

# 電力用油入変圧器の絶縁診断高度化のための部分放電現象に関する研究

著者	芝田 拓樹
発行年	2023-03
その他のタイトル	Partial Discharge Phenomena for Advanced Insulation Diagnostics of Oil-Filled Power Transformers
学位授与年度	令和4年度
学位授与番号	17104甲工第562号
URL	<a href="http://doi.org/10.18997/00009173">http://doi.org/10.18997/00009173</a>

令和4年度 博士学位論文

電力用油入変圧器の絶縁診断高度化のための  
部分放電現象に関する研究

**Partial Discharge Phenomena for Advanced  
Insulation Diagnostics of Oil-Filled Power Transformers**

九州工業大学大学院工学府  
工学専攻電気電子工学領域

芝田 拓樹

令和5年3月

# 要旨

電力用変圧器は、電力システムにおいて主要な機器であり、その安定運用には診断技術が重要である。油入変圧器に対しては油中ガス分析による異常診断が一般的であるが、即応性やオンラインでの状態把握には課題がある。他方、ガス絶縁開閉装置 (GIS) では部分放電 (PD) による UHF 帯 (0.3~3GHz) の放射電磁波を測定する UHF 法による PD 診断が普及してきていることから、変圧器でも UHF 法による診断が油中ガス分析のように一般化されることが考えられる。UHF 法の適用には、PD 現象、特に放射電磁波と関係する PD 電流の高周波特性の理解と解明が必要であるが、油中での PD 電流の広帯域計測は十分に行われていない。放電物理の観点とともに放射電磁波検出の観点からも PD 電流の超広帯域測定が必要である。また、運用中の油入変圧器の絶縁油は温度上昇や経年による劣化、絶縁紙劣化によるフルフルールの生成、流動帯電防止の添加剤含有など、実験室で検討されている室温状態の新油とは異なる状態であり、それらを考慮した検討も必要である。

以上のような背景に鑑み、本研究では、電力用油入変圧器の絶縁油として主に用いられる鉱油を対象に、超広帯域計測により PD 電流特性を明らかにするとともに、その放射電磁波特性を検討した。さらに実運用状態を評価できる装置を提案し構築した。以下に本論文の構成と概要を記す。

第 1 章では、序論として、本研究の背景や変圧器の技術開発動向から取り組むべき課題について述べた。

第 2 章では、実験装置および実験方法として、本研究で使用した超広帯域 PD 電流パルス波形測定システムの構成や仕様および試験設備等を述べた。

第 3 章では、超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の脱気状態の相違と極性効果について述べた。SF<sub>6</sub> ガス中では超広帯域計測により負極性 PD 電流波形では数 10 ps オーダの立ち上がり時間を有することなどが明らかにされているが、油中への適用はなく特性は不明であった。絶縁油は十分脱気し清純にしないと溶存しているガスや水分、異物などが絶縁性能に影響するため、超広帯域計測を適用しこれら影響を明確に理解、評価することを考えた。本章では基本となる鉱油を対象に、脱気状態および交流電圧の極性効果による PD 電流波形の基礎特性を調べた。その結果、油中の“真性放電”だけでなく溶存ガスによる“油中ガス放電”が発生していることや PD 電流波形に明確な極性効果があることを明らかにした。

第 4 章では、超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の経年油と新油の相違について述べた。絶縁油は長期運転に伴う経年劣化を考慮する必要がある。そこで、超広帯域計測を適用

した新油と経年油での PD 電流波形の相違を検討した。また、絶縁油種類の比較として難燃性のシリコン油の新油についても併せて比較検討した。さらに UHF 帯および VHF 帯に感度を有するアンテナを用いた PD 放射電磁波の同期計測も行い、PD 電流との関係を、正準判別分析や多変量解析などの統計解析手法を用いて議論した。その結果、各絶縁油で PD 電流波形には顕著な極性効果が認められ、負極性 PD 電流波形の特徴量を用いて相関関係を比較すると、鉱油とシリコン油では特性に相違が認められたが、経年油と新油では同一の特性が示された。この結果は、PD 放射電磁波の振幅値と負極性 PD 電流波形の特徴量との関係でも同様に示された。さらに線形正準判別分析を行った結果、経年油と新油およびシリコン油で相違がある可能性が示唆された一方で、Wilks の  $\Lambda$  という統計値では有意差があるとはいえないと評価された。経年油と新油の相違有無に関しては、今後さらに測定帯域を拡張した結果による評価が待たれる。

第 5 章では、鉱油中負極性 PD 電流の立ち上がり時間特性の電界利用率依存性と 5G 通信帯域との関係について述べた。鉱油中の PD 電流パルスの立ち上がり時間を電界利用率を変化させて調べるとともに、それらの PD 放射電磁波の周波数特性と 5G 通信で使用される通信帯域との関係を検討した。その結果、鉱油中の PD 電流波形は電界利用率依存性があり利用率が増加するほど立ち上がり時間は増加した。さらに、測定結果に基づき PD 電流波形をガウス波形でモデル化して放射電磁波の周波数特性を検討した結果、鉱油中 PD は 5G 通信で使用されるミリ波帯にピークを示す電磁波が放射される可能性があることがわかった。

第 6 章では、変圧器の実運用状態を模擬した試験検討の一例および試験システムの構築結果を示し、また油中放電現象への光学測定の適用結果を示した。実運用状態の変圧器絶縁診断を考えると、実器環境を模擬できる試験系の確立が必要である。また劣悪な電氣的ノイズ環境では UHF 法による PD 現象の検出が困難となるため、油中放電現象への光学測定の適用も重要である。そこで、実運用状態を模擬した試験条件の一例として、流動帯電防止の観点から鉱油へ添加される BTA が PD 特性に及ぼす影響を超広帯域計測により検討した。その結果、PD 電流の時間変化や PD 放射電磁波強度に BTA 添加は影響がないことを明らかにした。次に油中放電現象への光学測定の適用を検討し、鉱油中放電により発生する炭化水素系分解ガスの発生種や発生タイミングを評価できることが示された。最後に変圧器の実運用状態の絶縁油を模擬できる試験システムを提案・構築した。これにより、実運用状態での絶縁油中 PD 現象だけでなく、今後適用される新たな絶縁油の放電特性や診断手法の検討・評価を可能とする装置を提示した。

第 7 章では、総括として本研究で得られた成果をまとめた。

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1. はじめに.....	1
1.2. 変圧器に関する研究調査の動向.....	4
1.3. 変圧器の異常現象とその診断技術手法.....	9
1.3.1. 油入変圧器の劣化要因と内部での異常現象.....	9
1.3.2. 変圧器の異常診断技術の概要.....	10
1.3.3. 部分放電検出による油入変圧器絶縁診断フロー.....	12
1.4. 超広帯域 PD 電流パルス波形測定の必要性.....	13
1.5. 鉱油中 PD 現象に関する研究動向.....	14
1.6. 本論文の目的と構成.....	17
[第1章の参考文献].....	20
<b>第2章 実験装置および実験方法</b> .....	<b>22</b>
2.1. はじめに.....	22
2.2. 油中 PD 現象の測定装置.....	22
2.2.1. PD 電流パルス測定装置(SHF_PDPW 装置).....	22
2.2.2. PD 放射電磁波の測定装置.....	26
2.3. 絶縁油.....	28
2.4. 実験方法.....	29
2.5. 光学測定装置.....	31
2.6. まとめ.....	32
[第2章の参考文献].....	33
<b>第3章 超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の脱気状態の相違と極性効果</b> .....	<b>34</b>
3.1. はじめに.....	34
3.2. 実験装置と方法.....	34
3.2.1. 実験装置と脱気状態.....	34
3.2.2. 実験方法と基礎絶縁特性.....	36
3.3. 実験結果.....	37
3.3.1. 極性効果.....	37
3.3.2. 脱気状態の影響.....	39
3.4. 考察.....	44

3.4.1. 絶縁油中 PD の波形形成機構.....	44
3.4.2. 測定周波数帯域の重要性.....	46
3.5. まとめ.....	48
[第 3 章の参考文献].....	49
<b>第 4 章 超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の経年油と新油の相違と統計学的手法による波形比較</b> .....	<b>50</b>
4.1. はじめに.....	50
4.2. 実験装置と方法.....	51
4.3. 実験結果.....	53
4.3.1. 部分放電開始電圧と PD 電流波形.....	53
4.3.2. PD 電流特性.....	57
4.4. 考察.....	59
4.4.1. PD 電流波形の統計的比較.....	59
4.4.2. 放射電磁波との関係.....	60
4.5. まとめ.....	69
[第 4 章の参考文献].....	70
<b>第 5 章 鉱油中負極性 PD 電流のピコ秒立ち上がり時間特性と 5G 帯域との関係</b> .....	<b>72</b>
5.1. はじめに.....	72
5.2. 実験装置と方法.....	73
5.3. 実験結果.....	73
5.4. 考察.....	76
5.4.1. SF <sub>6</sub> ガス中 PD との比較.....	76
5.4.2. 5G 通信への影響.....	77
5.5. まとめ.....	80
[第 5 章の参考文献].....	81
<b>第 6 章 光学測定技術の適用と実運用状態を模擬できる試験システムの提案</b> .....	<b>82</b>
6.1. はじめに.....	82
6.2. BTA 添加有無における PD 電流特性.....	83
6.2.1. 実験装置と方法.....	83
6.2.2. 実験結果.....	83
6.3. 油中放電現象への光学測定の適用.....	89
6.3.1. 実験装置と方法.....	89
6.3.2. 実験結果.....	89

6.3.3. 時間分解分光スペクトル測定.....	94
6.4. 実運用状態を模擬できる試験システムの提案.....	96
6.4.1. 電力用変圧器の運用状態.....	96
6.4.2. 試験システムの構築.....	97
6.4.3. 試験システムの検証.....	101
6.5. まとめ.....	102
[第6章の参考文献].....	103
<b>第7章 総括</b> .....	<b>104</b>
7.1. 総括.....	104
7.2. 今後の課題.....	107
[第7章の参考文献].....	108

## 研究業績

## 謝辞

# 第1章 序論

## 1.1. はじめに

人間が生活し社会を継続的に発展させるために、エネルギーの存在は欠かせないものである。限りある資源に対して加速するエネルギー消費量やその環境への影響などの問題を抱えながらエネルギー資源をいかに安定して確保していくかを考えると、電気エネルギー(電力)の有効活用が一つの解となる。電力の安定供給は、脱炭素化とデジタル化、電化の観点から、世界全体で重要な課題である<sup>[1]</sup>。国際エネルギー機関 (International Energy Agency : IEA) によると2022年の電力需要量(図1-1)は前年比2.4%増の見通しとされており、COVID-19からの経済回復で大きく伸びた2021年(5.8%増)に比べて大きく縮小するものの、COVID-19拡大前の5年間(2015~2019年)の平均増加率と同水準であり、2023年の増加率も2022年と同水準と予測されている<sup>[2]</sup>。また、2022年の世界のエネルギー投資(図1-2)は前年比8%増の2兆4,000億ドル、そのうち電力分野への投資は5.6%増の9,800億ドルと予測されており<sup>[3]</sup>、需要・投資ともに今後も増加していくことが予想される。国内では2011年3月の東日本大震災により、電力機器の安全性に加えて災害時の機器の影響評価が求められている。図1-3に示すように納入後30年を超過した高経年変圧器が増加する一方、電力会社の電力料金抑制などの経済的な観点からは、機器の長期的な運用が求められており、一般に運転年数の増大とともに事故率の上昇(図1-4)は避けられない<sup>[4]</sup>。これらのニーズに応え、合理的な維持運用、故障の未然防止、計画的更新を行うために、異常診断・劣化診断技術の高度化が求められている<sup>[5]</sup>。

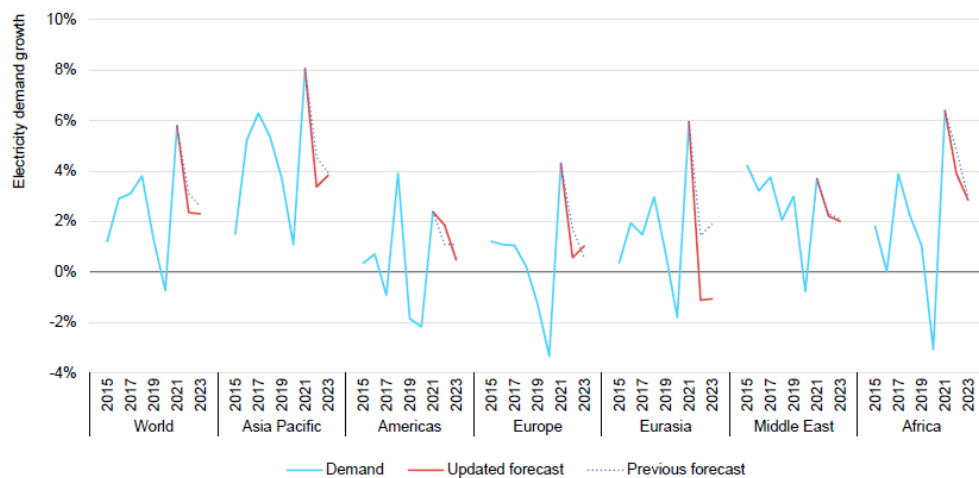


図 1-1. 電力需要の世界的な変化 (2015-2023) <sup>[2]</sup>



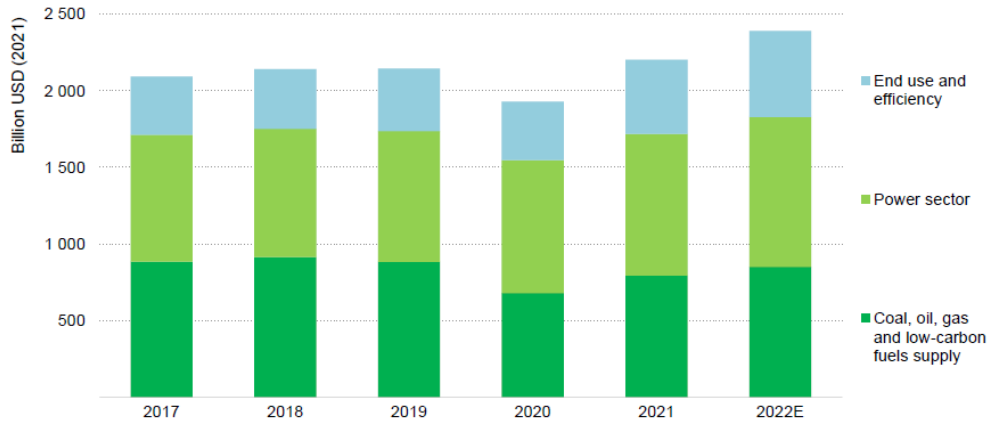


図 1-2. 世界のエネルギー投資の変遷<sup>[3]</sup>

○ 変圧器台数 (500kV~66kV) : 約15,000台

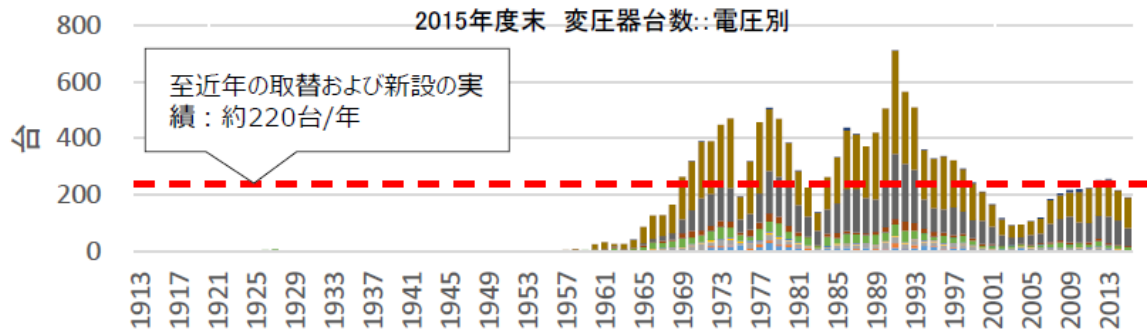


図 1-3. 変圧器台数の分布<sup>[4]</sup>

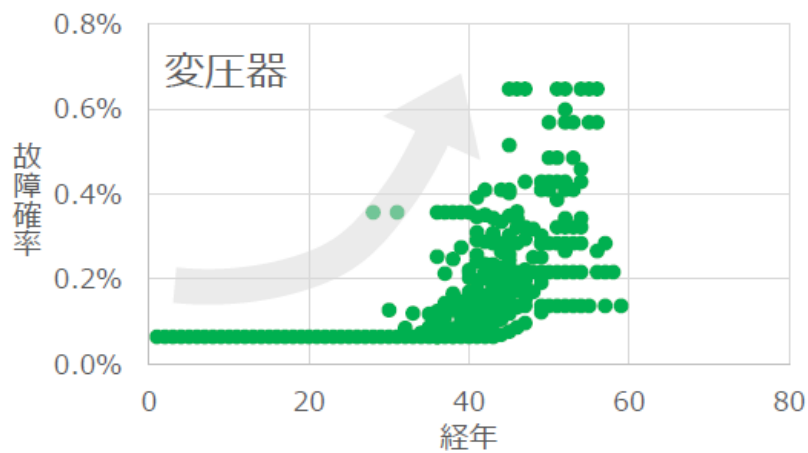


図 1-4. 変圧器の故障確率<sup>[4]</sup>

電力用変圧器は、電力システムにおいて主要な機器であり、その故障はエネルギー供給の停止だけでなく近隣設備の損傷や環境問題の原因となる可能性がある。一方で、電力用変圧器は大型で高価であり交換が容易ではなく数十年といった長期間運用されることから、状態の監視や事故未然防止のための異常診断技術は重要である。変圧器は主に、2つの巻線構造体と両者を磁氣的に効率的に結合させる鉄心、及びこれらを電氣的に絶縁する絶縁体で構成される。機器の絶縁と冷却の観点から、絶縁媒体として、液体では鉱油やシリコン油の他に近年では環境調和性の高いエステル油、気体では空気やSF<sub>6</sub>ガス、固体ではセルローズ紙やフィルム材、エポキシ樹脂などが使用されている。特に電力用変圧器においては、他の絶縁方式に比べ、安価で信頼性が高いことから鉱油とセルローズ紙の複合絶縁が主流となっている。鉱油は変圧器が商用化されて以来使用されており、依然として変圧器の絶縁媒体として重要な役割を担っている。

鉱油を使用した油入変圧器の異常診断としては油中ガス分析による化学的手法が一般的である。油中ガス分析は変圧器内で局所加熱や放電が起こった際に絶縁油や絶縁物が分解し油中に溶存したガスを分析する手法である。運転中の変圧器でも容易に絶縁油が採取でき内部異常の有無や状態が高感度に検出できることから、変圧器の保守管理として世界的に確立している手法の一つである<sup>[6-9]</sup>。しかし、油中ガス分析手法は異常現象を直接的に検出する手法ではなく、異常現象が発生したときに派生的に生じる分解ガスを分析して異常現象を推測する方法であるため、異常現象の診断には限界があり<sup>[8]</sup>、異常発生から検出までの即応性やオンラインでの状態把握には課題を残している。近年のIoT技術やAIの適用を考えると、即応的で放電現象を直接測定する手法の確立が必要である。

放電現象の測定として、絶縁破壊 (Breakdown : BD) の前駆現象である部分放電 (Partial Discharge : PD) が注目されている。変圧器内の巻線やリード線、絶縁支持物などにおいて発生するPDは、放置すると絶縁破壊事故に至る場合があるため、絶縁破壊事故を未然に防止するためにPD検出・評価手法が検討されている。PD検出はPDに起因する電流、放射電磁波、音波 (弾性波)、光を検出することで行われ、その信号を評価することで異常状態を判定する<sup>[5, 11-13]</sup>。これらの信号の中で、変圧器においてはPDパルス電流を測定する電気パルス法と絶縁油中を伝搬する音波を測定する音響信号法が主に実用化されている<sup>[14]</sup>。PD検出手法は、油中ガス分析に比べ発生現象に対する時間応答性が良く、急激な絶縁性の劣化の診断が可能である利点を持つ。しかし、現在実用化されているこれらの手法は、PDの原因とその信号との関係および電磁ノイズの影響などによる検出感度ならびに精度に課題が残されている<sup>[15]</sup>。従って、最新の測定技術や解析技術等を適用し、従来のPD検出技術の課題を

克服することにより、増大する経年変圧器に対し有効な診断技術になり得ると考えられる。

従来の変圧器 PD 検出手法に対し、PD により放射される電磁波を 0.3~3 GHz の極超短波と呼ばれる UHF 帯 (Ultra High Frequency) で検出する UHF 法は<sup>[16]</sup>、放電電流や弾性波と比べて比較的長い距離を伝搬できるため、異常発生箇所となる放電源から比較的離れた位置でも検出できることや、30~300 MHz の超短波と呼ばれる VHF 帯 (Very High Frequency) までの通信・放送波などのノイズの影響を受けにくいことなどの利点を持ち、ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear : GIS) などの電力機器で適用が進められている。GIS だけでなく、変圧器や電力ケーブルでも UHF 法が適用され始めていることから<sup>[17,18]</sup>、変圧器においても UHF 法による診断が油中ガス分析のように一般化されることが考えられる。UHF 法の一般化ならびに高度化には、絶縁油中での PD 現象のより進んだ理解が重要となり、特に放射電磁波と関係する PD 電流波形の正確な観測と理解が重要である。しかしながら、絶縁油中の放電は絶縁油の経年状態や水分やガスあるいは異物等の油中混入物の影響を受けるため、SF<sub>6</sub>などのガス中放電より複雑であり、且つ絶縁耐力も高く PD 電流パルスの急峻さ、即ち測定に必要な周波数帯域は不明であり完全に解明されているわけではない。

近年、PD 電流パルスに対する超広帯域測定技術が確立してきたことで、UHF 帯以上の数 10 GHz までの超広帯域な放電電流パルスを測定することが可能になっており、SF<sub>6</sub> ガス中の PD 電流の検討が進められているが<sup>[19]</sup>、油中の PD 電流パルスはこれまで UHF 帯の帯域までしか検討されていない<sup>[20]</sup>。従って、この超広帯域測定技術を油中放電に適用することで、油中 PD 現象を明らかにすることが期待できる。また、運用中の油入変圧器の絶縁油は温度上昇や経年による劣化、絶縁紙劣化によるフルフラールの生成、流動帯電防止の添加剤含有など、実験室で検討されている室温状態の新油とは異なる状態であり、それらを考慮した検討も必要である。

以上のような背景に鑑み、本研究では電力用油入変圧器の監視診断・予防保全を高度化することを目的とし、変圧器用絶縁油の中でも特に鉱油を主対象として、超広帯域計測により PD 電流の基礎特性、特に極性効果や経年油と新油の相違、あるいは油種類による相違等を、統計解析手法を導入して詳細に明らかにする。また UHF 法による診断の観点から、放電放射電磁波特性を検討する。さらに、これらの成果に基づき実運用状態を評価できる装置を提案し構築する。

## 1.2. 変圧器に関する研究調査の動向

表 1-1 に、変圧器に関する国内外機関の研究調査動向として、電気学会調査専門委員会と電気協同研究会および CIGRE (International Council on Large Electric Systems) の技術報告書 (Technical Brochure : TB) から「変圧器 (Transformer)」をキーワードに関連性の高いと思われるものを抽出した結果を示し、それぞれ代表的なものを抜粋したものを図 1-5 に示す。なお、CIGRE は 1921 年にパリで設立され、日本 CIGRE 国内委員会は 1953 年に設立されており、最初の TB は TB 12 が 1969 年に発行されており、“Transformer”の用語が入った最初の TB は TB 7 で 1980 年に発行されている。

同表より、初期は試験法や運転指針に関する調査報告が多く、近年は保守や保全、信頼性や診断といった内容に移行していることがわかる。

国内では 1980 年代から「予防保全」、「設備保全」、「保守管理」という用語がタイトルに入り始め、2000 年代には「運用限度評価」、「信頼性維持」、「点検合理化」、2010 年代には「異常診断」、「保守診断」、「品質管理基準」、「保守・点検ガイドライン」という用語がタイトルに入るようになっており、「診断」は 2010 年代になり使用され始めたことがわかる。なお、保守診断以外では、環境、不燃性・難燃性、リサイクル、材料等の用語が取り上げられている。また、「部分放電 (PD)」という用語がタイトルに入った変圧器に関する報告書はなかった。

他方、CIGRE の TB では、PD (partial discharge) の用語がタイトルに入ったものがある。最新の 2022 年発行の TB861 では「Improvements to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers」、2017 年発行の TB676 では「Partial discharges in transformers」のように PD が入っている。また、2000 年代から “monitoring”, “assessment” という用語が入った TB が発行されているが、“diagnostic”の用語は 2004 年発行の TB254 「Dielectric response methods for diagnostics of power transformers」に初めて見られる。なお、HVDC に関係する報告も多い。

以上のように、1960 年代後半以降の高度経済成長期に製造された大量の油入変圧器が設計期待寿命とされている 30 年を超えて現在も数多く運用されている中で、「診断」や「部分放電」といったキーワードが近年特に重要視されていることが分かる。

表 1-1-(1). 変圧器に関する調査研究の変遷

	1940-1989
電気学会 調査専門委員会 (30件)	1) 油入変圧器運転指針, 湿気に関する術語・記号・単位, 有機材料の電氣的性質の湿度特性, No.1-018 (1957) 2) 変圧器の衝撃電圧試験における故障検出, No.1-037 (1959) 3) 油入変圧器試験指針, 励磁系電圧速度に関する調査報告, No.1-067 (1965) 4) 冷却塔水冷式変圧器の温度上昇限度, UHV系統の絶縁協調に関する調査報告, 超高圧地中送電線による通信線への電磁誘導に関する研究, No.1-109 (1974) 5) V-t特性からみた500kV油入変圧器の交流絶縁試験の検討, No.2-047 (1976) 6) 乾式変圧器の運転指針について, わが国における電力用並列コンデンサの設置状況, 稼働状況および無効電力配分状況に関する調査報告, No.1-115 (1976) 7) 長ギャップ放電の測定と実験技術, 試験用変圧器の使用上の問題点と対策, No.1-116 (1977) 8) 油入変圧器用ブッシングの定格電流選定指針 - 気中 - 油中用ブッシング -, No.1-124 (1978) 9) 変圧器内外規格比較対照表, 磁気バブル技術の現状, No.1-129 (1979) 10) 油入変圧器試験指針, No.2-119 (1981) 11) 変圧器内外規格比較対照表(改訂), 我が国における電力用並列コンデンサの設置状況, 稼働状況および無効電力配分状況に関する調査報告, No.1-140 (1985)
電気協同研究会 (32件)	1) 既設変圧器の格上使用/既設発電機の格上使用, 第2巻 第1号 (1946) 2) 屋内配線用電流制限器の研究/柱上変圧器焼損防止器の研究/蒸気タービン発電機の調相機運転規程, 第3巻 第5号 (1947) 3) 電力用蓄電器の諸問題/変圧器低圧側移行電圧保護装置設置要綱, 第9巻 第6号 (1953) 4) 単相三線式低圧配電方式, 第11巻 第4号 (1955) 5) 我国における低圧配電線及び負荷の実態, 第17巻 第5号 (1961) 6) 400 k V級送電, 第18巻 第2号 (1962) 7) 負荷時タップ切換変圧器(1), 第20巻 第5号 (1964) 8) 負荷時タップ切換変圧器(2), 第21巻 第5号 (1965) 9) 柱上変圧器の寿命と負荷管理, 第23巻 第6号 (1967) 10) 負荷時タップ切換変圧器研究の成果, 第24巻 第3号 (1968) 11) 20 k V級架空配電方式, 第27巻 第1号 (1971) 12) 特別高圧需要家受電設備, 第29巻 第4号 (1973) 13) 20 k V級配電方式 (地中編), 第30巻 第5号 (1974) 14) 大容量変圧器の事故防止対策, 第30巻 第6号 (1974) 15) 大容量変圧器現地作業基準, 第31巻 第3号 (1975) 16) 変電所低騒音化対策, 第33巻 第2号 (1977) 17) 配電用負荷時タップ切換変圧器の標準化, 第35巻 第4号 (1979) 18) 油中ガス分析による油入機器の保守管理, 第36巻 第1号 (1980) 19) 変圧器ブッシングの耐震設計, 第38巻 第2号 (1982) 20) 変電機器の省エネルギー化方策と効率運転, 第40巻 第4号(1984) 21) 絶縁設計の合理化, 第44巻 第3号 (1988)
CIGRE Technical Brochure (33件)	1) Non-Conventional Current and Voltage Transformers, TB 7, WG 34.03 (1980)

表 1-1-(2). 変圧器に関する調査研究の変遷

	1990-2009
電気学会 調査専門委員会 (30件)	<p>12) 油入変圧器運転指針, クライオエレクトロニクスの現状と将来, No.1-143 (1989)</p> <p>13) 変圧器の予防保全技術の現状とその動向, No.2-344 (1990)</p> <p>14) 不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向, No.459 (1993)</p> <p>15) 変圧器の環境適合技術の現状とその動向, No.575 (1995)</p> <p>16) 変圧器の解析技術の現状とその動向, No.701 (1998)</p> <p>17) 液体中の高電界現象と機器適用技術 ~次世代の液体絶縁技術に向けて~, No.730 (1999)</p> <p>18) 絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態, No.752 (2000)</p> <p>19) 変圧器の試験, 測定技術の現状とその動向, No.816 (2001)</p> <p>20) 電力用磁性材料とその有効利用, No.921 (2003)</p> <p>21) 経年変圧器の信頼性維持技術の現状と動向, No.922 (2003)</p> <p>22) 変圧器の環境適合性向上技術の現状とその動向, No.1023 (2005)</p> <p>23) 変圧器の不燃性・難燃性向上技術の現状と動向, No.1090 (2007)</p>
電気協同研究会 (32件)	<p>22) 変電設備保全の高度化・効率化, 第50巻 第2号 (1994)</p> <p>23) 送変電設備の現地耐電圧試験合理化, 第53巻 第4号 (1997)</p> <p>24) ガス絶縁変圧器の保守管理, 第54巻 第5号 (1998)</p> <p>25) 変電設備の点検合理化, 第56巻 第2号 (2000)</p> <p>26) 環境と共生する電力流通技術, 第57巻 第4号 (2001)</p> <p>27) 配電資機材リサイクル技術, 第58巻 第6号 (2002)</p> <p>28) 変電設備の運用限度評価, 第61巻 第2号 (2005)</p> <p>29) 密閉形変電設備の劣化保全技術高度化, 第61巻 第3号 (2005)</p> <p>30) 電力用変圧器改修ガイドライン, 第65巻 第1号 (2009)</p>
CIGRE Technical Brochure (33件)	<p>2) Paper-oil insulated measurement transformer, TB 57, WG 23.07 (1990)</p> <p>3) Thermal aspects of transformers, TB 96, WG 12.09 (1995)</p> <p>4) Effect of particles on transformer dielectric strength, TB 157, WG 12.17 (2000)</p> <p>5) Static electrification in power transformers, TB 170, JWG 12/15.13 (2000)</p> <p>6) Life management techniques for power transformers, TB 227, WG A2.18 (2003)</p> <p>7) Analysis of HVDC thyristor converter transformer performance, TB 240, JTF B4.04/A2.01 (2004)</p> <p>8) Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, TB 254, TF D1.01.09 (2004)</p> <p>9) Recent developments on the interpretation of dissolved gas analysis in transformers, TB296, JTF D1.02/A2.11 (2006)</p> <p>10) Guide on transformer lifetime data management, TB 298, WG A2.23 (2006)</p> <p>11) Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, TB 322, TF D1.01.10 (2007)</p> <p>12) Mechanical-condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA), TB 342, WG A2.26 (2008)</p> <p>13) Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers, TB 343, WG A2.27 (2008)</p> <p>14) Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, TB 349, WG A2.30 (2008)</p> <p>15) Copper Sulphide in Transformer Insulation, TB 378, WG A2.32 (2009)</p>

表 1-1-(3). 変圧器に関する調査研究の変遷

	2010-2022
電気学会 調査専門委員会 (30件)	<p>24) 油入変圧器保守診断技術の最新動向, No.1191 (2010)</p> <p>25) 変圧器使用材料とその適用技術に関する最新動向, No.1271 (2012)</p> <p>26) 電氣的・音響的手法による変圧器の異常診断技術の最新動向, No.1336 (2015)</p> <p>27) 電力用磁性材料の評価・活用技術調査報告, No.1402 (2017)</p> <p>28) 変圧器国内外規格の動向と比較調査, No.1404 (2017)</p> <p>29) 変圧器の機能・性能の多様化に関する最新動向, No.1478 (2020)</p> <p>30) 電力機器・設備において実用化されている絶縁材料と最新の診断技術, No.1504 (2021)</p>
電気協同研究会 (32件)	<p>31) 負荷時タップ切換装置の保守・点検ガイドライン, 第67巻 第4号 (2011)</p> <p>32) 電力用変圧器の分解輸送・現地作業品質管理基準, 第69巻 第2号 (2013)</p>
CIGRE Technical Brochure (33件)	<p>16) Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings, TB 414, WG D1.01 (2010)</p> <p>17) Guide for Transformer Maintenance, TB 445, WG A2.34 (2011)</p> <p>18) Modern Techniques for Protecting, controlling and monitoring power transformers, TB 463, WG B5.05 (2011)</p> <p>19) Guide for Transformer Fire Safety Practices, TB 537, WG A2.33 (2013)</p> <p>20) Study of Converter Transients Imposed on the HVDC Converter Transformers, TB 609, WG B4.51 (2015)</p> <p>21) Guide on transformer intelligent condition monitoring (TICM) system, TB 630, WG A2.44 (2015)</p> <p>22) Transformer reliability survey, TB 642, WG A2.37 (2015)</p> <p>23) HVDC transformer insulation: oil conductivity, TB 646, JWG A2/D1.41 (2016)</p> <p>24) Partial discharges in transformers, TB 676, WG D1.29 (2017)</p> <p>25) Moisture measurement and assessment in transformer insulation - Evaluation of chemical methods and moisture capacitive sensors, TB 751, WG D1.52 (2018)</p> <p>26) Transformer bushing reliability, TB 755, WG A2.43 (2019)</p> <p>27) Condition assessment of power transformers, TB 761, WG A2.49 (2019)</p> <p>28) Field experience with transformer solid insulation ageing markers, TB 779, JWG A2/D1.46 (2019)</p> <p>29) Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA), TB 812, WG A2.53 (2020)</p> <p>30) Dielectric performance of insulating liquids for transformers, TB 856, WG D1.70 TF3 (2021)</p> <p>31) On-Site Assembly, On-Site Rebuild, and On-Site High Voltage Testing of Power Transformers, TB 857, WG A2.59 (2021)</p> <p>32) HVDC transformer failure survey results from 2013 to 2020, TB 859, AG B4.04 (2021)</p> <p>33) Improvements to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers, TB 861, JWG A2/D1.51 (2022)</p>



図 1-5. 変圧器に関する調査研究の変遷(表 1-1 の抜粋)

### 1.3. 油入変圧器の異常現象とその診断技術手法

#### 1.3.1. 油入変圧器の劣化要因と内部での異常現象

変圧器内部の構成材料は、コイル導体や鉄心材料、絶縁紙やプレスボードなどのセルローズ系絶縁物、絶縁油などの多様な材料からなっている。内部異常は、これらの各種絶縁材料が、熱的、機械的、電氣的、環境的要因により劣化することにより生じる。これらの劣化現象は、経年の要素が加わりさらに複雑となる。図 1-6 に、油入変圧器の異常と劣化による変圧器内部絶縁材料の状態変化を示す。変圧器の異常としては放電や過熱異常があり、劣化としては主に酸化劣化により絶縁性能や機械的性能の低下を生じる。それら異常や劣化によって、絶縁油や絶縁紙の炭化水素系物質の状態変化が生じ、 $C_2H_6$ や $C_2H_2$ などの可燃性ガスやフルフルールなどが生成される。

図 1-7 に、油入変圧器の劣化要因とそれに伴う変圧器内部での異常現象ならびに機能への影響を示す。同図に示すように、変圧器の寿命の支配的要因は熱的要因である。コイル絶縁紙の機械的強度が熱的ストレスによって低下し、変圧器の外部で短絡や地絡事故が発生した際、事故電流による電磁機械力に耐えることができず絶縁紙の破れを引き起こし、結果として絶縁破壊に至る。他方、寿命以外にも絶縁油や絶縁物の劣化により絶縁耐力低下や PD 発生が引き起こされるため、この PD を検出できれば事故や故障の未然防止につながり、さらにその危険度を判定することができれば、的確な保守および更新計画を立て設備資産運用の効率化を図ることが可能となる。従って、PD 検出法は、増大する高経年変圧器に対して有効な診断技術となると考えられる。



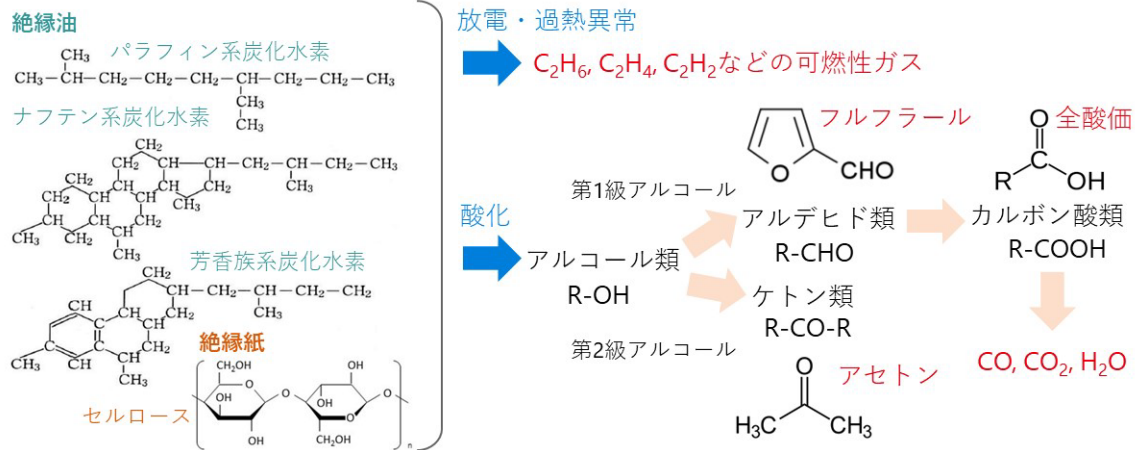


図 1-6. 油入変圧器の異常と劣化による絶縁材料の状態変化

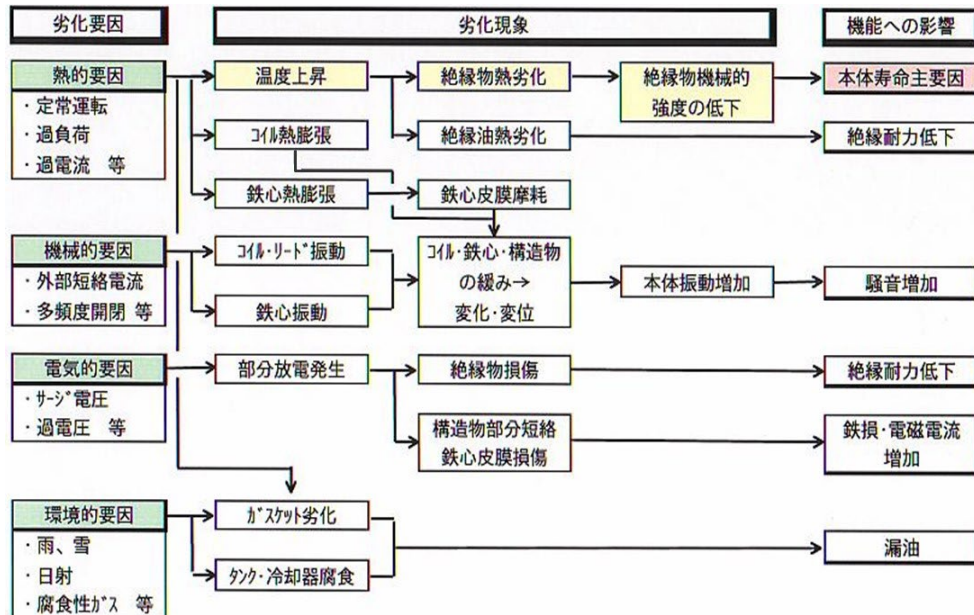


図 1-7. 油入変圧器の劣化要因と異常現象の分類

### 1.3.2. 油入変圧器の異常診断技術の概要

油入変圧器の保守管理においては外観検査の他に、内部異常に対して電氣的、光学的、化学的、音響的手法によって絶縁状態が監視・診断され、事故の未然防止と故障の早期発見が図られている。表 1-2 に、従来から実施されていたものと近年実施されるようになった変圧器の異常診断手法について、診断手法ごとの利点および課題と併せて示す<sup>[5]</sup>。本研究では、この中でも特に近年 PD 測定技術として大きく進歩してきており、オンライン監視が可能で PD 発生箇所の特異性が高い精度で行えると期待されている UHF 法に着目している。

表 1-2. 従来および最新の油入変圧器の異常診断手法<sup>[5]</sup>

手法	異常現象	診断手法	測定法	利点	欠点(課題)	オンライン監視	
1	音響的手法	AE法 (Acoustic Emission) (音波測定法)	部分放電により発生する周波数10kHz~2MHzの超音波を、音響センサや光ファイバセンサで検出する手法	・装置が単純 ・伝達速度が音速のため測定信号の位相差からの位置標定が比較的容易 ・音響の干渉には敏感であるが電磁干渉には影響が少ない ・既設器に適用可能	・複雑な構造物内で振動があると検出感度が低下する ・音響信号強度と部分放電の規模は、放電源の種類や測定周波数などにも依存するため、それらの関係は明確ではない	可能	
2	部分放電	UHF法 (Ultra High Frequency) (電磁波測定法)	部分放電により発生するVHF(30~300MHz)、UHF(300MHz~3GHz)帯域の電磁波を検出する手法	・外部ノイズに強い ・位置標定が可能 ・内部にセンサを取り付ければ高感度が得られる	・放電電荷量への校正法の確立 ・位置標定精度の向上 ・最適センサ、取付位置、センサ数などの理論的裏付けのある決定 ・シミュレーションや波形解析による電磁波伝搬現象の解明	可能	
3		壁面センサ測定法	部分放電発生時に流れるタンクの充電電流をタンク壁に面接触させたコンデンサにより検出する手法(周波数帯域5~20MHz)	ERA法に比較して、測定系のインピーダンスを極力排除した測定が可能となり、測定感度が高い	・ERA法による見かけの放電電荷量との比較が課題 ・モールド変圧器など接地されていない箇所を測定する場合、間接的な測定となり感度が低下する	可能	
4		従来法、IEC法 (IEC60270に準拠) ERA法 (Electrical Reserch Assosiation)	部分放電に伴い発生し、回路中を流れるパルス電流(数10~数100kHz)を検出する手法	見かけの放電電荷量を測定することにより、部分放電の大きさを示す目安として用いられる	・位置標定を行うことは困難 ・系統誤電中の異常監視はノイズの影響を受けやすい	不可	
5		電氣的 手法	FRA (Frequency Response Analysis) (周波数応答解析)	電圧、電流波形から得られる伝達関数を低周波から高周波(数10~数MHz)まで測定し、伝達関数を比較検出する手法	従来の低周波での短絡インピーダンス測定に比べ巻線の軽微な変化を検出可能	・初期データとの比較で診断するため、初期データがない既設器の診断が難しい ・初期データとの変化から異常様相、異常箇所、異常量を特定することが課題	不可
6	従来法 短絡インピーダンス法		変圧器の短絡インピーダンスを測定し、その変化率により巻線の変化を推定する手法	・測定が比較的簡単 ・規格等で規定されている	巻線や鉄心の微小な変化の検出は困難	不可	
7	RVM (Return Voltage Measurement) (回復電圧測定法)		供試器に直流電圧を印加後短絡、開放して、供試器に発生する回復電圧と時定数を測定し、このRVM特性とX-Y絶縁モデルとの比較で水分量を計算する手法	油-紙絶縁系全体の水分量の外部診断が可能	・水分量がしばしば他の方法より高い ・形状と油特性の依存性が考慮されない ・水分量の変化を油と絶縁物に分離することが難しい	不可	
8	油浸紙、 油の劣化 (水分異常)	PDC (Polarization Depolarization Current) (分極、脱分極電流)	絶縁紙に直流電圧を印加し、分極電流および電圧印加をやめて試験片を短絡した時の脱分極電流を測定し、その電流の時間特性とX-Y絶縁モデルの時間特性を比較することで、水分量を計算する手法	・油-紙絶縁系全体の水分量の外部診断が可能 ・絶縁紙の水分量と劣化を、RVMに比べ、より精度よく診断可能	絶縁物の温度に大きく依存するため、温度測定が極めて重要	不可	
9		FDS (Frequency Domain Spectroscopy) (周波数スペクトル分析)	周波数に依存する電氣的キャパシタンスと誘電正接の測定結果と、あらかじめ計算してあるX-Y絶縁モデルの水分とキャパシタンス、誘電正接の関係グラフより、水分量を計算する手法(周波数帯域0.0001~1kHz)	・油-紙絶縁系全体の水分量の外部診断が可能 ・絶縁紙の水分量と劣化を、RVMに比べ、より精度よく診断可能	絶縁物の温度に大きく依存するため、温度測定が極めて重要	不可	
10	光學的 手法	絶縁油の分析	光学診断	硫黄を含む化合物を高温で燃焼させ酸化硫黄(SO)を生成し、SOとオゾンで化学発光反応する光を光電子増倍管で硫黄を検出する手法	硫化腐食を発生させる、絶縁油の添加剤DBDSを化学的分析に比べ、短時間で分析可能	硫黄分以外の検出はできない	不可
11		光学診断 (分散染色法)	絶縁油に浮遊する絶縁紙のセルロース繊維に白色光を照射し、その分散色の変化で劣化度合いを検出する手法	従来法に比べ、絶縁物の劣化度合いを非破壊評価できる	色の変化と劣化の度合いの定量的検討が必要	不可	
12		光学診断 (吸光度差測定)	劣化度合いに応じて変化する絶縁油や絶縁紙の2波長間の吸光度差を検知する手法	・絶縁物の劣化度合いを非破壊評価できる ・水分含有量も測定できる	・事前に絶縁紙の平均重合度と反射吸光度差からマスターカーブの作成が必要 ・劣化の評価は、初期データとの比較が必要	不可	
13	油浸紙の劣化	従来法 平均重合度による診断 (JEM1455)	絶縁紙を銅エチレンジアミン溶液に溶解し、毛細管粘度計で粘度を測定し、平均重合度を計算で求める手法	測定実績が数多くあり、従来から余寿命診断の基本的な測定法として使用されている	変圧器内部の絶縁紙を採取する必要があるため、内部構造物の表面部分の採取しかたで、巻線内部の平均重合度を直接測定することはできない	不可	
14		化学的手法	従来法 フルフラール定量分析	絶縁紙の熱劣化によって生成するフルフラール量を定量分析し、巻線絶縁紙質量に対するフルフラール量の比率により寿命を判定する手法	平均重合度との関係が確認されており、絶縁紙を採取しなくても油中ガス分析をすることにより、絶縁紙の余寿命診断が行える	・絶縁物中のフルフラール量で診断するため、絶縁油の入れ替えを助案する必要がある ・巻線絶縁紙の正確な質量を入手する必要がある ・平均重合度との関係は、誤差が大きく継続的なデータ蓄積が必要	可能
15	部分放電 過熱 経年劣化	従来法 油中ガス分析 (DGA) (Dissolved Gas Analysis)	絶縁油から対象ガスを抽出し、抽出した対象ガスの濃度を定量化する手法	機器から容易に油をサンプリングでき、長年の機器故障とガスパターンの検討により、故障の原因を解析可能	故障の部位を厳密に特定することは困難	可能	

### 1.3.3. 部分放電検出による油入変圧器絶縁診断フロー

PD 検出に基づく電力機器の絶縁診断の目的は、PD 現象発生の有無に始まり、その発生箇所や絶縁異常状態の同定、危険度判定ならびに余寿命推定に至る幅広いものである。これらを信頼性高く実施するためには、(1) PD 現象、(2) 放電信号の伝搬特性、(3) 信号を取得するセンサ特性、(4) 取得信号の解釈・判断に関する4つの項目を体系的且つ総合的に考える必要がある<sup>[21]</sup>。この絶縁診断の考えを図1-8にまとめる。以下に、変圧器の絶縁診断技術における各診断フローの検討課題を述べる。

#### (1) PD 現象の把握

変圧器内部での放電現象は、発生位置の絶縁構成、発生時の印加電圧などにより異なる。また、油入変圧器の絶縁油は温度上昇や経年による劣化、水分量や溶存ガス、異物の混入などにより絶縁状態は影響を受けるため、それらを考慮した検討も必要である。さらに、絶縁破壊の危険度判定ならびに余寿命推定には、PD 現象の経時変化の特徴や破壊メカニズムの解明が必要となる。即ち、取得するPD放射電磁波の起源となる放電現象を理解しないことには、放電状態の把握や予測、原理的に最適なセンサや測定システム選定の判断・構築が困難となる。

#### (2) PD 信号の伝搬特性

PD に伴って発生する信号として、電磁波、超音波、分解ガス、光などがある。これらはセンサで測定するために、そのセンサ位置までの内部構造物に依存する伝搬特性を理解する必要がある。変圧器の場合、タンク壁や鉄心などの金属性の構造物に依存する電磁波モード特性および最短の信号伝搬経路、誘電率の異なる絶縁材料の多層構造による伝搬速度への影響がある。

#### (3) PD 信号を取得するセンサの特性

実器に適用するセンサは、診断目的に応じた信号を取得できるよう、感度、周波数帯域、時間応答性、外部ノイズとの識別等を考慮して開発・設計する必要がある。また、上述した伝搬特性などを考慮した取り付け位置、配置、個数などの選定も重要である。従って、PD 現象と信号伝搬特性の検討結果に基づき、センサの最適化について検討する必要がある。

(4) 取得信号の解釈・判断

取得した PD 放射電磁波信号に基づき絶縁診断を実施するためには、取得する信号の起源である PD 現象の理解が基礎となる。また、診断目的に応じたデータ取得の方法、形式 (周波数領域, 時間領域など), 解析手法の選定が重要である。

信頼性の高い診断を行うためには、以上のような体系的かつ相互的な診断フローの構築が必要となる。

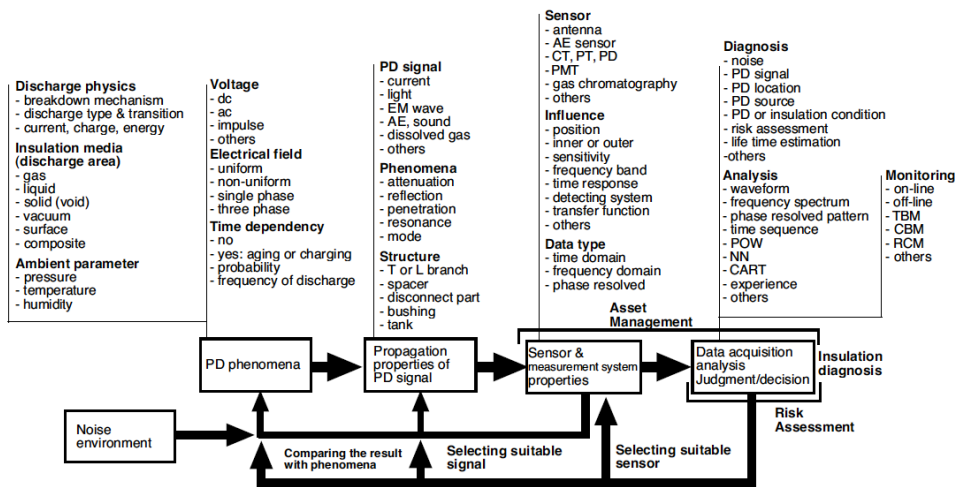


図 1-8. PD 検出に基づく電力機器絶縁診断のコンセプト(絶縁診断フロー) [21]

1.4. 超広帯域 PD 電流パルス波形測定の必要性

図1-9に、PD 電流パルスの超広帯域測定の必要性と考え方を模式的に示す[22]。ここでは UHF 法を対象としてPD電流パルス波形と放射電磁波の関係を述べる。

UHF法による絶縁診断では、測定された放射電磁波信号 $V_{em}(t)$  から、放電の様相や絶縁異常の状態、さらには寿命推定などの診断を行うことになる。放電源から放射される電磁波は、放電電流 $i_p(t)$  に依存する。特に、放電源から十分離れた遠方界での電磁波振幅強度は、電流の時間変化 $di_p(t)/dt$  に依存するため、 $i_p(t)$ の特に正確な測定や理解が望まれる。 $i_p(t)$ による放射電磁波 $V_{pd}(t)$ は、測定点まで伝搬していく過程で減衰や反射、分散特性などにより変歪する可能性があり、測定位置での波形 $V_{pd}'(t)$ は $V_{pd}(t)$ とは一般に異なる。さらに、この $V_{pd}'(t)$ は測定波形とならず、測定波形 $V_{em}(t)$ は、測定系の特性、即ち、使用するアンテナや測定機器、同軸ケーブルなどの特性の影響を受け、 $V_{pd}'(t)$ から変化する。従って、測定波形 $V_{em}(t)$ に基づきPD 現象を議論するには、これら電磁波の放射特性や伝搬特性、さらに計測系の特性を理解することが重要となる。そのためには、理論的解析との比較検討が必要である。実現象を

正確に測定した電流波形  $i_p(t)$  を有していれば、これを入力データとして FDTD (Finite Difference Time Domain method) 法などの電磁界解析により理論特性を検討することが可能となる。

他方、放電現象の理解には、 $i_p(t)$  に基づき、そのピーク値  $I_p$  や積分による電荷量  $q$  などの電氣的な情報を得ることができる。この  $I_p$  や  $q$ 、あるいは、放射電磁波  $V_{pd}(t)$  を考える上で重要となる  $i_p(t)$  の立ち上がり時間  $t_r$  は、測定周波数帯域に影響を受ける<sup>[19, 23]</sup>。そのため、放電現象理解の観点からも正確な電流波形  $i_p(t)$  を測定する必要がある。以上のように、 $i_p(t)$  を実現象に応じた精度で正確に測定することは、PD 現象ならびに測定電磁波信号の理解ならびに両者の関係をよりよく理解するために重要であるといえる。このために、超広帯域測定は必要である。

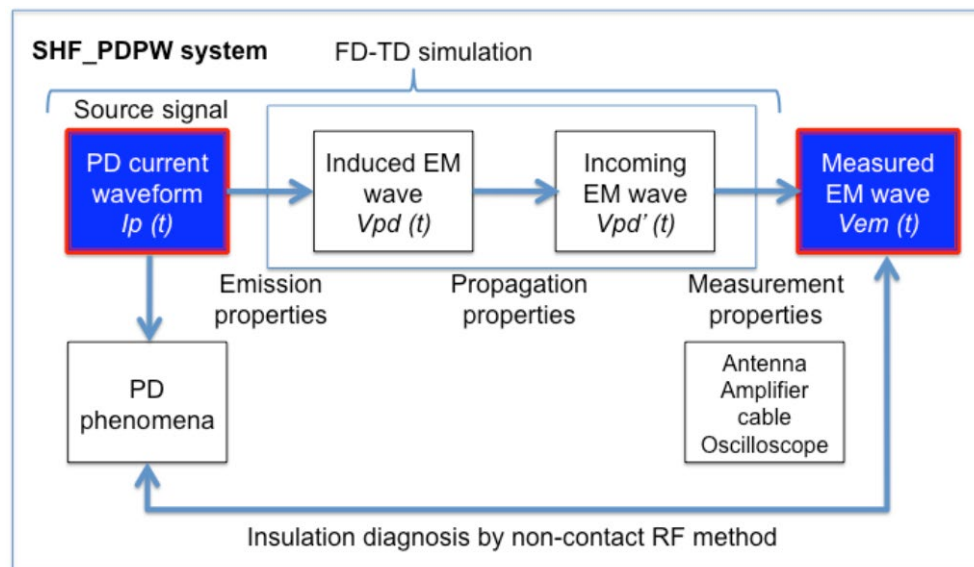


図 1-9. PD 電流パルスと放射電磁波との関係による超広帯域測定の重要性<sup>[22]</sup>

### 1.5. 鉱油中 PD 現象に関する研究動向<sup>[24]</sup>

N. Pattanadach は、鉱油の部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception Voltage : PDIV) および PD 特性を電極構成や鉱油の状態および試験方法の観点から調査している。図 1-10 と図 1-11 に PDIV 測定の試験回路図とセットアップを示す。PD パルス電流は  $50 \Omega$  のシャント抵抗で検出し、 $2.2 \text{ GS/s}$ 、 $500 \text{ MHz}$  のオシロスコープで測定している。図 1-12 に、正極性 PD パルス電流波形例を示す。PD 電流ピークは約  $0.2 \sim 1.3 \text{ mA}$ 、持続時間は  $0.6 \sim 9.3 \mu\text{s}$ 、立ち上がり時間は  $40 \sim 570 \text{ ns}$  の結果となっている。図 1-13 に、油中の水分含有量と油温度の影響検討に使用している試験容器を示す。容器外部からヒーターと加熱ブランケットを使用

して油を加熱している。表 1-3 に、水分量と油温を変化させた場合の PD 電流パルス特性を示す。鉱油の温度が室温から 40 °C に上昇すると電流ピークと持続時間の最大値は減少し、40 °C から 90 °C に上昇すると電流ピークと持続時間の最大値は増加する傾向があり、さらに立ち上がり時間の最大値は温度の上昇とともに増加したと述べている。実運用時には油温は変化するため、実運用状態を模擬する試験容器では油温を変化させて PD 特性を評価することが必要であるといえる。

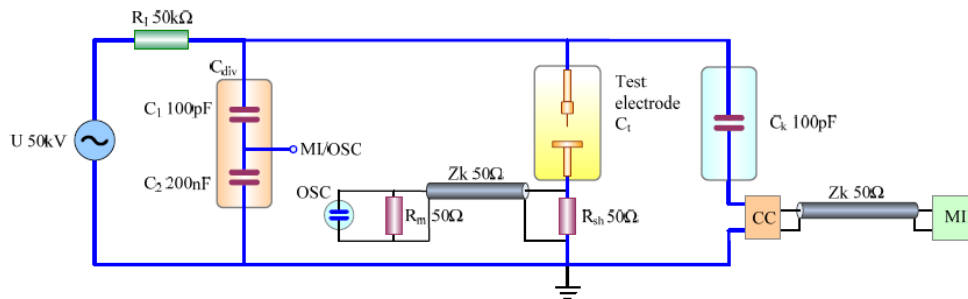
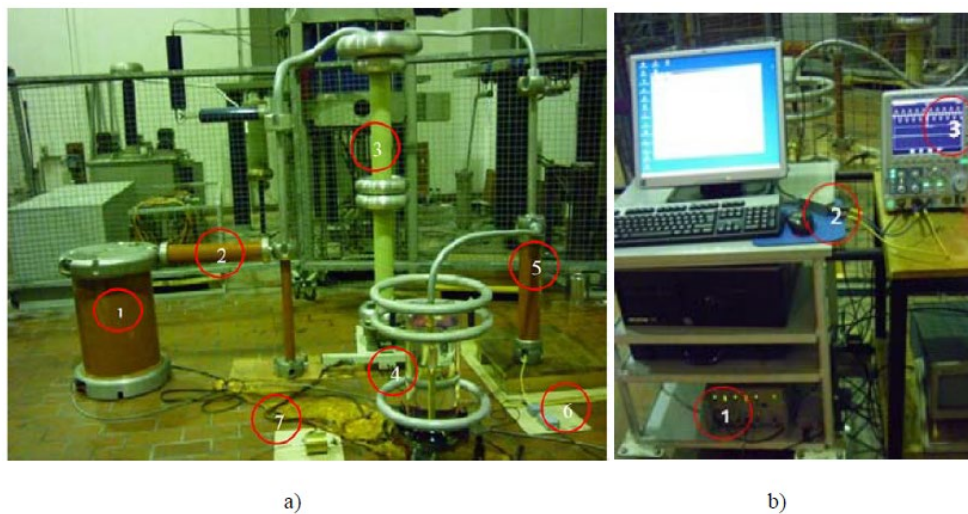


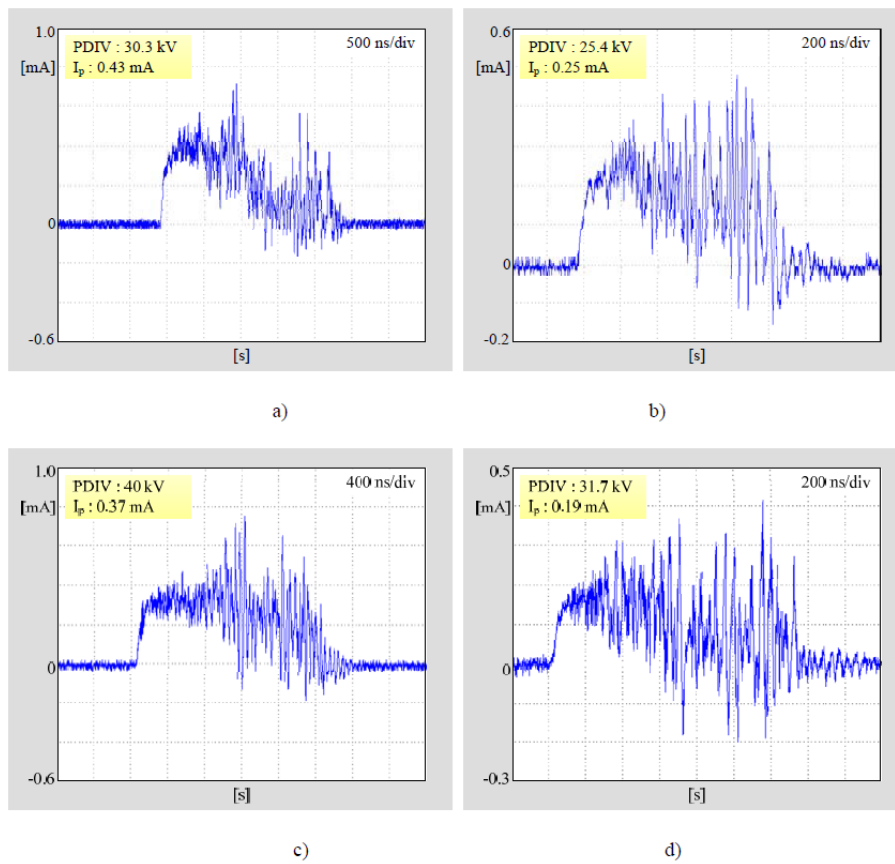
図 1-10. PDIV 測定の試験回路図<sup>[24]</sup>



a) test circuit set up b) measuring system

Where a) 1. High-Voltage supply 50 kV, 2. Current limiting resistor,  $R_1$ : 50 k $\Omega$ , 3. Capacitive voltage divider,  $C_{div}$ :200kV, ratio 2,000:1, 4. Test vessel, $C_t$ , 5. Coupling capacitor,  $C_k$  :100 kV, 100 pF, 6. Coupling device, CC, 7. Shunt resistor,  $R_{sh}$ : 50  $\Omega$ , b) 1. Measuring instrument ICM, 2. Matching impedance,  $R_m$ : 50  $\Omega$ , 3. Oscilloscope, Yokogawa DLM 2054, 2.2GS/s, 500 MHz

図 1-11. PDIV 測定のセットアップ<sup>[24]</sup>



a) IEC method for the needle- plane electrode system b) combine PDIV test method for the needle-plane electrode system c) IEC method for the needle-sphere electrode system d) combine PDIV test method for the needle-sphere electrode system

図 1-12. 鉱油中 PD 電流波形<sup>[24]</sup>

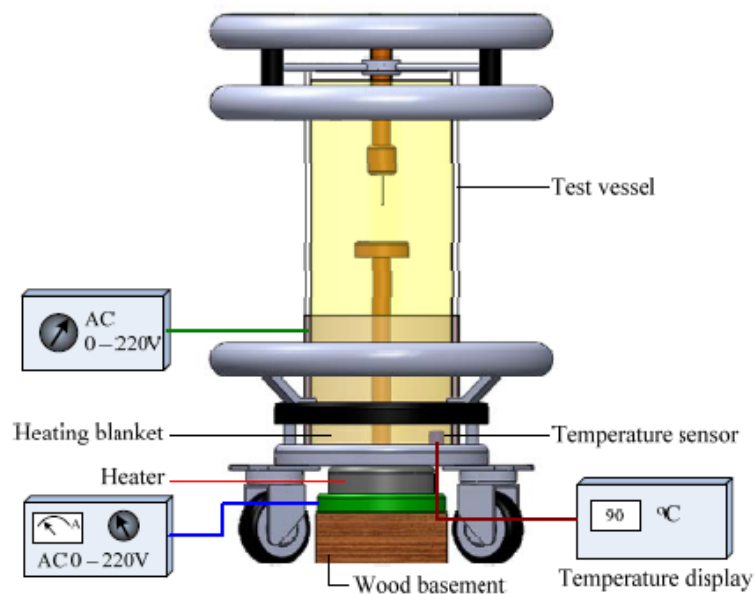


図 1-13. 水分含有量と温度の影響検討用テストセル<sup>[24]</sup>

表 1-3. 水分含有量と温度変化による PD 電流特性<sup>[24]</sup>

Parameter	Temperature (°C)	Water content		
		4 ppm	20 ppm	40 ppm
Pulse current	RT	0.29-0.61	0.22-0.43	0.22-0.59
	40	0.20-0.53	0.11-0.40	0.26-0.43
	60	0.26-0.52	0.12-0.50	0.28-0.40
	90	0.34-0.60	0.13-0.58	0.30-0.56
Pulse duration	RT	1.22-4.8	0.87-3.47	1.12-3.37
	40	1.23-3.81	0.67-3.00	1.14-3.51
	60	1.40-3.70	0.54-3.31	1.24-3.91
	90	1.57-4.42	0.89-3.42	1.26-3.63
Rise time	RT	91-281	75-298	86-273
	40	100-385	81-421	93-239
	60	97-612	185-512	84-370
	90	94-577	67-667	123-470

### 1.6. 本論文の目的と構成

以上の背景に鑑み、本研究では電力用油入変圧器の監視診断・予防保全を高度化することを目的とし、電力用油入変圧器の絶縁油として主に用いられる鉱油を対象に、超広帯域計測により PD 電流の基礎特性を明らかにするとともに、UHF 法による診断の観点から、PD 放射電磁波特性を検討した。さらに、将来的な診断技術として油中放電時の発光検出による診断技術を検討した。これらの成果に基づき実運用状態を評価できる装置を提案し構築した。図 1-14 に、絶縁診断高度化のためのコンセプトを、図 1-15 に本論文の構成を示し、以下にその概要を記す。

第 1 章では、序論として、本研究の研究背景や変圧器の技術開発動向から取り組むべき課題について述べた。

第 2 章では実験装置および実験方法として、本研究で使用した超広帯域 PD 電流パルス波形測定システムの構成や仕様および試験設備等について述べる。



第3章では、超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の脱気状態の相違と極性効果について述べる。SF<sub>6</sub> ガス中では、超広帯域計測により負極性 PD 電流波形では数 10 ps オーダの立ち上がり時間を有することなどが明らかにされているが、油入変圧器への適用はなく特性は不明であった。絶縁油を十分脱気し清純にしないと溶存しているガスや水分、異物などが絶縁性能に影響するため、超広帯域計測を適用しこれら影響を明確に理解、評価することを考えた。本章では基本となる鉱油を対象に、脱気状態および交流電圧の極性効果による PD 電流波形の基礎特性を調べ、超広帯域計測の有効性を示した。

第4章では、超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の経年油と新油の相違について述べる。電力用変圧器内の絶縁油は長期間の運転に伴う経年劣化を考慮する必要がある。そこで、超広帯域計測を適用した新油と経年油での PD 電流波形の相違を検討した。また、絶縁油種類の比較として難燃性のシリコーン油の新油についても併せて比較検討した。さらに UHF 帯および VHF 帯に感度を有するアンテナを用いた PD 放射電磁波の同期計測も行い、PD 電流との関係を、正準判別分析や多変量解析などの統計解析手法を用いて議論した。

第5章では、鉱油中負極性 PD 電流の立ち上がり時間特性の電界利用率依存性と 5G 通信帯域との関係について述べる。PD 電流パルスの立ち上がり時間は、放電電極の電界利用率により変化するため、電界利用率に基づき特性を評価することが必要であるが、鉱油中の特性は明らかとなっておらず、SF<sub>6</sub> ガス中 PD との関係も明らかでない。また近年、5G と呼ばれる第5世代移動通信システムが普及してきており、ピコ秒領域の PD 現象がこのような帯域の通信に及ぼす影響を知ることは重要である。そこで、鉱油中の PD 電流パルス波形の立ち上がり時間を針電極系の電界利用率を変化させて調べるとともに、それらの PD 放射電磁波の周波数特性と 5G 通信で使用される通信帯域との関係を検討した。

第6章では、上記の研究成果に基づき、より実用的な観点から実運用状態における PD 特性を評価できる装置を提案し、プロトタイプモデルの構築を行う。特にこの新しい試験装置は、UHF 法による PD 放射電磁波の検討だけでなく、将来的な診断技術として PD 発光の光学測定を考慮した装置とする。これは、5G 通信や劣悪な電磁ノイズ環境での PD 検出を可能とすることや、将来的な PD 発光検出による診断技術を検討するためである。そこでまず、実運用状態を模擬した試験条件の一例として、流動帯電防止の観点から鉱油へ添加される 1, 2, 3-ベンゾトリアゾール (BTA) が PD 特性に及ぼす影響を超広帯域計測により検討した。次に、油中放電現象への光学測定の実用性を検討した。

第7章では総括として本研究で得られた成果を述べた。

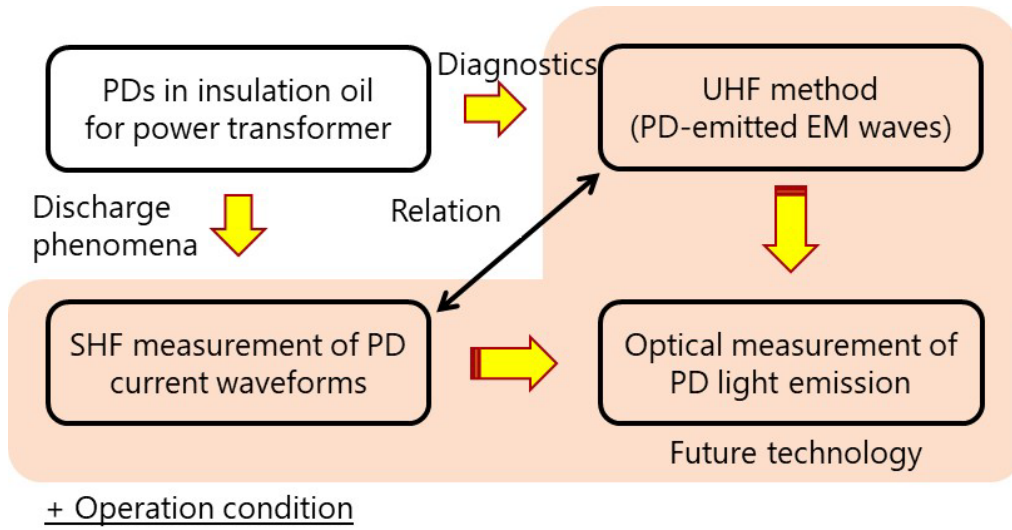


図 1-14. 電力用油入変圧器の絶縁診断高度化のコンセプト

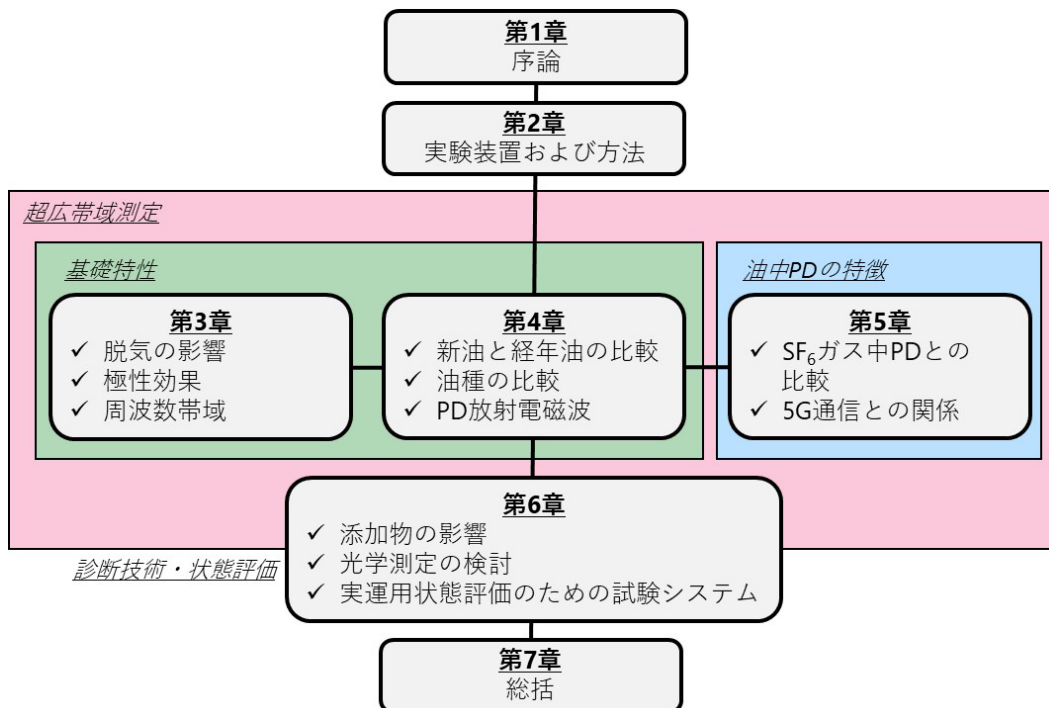


図 1-15. 本論文の構成

## [第 1 章の参考文献]

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 「エネルギー白書 2022」, 2022
- [2] International Energy Agency, “Electricity Market Report – July 2022,” 2022
- [3] International Energy Agency, “World Energy Investment 2022,” 2022
- [4] 電力広域的運営推進機関, 「高経年化設備更新ガイドラインの策定について ~送配電設備更新のための設備管理の高度化~(設備リスク評価)」, 2021
- [5] 電氣的・音響的手法による変圧器の最新異常診断技術調査専門委員会, 「電氣的・音響的手法による変圧器の異常診断技術の最新動向」, 電気学会技術報告, 第 1336 号, 2015
- [6] 電気協同研究会, 「油中ガス分析による油入機器の保守管理」, 電気協同研究, 第 36 巻 第 1 号, 1980
- [7] 電気協同研究会, 「電力用変圧器改修ガイドライン」, 電気協同研究, 第 65 巻 第 1 号, 2009
- [8] IEEE C57.104-2019, “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers,” IEEE Power and Energy Society, 2019
- [9] IEC 60599:2022, “Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis,” IEC, 2015
- [10] 変圧器予防保全調査専門委員会, 「変圧器の予防保全技術の現状とその動向」, 電気学会技術報告 (II 部), 第 344 号, 1990
- [11] 油入変圧器保守診断技術の最新動向調査専門委員会, 「油入変圧器保守診断技術の最新動向」, 電気学会技術報告, 第 1191 号, 2010
- [12] 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」, 電気学会, 1998
- [13] 大久保仁, 「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」, 電気学会論文誌 B, 第 119 巻, 第 4 号, pp.434-437, 1999
- [14] 篠崎孝一, 「変圧器のオンライン診断技術」, 電気学会誌, 第 127 巻, 第 1 号, pp.16-18, 2007
- [15] 変電設備保全への IT 適用調査専門委員会, 「変電設備保全への IT 適用に関する調査報告」, 電気学会技術報告, 第 1041 号, 2005
- [16] CIGRE Technical Brochure WG D1.37, “Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC60270) and unconventional methods,” TB662, 2016
- [17] IEC 62478:2016, “High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods,” IEC, 2016

- [18] CIGRE Technical Brochure WG D1.29, “Partial Discharges in Transformers,” TB676, 2017
- [19] S. Ohtsuka, K. Fukuda and A. Sogabe, “MEASUREMENT OF PD CURRENT WAVEFORMS IN SF<sub>6</sub> GAS WITH A SUPER HIGH FREQUENCY WIDE BAND MEASUREMENT SYSTEM,” XVII International Symposium on High Voltage Engineering, D-074, 2011
- [20] G.P. Cleary and M.D. Judd, “UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil,” *Science, Measurement and Technology*, 153 (2), pp.47-54, 2006
- [21] 大塚信也, 手嶋隆志, 松本聡, 匹田政幸, 「部分放電検出に基づく電力機器の絶縁診断に関する考え方」, 平成 18 年電気学会全国大会, 6-209, 2006
- [22] 大塚信也, 福田浩平, 福崎稔, 「超広帯域 PD 電流パルス測定システムの必要性と SF<sub>6</sub> ガス中測定波形例」, 平成 23 年度電気学会九州支部連合大会, 04-2P-11, 2011
- [23] 福崎稔, 福田浩平, 曾我部敦志, 大塚信也, 「超広帯域測定システムによる SF<sub>6</sub> ガス中 PD 電流パルス波形に測定周波数帯域が及ぼす影響」, 平成 23 年度電気学会九州支部連合大会, 04-2P-12, 2011
- [24] N. Pattanadech, “PARTIAL DISCHARGE INCEPTION VOLTAGE CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL,” Graz University of Technology, 2013

## 第2章 実験装置および実験方法

### 2.1. はじめに

電力機器の絶縁診断を高度化するうえでは、PD現象の信号の伝搬特性、信号を取得するセンサ特性、取得信号の解釈・判断の4つの項目を体系的且つ相互的に考える必要がある<sup>[1]</sup>。また、PD放射電磁波に基づき絶縁診断を行うUHF法による場合、放射源であるPD電流パルス波形の正確な測定やPD電流パルスとPD放射電磁波の関係の理解が重要となる<sup>[2]</sup>。そのため、PD電流パルスの広帯域測定が必要となるが、油中のPD電流パルスはこれまでUHF帯の帯域までしか検討されていない<sup>[3]</sup>。SF<sub>6</sub>ガス中の検討でSHF帯(3~30GHz)までの測定が可能となっている<sup>[4]</sup>ので、それらの装置を油中の測定に適用できるように改良した。具体的には、試験容器にフィルタを取り付け注油の際に不純物を除去できるようにしたうえで、試験容器内の油は真空引きにより水分や溶存ガスを除去し、油上部空間には窒素を充填し水分や空気の混入を防いだ。

PD電流波形の超広帯域計測は、測定系全体の周波数応答をSHF帯あるいはEHF帯(30~300GHz)の一部まで可能とするPD電流測定装置を用いて実現した。同装置は、同軸ケーブル先端に設置した針電極でPDを発生させ、そのPD電流を同軸ケーブルを用いて、直接50Ω系の伝送線路を介してオシロスコープに導入することで行う。超広帯域用オシロスコープの入力電圧レベルは制約があり普及器と比較して相対的に低レベルである。そのため、PD電流の大きさによっては過入力となり装置を破壊する可能性があることや、同軸ケーブルの帯電を防止するために同軸ケーブルとオシロスコープの接続には減衰器を挿入して行っている。

本章では、油中PD電流パルスの超広帯域測定および放射電磁波との同期測定の装置構成を述べる。これらはラボの基礎的な実験に対応する装置であり、第6章で議論するように、実運用状態を模擬した試験装置とするには更に装置の追加、改良が必要となるが、その詳細は第6章で述べる。さらに、第6章で述べる次世代技術として油中PD診断への光学測定適用に向けた基礎検討として実施した、油中BD時の光学測定の装置構成を述べる。

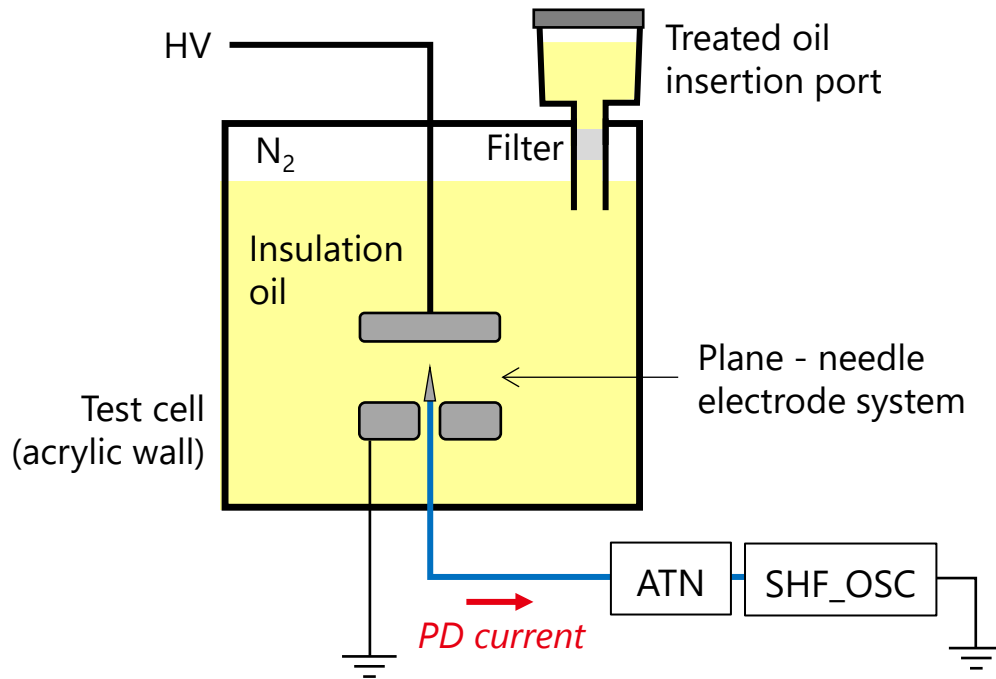
### 2.2. 油中PD現象の測定装置

#### 2.2.1. PD電流パルス測定装置(SHF\_PDPW装置)

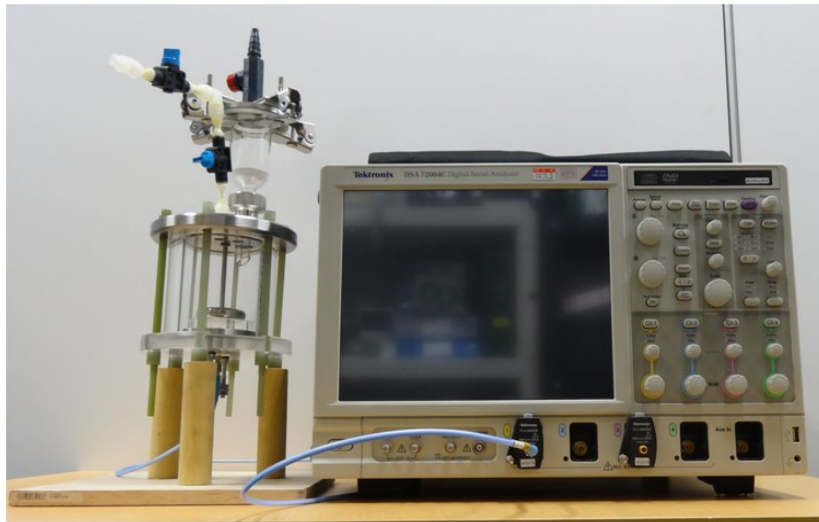
PD電流パルス波形は、SF<sub>6</sub>ガス中では電極系の電界利用率にも依存するが数10psの立ち上がり時間を有する非常に急峻な現象<sup>[4]</sup>である場合もあり、PD電流パルス波形を正確に測

定するためには、測定系全体の周波数帯域は PD 現象に対応した応答特性を有することが必要である。計測系のスペックだけでなく、高電圧試験であるため高電圧の取り扱いや絶縁破壊を防止する放電の知識も実験を実施するうえで必要である。近年、計測器、特にオシロスコープの性能向上が著しく、アナログ帯域として 30 GHz を超える製品が流通している。各メーカーのフラグシップ機種では、70 GHz や 100 GHz の帯域を有する製品も存在する。帯域が上昇すると接続端子の形状は SMK や SMV と言われるような特殊なタイプとなり、使用する同軸ケーブルや減衰器のコネクタも対応して特殊となる。

PD 電流信号を計測するには検出器が必要となるが、検出器の帯域を上げることは難しく、市販品として SHF 帯などの広帯域まで対応できる電流パルス検出器はほとんどない。そこで、40 GHz まで対応する SMK コネクタ付き同軸ケーブルに針電極を直接取り付け、針電極を検出器とすることで広帯域での PD 電流信号の検出を可能にしている。そして、広帯域のアッテネータ、デジタルオシロスコープを用いることで、超広帯域での PD 電流パルス波形の測定を可能にしている。なお、本研究で使用した円柱形状の圧力容器はアクリル製で電磁波を透過するため、後述する PD 電流パルス波形と PD 放射電磁波の同期測定が可能となっている。図 2-1 に SHF\_PDPW 装置の構成を示し、以下に SHF\_PDPW 装置についての詳細な説明を記す。



(a) 構成



(b) 外観

図 2-1. SHF\_PDPW 装置

(1) 電極形状

図 2-2 に、本研究で使用した電極を示す。本実験では、不平等電界を形成するため針対平板電極を用いた。針電極は針先端部の損傷を防止するため、融点の高いタングステン製のものを用いた。平板電極はステンレス製で直径 50mm のものを使用した。ギャップ長は、針もしくは平板電極の電極棒の長さを変えることにより設定可能となっている。

図 2-3 に、一例として、本研究で使用した針電極の先端を、高精細デジタルマイクロスコープ (KEYENCE, VH-6300, 倍率 25~17 倍) で拡大したものを示す。同図(a)に実験前のもの、同図(b)に実験後の針電極の先端を拡大したものを示す。同図(b)より、長時間の放電による針先端部の劣化は見られていないことがわかる。

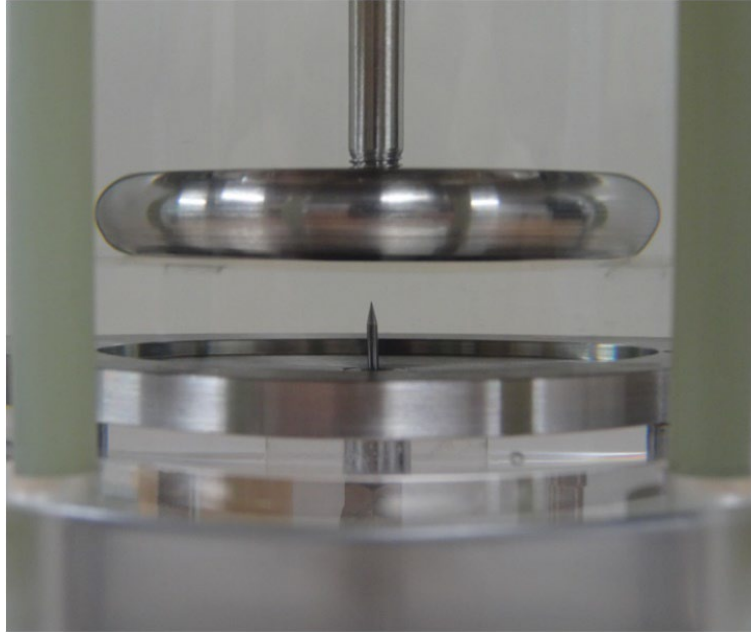
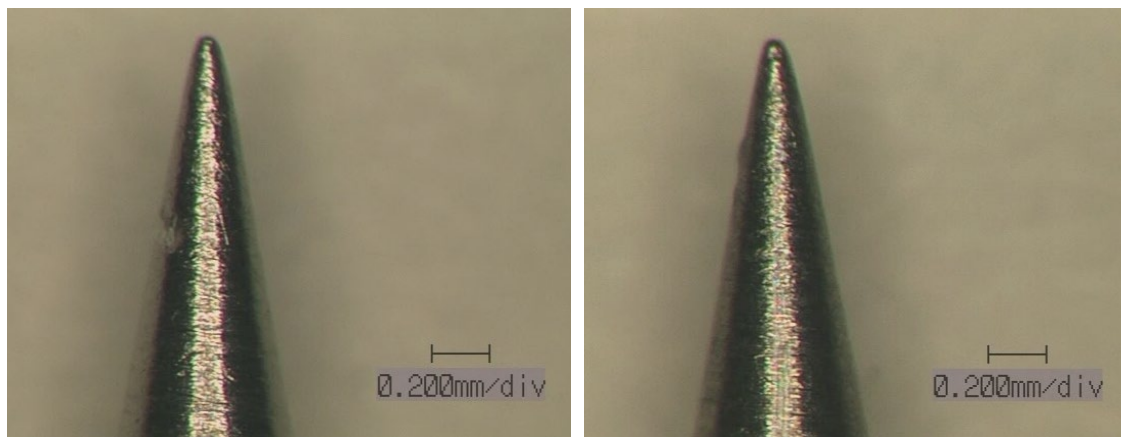


図 2-2. 針対平板電極



(a) 試験前

(b) 試験後

図 2-3. 針電極先端



## (2) SMK コネクタ同軸ケーブル

本研究では測定する周波数帯域により帯域幅 40 GHz と 67 GHz の同軸ケーブルを用いた。

## (3) アッテネータ

本研究では PD 電流パルス波形を超広帯域で測定するため、周波数帯域が 40 GHz もしくは 60 GHz の広帯域のアッテネータを使用した。アッテネータは PD 電流の大きさにより減衰率 6 dB と 10 dB を使い分けた。

## (4) デジタルオシロスコープ

表 2-1 に、PD 電流パルスの測定に用いたデジタルオシロスコープを示す。70 GHz のオシロスコープは、70 GHz の入力端子 1 ch の他に 33 GHz の入力端子が 2 ch 付いている。なお、表中の立ち上がり時間は 10~90 % での値である。

表 2-1. デジタルオシロスコープの仕様

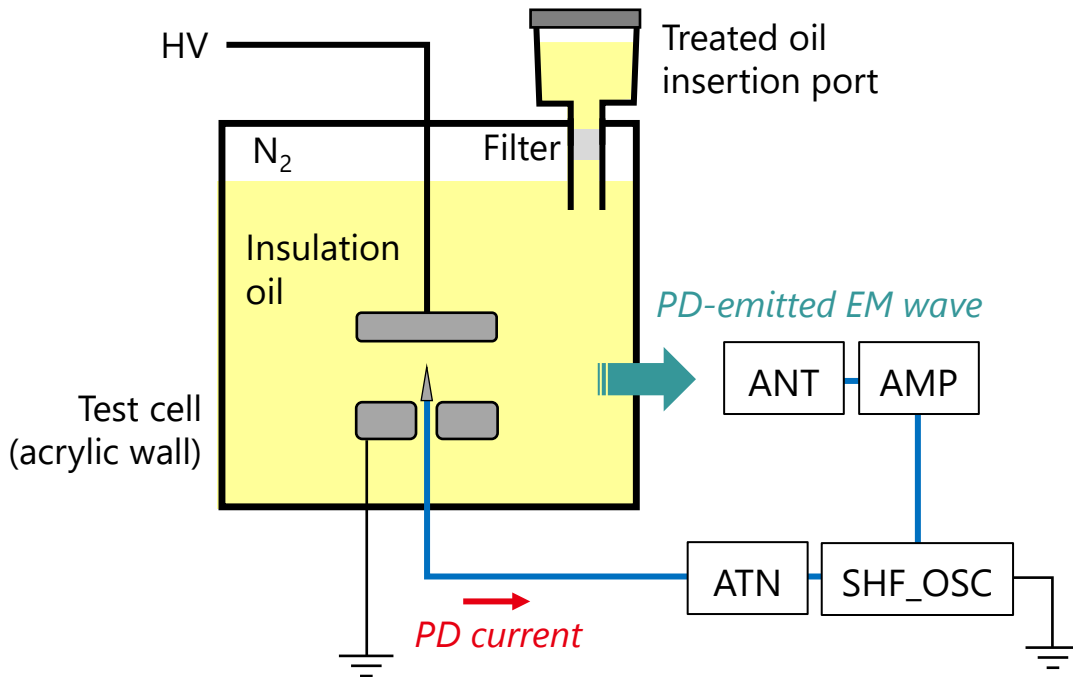
型番	測定周波数帯域 (GHz)	サンプリング (GS/s)	立ち上がり時間 (ps)
Tektronix DSA73304D	33	100	13
Tektronix DPO77002SX	70(33)	200(100)	5.6(13.0)

## 2.2.2. PD 放射電磁波の測定装置

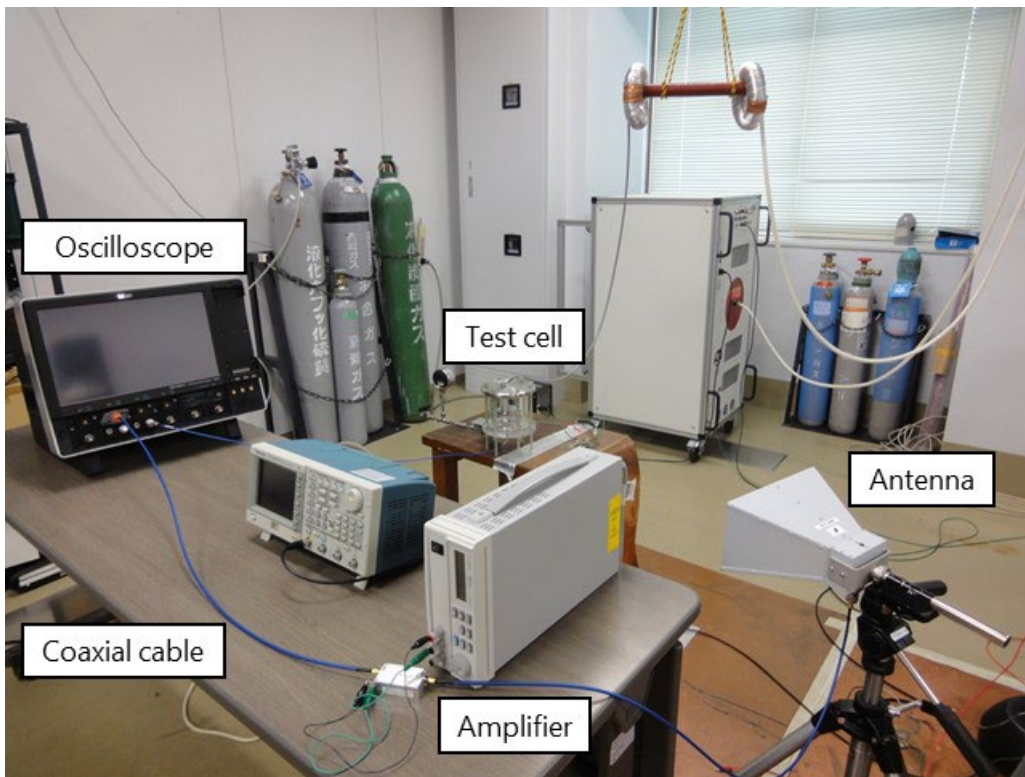
放射電磁波の測定はアンテナと計測器で行うが、時間領域と周波数領域の特性の何れを検討するかにより計測器が異なる。後者はスペクトラムアナライザやリアルタイムスペクトラムアナライザを用いることになるが、本研究では PD 電流波形との関係を議論するために、前者の時間領域の測定を行うこととした。そのため、基本的には PD 電流波形と PD 放射電磁波は同一計測器で同期計測することとした。

電磁波を検出するアンテナは、PD 電流特性を考慮すると SHF 帯までブロードな特性を有することが望ましいがそのようなアンテナは市販品としては存在しない。また、現行の UHF 法に基づき議論を行うため、本研究では UHF 帯の検出を目的として UHF 帯にブロードな特性を有する標準的なアンテナであるホーンアンテナを使用することとした。

図 2-4 に、PD 電流パルス波形と PD 放射電磁波同期測定の実験装置図を示す。以下に PD 放射電磁波を測定するために用いた測定装置の詳細を示す。



(a) 構成



(b) 外観

図 2-4. PD 電流パルス波形と PD 放射電磁波の同期測定

## (1) アンテナ

PD 放射電磁波の測定には、ホーンアンテナ (SCHWARZBECK, BBHA9120D, 1~18 GHz) を主に使用し、異なる周波数帯域での検出の検討としてモノポールアンテナ (第一電波工業, RH707, 120/140/150/300/430/450/800/900 MHz) も使用した。

## (2) アンプ

PD 放射電磁波の感度が十分でない場合は、ゲイン 45 dB (帯域幅 1.5~6.5 GHz) もしくはゲイン 42 dB (帯域幅 2~10 GHz) のアンプを使用した。

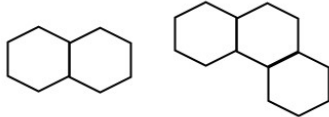
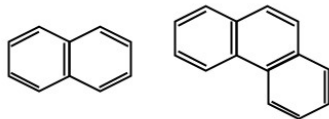
## 2.3. 絶縁油

本研究では、経年油を含む 3 種類の鉱油と 1 種類のシリコン油の計 4 種類の絶縁油を絶縁媒体として使用した。表 2-2 に使用した新油の物性値を、表 2-3 に鉱油とシリコン油の化学構造の例を示す。鉱油系絶縁油中に含まれる炭化水素は、複雑な多くの異性体から構成されており、炭化水素の化学構造のタイプ分類で示され、鎖状につながったパラフィン系炭化水素、環状につながったナフテン系炭化水素、ベンゼン環を持つ芳香族系炭化水素の 3 つに大別される。鉱油系絶縁油はこれらのタイプ別炭化水素が多様に組み合った構造を持つ分子の構造物であり、変圧器絶縁油の各銘柄における各タイプ別炭化水素の含有割合は、パラフィン分が 45~60%程度、ナフテン分が 25~40%程度および芳香族分が 10~20%程度であり、銘柄による大きな差はない<sup>5)</sup>。また、ジメチルポリシロキサン構造を持ったシリコンオイルは天然には存在しない合成オイルで、シロキサン結合 (Si-O-Si) と有機質のメチル基からなっている。

表 2-2. 絶縁油の物性値

	鉱油		シリコン油
	ENEOS, 高圧絶縁油K	かんでんエンジニアリング, サンオームオイルM1	信越化学工業, KF-96-10cs
動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	8.05@40°C	8.56@40°C	10@25°C
引火点 (°C)	132	144	> 160
絶縁破壊電圧 (kV/2.5mm)	60	74	> 50
体積抵抗率 (TΩ・m)	35@80°C	30@80°C	> 1

表 2-3. 絶縁油のタイプと構造例

タイプ		構造	
鉱油	パラフィン系 炭化水素	$\text{CH}_3 - \left( \text{CH}_2 \right)_n - \text{CH}_3$	n-パラフィン
	ナフテン系 炭化水素		2, 3環ナフテン
	芳香族系 炭化水素		2, 3環芳香族
シリコーン油		ジメチルポリシロキサン構造 $\text{CH}_3 - \text{Si} \begin{matrix}   \\ \text{CH}_3 \end{matrix} - \text{O} - \left[ \text{Si} \begin{matrix}   \\ \text{CH}_3 \end{matrix} - \text{O} \right]_n - \text{Si} \begin{matrix}   \\ \text{CH}_3 \end{matrix} - \text{CH}_3$	

#### 2.4. 実験方法

高電圧の印加は、通常の試験用変圧器を使用せず、任意波形発生装置かファンクションジェネレータで信号源波形を作成し、高電圧アンプで増幅して行った。これにより、通常の 50 Hz や 60 Hz の商用周波数の高電圧試験や、正極性や負極性の直流電圧印加などが電源設備を変更することなく自在に実施できる。さらに、周波数を変化させた実験や正弦波の片極性だけの印加など、PD 特性の検討に応じて要求される特殊な高電圧波形を発生させて試験ができる特徴が本装置にはある。PD 電流パルスは 2.2.1 項に示した測定装置を用いて、オシロスコープのトリガ機能により 1 発ずつ測定を実施した。以下に PD 電流波形の測定結果で留意すべき事項を示す。

##### (1) PD 電流パルス波形の極性定義

PD 電流の極性の定義は、異物に印加される電圧の極性により通常定義されている。図 2-5 に示す本電極系では、平板電極が上部電極、針電極が下部電極となっており、平板電極に電圧を印加している。そのため、平板電極に正の電圧を印加した場合、負極性放電となり、

負の電圧を印加した場合、正極性放電となる。しかし、オシロスコープで測定される PD 電流パルス波形は図 2-6 に示すように、負極性放電の場合、正の値で表示され、正極性放電の場合、負の値で表示される。そこで、図 2-7 のように、測定波形を反転させ表示を行い、同図(a)の負の電圧を印加した場合に発生した PD 電流を正極性放電、同図(b)の正の電圧を印加した場合に発生した PD 電流を負極性放電と定義した。

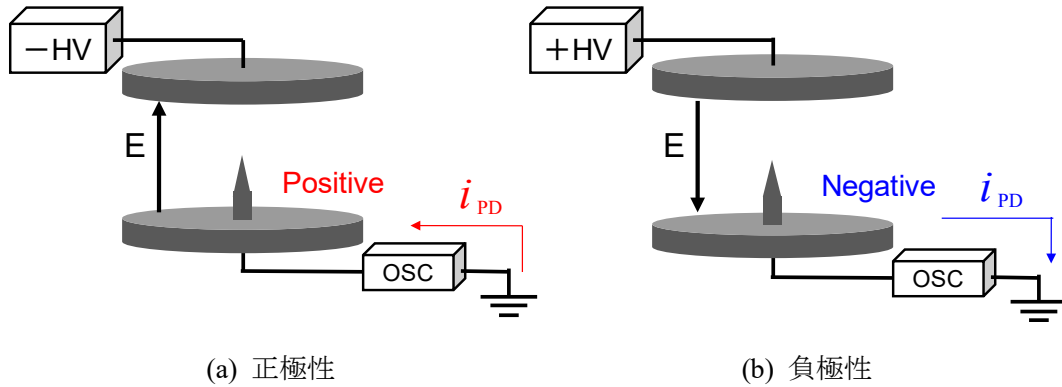
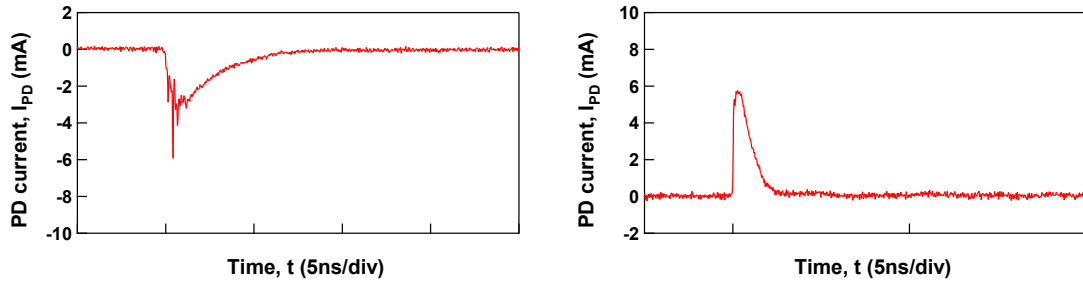
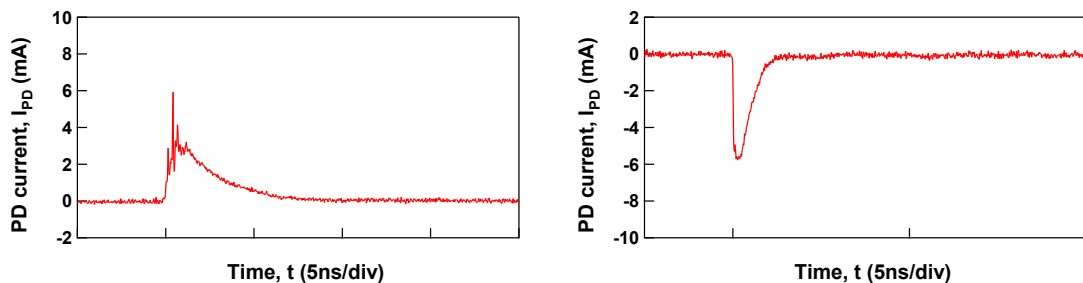


図 2-5. 極性による PD 電流の流れ



(a) 正極性 (b) 負極性

図 2-6. 測定される PD 電流波形



(a) 正極性 (b) 負極性

図 2-7. 本研究での PD 電流波形の表示

## (2) PD 現象の時系列的な関係

時系列的に PD 現象を考えると、PD は電離現象による空間電荷とともに油中にガスや分解生成物を生じさせるため、次に発生する PD は条件によりこれらの影響を受ける可能性がある。特に直流機器などで連続する PD 特性を議論するときには注意を要するが、本研究では1つの波形測定後には記録保存等のため数分間の電圧停止期間があり、前の PD の影響は殆どないと考えられる。また、仮に影響があるとしても、本研究の対象は同様の手順で測定している PD 電流波形そのものである。従って、本研究では時系列的な前後の PD 現象の関係は基本的には議論しない。

## 2.5. 光学測定装置

油中 BD 発生時の発光現象を高速ビデオカメラと分光器を用いて測定した。図 2-8 に、装置構成を示す。本実験では、PD 電流の超広帯域計測を目的としているわけではないので、2.2 節の構成と異なり針電極を上部に取り付けて高電圧を印加している点に注意が必要である。BD までの電極間ギャップの状態を、高速度ビデオカメラ (フォトロン, FASTCAM SA-Z) を用いて 40,000 fps (フレーム間隔 25  $\mu$ s) で観測した。BD の発光スペクトルは分光器 (Ocean Optics, FUSB2000+) を用いて観測した。さらに、光学フィルタと光電子増倍管 (Photomultiplier tube : PMT) を組み合わせ、選択的に抽出した複数の発光スペクトル強度の時間変化特性を測定し比較検討するための装置を構築した。図 2-9 に、装置構成を示す。本装置は必要に応じて放射電磁波の同時測定や高速度ビデオカメラの適用も可能である。

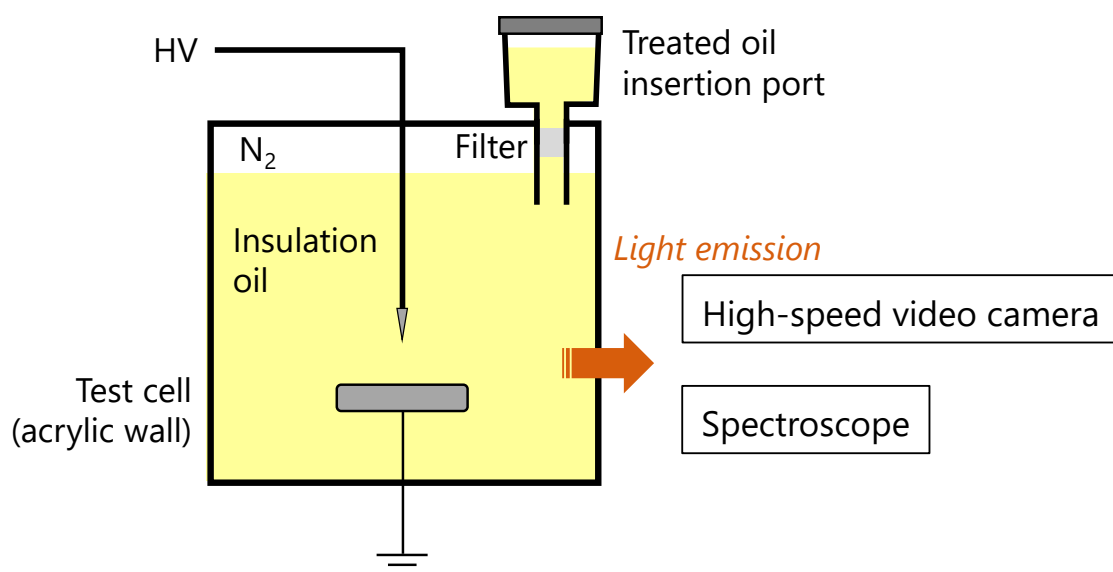


図 2-8. 油中放電の発光特性測定

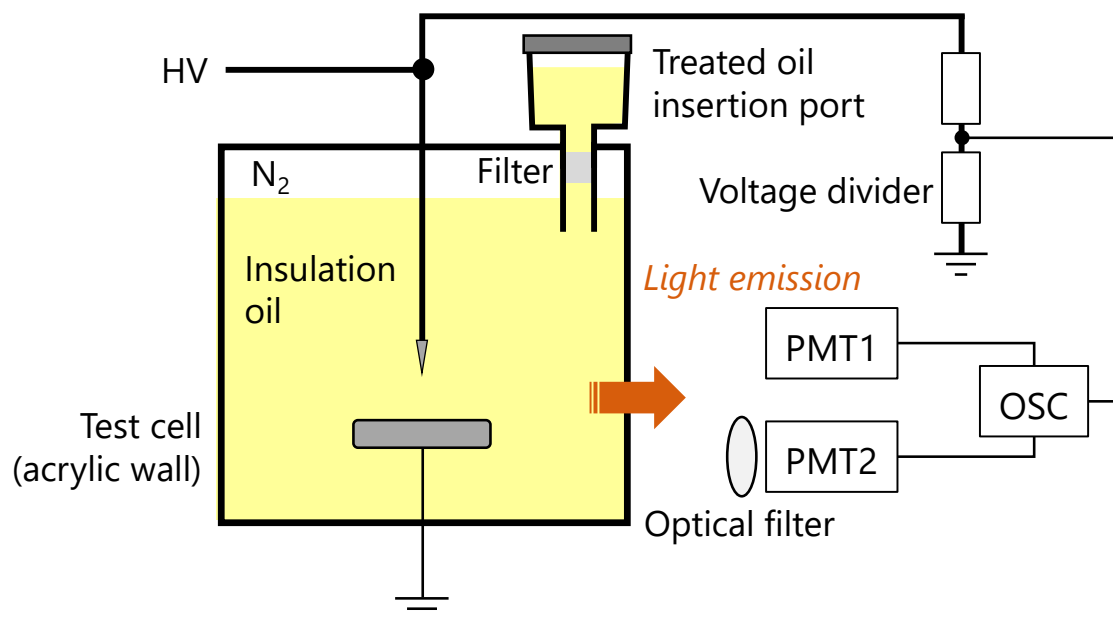


図 2-9. 油中放電の発光スペクトルの時間変化特性の測定

## 2.6. まとめ

本章では、本研究で使用した油中 PD 電流パルスの超広帯域測定および放射電磁波との同期測定、油中放電時の光学測定に使用した実験装置の構成を示した。

[第 2 章の参考文献]

- [1] 大塚信也, 手嶋隆志, 松本聡, 匹田政幸, 「部分放電検出に基づく電力機器の絶縁診断に関する考え方」, 平成 18 年電気学会全国大会, 6-209, 2006
- [2] 大塚信也, 福田浩平, 福崎稔, 「超広帯域 PD 電流パルス測定システムの必要性と SF<sub>6</sub> ガス中測定波形例」, 平成 23 年電気関係学会九州支部連合大会, 04-2P-11, 2011
- [3] G.P. Cleary and M.D. Judd, “UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil,” *Science, Measurement and Technology*, 153 (2), pp.47-54, 2006
- [4] S. Ohtsuka, K. Fukuda and A. Sogabe, “MEASUREMENT OF PD CURRENT WAVEFORMS IN SF<sub>6</sub> GAS WITH A SUPER HIGH FREQUENCY WIDE BAND MEASUREMENT SYSTEM,” XVII International Symposium on High Voltage Engineering, D-074, 2011
- [5] 電気協同研究会, 「電力用変圧器改修ガイドライン」, 電気協同研究, 第 65 巻 第 1 号, 2009



## 第3章 超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の脱気状態の相違と極性効果

### 3.1. はじめに

これまでに、ガス絶縁開閉装置 (GIS) の主絶縁媒体である SF<sub>6</sub> ガスを対象に、SF<sub>6</sub> ガス中での PD 発生から BD に至る PD 進展現象は詳細に観測されており<sup>[1]</sup>, BD 機構やスケーリング則が明らかにされている<sup>[2]</sup>。また、放電物理や PD 放射電磁波による診断の観点から、PD 電流波形、特に単発パルスで立ち上がりの急峻な負極性 PD を対象に超広帯域計測が行われており、数 10 ps オーダの立ち上がり時間を有することや立ち上がり部は臨界電界内での電離現象に基づくことが明らかにされている<sup>[3]</sup>。

電力機器は、GIS やガス絶縁変圧器のようにガス絶縁媒体を使用する機器だけでなく、油入変圧器や OF ケーブルなど液体絶縁物を使用する機器やモールド変圧器や CV ケーブルなど固体絶縁物を使用する機器があり、何れの絶縁物でも PD は発生し、PD により放射される UHF 帯の電磁波を検出する UHF 法が適用されている<sup>[4]</sup>。放電物理の理解ならびに UHF 法の高度化の観点から、PD 現象、特に放射電磁波と関係し電離現象を反映する PD 電流波形の正確な観測と理解は重要である。鉱油中の PD 電流波形は、アナログ帯域 3 GHz のオシロスコープで測定したところ、最小の立ち上がり時間は正極性 PD で 2 ns、負極性 PD で 0.9 ns との報告<sup>[5]</sup>もあるが、この結果は測定帯域の制約を受けており、超広帯域計測では更に急峻な波形が観測されると思われる<sup>[3]</sup>。

本章では、液体絶縁物中 PD 現象の超広帯域計測により、まず基本となる油入変圧器で使用されている鉱油を対象に、鉱油中での PD 電流波形の基礎特性を明らかにすることを目的とした。液体絶縁物は、優れた冷却性能と絶縁性能を有しているが、液体中の不純物や混入物あるいは溶存しているガスや水分などは絶縁性能に大きな影響を及ぼすことが知られている<sup>[6-9]</sup>。そこで、脱気条件を変えた鉱油中で PD 電流波形に相違が認められるかを調べるとともに、交流印加電圧の極性による相違、即ち正極性と負極性 PD 電流波形の極性効果を実験により詳細に調べた。

### 3.2. 実験装置と方法

#### 3.2.1. 実験装置と脱気状態

本研究では、絶縁油として鉱油 (ENEOS, 高圧絶縁油 K) を使用した。絶縁油は極力空気に触れさせないように注意しながら濾過器を通して試験容器内に注油した後、絶縁油に含ま

れるガス及び水分を脱気するために表 3-1 に示される 3 つの脱気処理(Degassing treatment, DT)を行い、高電圧試験を実施した。

3 つの DT 状態とは、脱気状態のよい“Good\_DT”，簡易的な脱気状態である“Poor\_DT”，及び“Poor\_DT”と同様の処理であるが目視で微小な気泡が認められる“Void\_DT”である。図 3-1 に Good\_DT と Poor\_DT の実験前の状態をガス分析した結果を示す（ここで Void\_DT は Poor\_DT と同等と考えてよい）。大気に関するガス成分 (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) は、Good\_DT では N<sub>2</sub> 以外は低下している。これは脱気処理による効果であり、N<sub>2</sub> の増加は脱気して静置後に 0.1 MPa-abs の N<sub>2</sub> を封入したからである。他方、可燃性ガス成分 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO) は、Good\_DT の方が Poor\_DT よりも大きな値を示しているようにも見えるが、何れも定量下限値以下である。何れも試験前の新油であることから、定量下限値を超える可燃性ガスが検出されなかった本結果は妥当である（絶縁油の状態評価は「正常」）。また、脱気処理により油中水分量は低下するが、試験容器に注油した鉱油の脱気前後の水分量を評価したところ（脱気は Good\_DT に相当）、13 ppm と 2 ppm と評価された。この結果から、簡易的ながら脱気処理を行っている Poor\_DT と Void\_DT での水分量は 13 ppm 以下、Good\_DT では 2 ppm 前後と考えられる。本実験で使用した各脱気状態の絶縁油は以上のような状態であり、実器を想定した場合、新油として運転開始時の正常な状態に相当すると考えられる。

表 3-1. 脱気処理条件

脱気状態	脱気方法	微小気泡
Good_DT	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 真空引き6時間</li> <li>・ N<sub>2</sub>加圧0.1MPa-abs</li> <li>・ 静置12時間</li> </ul>	なし
Poor_DT	真空引き5分	なし
Void_DT	真空引き5分	あり

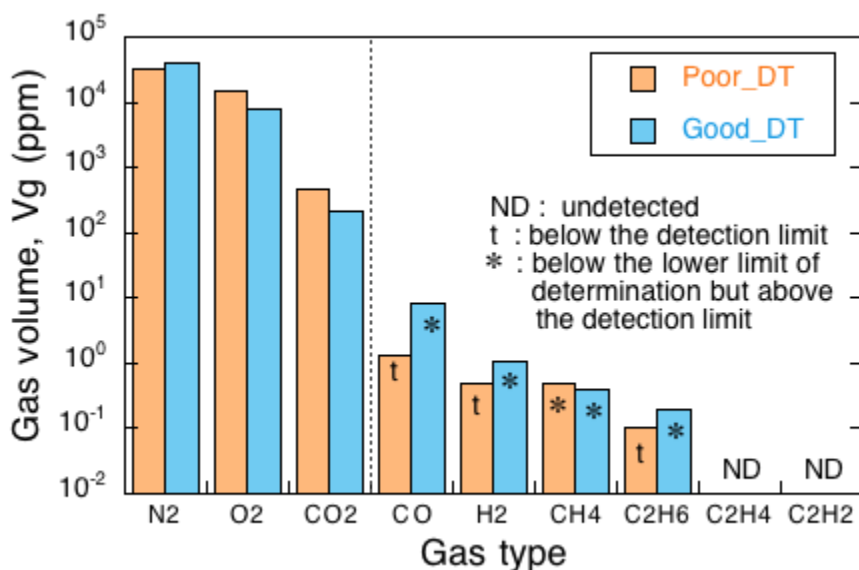


図 3-1. 脱気処理条件による油中ガス分析結果

### 3.2.2. 実験方法と基礎絶縁特性

本研究では、主にアナログ帯域  $f_{BW}=33$  GHz (サンプリング周波数 100 GS/s) のデジタルオシロスコープを使用した。

図 3-2 に、各脱気処理状態での部分放電開始電圧 PDIV を示す。図中のエラーバーは最大値と最小値で、シンボルは平均値を示している。以下のグラフでも同様の表示である。図 3-2 の結果は絶縁油の状態変化が少ないよう 5 回の測定による評価であるが、他のグラフでは 20 個程度の測定データから評価している。電圧値は実効値でなく波高値 ( $kV_p$ ) で表示した。PDIV は脱気処理状態により異なり、Good\_DT > Poor\_DT > Void\_DT の順で低下した。この PDIV の結果からも、脱気処理状態は電気絶縁的にも異なっていることが確かめられた。PDIV の極性差は基本的に正極性 PDIV の方が負極性よりも高く、正極性では Good\_DT に対し Poor\_DT と Void\_DT では 30 %程度の低下であり、負極性では Good\_DT に対して Poor\_DT では 20 %程度、Void\_DT では 40 %の低下であった。

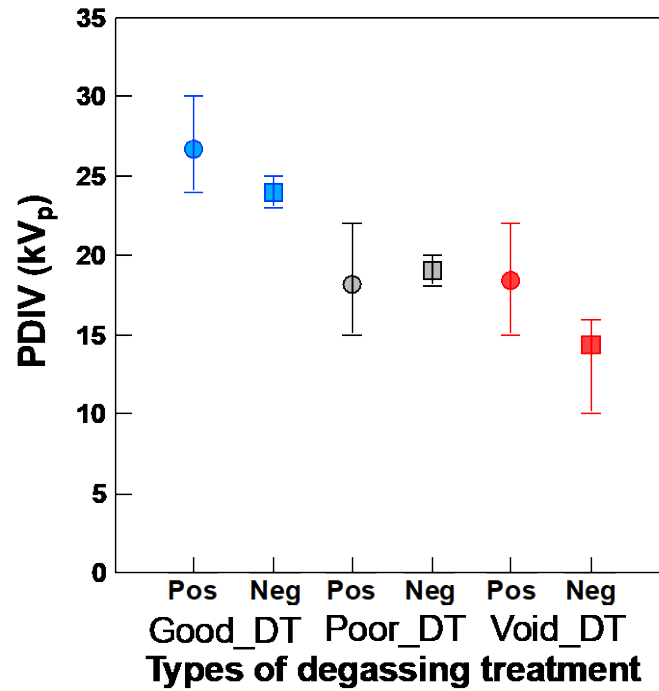


図 3-2. 脱気処理条件による PDIV

### 3.3. 実験結果

#### 3.3.1. 極性効果

まず一例として、図 3-3 に Good\_DT で PDIV 付近で測定した PD 発生位相と PD 電流ピーク値を示す。同図は電流波形を反転させていない元波形の結果であり、負極性 PD は正の値に、正極性 PD は負の値で表示している。正負両極性とも PD はピーク電圧付近で発生しており、針電極での PD 現象であることに矛盾はない。

図 3-4 (a-1), (b) に Good\_DT で PDIV 付近での正極性と負極性 PD の代表的な電流波形を示す。同図(a-1)と(b)の横軸の時間レンジは  $2 \mu\text{s}/\text{div}$  と  $500 \text{ ps}/\text{div}$  と大きく異なっているように、正極性 PD 電流波形は持続時間が長く複数のパルスが多数重畳したクラスター状の形状であるのに対し、負極性 PD 電流波形はパルス幅の短い急峻な単発パルス形状である。同図(b)の立ち上がり時間  $t_r$  は  $23.2 \text{ ps}$  であり、超広帯域計測でないと観測できない波形である。なお、同図(a-1)の時間軸を拡大した同図(a-2)~(a-4)の波形からわかるように、正極性 PD 電流を構成する多数のパルスは負極性 PD の単発パルスと比べて立ち上がり時間ならびにパルス幅は長く、著しい相違があることがわかった。この波形の相違や形成機構に関する検討は次節で行う。

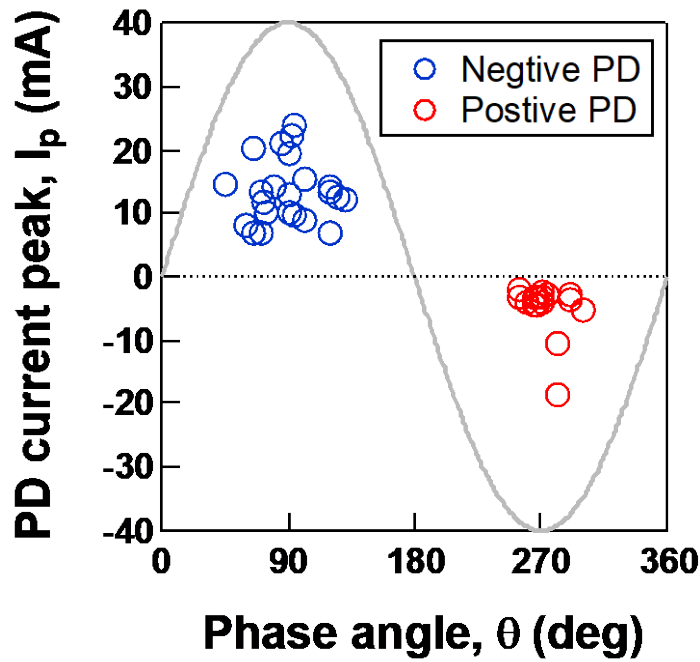


図 3-3. Good\_DT 条件における PDIV 発生位相および PD 電流ピーク値

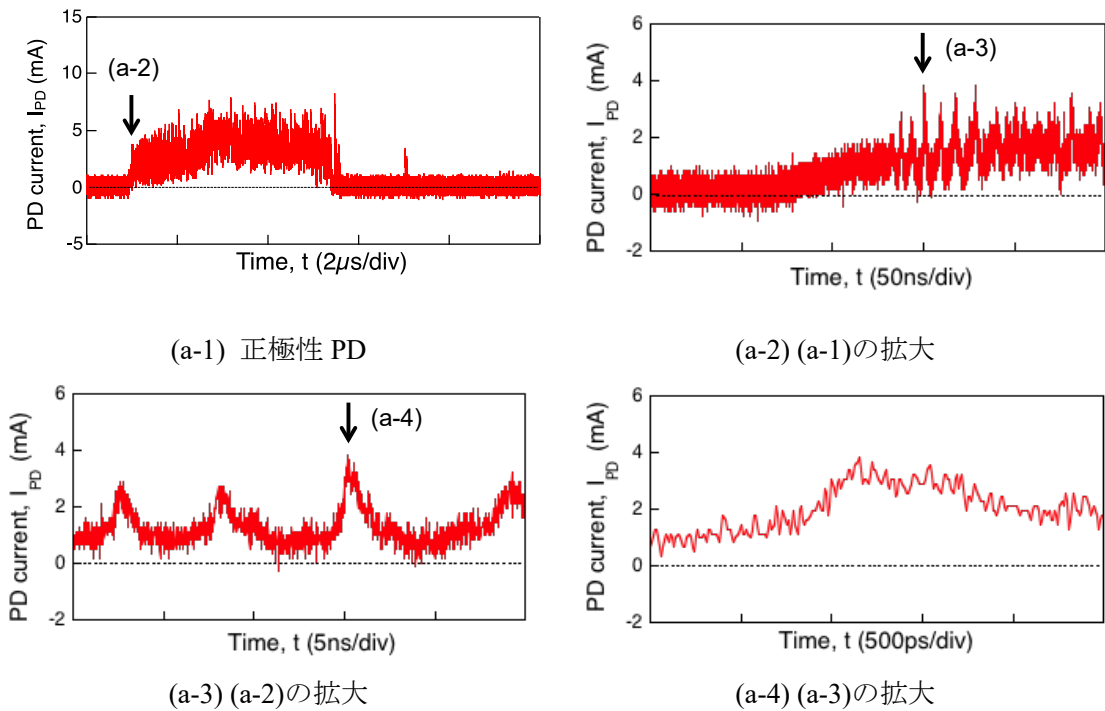
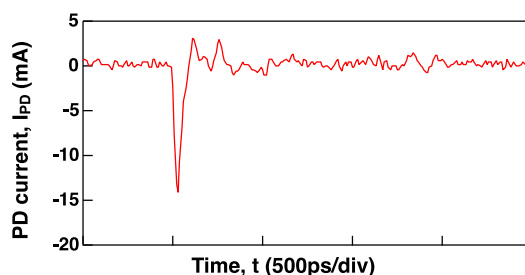


図 3-4(1). Good\_DT 条件における PDIV 付近での PD 電流波形



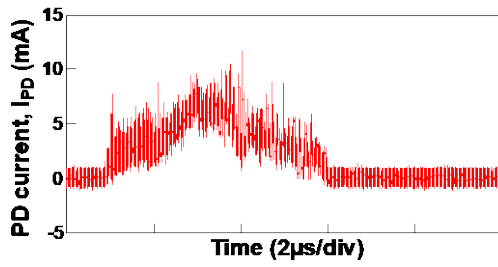
(b) 負極性 PD

図 3-4(2). Good\_DT 条件における PDIV 付近での PD 電流波形

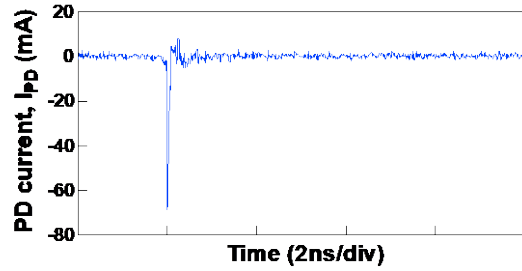
### 3.3.2. 脱気状態の影響

図 3-5 に異なる脱気状態での正極性と負極性 PD 電流波形の一例を示す。同図(a-1), (a-2) のように, Good\_DT では印加電圧が PDIV より上昇した場合, 図 3-4 と比較すると明らかのように, 正負極性とも電流波形のピーク値が増加する変化が見られることもあるが, PD 電流の波形形状には大きな変化は認められなかった。一方, Void\_DT では, Good\_DT と同様に印加電圧の上昇によっても PD 電流の波形形状に大きな変化は認められなかったが, 正負両極性とも Good\_DT の PD 電流波形とは波形形状が大きく異なった。即ち, 正極性の PD 電流波形は同図(d-1)のように立ち上がり時間とパルス幅が大きな単発のパルスとなり, 負極性の PD 電流波形は同図(d-2)のように正極性と同様の立ち上がり時間とパルス幅の大きな単発のパルスとなった。一方, Poor\_DT では, Good\_DT と同様の正極性では  $\mu\text{s}$  オーダで持続する多数のピークが重畳したクラスター状の波形だけでなく, 同図(b-1)のように急峻な単発パルスや同図(c-1)のような Void\_DT と同様の立ち上がり時間とパルス幅が大きな PD 電流波形が観測されることもあった。負極性では Good\_DT と同様の同図(b-2)のように急峻でパルス幅の短い単発パルスだけでなく, 同図(c-2)のように Void\_DT と同様の立ち上がり時間とパルス幅が大きな PD 電流波形が観測されることもあった。即ち, Poor\_DT では, Good\_DT と Void\_DT と類似する特徴を有する 2 種類の PD 電流波形が観測された。

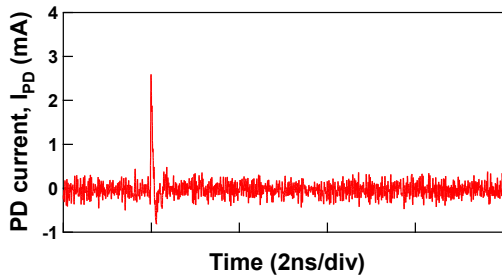
ここで, 単発パルスであるため比較が容易な負極性 PD 電流波形に着目し, 波形の面積から求めた電荷量  $q$  の印加電圧依存性および電流波形のピーク値  $I_p$  と立ち上がり時間  $t_r$  の関係を図 3-6 に示す。同図(a)より, 脱気処理状態により電荷量  $q$  は異なり,  $\text{Void\_DT} > \text{Good\_DT}$  の関係ならびに印加電圧の増加により  $q$  は増加することがわかる。同図(b)の  $I_p$  と  $t_r$  の関係から, Good\_DT と Void\_DT で特性は区別され, Poor\_DT ではどちらかの特性に属する PD が発生していることがわかる。



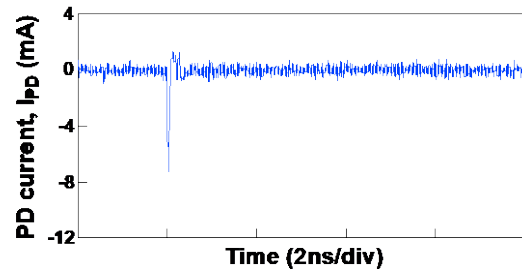
(a-1) 正極性 PD (Good\_DT, PDIV 超)



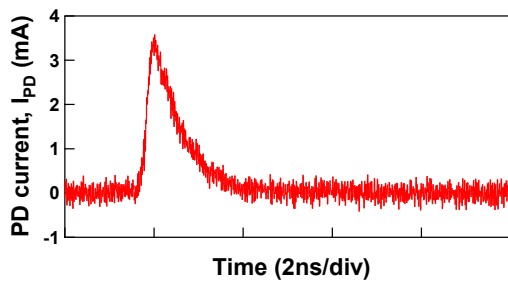
(a-2) 負極性 PD (Good\_DT, PDIV 超)



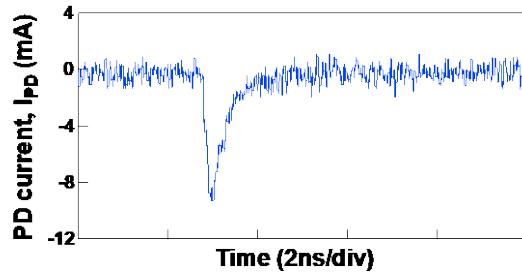
(b-1) 正極性 PD (Poor\_DT, PDIV 付近)



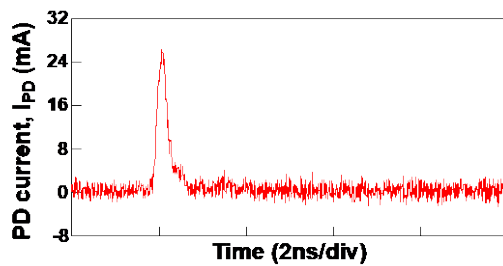
(b-2) 負極性 PD (Poor\_DT, PDIV 付近)



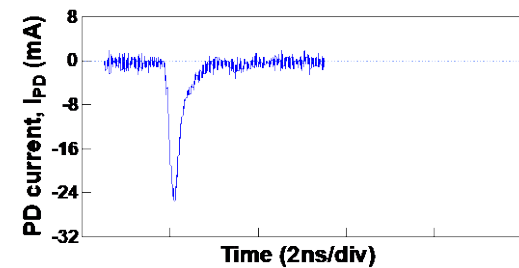
(c-1) 正極性 PD (Poor\_DT, PDIV 超)



(c-2) 負極性 PD (Poor\_DT, PDIV 超)

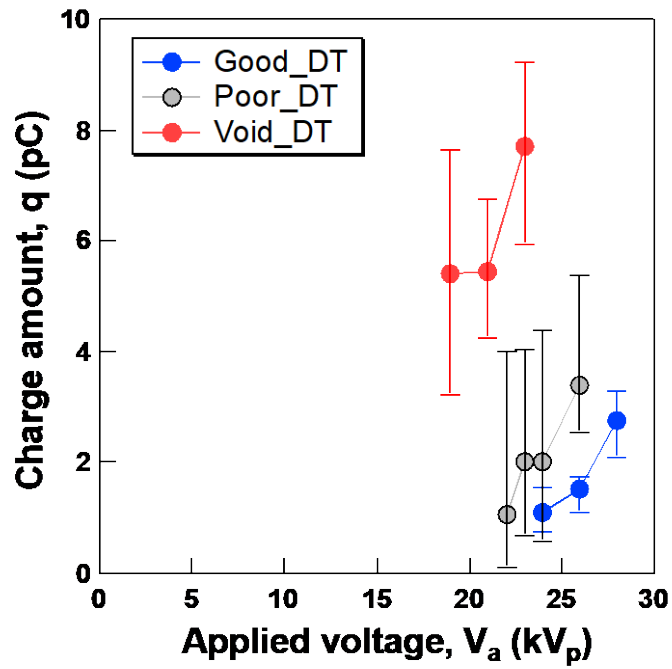


(d-1) 正極性 PD (Void\_DT, PDIV 超)

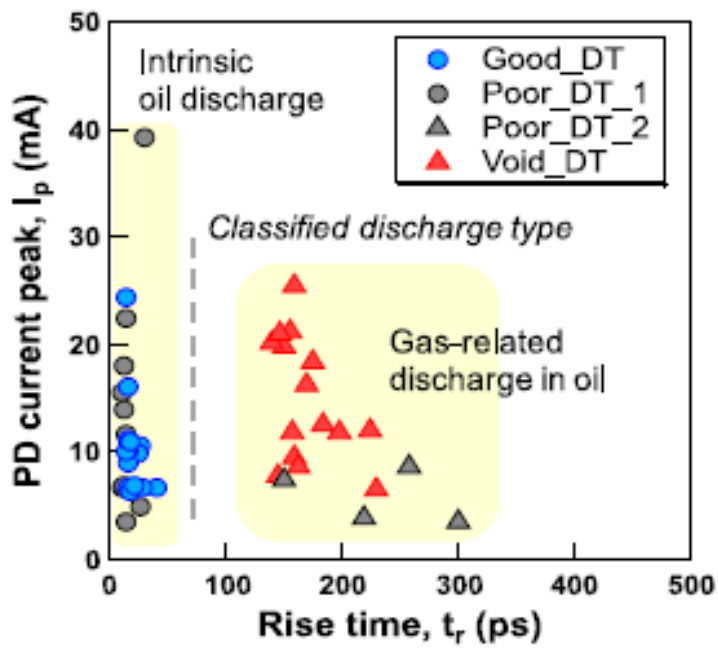


(d-2) 負極性 PD (Void\_DT, PDIV 超)

図 3-5. 脱気処理条件による PD 電流波形



(a) 印加電圧－電荷量特性

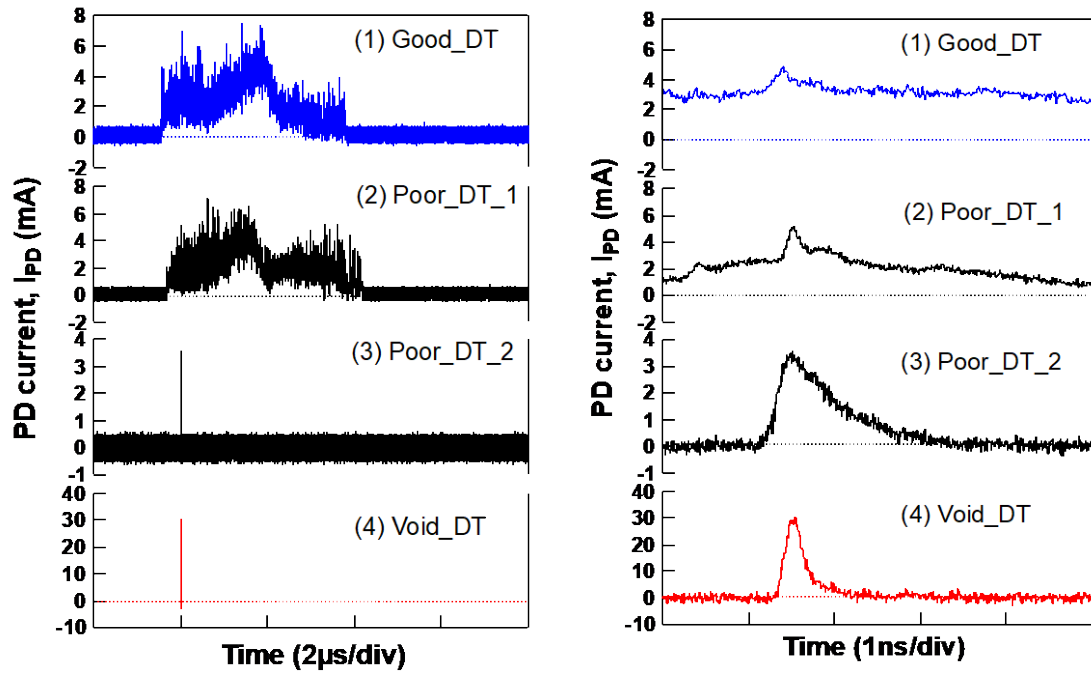


(b) 立ち上がり時間－ピーク値特性

図 3-6. 脱気処理条件による負極性 PD 電流波形特性

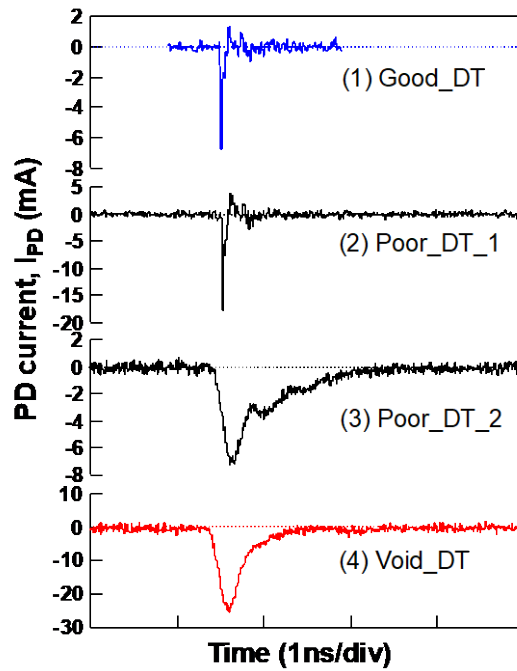


これらの PD 電流波形の特徴を整理するため、図 3-7 に、同一時間軸で各 DT の正極性と負極性の PD 電流波形をまとめた。Poor\_DT は 2 種類の波形が存在するため、Poor\_DT\_1 と Poor\_DT\_2 として 2 つの波形を表示した。正極性 PD では線状のパルス波形を確認できるよう、同図(a)の時間軸を拡大した結果を同図(b)に示した。上記のように、絶縁液体中の PD 電流波形は脱気状態により変化することがわかる。後述するように、脱気状態による相違は、油中の“真性放電”と溶存ガスと関係する“油中ガス放電”によるものであり、負極性の PD 電流波形の特徴は超広帯域測定でないと区別できないものである。なお、図 3-6 (b)の結果から、計測された負極性の油中“真性放電”の電流波形立ち上がり時間  $t_r$  の最小と最大、平均値はそれぞれ 10.1 ps, 40.8 ps, 18.2 ps であり、“油中ガス放電”の電流波形ではそれぞれ 140 ps, 301 ps, 183.4 ps であった。油中“真性放電”の電流波形は数 10 ps の急峻な立ち上がり時間を有していることが本研究により明らかとなった。



(a) 正極性 PD

(b) (a)の拡大



(c) 負極性 PD

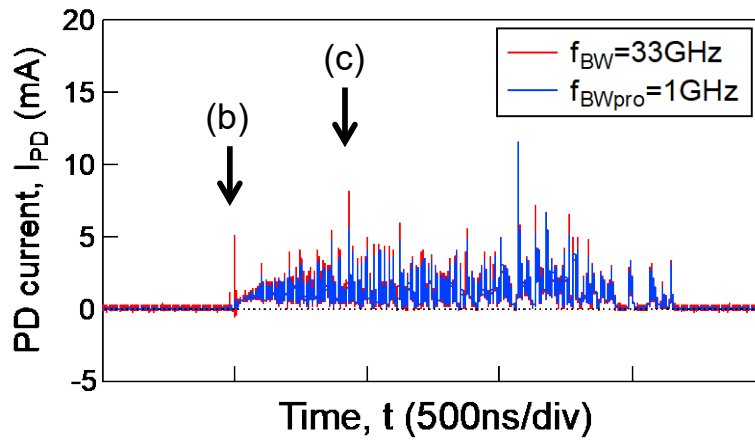
図 3-7. 脱気処理条件による PD 電流波形の比較

### 3.4. 考察

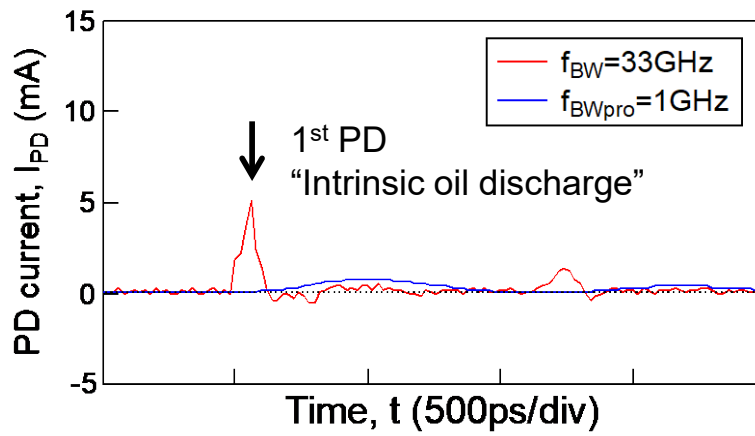
#### 3.4.1. 絶縁油中 PD の波形形成機構

図 3-8 (a)に、Good\_DT の正極性 PD 電流波形の測定結果 ( $f_{BW} = 33$  GHz) と、アナログ帯域 1 GHz の通常のオシロスコープでの測定の模擬としてその結果を 1 GHz のバターース型 4 次のローパスフィルタ ( $f_{BWpro} = 1$  GHz) で波形処理した結果を併せて示す。同図(b)と(c)は、同図(a)の先頭部と中間部のピーク値付近を時間拡大した結果である。同図(b)の時間レンジは 500 ps/div であることに注意が必要であるが、最初のパルスは急峻であり、 $f_{BWpro} = 1$  GHz の結果ではパルスは確認できない。即ち、1 GHz 程度のオシロスコープでは観測できないことを示唆している。他方、同図(c)のように (時間レンジは 20 ns/div)、継続する多数のパルスは  $f_{BWpro} = 1$  GHz の結果と殆んど相違はなく、図 3-5~3-7 に示した Void\_DT でのパルスとほぼ同等である。

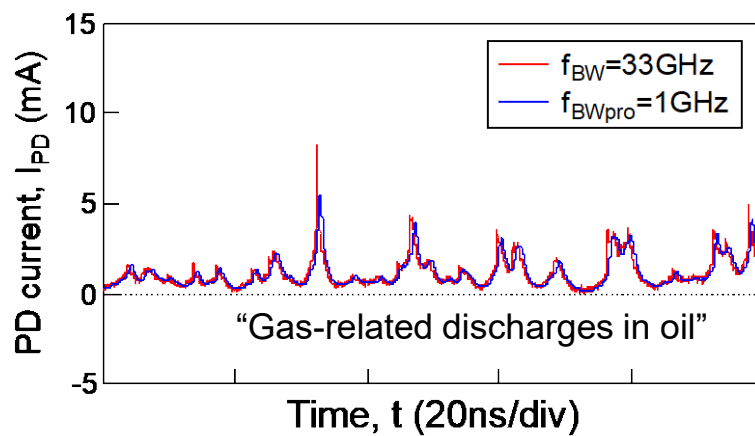
この結果から、溶存ガスが影響しないほど十分に脱気した状態 (Good\_DT) であれば、絶縁油中での“真性放電”として急峻なパルス状 PD が発生し、その PD により PD 経路周辺にはガスが発生していると考えられる。図 3-9 に示すように、正極性では、高電界方向へ移動する電子により電離が発生しているため二次電子の作用は大きく、発生したガス中での二次電子により立ち上がり時間が長くパルス幅が広い“油中ガス放電”が継続して発生し、クラスター状の持続時間の長い PD 電流が観測されたと解釈される。一方、負極性では、電離は低電界方向へ移動する電子によるものであるため二次電子の作用は小さく、単発の“真性放電”として急峻なパルス状電流が観測されたと理解できる<sup>[3]</sup>。脱気が十分でなく溶存ガスが影響する場合 (Void\_DT) では、正負両極性とも溶存ガスによる“油中ガス放電”が発生していると理解できる。図 3-10 に、脱気処理条件による油中状態の模式図を示す。Good\_DT は上述のとおり絶縁油中での“真性放電”であり、Poor\_DT は油中に目視では確認できない程小さなボイドが存在している中で、Poor\_DT\_1 が絶縁油中での“真性放電”，Poor\_DT\_2 がその小さなボイド中で発生する“油中ガス放電”であると Good\_DT および Void\_DT の PD 電流パルス波形の形状との相似性から考えられる。油中とボイド中で電流波形形状が異なるのは、油とガスで電流波形の立ち上がり時間を形成する臨界電界や電子の移動度、ドリフト速度の違いが要因だと考えられる。なお、Poor\_DT や Void\_DT で観測された単発の正極性 PD 電流波形は、Good\_DT と比べて PDIV は 30%程度低下しているように、二次電子の作用が相対的に低く継続する放電が発生しなかったものと考えられる。



(a) 正極性 PD 電流波形 (波形全体)



(b) (a)の先頭部拡大



(c) (a)の中間部拡大

図 3-8. Good\_DT 条件における測定帯域の違いを模擬した正極性 PD 電流波形の比較

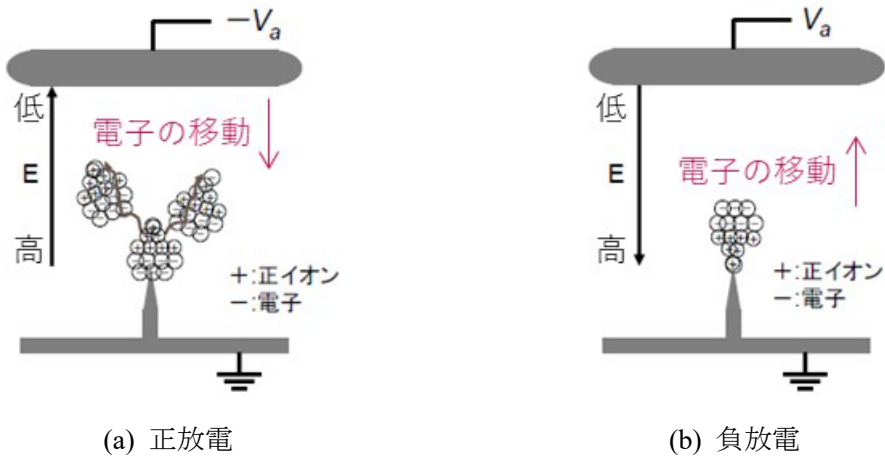


図 3-9. 極性による放電進展モデル

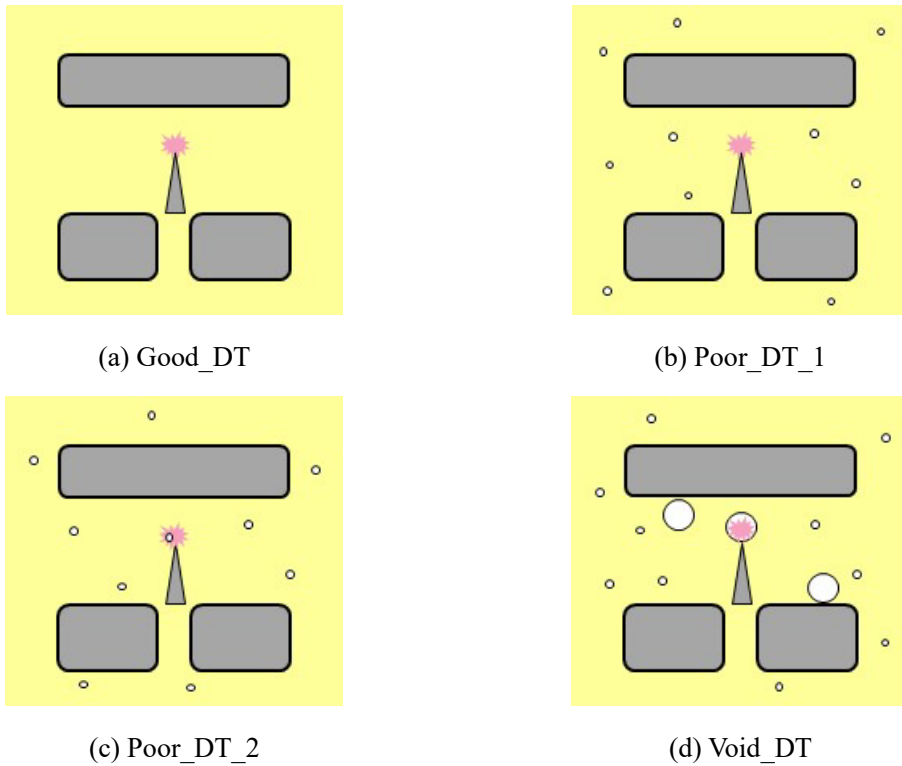


図 3-10. 脱気処理条件による油中状態

### 3.4.2. 測定周波数帯域の重要性

前項に引き続き、1 GHz のローパスフィルタによる波形処理を行うことで、PD 電流波形測定における測定帯域の重要性を更に検討した。図 3-11 に図 3-7 (c)に示した負極性 PD 電流波形を波形処理した結果を、図 3-12 に図 3-6 (b)の負極性 PD の  $I_p$  と  $t_r$  の関係を再整理し

た結果をそれぞれ示す。図 3-11 の結果を比較すると、同図(a)の超広帯域測定では Good\_DT と Void\_DT の特徴である絶縁油中の“真性放電”と“油中ガス放電”の PD 電流波形は明確に区別できるが、同図(b)の波形処理した結果、即ち通常の 1 GHz 程度のオシロスコープ測定を模擬した結果ではこの特徴的な相違は観測できない。即ち、同様の PD が発生していると誤評価することになる。同様に図 3-12 の結果を見ると、図 3-6 (b)で区別できていた絶縁油中負極性 PD の“真性放電”と“油中ガス放電”が混在しており区別が困難となっている。本結果は、測定帯域の十分でない結果を発展の著しい AI や機械学習により区別させることはできたとしても、その判別ルールは物理現象を正しく反映したものでない場合があることを示唆しており、ルールの解釈や適用には測定系と物理現象の関係に注意を払う必要がある。

以上のように、本章では鉱油中 PD 電流波形の計測には超広帯域計測が必要であり、PD 現象の理解に有用であることを示した。

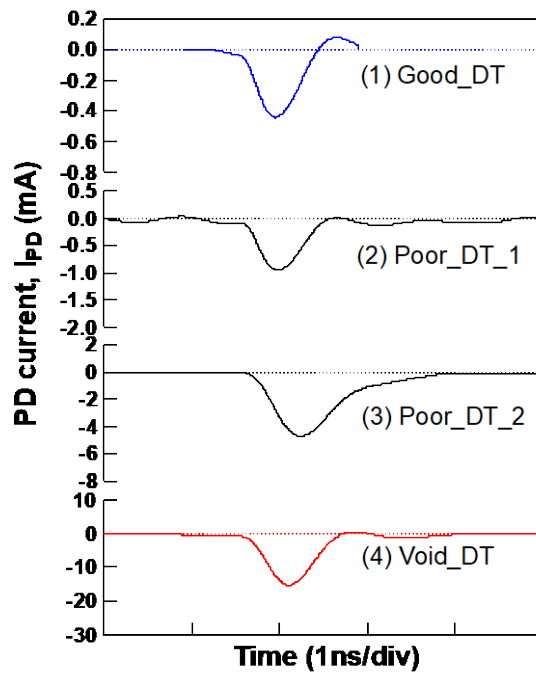


図 3-11. 図 3-7 (c)の 1 GHz ローパスフィルタ処理波形

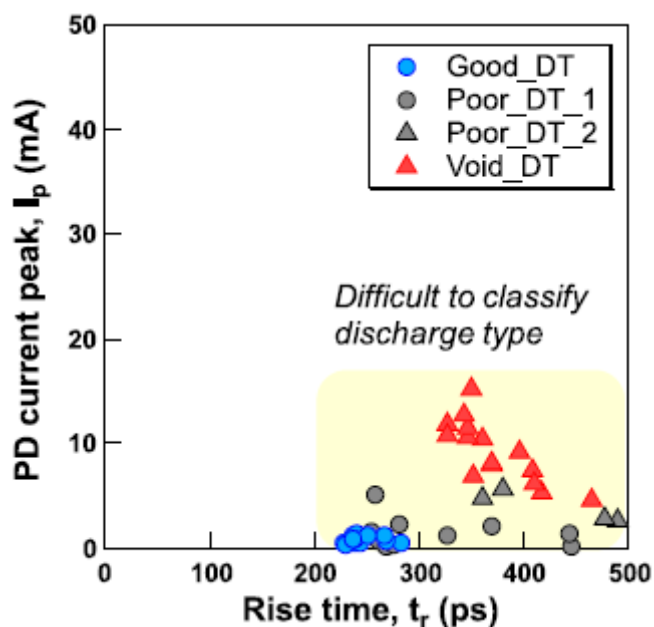


図 3-12. 1 GHz ローパスフィルタ処理による図 3-6 (b)の再評価

### 3.5. まとめ

本章では、液体絶縁物中 PD 現象の超広帯域計測として、鉱油中での PD 電流波形の基礎特性を明らかにすることを目的として、脱気状態及び交流印加電圧の極性効果による PD 電流波形の相違を詳細に調べた。

その結果、脱気が十分でないと油中の“真性放電”だけでなく溶存ガスによる“油中ガス放電”が発生していることや PD 電流波形には明確な極性効果があることを明らかにした。これら PD の発生メカニズムは溶存ガスの有無と油中“真性放電”により発生するガスおよび二次電子の作用により説明できることを明らかにした。また、負極性の油中“真性放電”および“油中ガス放電”の電流波形の立ち上がり時間はそれぞれ数 10 ps と数 100 ps 前後であることを超広帯域計測により明らかにした<sup>[10]</sup>。

[第3章の参考文献]

- [1] 大塚信也, 中山裕太, 鈴木悠太, 「SF<sub>6</sub> ガス中のリーダ転移を含む部分放電進展現象の光学計測」, 電気学会論文誌 B, 第 141 巻, 第 2 号, pp.196-206, 2021
- [2] 大塚信也, 鈴木悠太, 中山裕太, 「負極性雷インパルス電圧下の SF<sub>6</sub> ガス中部分放電のリーダ転移特性とスケーリング則」, 電気学会論文誌 B, 第 141 巻, 第 2 号, pp.207-216, 2021
- [3] 大塚信也, 小坪俊勝, 「SF<sub>6</sub> ガス中部分放電電流パルス波形のピコ秒立ち上がり時間特性とその形成メカニズム」, 電気学会論文誌 A, 第 141 巻, 第 1 号, pp.40-47, 2021
- [4] CIGRE Technical Brochure WG D1.37, “Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC60270) and unconventional methods,” TB662, 2016
- [5] G. P. Cleary and M. D. Judd, “UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil,” IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, Vol.153, No.2, pp.47-54, 2006
- [6] CIGRE Technical Brochure WG A2.30, “Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems,” TB349, 2008
- [7] S. J. Tee, Q. Liu, Z. D. Wang, G. Wilson, P. Jarman, R. Hooton, D. Walker and P. Dyer, “Seasonal influence on moisture interpretation for transformer aging assessment,” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 32, No. 3, pp.29-37, 2016
- [8] 平松悠史, 村上祐一, 村本裕二, 「鉱油および植物系絶縁油の交流絶縁破壊特性に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, 第 140 巻 第 3 号, pp.149-155, 2020
- [9] 石井敏次, 上田実, 「絶縁油の交流破壊電圧に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, 第 92 巻, 第 3 号, pp.154-158, 1972
- [10] 大塚信也, 福崎稔, 芝田拓樹, 「鉱油中 PD 電流波形の超広帯域計測—脱気状態と極性効果の相違—」, 電気学会論文誌 B, 第 142 巻 第 11 号, pp.561-567, 2022



## 第4章 超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の経年油と新油の相違と統計学的手法による波形比較

### 4.1. はじめに

絶縁油は油中に異物や気泡あるいは水分が存在すると絶縁耐力が低下することが知られているが<sup>[1-4]</sup>、経年劣化による絶縁耐力の低下も考慮する必要がある。電力機器の品質管理や絶縁診断の観点から PD 試験や PD の検出が行われるが、前述のように PD により放射される UHF 帯 (0.3~3 GHz) の電磁波を検出する UHF 法の適用が進んでいる<sup>[5]</sup>ことから、UHF 法の高度化ならびに PD の発生・進展機構の解明には、PD 電流の時間変化、即ち PD 電流波形の正確な測定と理解が重要となる<sup>[6-10]</sup>。

前章では超広帯域 PD 電流パルス波形計測装置 (SHF\_PDPW 装置) を用いて鉱油中 PD 電流の波形形状は脱気状態 (例えば、目視できない気泡の存在) により大きく異なること<sup>[11]</sup>等をはじめて明らかにした。これら特徴は超広帯域計測により明らかに観測されたものであり、一般的な 1 GHz 程度の OSC では同一波形に見え区別できない現象であった。

本章では、鉱油中の放電物理ならびに絶縁診断のさらなる検討として、超広帯域計測を適用することで新油と経年油で、あるいは絶縁油の種類で PD 電流波形にどのような相違があるかを明らかにすることを考えた。これまで絶縁油中の PD 電流波形は、帯域 3 GHz の OSC を用いた検討<sup>[12]</sup>や、500 MHz の OSC と 300 kHz の PD 検出器による広帯域と狭帯域の比較<sup>[13]</sup>、共振周波数が 90 kHz~2.13 MHz の検出器での比較<sup>[9]</sup>などが行われているが、本研究のような 33 GHz の OSC を用いた超広帯域計測による検討はなされておらず、本研究の意義は大きい。

本章では、48 年経過した配電用変圧器から採取した経年油を用いて新品の鉱油 (以下、新油と呼ぶ) と比較するとともに、絶縁油種類の比較として難燃性のシリコン油を対象とし<sup>[14]</sup>、これら 3 種類の絶縁油中 PD 電流波形を超広帯域計測により極性効果を考慮して詳細に調べた。経年油と新油はガス分析を行い、状態を確認して実験に使用した。さらに、PD 電流波形と同時に UHF 帯に感度を有する UHF 帯アンテナで PD 放射電磁波波形を計測した。絶縁油の種類や経年の影響及び UHF 法適用の観点から、PD 電流波形の相違や UHF 帯アンテナでの電磁波検出特性ならびに PD 電流と PD 放射電磁波の関係を、正準判別分析や多変量解析などの統計解析手法を用いて議論した。

#### 4.2. 実験装置と方法

実験装置は第3章で使用したものに加えて PD 放射電磁波を PD 電流波形と同期して計測した<sup>[6, 11]</sup>。PD 放射電磁波はホーンアンテナを使用して測定した。アンテナは針電極から 40 cm 離れた位置に垂直偏波となる向きに設置した (アンテナ設置距離 40 cm は、1 GHz の波長 30 cm を  $2\pi$  で除した値 4.8 cm より大きく遠方界条件を満たしている)。

図 4-1 に実験に使用した 3 種類の絶縁油の写真を示す。新油は鉱油 (ENEOS, 高圧絶縁油 K) で図 4-1(a)のように薄い黄色の透明液体である。経年油は配電用変圧器に 48 年以上使用されていた鉱油で、同図(b)のように新油よりも濃い黄色の透明液体である。シリコン油 (信越化学, KF-96-10cs) は動粘度 10 cSt であり、鉱油と異なり同図(c)のように無色透明である。絶縁油は基本的に、濾過器を通して試験容器に注油した後、真空ポンプで 6 時間真空脱気し、0.1 MPa-abs の窒素ガスを封入して 12 時間静置して実験に使用した (第 3 章の “Good\_DT” に相当)。但し、経年油は油中ガスを排出しないように脱気処理を行わずに使用した。後述するが、これら 3 種類の絶縁油の部分放電開始電圧 PDIV は異なっており、絶縁特性の異なる絶縁油での PD 実験となっている。

図 4-2 に、実験前の経年油と新油のガス分析結果を示す。同図(a)は大気に関するガス成分 ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ) で、同図(b)は、熱分解や酸化、放電により発生する可燃性ガス成分 ( $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ) の結果である。同図(a)から、 $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  のガス量はどれも経年油の方が新油よりも大きく、特に  $CO_2$  は 1,660 ppm と大きな値が観測された。 $CO_2$  は絶縁紙の加熱、経年劣化で発生するとされていることから<sup>[12, 15]</sup>、経年油の特徴が現れている。他方、同図(b)から、経年油では  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$  が数 ppm 程度であるが検出されており、 $C_2H_2$  も定量下限値以下ではあるが検出限界以上の値<sup>[16]</sup>として 0.1 ppm が観測された (図中シンボル “\*”)。一方、新油では  $C_2H_2$  と  $C_2H_4$  は検出されず (図中シンボル “N”),  $C_2H_6$ ,  $CH_4$  は定量下限値以下ではあるが検出限界以上の値<sup>[16]</sup>として、それぞれ 0.2 ppm, 0.4 ppm が観測された。また、何れの絶縁油でも  $CO$  と  $H_2$  も定量下限値以下の値<sup>[16]</sup>として観測された (図中シンボル “t” は検出限界未満を表す)。定量下限値以上で検出された可燃性ガスの総量 TCG は、経年油では 5 ppm であるが新油では 0 ppm であった。

以上のように、経年油と新油でガス分析結果は異なり、経年油では可燃性ガスが検出されたが、そのガス量は「正常」と判定<sup>[16]</sup>される量であった。このような絶縁油を用いて PD 実験を行った。

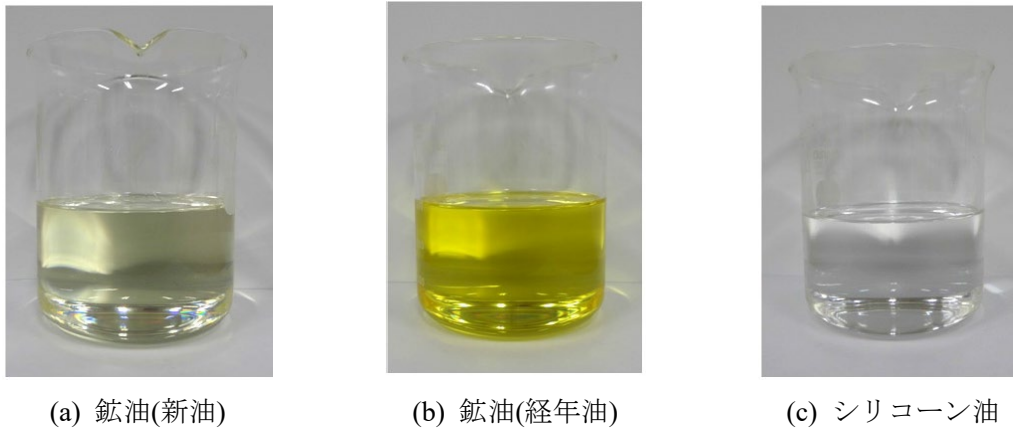
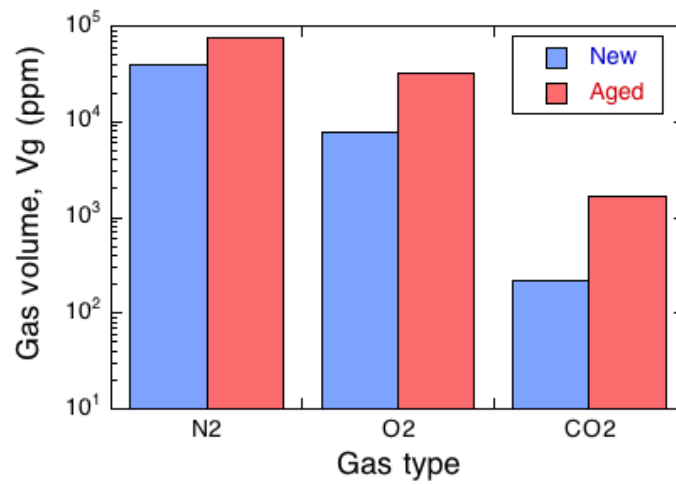
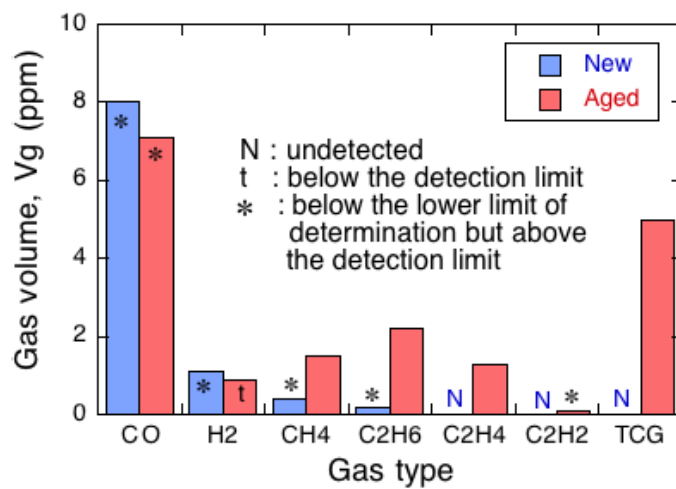


図4-1. 絶縁油の外観



(a) 大気に関するガス成分



(b) 可燃性ガス成分

図4-2. 鉱油の油中ガス分析結果

### 4.3. 実験結果

#### 4.3.1. 部分放電開始電圧と PD 電流波形

図 4-3 に、実験に使用した各絶縁油の正および負極性 PD 開始電圧 (PDIV) を示す。新油を基準として比較すると、経年油は新油よりも正負極性とも PDIV は低下しているが、正極性は 7%程度の低下に対し負極性では 2%の低下でほぼ同等とも言える。一方、シリコーン油は、正極性は新油よりも 7%程度上昇しているが、負極性では 10%程度低下していた。このように、新油と経年油及び鉱油とシリコーン油では PDIV 特性に相違があることが確認された。

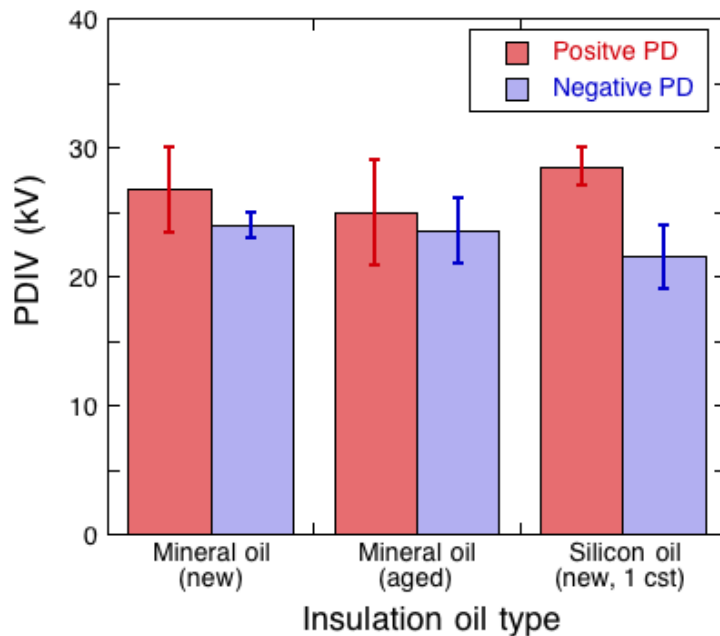
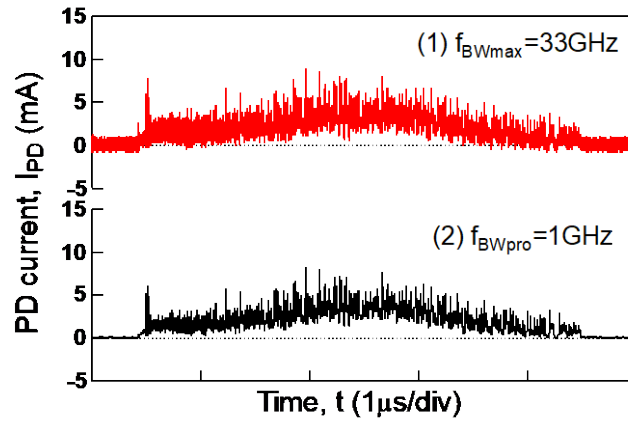


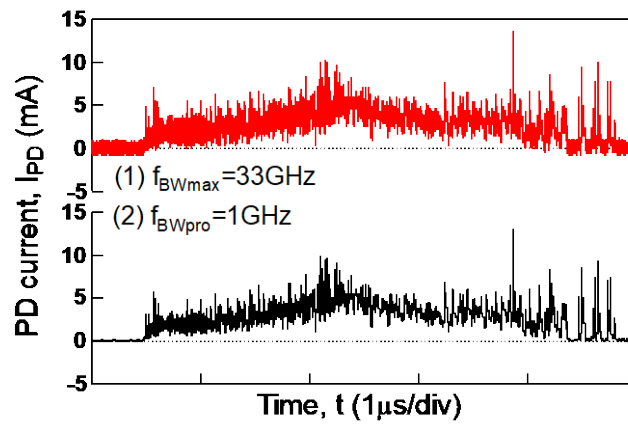
図 4-3. 各絶縁油の PDIV

図 4-4 に、各絶縁油中で PDIV で測定された正と負極性の典型的な PD 電流波形をそれぞれ示す。同図には、PD 電流波形の周波数特性と超広帯域計測の特徴を明確にするため、遮断周波数  $f_{BWpro} = 1 \text{ GHz}$  のローパスフィルタ (LPF) 処理した波形も示した (図中(2))。何れの絶縁油でも正極性と負極性での PD 電流波形は著しく異なっている。即ち、正極性 PD では多数のパルスが認められ、鉱油では経年油と新油に関わらず同図(a-1), (a-2)のように多数のパルスが重畳した数  $\mu\text{s}$  に渡り直流分が認められるようなパルス幅の長い波形である<sup>[2, 9, 11-13]</sup>。他方、シリコーン油では、同図(a-3)のように多数のパルスは発生しているが鉱油のような持続する直流分は認められず、また鉱油と比べて相対的に大きな 100 mA を超えるパル

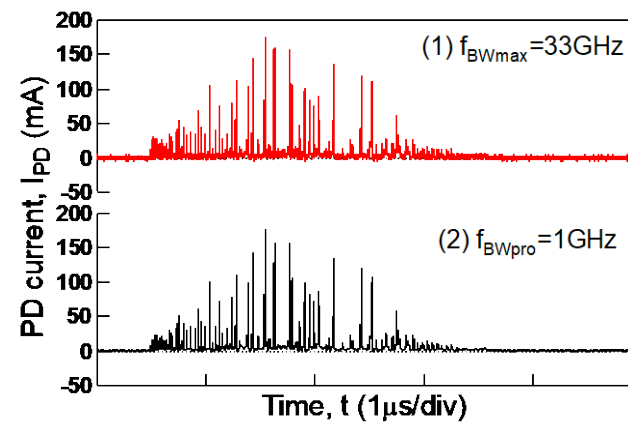
スが発生している。一方、負極性 PD では、何れの絶縁油中でも急峻なパルスが観測されており<sup>[11]</sup>、一見したところピーク値に違いはあるものの波形形状には顕著な相違は認められなかった。ここで、図中(2)の  $f_{BWpro} = 1 \text{ GHz}$  の LPF 処理した波形を見ると、正極性 PD では同図(1)の超広帯域測定結果と比べてピーク値ならびに波形に殆ど変化がないことがわかる。一方、負極性 PD では波形形状の変化は大きい。この処理された波形のピーク値や形状はほぼ同一であるため、特に負極性 PD 電流の測定は 1 GHz 程度の測定系では十分でなく、PD 現象を正しく理解、評価できない可能性があることを示唆している。なお、鉱油とシリコーン油の正極性 PD 電流の相違は、PD により発生するガス種に相違があり<sup>[14]</sup>、持続する放電は発生ガス中の放電特性や、放電による荷電粒子や副生成物の生成、それらによる絶縁油の導電性や粘性などの特性変化などが複合して影響していると思われる。また、経年油と新油では、個々のパルスでの相違は小さく、連続して発生する PD 特性に相違が現れているように見える。以下では、個々のパルスに着目して定量的な検討を進める。



(a-1) 鉱油(新油)



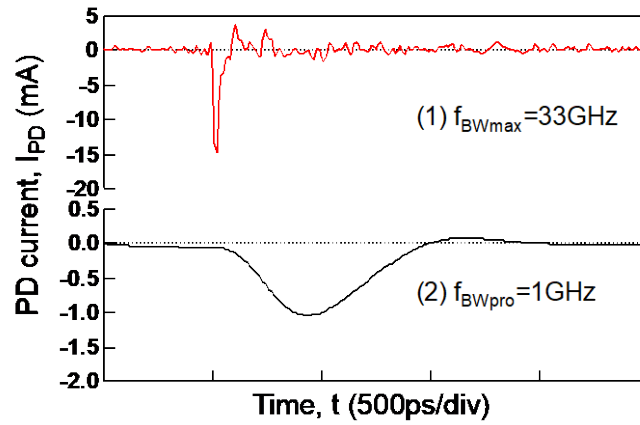
(a-2) 鉱油(経年油)



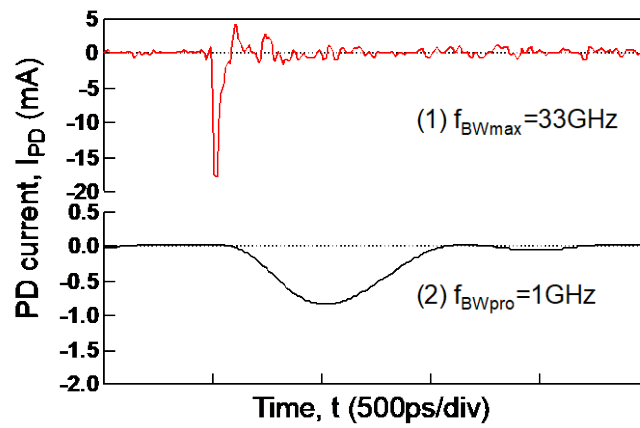
(a-3) シリコーン油

(a) 正極性 PD

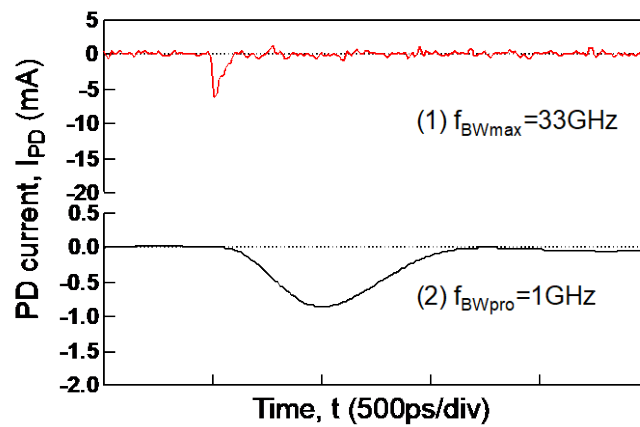
図 4-4-(1). 各絶縁油における PDIV での PD 電流波形



(b-1) 鉱油(新油)



(b-2) 鉱油(経年油)



(b-3) シリコーン油

(b) 負極性 PD

図 4-4-(2). 各絶縁油における PDIV での PD 電流波形

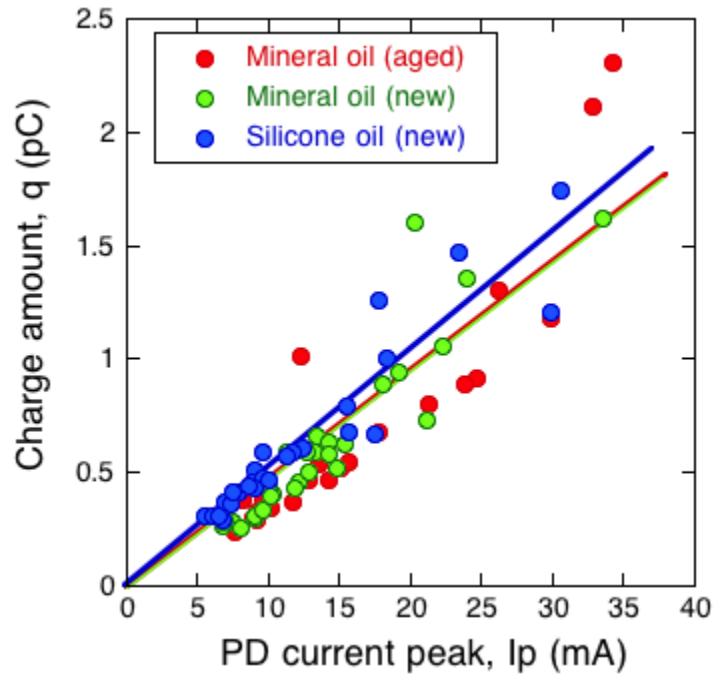
#### 4.3.2. PD 電流特性

前項で示したように、負極性 PD では正極性と比べて周波数の高い急峻な単独のパルスが発生しているため、以下では解析のための分離が容易な単独で特徴的な超広帯域測定結果である負極性 PD に着目し、PD 電流波形の特徴と絶縁油間の相違を検討する。電流波形の特徴として、微小ダイポールモデルの放射電界の理論式における電流パラメータから、電流ピーク値  $I_p$ 、積分値である電荷量  $q$ 、波頭立ち上がり部の時間変化  $di/dt$ 、および関係する波頭部の立ち上がり時間  $t_r$  の 4 つを選んだ。これらパラメータ単独の評価では、各絶縁油で発生する PD の大きさの相違が影響する懸念があるため、絶縁油間の評価は 2 つのパラメータの相関関係に基づく評価とした。

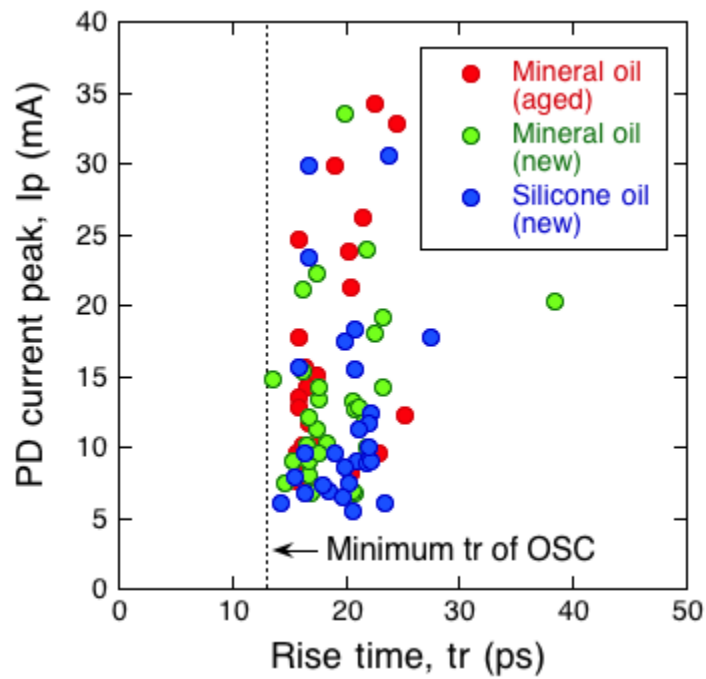
図 4-5(a)に各絶縁油における  $q$  と  $I_p$  の関係、同様に図 4-5(b)に  $I_p$  と  $t_r$  の関係を示す。同図 (a)から、何れの絶縁油でも  $q$  と  $I_p$  には比例関係が認められる。線形近似で特性を評価すると、図中の直線のように 2 種類の特性、即ち、経年油と新油の特性は一致し、シリコン油は一致しない特性 (傾きは 11%増加) が示された。他方、同図(b)から、 $I_p$  と  $t_r$  に明確な相関関係は認められないが、 $t_r$  は何れの絶縁油でも 20 ps 前後に分布しており (最小値は新油で 13.5 ps)、数 10 ps オーダの立ち上がり時間を有する急峻なパルスであることが本研究により示された。最小と最大値、平均値や中央値などの  $t_r$  特性を表 4-1 にまとめた。

以上の評価では経年油と新油の相違は認められなかったが、図 4-5 (b)の  $t_r$  分布から測定結果は使用したオシロスコープ OSC1 の測定下限値 13 ps の影響を受けている可能性があり、測定帯域をさらに拡張すると相違が現れる可能性がある。帯域拡張による検討は別報に譲るが、PD 電流波形のさらに統計的な考察を次章で行う。





(a) 電流ピーク値－電荷量特性



(b) 立ち上がり時間－電流ピーク値特性

図 4-5. 各絶縁油における負極性 PD 電流特性

表 4-1. 各絶縁油における負極性 PD 電流波形の立ち上がり時間特性

Oil type	Minimum tr (ps)	Maximum tr (ps)	Averaged tr (ps)	Median (ps)
Mineral oil (aged)	15.6	25.2	18.2	16.7
Mineral oil (new)	13.5	60.4	20.8	18.1
Silicone oil (new)	14.2	27.4	19.9	20.3

#### 4.4. 考察

##### 4.4.1. PD 電流波形の統計的比較

図 4-6 に、市販の統計解析ソフトウェア JMP を用いた線形正準判別分析により、3 種類の絶縁油を PD 電流波形の  $I_p$ ,  $q$ ,  $t_r$ ,  $di/dt$  の 4 つの変数に基づき比較した結果を示す。線形正準判別とは、3 群以上を線形的に区別して判別する統計解析手法の一つであり、判別分析 (discriminant analysis) には線形判別分析の他に、二次判別分析や混合判別分析などがある。3 群以上の判別は、正準判別分析 (Canonical discriminant analysis, CDA) や重判別分析 (Multiple discriminant analysis, MDA) と呼ばれる。正準とは主成分分析 (Principal component analysis, PCA) と関係のある正準相関分析 (Canonical Correlation Analysis, CCA) で用いられる用語であるが、主成分分析や正準相関分析はデータの分布、散らばりを表現するが、正準判別は群がなるべく分離するようにデータを配置する違いがある。

同図より、3 つの特性は近接しており類似した特性であることがわかるが、図中のシンボル「+」で示される各多変量平均に対応する点は一致しておらず絶縁油種類による相違がある可能性がある。なお、大きな楕円は各平均の 95 %信頼楕円であり、その中の小さな楕円は各グループの 50 %確率楕円である。各評価楕円に重なりはあるものの完全に内包関係を示す分布はなく、この結果からも各特性に相違があることが示唆される。そこで、多変量共分散分析で最も一般的に用いられている多群の重心が重なっているかどうかを検定する Wilks の  $\Lambda$  という統計値を用いて有意差があるかを検討した。その結果、 $\Lambda=0.824$ ,  $F=1.9537$ ,  $p$  値 ( $P_{pro} > F$ ) = 0.0559 と評価され、有意水準を一般に使用されている 5 % ( $\alpha = 0.05$ ) とすると  $\alpha < p$  となるため帰無仮説「絶縁油種類による PD 電流波形に相違はない」は棄却されない結果となった。即ち、 $\alpha = 0.05$  では 3 種の絶縁油で相違がないことを否定できず、PD 電流波形に差があるとは言えないと評価された。但し、 $p$  値は 5.6 %であり有意水準 5 %とほぼ同値である関係での評価である点に注意が必要である。

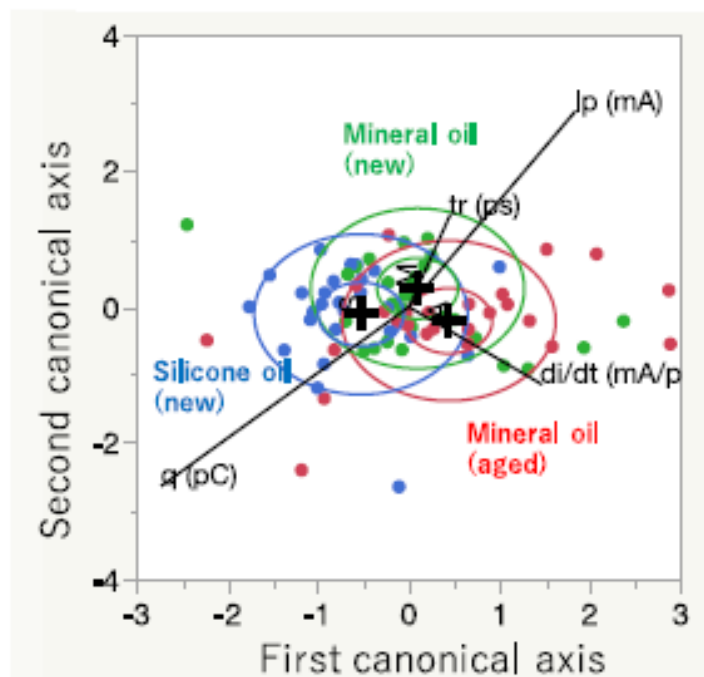
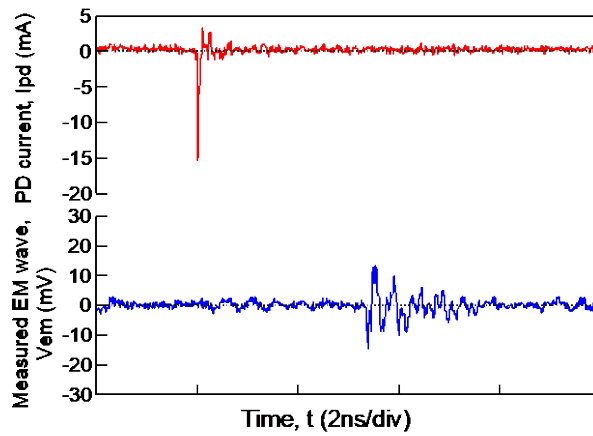


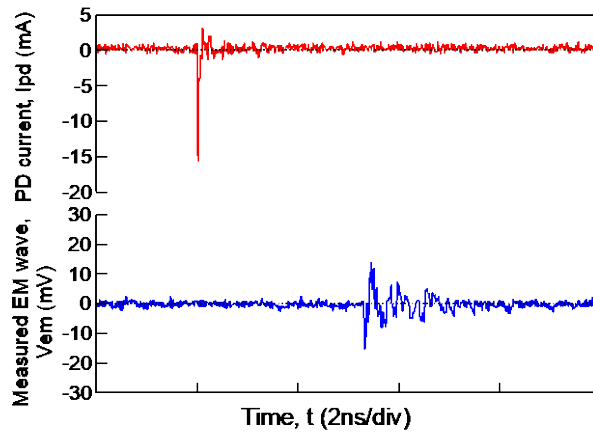
図 4-6. 各絶縁油における負極性 PD 電流波形特性を用いた線形正準判別分析

#### 4.4.2. 放射電磁波との関係

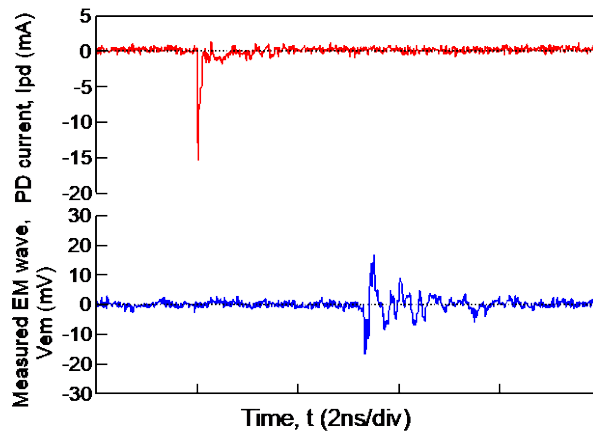
図 4-7 に、各絶縁油における負極性ならびに正極性 PD 発生時の典型的な電流と放射電磁波波形の同期測定結果を示す。同図は PDIV 以上の同一の 30 kV 印加時の結果である。同図 (a-1)~(a-3) のように、負極性 PD の場合は、絶縁油の種類に関わらず PD 電流パルスに対応して電磁波が検出されている。観測された電磁波と電流パルスの時間差は、測定経路の理論的な伝搬時間差と一致することを確認している。他方、同図 (b-1)~(b-3) やその先頭部の時間軸を拡大した同図 (b-4)~(b-9) のように、正極性 PD の場合は、電磁波は主に PD 電流発生先頭部で、電流値が後続のものより相対的に小さい場合 (同図 (b-8)) にも検出されている。それ以降では電流値の大きなパルス発生に対応して検出されているが、同図 (b-2), (b-5) のように鉱油の場合には経年油と新油に関わらず直流部の変化に対応する電磁波の検出はない。これらは、絶縁油中の負極性の単独 PD や正極性での先頭部 PD のような最初の PD は油中の“真性放電”に相当し、ピーク値が小さくても急峻で  $di/dt$  が相対的に大きい PD であり UHF 帯アンテナで検出されるが、継続する PD は先行する PD で発生したガスの影響を受けるため“気中放電”に相当し、最初の PD と比べて相対的に低い周波数成分であり (図 4-4(a-2)), 直流成分も同様に低い周波数成分であるため UHF 帯アンテナで検出されなかったものと解釈される。



(a-1) 鉱油(新油)



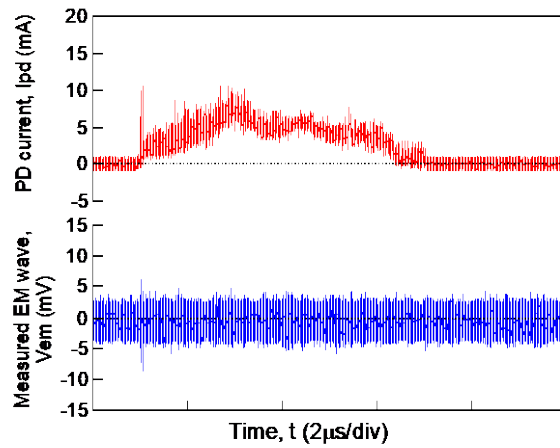
(a-2) 鉱油(経年油)



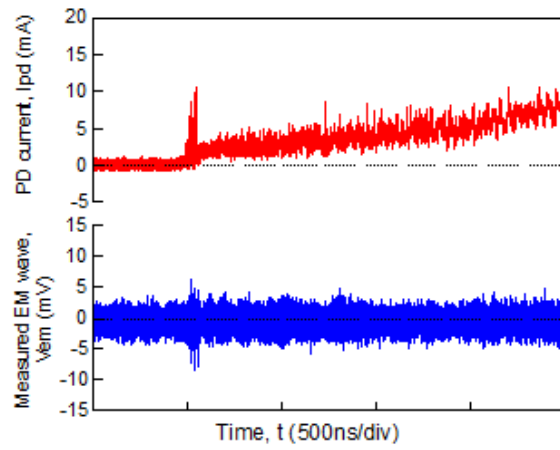
(a-3) シリコーン油

(a) 負極性 PD

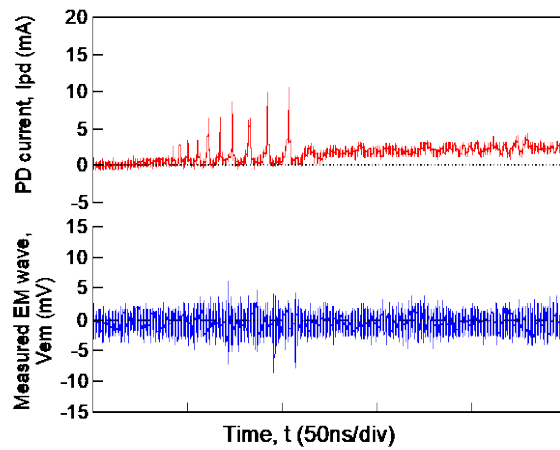
図 4-7-(1). 各絶縁油における PD 電流と PD 放射電磁波の同期測定結果



(b-1) 鉱油(新油)



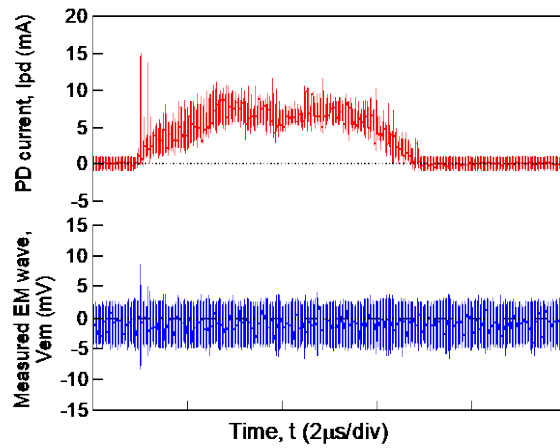
(b-2) (b-1)の拡大



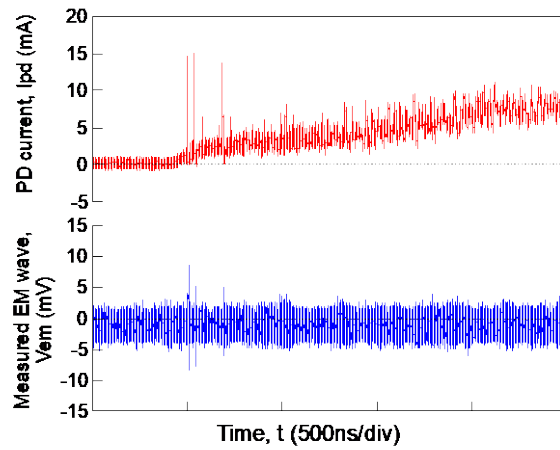
(b-3) (b-2)の拡大

(b) 正極性 PD

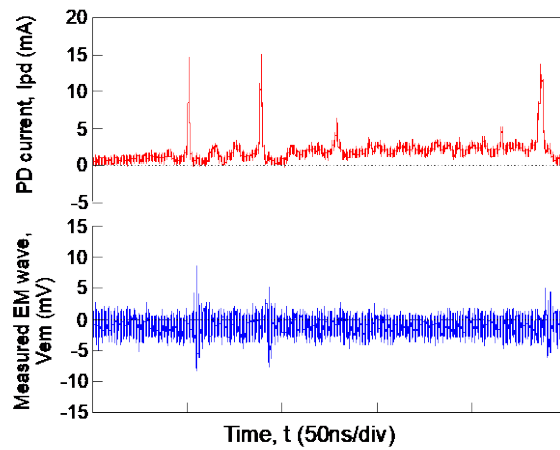
図 4-7-(2). 各絶縁油における PD 電流と PD 放射電磁波の同期測定結果



(b-4) 鉱油(経年油)



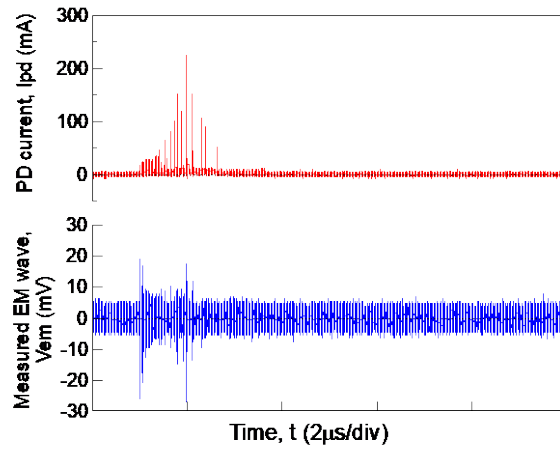
(b-5) (b-4)の拡大



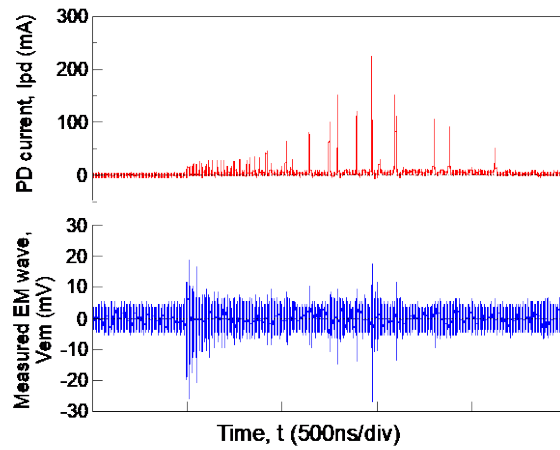
(b-6) (b-5)の拡大

(b) 正極性 PD

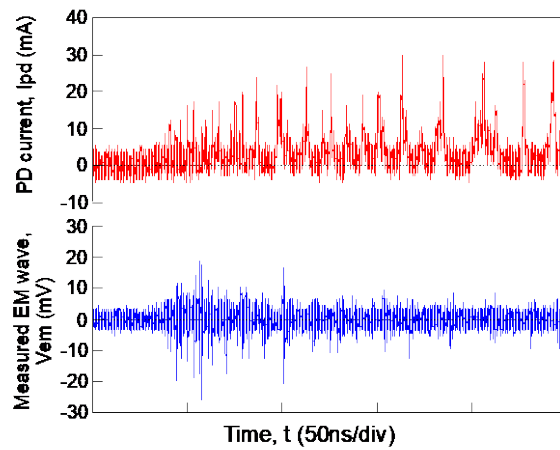
図 4-7-(3). 各絶縁油における PD 電流と PD 放射電磁波の同期測定結果



(b-7) シリコン油



(b-8) (b-7)の拡大



(b-9) (b-8)の拡大

(b) 正極性 PD

図 4-7-(4). 各絶縁油における PD 電流と PD 放射電磁波の同期測定結果

以上の結果から、UHF法による電磁波検出には極性効果と放射される電磁波の周波数帯域の考慮が必要であり、絶縁油中 PD に対する UHF 法は、負極性では電磁波検出により PD 発生を評価できるが、正極性では電磁波検出時以外にも PD が発生している可能性に注意を要することが本実験により示された。PD 電流と放射電磁波の関係をより詳細に議論するため、上記の PD 電流波形の検討と同様に、負極性 PD に着目してさらに検討した。

PD 放射電磁波と PD 電流の関係は、長さ  $l$  で電流  $I(t)$  が流れる微小ダイポールを放射源と考え、球座標系  $(\theta, \varphi, r)$  における原点に放射源があるとすると、原点から  $\theta$  方向で距離  $r$  の位置での放射電界強度の時間変化  $E_{\theta}(t)$  は次式で与えられる。ここで、 $v$  は電磁波の伝搬速度であり、媒質の誘電率と透磁率により光速と異なる値を示すことになる。

$$E_{\theta}(t) = \frac{l}{4\pi} \left( \frac{1}{\varepsilon} \int I\left(t - \frac{r}{v}\right) dt \frac{1}{r^3} + \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} I\left(t - \frac{r}{v}\right) \frac{1}{r^2} + \mu \frac{dI\left(t - \frac{r}{v}\right)}{dt} \frac{1}{r} \right) \sin \theta \quad \dots (4.1)$$

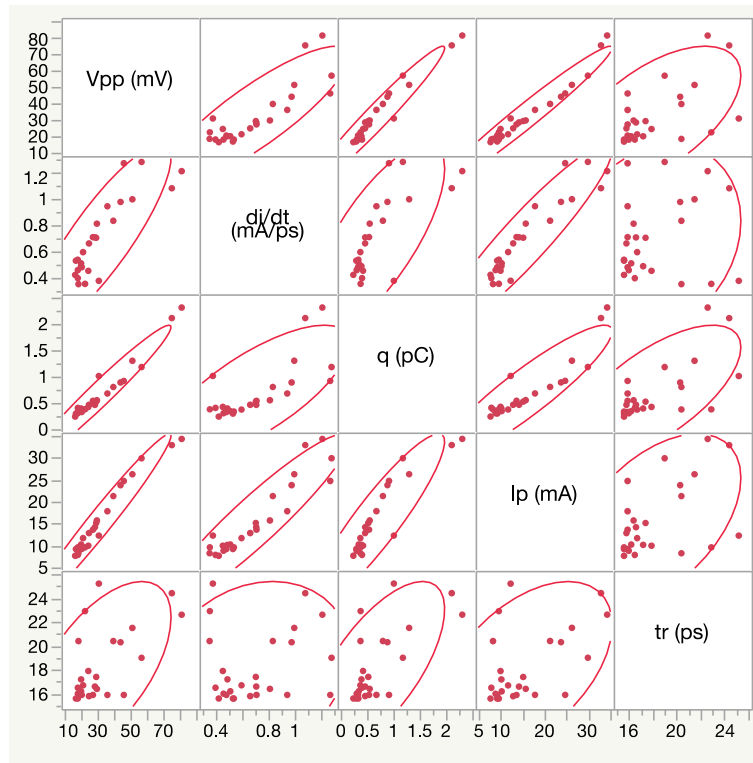
(4.1)式から、 $E_{\theta}(t)$  は電流に関する3項、電流  $I(t)$  とその微分値  $dI(t)/dt$  および積分値 (電荷量  $q$  に相当)、と関係することがわかる。各項は距離  $r$  の指数が異なり、遠方界では指数1の微分項が支配的となる。前項で使用した4つの電流パラメータは、この3つ (電流は電流ピーク値) と、微分値  $di/dt$  とピーク値  $I_p$  と関連する波頭立ち上がり部の時間変化  $t_r$  であった。

図4-8に、PD放射電磁波の振幅強度  $V_{pp}$  と同期計測されたPD電流波形の4つのパラメータを変数として多変量解析を行った結果を示す。これらの結果から、各絶縁油の  $V_{pp}$  と電流パラメータの関係のみを抽出したものを図4-9に示す。図中の楕円は95%二変量正規確率楕円である。何れの絶縁油でも、 $V_{pp}$  は(4.1)式と関係ある電流ピーク値  $I_p$ 、電荷量  $q$  及び時間変化  $di/dt$  と正の相関が認められたが、特に  $I_p$  及び  $q$  との相関が高いことが示された。相関の高い  $V_{pp}$  と  $I_p$  の関係を、各絶縁油で線形近似して一つにまとめて図4-10に示した。図4-5(a)に示したPD電流波形の  $I_p$  と  $q$  の関係と同様に、 $V_{pp}$  と  $I_p$  の関係は経年油と新油は同一であるのに対しシリコン油は異なる特性として評価された。この結果は  $V_{pp}$  と  $q$  の関係及び  $V_{pp}$  と  $di/dt$  の関係でも同様であった。

以上の結果、33 GHz オシロスコープを用いた超広帯域計測による急峻な負極性 PD の電流波形の相関特性ならびに放射電磁波と電流波形の相関特性の両方から、鉱油とシリコン油での PD 電流波形特性は異なり、鉱油の経年油と新油では同一の特性と評価された。更に PD 電流波形の特徴量に基づく線形正準判別分析から有意水準5%では経年油と新油及び

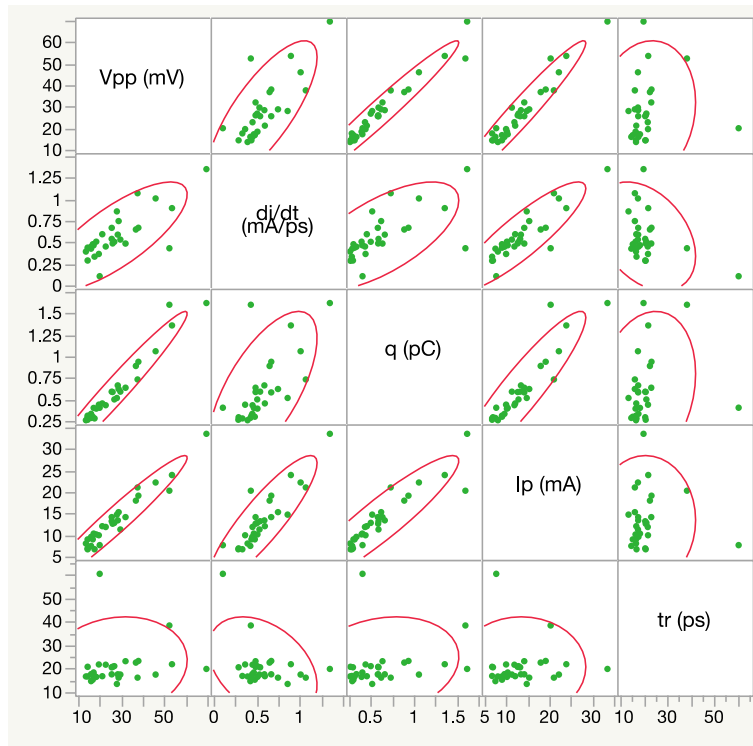


シリコン油には相違があるとは言えないと評価されたが、 $p$  値は 5.6 %と有意水準とほぼ同程度での評価であった。よって、経年油と新油の相違有無に関しては、今後さらに測定帯域を拡張した結果による評価が待たれる。

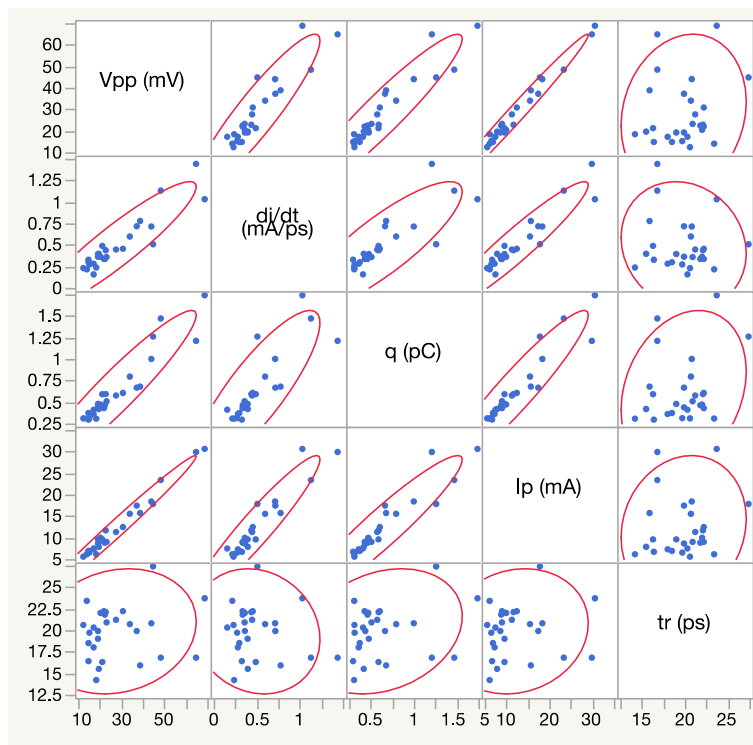


(a) 鉱油(経年油)

図 4-8-(1). PD 放射電磁波強度と負極性 PD 電流波形特性の多変量解析結果



(b) 鉱油(新油)



(c) シリコーン油

図 4-8-(2). PD 放射電磁波強度と負極性 PD 電流波形特性の多変量解析結果

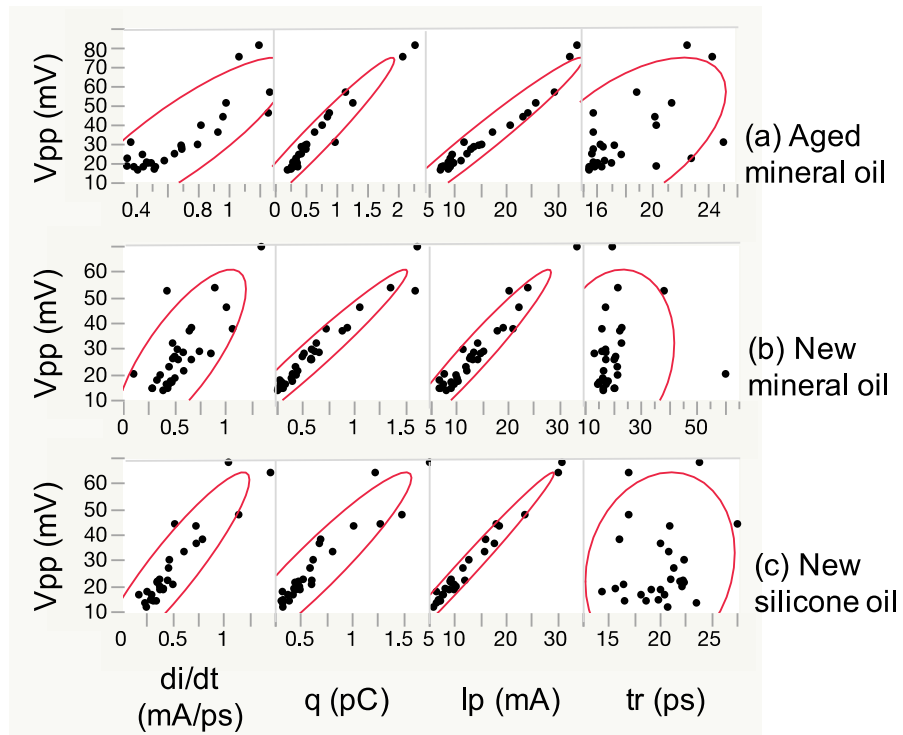


図 4-9. PD 放射電磁波強度と負極性 PD 電流波形特性との関係

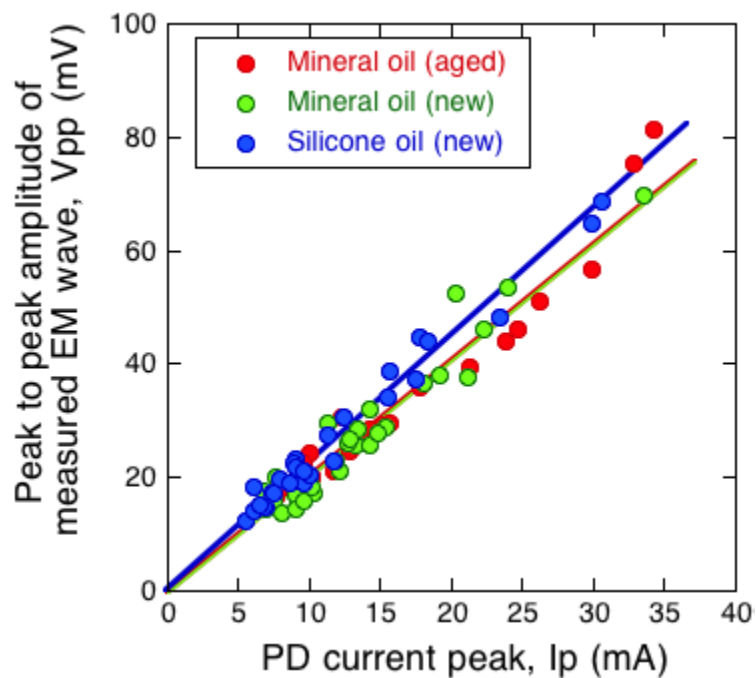


図 4-10. 各絶縁油における負極性 PD 電流ピーク値—PD 放射電磁波強度特性

#### 4.5. まとめ

本章では、鉱油中の放電物理ならびに UHF 法による絶縁診断のさらなる検討として、アナログ帯域 33 GHz のオシロスコープを用いた超広帯域計測装置を用い、鉱油の経年油と新油で、あるいは鉱油とシリコン油で、PD 電流波形にどのような相違があるかを実験により詳細に調べた。その結果、PD 電流波形には顕著な極性効果が認められた。正極性 PD では多数のパルスが認められ、鉱油では経年油と新油によらずパルスが重畳した数  $\mu\text{s}$  に渡り直流分が認められるようなパルス幅の長い波形に対し、シリコン油では持続する直流分は認められない相違があった。負極性 PD 電流パルスの立ち上がり時間の計測された最小値付近の結果は計測系の測定限界の影響を受けている可能性があり、測定帯域をさらに拡張した測定の必要性が示唆された。さらに PD 電流波形と同時に UHF 帯アンテナで PD 放射電磁波波形を計測し、これらの結果に基づき、PD 電流波形の相違や UHF 帯アンテナでの電磁波検出特性ならびに PD 電流と PD 放射電磁波の関係などを、統計解析手法を用いて議論した。その結果、急峻な負極性 PD 電流波形の特徴量の二変数の相関関係に基づき経年油と新油およびシリコン油を比較すると、鉱油とシリコン油では特性に相違が認められたが、経年油と新油では同一の特性が示された。この結果は、PD 放射電磁波の振幅値  $V_{pp}$  と電流ピーク値  $I_p$  あるいは電荷量  $q$  や  $di/dt$  との関係でも同様に示された。さらに PD 電流波形の 4 つの特徴量を用いて線形正準判別分析を行った結果、経年油と新油及びシリコン油で相違がある可能性が示唆されたが、Wilks の  $\Lambda$  という統計値により有意水準  $\alpha = 0.05$  で評価すると、帰無仮説は棄却されず経年油と新油及びシリコン油中の PD 電流波形に差があるとは言えないと評価された。ただし、その p 値は 5.6 % と有意水準 5 % とほぼ同値であり、測定系の帯域制限の影響を受けている可能性があることから、経年油と新油の相違有無に関しては今後さらに測定帯域を拡張した結果による評価が待たれる<sup>[17]</sup>。

[第4章の参考文献]

- [1] CIGRE Technical Brochure WG A2.30, “Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems,” TB349, 2008
  - [2] N. Pattanadach and M. Muhr, “Partial discharge inception voltage investigation of mineral oil: effect of electrode configurations and oil conditions,” IEEE Trans. on DEI, Vol.23, No.5, pp.2917-2924, 2016
  - [3] S. J. Tee, Q. Liu, Z. D. Wang, G. Wilson, P. Jarman, R. Hooton, D. Walker and P. Dyer, “Seasonal influence on moisture interpretation for transformer aging assessment,” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 32, No. 3, pp.29-37, 2016
  - [4] 平松悠史, 村上祐一, 村本裕二, 「鉱油および植物系絶縁油の交流絶縁破壊特性に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, 第 140 巻, 第 3 号, pp.149-155, 2020
  - [5] CIGRE Technical Brochure WG D1.37, “Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC60270) and unconventional methods,” TB662, 2016
  - [6] 大塚信也, 小坪俊勝, 「SF<sub>6</sub> ガス中部分放電電流パルス波形のピコ秒立ち上がり時間特性とその形成メカニズム」, 電気学会論文誌 B, 第 141 巻, 第 1 号, pp.40-47, 2021
  - [7] 大塚信也, 中山裕太, 鈴木悠太, 「SF<sub>6</sub> ガス中のリーダ転移を含む部分放電進展現象の光学計測」, 電気学会論文誌 B, 第 141 巻, 第 2 号, pp.196-206, 2021
  - [8] 大塚信也, 鈴木悠太, 中山裕太, 「負極性雷インパルス電圧下の SF<sub>6</sub> ガス中部分放電のリーダ転移特性とスケーリング則」, 電気学会論文誌 B, 第 141 巻, 第 2 号, pp.207-216, 2021
  - [9] H. Debruyne and O. Lesaint, “About the significance of PD measurements in liquids,” IEEE Trans. on DEI, Vol.10, No.3, pp.385-392, 2003
  - [10] 牧野裕太, 栗原隆史, 高橋俊裕, 「油浸紙積層絶縁系の油隙における部分放電信号と発光および気泡の準同時観察ならびに分解ガスの検出」, 電気学会論文誌 A, Vol.139, No.9, pp.393-399, 2019
  - [11] M. Fukuzaki, T. Matsumoto and S. Ohtsuka, “Sophisticated measurement of PD current pulses in insulation oil and the effects of deaeration treatment on the waveforms with the SHF\_PDPW system,” XVIII International Symposium on High Voltage Engineering, PD-44, 2013
  - [12] G. P. Cleary and M. D. Judd, “UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil,” IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, Vol.153, No.2, pp.47-54, 2006
-

- [13] M. Pompili and C. Mazzetti, “Simultaneous ultrawide and narrowband detection of PD pulses in dielectric liquids,” IEEE Trans. on DEI, Vol.5, No.3, pp.402-407, 1998
- [14] 桑原宏, 鶴田敬二, 石井敏次, 吉永淳, 「シリコン油中の放電によるガスの発生」, 電気学会論文誌 A, Vol.97, No.5, pp.267-273, 1977
- [15] 山岡道彦, 「変圧器内絶縁油の異常現象に基づくガス発生について」, 電気学会雑誌, Vol.82, No.887, pp.1327-1336, 1962
- [16] 電気協同研究会, 「電力用変圧器改修ガイドライン」, 電気協同研究, 第 65 卷 第 1 号, 2009
- [17] 芝田拓樹, 福崎稔, 松本卓也, 大塚信也, 「超広帯域計測による経年絶縁油と新油及び油種類による PD 電流波形の比較」, 電気学会論文誌 B, 第 142 卷, 第 10 号, pp.482-489, 2022

## 第5章 鉱油中負極性 PD 電流のピコ秒立ち上がり時間特性と 5G 帯域との関係

### 5.1. はじめに

前章までに示したように、鉱油やシリコン油などの絶縁油中 PD は、PD 電流波形の立ち上がり時間が数 10 ps である急峻なパルス現象であることが明らかとなった。他方、ガス絶縁機器の主要な絶縁媒体である SF<sub>6</sub> ガス中の PD も、針電極系の電界利用率にも依存するが、PD 電流波形の立ち上がり時間が数 10 ps オーダの急峻なパルス現象であることが知られている<sup>[1]</sup>。変圧器とガス絶縁機器が直結されている送変電機器や、油浸あるいはガス絶縁変圧器の PD 診断の周波数特性を検討するとき、絶縁油中と SF<sub>6</sub> ガス中での PD 電流パルスとの関係、即ち絶縁油中と SF<sub>6</sub> ガス中での PD 電流パルスの急峻さは同等か相違があるのかの理解が必要である。PD 電流パルスの立ち上がり時間は、放電電極の電界利用率により変化するため、電界利用率に基づき特性を評価することが必要であるが、鉱油中の特性は明らかとなっていない。

鉱油や SF<sub>6</sub> ガス中の PD はこのような急峻な電流パルスを伴う現象であるため、UHF 法と呼ばれる主に UHF 帯 (0.3~3 GHz) に感度を有するアンテナやセンサで放射電磁波を検出する手法が電力用変圧器や GIS あるいは電力ケーブルの PD 診断に適用されている<sup>[2]</sup>。近年、5G と呼ばれる第 5 世代移動通信システムが普及してきており、拡張モバイルブロードバンド (eMBB) や超高信頼性低遅延通信 (URLLC)、大規模マシンタイプ通信 (mMTC) などのサービスにより産業界だけでなく社会全体がより良く大きく変化することが期待されている。国内では 5G 通信に Sub6 帯の 3.7 GHz 帯と 4.5 GHz 帯、ミリ波帯の 28 GHz 帯が使用されるが、ピコ秒領域の PD 現象がこのような帯域の通信に及ぼす影響を知ることは重要である。

以上の背景のもと、本章では 70 GHz のアナログ帯域を有するオシロスコープを用いた超広帯域 PD 電流パルス波形計測装置 (SHF/EHF\_PDPW システム)<sup>[1,3]</sup>を用い、鉱油中の PD 電流パルス波形の立ち上がり時間を針電極系の電界利用率を変化させて調べた。その結果を SF<sub>6</sub> ガス中の PD 特性と比較した。さらに鉱油中 PD 電流波形の測定結果に基づき、PD 電流波形をガウス波形でモデル化し一般化して放射電磁波の周波数特性を議論し、5G 通信で使用される通信帯域との関係を明らかにした。

### 5.2. 実験装置と方法

実験装置は基本的には第 3 章と同様であるが、アナログ帯域 70 GHz のオシロスコープを用いた超広帯域 PD 電流パルス波形計測装置を構成し PD 電流波形を測定した。本実験では鉱油 (ENEOS, 高圧絶縁油 K) を使用した。また、針電極先端の曲率半径とギャップ長を変化させることで、電極系の電界利用率  $u$  を  $u = 1.8, 3.2, 6.3\%$  の 3 条件で変更した、なお、電界利用率  $u$  が低下するほど針電極の先端曲率半径は低下、即ち尖っていることになる。図 5-1 に本実験条件での部分放電開始電圧(PDIV)  $V_{pd}$  を電界利用率依存性として示す。本 PDIV は負極性であり、本研究では二次ストリーマの発生が少ないシングルストリーマが支配的な負極性の PD を対象とした。

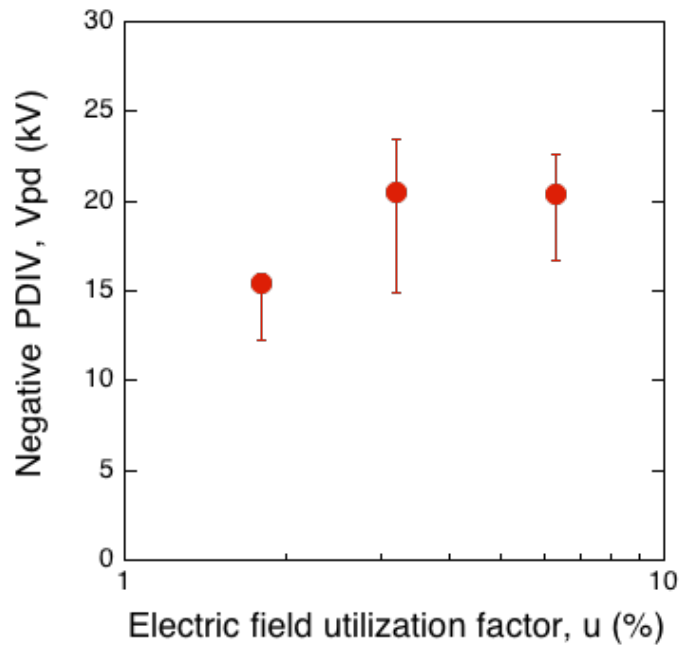


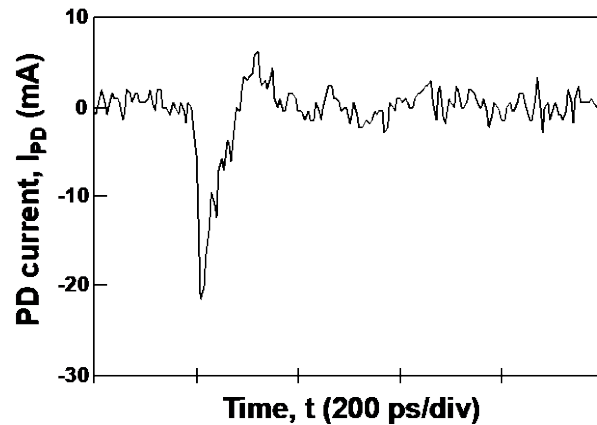
図 5-1. 鉱油中負極性 PDIV の電界利用率依存性

### 5.3. 実験結果

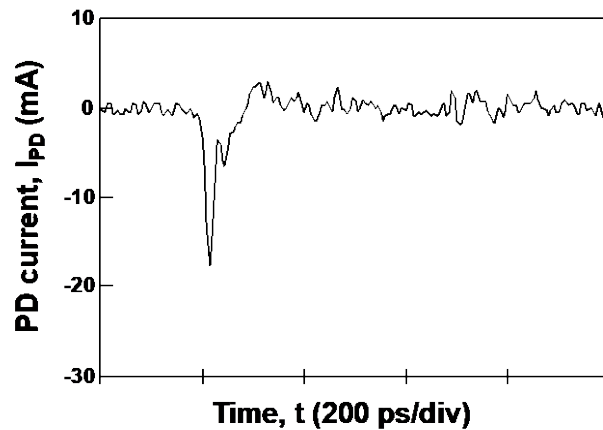
図 5-2 に超広帯域計測装置で測定された各電界利用率における典型的な PD 電流波形を示す。第 3, 4 章で示されたように、負極性の PD 電流波形はシングルピークの急峻なパルス波形である。同図(a)~(c)のそれぞれの立ち上がり時間  $t_r$  は 15.0 ps, 17.7 ps および 27.3 ps であった。このような波形の立ち上がり時間  $t_r$  を電界利用率依存性として図 5-3 にまとめた。同図に示されるように、立ち上がり時間  $t_r$  は電界利用率が増加するほど増加しており、その平均値は数 10 ps の領域にあることがわかる。図 5-4 に、各電界利用率で測定した PD 電流



波形のピーク値  $I_p$  と波形の面積から求めた電荷量  $q$  の関係を示す。同図に示されるように、 $q$  と  $I_p$  の関係を示すグラフの傾きは電界利用率  $u$  が大きくなるほど増加しており、一致していないことがわかる。これは、図 5-3 で示された  $t_r$  の電界利用率  $u$  依存性から、 $t_r$  と共にパルス幅が大きくなっていることを考えると理解できる。また、PD 電流パルスは電界利用率依存性があること、即ち電力機器内の異物や欠陥のサイズや形状が異なると発生する PD 電流は異なり、それにより放射される電磁波特性も異なることを意味している。

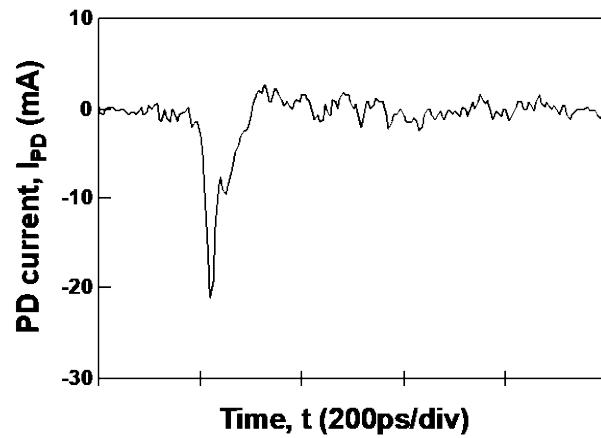


(a)  $u = 1.8\%$



(b)  $u = 3.2\%$

図 5-2-(1). 各電界利用率における鉱油中負極性 PD 電流波形例



(c)  $u = 6.3\%$

図 5-2-(2). 各電界利用率における鉱油中負極性 PD 電流波形例

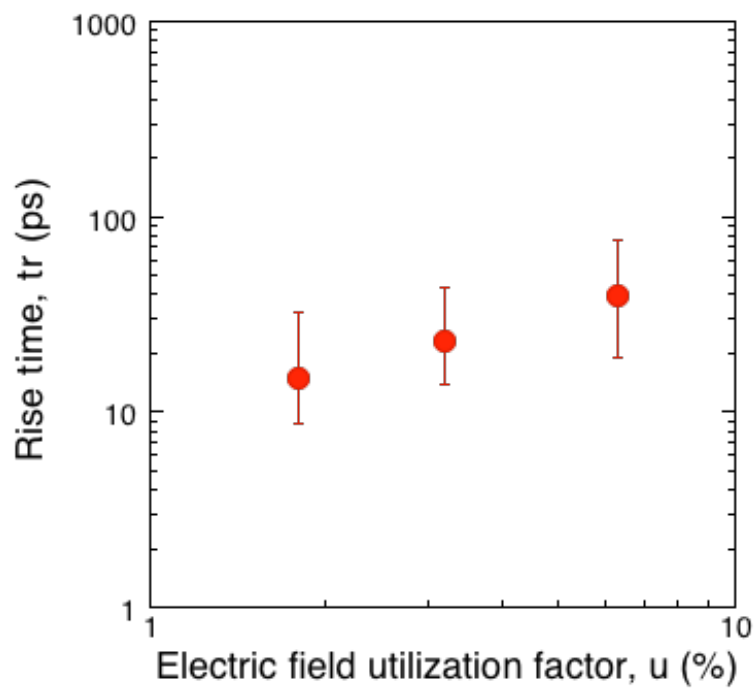


図 5-3. 鉱油中負極性 PD 電流波形の立ち上がり時間の電界利用率依存性

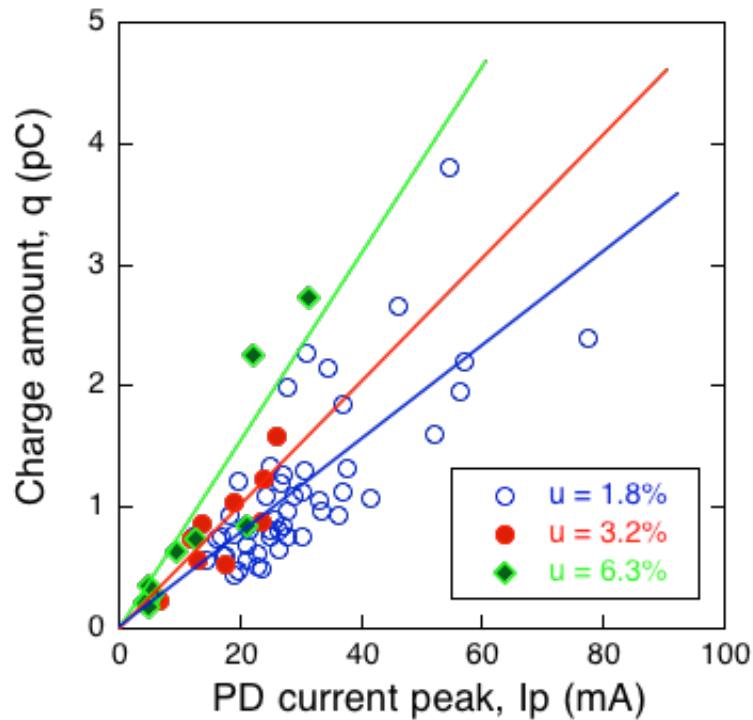


図 5-4. 鉱油中負極性 PD 電流波形の電流ピーク値  $I_p$  と電荷量  $q$  の関係

#### 5.4. 考察

##### 5.4.1. SF<sub>6</sub> ガス中 PD との比較

図 5-5 に、SF<sub>6</sub> ガス中で測定された PD 電流パルスの立ち上がり時間  $t_r$  の電界利用率依存性<sup>[1]</sup>と併せて本研究で得られた図 5-3 の鉱油中の結果を示す。なお、図中の右上がりの帯は SF<sub>6</sub> ガス中での電離指数  $k$  を 10.5 から 18 とした場合のストリーマ理論による理論値であり、超広帯域計測装置による測定結果はこの理論値とよく一致していることがわかる。なお、通常のアナログ帯域 1 GHz のオシロスコープでの観測ではこの理論値と一致しない<sup>[1]</sup>。同図から明らかなように、鉱油中の PD 電流パルスの立ち上がり時間は SF<sub>6</sub> ガス中よりも短い、即ちより急峻であることがわかる。この結果は、同じ電流値の PD であれば、鉱油中の PD の方が SF<sub>6</sub> ガス中よりも  $di/dt$  は大きくなることを意味しており、UHF 法による PD 検出・診断の観点からは、鉱油中 PD の方がより大きな振幅値を有する電磁波を放射することを示唆している。

ガス中では実効電離係数が 0 となる電界値 (換算電界値) として臨界電界  $E_{cr}$  はよく検討されており、理論的な解析値や実験値の報告は多数ありよく知られているが、鉱油などの絶縁油では製品による成分の相違や添加物、不純物の影響により  $E_{cr}$  ならびに電子やイオンの移動度など電流波形を検討する際に必要な基礎的な物性値が不明であることが多い。例え

ば、鉱油中の PD 電流波形の立ち上がり時間も SF<sub>6</sub> ガス中と同様に臨界電界領域を電子が移動する時間に等しいと仮定できると、立ち上がり時間と電離領域の電界分布から  $E_{cr}$  と電子の移動度を推定できることになる<sup>[3]</sup>。このように、超広帯域計測による PD 電流波形の観測結果は応用できる。

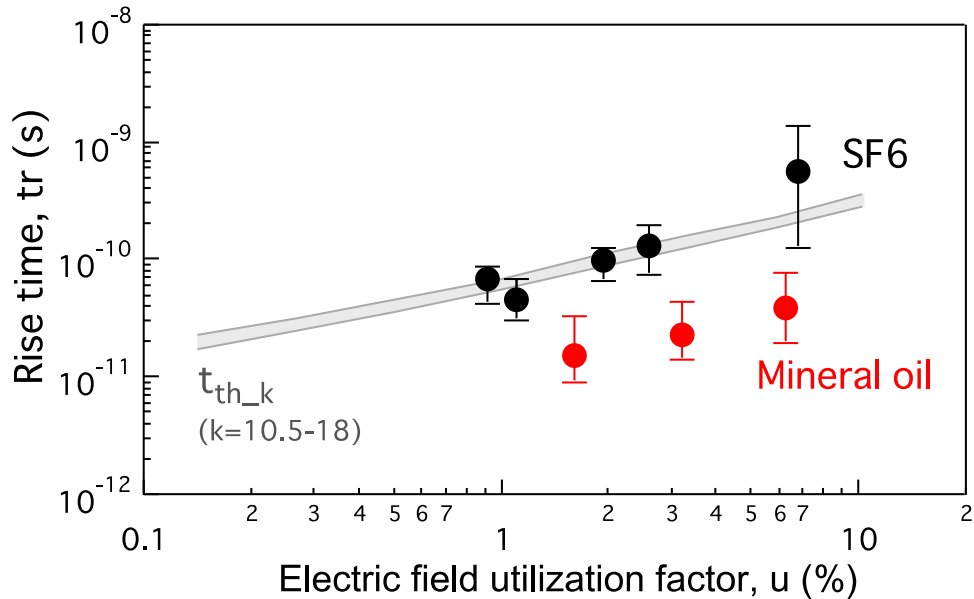


図 5-5. 鉱油および SF<sub>6</sub> ガス中負極性 PD 電流波形立ち上がり時間の電界利用率依存性

#### 5.4.2. 5G 通信への影響

上記のように、鉱油中の PD 電流波形は SF<sub>6</sub> ガス中 PD よりもより急峻であり、即ち立ち上がり時間は短く数 10 ps オーダの領域で発生することがあることが示された。本研究での最小  $t_r$  は 8.77 ps であった<sup>[3]</sup>。同様の鉱油中の実験を、計測機器の帯域が及ぼす影響としてオシロスコープの帯域を 70 GHz から 33 GHz, 20 GHz, 10 GHz, 5 GHz と変化させて検討した結果、70 GHz での結果の  $t_r$  の平均値は 13 ps であった<sup>[4]</sup>。本研究での  $u=1.8\%$  での  $t_r$  の平均値は 15 ps である。よって、以下の検討では、実験で得られた  $t_r$  の最小平均値である 13 ps を代表値として使用し、ガウス波形による模擬 PD 電流波形に基づき放射電磁波特性を検討する。これは、ガウス波形を用いることで、微分や積分およびそれらのフーリエ変換による周波数特性を数学的に容易に検討できる利点がある。詳細は後述する。

模擬 PD 電流波形として、半値半幅 (half width at half maximum, HWHM) が 13 ps のガウス波形を使用した。図 5-6 に、HWHM = 13 ps のガウス波形の一例を示す。同図では測定結

果の波形とピーク値が一致するようにガウス波形のピーク値を設定した。測定波形の  $t_r$  は 15.3 ps であり、3 点の移動平均処理を行い平滑化して表示している。ガウス波形による模擬 PD 電流波形は立ち上がり部および波尾の電流が大きな部分はよい一致を示しているが、それ以下の部分では測定値よりも早く減衰している。図 5-7 に、HWHM の相違を可視化する観点で、一例として HWHM が 80 ps と 400 ps の場合を 13 ps の波形と一緒に示す。これらの値は、70 GHz で測定した結果を 5 GHz あるいは 1 GHz のオシロスコープで観測した場合の結果に相当するが、立ち上がりの遅い PD 電流波形を模擬している波形と捉えてもよい。このようなガウス波形による模擬 PD 電流波形に対して遠方界の放射電磁波の周波数帯域を検討した。

(5.1)式に、一般的なガウス分布 (正規分布) の確率密度関数による式を示す。式中の  $\sigma$  は標準偏差であり、同式では平均  $\mu=0$  としている。この分布を模擬 PD 電流波形  $i(t)$  と考えると、遠方界での電磁波は  $i(t)$  の微分である  $di(t)/dt$  と関係するため、(5.1)式を微分すると(5.2)式のようなレイリー分布の確率密度関数と類似した、係数が異なる分布となる。(5.1)式、(5.2)式ともにフーリエ変換が可能であり、フーリエ変換により求めた式に基づき周波数特性を検討した。

$$i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots (5.1)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots (5.2)$$

図 5-8 に、HWHM を 5~400 ps で変化させた(5.2)式をフーリエ変換して求めたスペクトラム強度分布の大きさを示す。同図では 5G 通信で使用されるミリ波帯 (国内 28 GHz 帯, 海外 24/26/28/37/39/48 GHz など) を含む 20~40 GHz の領域と国内の Sub6 帯 (3.7/4.5 GHz 帯) を含む 3~6 GHz の周波数領域を黄色でマークしている。図中の HWHM が 10 ps, 13 ps, 15 ps の結果は、スペクトルピークが黄色のマーク内に現れていることがわかる。即ち、このような時間変化を有する PD が発生すると 5G 通信のミリ波帯にピークを示す電磁波が発生する可能性があることがわかった。また、HWHM が 80 ps のスペクトラム分布を見ると、国内の Sub6 帯に相当する周波数領域でピークが現れていることがわかる。このように、PD 現象の立ち上がり時間を模擬したガウス波形を用いることで、簡易的に容易に放射される電磁波の周波数特性を検討することができた。

なお、実際には実験による検討と共に自由空間伝搬損失など伝搬する電磁波の減衰の周波数特性を検討する必要がある。実験に関しては、ブロードな広帯域のアンテナがないことが問題であるが、放電発生有無による 5G 通信内容にエラーが発生するかなど現象論的な検討は可能であり、今後の実施が期待される。

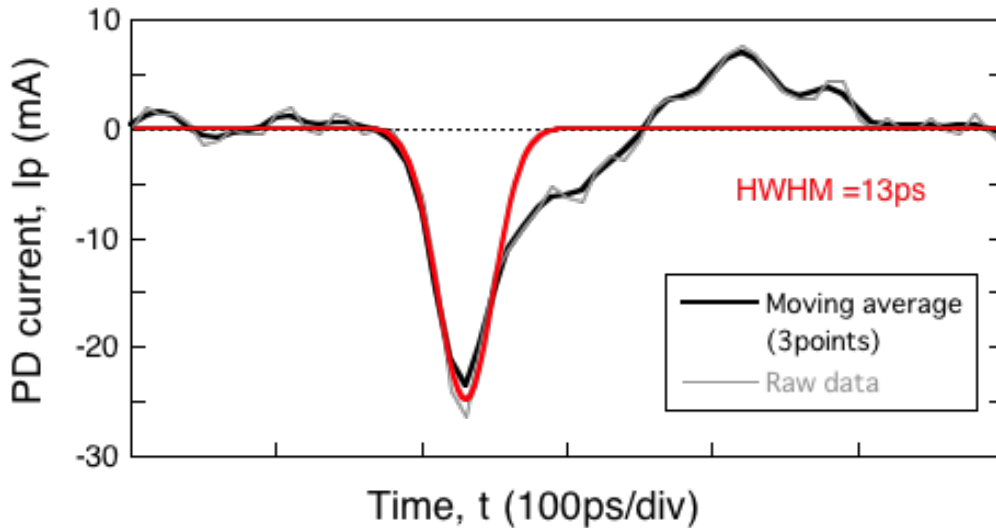


図 5-6. HWHM=13 ps のガウス波形により模擬した PD 電流波形の一例

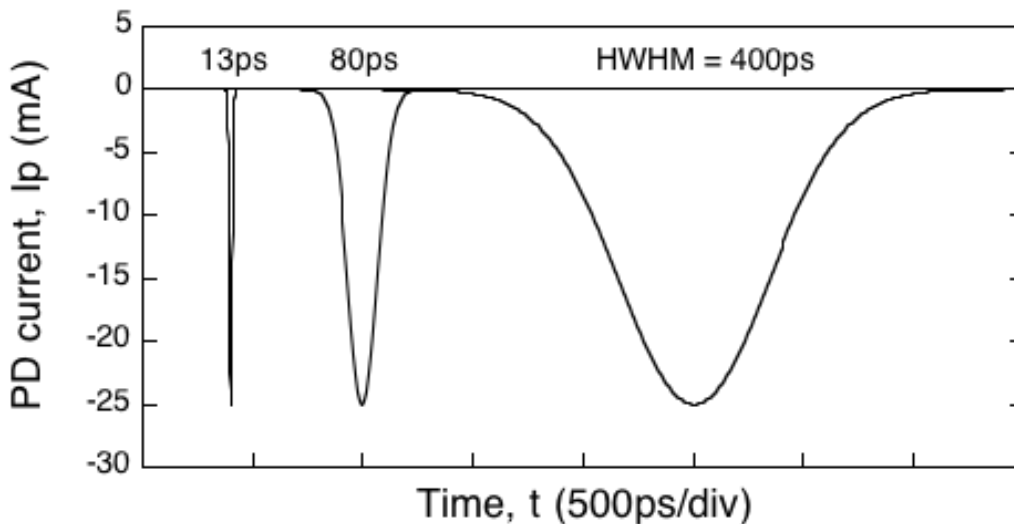


図 5-7. 異なる HWHM を有するガウス波形の比較

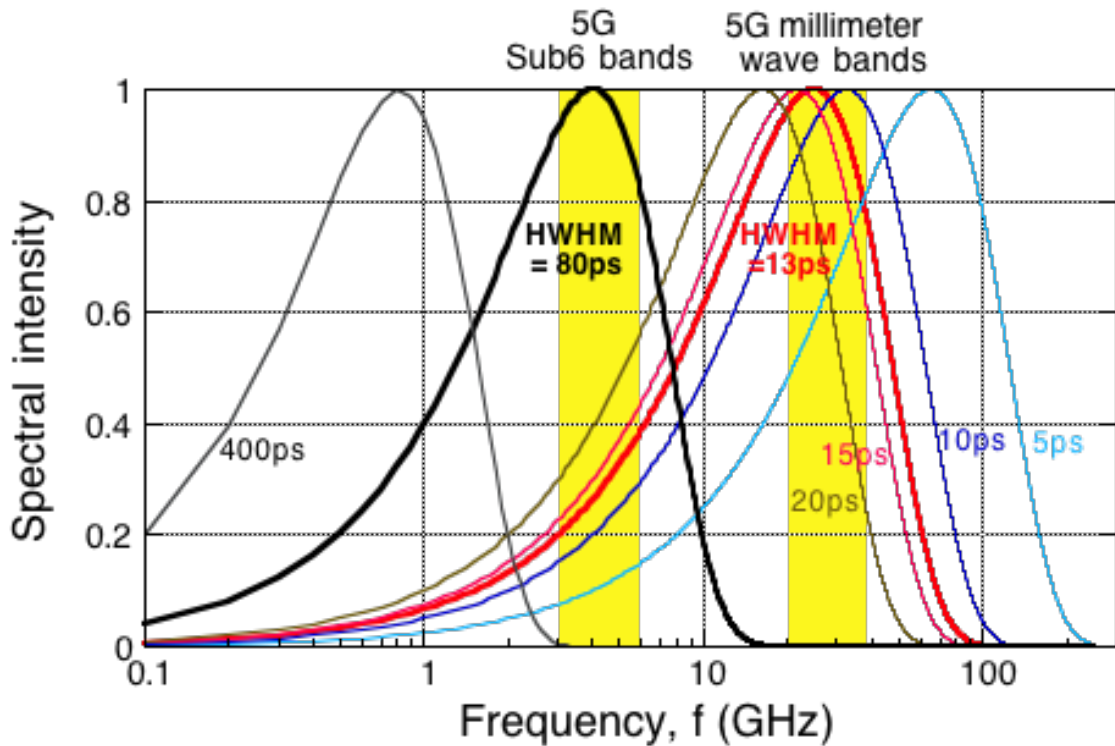


図 5-8. 異なる HWHM を有する模擬 PD 電流波形から放射される遠方界電磁波の周波数特性

### 5.5. まとめ

本章では、アナログ帯域 70 GHz のオシロスコープを用いた超広帯域計測装置により鉱油中の PD 電流パルス波形の立ち上がり時間  $t_r$  を針電極系の電界利用率を変化させて調べた。その結果、鉱油中の PD 電流波形は電界利用率依存性があり利用率が増加するほど  $t_r$  は増加した。また、SF<sub>6</sub> ガス中 PD よりもより急峻であり (即ち、立ち上がり時間は短く) 数 10 ps の領域で発生することが示された。本研究で観測された最小の  $t_r$  は 8.77 ps であった。さらに、測定結果に基づき、PD 電流波形をガウス波形でモデル化して放射電磁波の周波数特性を議論した。その結果、鉱油中 PD は 5G 通信で使用されるミリ波帯にピークを示す電磁波が放射される可能性があることがわかった。また、同様の検討から半値半幅 HWHM が 80 ps 程度の PD からは Sub6 帯でピークを示す電磁波が放射される可能性が示された<sup>[5]</sup>。

[第 5 章の参考文献]

- [1] 大塚信也, 小坪俊勝, 「SF<sub>6</sub> ガス中部分放電電流パルス波形のピコ秒立ち上がり時間特性とその形成メカニズム」, 電気学会論文誌 A, 第 141 巻, 第 1 号, pp.40-47, 2021
- [2] CIGRE WG D1.37, “Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional method,” TB662, 2016
- [3] S. Ohtsuka, K. Yhosida and T. Kotsubo, “Fundamental properties of PD current waveforms in insulation oil measured with extremely high frequency measurement system consisting of 70GHz oscilloscopes,” The 37th Technical Meeting on Insulating Oil Section, The Japan Petroleum Institute, pp.34-42, 2017
- [4] 山内辰浩, 竹中佑太郎, 大塚信也, 「デジタルフィルタ形状が 70GHz オシロスコープで測定した PD 電流波形の信号処理統計量に及ぼす影響」, 2019 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 01-2A-08, p.306, 2019
- [5] S. Ohtsuka, T. Yamauchi and H. Shibata, “Rise Time Characteristics on the Order of Picoseconds of Negative PD Current Pulses in SF<sub>6</sub> Gas and Mineral Oil and Impact of PD-Emitted EM Waves on the 5G Frequency Band,” 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, A2-2, 2022



## 第6章 光学測定技術の適用と実運用状態を 模擬できる試験システムの提案

### 6.1. はじめに

前章までに述べたように、絶縁油中の PD 電流を超広帯域で測定することで、油中 PD 電流の立ち上がりはピコ秒オーダーの現象であることを明らかにするとともに、油の脱気処理状態や経年油と新油の相違、あるいは鉱油とシリコン油の油種類の相違による PD 特性の相違を統計学的手法を用いて明らかにした。一方、実運用されている電力用変圧器の絶縁油の油温は負荷に応じて変化して 80°C 以上になることもあり、絶縁油は経年劣化や酸化の影響を受ける。また、変圧器の絶縁は絶縁油とともに絶縁紙やプレスボードなどの固体絶縁物との複合絶縁系であり、変圧器の寿命を決める固体絶縁物の劣化診断として、油中に析出されたフルフラール量を評価することで絶縁物の劣化度を診断することが行われている<sup>[1]</sup>。さらに、冷却のため循環している絶縁油と固体絶縁物の間で発生する流動帯電を防止するために、絶縁油に BTA と呼ばれる 1,2,3-ベンゾトリアゾールが添加物として添加されることもあり、BTA 添加油も JIS に規定されている<sup>[2-4]</sup>。このように、実器電力用変圧器の絶縁油は、これまで議論してきたような、室温で添加物や不純物のない安定的な状態ではない。より実運用状態に近い状態での絶縁診断技術を考えるとき、実器環境を模擬した試験系の確立が必要と考えられる。

本章ではまず、実運用状態を模擬した試験条件の一例として、流動帯電防止の観点から添加される BTA 添加有無での PD 電流波形の相違を検討した。次に、次世代技術として油中 PD 診断への光学測定適用に向けた基礎検討として、絶縁油中での絶縁破壊発生時の発光現象を高速ビデオカメラや分光器を用いて測定した。さらに、光学フィルタと光電子増倍管 (PMT) を組み合わせた装置を構築して特定発光波長強度の時間変化を測定した。これらは、第5章で議論したように、絶縁油中での PD 現象は 5G 通信に影響を与える可能性が示唆されたように電氣的なノイズ源として振る舞う可能性がある一方、劣悪な電磁ノイズ環境では UHF 法のように電氣的信号 (電磁波) を検出することは困難となり、電磁ノイズ環境の影響を受けない光学測定技術が将来有用になると考えられるためである。また、放電現象を光学的に観測、評価することは、PD 現象や放電状態の理解に有効であることから、油中放電現象への光学測定の適用は重要である。最後に、これら知見と前章までに得られた成果を反映させて、電力用油入変圧器の実運用状態を模擬できる試験システムを提案し、構築した。

## 6.2. BTA 添加有無による PD 電流特性

電力用変圧器の輸送限界容量を増大するための技術として絶縁性能の向上とともに機器内を循環させる絶縁油の流量増大による冷却効率の上昇が検討されてきたが、この技術進展に伴い絶縁物の帯電現象がクローズアップされてきた<sup>[4, 5]</sup>。一般的に絶縁された物体同士が接触して摺動するとその界面で静電気現象、即ち帯電現象が発生する。そのため、流動している絶縁油と静止している変圧器巻線や構造体の固体絶縁物の間には「流動帯電」として知られる帯電現象が発生する。従来、流動帯電は石油工業の分野でパイプラインの送油時に発生する静電気による災害防止の観点から研究されてきたが<sup>[6]</sup>、絶縁性能の向上と流量増大により送油式・導油式の電力用変圧器においても問題となってきた。流動帯電は、巻線内部や油道周辺の絶縁物に電荷を蓄積し、その部位の直流電位が上昇すると静電気放電が発生することがあり、この静電気放電が進展すると絶縁破壊を引き起こすことになる。流動帯電に対する対策として、油流速度の低減や流路構造の改善などが行われているが、BTA 添加も抑制策の一つである。これは、BTA は水素イオンと負イオンに解離するため、解離した BTA が帯電した絶縁物と絶縁油それぞれを電氣的に中和するためである<sup>[2, 3]</sup>。

本節では、BTA 添加が変圧器用絶縁油の PD 特性に及ぼす影響を、PD 電流波形の超広帯域計測により検討した。また、PD 電流と PD 放射電磁波の同時測定を行い、両者の関係を検討した。

### 6.2.1. 実験装置と方法

絶縁油には鉱油 (かんでんエンジニアリング, サンオームオイル M1) を用いた。この絶縁油に、BTA (東京化成工業) の添加無しの試験油 (「No BTA 試験油」と呼ぶ) と電気協同研究会でも報告<sup>[2]</sup>のある 30 ppm 添加の試験油 (「30 ppm BTA 試験油」と呼ぶ) の 2 種類を準備して PD 特性を比較検討した。実験には周波数帯域 33 GHz のデジタルオシロスコープを使用し、PD 電流は 20 dB のアッテネータを介して、一方で PD 放射電磁波はホーンアンテナとモノポールアンテナの周波数帯域の異なる 2 種類のアンテナを使用して測定した。なお、アンテナは電極から 30 cm 離れた位置に設置した。試験油は、試験容器に注油後 6 時間以上真空引きを行い、12 時間以上静置して使用している。

### 6.2.2. 実験結果

図 6-1 に、BTA 添加有無での交流電圧印加時の PDIV (kV<sub>p</sub>) を示す。同図中のプロットは 30 回の測定の平均値、エラーバーは最大と最小値、太線は標準偏差を示している。同図よ

り、PDIV 特性には極性効果が認められ、正極性の方が負極性よりも高い。また、BTA を添加した 30 ppm BTA 試験油の方が PDIV の平均値は高く、ばらつきは小さかった。両者の平均値を有意水準 0.05 で t 検定した結果、正および負極性の両 PDIV ともに BTA 添加有無で有意差があると評価された。この BTA 添加による PDIV の上昇は、誘電率変化による効果を考慮する必要があるが、BTA の添加効果による絶縁油中の流動帯電電荷量の低下により、局所電界あるいは初期電子供給が緩和された影響が考えられる。これは PDIV のばらつきが低下した結果とも矛盾しない。

図 6-2 に、BTA 添加有無での負極性 PD 電流パルス波形の測定結果の一例を示す。同図に示されるように、何れも波形の立ち上がり時間は 20 ps 程度の非常に急峻なパルスであることがわかるが、BTA 添加有無で PD 電流波形の形状に大きな変化は認められない。図 6-3 に、負極性 PD 電流パルス波形の立ち上がり時間  $t_r$  とピーク値  $I_p$  の関係を示す。BTA 添加により  $I_p$  のばらつきは低下しているように見える。同図のプロット群の傾き、即ち  $I_p/t_r$  の値は PD 電流波形の立ち上がり部の時間変化 ( $di/dt$ ) に相当することや  $I_p$  の値自体もダイポールモデルにおける放射電磁波の振幅強度に影響するパラメータであるため、本結果は PD 放射電磁波の振幅強度特性を検討する際の基礎データとなるものである。

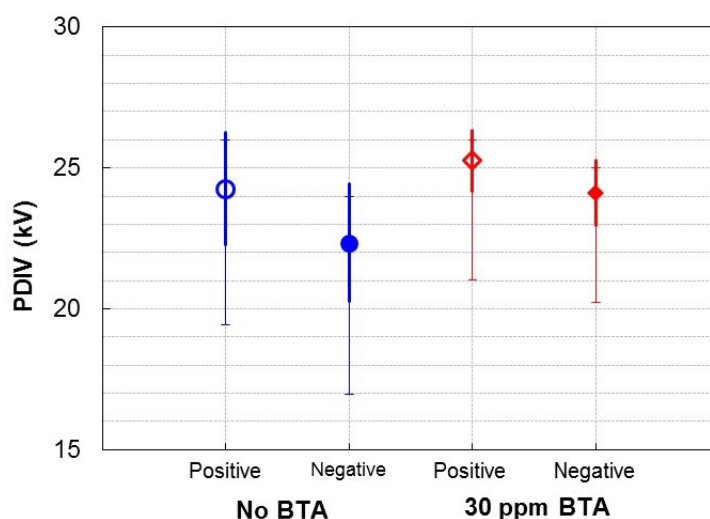
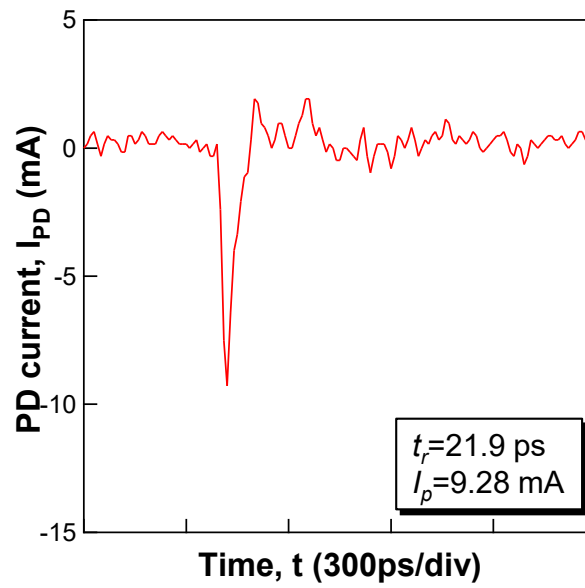
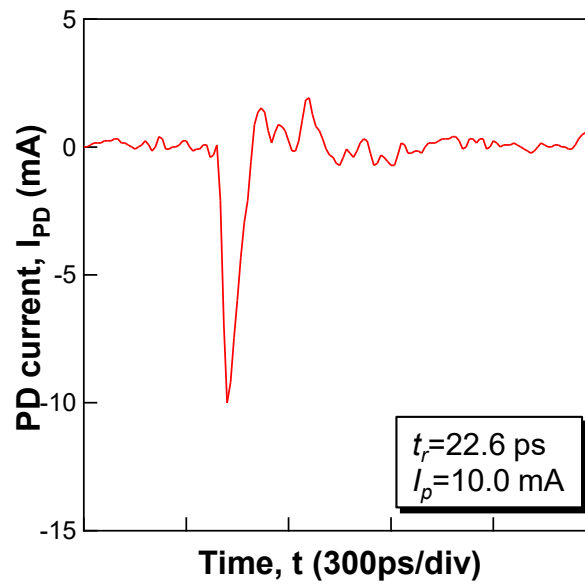


図 6-1. BTA 添加有無による PDIV 特性の比較



(a) No BTA 試験油



(b) 30 ppm BTA 試験油

図 6-2. BTA 添加有無における負極性 PD 電流波形の測定例

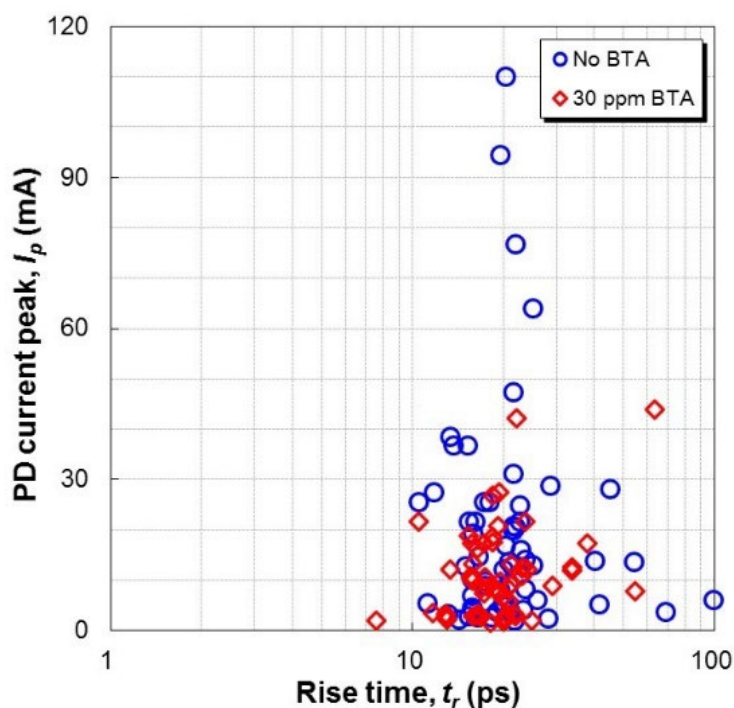
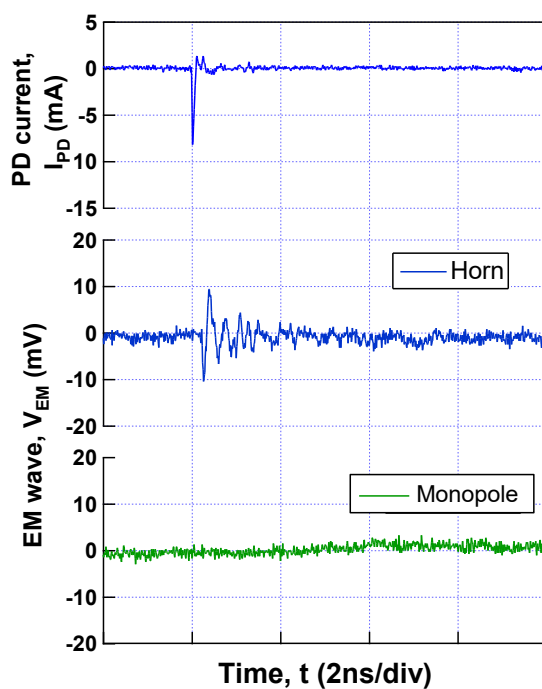
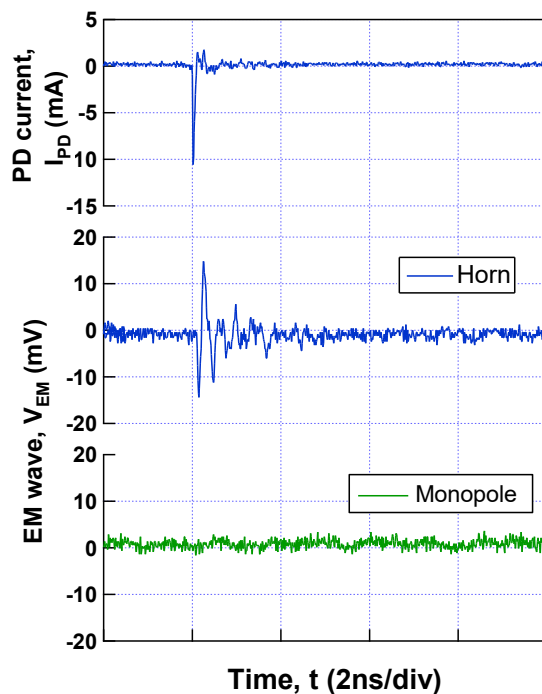


図 6-3. BTA 添加有無における立ち上がり時間—電流ピーク値特性

図 6-4 に、BTA 添加有無での負極性 PD 電流波形と PD 放射電磁波の同期測定結果の一例をそれぞれ示す。同図の PD 放射電磁波は 2 つの周波数帯域の異なるアンテナで計測した結果が示されているが、ホーンアンテナでは振幅する波形形状が確認できる、即ち PD 放射電磁波を検出できているが、相対的に周波数帯域の低いモノポールアンテナでは振幅波形は確認できない。即ち、PD 放射電磁波は検出されなかった。この結果は、第 4 章や第 5 章で述べたように、絶縁油中 PD 電流は数 10 ps の立ち上がり時間を有する急峻なパルスであり、その放射電磁波の周波数成分は SHF 帯を含む超高周波帯域である。そのため、絶縁油中の PD 放射電磁波を検出するにはその現象に応じた高周波帯域対応のアンテナ選定が必要であることを示している。また、アンテナ選定が適切でないと、PD が発生していても PD 発生がないと誤判定を行う危険性があることを示唆している。



(a) No BTA 試験油



(b) 30 ppm BTA 試験油

図 6-4. BTA 添加有無における PD 電流と PD 放射電磁波の同期測定結果

図 6-5 に、ホーンアンテナを用いて測定した PD 放射電磁波の振幅強度  $V_{pp}$  と負極性 PD 電流パルス波形の立ち上がり部の電流変化率  $di/dt$  の関係を示す。図中には、 $V_{pp}$  と  $di/dt$  の関係を比例関係として求めた近似直線も併せて示している。同図より、両試験油の近似直線はよく一致していることがわかる。即ち、BTA 添加有無によらず  $V_{pp}$  と  $di/dt$  の関係はほぼ同一であると言える。また、図 6-3 で、No BTA 試験油で大きな  $I_p$  値を有する PD の発生が示されていたが、これらは図 6-5 では  $di/dt$  の大きな値でのプロットに相当する。これらは、 $V_{pp}$  と  $di/dt$  の関係で見ると近似直線上に分布していることから、小さな  $I_p$  値の PD と同じ形態の PD であること、ノイズや異なる部位での放電信号でないことがわかる。BTA の帯電電荷を中和する機能を考えると、BTA 添加がない場合は先駆する PD により生成された絶縁油中の空間電荷の影響が BTA 添加がある場合よりも相対的に大きく現れ、ばらつきや発生とともに強度の大きな PD が発生したものと解釈される。以上の結果、BTA 添加は 1 発 1 発の PD 現象自体には影響を与えていないが、PD 発生群として見ると、絶縁油中の空間電荷の挙動に影響を与えている、具体的には空間電荷を中和している可能性が示唆された。それにより PD 電流のばらつきや大きな PD の発生を抑制する効果があると解釈された。

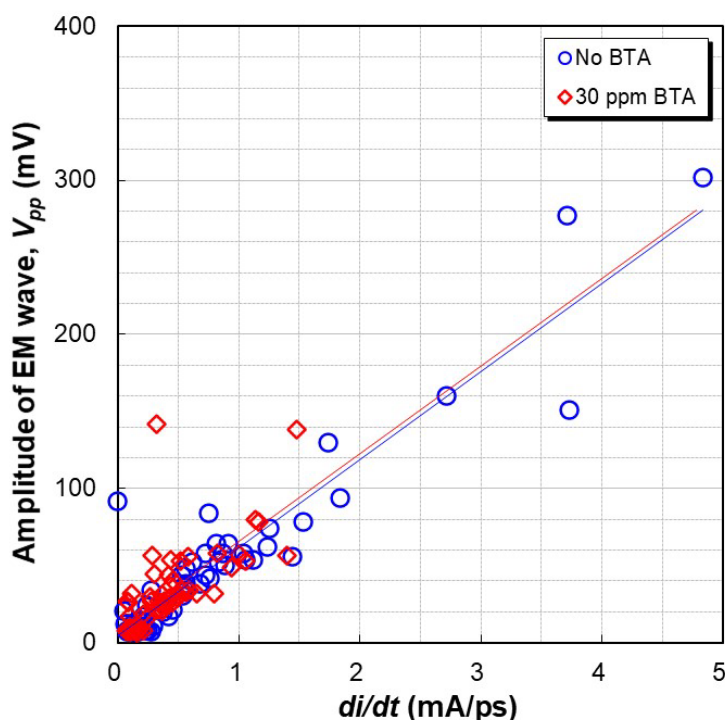


図 6-5. BTA 添加有無における PD 電流の時間変化と PD 放射電磁波の振幅強度の関係

### 6.3. 油中放電現象への光学測定への適用

次世代技術としての油中 PD 診断への光学測定適用に向けた基礎検討として、水分 (水滴) を混入させた絶縁油中で絶縁破壊を発生させ、その時の発光現象を高速ビデオカメラと分光器を用いて測定した。水分の混入は実運用状態でも重要であり、絶縁破壊による水の分解により、絶縁油の炭化水素系の発光ラインだけでなく水分由来の水素のラインの観測に影響が現れる可能性がある。さらに、光学フィルタと PMT を組み合わせた装置を用い、異なる光学フィルタにより選択的に抽出した複数の発光スペクトル強度の時間変化特性を測定し比較検討することで、放電発生時の絶縁油の状態や放電により発生する分解生成物の検討が可能かを議論した。

#### 6.3.1. 実験装置と方法

実験装置の構成は図 2-8 に示したとおりで、鉱油 (ENEOS, 高圧絶縁油 K) 中に設置したギャップ長 6.5 mm の針対平板電極に交流高電圧を印加した。BD までの電極間ギャップの状態を、高速度ビデオカメラ (フォトロン, FASTCAM SA-Z) を用いて 40,000 fps (フレーム間隔 25  $\mu$ s) で観測した。BD の発光スペクトルは分光器 (Ocean Optics, USB2000+) を用いて観測した。絶縁油中に混入する水滴は水道水を使用し、デジタルマイクロピペットを用いて 10 ppm 単位で注水した。

#### 6.3.2. 実験結果

図 6-6 に、水滴混入がない状態 (注水量  $V_w = 0$  ppm) と 2 種類の注水状態 (注水量  $V_w = 10, 20$  ppm) の条件における絶縁破壊電圧 (Breakdown voltage : BDV) を示す。2 種類の注水状態でのそれぞれ 1 回目の BD (同図中の白抜きのプロット) が注水した水滴を介した放電で、BDV が特に低くなっている。水滴混入条件で 1 回目の水滴を介した BD 以降も水滴混入がない状態に比べ BDV は低下している。これは 1 回目の BD で小さく分裂した水滴の影響や油中に溶存した水分、または BD の繰り返しにより発生した分解ガスにより絶縁油の絶縁耐力が低下したためと考えられる。なお、20°C の室温レベルでは 10 ppm と 20 ppm の油中水分量で BDV は低下するが顕著ではないと示されている<sup>[7]</sup>。図 6-7 に、水滴混入がない状態、即ち注水量  $V_w = 0$  ppm の条件で高速度ビデオカメラで測定した BD 発生時の発光画像 (25  $\mu$ s 間のフレーム画像) 例を示す。BD は複数回発生することもあり、最初の BD が発生したフレームを  $T_0$  とし、添え字は  $T_0$  から経過したフレーム数を表している。例えば、 $T_{25}$  は 25 フレーム後の画像であり、BD 発生後に 625  $\mu$ s 経過した画像である。同図(a)は  $T_0$  の最初の



BD発生時で、針電極直下の領域でBDが発生していることがわかるが、放電路の確認ができないほど発光強度は強い。同図(b)~(d)は、その後の状態を示しており、再びBDが発生して放電路が確認できるものや、発生した気泡雲の中で全体が発光しているものなど異なる様相があることがわかる。特に、時間経過により発光の色が紫(同図(b))から青色(同図(c))と変化し異なっていることがわかる。BDがさらに繰り返されるとオレンジや赤色の燃焼が起こっているような発光状態が観測された(同図(d))。

一方、絶縁油に水滴を混入すると、図6-8に示されるように(同図は注水量  $V_w = 20$  ppmでの結果で、水滴は針直下から図中の左側に配置)、水滴が針電極と平板電極間で形成されている電気力線に沿って伸張し、その伸張した水滴のパスを經由してBDが発生した。この結果からも油中水分の混入はBD特性に大きく影響することがわかる。BD時の発光特性を見ると、同様の発色を伴う発光画像は観測されているが、発光の領域と気泡雲の形成に相違があるように見える。これらは水滴を介した現象であることと、水滴を介した破壊電圧が低く気泡の発生が相対的に少ないことが原因と思われる。このような放電の発光色の時間変化が観測されたことから、分光器を用いてさらに詳細に発光特性を検討した。

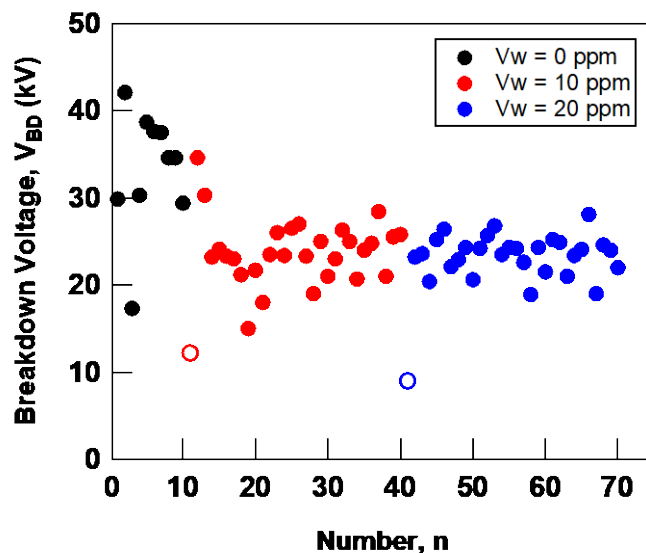
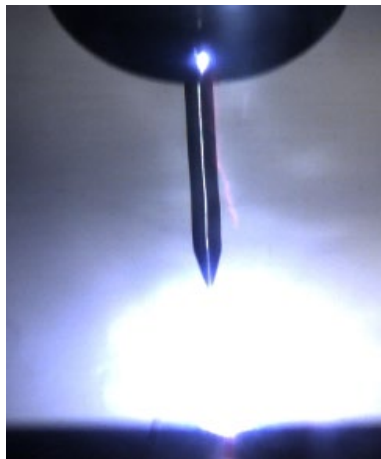
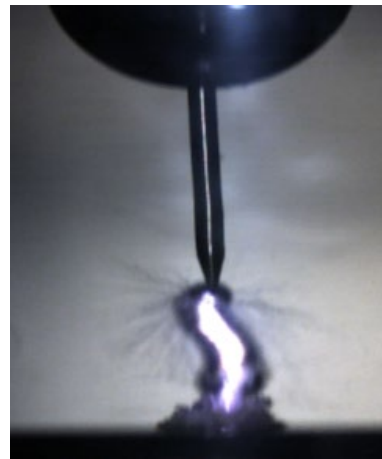


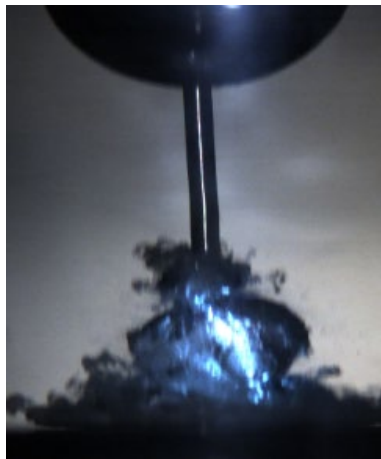
図 6-6. 水滴有無における絶縁破壊電圧



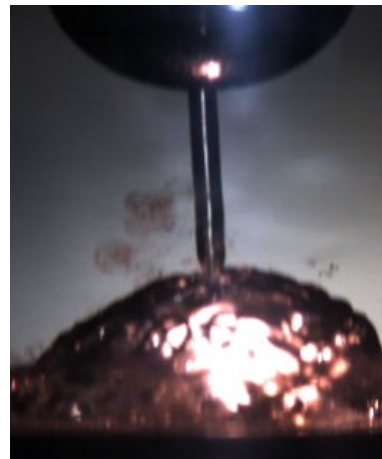
(a)  $T_0$



(b)  $T_{25}$



(c)  $T_{106}$



(d)  $T_{606}$

図 6-7. 水滴無し (注水量  $V_W = 0$  ppm) での油中 BD 発生時の発光

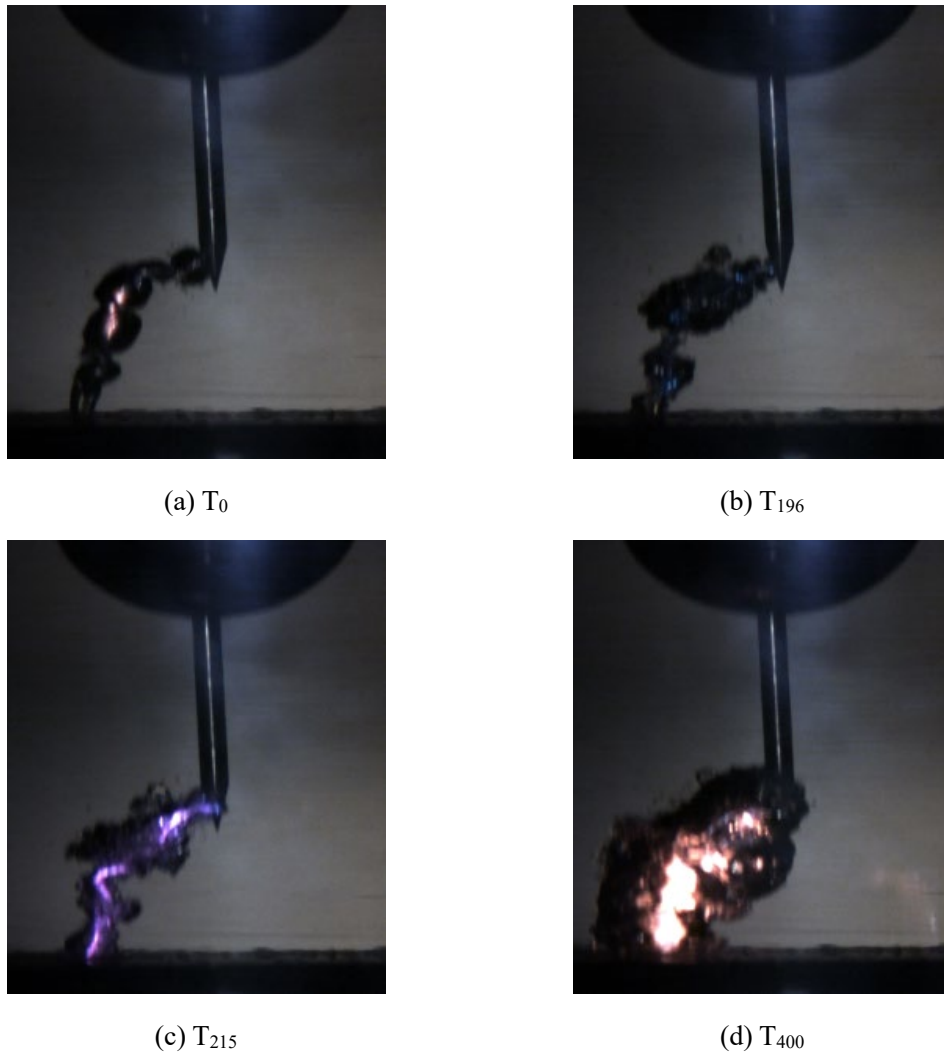
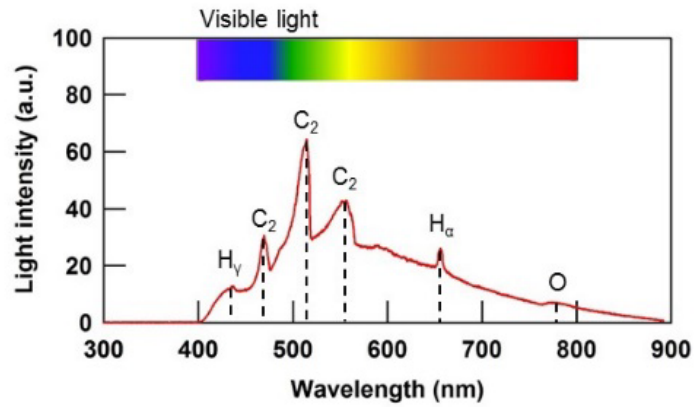
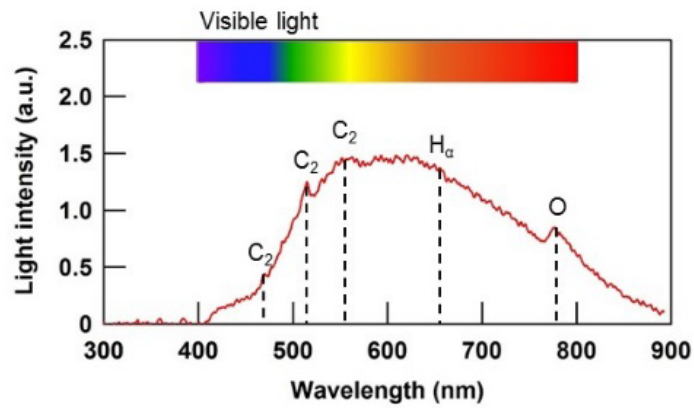


図 6-8. 水滴有り (注水量  $V_w = 20$  ppm) での油中 BD 発生時の発光

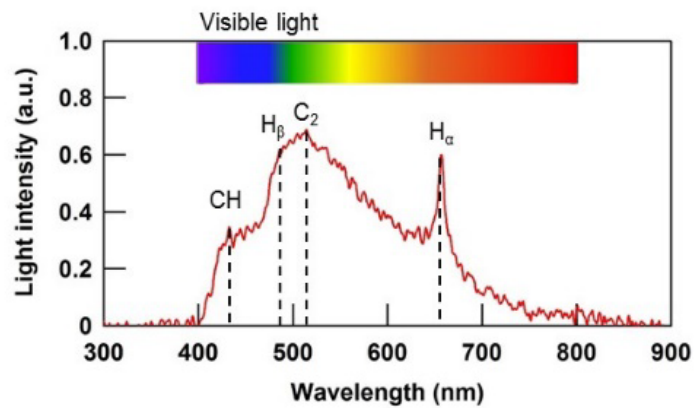
図 6-9 に、水滴混入有無の条件での BD 時の発光スペクトルを分光器で測定した結果を示す。発光強度は水滴混入がない条件の方が大きくなっており、これは水滴混入がない状態での BDV が高かったことが関係していると思われる。何れの結果も、 $C_2$  ラジカル (特に 513 nm の発光強度が大きい) や H あるいは O に関するスペクトルピークが観測されており、これらは絶縁油由来の炭化水素や混入した水分が分解されて発生したものと思われる。また、高速ビデオカメラで観測された特徴的な発光色は  $H_\gamma$  の紫および  $H_\beta$  の青、 $H_\alpha$  のオレンジと関連していると思われる。また、水滴混入時には  $H_\alpha$  や O のスペクトルラインに顕著なピークが観測されている。このように、相互のピークの関係性を比較することで絶縁油中の混入水分や発生した分解ガス状態が評価できる可能性があることが示唆された。



(a) 水滴無し(注水量  $V_W = 0$  ppm)



(b) 水滴有り(注水量  $V_W = 10$  ppm)



(c) 水滴有り(注水量  $V_W = 20$  ppm)

図 6-9. 水滴有無における油中 BD 時の発光スペクトル

## 6.3.3. 時間分解分光スペクトル測定

前項で鉱油中の BD 現象を高速度ビデオカメラおよび分光器で観測することで、炭化水素系の分解ガスや燃焼に由来する発光スペクトルを確認した。そこで、光学フィルタと光電子 PMT を組み合わせた装置を用い、異なる光学フィルタにより選択的に抽出した複数の発光スペクトル強度の時間変化特性を測定し比較検討することで、放電発生時の絶縁油の状態や放電により発生する分解生成物の検討が可能かを議論した。

実験装置の構成は図 2-9 に示したとおりで、鉱油 (ENEOS, 高圧絶縁油 K) 中に設置したギャップ長 6.5mm の針対平板電極に交流高電圧を印加した。本実験では、光学フィルタなしの PMT と前項で発光強度の大きかった C<sub>2</sub>ラジカルに透過帯域を持つフィルタ (513.7 nm) を取り付けた PMT で、AC 印加時の油中 BD 現象を 10 回測定した。BD は全て正極性のピーク付近で発生した。

図 6-10 に、測定結果の一例として 1 回目の BD 時の測定波形を示す。本測定ではフィルタを取り付けた PMT においても同様の強度で測定できるよう、2 個の PMT はそれぞれ異なるゲインを設定した。同図より、BD と同時にフィルタなし、513.7 nm フィルタの PMT で発光が観測されていることがわかる。図 6-11 に、BD 時の電磁ノイズを除去するため、PMT の測定波形をカットオフ周波数 10 kHz でローパスフィルタリング処理を行ったものを示す。同図より、BD 直後にフィルタなしの波形がピークを迎えたあとに 513.7 nm フィルタの波形の強度が増加していることがわかる。即ち、この光学フィルタを透過する C<sub>2</sub>ラジカル由来の化学発光が発生していることがわかる。パラフィン系を主とする炭化水素系の化合物の熱分解過程においては、分子内の結合が熱エネルギーにより切断し、それによって生じるラジカルが連鎖的に引き起こす反応であると言われており<sup>[2, 8, 9]</sup>、513.7 nm フィルタの波形の強度が増加している時間で C<sub>2</sub>ラジカル由来の反応が発生していると解釈できる。即ち、本手法を用いると、このような C<sub>2</sub>ラジカル由来の化学反応時間が評価できることを示唆している。

C<sub>2</sub>ラジカルの発光スペクトル特性の検討として、図 6-12 に示すような光学フィルタ有無での測定波形の発光強度比 (フィルタあり/フィルタなし) を求め、BD 後に現れるピーク値  $L_p$  と、BD からピークまでの時間  $t_B$  をまとめると、図 6-13 になる。ここで発光強度比は、BD 発生と同極性で議論できるよう、BD 発生から 5 ms 以内で、電磁ノイズを除いて評価を行った。同図に示されるように、 $t_B$  は 1~3 ms の間で発生していることがわかる。以上より、時間分解分光スペクトル測定を行うことで、BD 中に発生する特徴的なスペクトルの時間変化を評価できることが示唆された。

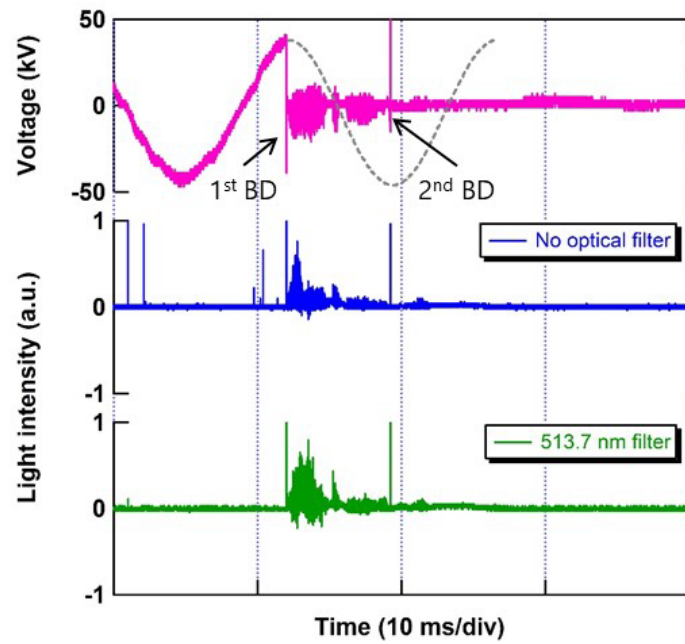


図 6-10. 油中 BD 時の発光スペクトル強度の時間変化特性

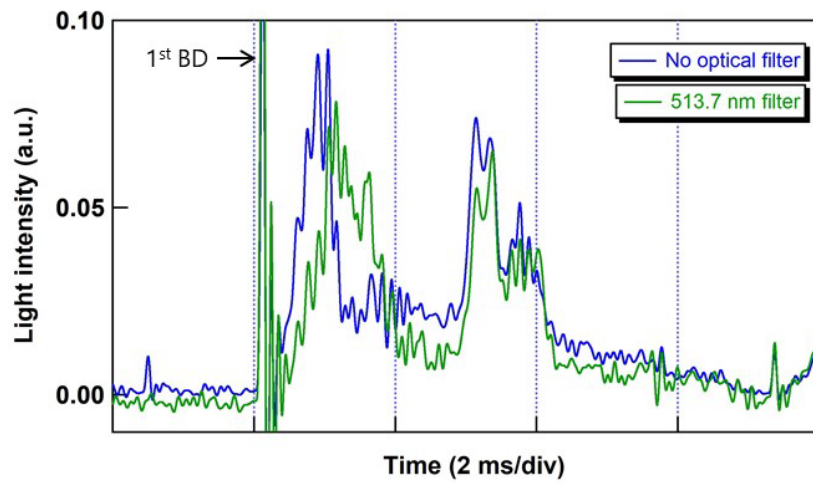


図 6-11. ローパスフィルタリング処理 (カットオフ周波数 10kHz) した発光スペクトル波形

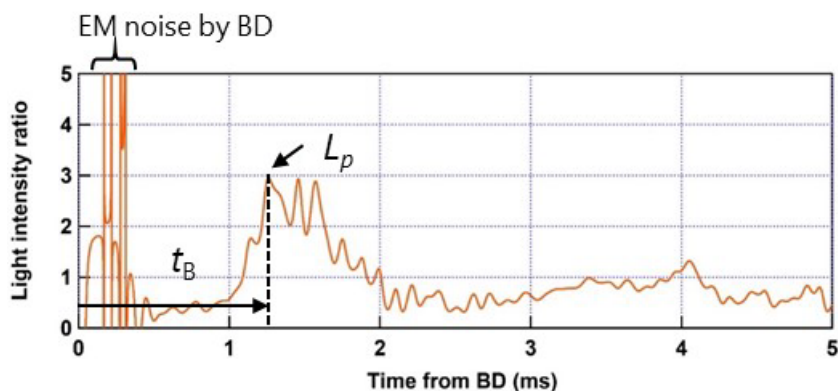


図 6-12. 光学フィルタ有無での発光スペクトルの強度比 (フィルタあり/フィルタなし)

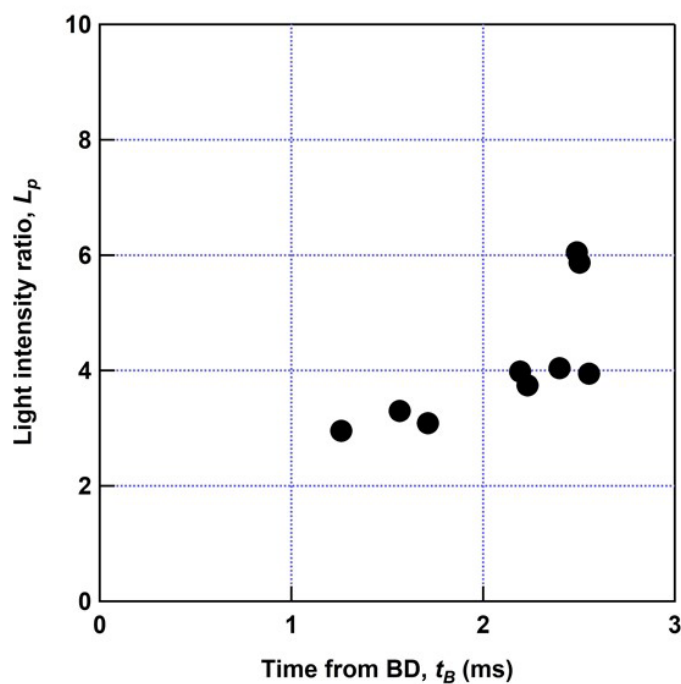


図 6-13. 発光スペクトルの強度比特性

#### 6.4. 実運用状態を模擬できる試験システムの提案

##### 6.4.1. 電力用変圧器の運用状態

実運用状態を模擬できる試験システムの構築にあたり，初めに実器変圧器の絶縁油状態を模擬してその状態で異常（放電現象）を再現し，放電信号を検出し評価するために必要な項目を整理する。基本的な項目は，大きく 3 つに分けられる。即ち，1) 絶縁油の状態とともに，診断の観点から 2) 放電源と 3) 計測系の 3 つである。

まず 1)の絶縁油の状態に関しては，ここでは具体的な管理値や基準値が確立している鉦

油を基準に以下の4つを考えた。一つ目は絶縁油の温度である。JEC-2200「変圧器」では、変圧器は周囲温度-25~40℃で使用され、その環境下での油温度の上昇は最大60Kまでと規定されている<sup>[10]</sup>。即ち、周囲温度40℃における変圧器内絶縁油の最高温度は100℃である。二つ目は混入する水分量である。一つ目の温度とも関係するが、絶縁油の絶縁耐力は飽和水分量に占める水分の割合が多くなるほど低下することが知られており<sup>[7]</sup>、電気協同研究では、500kV機器の据付時の絶縁油の管理値として、水分量10ppm以下との調査結果がある<sup>[11]</sup>。三つ目は添加物である。6.2節で述べたように国内の高電圧大容量変圧器においては、流動帯電の抑制策の一つとして、BTAの添加が行われている<sup>[2-4]</sup>。四つ目は混入する油中ガスである。変圧器内部で放電や局所過熱等の異常が発生した場合、絶縁油が熱分解しガスが発生する。鉱油系絶縁油の主成分は炭化水素であるため、過熱や放電などの内部異常時には炭化水素由来のH<sub>2</sub>やC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>などの可燃性ガスが発生する<sup>[1]</sup>。

次に、2)の放電源に関しては、放電発生部位の材料と電界および電界の時間変化(印加される電圧波形)を考慮した電極系の設定と使用する高電圧電源の対応が必要になる。電源は本研究で使用している任意波形発生装置もしくはファンクションジェネレータと高電圧アンプを使用することで、直流と交流および任意の高電圧電圧波形を設定できる。雷サージや開閉サージなどはインパルス電圧発生装置で再現できる。他方、材料は実器の絶縁油とともにプレスボードなどの変圧器内の構造絶縁物を使用して実運用状態を再現できる。

3)の計測系は、上記の1)、2)で再現した実器環境での放電現象を検出・評価するための対応で、本研究の核心でもあるPD電流の超広帯域計測ができるように試験容器から超広帯域対応同軸ケーブルの取り出しは必須である。また、PDやBDなど放電現象により発生する電磁波や光が試験容器外に伝搬できるように電磁波と光信号に対する開口部(例えば、可視光領域を含み紫外光や赤外光が透過できる窓)の設置が必要になる。

以上の必要項目を考慮して実運用状態を模擬できる試験システムを構築した。

#### 6.4.2. 試験システムの構築

図6-14に、構築した実運用状態を模擬できる試験システムを示す。同図に示されるように、前項で整理した項目を反映させた「放電試験容器」を中心として、本システムは3つの容器で構成されている。それぞれ「放電試験容器」、「リザーブ容器」、「コンサベータ容器」と呼ぶことにするが、これらは試験油の初期状態の調整ならびに試験を実施するために必要な容器である。

リザーブ容器は、試験に使用する絶縁油の初期状態を整えるための容器である。脱気を行



うとともに絶縁油へBTAなどの添加物の溶存にも使用する。試験に使用する絶縁油をリザーブ容器内に入れた後、添加物の混入が必要であれば添加物を追加した後、真空ポンプを接続して真空引きを行うことで脱気処理を行う。その際、容器内に攪拌子を入れ容器の下に設置したスターラーで攪拌子を回転させることで容器内の油及び添加物が攪拌され効率よく混入・脱気処理を行う工夫がされている。なお、容器側面には引出し端子が2つ付いているので、ここに印加線と接地線を接続し、容器内に電極等のサンプルを設置することで簡易的に放電試験を実施することも可能である。

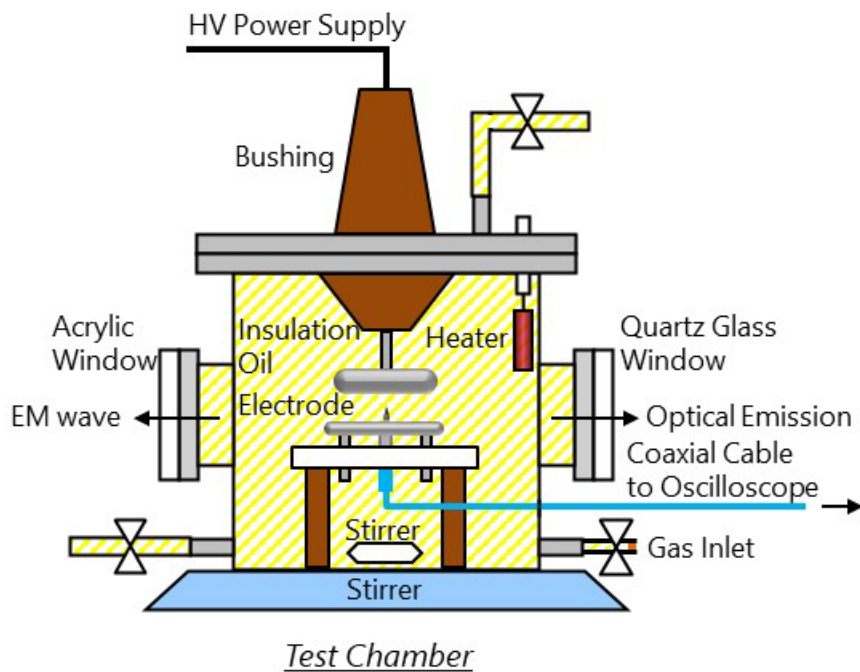
放電試験容器は、本システムの中心となる容器であり、高電圧を印加して対象試験油中でPDやBDなど放電現象を発生させる。この放電発生の条件を明らかにするとともに発生する電流や発光、電磁波などの放電信号を測定する容器である。そのため、容器上部には外部電源からの高電圧を試験容器内の電極系に導入するためのブッシングが取り付けられている。一例として、容器内に設置した針対平板電極系の様子を図6-15に示す。同図のように、下部の針電極には超広帯域の同軸ケーブルが接続されており、前章までに示したように超広帯域でPD電流を測定するため容器外部の超広帯域オシロスコープに接続される。また、同図の正面奥に円形の窓が見えるように、試験容器には電磁波開口部ならびに放電発光測定のための観測窓を設けており、紫外領域から赤外領域の波長が観測できるように観測窓には石英ガラスが使用されている。

本容器はさらに、試験油の温度を変圧器運転中の油温として考慮されている周囲温度から60 Kの温度範囲で変化できるように内部にヒータを設置する構造にしてあり、容器上部にはヒータを駆動する電圧導入端子を設けている。容器側面下部には、リザーブ容器から脱気や添加物等の初期条件を整えた試験油を導入するための端子があり、さらに、実運用時の放電や加熱により発生するガスを模擬して水素やアセチレン、エチレン、メタン、エタンなどの可燃性ガスあるいは一酸化炭素等を試験油に導入するための注入端子もある。この注入端子はガスの導入だけでなく、試験前後の試験油を採油して油中ガス分析を行うことにも使用できる。なお、リザーブ容器と同様に本容器にも攪拌子を入れて容器内の試験油を攪拌できる仕様としている。

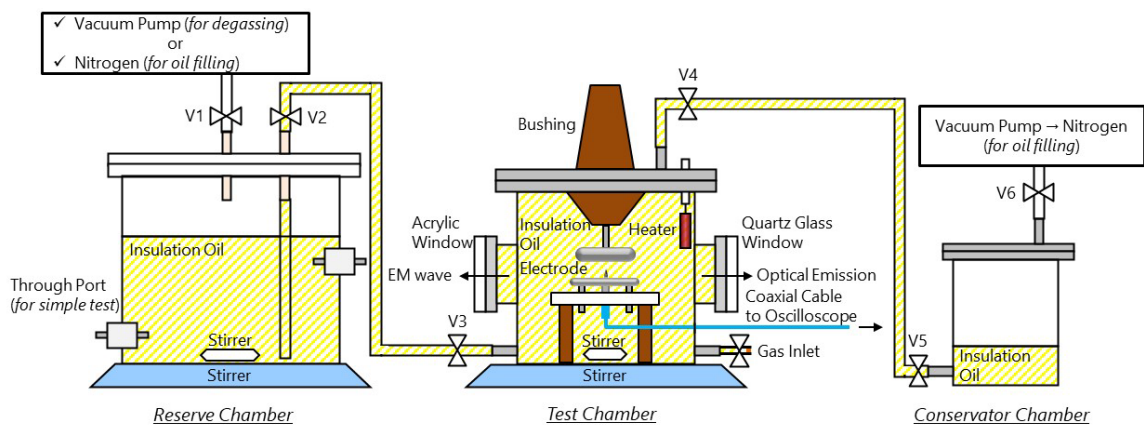
最後のコンサベータ容器は、電力用変圧器の実器に取り付けられているコンサベータと同様の役割を果たす。即ち、試験油の温度変化による膨張・収縮を吸収する役割である。

これら3つの容器から構成される本システムにおいて、放電試験容器への注油は以下の手順で行う。まず、全ての容器を接続し、リザーブ容器に油を入れ、脱気や添加物の混入などを行い試験条件の油状態に調整する。それと並行もしくは次に、V2端子を閉じV3~V6端

子を明け V6 端子から真空引きを行う。その後、V2 端子を開け V1 端子から窒素加圧し、コンサベータ容器内の 1/3 程度まで注油を行う。リザーブ容器の上部から加圧して注油する理由は、リザーブ容器内の脱気処理したことで容器内が真空状態にあり、加圧をしてリザーブ容器内と試験・コンサベータ容器内に差圧を発生させなければ注油ができないからである。注油後はコンサベータ容器の上部から窒素加圧することで、試験容器からコンサベータ容器への油の移動とともに、試験容器内に溶存させたガスがコンサベータ容器の上部空間に抜けることを防止できる。

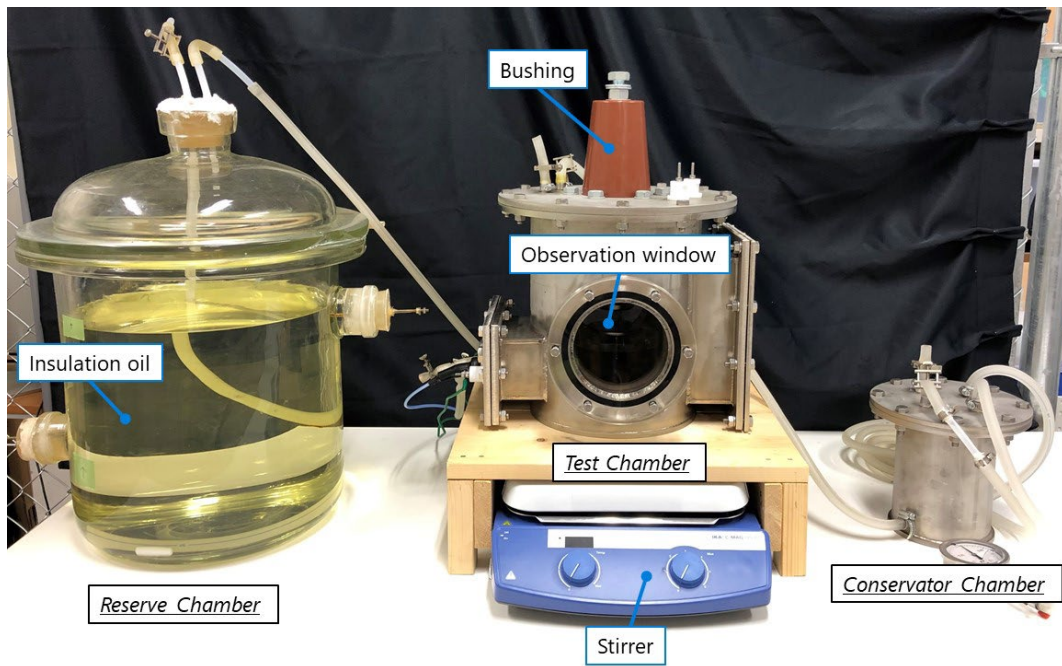


(a) 放電試験容器



(b) 全体構成

図 6-14-(1). 実運用状態を模擬できる試験システム



(c) 外観

図 6-14-(2). 実運用状態を模擬できる試験システム

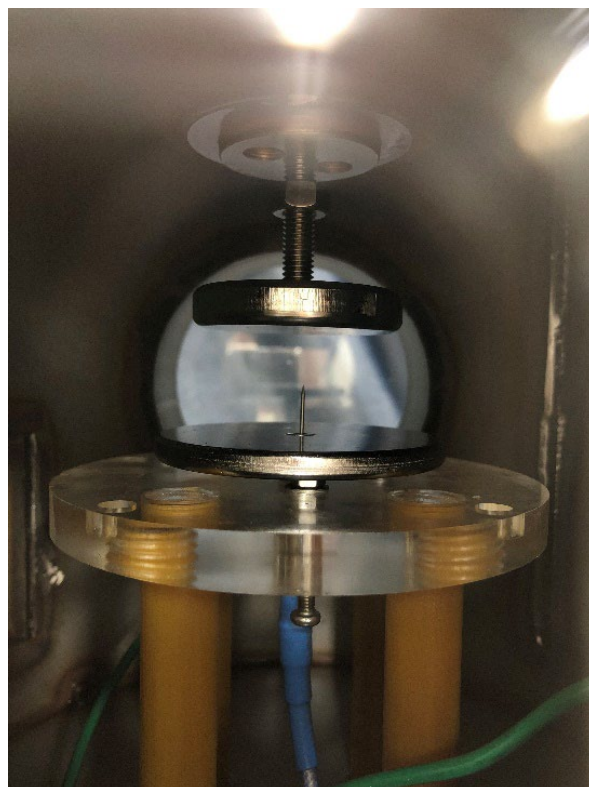


図 6-15. 放電試験容器内に設置した針対平板電極

## 6.4.3. 試験システムの検証

試験システムの構築後、1) リザーブ容器で油が脱気処理できるか、さらに2) その油を試験容器に注油して油漏れなどすることなく放電実験を実施することができるかを確認するために、まず、脱気処理前の油と脱気して試験容器へ注油後の油の水分量分析と油中ガス分析を実施し比較した。脱気処理前の油はリザーブ容器に入れた直後に容器内から、注油後の油は試験容器のガス注入口からそれぞれ採油した。本検討で使用した油は、鉱油 (かんでんエンジニアリング, サンオームオイル M1) であり、リザーブ容器内で6時間真空引きを実施した後に試験容器に注油した。注油後に油漏れの発生はなく、放電試験を実施できる試験容器であることを確認した。

表 6-1 に、脱気処理前と脱気後に注油した試験油の油中ガス分析結果を示す。同表より、脱気処理により油中水分量は脱気前の 13 ppm から 2 ppm へ低下し、同様に可燃性ガス総量は 6.8 ppm から 0.0 ppm へ、大気ガスも含めた油中ガス全量は 68,010 ppm から 10,563 ppm へ減少していることが確認できた。電気協同研究では 500 kV 機器据付時の絶縁油の管理値として、油中水分量は 10 ppm 以下、油中ガス量は 0.5% (5,000 ppm) 以下との調査結果がある<sup>[11]</sup>。今回の結果では、水分量は 10 ppm 以下を達成しているとともに、可燃性ガス総量は 0.0% となった。また、油中ガス量は 0.5% を僅かに超える 1.06 % であったが、これは N<sub>2</sub> の量が大部分であり、且つ脱気前の状態よりも脱気して注油した後の N<sub>2</sub> の O<sub>2</sub> に対する量は 2 倍ほど増えていることからわかるように、注油時に加圧ガスとして使用している N<sub>2</sub> が混入した影響であると考えられる。そのため、油中ガス量もほぼ問題ないと解釈できることから、本システムで脱気処理ならびに試験容器への注油に問題はなく、実器変圧器用開始時の絶縁油の状態を模擬できることが確認できた。

さらに、この脱気注油後の試験油を用いて高電圧を安全に問題なく印加できるかを試験した。試験容器内の電極系は針-平板電極であり、60 Hz の交流高電圧を印加電圧として用いた。その結果、電極系以外で BD を含む放電発生はないことを確認するとともに、電極系で PD を発生させることができた。PD 発生後にさらに印加電圧を上昇させると、電極系で BD が発生することも確認できた。本実験条件では、BDV は 38 kV<sub>p</sub> であった。このように、本システムで PD ならびに BD 試験を実施できることが確認された。

今後は、ヒータを作動させて絶縁油の油温を変化させたり、劣化状態を再現するようフルフラールや水分、あるいは分解ガスを混入させて実験をすることで、実運用状態を再現した放電試験を実施できる。また、本システムを用いることで、今後新たに開発や適用される絶縁油の実運用環境における性能評価が可能となることが期待される。

表 6-1. 油中ガス分析結果

採油時点		脱気前	脱気注油後
一般分析	水分量(ppm)	13	2
油中ガス 分析 (ppm)	O <sub>2</sub> (酸素)	21355	2726
	N <sub>2</sub> (窒素)	46382	7789
	CO <sub>2</sub> (二酸化炭素)	267	48
	*CO(一酸化炭素)	6.8	0.0
	*H <sub>2</sub> (水素)	0.0	0.0
	*CH <sub>4</sub> (メタン)	0.0	0.0
	*C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (アセチレン)	0.0	0.0
	*C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (エチレン)	0.0	0.0
	*C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (エタン)	0.0	0.0
	*C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (プロピレン)	0.0	0.0
	*C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (プロパン)	0.0	0.0
	可燃性ガス総量(*印)	6.8	0.0
	油中ガス全量	68010.8	10563.0

## 6.5. まとめ

本章ではまず、実運用状態を模擬した試験条件の一例として、流動帯電防止の観点から添加される BTA 添加有無での PD 電流波形の相違を検討した。超広帯域測定の結果、PD 電流の時間変化と PD 放射電磁波強度には BTA 添加は影響がないことを明らかにした<sup>[12]</sup>。次に、次世代技術として油中 PD 診断への光学測定適用に向けた基礎検討として、絶縁油中での BD 発生時の発光現象を高速ビデオカメラや分光器、光学フィルタと PMT を組み合わせた装置により観測した。その結果、鉱油中放電により発生する炭化水素系分解ガスの発生種や発生タイミングを評価できることが示唆された<sup>[13]</sup>。最後に、これまでに得られた成果を反映させて、電力用油入変圧器の実運用状態を模擬できる試験システムを提案・構築し、注油や電圧印加できることを確認した。

[第 6 章の参考文献]

- [1] 電気協同研究会, 「油入変圧器の保守管理」, 電気協同研究, 第 54 巻 第 5 号(その 1), 1999
- [2] 電気協同研究会, 「電力用変圧器改修ガイドライン」, 電気協同研究, 第 65 巻 第 1 号, 2009
- [3] 安田正行, 後藤清, 大久保仁, 月岡淑郎, 宮本晃男, 「大容量変圧器における流動帯電の一抑制方法について」, 電気学会論文誌 B, 第 105 巻, 第 3 号, pp.265-272, 1985
- [4] 小林隆幸, 山田慎, 白坂行康, 細川登, 「経年変圧器における流動帯電現象」, 電気学会論文誌 B, 第 128 巻, 第 3 号, pp.511-515, 2008
- [5] 田村良平, 渡邊次男, 宮本晃男, 山田直也, 「大容量外鉄型変圧器における流動帯電現象」, 静電気学会誌, Vol.3, No.3, pp.266-273, 1979
- [6] A. Klinkenberg, J. L. van der Minne, “Electrostatics in the Petroleum Industry,” Elsevier, 1958
- [7] 石井敏次, 上田実, 「絶縁油の交流破壊電圧に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, 第 92 巻, 第 3 号, pp.154-158, 1972
- [8] Benjamin T. Brooks, Cecil E. Boord, Stewart S. Kurtz Jr., “The chemistry of petroleum hydrocarbons,” Reinhold, 1954
- [9] 白井万次郎, 下地貞夫, 石井敏次, 「絶縁油熱分解の熱力学的考察」, 電気学会論文誌 A, 第 97 巻 第 7 号, pp.331-338, 1977
- [10] JEC-2200-2014, 「変圧器」, 電気学会電気規格調査会標準規格, 2015
- [11] 電気協同研究会, 「電力用変圧器の分解輸送・現地作業品質管理基準」, 電気協同研究, 第 69 巻 第 2 号, 2013
- [12] H. Shibata, T. Kotsubo, T. Yamauchi and S. Ohtsuka, “Construction of the SHF Test Apparatus to Measure the Partial Discharge Current Waveforms in the Practical Operation Conditions of Power Transformer and Application to Influence of BTA Addition,” 2018 Electrical Insulation Conference, pp.182-185, 2018
- [13] H. Shibata, T. Yamauchi, K. Yoshida and S. Ohtsuka, “Breakdown Light Emission Spectrum of Mineral Oil Including a Water Droplet Observed with a Spectroscope and Optical Sensors Attached with a Color Filter,” 21<sup>st</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, 931, 2019

## 第7章 総括

### 7.1. 総括

世界の電力需要および電力分野への投資は今後も増加していくと見込まれている<sup>[1,2]</sup>。国内においては、電力料金抑制などの経済性の観点から電力機器の長期的な運用が求められているが、一般に運転年数の増大とともに事故率の上昇は避けられないため、合理的な維持運用、故障の未然防止、計画的更新を行うために、異常診断・劣化診断技術の高度化が求められている。

電力用変圧器は、電力システムにおいて主要な機器であり、その安定運用には診断技術が重要な役割を担っている。電力用変圧器で主に使用されている鉱油を絶縁媒体とした油入変圧器に対しては油中ガス分析による異常診断が一般的であるが、即応性やオンラインでの状態把握には課題がある。他方、ガス絶縁開閉装置ではPDによるUHF帯の放射電磁波を測定するUHF法によるPD診断が普及してきていることから、変圧器でもUHF法による診断が油中ガス分析のように一般化されることが考えられる。このUHF法の適用ならびに高度化には、PD現象のより進んだ理解が重要となり、特に放射電磁波と関係するPD電流波形の正確な観測と理解が重要である。しかしながら、油中の放電は不純物の影響を受けるなどSF<sub>6</sub>などのガス中放電より複雑で完全に解明されているわけではない。

近年、超広帯域測定技術が確立してきたことで、UHF帯以上の数10GHzまでの超広帯域な放電電流パルスを測定することが可能になっており、SF<sub>6</sub>ガス中のPD電流の検討が進められている<sup>[3]</sup>。この測定技術を油中放電に適用することで、油中PD現象を明らかにすることが期待できる。また、運用中の油入変圧器の絶縁油は温度上昇や経年による劣化、絶縁紙劣化によるフルフラールの生成、流動帯電防止の添加剤含有など、実験室で検討されている室温状態の新油とは異なる状態であり、それらを考慮した検討も必要である。

以上のような背景から、本研究では油中放電の基礎現象を解明することで、変圧器の監視診断・予防保全を高度化することを目的とし、変圧器用絶縁油の中でも特に鉱油を主対象として、超広帯域計測によりPD電流特性を明らかにするとともに、その放射電磁波特性を検討した。さらに実運用状態を評価できる装置を提案し構築した。

以下に本論文の構成および概要と得られた成果を記す。

第1章では序論として、本研究の背景や変圧器の技術開発動向から取り組むべき課題について述べた。

第2章では実験装置および実験方法として、本研究で使用した超広帯域PD電流パルス波

形測定システムの構成や各種仕様および試験設備等について述べた。

第3章では、超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の脱気状態の相違と極性効果について述べた。SF<sub>6</sub> ガス中では、超広帯域計測により負極性 PD 電流波形では数 10 ps オーダの立ち上がり時間を有することなどが明らかにされているが、油入変圧器への適用はなく特性は不明であった。絶縁油を十分脱気し清純にしないと溶存しているガスや水分、異物などが絶縁性能に影響するため、超広帯域計測を適用しこれら影響を明確に理解、評価することを考えた。そこで基本となる鉱油を対象に、脱気状態および交流電圧の極性効果による PD 電流波形の基礎特性を調べた。得られた成果を以下に示す。

- (1) 脱気が十分でないと油中の“真性放電”だけでなく溶存ガスによる“油中ガス放電”が発生していることや PD 電流波形には明確な極性効果があることを明らかにした。
- (2) それら PD の発生メカニズムは溶存ガスの有無と油中“真性放電”により発生するガス及び二次電子の作用により説明できることを明らかにした。
- (3) 負極性の油中“真性放電”および“油中ガス放電”の電流波形の立ち上がり時間はそれぞれ数 10 ps と数 100 ps 前後であることを超広帯域計測により明らかにし、超広帯域計測の有効性を示した。

第4章では超広帯域計測による鉱油中 PD 電流波形の経年油と新油の相違について述べる。電力用変圧器内の絶縁油は長期間の運転に伴う経年劣化の影響を考慮する必要がある。そこで、超広帯域計測を適用した新油と経年油での PD 電流波形の相違を検討した。また、絶縁油種類の比較として難燃性のシリコーン油の新油についても併せて比較検討した。さらに UHF 帯および VHF 帯に感度を有するアンテナを用いた PD 放射電磁波の同期計測も行い、PD 電流との関係を、正準判別分析や多変量解析などの統計解析手法を用いて議論した。得られた成果を以下に示す。

- (1) 各絶縁油で PD 電流波形には顕著な極性効果が認められ、負極性 PD 電流波形の特徴量を用いて相関関係を比較すると、鉱油とシリコーン油では特性に相違が認められたが、経年油と新油では同一の特性が示された。この結果は、PD 放射電磁波の振幅値と負極性 PD 電流波形の特徴量との関係でも同様に示された。
- (2) 線形正準判別分析を行った結果、経年油と新油およびシリコーン油で相違がある可能性が示唆された一方で、Wilks の  $\Lambda$  という統計値では有意差があるとはいえないと評価された。負極性 PD 電流波形の立ち上がり時間の結果から測定系の帯域制限の影響を受けている可能性があることから、経年油と新油の相違有無に関しては今後さらに測定帯域を拡張した検討が必要なことが示唆された。



第5章では鉱油中負極性 PD 電流の立ち上がり時間特性の電界利用率依存性と 5G 通信帯域との関係について述べた。PD 電流パルスの立ち上がり時間は、放電電極の電界利用率により変化するため、電界利用率に基づき特性を評価することが必要であるが、鉱油中の特性は明らかとなっていない。また近年、5G と呼ばれる第5世代移動通信システムが普及してきており、ピコ秒領域の PD 現象がこのような帯域の通信に及ぼす影響を知ることは重要である。そこで、鉱油中の PD 電流パルス波形の立ち上がり時間を針電極系の電界利用率を変化させて調べるとともに、それらの PD 放射電磁波の周波数特性と 5G 通信で使用される通信帯域との関係を検討した。得られた成果を以下に示す。

- (1) 鉱油中の PD 電流波形は電界利用率依存性があり利用率が増加するほど立ち上がり時間は増加した。SF<sub>6</sub> ガス中 PD よりもより急峻であり数 10 ps の領域で発生することが示された。
- (2) 測定結果に基づき PD 電流波形をガウス波形でモデル化し一般化して放射電磁波の周波数特性を検討した結果、鉱油中 PD は 5G 通信で使用されるミリ波帯にピークを示す電磁波が放射される可能性があることがわかった。また、同様の検討から半値半幅 HWHM が 80 ps 程度の PD からは Sub6 帯でピークを示す電磁波が放射される可能性が示された。

第6章では変圧器の実運用状態を模擬した試験検討の一例および試験システムの構築結果を示し、また油中放電現象への光学測定の適用結果を示した。実運用状態の変圧器絶縁診断を考えると、実器環境を模擬できる試験系の確立が必要である。また、劣悪な電氣的ノイズ環境では UHF 法による PD 現象の検出が困難となるため、油中放電現象への光学測定の適用評価も重要である。そこでまず、実運用状態を模擬した試験条件の一例として、流動帯電防止の観点から鉱油へ添加される BTA が PD 特性に及ぼす影響を超広帯域計測により検討した。次に、油中放電現象への光学測定の適用例を示した。最後に、これまでに得られた成果を反映させて、電力用油入変圧器の実運用状態を模擬できる試験システムを提案・構築した。得られた成果を以下に示す。

- (1) 油中への BTA 添加有無による PD 電流波形の超広帯域計測の結果、PD 電流の時間変化と PD 放射電磁波強度には BTA 添加は影響がないことを明らかにした。
- (2) 油中放電の光学測定の結果、鉱油中放電により発生する炭化水素系分解ガスの発生種や発生タイミングを評価できることが示された。
- (3) 変圧器の実運用状態の絶縁油を模擬できる試験システムを提案・構築し、注油や電圧印加できることを確認した。これにより、実運用状態での絶縁油中 PD 現象だけでの

---

く、今後適用される新たな絶縁油の放電特性や診断手法の検討・評価を可能とする装置を提示した。

## 7.2. 今後の課題

以上の研究成果を踏まえ、今後の検討課題を以下に示す。

- (1) 構築した試験システムを用いて、実運用状態の鉱油中放電特性を取得する。また鉱油だけでなく、近年適用が急速に進んでいるエステル油<sup>[4-5]</sup>など、新たな絶縁油の放電特性を取得し、油中放電現象解明のための知見を得る。
- (2) 超広帯域計測で取得した PD 電流波形をソースとして FDTD 法を用いた電磁界解析などの数値解析することで、UHF センサの最適な帯域や配置を明らかにするなど、診断手法の検討・評価を行っていく。

[第 7 章の参考文献]

- [1] International Energy Agency, “Electricity Market Report – July 2022,” 2022
- [2] International Energy Agency, “World Energy Investment 2022,” 2022
- [3] S. Ohtsuka, K. Fukuda and A. Sogabe, “MEASUREMENT OF PD CURRENT WAVEFORMS IN SF<sub>6</sub> GAS WITH A SUPER HIGH FREQUENCY WIDE BAND MEASUREMENT SYSTEM,” XVII International Symposium on High Voltage Engineering, D-074, 2011
- [4] X. Wang, “PARTIAL DISCHARGE BEHAVIOURS AND BREAKDOWN MECHANISMS OF ESTER TRANSFORMER LIQUIDS UNDER AC STRESS,” University of Manchester, 2011
- [5] 加藤雅道, 「油中ガス分析と量子化学計算を適用したエステル系絶縁油入電力機器の異常診断技術」, 芝浦工業大学, 2020

## 研究業績

1. Construction of the SHF Test Apparatus to Measure the Partial Discharge Current Waveforms in the Practical Operation Conditions of Power Transformer and Application to Influence of BTA Addition  
2018 Electrical Insulation Conference, pp.182-185, 2018  
Hiroki Shibata, Toshikatsu Kotsubo, Tatsuhiro Yamauchi, Shinya Ohtsuka
2. Breakdown Light Emission Spectrum of Mineral Oil Including a Water Droplet Observed with a Spectroscope and Optical Sensors Attached with a Color Filter  
21<sup>st</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, 931, 2019  
Hiroki Shibata, Tatsuhiro Yamauchi, Keisuke Yoshida, Shinya Ohtsuka
3. 超広帯域計測による経年絶縁油と新油及び油種類による PD 電流波形の比較  
電気学会論文誌 B, 第 142 巻, 第 10 号, pp.482-489, 2022  
芝田 拓樹, 福崎 稔, 松本 卓也, 大塚 信也
4. 鉱油中 PD 電流波形の超広帯域計測—脱気状態と極性効果の相違—  
電気学会論文誌 B, 第 142 巻, 第 11 号, pp.561-567, 2022  
大塚 信也, 福崎 稔, 芝田 拓樹
5. Rise Time Characteristics on the Order of Picoseconds of Negative PD Current Pulses in SF<sub>6</sub> Gas and Mineral Oil and Impact of PD-Emitted EM Waves on the 5G Frequency Band  
9<sup>th</sup> International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2022, A2-2, 2022  
Shinya Ohtsuka, Tatsuhiro Yamauchi, Hiroki Shibata

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました、九州工業大学 大学院工学研究院電気電子工学研究系の大塚信也教授に深く感謝するとともに厚く御礼を申し上げます。また本論文の副査となって頂き、数多くの有益なご助言とご指導を賜りました、九州工業大学 大学院工学研究院電気電子工学研究系の内藤正路教授、小森望充教授、松本聡教授、松嶋徹准教授に心より感謝いたします。

本研究に取り組む機会を与えてくださった、元三菱電機株式会社の菊池邦夫氏、三菱電機株式会社 系統変電システム製作所の 皆川忠郎氏、日野悦弘氏、清水芳則氏、宮下信氏に深く御礼を申し上げます。また本研究を遂行するにあたり有益なご助言を賜りました、三菱電機株式会社の栗山遼太氏に厚く御礼を申し上げます。

九州工業大学大学院博士後期課程に在学中、様々なご支援を賜りました大塚研究室の修了・卒業生諸氏に厚く御礼を申し上げます。特に第9期生 吉田圭佑氏、第10期生 小坪俊勝氏、第12期生 山内辰浩氏には多大な支援をいただきました。深く感謝の意を表します。

研究生活において、数々のご協力をいただきました、大塚研究室秘書 小山之子さんに深く感謝いたします。

最後に、九州工業大学大学院博士後期課程進学にあたり、温かく見守り続けてくれた母 由美子、支えてくれた妻 美沙都、長男 鍊人と次男 朔弥に心より感謝いたします。