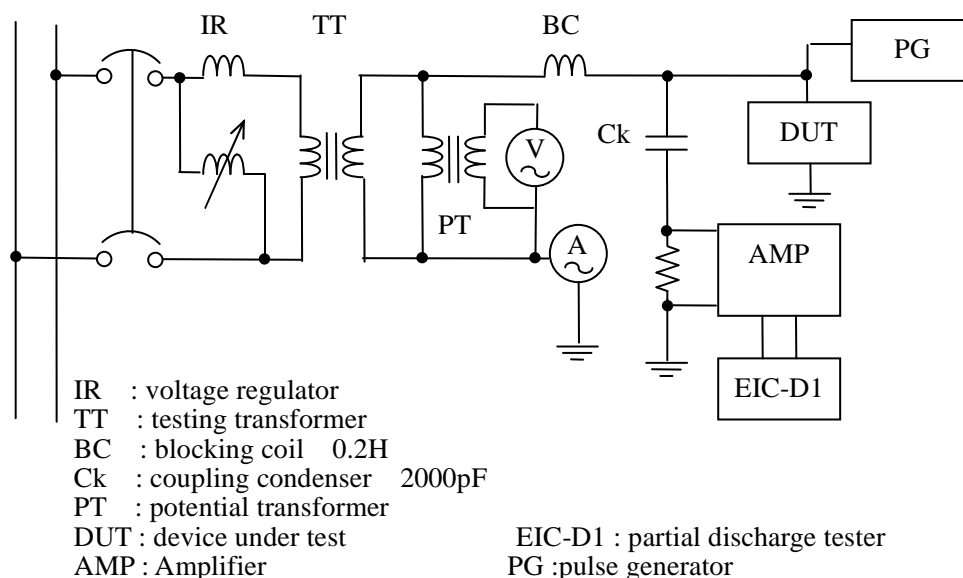


図 5.15 部分放電電荷量の測定回路

3相それぞれに対し部分放電電荷量の測定を実施したが、このうち1本で部分放電が検出され、図 5.16 のような測定結果が得られた。これによると、放電電荷量は 58pC という結果になった。また同時に電磁波の計測も実施したが、放射電磁波にエポキシ樹脂の特徴を表す周波数成分が含まれる事も再確認された。本研究で開発したエポキシ絶縁用部分放電監視装置では、放電電荷量は 25 pC～50 pC と推定されていた。よって装置による推定放電電荷量と実際の値は概ね一致した。以上の結果から、本研究で開発したエポキシ絶縁用部分放電監視装置では、実際のエポキシ製ブッシングの部分放電を検出可能であり、その妥当性も示すことができた。

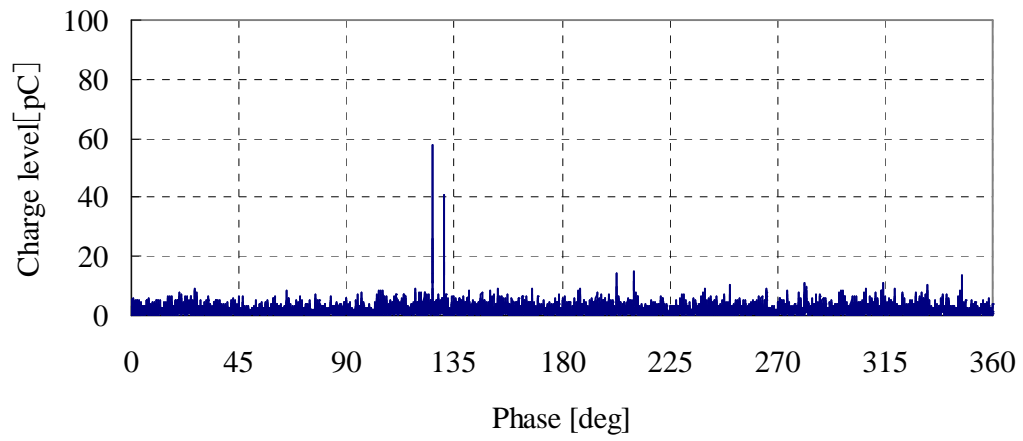


図 5.16 部分放電電荷量の測定結果

文 献

- (1) 浦野幸治, 江原由泰, 岸田治夫, 伊藤泰朗:「トリー進展現象における放電発光位置と放電電荷の位相角解析」, 電学論 A, Vol.117, No.8, pp.825-831 (1997)
- (2) 小林正三, 工藤勝利:「交流トリーの進展に伴う発光現象のカオス性」, 電学論 A, Vol.116, No.8, pp.718-724 (1996)
- (3) 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ー伸展と放射電磁波」, 電学論 A, Vol.129, No.12, pp.915-921 (2009)
- (4) 高田一, 林昌幸, 小迫雅裕, 匹田政幸, 中村修平, 梅村時博, 中村勇介, 広瀬達也, 東山雅一:「エポキシモールド絶縁システム中の人工ボイド内部分放電現象の検討」, 電学論 A, Vol.131, No.9, pp.785-791 (2011)
- (5) 松縄暁, 小迫雅裕, 大木義路, 向當政典, 岡部成光, 田中祀捷:「エポキシ/アルミナ ナノコンポジットの創製とトリーイング破壊特性」, 電学会放電研究会, ED-06-32, pp.73-78 (2006)
- (6) 今井隆浩, 澤史雄, 尾崎多文, 中野俊之, 清水敏夫, 吉満哲夫:「エポキシ樹脂のナノコンポジット化とその絶縁特性の検討」, 電学論 A, Vol.124, No.11, pp.1065-1072 (2004)
- (7) 門脇一則, 西本栄, 木谷勇:「ポリエチレン中での電気トリー成長過程における圧力波の時間周波数特性の推移」, 電学論 A, Vol.123, No.6, pp.587-592 (2003)
- (8) 河端宏樹, 金忠植, 水谷照吉:「模擬トリーチャンネルからのトリー伸展現象と部分放電特性」, 電学論 A, Vol.123, No.4, pp.407-412 (2003)
- (9) 木谷博昭, 清水芳則, 宅間董:「エポキシ樹脂中の空気あるいは SF6 ボイドからの部分放電劣化」, 電学論 A, Vol.122, No.6, pp.557-562 (2002)
- (10) 門脇一則, 西本栄, 木谷勇:「ナノ秒パルスの繰り返し印加によりエポキシ樹脂中を進展するトリーからの圧力波測定」, 電学論 A, Vol.121, No.11, pp.1039-1045 (2001)
- (11) 牟田神東達也, 川崎誠, 上野秀樹, 岡田翔:「部分放電に伴う放射電磁波による油入ブッシング劣化診断」, 電学会放電研究会, ED-12-160, pp.25-30 (2012)
- (12) 黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也:「固体絶縁材料中の部分放電による放射電磁波特性の極性変化」, 電気学会パルスパワー・放電合同研究会, ED-11-077 (2011)
- (13) 牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人:「エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発」, 電学

論 B, Vol.131, No.8, pp.687-692 (2011)

- (14) 工藤勝利, 山口宗五郎 : 「広い温度範囲においてトリーの性状に及ぼす印加電圧波形の影響」, 電学論 A, Vol.93, No.9, pp.382-388 (1973)
- (15) 電気学会電気規格調査会 : 「JEC0401(1990) 部分放電測定」 (1990)

第6章 総括

本章では、筆者が取り組んできた本研究で得られた成果を総括として述べる。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。電力自由化に伴い電気事業者ではコスト削減を余儀なくされており、設備投資費の抑制に取り組んでいる。また今日の高度情報社会では、至るところで電気が用いられていることから、停電により電力供給が滞れば社会に与える被害は甚大となる。そのため停電事故を未然に防ぐため、設備異常を早期に発見することが望まれる。電気エネルギーの需要側および供給側の両方からの要望を実現するには、絶縁劣化試験の実施が重要となる。この絶縁劣化試験では部分放電診断が特に有効であり、また部分放電はそれ自体が有害であるため、部分放電に対する現象説明も絶縁劣化診断技術の向上にとって有効と考えられる。そこで本研究では、部分放電に伴う放射電磁波の現象説明に取り組み、得られた知見をもとに従来に無い新しい部分放電診断手法の開発に取り組んだ。

第2章では部分放電現象や、部分放電を検出する各種手法について述べた。部分放電に伴い電流や超音波など様々な物理現象が観測されるが、筆者はそれらのうち電磁波に着目した研究に取り組んでいる。部分放電に伴い放射される電磁波の周波数成分において、部分放電の発生源である絶縁材料によって特徴が見られることを、筆者らの研究グループでは見出している。この特徴はアンテナで検出した電磁波の波形に対し、高速フーリエ変換などの周波数分析を行うことによって明らかになったものである。空気・絶縁油およびエポキシ樹脂を対象に放射電磁波の周波数成分を比較したところ、空気の場合は20 MHz程度の周波数成分が主となり、100 MHz以上の帯域では信号が検出されない。これに対し絶縁油の場合は、空気中の場合には見られない150 MHz付近の周波数成分が検出される。またエポキシ樹脂の場合には、絶縁油と同様に150 MHzといった帯域の周波数成分が検出されるが、これとは別に他の材料では見られない200 MHz以上の周波数成分も検出されることを特性試験により確認した。

第3章では、部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分において、特徴が生じるメカニズムの解明を目指して各種試験による検討を行った。絶縁材料によって、部分放電が発生する絶縁破壊電界の強度は異なる。部分放電の電磁波強度は、放電電流の時間変化 di/dt と比例関係にある。そのため放射電磁波は、電流波形において時間変化の大きい立ち上がり部

分に強く影響される。この立ち上がり時間は部分放電発生時の電界強度によって変化し、電界強度が大きくなるに伴い放電電流の立ち上がりは急峻になる。また部分放電電流の立ち上がり時間は、電子なだれの進展距離と速度によって決まることが知られている。そこでこれらに影響を与えるパラメータについて文献調査したところ、電子なだれの進展距離に影響を与える放電時における電子の平均自由行程は、材料の種類に関係なく同程度になることが分かった。また放電時における電子なだれの速度も、電界強度だけで変化することが判明した。これらにより、部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分を決定するパラメータは、放電発生時における電界強度のみであることを解明した。以上の結果から、部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分において、絶縁材料毎に特徴が見られる原因は、材料によって絶縁破壊電界が異なるためと分かった。部分放電現象を撮影する高速カメラの機能向上や、電子レベルでの現象解明を進めることによって、周波数成分が持つ物理的な意味の解明も今後期待される。

第4章では、部分放電の放射電磁波に関して得られた知見を活用し、電磁波を検出することで、油入りブッシング内部の部分放電を診断する新たな手法を開発した結果について述べた。この手法は、絶縁油中で発生する部分放電の放射電磁波において、周波数成分の特徴として150 MHz近傍の周波数成分が含まれることに着目したものである。油入りブッシングの部分放電を診断するため、簡易型および精密型の2種類の部分放電診断手法を開発したが、簡易型では油中放電の有無、精密型では放電発生箇所の標定および放電電荷量の推定が可能である。開発した手法を実フィールドで適用したところ、部分放電が発生しているブッシングを対象設備が運転中に標定することができた。またブッシング内部の絶縁油を採取し溶存ガスの分析を行ったところ、部分放電による異常加熱の可能性を示す水素やアセチレンといった可燃性ガスが検出された。これにより、開発した手法による部分放電診断結果の妥当性が示された。本研究で開発した部分放電診断手法を用いることで、従来では運転中の実施が困難であった油入りブッシングの部分放電診断が可能となり、設備事故の未然防止に大きく貢献できたと考える。

第5章では、前章と同じく部分放電の放射電磁波に生じる周波数成分の特徴に着目し、エポキシ絶縁用の部分放電診断手法を開発した結果について述べている。エポキシ樹脂中で電気トリの進展を伴う部分放電が発生した場合、放射される電磁波には200 MHzを超える周波数成分が含まれる。そこで200 MHz～452 MHzを4 MHz刻みでスイープし、電磁波強度によって放電電荷量の推定および放電発生回数の記録が可能な常時監視装置を開発

した。開発した装置を実フィールドに適用し、キュービクル内部で発生する部分放電の診断を実施したところ、エポキシ製貫通ブッシングの部分放電が発生源と疑われる電磁波が検出され、その電磁波強度から推定される放電電荷量は25～50 pCであった。当該キュービクルのエポキシ製貫通ブッシングを入手することが出来たため、JEC規格に準拠した手法で部分放電の放電電荷量を測定したところ、入手したブッシング3相のうち1相で58 pCの部分放電が検出された。これは本研究で開発した診断装置による推定結果と同程度であり、開発した診断手法の信憑性を確認することができた。

本研究では、部分放電に伴う放射電磁波の周波数成分に着目し、絶縁材料によって周波数成分の特徴が異なる原因を解明した。また検出する周波数帯域を選定することで、放電発生源を判別できる部分放電診断手法も開発した。電磁波による部分放電診断では、一般的に外部ノイズの影響を受けやすいといった欠点を有している。これに対し本研究で開発した手法では、診断対象の絶縁材料に特有の周波数成分が含まれているか否かにより放電発生有無を判定できるため、ノイズの除去が可能となる。診断対象の機器に用いられている絶縁材料が何であっても、基本的に同一の診断手法で対応できることから、開発した手法は全ての電力設備に対する巡視点検ツールとしての発展が可能と考えられる。

ただし電磁波は、金属で覆われると遮蔽され透過できない特性を有している。そのため、金属製タンクで覆われたガス絶縁機器の内部や、エレファント型と呼ばれる金属ケースで覆われた型式のブッシング内部で発生する部分放電の検出は困難と考えられる。これらに対し本研究で得られた知見を活用し部分放電を検出するには、フランジ部の絶縁スペーサー等にアンテナを近づけ、漏洩する電磁波を感度良く検出することが必要になる。

この電磁波における問題点を改善する一例として、超音波信号の検出が挙げられる。部分放電に伴う超音波をAEセンサにより検出すれば、金属筐体内部の部分放電を検出することができ、電磁波による部分放電診断の補完が可能である。ただし絶縁材料によって、電磁波と同様に超音波の信号にも特徴が生じるかなどは不明である。部分放電に伴う超音波信号について、理論的に検討した研究事例も見当たらないのが現状であり、学術的に興味深い内容である。よって超音波など他の部分放電検出手法についても知見を蓄積することで、より高度な部分放電診断技術が構築可能になると期待される。

謝 辞

本論文は、兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻の上野秀樹教授によるご指導のもと、筆者が取り組んだ研究の成果をまとめたものである。筆者が社会人ドクターとして大学院博士後期課程へ入学し、本研究を遂行することが出来たのは、ひとえに上野教授によるご尽力のお陰である。研究の遂行にあたって上野教授から賜ったご指導、ご鞭撻に対し、心より感謝を表する次第である。

また、兵庫県立大学大学院博士後期課程に在籍中、電気系工学専攻の岡田翔助教には大変お世話になった。電力系統工学研究室にて学生生活を有意義に過ごすことが出来たのは、岡田助教のお陰である。よって厚く御礼を申し上げる。

本研究に取り組むきっかけを与えて下さった関西電力株式会社の柿花邦彦氏に対し、厚く御礼を申し上げる。柿花氏が電力技術研究所に在籍中、熱意を持って取り組まれた研究業務に対し、筆者も携わることが出来た経験が本論文の執筆につながっている。

本論文をまとめるにあたり、公聴会を通じ有益なご助言、ご教示を賜った兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻の永田正義教授、藤原関夫教授、畠山賢一教授および多田和也准教授に厚く御礼を申し上げる。

また兵庫県立大学大学院博士後期課程への在籍中、課題等でお世話になった小野田光宣教授、福本直之准教授、伊藤省吾准教授、菊池祐介准教授および渡邊健夫准教授に厚く御礼を申し上げる。

兵庫県立大学大学院博士後期課程に在籍中、様々なご支援を賜った電力系統工学研究室の修了・卒業生諸氏に厚く御礼を申し上げる。2013年卒業研究生の古藤正隆氏および2012年卒業研究生の櫻井麗翔氏には、研究を遂行するにあたり有益な討論をして頂いた。また2011年博士前期課程修了生の黒石祥斗氏には、特に多大な支援を頂いた。本研究における黒石氏の貢献は大きく、深く感謝を表する次第である。

また兵庫県立大学大学院博士後期課程への進学にあたり、理解を示しご配慮を賜った株式会社かんでんエンジニアリングの方々、とりわけ部分放電に伴う放射電磁波の計測に関し、技術指導を賜った川崎誠グループマネージャーに厚く御礼を申し上げる。

最後に、兵庫県立大学大学院博士後期課程へ進学するにあたっては、妻である直美からの惜しみない支援があった。妻の理解無しには本研究の遂行は考えられず、改めて深い感謝の意を表する次第である。

研究業績

● 発表論文

- (1) The Relationship between the Current through the Transformer Neutral Point and Natural Phenomena
Jun Izutsu, Takashi Ochi, Tomiichi Uetake and Tatsuya Mutakamihigashi
電気学会論文誌A, Vol.126, No.4, pp.233-237 (2006)
- (2) エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発
牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人
電気学会論文誌B, Vol.131, No.8, pp.687-692 (2011)
- (3) 各種絶縁材料の劣化に伴う部分放電信号のウェーブレット解析
牟田神東達也, 岡田翔, 上野秀樹
電気設備学会誌, Vol.33, No.5, pp.344-350 (2013)
- (4) 油入ブッシングの内部部分放電診断手法の開発
牟田神東達也, 川崎誠, 岡田翔, 上野秀樹
電気学会論文誌B, Vol.134, No.2, pp.177-182 (2014)
- (5) 電気トリー進展に伴う部分放電の極性効果と放射電磁波
牟田神東達也, 黒石祥斗, 上野秀樹
電気学会論文誌A, 134, No.4 (2014)に採録決定済み
- (6) Electric Field Dependence of Frequency Components in Electromagnetic Waves Radiated by Partial Discharge
Tatsuya Mutakamihigashi, Sho Okada and Hideki Ueno
IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation (投稿中)
- (7) Polar Effect of Electromagnetic Waves due to Partial Discharge
Tatsuya Mutakamihigashi, Masakata Koto, Sho Okada, Hideki Ueno
IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (電気学会共通英文論文誌, 投稿準備中)
- (8) Application of FDTD Simulation for Calculating Electric Field Strength at PD Occurring
Tatsuya Mutakamihigashi, Sho Okada, Hideki Ueno
IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation (投稿準備中)

● 国際会議

- (1) Wavelet Transformation of Partial Discharge Signals Associated with the Degradation of the Various Insulation Materials
Tatsuya Mutakamihigashi, Yasuhito Hashiba, Hiroshi Morii, Yoshito Kuroishi and Hideki Ueno
Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2012 (ICEE2012), No.ED-1, pp.574-578 (2012)
- (2) Relationship Between Electric Field Strength and Characteristic Frequency in Partial Discharge
Tatsuya Mutakamihigashi, Reisho Sakurai, Sho Okada and Hideki Ueno
Proceedings of 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2013), No.OD1-01, pp.651-656 (2013)

● 研究会発表

- (1) 電気設備の絶縁劣化常時監視装置の開発
牟田神東達也, 川崎誠, 丸山和男
電気学会 放電・開閉保護・高電圧 合同研究会, ED-01-243,SP-01-88,HV-01-142(2001)
(平成 13 年 11 月 米子コンベンションセンター)
- (2) 変圧器中性線に流れる地電流観測と接地回路の地電流基礎解析について-地震に伴う電磁現象に関する研究(その 1)-
武内康夫, 樋口武光, 尾池和夫, 井筒潤, 牟田神東達也
電気学会 電磁環境研究会, EMC-03-7(2003)
(平成 15 年 1 月 大阪大学)
- (3) 土中電界の地表電気現象基礎解析-地震に伴う電磁現象に関する研究(その 2)-
牟田神東達也, 武内康夫, 尾池和夫, 井筒潤
電気学会 電磁環境研究会, EMC-03-22(2003)
(平成 15 年 7 月 大同工業大学)
- (4) 中性点電流データと自然現象との関係について-地震に伴う電磁現象に関する研究(その 3)-
井筒潤, 尾池和夫, 武内康夫, 牟田神東達也
電気学会 電磁環境研究会, EMC-03-23(2003)
(平成 15 年 7 月 大同工業大学)

- (5) 固体絶縁材料中の部分放電による放射電磁波特性の極性変化
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也
電気学会 パルスパワー・放電合同研究会, ED-11-077(2011)
(平成 23 年 8 月 愛媛大学)
- (6) 部分放電に伴う放射電磁波による油入ブッシング劣化診断
牟田神東達也, 川崎誠, 上野秀樹, 岡田翔
電気学会放電研究会, ED-12-160(2012)
(平成 24 年 12 月 兵庫県立大学)

● 部門大会

- (1) 過渡温度解析に基づいた電力用変圧器の熱劣化推定手法の検討
水谷嘉伸, 高橋紹大, 伊藤哲夫, 柿花邦彦, 牟田神東達也
平成 18 年電気学会 電力・エネルギー部門大会変圧器Ⅱ, No.268(2006)
(平成 18 年 9 月 琉球大学)
- (2) エポキシ樹脂および架橋ポリエチレン中の部分放電による放射電磁波特性の極性変化
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也
平成 23 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, XIX-2 (2011)
(平成 23 年 9 月 東京工業大学)
- (3) 154～275kV 油入変圧器絶縁紙の温度履歴解析に基づく熱劣化評価手法
水谷嘉伸, 高橋紹大, 羽柴靖人, 櫛原一世, 牟田神東達也
平成 24 年電気学会 電力・エネルギー部門大会変圧器Ⅰ, No.343(2012)
(平成 24 年 9 月 北海道大学)
- (4) 絶縁体の物性と部分放電様相の関係
牟田神東達也, 黒石祥斗, 岡田翔, 上野秀樹
平成 24 年電気学会 電力・エネルギー部門大会ケーブルⅣ, No.426(2012)
(平成 24 年 9 月 北海道大学)
- (5) 部分放電における電界強度と放射電磁波の関係
牟田神東達也, 岡田翔, 上野秀樹
平成 25 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 13-E-a1-5 (2013)
(平成 25 年 9 月 横浜国立大学)

● 学会報告

- (1) 固体絶縁材料中の電気トリ一進展と放射電磁波特性の極性変化
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也
第 277 回電気材料技術懇談会, 277-9(2011)
(平成 23 年 7 月 中央電気倶楽部)
- (2) 電気トリ一の進展と放射電磁波の検出・解析
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也
平成 23 年電気関係学会関西連合大会, 29A3-7 (2011)
(平成 23 年 10 月 兵庫県立大学)
- (3) エポキシ樹脂中の部分放電および放射電磁波周波数に関する研究
牟田神東達也, 岡田翔, 上野秀樹
平成 24 年電気関係学会関西連合大会, p-6 (2012)
(平成 24 年 12 月 関西大学)
- (4) 各種条件下における部分放電による放射電磁波
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 森井浩, 牟田神東達也
平成 24 年電気学会全国大会, 2-039 (2012 年)
(平成 24 年 3 月 広島工業大学)
- (5) ウェーブレット変換による部分放電の特徴抽出
牟田神東達也, 羽柴靖人, 森井浩, 黒石祥斗, 上野秀樹
平成 24 年電気学会全国大会, 1-088 (2012)
(平成 24 年 3 月 広島工業大学)
- (6) 部分放電における電界強度と電流波形の関係
牟田神東達也, 櫻井麗翔, 岡田翔, 上野秀樹
平成 25 年電気学会全国大会, 1-066 (2013)
(平成 25 年 3 月 名古屋大学)
- (7) 絶縁油中の部分放電における放射電磁波の極性変化
牟田神東達也, 奈良直也, 古藤正隆, 岡田翔, 上野秀樹
平成 26 年電気学会全国大会 (投稿準備中)
(平成 26 年 3 月 愛媛大学)

● その他研究論文

- (1) 超高压変圧器用絶縁紙の劣化評価
羽柴靖人, 水谷嘉伸, 牟田神東達也
電気評論 2011 年臨時増刊号, pp.56-59 (2011)
- (2) 電気トリーの進展に伴う正・負極性放電による放射電磁波特性の変化
黒石祥斗, 上野秀樹, 羽柴靖人, 牟田神東達也
兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告, No64, pp.13-18 (2011)