



Title	電力機器の診断技術に関する研究
Author(s)	川田, 昌武
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3143929">https://doi.org/10.11501/3143929</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

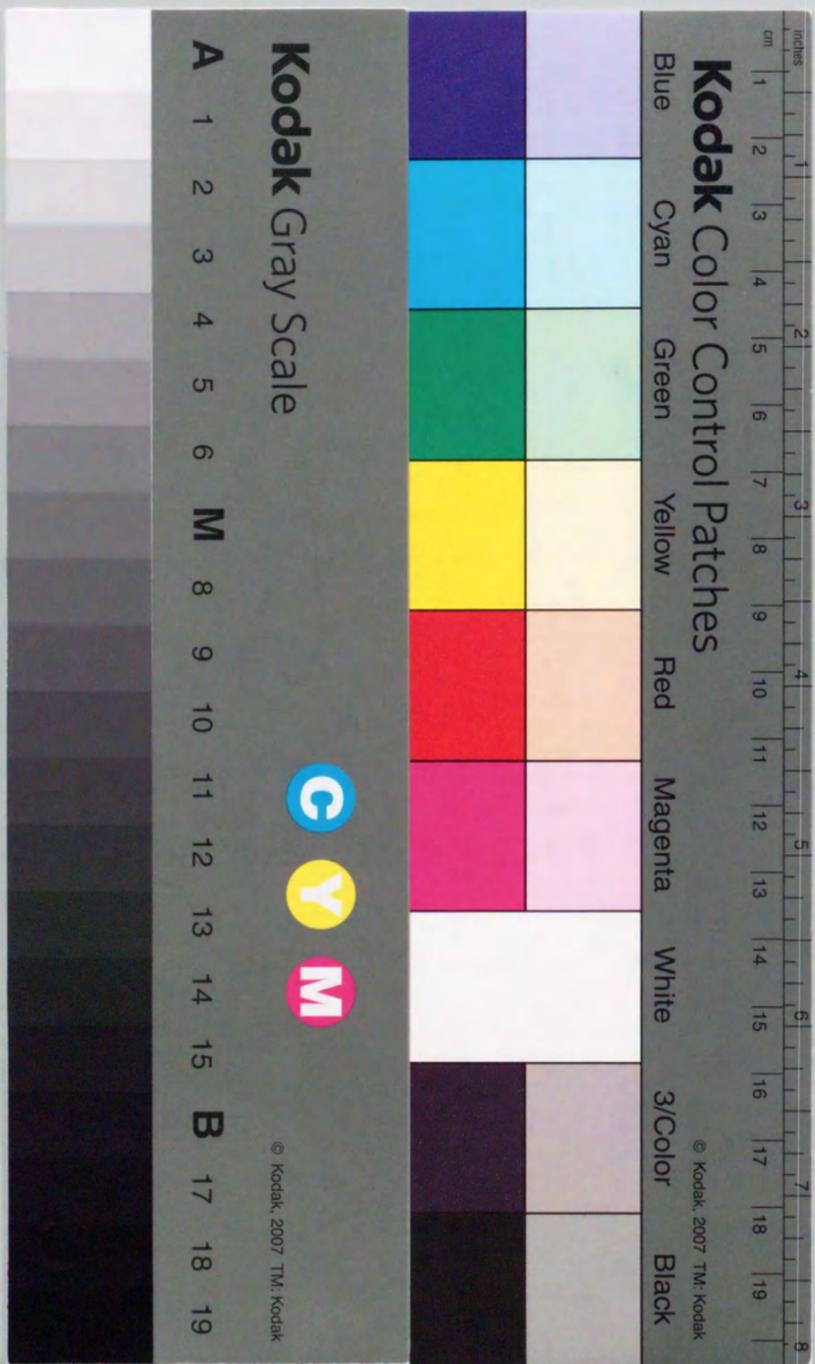
<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

電力機器の診断技術に関する研究

1998年

川田昌武



①

## 電力機器の診断技術に関する研究

1998年

川田昌武

## 内容梗概

本論文は、電力機器の診断技術の開発を目的として、研究を遂行した結果を纏めたもので、以下の6章より構成されている。

第1章は序論であり、電力機器の診断技術の必要性を社会的背景より述べている。なお本研究では、電力機器の診断技術として、GIS (Gas Insulated Switchgear)・発電機の診断技術に着目していることから、その現状と課題を述べ、本研究の目的及び意義を明らかにしている。

第2章では、絶縁劣化の予兆現象である部分放電から放射される電磁波に着目し、その電磁波を検出するとともに、放電源の位置標定を行う手法の開発を行っている。放射電磁波を複数のアンテナで受信することにより、その到達時間差を求める方法として、電磁波空間位相差法を提案し、変電所設備の中で重要な要素設備となっているGISと発電所設備の心臓部とも言うべき発電機の固定子コイル絶縁の劣化検出に適用した結果について述べている。なお、GISではVHF帯(MHz)電磁波、発電機ではSHF帯(GHz)電磁波を受信・解析し、本手法の有効性を明らかにしている。

第3章では、部分放電より放射されるVHF帯の広帯域電磁波を、ウェーブレット変換により時間周波数解析を行った結果を述べている。具体的には、GIS内のSF<sub>6</sub>ガス中の部分放電に着目しており、この解析結果から放電電荷量とウェーブレット変換によるダイナミックスペクトラムとの関係を明らかにしている。

第4章では、実運用に供していた発電機からサンプリングした固定子コイルを用いて絶縁破壊試験を行い、その放射されるGHz帯電磁波を測定することで、コイルの絶縁劣化状態を診断する方法を提案している。その際、診断方法として一般的に用いられている累積破壊確率と放射電磁波パルスとの関係を明らかにし、発電機運転停止の一つの判断基準となりうることを示している。

第5章では、同期発電機・電動機などの軸受部の診断方法として有効とされているフェログラフィー分析法の自動診断化を検討している。フェログラフィー分析法の摩耗粒子自動検出を実現とするために、コンピュータによる画像処理技術とニューラルネットワークを用いたシステムを構築し、実際に摩耗粒子の判別に用いた結果を述べ、その有効性を明らかにしている。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。

# 目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 GIS・発電機の診断技術の現状と課題	2
1.3 本研究の目的	4
1.4 結言	5
第1章 文献	6
第2章 電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法	9
2.1 緒言	9
2.2 電磁波空間位相差の原理	10
2.3 部分放電源の位置標定方法	15
2.4 GISの部分放電検出	17
2.4.1 実験配置および計測システム	17
2.4.2 部分放電源の位置標定	19
2.4.3 微小放電に対する測定	25
2.5 発電機固定子コイルの部分放電検出	28
2.5.1 GHz帯放射電磁波測定システム	28
2.5.2 固定子コイル部分モデルによる模擬実験	35
2.5.3 発電機の運転中PD検出	41
2.6 結言	52
第2章 文献	54
第3章 ウェーブレット変換を用いた部分放電解析法	57
3.1 緒言	57
3.2 ウェーブレット変換	58
3.3 SF <sub>6</sub> ガス中の部分放電の時間周波数解析	61
3.3.1 実験方法	61
3.3.2 部分放電の時間周波数解析結果	63
3.3.3 より微小な放電時の時間周波数解析	70
3.4 結言	73
第3章 文献	74

第4章 GHz帯放射電磁波測定による絶縁劣化診断法	76
4.1 緒言	76
4.2 発電機固定子コイルの絶縁劣化診断	77
4.2.1 GHz帯放射電磁波測定システム	77
4.2.2 固定子コイルの絶縁破壊法	79
4.2.3 固定子コイルの絶縁破壊電圧値に基づく破壊確率解析	83
4.2.4 GHz帯放射電磁波による絶縁劣化診断	85
4.3 結言	90
第4章 文献	91
第5章 画像処理技術とニューラルネットワークによる自動診断法	93
5.1 緒言	93
5.2 同期機すべり軸受の潤滑油中摩耗粒子検出	96
5.2.1 フェログラフィー分析法	96
5.2.2 システム構成	99
5.2.3 画像処理技術による摩耗粒子の特徴抽出法	99
5.2.4 ニューラルネットワークによる認識法	105
5.2.5 摩耗粒子の検出・認識結果	108
5.3 結言	112
第5章 文献	113
第6章 結論	115
謝辞	120
研究業績	121

# 第1章

## 序論

### 1.1 緒言

電気は照明・熱・動力・通信など多様な利用形態に容易に変換できうることから、電力需要は今後 2030年まで年率2~3[%]の割合で上昇し、総エネルギーに占める電力需要の割合（電力化率）は、現在の40[%]前後から50~60[%]にまで増加するものと想定されている<sup>(1)</sup>。また、高度情報社会へと進みつつある現在、より良質な電力の安定供給（無瞬断・無停電）はこれまで以上に望まれている。

一方、電力業界における規制緩和が世界的な趨勢となっており、我が国では電気事業の運営に関する法律である電気事業法<sup>(2)</sup><sup>(3)</sup>が、1995年4月9日に31年ぶりに改正（1995年12月1日施行）され、他業界からの発電分野への参入が自由化されると共に、各電力会社間においてもヤードスティック方式<sup>(3)</sup>という本格的な競争原理が導入された。電力会社は一層の企業努力・経営効率化を要求され、設備工事費のコストダウン、保守業務の合理化による経費削減が要求されている。

この様な時代背景のもと、我が国では昭和30年~40年代（1960~1970年代）の高度経済成長期に設置された数多くの電力機器・設備が20年~30年の使用期間を経過し、

老朽化<sup>(1)(4)</sup>が進んでいることから、機器・設備の事故の未然防止、効率的な更新計画のためにも、より合理的な診断手法<sup>(5)~(12)</sup>の開発が強く要望される情勢となっている。電力機器・設備の診断において、各種の異常の兆候となる現象を検出するためのセンサ技術が必要とされるが、近年の技術進歩により複雑な物理的および化学的現象を検出することが可能となり<sup>(5)~(12)</sup>、効果的な診断・監視を行うことが実現されつつある。

## 1. 2 GIS・発電機の診断技術の現状と課題

### <GISの診断技術の現状と課題>

変電所設備において重要な設備であるSF<sub>6</sub>を利用したガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）が、我が国に1969年（昭和44年）に導入されて以来、その優れた適合性（コンパクト、耐環境性、安全性等）から急速に普及してきた。導入初期のGISは、「複圧・循環式」（高圧ガスにより遮断し、低圧ガスで対地絶縁し、そのガス圧を常時循環させる方式）であり構造が複雑であったことから、運転保守は頻繁に行われた。その後、1970年代後半（昭和50年代）には、現在の「単圧・封じきり式」（低圧ガスだけを使用して遮断時にのみガスを圧縮する方式）となり、GISの大幅なコンパクト化につながり、高信頼性・保守性が格段に向上している<sup>(13)(14)</sup>。現在では、新しく建設される変電所のほとんどにGISが採用され、また、UHV（1000[kV]）GISや500[kV]直流GISの実用化への見通しが得られている<sup>(13)(14)</sup>。

GISは本来無保守・無点検を指向した機器であるが、万一内部事故が発生した場合には、その復旧に多くの時間を要し系統運用にも影響を与えるという欠点がある。したがって、金属容器によって密閉されている開閉装置の内部の機器が十分な機能を保持していることの確認、内部における異常兆候の早期発見や故障位置の標定が重要であることから、診断技術の開発適用が特に必要とされ、この点に関する技術開発は活発に行われている。部分放電（PD：Partial Discharge）検出による絶縁診断方法としては、絶縁スペーサ法、タンク外壁検出法、振動検出法、音響検出法等が報告されている<sup>(5)(8)(15)</sup>。しかしながら、上記の診断方法では、その信号検出センサはGIS

に接触あるいは内蔵されており、測定の安全性や作業性等を考慮すると、変電所設備における機器に対しては、非接触で診断を行うことが理想的である。GISにおけるPDの発生から絶縁破壊までのリードタイムは数時間から数日が大半を占めている<sup>(9)</sup>ことから、突発的に発生する異常に対し常時監視する必要性があり、人員の省力化からも自動監視化が望まれている。

### <発電機の診断技術の現状と課題>

大容量発電プラントの新設が飽和傾向にあるなかで、プラントの長寿命化・予防保全に関する研究が活発に実施されている。発電機は定期的な保守管理によって信頼性の確保・向上を図っているが、電力需要の昼夜間格差、季節間格差が年々拡大の一步を辿っており、火力タービン発電機（日本の全発電電力量の約60%）が火力発電である<sup>(1)(18)</sup>の中間負荷運用、DSS（Daily Start-Stop：毎日起動・停止）やWSS（Weekly Start-Stop：毎週起動・停止）が高頻度に要求され運転条件の過酷化が進んでいる<sup>(4)</sup>ことから、安定した運転を継続するための適切な劣化診断技術が社会的な要請となっている。

発電機は鉄合金、非鉄合金、絶縁物など各種の材料を用いており、その材料が個々の特性を持ち、且つ、電気的、機械的、熱的といった多様なストレスが種々の運用モードで合成された形で作用するため、各部品ごとの劣化状態を測定・監視するシステムが必要となる。発電機の事故としては、固定子コイルの絶縁破壊事故、軸受部の損傷、ブラシおよびスリップリングの事故、振動問題等であり<sup>(4)(5)(19)</sup>、特に、固定子コイルの絶縁破壊事故と軸受部の事故は、長期間の運転休止を余儀なくされることから、最も重要な診断箇所となっている。

固定子コイルにおける絶縁破壊は絶縁体中の欠陥部（ボイド）で生じることが多く、この欠陥部で発生するPD（部分放電）が破壊の発端となることから、PDの測定・解析は健全性評価の重要な手段となっている<sup>(4)~(12)(16)(17)</sup>。1980年代において北米の水車発電機で絶縁トラブルが多発し、これに対処すべくPD計測技術の開発が行われ、1990年代に入りタービン発電機・電動機も対象として、PD計測技術による絶縁診断法が世界的に報告されているが、診断精度の向上にはまだまだ計測結果の蓄積が必要となっている<sup>(16)(17)</sup>。

一方、軸受部の劣化診断法としては、低周波振動法、分光分析法、振動加速度法、フェログラフィー分析法等があげられている<sup>(5)(20)~(22)</sup>。なかでも、フェログラフィー分析法は、摩擦部分の致命的な損傷を未然に防止することを目的として開発された摩耗粒子分析法であり、他の方法では発見し得ない損傷形態（摩耗、焼付き、疲労はく離）を検出できることから、有効な軸受部劣化診断法となっている<sup>(20)</sup>。しかしながら、フェログラフィー分析法は摩耗粒子の種類・量・大きさ等を光学（2色）顕微鏡による分析官の目視により計測し、これらを劣化状態の判定基準としていることから、欠陥の有無を判定するにはかなりの経験を必要としており、熟練者の不足、疲労による誤診、診断時間の短縮等の問題を解決するという点から、その自動化の必要性が増大している。

### 1. 3 本研究の目的

本研究では、変電所において重要な要素設備となっているGIS（ガス絶縁開閉装置）と、発電所の心臓部とも言うべき発電機の固定子コイルの絶縁破壊の予兆現象であるPD（部分放電）の検出技術の開発と、発電機・電動機等の回転機軸受部の自動診断技術の開発を目的とする。以下に第2章から第6章の検討内容について述べる。

第2章では、絶縁劣化の予兆現象である部分放電から放射される電磁波を検出するとともに、放電源の位置標定を行うことを目的として電磁波空間位相差法<sup>(23)~(25)</sup>を提案し、GIS及び発電機固定子コイル絶縁に適用した結果を示す。GISでは、VHF帯（MHz）の広帯域電磁波、発電機ではSHF帯（GHz）の狭帯域電磁波を受信・解析し、本手法の有効性を明らかにする。なお、GHz帯電磁波を狭帯域で受信可能とするためにダウンコンバータを設計・製作し、その性能評価を行うとともに、ダウンコンバータによるGHz帯電磁波の計測結果について示す。

第3章では、ウェーブレット変換を用いたPD解析法を提案し、GIS内のSF<sub>6</sub>ガス中におけるPDからの放射電磁波のダイナミックスペクトラムと、その電荷量との関係を示す<sup>(26)(27)</sup>ことを目的とする。そして、このダイナミックスペクトラムと電荷量との関係による絶縁劣化診断の可能性を検討する。

第4章では、発電機固定子コイル内のPDから放射されるGHz帯電磁波と、3 $\sigma$ 管理法<sup>(5)</sup>より求め得る累積破壊確率との関係による絶縁劣化診断法を提案し、発電機の計画害緊急停止を回避するための指標を示す<sup>(28)~(30)</sup>ことを目的とする。本診断法の有効性を、固定子コイルを用いた絶縁破壊試験を行い、その累積破壊確率と放射電磁波パルスとの関係から示す。

第5章では、同期発電機・電動機などの軸受部の診断方法として有効とされているフェログラフィー分析法の自動診断化技術の開発<sup>(31)</sup>を目的とする。フェログラフィー分析法の摩耗粒子自動検出を実現するために、コンピュータによる画像処理技術とニューラルネットワークを用いたシステムを構築し、実際に摩耗粒子の判別に用いた結果を述べ、その有効性を示す。

第6章では、結論として得られた成果を総括する。

### 1. 4 結言

本章では、電力機器の劣化診断技術の開発の必要性とその課題を現代の社会的背景から述べるとともに、本研究の目的を明確にした。

## 第1章 文献

- (1) 福田務, 相原良典: "電力技術", オーム社, 平成8年(1996年)
- (2) 電気書院編: "電気設備技術基準とその解釈(電気事業法)" pp. 344, 電気書院, 平成9年改正版
- (3) 田尻陸夫: "電気施設管理と法規", pp. 16 オーム社, 平成9年(1997年)
- (4) 日立評論: "電力設備の予防保全技術" Vol. 75 1993年12月
- (5) 電気学会編: "電気設備の診断技術", オーム社, 1988年
- (6) 特別高圧回転機・ケーブル絶縁の劣化診断技術調査専門委員会: "特別高圧回転機ケーブルの絶縁劣化診断技術", 電気学会学術報告 第267号, 1988年3月
- (7) 松浦虔士, 岡部成光, 金子英男, "電力機器の絶縁余寿命推定法の現状", 電学論A, 114巻12号, pp. 845-852, 平成6年
- (8) 運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会: "電力設備の運転中絶縁診断技術", 電気学会技術報告 第402号, 1992年1月
- (9) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会: "電力設備の絶縁余寿命推定法", 電気学会技術報告 第502号, 1994年7月
- (10) 岡本達希: "最近の部分放電診断技術", 電学論B, 115巻10号, pp. 1136-1139, 平成7年(1995年)
- (11) 岡本達希: "絶縁計測におけるコンピュータ応用の最近の動向" 電学論A, 116巻6号, pp. 481-487, 平成8年(1996年)
- (12) 絶縁計測へのコンピュータ応用調査専門委員会: "絶縁計測へのコンピュータ応用技術", 電気学会学術報告 第593号, 1996年6月
- (13) 宅間薫: "ガス絶縁およびガス絶縁機器の基礎", 電学論B, 116巻10号, pp. 1168-1172 平成8年(1996年)
- (14) 石井豊章, 金山慎治: "ガス絶縁機器の最近の動向", 電学論B, 116巻10号, pp. 1173-1177 平成8年(1996年)
- (15) 真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化技術調査専門委員会: "真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化", 電気学会技術報告 第479号, 1993年12月
- (16) 木村健: "高電圧回転機のオンライン絶縁診断技術の動向", 電学論B, 110巻

12号, pp. 991-994, 平成2年(1990年)

- (17) 木村健: "大形回転機オンライン絶縁診断の研究動向" 第28回電気絶縁材料シンポジウム, pp. 227-230
- (18) 通商産業省資源エネルギー庁編集: "考えよう, 日本のエネルギー", 平成8年(1996年)
- (19) 渡辺達郎: "同期機", pp. 241-270, 日刊工業新聞社
- (20) 野呂瀬進, "フェログラフィーとその応用", 機械の研究 第37巻 第1号, pp. 9~14, 1985年
- (21) 野呂瀬進, 菊池正孝, 凌家杭, 笹田直, "フェログラフィーによる軸受損傷過程の追跡", 潤滑 第33巻 第7号, pp. 533~539, 1987年
- (22) 日本潤滑学会編, "潤滑故障例とその対策", 養賢堂,
- (23) Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura: "On Spatial Phase Difference Method For Detecting E-M Signals Associated With Partial Discharges in Power Apparatus", ISH, August 1993
- (24) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠: "電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法", 電学論B, 115巻10号, pp. 1168-1173, 1995年10月
- (25) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 音羽克則, 黒木悟, 森山隆: "GHz帯電磁波空間位相差法を用いた発電機固定子コイルの非接触部分放電検出システムの開発", 電学論B, 117巻2号, pp. 224-232, 1997年2月
- (26) 川田昌武, 和田将一, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠: "SF6ガス中における部分放電現象のウェーブレット変換を用いた時間周波数解析" 電気学会B部門, 117巻3号, pp. 338~345, 平成9年3月(1997年3月)
- (27) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura: "Detection of Wide-band E-M Signals Emitted from Partial Discharge Occurring in GIS using Wavelet Transform", IEEE Power Engineering Society (Submitted, 18 September, 1997)
- (28) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 音羽克則, 黒木悟, 森山隆: "発電機固定子コイルの絶縁破壊時におけるマイクロ波帯放射電磁波測定, 平成9年(1997年)3月電気学会全国大会, 1815 サージ・高電圧(高電圧計測)
- (29) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 大澤輝也, 黒木悟, 田中宏毅: "発電機固定子コイルの絶縁破壊現象に伴うGHz帯放射電磁波測定による絶縁劣化診断法", 電学論B, 1998年3月(印刷中)

- (30) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏夫, 音羽克則, 黒木悟, 森山隆:  
” GHz帯放射電磁波測定による発電機固定子コイルの絶縁劣化診断”, 平成9年  
電気学会電力・エネルギー部門大会 661 (G213 部分放電) 1997年7月
- (31) 川田昌武, 内海真志, 廬毅, 河崎善一郎, 松浦虔士, 岡本智行:” 画像処理技術  
とニューラルネットワークを適用したフェログラフイー分析法による同期機すべ  
り軸受の潤滑油中摩耗粒子検出”, 電気学会B部門, 117巻8号, pp. 1132-1139,  
平成9年8月 (1997年8月)

## 第2章

### 電磁波空間位相差法を用いた 非接触部分放電検出法

#### 2.1 緒言

変電所設備において重要な要素設備となっているガス絶縁開閉装置 (GIS : Gas Insulated Switchgear) の絶縁破壊の予兆現象である部分放電 (PD : Partial discharge) 信号の検出・放電源位置の特定は検討すべき課題となっている<sup>(1)~(6)</sup>。GISは本来無保守・無点検を指向した機器であるが, 万一内部事故が発生した場合には, その復旧に多くの時間を要し系統運用にも影響を与えるという欠点がある。したがって, 金属容器によって密閉されている開閉装置の内部の機器が十分な機能を保持していることの確認, 内部における異常兆候の早期発見や故障位置の標定が重要であることから, 診断技術の開発適用が特に必要とされ, この点に関する技術開発は活発に行われている。

GISのPD検出による絶縁診断方法としては, 絶縁スペーサ法, タンク外壁検出法, 振動検出法, 音響検出法等が報告されている<sup>(1)~(5)</sup>。しかしながら, 上記の診断方法では, その信号検出センサはGISに接触あるいは内蔵されており, 測定のア

全性や作業性等を考慮すると、電力機器に対して非接触で診断を行うことが理想的であると考えられる。また、GISにおけるPD発生から絶縁破壊までのリードタイムは数時間から数日が大半を占めている<sup>(6)</sup>ことから、突発的に発生する異常に対し常時監視する必要性があり、また、人員の省力化からも自動監視化が望まれる。

発電設備としては、発電機の高電圧化、大容量化、高機能化等に伴い、設計電界の上昇、始動・停止頻度の増大など、その使用条件は一段と過酷になっており、絶縁劣化の進展が早まることが懸念されている<sup>(4)(6)~(10)</sup>。そして、長期運転した発電機で絶縁破壊事故が発生した場合、コアまで損傷する例が運転事故の55%に達するという報告<sup>(4)</sup>もあり、その復旧工程およびその費用は多額に上がるものと考えられる。よって、発電機絶縁破壊事故を未然に防止し、かつ絶縁の経年劣化状況の把握による機器の保守・管理計画に反映すること等から、発電機の絶縁劣化診断技術の開発が望まれている。固定子コイルにおける絶縁破壊は絶縁体中の欠陥部で生じることが多く、特に固体材料や2種類以上の材料からなる複合材料では、ポイドなどの欠陥部で発生するPDが破壊の発端となる<sup>(4)</sup>ため、PDの測定・解析は健全性評価の重要な手段となっている<sup>(4)~(18)</sup>。

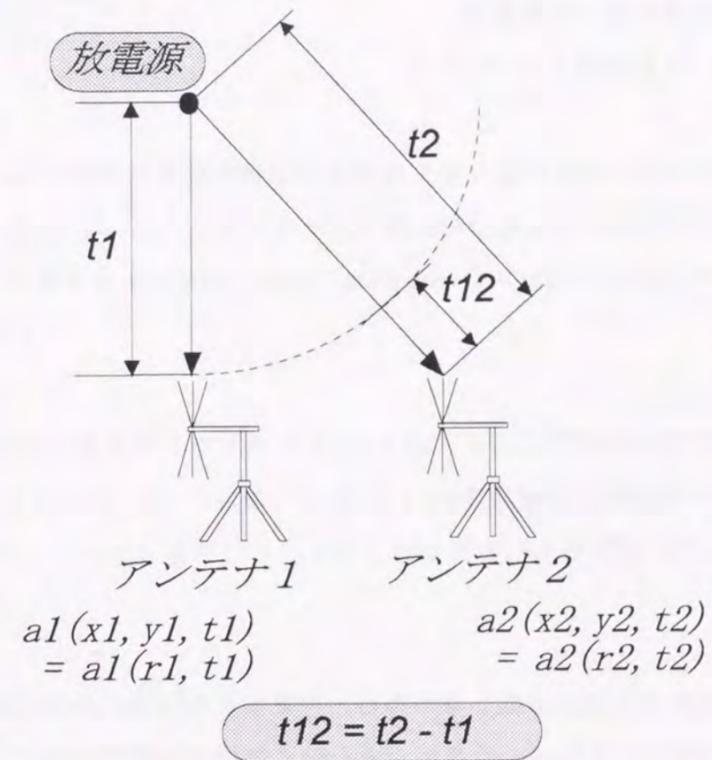
そこで本章では、電力機器の絶縁故障の予兆現象であるPDから放射される電磁波を複数の検出用アンテナで受信し、電磁波空間位相差法<sup>(19)~(21)</sup>を用いてPD信号の検出を行う方法を提案する。なお、電磁波空間位相差法はコンピュータを用いて処理することから、自動常時監視システムとしても期待ができる。本手法の有効性を、GISタンクを用いた故障模擬実験(屋外)と、発電機固定子コイルの部分モデルを用いた実験、及び実運用に供している発電機に対して適用した結果より示すこととする。

## 2.2 電磁波空間位相差法の原理<sup>(19)~(21)</sup>

電磁波空間位相差法の原理を図2.1に示す。電磁波空間位相差法は、放電源から放射される電磁波を複数本のアンテナを用いて任意の時間幅で受信した際の、空間周波数領域における位相差、すなわち空間位相差を求める<sup>(19)~(21)</sup>ことにより、PDを

検出可能とする手法である。なお、2点間(アンテナ位置)の空間位相差を時間領域に変換することで、放射電磁波の両アンテナ間の到達時間差( $t12 = t2 - t1$ )を求めることができる。

放射電磁波の測定点間における空間位相差を求めるアルゴリズムとして図2.2に示し、以下にその処理手順について述べる。なお電磁波空間位相差法は最尤推定法(Maximum Likelihood Estimation Method)を用いた時空間相関関数<sup>(22)~(24)</sup>に基づいている。



時空間領域においてデータを取得

- ・空間サンプリング
  - ・時間サンプリング
- ⇒  $a(\text{空間}, \text{時間}) = a(\text{距離}, \text{時間})$

図2.1 電磁波空間位相差法の原理

Fig. 2.1 Principle of Spathal Phase Difference Method

2本のアンテナで受信した電磁波信号を以下の様に定義<sup>(23)~(26)</sup>すると、

$$x_1(t) = s(t) + n_1(t) \quad (2.1a)$$

$$x_2(t) = \alpha s(t-D) + n_2(t) \quad (2.1b)$$

$x_1(t)$ : アンテナ1の受信信号

$x_2(t)$ : アンテナ2の受信信号

$s(t)$ : 放電源信号

$n_1(t), n_2(t)$ : 無相関である背景雑音

$\alpha$ : 減衰定数     $D$ : 時間差 ( $t_{12} = t_2 - t_1$ )

となり、この両アンテナ地点における受信信号の到達時間差  $D$  を求める。

まず、両地点の受信信号を任意の時間幅でフーリエ変換 (Fourier Transform) を行い、その相互エネルギー密度スペクトル (Cross Energy Density Spectrum) を求めると、

$$G_{12}(f) = X_1^*(f)X_2(f) \quad (2.2)$$

$G_{12}(f)$ : 相互エネルギー密度スペクトル

$X_1(f)$ :  $x_1(t)$  の周波数スペクトル

$X_2(f)$ :  $x_2(t)$  の周波数スペクトル

\*: 複素共役

となる。一方、放射電波源が移動しない場合、空間周波数領域における両地点間の空間位相差は一定であることから、背景雑音を有効に抑制する積算平均化 (Averaging) を用いることが可能となる。そこで、式(2.2)の相互エネルギー密度スペクトルに対してデータ数分の積算平均化を行う。この相互エネルギー密度スペクトルのフーリエ逆変換 (Inverse Fourier Transform) により、両地点間の時間差  $D$  を求め得るが、しかしながら、S/N比が低い場合には、到達時間差  $\tau = D$  を推定することは困難<sup>(23) (24)</sup>となる。微小信号受信時に際しても到達時間差を検知可能とするフィルタ関数 (重み関数) を考慮する必要があることから、”最尤推定法 (Maximum Likelihood Estimation Method)” を重み関数に適用して、

$$W(f) = \frac{C_{12}(f)}{|G_{12}(f)|[1-C_{12}(f)]} \quad (2.3)$$

を用いる<sup>(23) (24)</sup>。ここで、 $C_{12}$ は”振幅2乗コヒーレンス (Magnitude Squared Coherence)<sup>(22)</sup>”であり、以下の式で表される。

$$C_{12}(f) = \frac{(G_{12}(f))^2}{G_{11}(f)G_{22}(f)} \quad (2.4)$$

ここで、

$$G_{11}(f) = |X_1(f)|^2 \quad (2.5a)$$

$$G_{22}(f) = |X_2(f)|^2 \quad (2.5b)$$

であり、エネルギー密度スペクトル (Energy Density Spectrum) を示している。

よって式(2.6)より、相関関数である  $R(\tau)$  は重み関数と相互エネルギー密度スペクトルの積をフーリエ逆変換を行うことにより求めることが可能となる。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} W(f) G_{12}(f) e^{j2\pi f\tau} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_{12}(f)}{|1-C_{12}(f)|} \frac{G_{12}(f)}{|G_{12}(f)|} e^{j2\pi f\tau} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_{12}(f)}{|1-C_{12}(f)|} e^{j\phi(f)} e^{j2\pi f\tau} df \end{aligned} \quad (2.6)$$

ただし、

$$e^{j\phi(f)} = \frac{G_{12}(f)}{|G_{12}(f)|} \quad (2.7)$$

である。

また、式(2.7)において、式(2.1)の両式の背景雑音が互いに無相関である場合、空間位相差 $\phi(f)$ は時間差 $D$ を示し、

$$e^{j\phi(f)} = e^{-j2\pi fD} \quad (2.8)$$

となる。

よって、到達時間差が $\tau=D$ のとき、

$$e^{j\phi(f)} \cdot e^{j2\pi f\tau} = 1 \quad (2.9)$$

となり、式(2.6)の相関関数 $R(D)$ は最大値を示すことになる。すなわち、両受信信号の到達時間差 $D$ は空間周波数領域の空間位相差から求め得ることが分かる。

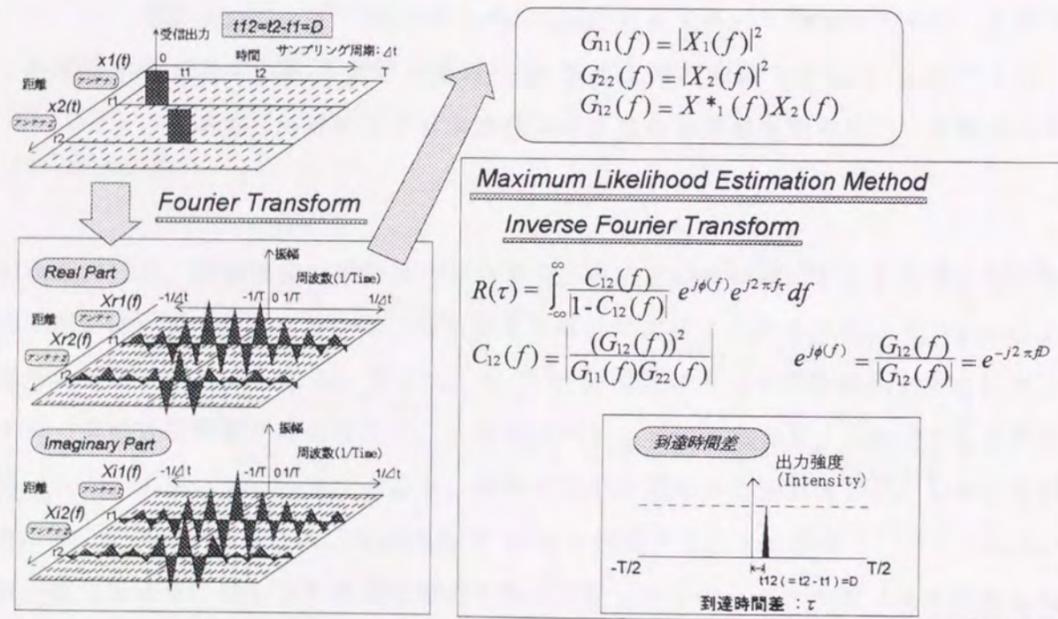


図2.2 電磁波空間位相差法のアルゴリズム

Fig. 2.2 Algorithm of Spatial Phase Difference Method

## 2.3 部分放電源の位置標定方法

2つの基準点からの距離差が一定である点の軌跡が、両基準点を焦点とする双曲線であることから、一対(2本)のアンテナを焦点とみなすと、その放射源の位置は、特定の双曲線上に存在することになる。距離差とは、すなわちアンテナへの到達時間差と電磁波の伝搬速度( $3 \times 10^8$  [m/s])の積により求まることから、2対(4本)のアンテナへの時間差を上述した空間位相差法により求め、式(2.10)に代入することにより、2つの双曲線の交点として放射波源の位置標定を行うことができる(双曲線法)。その概念図を図2.3に示す。位置標定における空間分解能(双曲線が交わる点)は、データのサンプリング周波数に依存する。

本手法をGISを用いたPDの位置標定に用いる。なお、GISは密閉されていることから、PDによる電磁波はプッシングから漏洩するものと考えられ、GIS内で発生した放電点の位置標定ではなく、放電が生じている機器の位置を標定することを意味する。

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = ct_{12} \quad (2.10a)$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} = ct_{34} \quad (2.10b)$$

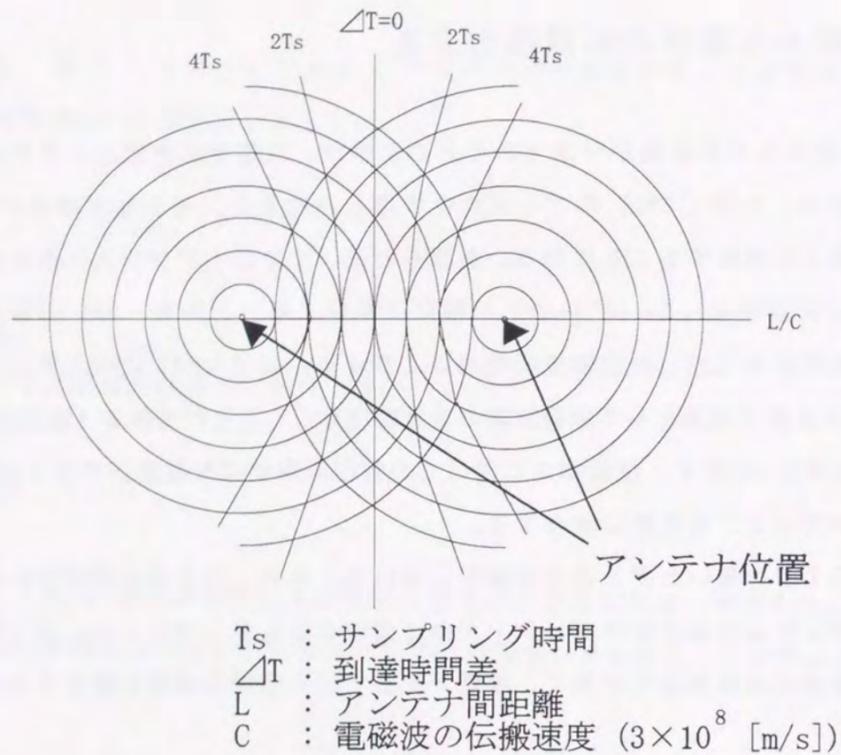
$(x, y)$ : 放電源の位置

$(x_n, y_n)$ : 各アンテナの位置 ( $n=1 \sim 4$ )

$t_{12}$ : アンテナ1とアンテナ2の時間差

$t_{34}$ : アンテナ3とアンテナ4の時間差

$c$ : 電磁波の伝搬速度( $3 \times 10^8$  [m/s])



### 時間差曲線 (標定位置曲線)

図2.3 放電源位置の標定 (双曲線法)

Fig. 2.3 Location of PD

## 2.4 GISの部分放電検出

### 2.4.1 実験配置と計測システム

実験方法として、図2.4に77kV GISタンクと試験回路を示す。同図に示す様に、GISタンク内の3導体中の2導体間に針-平板電極 (ギャップ長: 10[mm]) を接続し、これを模擬絶縁故障点、すなわち部分放電源とする。そして、この針状電極に交流電圧 (対地) を印加し、放電させる。なおPDの電荷量を可変させる場合、ギャップ長を変える方法と、印加電圧を変える方法があるが、本実験ではPDの電荷量を印加電圧を可変することで変化させることとした。GISタンク内のガスはSF<sub>6</sub>であり、ゲージガス圧力を0[kg/cm<sup>2</sup>] (大気圧) に設定した。

PDの電荷量の測定は、カップリングコンデンサ (ニチコン社製: 容量2000[pF]) に流れる電流の波高値を、予めパルス発生器により校正パルスを注入することで求めておいた値と比較することにより算出する。その際、電流の波高値はデジタル・ストレージ・オシロスコープ (DSO: テクトロニクス社製2440型) により抵抗 (50[Ω]) を介して (電圧波形として) 測定する。なお、DSOのサンプルング周波数は400 [MHz] である。

GIS内の部分放電検出として行った実験配置について図2.5に示す。なお同図において、77 kV GISタンクを任意の場所に配置してコロナ放電を発生させる。その際、50[m] 四方に配置した4本の検出用アンテナにより放電信号を受信する。各アンテナで受信した信号はデジタルストレージオシロスコープ (DSO, Gould社製4072型) により4チャンネル同時にサンプルングされアナログ/デジタル変換される。そしてデジタル変換された信号はコンピュータに読み込まれる。なおDSOのサンプルング周波数は400 [MHz] であり、アンテナはバイコンカルアンテナ (EMCO社製3014C型, 周波数帯域 20~200 [MHz]) を用いている。

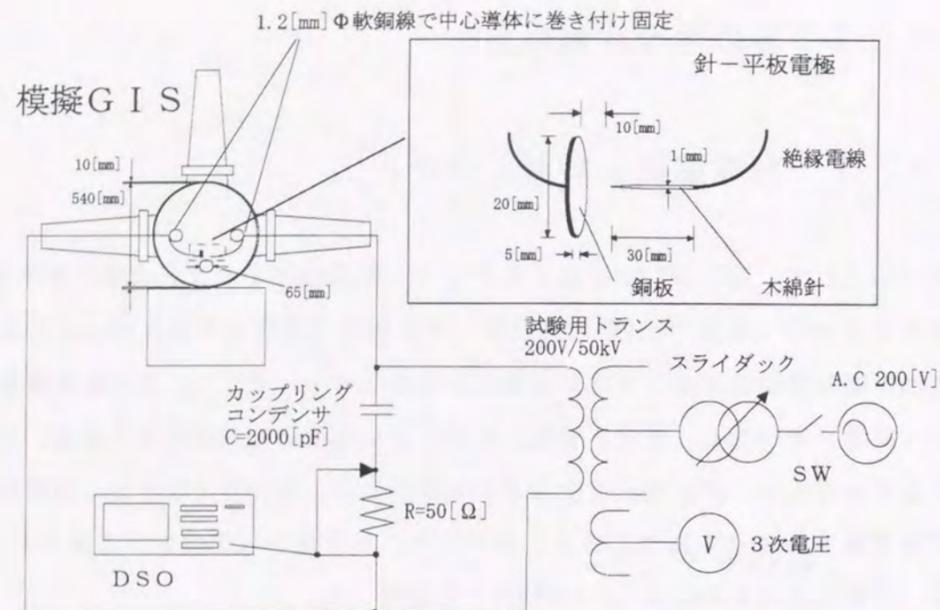


図2.4 77kV GISタンクと試験回路

Fig. 2.4 77kV GIS and the experimental circuit

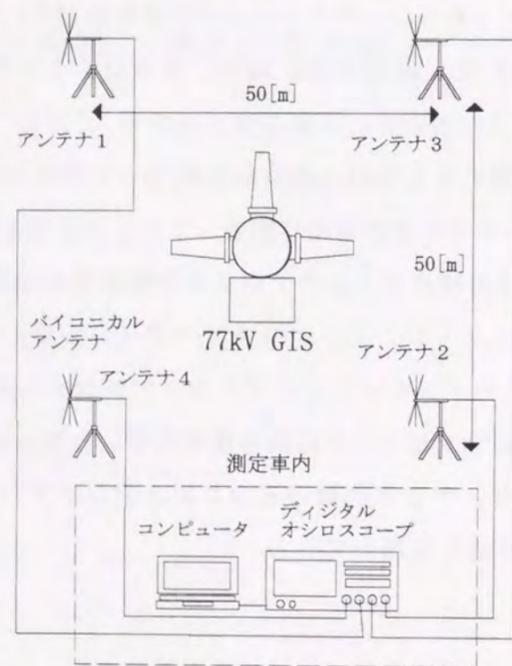


図2.5 実験配置

Fig. 2.5 Experimental arrangement

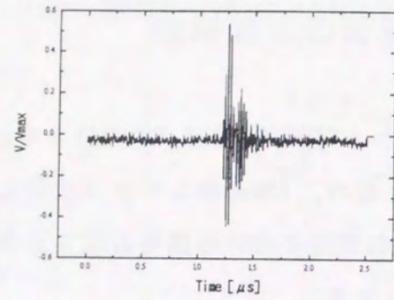
## 2.4.2 部分放電源の位置標定

GISを4本の各アンテナから等距離(図2.5における中心位置)に置き、模擬放電として1500[pC]を放電させた時の、4本のアンテナで受信した波形(DSOでの受信電圧比)を図2.6に示す。なお同図における信号の取り込み時間は、2.56[μs](ポイント数は1024ポイント)である。

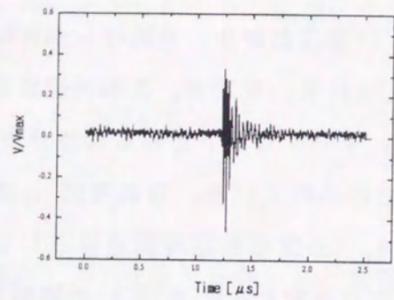
同図より、受信波形は雑音を含んでおり、またGISを中心位置に置いたがその受信レベルにばらつきが生じていることから、単純なレベルに関するしきい値では到達時間差を検出できないと考えられる。そこで、この受信波形に対して空間位相差法を適用した結果を図2.7に示す。データセットとして10組分取得したことから、式(2.2)における平均加算は10回分で行われている。なお同図(a)はアンテナ1, 2の信号到達時間差、同図(b)はアンテナ3, 4の信号到達時間差を示しており、その時間差における両信号の一致度合いを、出力強度として式(2.6)の相関関数 $R(\tau)$ により示している。つまり、出力強度が最大値を示す時間差が、両信号の到達時間差を意味する。なお、その時間差は、アンテナ1(アンテナ3)で受信した信号に対して、アンテナ2(アンテナ4)で受信した信号が、どの程度進んでいるかを示している。到達時間差の“-”はその逆の場合を意味する。

同図(a)より、アンテナ1, 2の信号到達時間差は0.01[μs](PD源がアンテナ2に近い)、同図(b)よりアンテナ3, 4の信号到達時間差は0.0075[μs](アンテナ4に近い)であることが分かる。この到達時間差をもとに双曲線法を用いて、PDの位置標定を行った結果を図2.8に示す。同図より、実際のGISの位置▲と空間位相差法による標定位置△がほぼ一致しており、測定誤差はアンテナ間距離に対して2.65[%]である。

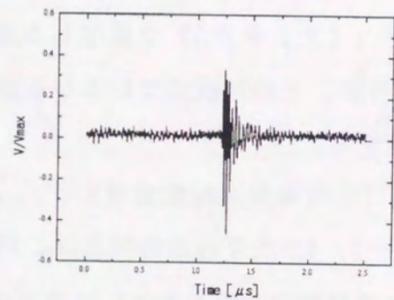
上記の場合、GISを中心に配置、すなわち、GISと各アンテナ間の距離が等距離の場合の位置標定であった。しかしながら、実際的に位置標定を行う場合には、GISと各アンテナ間の距離は異なっていることから、GISを任意に配置しPDを起こした際の到達時間差を図2.9に示す。同図よりアンテナ1, 2の到達時間差は-0.1[μs](アンテナ1に近い)、アンテナ3, 4の信号到達時間差は0.06[μs](アンテナ4に近い)であることが分かる。上記と同様に、この到達時間差をもとに位置標定した結



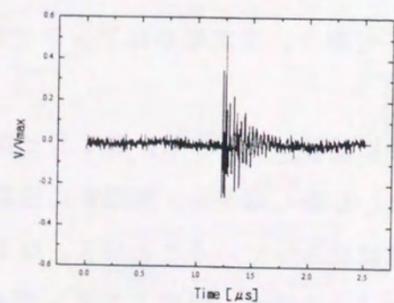
(a) アンテナ 1



(b) アンテナ 2



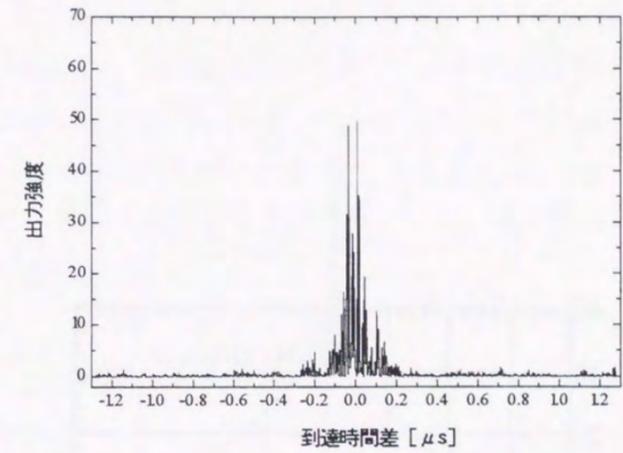
(c) アンテナ 3



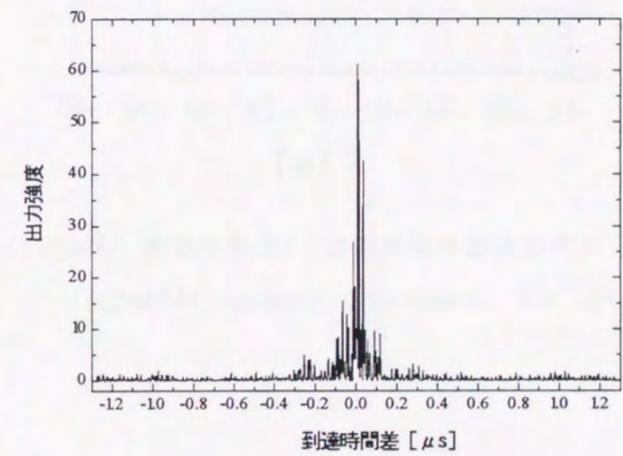
(d) アンテナ 4

図 2.6 受信波形

Fig. 2.6 Received wave



(a) アンテナ 1 と 2 の到達時間差



(b) アンテナ 3 と 4 の到達時間差

図 2.7 部分放電信号の到達時間差

Fig. 2.7 Time difference of arrival

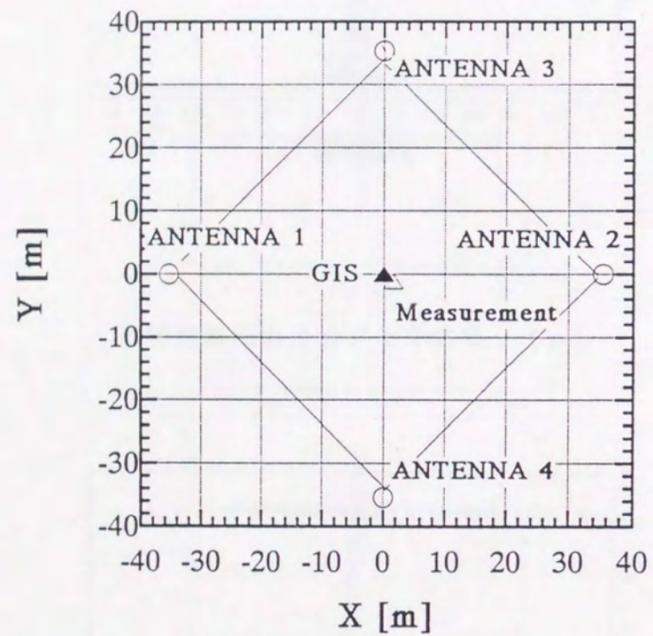
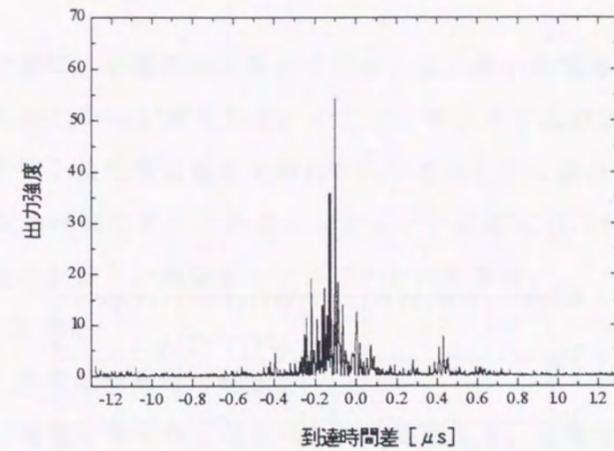
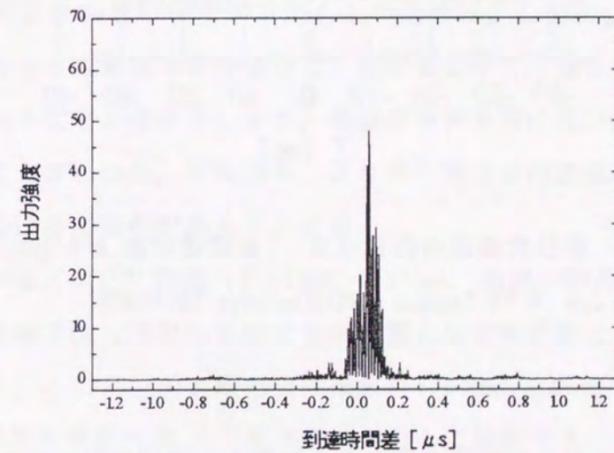


図2.8 部分放電源の位置標定 (放電電荷量 1500[pC])

Fig. 2.8 Location of PD (Discharge : 1500[pC])



(a) アンテナ1と2の到達時間差



(b) アンテナ3と4の到達時間差

図2.9 部分放電信号の到達時間差

Fig. 2.9 Time difference of arrival

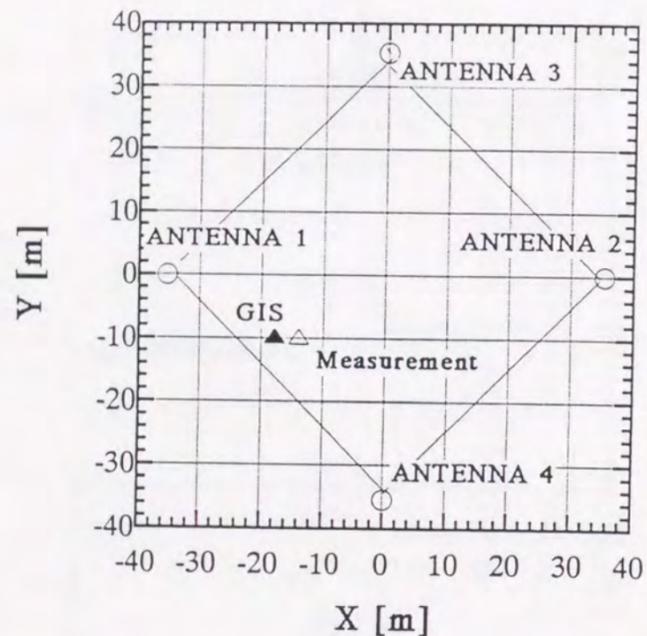


図2.10 部分放電源の位置標定 (放電電荷量 2000[pC])

Fig. 2.10 Location of PD (Discharge: 2000[pC])

果を図2.10に示す。同図より実際のGISの位置▲と空間位相差法による標定位置△は、ほぼ同位置を示しており、本方法がPDの発生点を検出する上で有効であることが分かる。

### 2.4.3 微小放電に対する測定

実際にPD計測による絶縁診断を行う場合、より微小な電荷量においても、その識別が可能となるシステムが望まれる。そこで、本システムが図2.5の実験配置において、どの程度の微小放電電荷量まで検出可能かを図2.11に部分放電電荷量の識別限界として示す。なお同図における放電点とアンテナ距離は35.36[m] (50[m]四方にアンテナを配置したことから、放電源とアンテナとの距離は、

$$50[m] \times \sqrt{2}/2 = 35.36[m]$$

の一定として、放電電荷量を可変した。

同図より、放電電荷量と出力強度は比例関係にあり、放電電荷量が小さくなれば、出力強度も低下するということが分かる。また、放電を発生させない場合のバックグラウンドの出力強度より小さい値の出力強度では、放電の存在を識別不能であることから、確実に識別できる放電電荷量は、約1000[pC]であることがわかる。

一方、受信する際の信号強度は、放電電荷量および、伝搬距離に依存すると考えられるので、図2.12にアンテナの距離を縮めた際の電荷量と受信波形の最大値の関係を示す。なお同図の放電位置とアンテナとの距離は、3.36[m], 9.63[m]とした。同図より、放電電荷量と放射波の信号強度は、電荷量が小さくなる程、信号強度も直線比例的に小さくなることが分かる。また、距離が増大するに従い、その直線関係の傾きが小さくなることがわかる。すなわち、より微小電荷量の放電に対しては、アンテナをGISに近づける必要があるといえる。

図2.12におけるアンテナ距離 (3.36[m], 9.63[m], 到達時間差計算値: 0.0209[μs]) において空間位相差法を適用した結果を電荷量と到達時間差として図2.13に示す。なお上述した様に、このアンテナ距離では確実に1000[pC]を識別できることから、1000[pC]の到達時間差を示す同図(a)を基準データとして検討する。

500[pC]の到達時間差を示す同図(b)は、同図(a)と同じ到達時間差を示していることから、確実に部分放電を検出したといえる。しかしながら、170[pC]の到達時間差を示す同図(c)は、同図(a)と異なった到達時間差を示していることから、部分放電を検出することができない。また、同距離においては放電電荷量350[pC]が検出限界であった。

すなわち、微小放電電荷を対象として絶縁診断を行う場合、アンテナをよりGIS近傍に設置することが不可欠であり、GIS近傍に設置することが可能であれば、数100[pC]以下の放電電荷量の検出を実現できる。

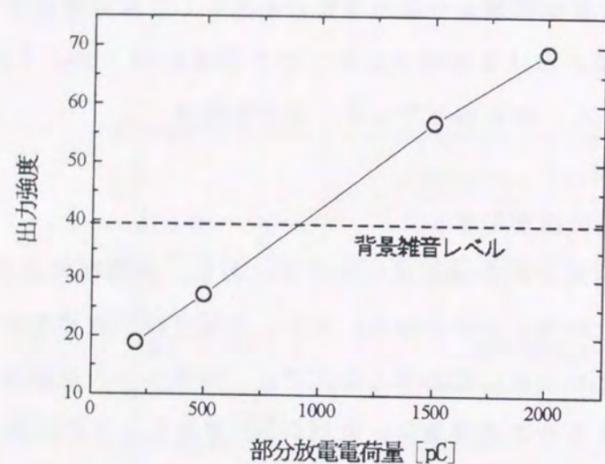


図2.11 部分放電電荷量と出力強度 (アンテナとGISとの距離: 35.36[m])

Fig. 2.11 Relation between partial discharge and output intensity

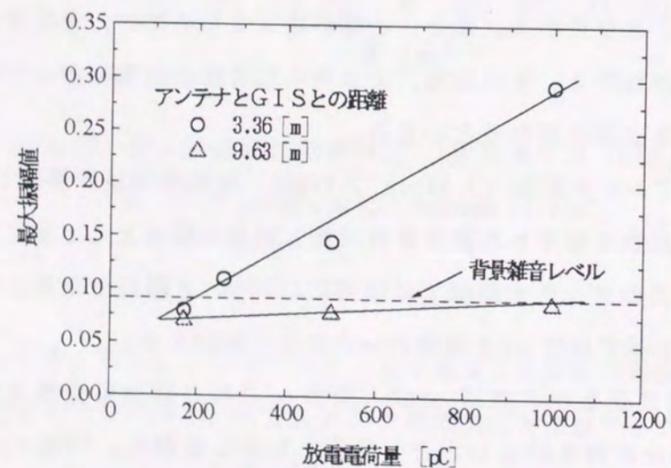
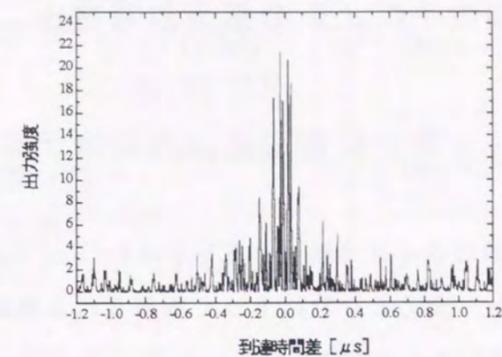
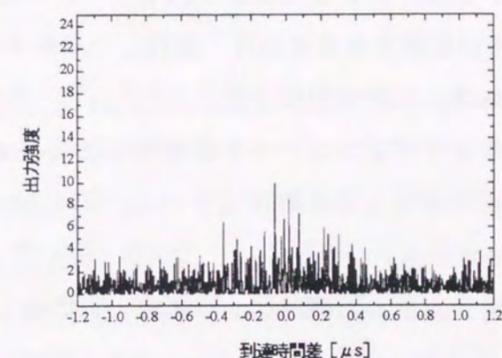


図2.12 部分放電電荷量と受信波形の最大値

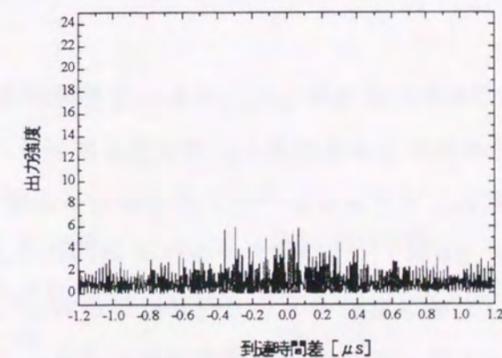
Fig. 2.12 Relation between partial discharge and maximum value



(a) 放電電荷量: 1000[pC]



(b) 放電電荷量: 500[pC]



(c) 放電電荷量: 170[pC]

図2.13 部分放電電荷量と到達時間差の出力強度

(GISと各アンテナとの距離, アンテナ1: 3.36[m], アンテナ2: 9.63[m])

Fig. 2.13 Relation between partial discharge and output intensity of time difference of arrival

## 2. 5 発電機固定子コイルの部分放電検出

### 2. 5. 1 GHz帯放射電磁波測定システム

発電機の固定子コイル内のボイドで発生するPDは1~5[ns]の現象であると報告されており<sup>(14)~(16)</sup>、また一般的にPDによって放射される電磁波はマイクロ波帯(GHz帯)にまで及んでいることが知られている<sup>(3)(27)(28)</sup>。この様な観点から、マイクロ波帯電磁波で絶縁劣化の予兆現象であるPDの検出を可能とするシステムを開発した。開発したシステムは、PDから放射されるマイクロ波帯電磁波を複数(2本)アンテナで受信し、その信号を独自に設計・製作したGHz帯相関型受信機(ダウンコンバータ)により処理し電磁波空間位相差法<sup>(19)~(21)</sup>を適用することでPD検出を行うものである。なおダウンコンバータは受信したGHz帯(2~3[GHz])において選択的に狭帯域)電磁波信号を周波数帯域が1[kHz]~500[kHz]の信号に周波数変換するGHz帯専用受信機である。

開発した非接触PD検出システムの構成について図2.14に示し、表2.1にアンテナ(ダブル・リッジ・ガイド・ホーン・アンテナ)、表2.2にマイクロ波プリアンプ、表2.3にA/D変換装置、表2.4にコンピュータの各仕様を示す。なお、アンテナとマイクロ波プリアンプ間のケーブル(型名:5D-2W,長さ:10[m])の減衰量は7[dB](3[GHz])となっている。

本システムの動作として以下に述べる。PDからの放射電磁波を2本のダブル・リッジ・ガイド・ホーン・アンテナにより受信し、マイクロ波プリアンプを通した後に、ダウンコンバータに入力する。ダウンコンバータから出力した信号をA/D変換装置(サンプリング周波数:1[MHz])により2チャンネル同時にサンプリングし、コンピュータに取り込む。A/D変換装置のトリガ信号は印加電圧(A.C.60[Hz])の0クロス時に発生させる。そして、電磁波空間位相差法により、この2本のデジタルデータからPDによって放射されるマイクロ波帯電磁波を検出すると共に、両アンテナ間の到達時間差を求める。なお、検出システムのセットノイズレベルは-110[dBm]である。

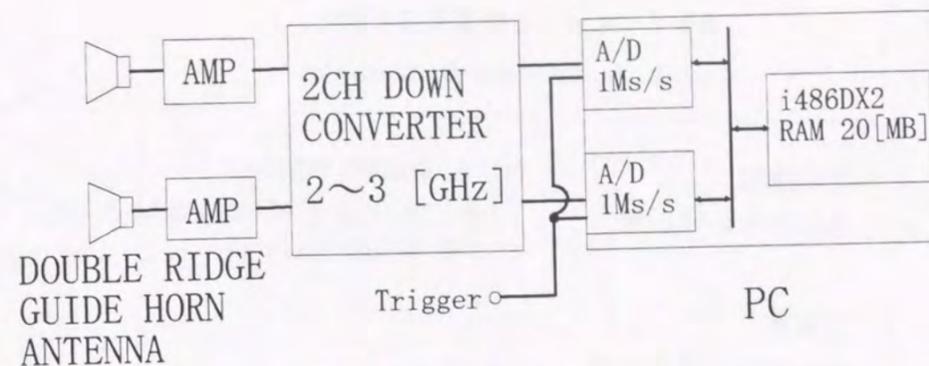


図2.14 検出システム

Fig. 2.14 PD detection system

表2.1 アンテナの仕様

Table2.1 The specification of double ridge guide horn antenna

使用機種	: 3115 (EMCO製)
周波数帯域	: 1~18[GHz]
平均電力利得	: 10.7[dB]
平均ビーム幅	: E-Plane 53[deg] H-Plane 48[deg]

表2.2 マイクロ波プリアンプの仕様

Table2.2 The specification of amplifire

使用機種	: 8449B (HP製)
周波数帯域	: 1[GHz]~26.5[GHz]
利得	: 26[dB]
利得フラットネス	: ± [dB]
雑音指数	: 7[dB] (1-12.7[GHz])
1dB利得圧縮レベル	: ≤+7[dBm]

表2.3 A/D変換装置の仕様

Table 2.3 The specification of A/D converter

使用機種	: DAS-50 (KEITHLEY製)
入力チャンネル数	: 4 (ボード2枚を各1チャンネルとして使用)
分解能	: 12bit
サンプリング周波数	: 1 [MHz]
メモリ	: 2MB
入力電圧レンジ	: $\pm 2.5$ [V], $\pm 5$ [V], $\pm 10$ [V] 0~5 [V], 0~10 [V]

表2.4 コンピュータの仕様

Table 2.4 The specification of computer

使用機種	: apricot XEN-LS II (三菱電機製)
CPU	: i486DX2 (66MHz)
主記憶容量	: 20MByte
外部記憶容量	: 500MByte
言語	: C言語

本研究では、PDから放射されるGHz帯電磁波（中心周波数2~3[GHz]において任意に選択）を検出する信号波として着目したため、専用の受信機が必要となる。製作したGHz帯相関型受信機（ダウンコンバータ）のダイアグラムを図2.15に、その仕様を表2.5に示す。ダウンコンバータは2入力2出力であり、内蔵の局部発振器の中心周波数を2~3[GHz]と100[MHz]ステップで任意に変えられる様に設計・製作した。

受信入力した2チャンネル信号は、帯域通過フィルタ（通過帯域：2~4[GHz]）と、高周波増幅器（40 [dB]）を通過させた後に周波数混合器（二重平衡混合機）により、局部発振器からの信号と混合することで中心周波数を式(2.11)の様に变化させる。

$$f_{out} = |f_{in} - f_{local}| \quad (2.11)$$

$f_{out}$  : ダウンコンバータ出力の中心周波数  
 $f_{in}$  : 入力信号の中心周波数  
 $f_{local}$  : ダウンコンバータの局部発振器周波数

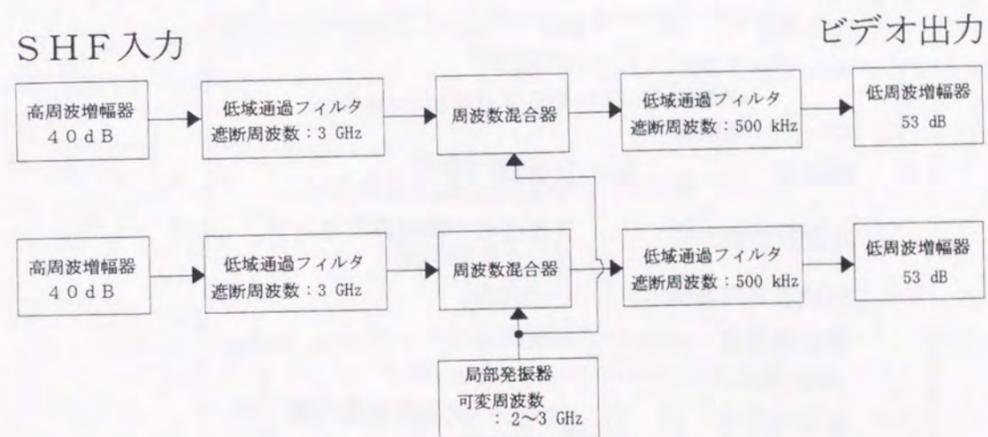


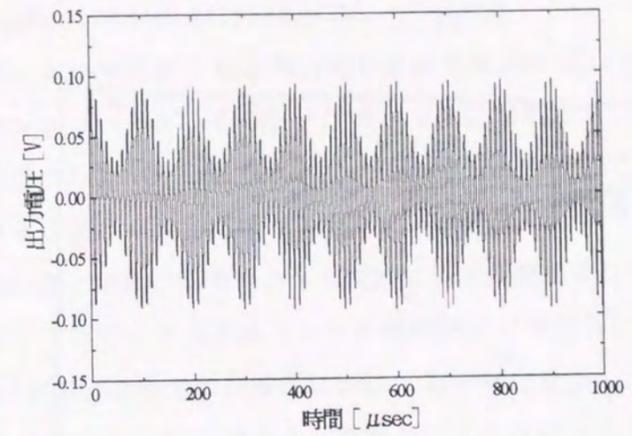
図2.15 GHz帯相関型受信機のブロックダイアグラム

Fig. 2.15 Block diagram of GHz 2ch down converter

表 2.5 GHz帯相関型受信機の仕様

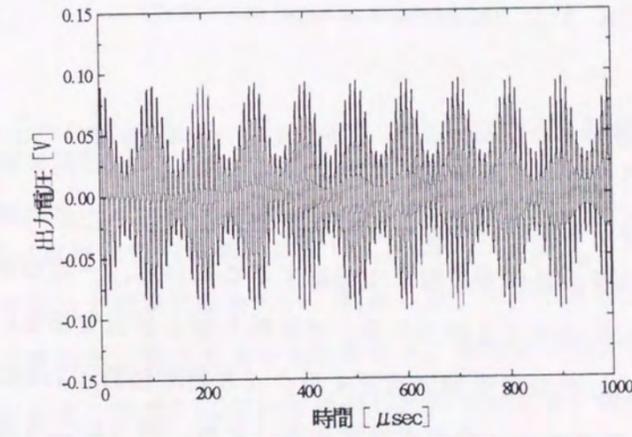
Table 2.5 The specification of GHz 2ch down converter

(1) SHF入力	
入力周波数	: 2~3[GHz]
入力信号レベル	: -95~-75[dBm]
入力LPF	: 9素子0.01[dB]リップルチェビシェフ特性
コネクタ	: N-R
インピーダンス	: 50[Ω]
(2) ローカル発振器	
発振器	: YIG同調発振器 (2-4[GHz]基本波発振)
周波数制御方式	: 基準信号の高調波にサンプリング位相同期
周波数可変範囲	: 2~3[GHz]
周波数設定	: 100[MHz]ステップ
SSB位相雑音レベル	: -80[dBc/Hz]以下
基準信号	: 100[MHz]水晶発振器内蔵
周波数安定度	: $\pm 5 \times 10^{-6}$ (周囲温度 0~50[C])
(3) ビデオ出力	
出力周波数	: 1[kHz]~500[kHz]
出力レベル	: -40~+10[dBm]
	: 60[dB]以上
(5) 動作温度	: 0~+40[C]
(6) 電源	: AC100[V] 50/60[Hz]
(7) 消費電力	: 約50[VA]



Input(-95[dBm]) 3.0001 [GHz] + 10 [kHz] (AM 50%)

(a) ch1出力端



Input(-95[dBm]) 3.0001 [GHz] + 10 [kHz] (AM 50%)

(b) ch2出力端

図 2.16 入出力周波数変換の動作例

Fig. 2.16 An example of converting frequency

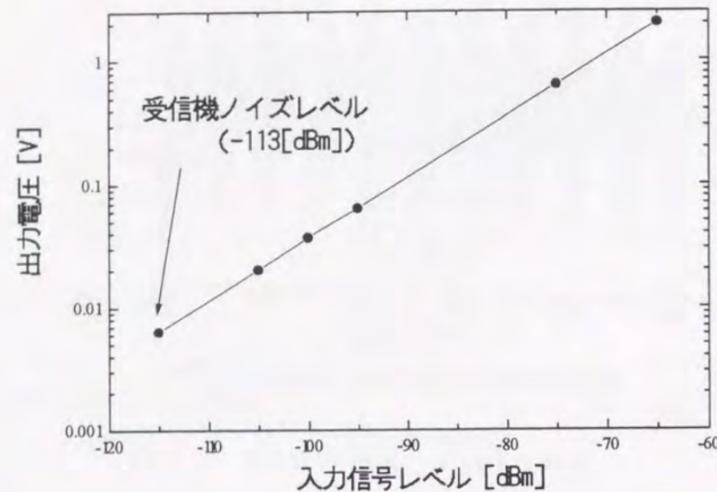


図2.17 入力信号レベルに対する出力電圧特性

Fig. 2.17 The amplitude of output versus input

すなわち、周波数スペクトラム分布を変化させることなく、中心周波数のみを変化させることを可能とすることを意味する。また、本方式は受信した広帯域の周波数信号をそれより低い一定の周波数信号に変えて増幅することから、一定の周波数成分だけを増幅すれば良く、特定の信号を検出する上で有効となる手法である。

そして、周波数変換した信号を低域通過フィルタ（遮断周波数：500[kHz]）と低周波増幅器（53 [dB]）を通過させた後に出させる。なお、出力端より得られる信号の周波数帯域は1[kHz]～500[kHz]であり、ダウンコンバータの総合利得は75[dB]（単一正弦波信号換算）である。

実際にこのダウンコンバータを用いた入出力周波数変換の一例について示すこととする。発振器（HP 8648C / HEWLETT PACKARD 製）により、任意の振幅変調波（発振周波数3.0001[GHz]、発振出力 -95[dBm]、信号波周波数10[kHz]、変調度50[%]）を発生出力させ、ダウンコンバータ（内蔵局部発振器の中心周波数を3[GHz]に設定）に2チャンネル同時に入力した際のダウンコンバータの出力波形を図2.16に示す。同図より、

入力信号は周波数変換されて出力されており、すなわち、

$$f_{in}(3.0001[\text{GHz}]) - f_{local}(3.0000[\text{GHz}]) = f_{out}(100[\text{kHz}])$$

となっており、また信号波の周波数(10[kHz])は入出力に際して変化しないことから、製作したダウンコンバータはその設計仕様を十分に満足している事が分かる。本機は希望波（入力信号）の周波数スペクトラム分布を変化させることなく、中心周波数のみを変化させることを可能としているといえる。さらに、両チャンネル間の出力波形に時間差が無いことから、両チャンネル同時に周波数変換を行っていることが分かる。

一方、ダウンコンバータの入出力レベル特性について図2.17に示す。なお入出力レベル特性は2～3[GHz]の各中心周波数において同一特性を示し、その雑音レベルは -113[dBm]（雑音指数：4[dB]）である。同図より、入力レベル（-113[dBm]～-65[dBm]）とその出力レベル（ピーク電圧値）は比例関係（対数表示）にあり、設計仕様である入力最小信号時（-95[dBm]）から入力最大信号時（-75[dBm]）の間において、本機は微小信号を受信する上で十分な入出力特性を実現していることが分かる。

## 2.5.2 固定子コイル部分モデルによる模擬実験

電磁環境が良好な室内実験室において、図2.18に示す火力発電機固定子コイルの部分モデルを用いて模擬実験を行い、開発したシステムが実際に固定子コイル内で発生したPDの検出が可能であるかを検証する。なお同図のアンテナ配置（空間的な制約から距離は任意に決定）において受信した背景雑音は、ほぼ熱雑音レベル（セットノイズレベル -110[dBm]）であったことから、両アンテナ間で受信した背景雑音は無相関である。また、固定子コイルのどの部分にポイドが存在しているかは分かっていない。

模擬実験で用いた試験回路を図2.19に示し、固定子コイルの仕様を表2.6に示す。実験方法としては、この固定子コイルのうちの一本に交流電圧10[kV]（対地）を印加することで、PDを発生させる。そのPDから放射されるGHz帯電磁波を本システムにより受信・処理しPD検出を行う。なお、固定子コイルの放電電荷量は試験回路

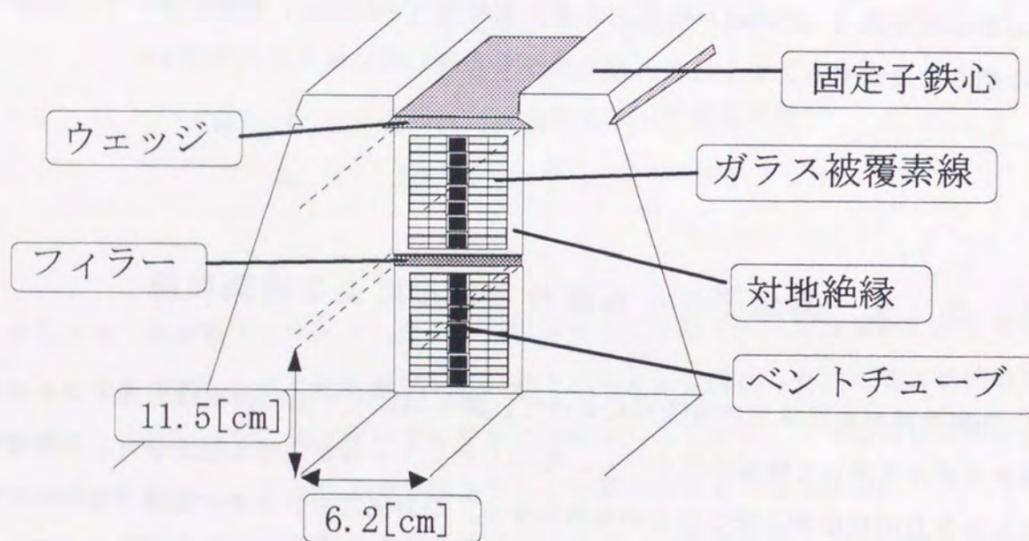
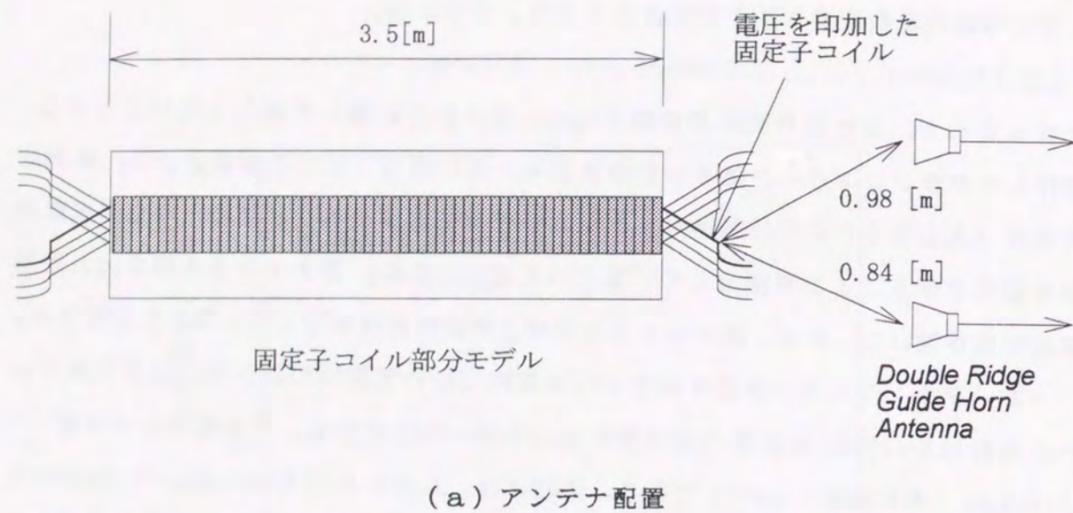


図2.18 固定子コイル部分モデルとアンテナ配置

Fig. 2.18 The partial model of the stator coil and the station of the two antennas

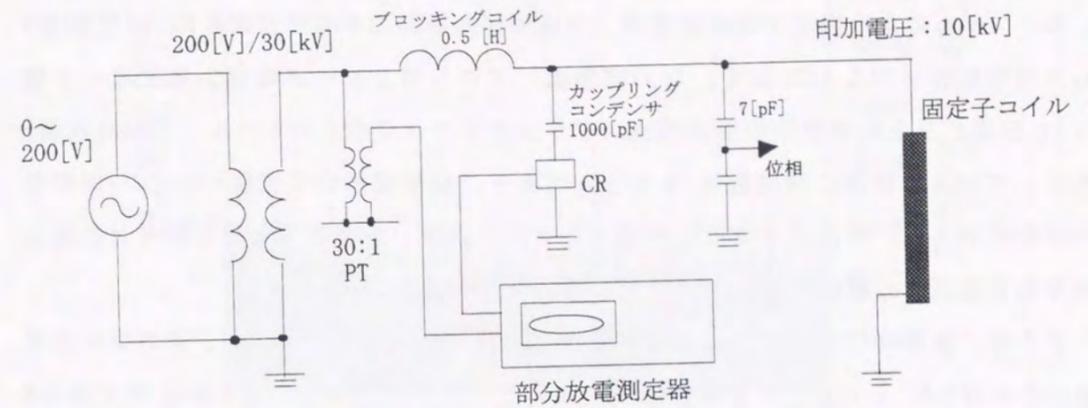


図2.19 試験回路

Fig. 2.19 An experimental circuit

表2.6 固定子コイル部分モデルの仕様

Table 2.6 The specifications of the partial model of the stator coil

容量	: 75 [MW]相当
定格電圧	: 13.8 [kV]
コア長	: 3.5 [m]
固定子コイル	: ポリエステル絶縁 (上下コイル各2本) 1964年運開、27年間運転

中 (図2.19) おける部分放電測定器を用いて測定した結果, 約3000[pC]であったことから, 本コイルは経年による平均的な劣化状態であると考えられる<sup>(4)(29)</sup>。

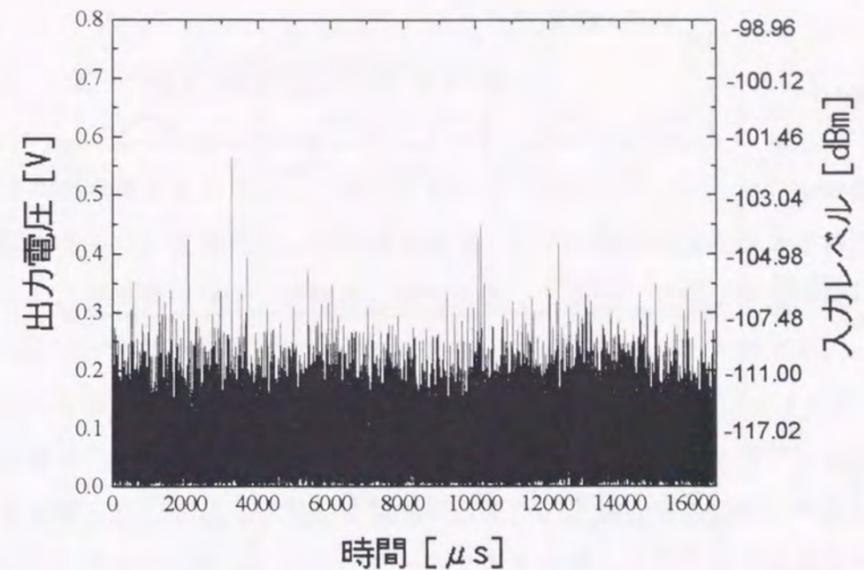
本システムにより受信・周波数変換 (内蔵局部発振器の中心周波数を3[GHz]に設定) した出力波形を図2.20に示す。なお同図は, ダウンコンバータの出力電圧ピーク値 ([V]表現) と放射電磁波の受信強度 (ダウンコンバータの入力レベル: [dBm]表現) を示している。同図の時間幅は16.67[ms]であり, 印加電圧の周波数60[Hz]の1周期分の時間幅である。同図より受信波形はパルス波であり, 背景雑音とPD信号との識別が単なる振幅値の閾値処理からでは困難であることが分かる。

そこで, 受信信号に対して電磁波空間位相差法を適用する。その際, PDは印加電圧の位相が0-90°と180-270°で発生頻度が高い<sup>(11)(16)</sup>ことから, 図2.21に示す様に0~4096[μs] (印加電圧の位相がほぼ0-90°付近) の受信波形を解析データとし, 周波数領域において積算平均化を適用するため, このデータを10周期分 (10組) 作成し, PDの検出を行うこととした。なお, PDが複数箇所存在している可能性も考えられるが, 本システムはそれらの放射電磁波の合成波を受信し解析を行っていることから, 各PDの発生箇所を個別に標定することはできず, 固定子コイルにPDが存在するかどうかを識別するものである。

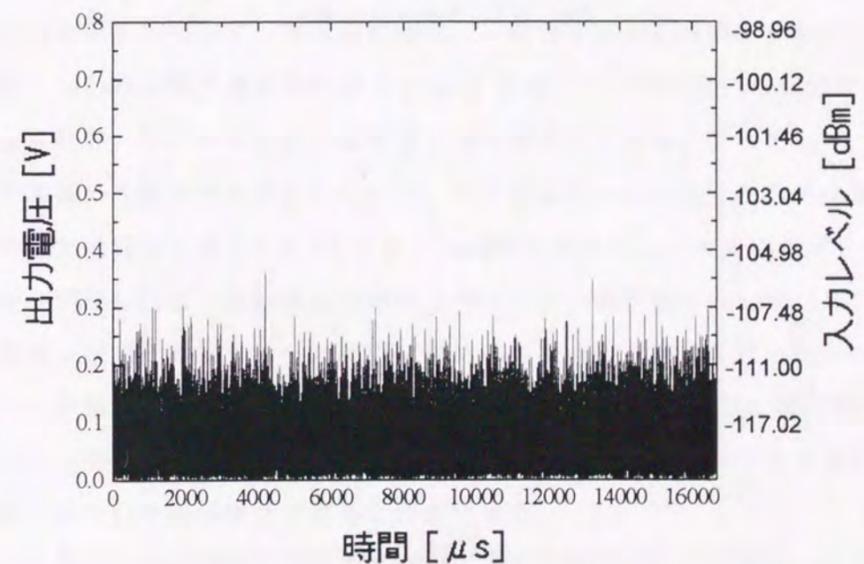
電磁波空間位相差法による解析結果として図2.22に示す。なお本結果では, 式(2.6)の相関関数  $R(\tau)$  を式(2.12)により変換し, 同式により出力強度は到達時間差  $D$  において最大値1を示すようにした。

$$Intensity(\tau) = \left\{ \frac{R(\tau)}{R(D)} \right\}^2 \quad (2.12)$$

式(2.12)の変換を行うことにより, 到達時間差  $D$  における値が他の到達時間における値より強調されることになる。同図より, 受信電磁波の両アンテナ間に対する到達時間差は0[μs]で最大値1を示しており, また他の時間差において相関性が認められない (出力強度のレベルが低い) ことから, 確実に到達時間差0[μs]で両アンテナ間に相関性がある信号波を受信していることが分かる。よって本実験の結果より, 開発したシステムはPDから放射されるマイクロ波帯電磁波の検出が可能であることが確認できた。



(a) アンテナ1



(b) アンテナ2

図2.20 放射電磁波の受信出力波形

Fig. 2.20 The received signals emitted from PD of the stator coil

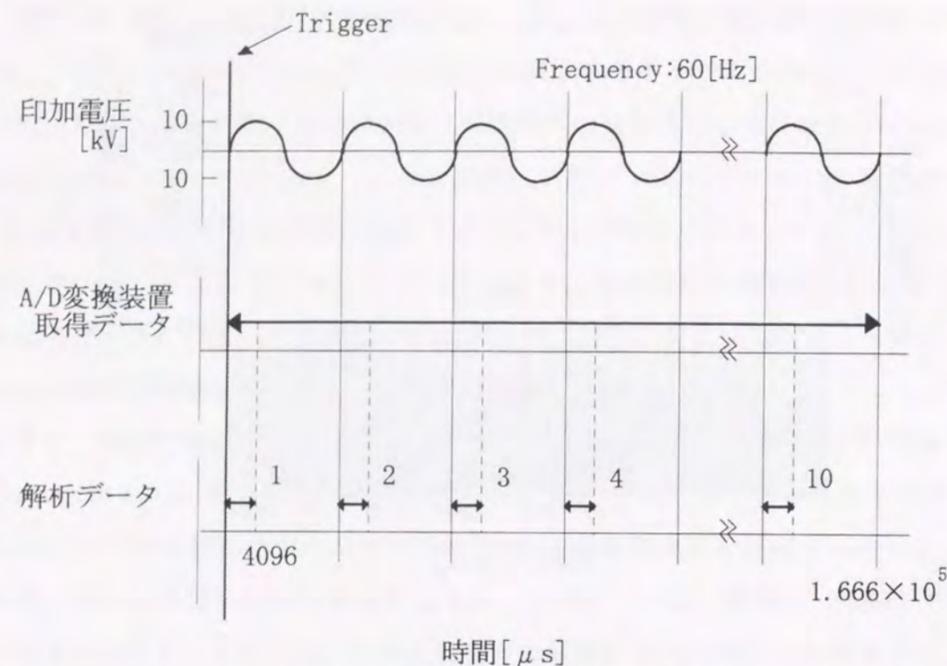


図2.21 積算平均化データの作成方法

Fig. 2.21 Averaging method

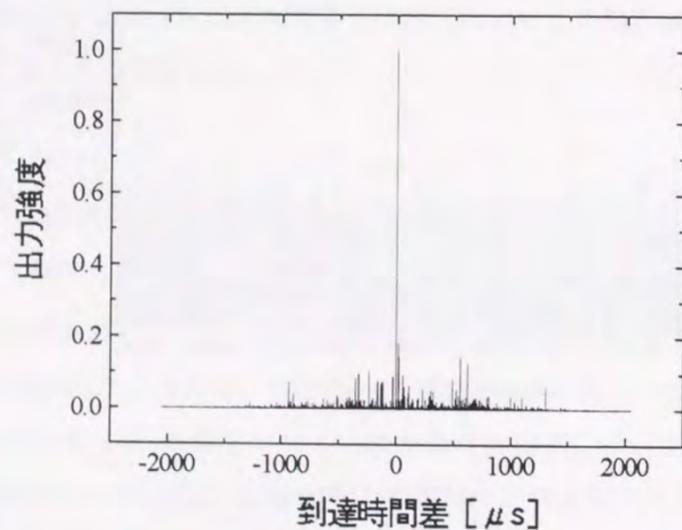


図2.22 部分放電信号の到達時間差

Fig. 2.22 The arrival time difference between two antennas

### 2.5.3 発電機の運転中PD検出

前節では発電機から取り出した固定子コイル（部分モデル）を用いた実験室内における絶縁計測について述べた。発電機の固定子コイル絶縁の劣化状態を早期に診断するためには、発電機の運転中診断が必要であることから、本節では実運用に供している火カタービン発電機のPD検出を行う方法とその結果について論ずる。

実験としては、まず、表2.7に示す火カタービン発電機（固定子コイルは内蔵のまま）の定期点検時における発電機分解中のPD検出を、前述のGHz帯電磁波空間位相差法により実施した。なお、同表の発電機は実際に関西電力株式会社の発電所にて実運用に供しているものである。次に、アンテナ部を内蔵した大阪発電所3号タービン発電機（表2.7(a)）の運転中におけるPD検出を行った。これらの結果より、開発したシステムが発電機の運転中PD検出に対して有効であることを示す。

定期点検時の発電機分解中におけるPD検出の際に、固定子コイルに電圧を印加した試験回路を図2.23に示す。同試験回路は、一般的に定期点検時に行われている部分放電試験、いわゆる最大放電電荷量（ $Q_{max}$ ）を測定する際に用いる回路である。同試験では各相U、V、W相の最大放電電荷量を独立して測定を行っており、その値から各相の巻線の劣化状態を評価している。同試験回路により測定した両発電機固定子コイルの最大放電電荷量を表2.8に示す。本試験の実施日は、大阪発電所3号タービン発電機が1997年5月9日、姫路第2発電所2号タービン発電機は1996年11月20日である。なお、GHz帯電磁波によるPD検出を通常の定期点検期間中に行ったため、時間の制約から各発電機において1相のみ、大阪発電所3号機ではW相、姫路第2発電所2号機ではU相の電磁波測定を行った。同表より両発電機は、最大放電電荷量の値という点では良好な絶縁状態であると判断できる。

図2.24にGHz帯電磁波を測定する際のアンテナ位置を示す。同図に示すように、発電機の励磁機側（タービン側は空間的な制約あり）にアンテナを配置し、PD検出を行うこととした。なお、両発電機の測定における各距離（ $d_1, d_2, d_3$ ）の相違は、各発電機の容量（絶縁距離等）に起因している。

受信したGHz帯電磁波として図2.25に示す。同図の電界強度は、アンテナ部にお

表2.7 火力タービン発電機の仕様

Table 2.7 The specification of the steam turbine generators

(a) 大阪発電所3号タービン発電機

定格容量	: 174 [MVA]
定格電圧	: 18 [kV]
力率	: 90 [%]
回転数	: 3600 [rpm]
絶縁システム	: エポキシ絶縁
冷却方式	: 水素冷却

(b) 姫路第2発電所2号機タービン発電機

定格容量	: 396 [MVA]
定格電圧	: 24 [kV]
力率	: 85 [%]
回転数	: 3600 [rpm]
絶縁システム	: エポキシ絶縁
冷却方式	: 水素冷却

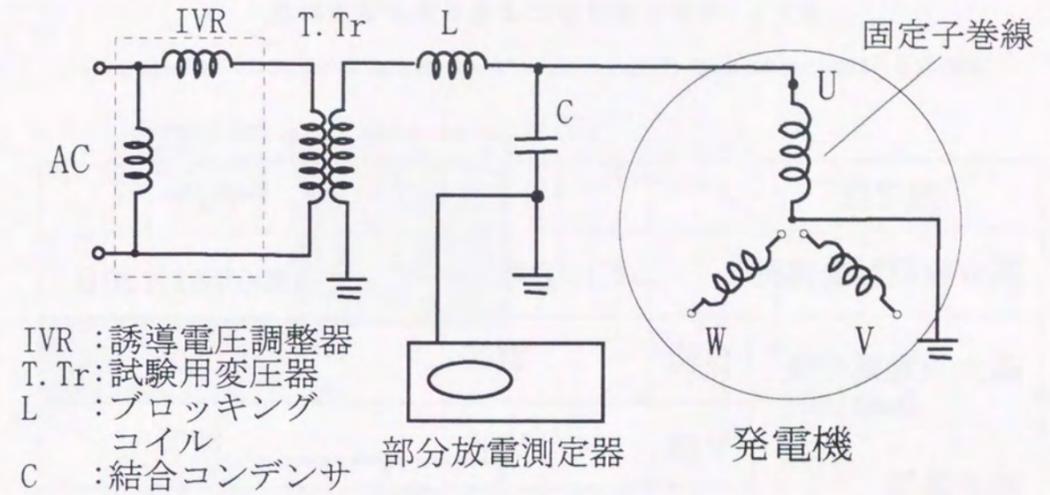


図2.23 部分放電試験回路

Fig. 2.23 The circuit of partial discharge test

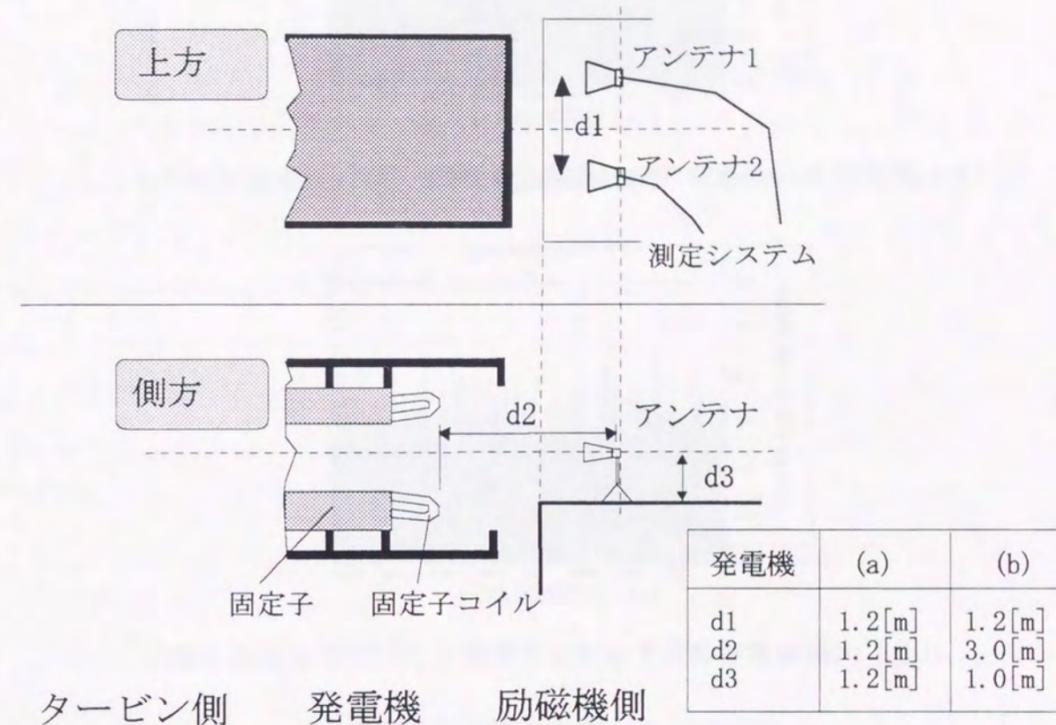
表2.8 部分放電試験による最大放電電荷量

Table 2.8 Maximum discharge (Qmax) of the turbine generators by the partial discharge test

発電機		(a)	(b)
部分放電試験実施日		1997年5月9日	1996年11月20日
最大放電電荷量 Qmax [pC]	U相	2100	5200
	V相	1900	3700
判定基準 11000 [pC] 以下	W相	1500	3700
	累積運転時間 [h] (起動回数 [回])	4,461 (183)	145,578 (810)

■ : GHz帯電磁波を測定

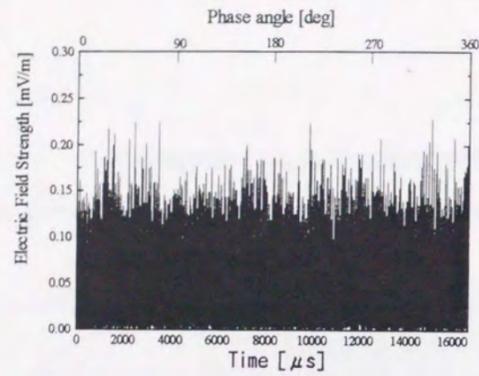
- (a) : 大阪発電所3号タービン発電機
- (b) : 姫路第2発電所2号タービン発電機



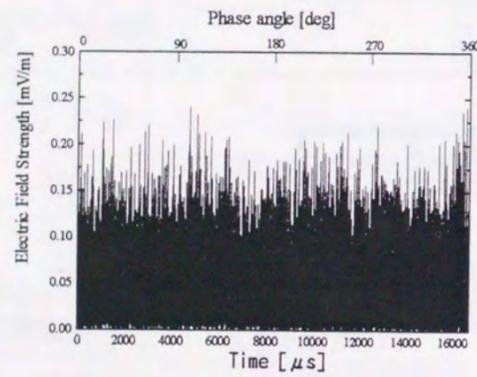
タービン側 発電機 励磁機側

図2.24 部分放電試験時の電磁波の測定方法

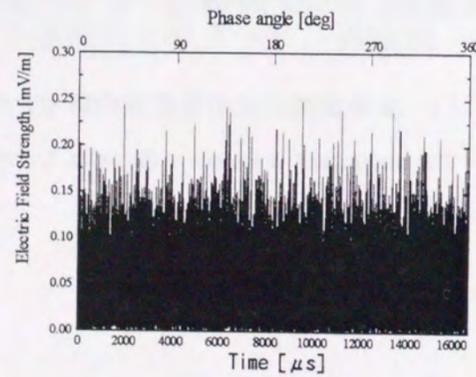
Fig. 2.24 The arrangement of antenna at the partial discharge test



(a) 背景雑音 (大阪発電所, 発電機側開放  $18/\sqrt{3} = 10.4$  [kV])



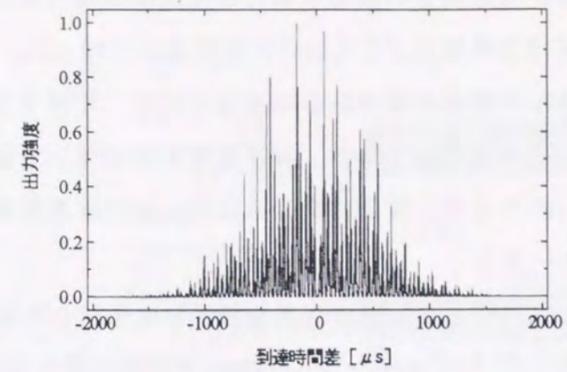
(b) 大阪発電所3号タービン発電機 ( $18/\sqrt{3} = 10.4$  [kV])



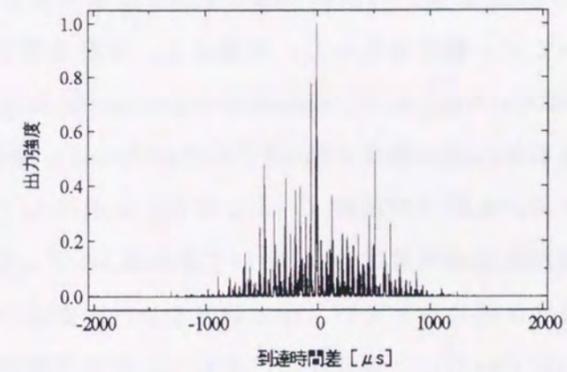
(c) 姫路第2発電所2号機タービン発電機 ( $24/\sqrt{3} = 13.9$  [kV])

図2.25 部分放電試験時の受信電磁波

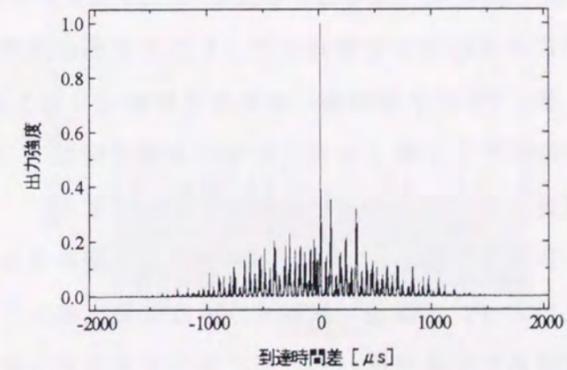
Fig. 2.25 The received E-M signals at the partial discharge test



(a) 背景雑音 (大阪発電所, 発電機側開放  $18/\sqrt{3} = 10.4$  [kV])



(b) 大阪発電所3号タービン発電機 ( $18/\sqrt{3} = 10.4$  [kV])



(c) 姫路第2発電所2号機タービン発電機 ( $24/\sqrt{3} = 13.9$  [kV])

図2.26 部分放電試験時の受信電磁波の到達時間差

Fig. 2.26 The time difference of arrival of E-M signals between two antennas at the partial discharge test

ける値を示している。背景雑音の測定は部分放電試験回路（図2.23）の発電機側を解放した状態で、電圧（定格電圧/ $\sqrt{3}$  [kV]）を印加して行った。すなわち、電圧印加時の変圧器等を含めた系全体の背景雑音の状態を知ることができる。また、両発電所で用いた試験回路は同一のものであり、背景雑音もほぼ同じであったことから、大阪発電所のみを示す。同図より、背景雑音とPDによる放射電磁波の振幅値からのPD検出は困難であるといえる。

これらの波形データに対して電磁波空間位相差法を適用した結果を図2.26に示す。PDは印加電圧の位相が  $0-90[\text{deg}]$  と  $180-270[\text{deg}]$  で発生頻度が高いと報告されていることから、本手法を適用するに当たり前節と同様に、ほぼ  $0-90[\text{deg}]$  にあたる  $0-4096 [\mu\text{s}]$  の波形を解析データとし、周波数領域の積算平均化を行うため、このデータの50サイクル分を用いてPD検出を行った。同図より、背景雑音では特定の到達時間差の出力強度が強調されるのではなく、全体的に広がりをもつことが分かる。なお、到達時間差が大きくなると、出力強度が0に近づいているのは、電磁波空間位相差法におけるフーリエ変換を用いる際の窓関数（ハニング窓）に起因している。一方、両発電機の場合、出力強度が到達時間差  $0 [\mu\text{s}]$  において最大値1を示しており、また、他の時間差において相関性が認められない（出力強度のレベルが低い）ことからPDによる放射電磁波を検出していることが分かる。そして、大阪発電所3号機（同図(b)）と姫路第2発電所2号機（同図(c)）を比較すると、姫路第2発電所2号機の結果は、到達時間差  $0 [\mu\text{s}]$  の出力強度レベルが他の時間差の出力強度レベルより、明らかに大きいことから、PDによるGHz帯電磁波がより強く放射されていたことを示すと考えられる。これは、表2.8に示す姫路第2発電所2号機（U相）の最大放電電荷量（ $5200[\text{pC}]$ ）が大阪発電所3号機（W相）の最大放電電荷量（ $1500[\text{pC}]$ ）より大きい値であったことを考慮すると矛盾がない結果であるといえる。

発電機運転中のGHz帯電磁波を検出する場合、発電機のフレームは金属（圧延鋼板）により製作されており、電磁波が遮蔽され外部に漏れ難いことから、発電機内部にアンテナを取り付けることを考案した。そこで、2本のアンテナを図2.27に示すように大阪発電所3号タービン発電機に内蔵しPD検出を行うこととした。なお、発電機内の空間的な制約から、2本のアンテナをタービン側（上下2カ所）のみに取り付けており、ダウンコンバータ、A/D変換器、コンピュータ等は発電機外部に設置して計測を行った。マイクロ波プリアンプは実験準備の都合により使用していない。

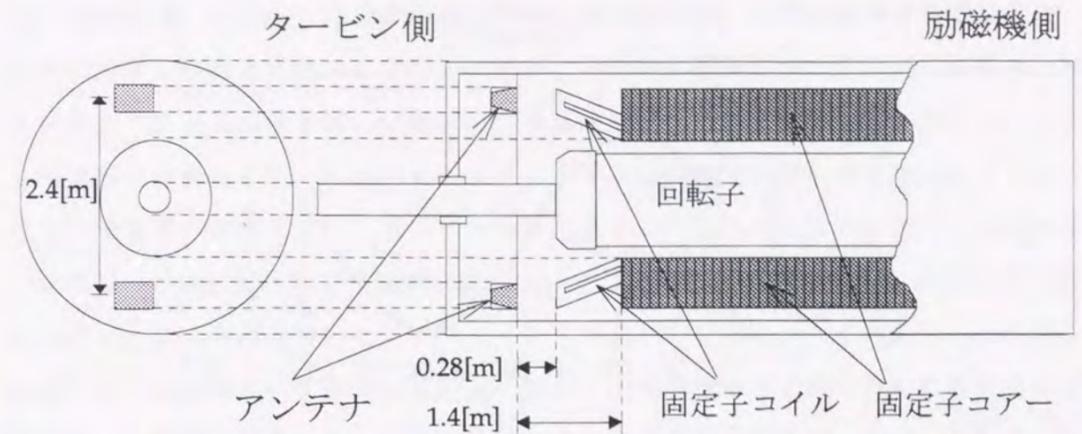


図2.27 大阪発電所3号タービン発電機の内蔵アンテナ取り付け位置

Fig. 2.27 The arrangement of built-in antennas of the steam turbine generator of unit three at Osaka power station

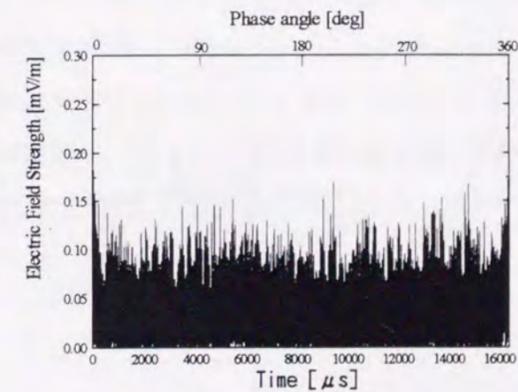


図2.28 発電機の120[MW]運転中における受信電磁波

Fig. 2.28 The received E-M signal at 120 [MW] operation of the turbine generator

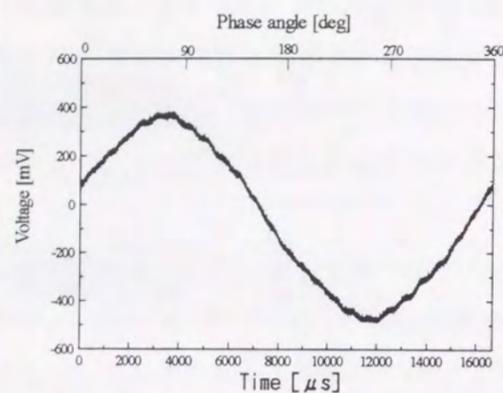


図2.29 取得したデジタルデータ

Fig. 2.29 The obtained digital data

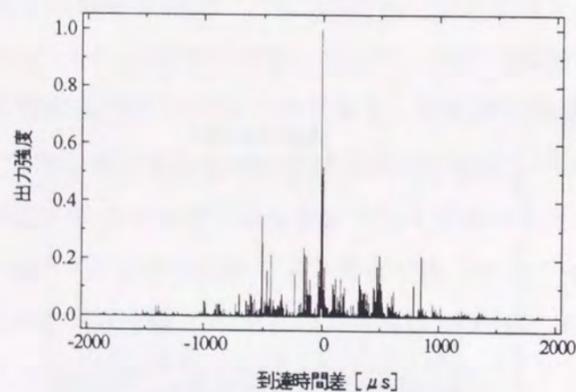


図2.30 発電機の運転中における電磁波の到達時間差

( 運転出力 : 120 [MW] )

Fig. 2.30 The time difference of arrival of E-M signals between two antennas

at the 120 [MW] operation of the turbine generator

図2.28に大阪発電所3号機の120[MW]運転時(1995年7月24日, 累積運転時間: 182[h], 起動回数: 8[回])における受信電磁波波形を示す。この発電機は実際に電力を発電所外に供給していた。なお, デジタル・データ取得においてA/D変換器をスタートさせるトリガ信号は, U相の出力電圧のゼロクロスを検出し発生させた。

発電機の運転時には, PD検出システム全体が発電機(運転周波数: 60[Hz])から生じる電磁界の影響を受け, コンピュータにより取り込まれた信号は図2.29に示す様に低周波(60[Hz]前後)で基線が変動していたことから, 受信電磁波の波形は低周波成分をフーリエ変換を用いたデジタル・フィルタリング処理(ハイパスフィルタによる遮断)により除去して表示している。なお, 発電機運転中の出力電圧に含まれる高調波による影響も考慮して, ハイパスフィルタの遮断周波数を2.44[kHz]と高めに設定した。

この発電機の運転周波数による電磁界の影響を考慮し, 電磁波空間位相差法にデジタル・ハイパスフィルタ(遮断周波数: 2.44[kHz])を組み込み, 本手法を運転中発電機に対して適用した結果を図2.30に示す。なお上述した様に, 電磁波空間位相差法の適用の際に, 取得データの両端での不連続点による影響を極力少なくするために窓関数としてハニング窓を用いた。同図より, 到達時間差0[μs]の出力強度レベルが, 他の時間差の出力強度レベルより大きいことから, 明らかに両アンテナ間において相関性のある信号を検出していることが分かる。なお, 同発電機の定期分解点検(1997年5月9日)は, この運転中計測(1995年7月24日)の後に行っており, その際の固定子コイルの最大放電電荷量が表2.8に示すように数1000[pC]であることを考慮すると, 本システムは発電機の運転中において, 放電電荷量が数1000[pC]のPD検出を可能にしたといえる。

## 2.6 結 言

本章では、絶縁劣化の予兆現象であるPD（部分放電）から放射される電磁波に着目し、その電磁波を検出する電磁波空間位相差法の提案と、検出システムの開発を行った。電磁波空間位相差法は放射電磁波を複数のアンテナで受信することにより、各アンテナ間の到達時間差を求める方法である。本手法をGIS（ガス絶縁開閉装置）と、発電機の固定子コイル絶縁に適用した。なお、GISではVHF帯（MHz）電磁波、発電機ではSHF帯（GHz）電磁波を受信・解析した。得られた結果は次のとおりである。

(1) SF<sub>6</sub>ガスで絶縁されたGIS内において発生させたPDより放射されるVHF帯広帯域電磁波（20[MHz]～200[MHz]）を複数（4本）の検出用アンテナで受信し、電磁波空間位相差法によりPDの検出を行った。放射電磁波の到達時間差が、電磁波空間位相差法より求まることから、部分放電発生スパンの位置標定を非接触で行うことが可能となった。

また、検出電荷量はアンテナとの距離に依存するが、アンテナをよりGISの近傍（数[m]程度）に配置して測定を行うことにより、数100[pC]の部分放電を検出できることが可能となった。

(2) 発電機固定子コイルにおいて発生したPDを非接触計測可能とするシステムを開発した。本システムは、PDによって放射されるマイクロ波帯電磁波を2本のアンテナで受信し、マイクロ波プリアンプを通した後に、独自に設計・製作したGHz帯相関型受信機（ダウンコンバータ）で周波数変換し、電磁波空間位相差法を適用することで、PDの検出を行うものである。

固定子コイル部分モデルに対して本システムを適用した結果、本システムは固定子コイル部分モデルのPD（数1000[pC]）から放射されたマイクロ波帯電磁波を検出した。すなわち、本システムは固定子コイルと非接触で、放電電荷量が数1000[pC]程度のPD検出を可能とすることを示した。

また、実運用に供している火カタービン発電機の定期分解点検時において、本シス

テムを用いたPD検出を実施した結果、本システムは実機においても、放電電荷量が数1000[pC]のPDを検出可能であることを示した。そして、発電機運転中のPD検出を行うために、発電機内に2本のアンテナを取り付けて計測を行った結果、本システムは発電機運転中においても、放電電荷量が数1000[pC]程度のPDを検出可能とすることを示した。

## 第2章 文献

- (1) 真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化技術調査専門委員会：“真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化”，電気学会技術報告 第479号，1993年12月
- (2) 犬島浩，榎井健，前川洋：“自己回帰モデルを用いたガス絶縁開閉装置（GIS）部分放電検出法の開発”，電学論，Vol.113-B, No.11, 1993
- (3) 木村喬，春浪隆夫，金万直広，斉藤宗敬：“外部アンテナを用いたGISの絶縁診断方法”電学論B，115巻10号，pp.1199-1207，1995年10月
- (4) 電気学会編：電気設備の診断技術，オーム社，1988年
- (5) 運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会：“電力設備の運転中絶縁診断技術”，電気学会技術報告 第402号，1992年1月
- (6) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会：“電力設備の絶縁余寿命推定法”，電気学会技術報告 第502号，1994年7月
- (7) 特別高圧回転機・ケーブル絶縁の劣化診断技術調査専門委員会：“特別高圧回転機・ケーブルの絶縁劣化診断技術”，電気学会学術報告 第267号，1988年3月
- (8) 木村健：“高電圧回転機のオンライン絶縁診断技術の動向”，電学論B，110巻12号，pp.991-994，平成2年
- (9) 日立評論：“電力設備の予防保全技術” Vol.75 1993年12月
- (10) 松浦虔士，岡部成光，金子英男，“電力機器の絶縁余寿命推定法の現状”，電学論A，114巻12号，pp.845-852，平成6年
- (11) G. C. Stone, H. G. Sedding, N. Fujimoto, and J. M. Braun: "Practical Implementation Ultrawideband Partial Discharge Detectors", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, pp. 70-81, February 1992
- (12) Andreas Kelen: "Trends in PD Diagnostics", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 529-534, August 1995
- (13) Sher Zaman Khan, Zhu Deheng, Jin Xianhe, Tan Kexiong: "A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 700-707, August 1995
- (14) H. G. Sedding, S. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 700-706, December 1991.
- (15) S. R. Campbell, G. C. Stone, H. G. Sedding, W. McDermid, R. Busse, "Practical On-line PD Tests for Turbine Generators and Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 281-287, June 1994.
- (16) G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding, W. McDermid: "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 567-577, August, 1995
- (17) E Gulski, F H Kreuger: "Computer-aided Analysis of Discharge Patterns", J. Phys. D, Appl. Phys. 23, 1990, pp1569 -1575
- (18) E Gulski, F H Kreuger: "Computer-aided Recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, pp82-92, February 1992
- (19) Z-I. Kawasaki, Kenji Matsu-ura: "On Spatial Phase Difference Method for Detecting E-M Signals Associated With Partial Discharges in Power Apparatus", ISH, August, 1993
- (20) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法”，電学論B，115巻10号，pp.1168-1173，1995年10月
- (21) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏男，音羽克則，黒木悟，森山隆：“GHz帯電磁波空間位相差法を用いた発電機固定子コイルの非接触部分放電検出システムの開発”，電学論B，117巻2号，pp.224-232，1997年2月
- (22) 日野幹雄：“スペクトル解析”，pp.52-66, pp.236-287，朝倉書店 1991年
- (23) C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-24, pp. 320-327, August, 1976
- (24) Kent Scarbrough, Nasir Ahmed, G. Clifford Carter, "On the Simulation of a Class of Time Delay Estimation Algorithms", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-29, pp. 534-540, June, 1981
- (25) Allan G. Piersol, "Time Delay Estimation Using Phase Data", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-29, pp. 471-477, June, 1981
- (26) William A. Gardner, Chin-Kang Chen, "Interference Tolerant Time-Difference-of-Arrival Estimation for Modulated Signals", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 36, pp. 1385-1395, Sept. 1988

- (27) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士: "GHz帯電磁波による非接触部分放電検出法の検証" 平成7年電気学会電力エネルギー部門大会, No. 520
- (28) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, Akira Nishimura, Hideki Tokura, Iwao Okada: "Verification of the Detection of Partial Discharges by Microwave", 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp. 311-314
- (29) G. C. Stone, H. G. Sedding, B. A. Loyd, B. K. Gupta: "The Ability of Diagnostic Tests to Estimate the Remaining Life of Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, pp. 833-841, December 1988

## 第3章

### ウェーブレット変換を用いた 部分放電解析法

#### 3.1 緒言

絶縁劣化の予兆であるPD（部分放電）の現象解明は、絶縁劣化診断<sup>(1)~(9)</sup>を行う上で重要であることから様々な研究者により進められており、PD開始から絶縁破壊に至るまでのPD特性の測定・解析、および絶縁破壊への定量的検討を行った報告が行われている<sup>(10)~(16)</sup>。特に、絶縁破壊の直前にはPDの電荷量が増加すると報告されており<sup>(10)</sup>、PDを常時監視することが劣化診断・破壊予知につながると考えられている。

そこで本章では、PDを常時監視するシステムを構築すると共に、PD現象の時間変化を検討する。その際、機器と非接触でPD検出を行うことが診断システムとして理想的であることから、PDによって発生する放射電磁波をアンテナにより受信する手法を採用する。前章ではPDを電磁波空間位相差法により検出し、さらにその放射源の位置標定を可能としたことを述べた。この電磁波空間位相差法を用いたPD検出システムでは、PDから放射される電磁波を複数のアンテナにより検出していたこと

から、同一システムを用いることが絶縁劣化診断において経済的であると考えられる。よって、本章においても、アンテナより得られる受信波形を基にPD現象の解析を行う。

PD現象の解析方法としては、PDによる放射電磁波の周波数時間変化（ダイナミックスpektrum）をウェーブレット変換を用いることで検討することとする。なおウェーブレット変換は時間周波数解析、すなわち、現象を時間と周波数の両面から捉えることが可能であることから、現象の生起時間や生起頻度（持続時間）を検討する場合には有効であり、近年様々な分野で応用がなされている<sup>(17)~(25)</sup>。本章では77kV GISを用いた模擬故障実験（屋外）の結果をもとに、PDによる放射電磁波のダイナミックスpektrumと、その放電電荷量との関係を示し、本システムの絶縁劣化診断に対する有効性を示す。

### 3. 2 ウェーブレット変換

信号の周波数成分を表現する方法としてフーリエ変換が上げられるが、フーリエ変換の基底に用いられる指数関数  $e^{-j\omega x}$  は時間領域で無限の広がりを持つことから、フーリエ変換では信号の時間情報が失われることになる。この欠点を補うため、近年、時間-周波数表現を可能とするウェーブレット変換の研究が盛んに行われている<sup>(17)~(25)</sup>。

関数  $f(x)$  のマザーウェーブレット  $\psi(x)$  によるウェーブレット変換は次の様に定義される。<sup>(17)~(23)</sup>

$$(W_{\psi, f})(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (3.1)$$

a ; スケール・パラメータ

b ; トランスレート・パラメータ

なお式 (3.1) を満たす一般的な条件として、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (3.2)$$

が用いられる<sup>(17)~(23)</sup>。式 (3.2) は、 $\psi(x)$  が振動的であることを意味する。

ウェーブレット変換を行う際、マザーウェーブレット  $\psi(x)$  の決定が重要となるが、実際の応用では時間周波数解析に都合の良い関数が任意に選ばれている。そこで本論文では、時間と周波数に関する不確定性が最小の関数（時間周波数空間において最も局在性が良い関数）であることから、信号の周波数を探り出すのに適している<sup>(18)~(21)</sup>とされている Gabor のマザー・ウェーブレットを用いる。Gabor のマザーウェーブレットは式 (3.3) で示される<sup>(17)~(21)</sup>。

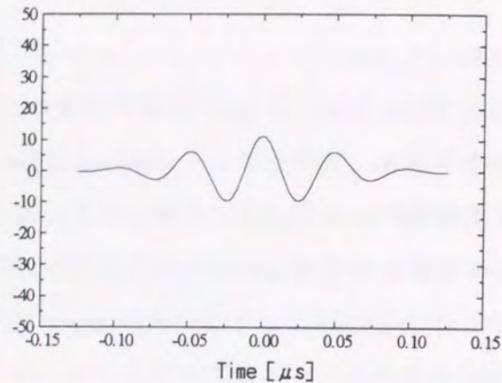
$$\psi(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} e^{-ix} \quad (3.3)$$

なお本論文では、マザーウェーブレットとして Gabor のマザーウェーブレットの実数部を用いることとする。すなわち、

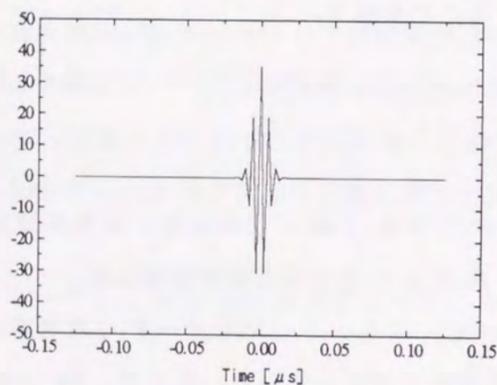
$$\psi(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cos(x) \quad (3.4)$$

とし、一般的に用いられている  $\sigma=8$ <sup>(17)</sup> とした。なお本論文では、信号の時間変化を検討することから、式 (3.3) における係数を省略した。

また、式 (3.1) において、スケール・パラメータ  $a$  に対応して  $\psi(x)$  の幅が  $a$  倍になることから、 $1/a$  は周波数に対応している。そこで、 $1/a = 2\pi f$  ( $f$ : 周波数) とし、この周波数  $f$  を可変することとする。本論文で用いるマザーウェーブレットを図3.1に示す。同図 (a) は周波数 20 [MHz] であり、同図 (b) は周波数 200 [MHz] のマザーウェーブレットを示している。なお用いた受信アンテナの周波数帯域が 20~200 [MHz] であることから、20~200 [MHz] の周波数帯域において PD の放射電磁波の解析を行う。



(a) 周波数：20[MHz]



(b) 周波数：200[MHz]

図3.1 Gabor マザーウェーブレット (実数部)

Fig. 3.1 Gabor mother wavelet (Real part)

### 3.3 SF6ガス中の部分放電の時間周波数解析

#### 3.3.1 実験方法

実験方法として、図3.2に77kV GISタンクと試験回路を示す。同図に示す様に、GISタンク内の3導体中の2導体間に針-平板電極（ギャップ長：10[mm]）を接続し、これを模擬絶縁故障点、すなわち部分放電源とする。そして、この針状電極に交流電圧（対地）を印加し、放電させる。本実験では、PDの電荷量を印加電圧を可変することで変化させる。GISタンク内のガスはSF<sub>6</sub>であり、ゲージガス圧力を0[kg/cm<sup>2</sup>]（大気圧）に設定した。

PDの電荷量の測定は、カップリングコンデンサ（ニチコン社製：容量2000[pF]）に流れる電流の波高値を、予めパルス発生器により校正パルスを注入することで求めておいた値と比較することにより算出する。その際、電流の波高値はデジタル・ストレージ・オシロスコープ（DSO：テクトロニクス社製2440型）により抵抗（50[Ω]）を介して（電圧波形として）測定する。

なお、ギャップ長、ガス圧等のパラメータが考えられるが、それらのパラメータを可変した場合の絶縁破壊電圧、放電電流等の特性について別の研究者によって検討報告<sup>(10)~(14)</sup>が行われていることから、本章では上記の条件でのみ実験、解析を行う。

PDから生じる放射電磁波は広帯域であり、この広帯域の電磁波を検出する上で有効であるバイコニカルアンテナ（EMCO社製3014C型、周波数帯域20~200[MHz]）により図3.3に示す配置により放射電磁波を受信し、DSO（Gould社製4072型）を用いてデジタルデータとして記録する。測定で用いた両DSOのサンプリング周波数は400[MHz]であり、解析時間窓は2.56[μs]である。このデータをもとに時間周波数解析を行う。

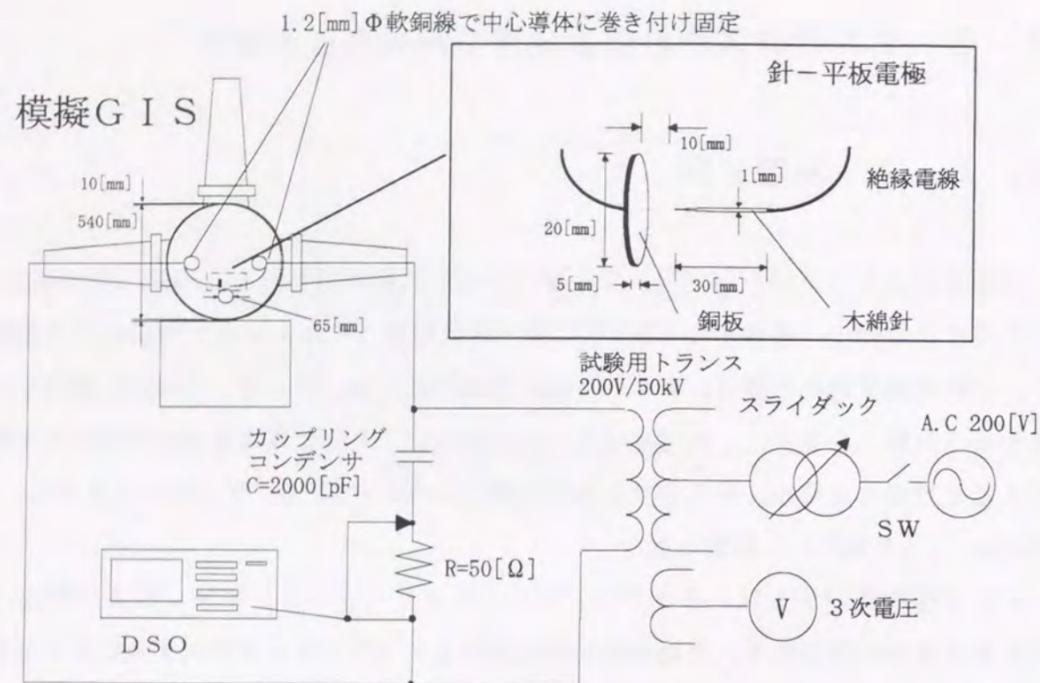


図3.2 77kV GISタンクと試験回路

Fig. 3.2 77kV GIS and the experimental circuit

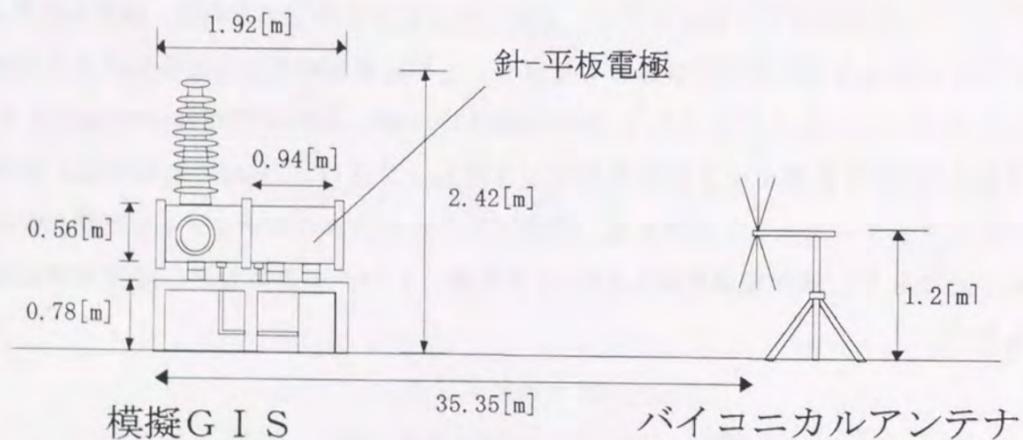


図3.3 PD放射電磁波の測定方法

Fig. 3.3 The measurement system of the electromagnetic waves emitted from PD

### 3.3.2 部分放電の時間周波数解析結果

上記の実験方法により得られた受信波形を図3.4に示す。なお同図(a)は、背景雑音のみの受信波形であり、同図(b)は、放電電荷量500[pC]、同図(c)は1500[pC]、同図(d)は、2000[pC]の受信波形を示している。同図より、その振幅値による放電電荷量の推定は、振幅値が天候等(降雨、風雪等により放射電磁波が減衰する)に影響されることや、放電源が多数存在する場合などを含め、劣化診断の信頼性という点からは、現実的には容易ではない。

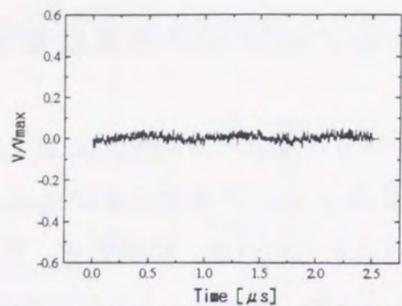
そこで、各放電電荷量の受信波形に対してウェーブレット変換を行ったものを図3.5に示す。なお同図では、ウェーブレット変換した値を絶対値表示している。同図は、PDの放射電磁波のダイナミックスペクトラム(各周波数成分がどのように時間変化しているか)を示しており、すなわち、PDの各周波数成分の生起時刻と持続時間がわかる。同図(a)は背景雑音、同図(b)は500[pC]、同図(c)は1500[pC]、同図(d)は2000[pC]の時間-周波数空間分布である。

同図より、PDの電荷量が小さいとき、すなわち、500[pC]の場合は、高周波成分(140-200[MHz])が放射電磁波の主成分として検出されていることが分かる。一方、PDの電荷量が1500、2000[pC]と増加すると、低周波成分(20-80 [MHz])が増加することが分かる。よって、絶縁劣化診断という観点から述べると、PDによる放射電磁波の低周波成分の検出が重要な要因となる。

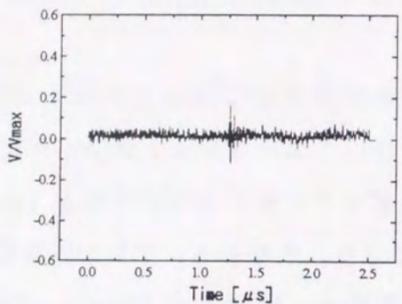
1500[pC]と2000[pC]の放電現象の相違について、その放射電磁波の低周波成分の持続時間から検討する。図3.6に低周波成分として40[MHz]の時間変化を示す。なお同図(a)は1500[pC]、同図(b)は2000[pC]の周波数40[MHz]を示している。

同図(a, b)より、明らかに2000[pC]の持続時間が長いことが分かる。すなわち、放電電荷量が多い場合、その低周波成分の持続時間が長く、絶縁劣化が進展した状態であると仮定することができる。このことは放電電流の持続時間が印加電圧の増加に伴って増加する報告と一致すると考えられる<sup>(13)(14)</sup>。

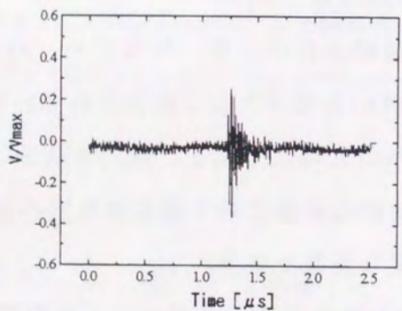
また、上記の場合は各放電電荷量において1回分の放電による時間-周波数特性であることから、再現性について検討する必要がある。そこで、図3.7に各電荷量における放電実験を10回行った際(各放電電荷量:500, 2000[pC]に対し、10回分のデー



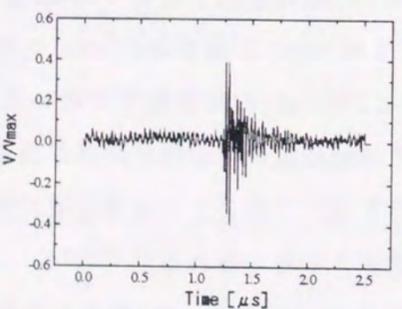
(a) 背景雑音 (印加電圧: 0 [kV])



(b) 500 [pC] (印加電圧: 2.5 [kV])



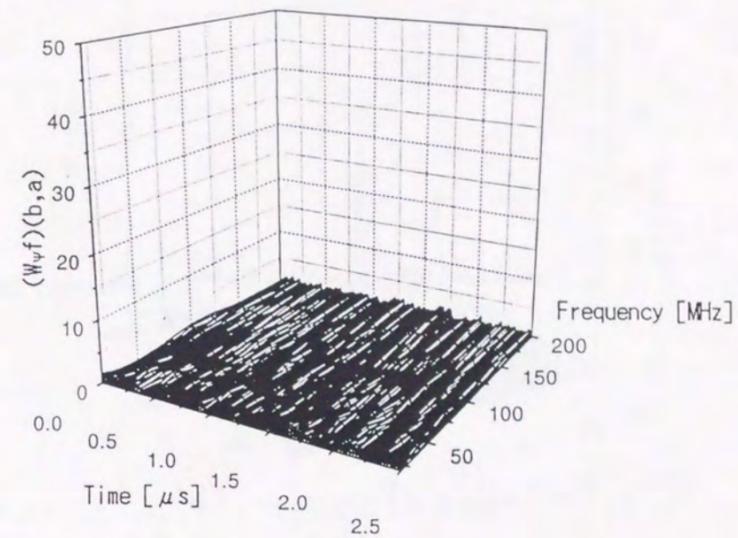
(c) 1500 [pC] (印加電圧: 6.7 [kV])



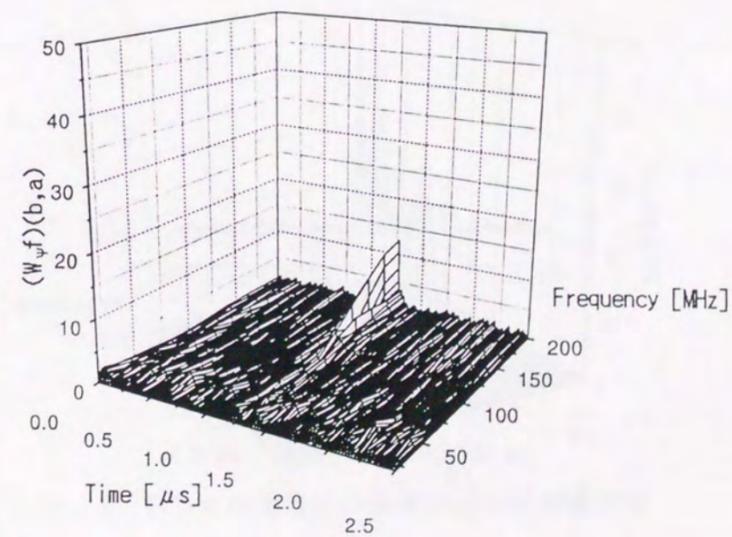
(d) 2000 [pC] (印加電圧: 8.0 [kV])

図3.4 放射電磁波の受信波形

Fig. 3.4 The electromagnetic waves received with antenna



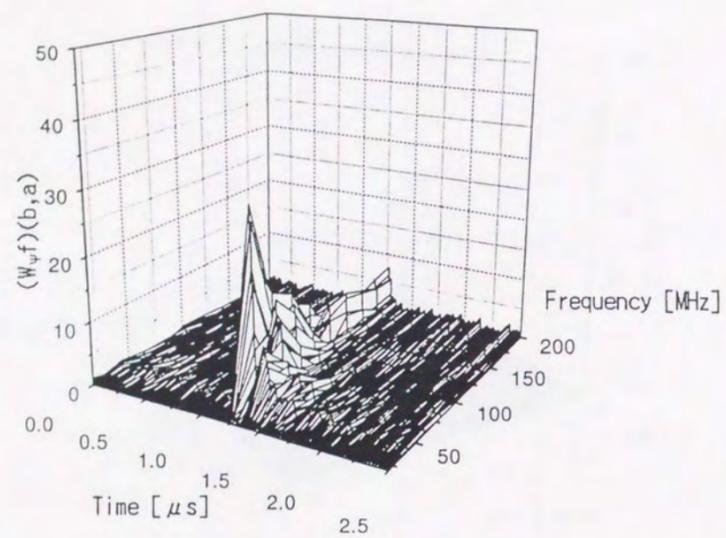
(a) 背景雑音



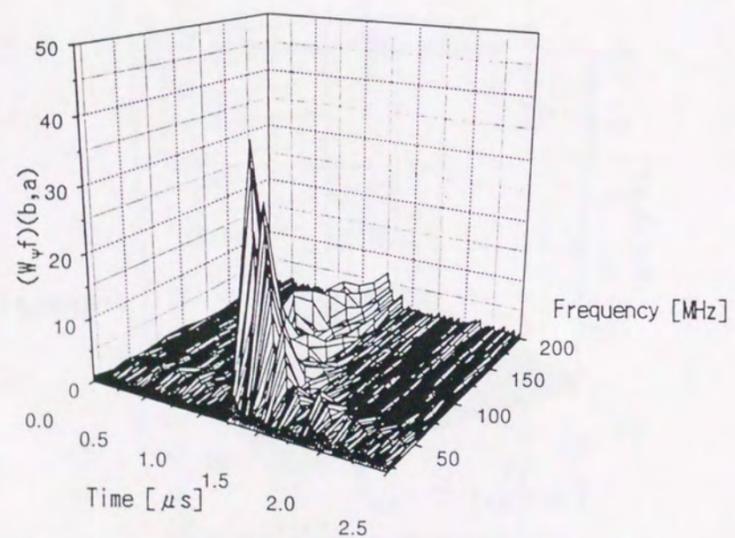
(b) 500 [pC]

図3.5 PD放射電磁波のダイナミックスペクトラム

Fig. 3.5 Dynamic spectrum of the electromagnetic wave emitted from PD



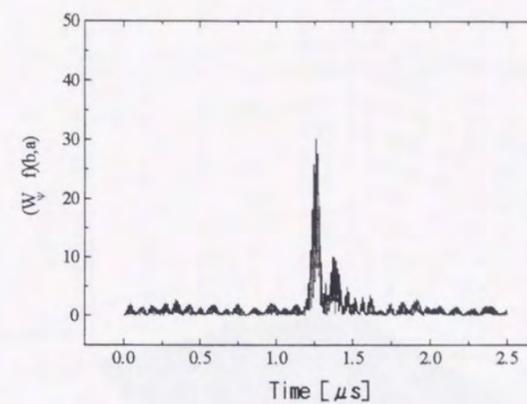
(c) 1500[pC]



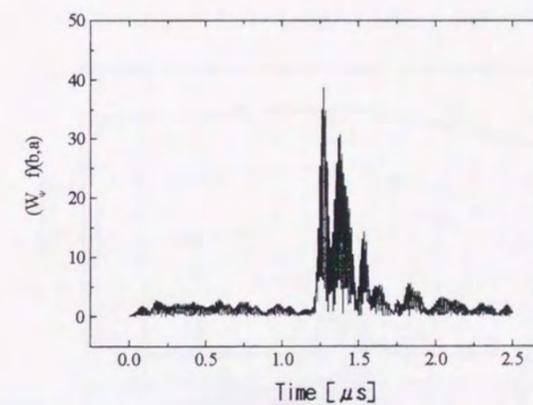
(d) 2000 [pC]

図3.5 PD放射電磁波のダイナミックスペクトラム

Fig. 3.5 Dynamic spectrum of the electromagnetic wave emitted from PD



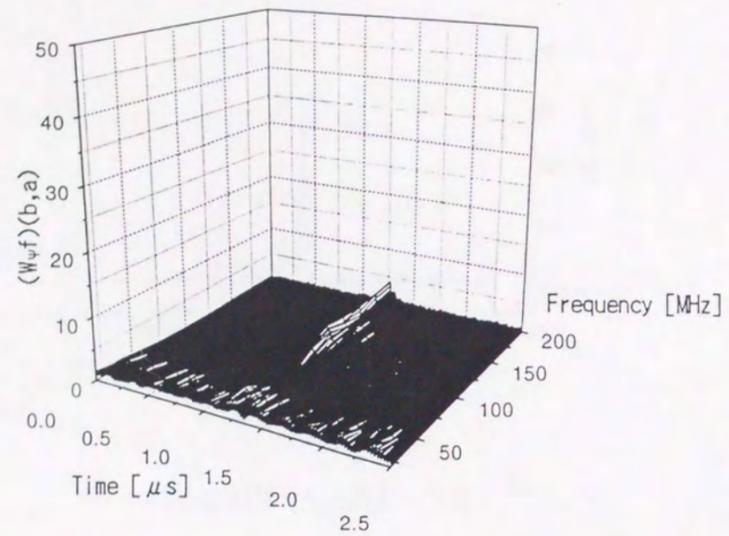
(a) 1500[pC] (40[MHz])



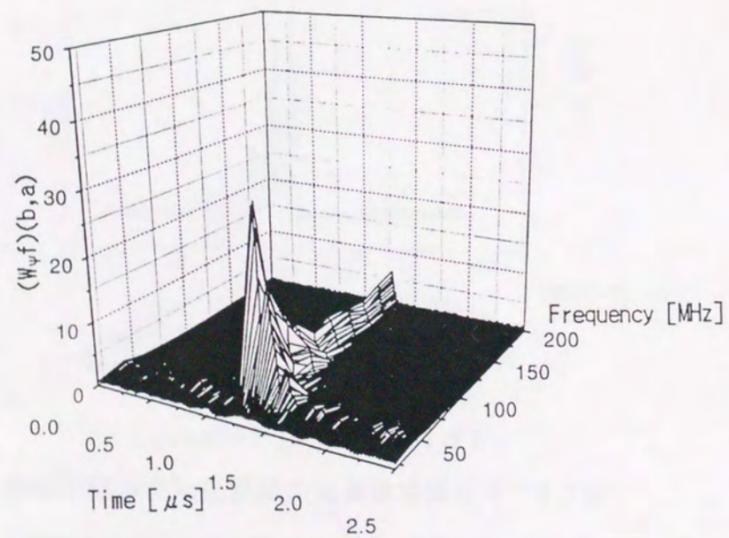
(b) 2000[pC] (40[MHz])

図3.6 PD放射電磁波の低周波成分の持続時間

Fig. 3.6 Duration-time of the electromagnetic wave (40[MHz]) emitted from PD



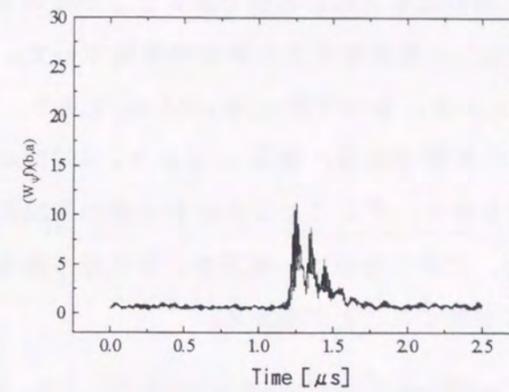
(a) 500[pC]



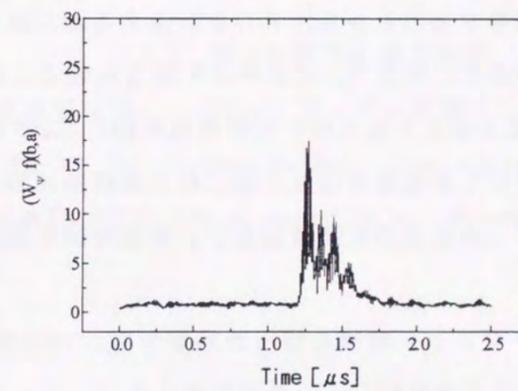
(b) 2000[pC]

図3.7 PD放射電磁波のダイナミックスペクトラム (放電10回分の平均分布)

Fig. 3.7 Dynamic spectrum of the electromagnetic wave emitted from PD (The average of 10 data sets)



(a) 1500[pC] (40[MHz])



(b) 2000[pC] (40[MHz])

図3.8 PD放射電磁波の低周波成分の持続時間 (放電10回分の平均)

Fig. 3.8 Duration-time of the electromagnetic wave (40[MHz]) emitted from PD (The average of 10 data sets)

タを取得)のウェーブレット変換の平均値を示した。

同図(a,b)より、放電電荷量の増加に伴い、低周波成分(20-80[MHz])が増加しており、すなわち、統計的検討においても上記と同様であることが分かる。

一方、1500[pC]と2000[pC]の低周波成分の持続時間について、放電実験10回分の平均値を示すと図3.8の様になる。なお同図(a)は1500[pC]であり、同図(b)は2000[pC]の周波数40[MHz]の時間変化波形である。同図(a,b)より、2000[pC]の放電持続時間が、1500[pC]より長くなることから、PDによる放射電磁波の持続時間に対し統計的検討を行った結果においても、上述した様に、電圧の上昇に伴う放電電荷量の増加に伴い低周波成分の持続時間が増加することが分かる。

### 3. 3. 3 より微小な放電時の時間周波数解析

実際的にPDによる絶縁劣化診断を行う場合、より微小な電荷量においても検出が可能であるシステムが望まれる。一方、電磁波を受信する際の信号強度は、放電電荷量および、伝搬距離に依存することから、PDを計測する際にはアンテナと放電点との距離を短縮する必要がある。そこで、アンテナ距離を放電点に近付け(3.36[m])、放電電荷量170[pC]の放電を発生させた時の受信波形を図3.9に示す。

同図より、背景雑音強度と放電信号強度の間に殆ど振幅差が無いため、受信波形の振幅情報のみではPDによる放電の生起時間及び、持続時間を識別することは困難である。

この波形に対しウェーブレット変換を行った結果を図3.10に示す。なお同図(a)は周波数40[MHz]、同図(b)は周波数200[MHz]の時間変化を示している。同図(a,b)より、1.25[μs]付近で信号強度が変化していることから、PDの生起時間を正確に検出していることが分かる。

またPDを放電電荷量の点から検討すると、先に述べたように2000[pC]のPDの場合、PDの放射電磁波は低周波成分が高周波成分より強く発生している。一方、170[pC]のPDに対応する図3.10では200[MHz]と40[MHz]の最大値(1.25~1.3[μs]付近)がほぼ同強度で出力されており、微小放電時には低周波成分の強度が相対的に弱いこ

とが分かる。よって、アンテナ距離を固定することで検出強度を一定にすれば、PDの電荷量の推定を時間一周波数解析を行うことで可能となると考えられる。

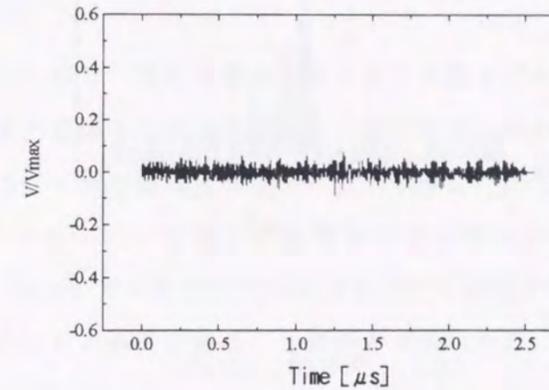
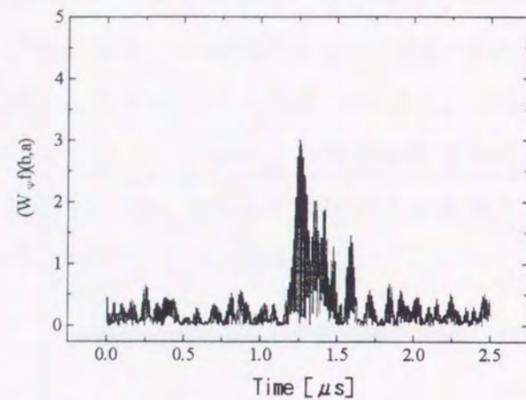


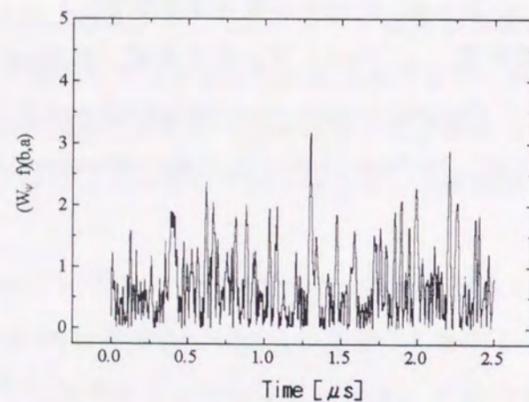
図3.9 微小放電時の受信波形

放電電荷量 : 170[pC] アンテナ距離 : 3.36[m]

Fig. 3.9 The electromagnetic waves received with antenna  
(Discharge:170[pC],The distance between fault point and antenna: 3.36[m])



(a) 周波数 40[MHz]



(b) 周波数 200[MHz]

図3.10 微小放電時の周波数時間変化

Fig. 3.10 Dynamic spectrum of the electromagnetic wave emitted from PD (Discharge: 170[pC])

### 3. 4 結言

本章では、SF<sub>6</sub>ガス中におけるPDの放電電荷量とPDにより放射される電磁波の周波数時間変化（ダイナミックスペクトラム）との関係について検討した。なお、PDの時間一周波数解析を行うにあたり、ウェーブレット変換を用いる手法を提案し適用した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 同一の欠陥に対し、電圧を増減させてPD放電電荷量を増減させた場合、PDの放電電荷量と放射電磁波の周波数成分との間に相関関係が存在することが明らかになった。すなわち、PDの放電電荷量が小さい場合は、その放射電磁波は主に高周波成分(140-200[MHz])から成っており、放電電荷量の増加に伴い、低周波成分(20-80[MHz])が増加し、且つ、その低周波成分の持続時間も増加することが分かった。また、この結果は統計的にも再現性があることが確かめられた。

(2) 本手法は放電電荷量が数100[pC]レベルである場合においても、その生起時間を正確に検出することが可能であることを示した。よって、電力機器の絶縁劣化の予知方法として、PDの放射電磁波の周波数時間変化（ダイナミックスペクトラム）を常時監視することの可能性が示された。

### 第3章 文献

- (1) 電気学会編：“電気設備の診断技術”，オーム社，1988年
- (2) 岡本達希：“最近の部分放電診断技術”，電学論B，115巻10号，pp. 1136-1139，平成7年（1995年）
- (3) 絶縁計測へのコンピュータ応用調査専門委員会：“絶縁計測へのコンピュータ応用技術”，電気学会学術報告 第593号，1996年6月
- (4) 真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化技術調査専門委員会：“真空遮断器・開閉装置のインテリジェント化”，電気学会技術報告 第479号，1993年12月
- (5) 運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会：“電力設備の運転中絶縁診断技術”，電気学会技術報告 第402号，1992年1月
- (6) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会：“電力設備の絶縁余寿命推定法”，電気学会技術報告 第502号，1994年7月
- (7) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法”，電学論B，115巻10号，pp. 1168-1173，1995年10月
- (8) Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura : "On Spatial Phase Difference Method For Detecting E-M Signals Associated With Partial Discharges in Power Apparatus", ISH, pp. 109-112, August 1993
- (9) 犬島浩，榊井健，前川洋：“自己回帰モデルを用いたガス絶縁開閉装置（GIS）部分放電検出法の開発”，電学論B，113巻11号，1993年11月
- (10) 加藤達朗，早川直樹，匹田政幸，大久保仁：“SF<sub>6</sub>ガス中における部分放電現象のコンピュータ計測とGIS内の絶縁破壊予知”，電学論B，115巻4号，平成7年
- (11) 古森郁尊，西口法明，匹田政幸，水谷照吉：“部分放電発生位相角分布によるパターン認識を応用した絶縁劣化診断および余寿命推定”，電学論A，113巻8号，平成5年
- (12) 細川辰三，河村和彦，関谷昌久，森田公，杉山修一：“SF<sub>6</sub>ガス中微小放電を伴ったギャップの絶縁破壊”，電学論B，111巻3号，平成3年
- (13) Guoxiang Xu, Kenji Arai, Waskyl Janischewsky: "Micro-Gap Discharge Phenomena in Air and SF<sub>6</sub> Gas", 電学論B，111巻5号，pp. 512-520 平成3年
- (14) K. Arai, W. Janischewsky, N. Miguchi: "Micro-gap Discharge Phenomena and Television Interference", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1, January 1985
- (15) 倉野重光，木田敏彦，水上明，乾秀雄：“活線診断用高精度部分放電検出システムの開発”，電学論A，112巻8号，pp. 725-734 平成4年
- (16) E Gulski, F H Kreuger: "Computer-aided analysis of discharge patterns", J. Phys. D, Appl. Phys. 23, 1990, pp1569-1575
- (17) 榊原進：“ウェーブレット入門”，東京電機大学出版
- (18) Charles K. Chui: "An Introduction to WAVELETS", ACADEMIC PRESS, INC. 1992
- (19) Stephane G. Mallat: "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation", IEEE Transactions on PAM, Vol. II, No. 7, July 1989
- (20) 山口昌哉，山田道夫：“ウェーブレット解析”，科学60，pp. 398-405 (1990)
- (21) 佐藤雅昭：“ウェーブレット理論の数学的基礎 第I部 第II部”，日本音響学会誌47巻6号，pp. 405-415，1991年
- (22) 河原英紀：“ウェーブレット解析の聴覚研究への応用”，日本音響学会誌47巻6号，pp. 424-429，1991年
- (23) 山田道夫：“ウェーブレット解析とその応用”，電子情報通信学会誌 Vol. 76 No. 5 pp. 518-528 1993年5月
- (24) Laura J. Pyrak-Nolte, David D. Nolte : "Wavelet analysis of velocity dispersion of elastic interface waves propagating along a fracture", Geophysical Research Letters, Vol. 22, NO. 11, pp1329-1332, June 1, 1995
- (25) Nobunao Takeuchi, Ken'ichi Narita, Yukihiro Goto: "Wavelet analysis of meteorological variables under winter thunderclouds over the Japan Sea", JGR, Vol. 99, No. D5, pp1051-10757, MAY 20, 1994

## 第4章

# GHz帯放射電磁波測定による 絶縁劣化診断法

### 4.1 緒言

火力タービン発電機は定期的な保守管理によって信頼性の確保・向上を図っているが、中間負荷運用、DSS (Daily Start-Stop: 毎日起動・停止) や WSS (Weekly Start-Stop: 毎週起動・停止) が高頻度に要求され、運転条件の過酷化が進んでいることから、安定した運転を継続するための適切な劣化診断技術、余寿命予測に基づく計画的な保守管理法が要請されている<sup>(1)~(16)</sup>。

発電機は鉄合金、非鉄合金、絶縁物など各種の材料を用いており、その材料が個々の特性を持ち、且つ、電氣的、機械的、熱的といった多様なストレスが種々の運用モードで合成された形で作用するため、発電機の期待寿命を一義的に評価、予測することは困難である<sup>(17), (18)</sup>。すなわち、各部品ごとの劣化状態を測定・監視するシステムが必要となる。本章では、発電機の心臓部とも言うべき固定子コイルの絶縁劣化を測定・評価する手法を検討する。

前章において、PDをその放射されるGHz帯電磁波により検出可能とするシステ

ムを開発したことを示した<sup>(20), (21)</sup>。しかしながら、固定子コイルの絶縁劣化状態を評価し、どの段階で発電機を停止・点検すべきかという指標を与えるには至っていない。そこで、絶縁破壊事故を未然に防止するという観点から、絶縁破壊直前のGHz帯電磁波を測定する必要があると考えられる。絶縁破壊直前の状態を本システムにより捉えることが可能であれば、発電機の事故による計画外停止を回避できることになる。

一方、発電機固定子コイルの寿命は残存破壊電圧の最低値で決定され、この残存破壊電圧最低値は3σ管理法で管理することがJIS等により示されている<sup>(3)~(5), (18)</sup>。そこで本章では、固定子コイル内のPDから放射されるGHz帯電磁波と、この3σ管理法から求め得る累積破壊確率との関係による絶縁劣化診断法を提案し、計画外緊急停止を回避するための指標について検討する。そして、本システムによる絶縁劣化診断法の有効性を、実運用に供していた火力タービン発電機(定格容量156[MVA], 定格電圧18[kV])の絶縁更新の際に、サンプリングした固定子コイルを用いた絶縁破壊試験の結果から示す。

### 4.2 発電機固定子コイルの絶縁劣化診断

#### 4.2.1 GHz帯放射電磁波測定システム

固定子コイル内のPDから放射されるGHz帯電磁波(中心周波数2~3[GHz]で100[MHz]毎に周波数可変)を受信・解析するために図4.1のシステムを開発し、固定子コイルの部分モデルに適用したことを前章において述べた<sup>(20), (21)</sup>。本章においても、同システムを用いて固定子コイル絶縁破壊試験時のGHz帯放射電磁波の測定を行うこととする。なお本章では、表4.1に示すマイクロ波プリアンプを実験準備の都合上、用いた。(第2章の表2.2の代わりに)。なお、アンテナとマイクロ波プリアンプ間のケーブル(型名: 5D-2W, 長さ: 10 [m])の減衰量は7 [dB] (3[GHz])である。

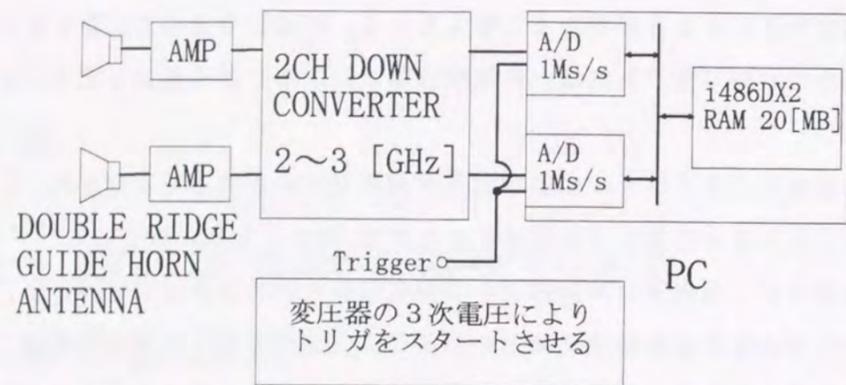


図4.1 GHz帯放射電磁波測定システム

Fig.4.1 Measurement system of microwave emitted from PD

表4.1 マイクロ波プリアンプの仕様

Table4.1 The specification of amplifire

使用機種	:87405A (HP製)
周波数帯域	:10 [MHz] ~ 3 [GHz]
利得	:24 [dB]
利得フラットネス	:±2 [dB]
雑音指数	:7.5 [dB]
1dB利得圧縮レベル	: ≤ +4 [dBm]

## 4. 2. 2 固定子コイルの絶縁破壊法

絶縁劣化とは絶縁層内のボイドの発生・拡大する現象であり、平均的にボイド量が多いほど、また局部的に大きなボイドが存在するほど、ボイド部分に電界が集中し放電する（導電体となる）ことから、絶縁パスは短くなり絶縁破壊電圧は低下する<sup>(18)</sup>。劣化要因としては、電氣的劣化、ヒートサイクル劣化、熱的劣化、機械的劣化、環境劣化等が上げられ、絶縁劣化を議論する場合、上記の複数の劣化要因について検討すべきであるが、本論文では電氣的劣化（課電劣化）にのみ着目して検討する。

電氣的劣化は一般的に運転中に加わる過電圧・運転電圧（V）と時間特性（t）との関係である V-t 特性を基に 2 変数ワイブル分布関数により評価されていることが多い<sup>(3)~(5), (18)</sup>。しかしながら、数学的には 2 変数の分布関数はあり得ず、絶縁破壊電圧 V と破壊までの時間 t は独立ではなく、1 次の自由度しかないとの報告もある<sup>(22), (23)</sup>。

本研究では電氣的絶縁劣化を固定子コイルへの印加電圧を増加させることで実現することとした。これは、コイル内の絶縁劣化に伴う局所的な電界集中を、印加電圧増加による電界強度の上昇と等価であると仮定している。なお本破壊実験は、表 4.2 に示す実運用に供していた火力タービン発電機の絶縁更新の際にサンプリングしたコイル 4 本を用いて行った。

図 4.2 に絶縁破壊試験回路、電極構成、破壊箇所を示す。同図 (a) に示す回路による破壊方法は分圧課電法と呼ばれており、分圧電極と接触しているコイル表面（外側）の電位を調節し、主電極（接地）と接触しているコイル絶縁層の電位差を最大にさせることで、主電極と接触している絶縁層のみを破壊する方法である。よって、本方法は一本のコイルにおいて複数箇所を個別に分けて破壊できる。本論文では同図 (c) に示すように、1 本のコイルにおいて 4 箇所 (No. 1~4) を個別に破壊した。なお、電極間には電界緩和塗料を塗布しており、電極沿面からの閃絡を防ぐとともに電磁波放射を可能な限り低くする様に配慮した（図 4.3）

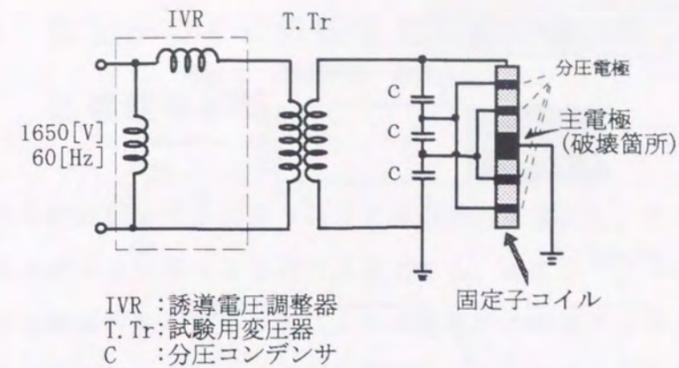
印加した電圧は交流（60 [Hz]）であり、40 [kV] から 5 [kV] の刻みの 1 分間ホールドでコイルが破壊するまで上昇させた。実験に用いたコイルは 4 本（15 箇所、注：本来は 16 箇所であるが、1 箇所が測定不能であったため）であり、そのうちの 1 本（3

箇所) について放射電磁波を測定した。本実験に用いた固定子コイルは定格電圧が18 [kV] であることから、その絶縁破壊電圧は  $3 \sim 4 \times 18$  [kV] (54~72[kV]) 以上と予想されるため、70[kV] 以下の印加電圧において任意に GHz 帯放射電磁波を測定した。

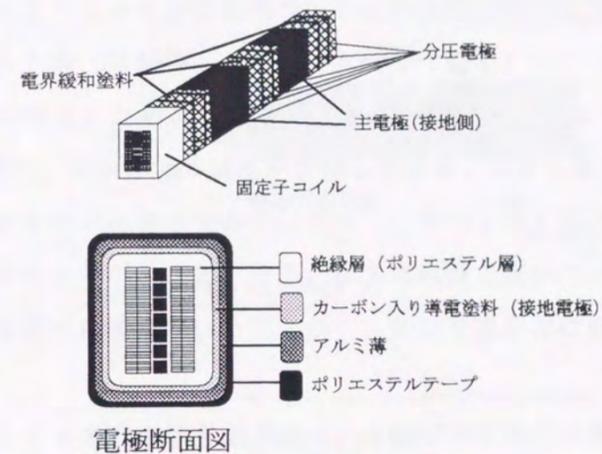
表 4.2 発電機仕様および経歴

Table 4.2 The specification of the turbine generator

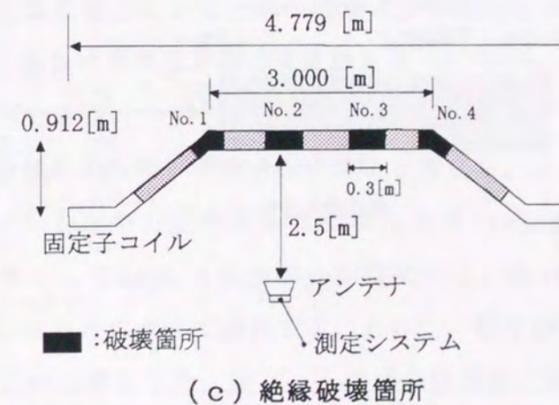
定格容量	:	156 [MVA]
定格電圧	:	18 [kV]
回転数	:	3600 [rpm]
運転時間	:	145,578 [h]
起動・停止回数	:	810 [回]
絶縁システム	:	ポリエステル絶縁



(a) 破壊試験回路



(b) 電極構成



(c) 絶縁破壊箇所

図 4.2 固定子コイルの破壊試験回路及び絶縁破壊箇所

Fig.4.2 The circuit of the breakdown test and the breakdown point of the winding

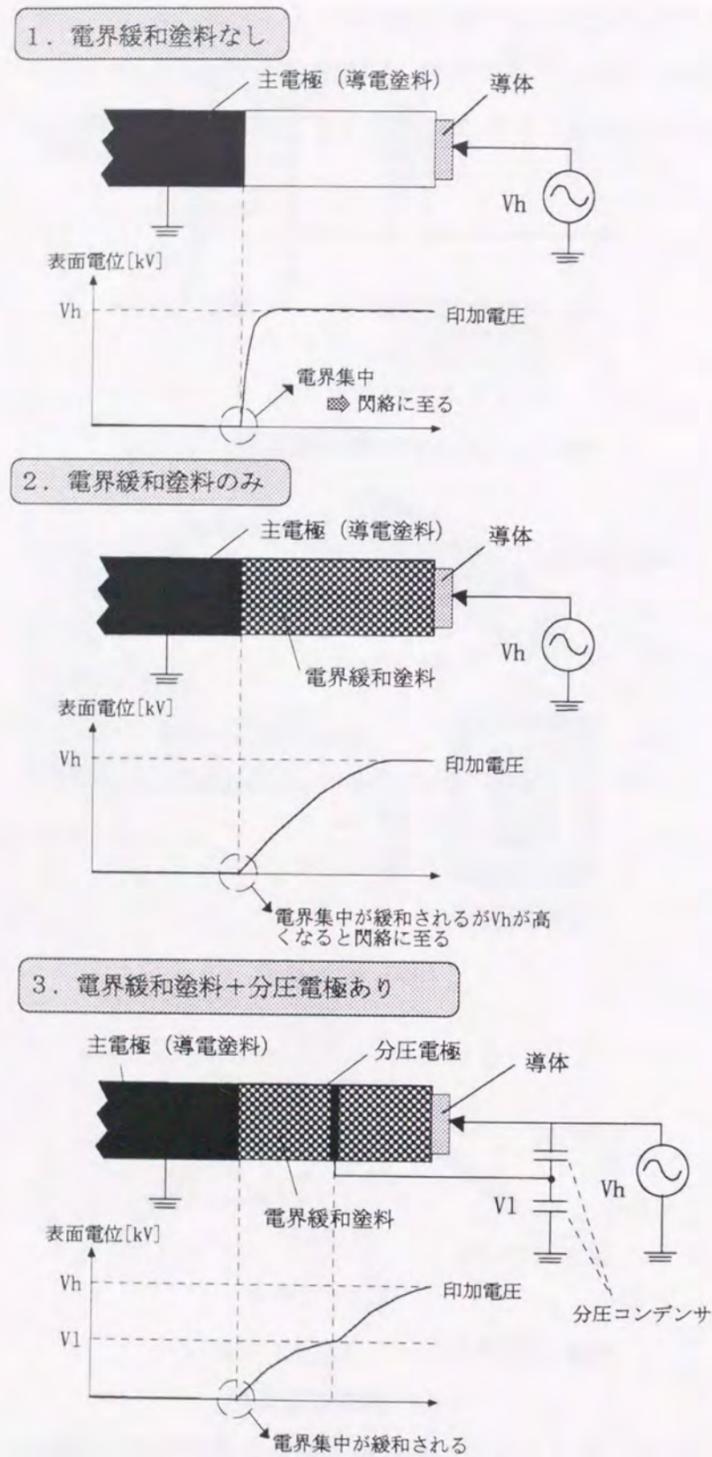


図4.3 固定コイルの表面電位

Fig. 4.3 The surface electric potential of the winding

#### 4. 2. 3 固定子コイルの絶縁破壊電圧値に基づく 破壊確率解析

固定子コイルの絶縁破壊現象に伴うGHz帯電磁波を検出し、コイルを診断するためには、コイルの状態を評価する指標が必要となる。固定子コイルの絶縁破壊試験では、コイル自体の絶縁特性のばらつきにより破壊電圧の相違が生じることから、印加電圧ではなく破壊確率により、その性能を確率統計的に評価している<sup>(3)~(5), (18)</sup>。

そこで、固定子コイルの残存破壊電圧値の分布解析に用いられている正規分布<sup>(5), (18)</sup>により、固定子コイルの絶縁破壊電圧の統計処理を行うこととする。放射電磁波を測定したコイル1本(3箇所)と他の3本(12箇所)の計15箇所を絶縁破壊させた際の、絶縁破壊電圧と累積破壊確率の関係を図4.4に示す。なお、破壊電圧が71[kV]において2箇所、80[kV]で3箇所が破壊しており、同図では重ねて表示している。同図は正規確率紙を用いた表示であり、従って、その分布が直線関係にある場合、統計的には正規分布である<sup>(18)</sup>ことになる。即ち本実験で用いたコイルの絶縁破壊電圧の分布は、ほぼ直線状に並んでいることから、ほぼ正規分布に近い形になっていることが分かる。

また、固定子コイルの寿命は最弱点部である残存破壊電圧の最低値で推定する必要がある。一般的に、破壊電圧最低値の管理法としてJISなどに3σ管理法が提案されている<sup>(5), (18)</sup>。この管理法によると残存破壊電圧の最低値は(平均値-3×標準偏差)より推定でき、本コイルは残存破壊電圧最低値 59.52[kV] (=75.27[kV]-3×5.25[kV])と求めることができる。

そして、絶縁破壊電圧の分布が正規分布であるとみなし、上記において求めた絶縁破壊電圧の平均値(75.27[kV])と標準偏差(5.25[kV])を用いて、印加電圧とコイルの累積破壊確率との関係として式(4.1)に示す。本論文では、式(4.1)より求め得る累積破壊確率と放射電磁波を対応させて検討するとともに、残存破壊電圧最低値の累積破壊確率を発電機停止の指標とした。なお、この残存破壊電圧最低値59[kV](小数点以下切り捨て)の累積破壊確率は式(4.1)を用いて(印加電圧:1[kV]間隔)計算した結果0.131[%]と求められる。

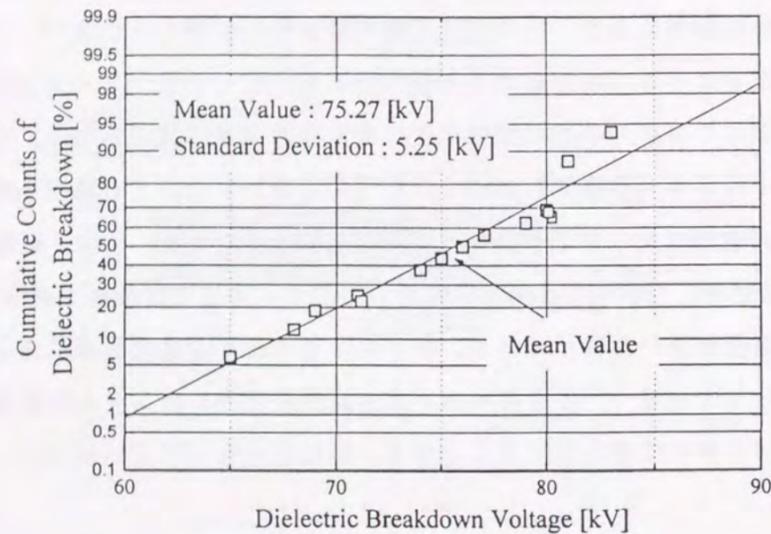


図4.4 絶縁破壊電圧値と累積破壊確率との関係

Fig.4.4 The relationship between breakdown voltage and cumulative counts of dielectric breakdown

$$f(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(V-\bar{V})^2}{2\sigma^2}\right) \times 100 [\%] \quad (4.1a)$$

$$F(V) = \sum_0^V f(V) \quad (4.1b)$$

$f(V)$  : 破壊確率 [%]

$F(V)$  : 累積破壊確率 [%]

$V$  : 印加電圧 [kV]

$\bar{V}$  : 平均破壊電圧 [kV] (= 75.27 [kV])

$\sigma$  : 標準偏差 [kV] (= 5.25 [kV])

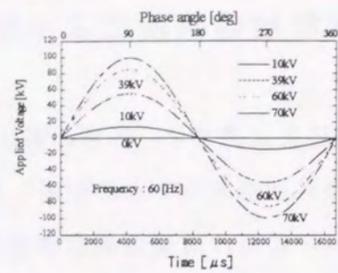
#### 4.2.4 GHz帯放射電磁波による絶縁劣化診断法

固定子コイルに印加した電圧を上昇させ、任意の電圧値において受信した電磁波波形（ダウンコンバータの局部発振器を3[GHz]に設定）を図4.5に示す。なお同図は、各電圧値において電源10周期分における受信電磁波強度の最大振幅値を示した波形（ピークホールド）であり、本破壊箇所（No.3）は印加電圧80[kV]で絶縁層が破壊している。同図より、印加電圧を上昇させるに従い、放射電磁波は振幅値、発生頻度とともに増加していることが分かる。

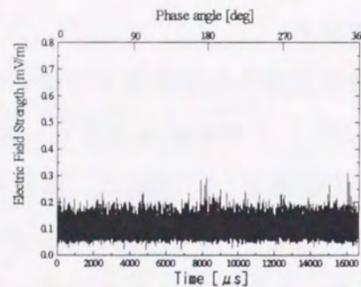
印加電圧に対する放射電磁波の発生位相角としては、印加電圧が10[kV]のとき0[deg](360[deg])と180[deg]付近において最大振幅値を示している。60[kV]では130[deg]と310[deg]付近において最大振幅値を示し、同時に、振幅値の大きいパルスの発生頻度も増加している。そして、70[kV]では90[deg]と270[deg]付近において最大振幅値を示し、20~90, 200~270[deg]において振幅値の大きいパルスの発生頻度が増加していることが分かる。すなわち、放射電磁波の振幅値と発生頻度より、絶縁破壊の初期段階では印加電圧の微分値が大きい位相角(0, 180[deg])において破壊が進展し、破壊直前では位相角がシフトし、印加電圧の最大値となる位相角付近(20~90, 200~270[deg])において破壊がより進展すると考えられる。

この放射電磁波の発生位相角も診断に用いることが可能であると考えられる<sup>(13)</sup>、<sup>(16)</sup>が、放射電磁波の振幅値と発生頻度が印加電圧の上昇（絶縁破壊に近づく）に伴い顕著に増加することから、本論文では放射電磁波の振幅値とパルス数に着目することとした。図4.6に放射電磁波強度(0.114[mV/m]以上、任意)によるヒストグラム(4.48×10<sup>-3</sup> [mV/m]間隔、任意)を示す。なお同図は、電源電圧10周期分のヒストグラムの平均値を示している。

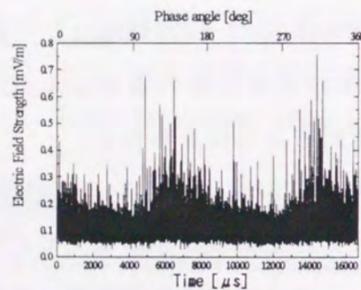
同図より、印加電圧を増加させると各電磁波強度においてパルス数が増加していることが分かる。このパルス増加度を数値化することにより、破壊現象を的確に把握することが可能であると考えられることから、基準である背景雑音受信時のパルス数と各電圧印加時におけるパルス数との差として図4.7に示す。同図における各放射電磁波強度のパルスの総和を検討すると、明らかに印加電圧の増加に伴って総パルス数は増加しており、特に、10~60[kV]と60~70[kV]を比較すると、その増加度合いは60~



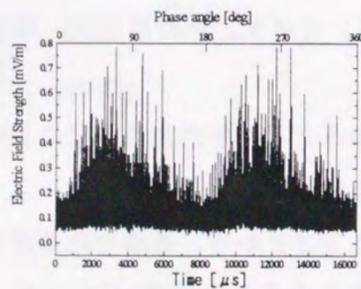
(a) 印加電圧



(b) 10[kV]



(c) 60[kV]



(d) 70[kV]

図4.5 各印加電圧値における受信電磁波波形

Fig.4.5 Received microwave at the each applied voltage

70[kV]において急増していることが分かる。すなわち、より破壊に近づくに伴いGH $\zeta$ 帯放射電磁波の強度とパルス発生頻度が増加することを示している。

上述した様に、コイルの劣化状態を評価するには、印加電圧ではなく破壊確率で行うべきであることから、この総パルス数と上述した累積破壊確率との関係を図4.8に示す。なお同図は、1本のコイルにおける3箇所から得られたパルス数をもとに示している。総パルス数はヒストグラムを表示する際の放射電磁波の振幅値による閾値と間隔（階級）により決定されることから相対的な指標である。

同図より、総パルス数の増加とともに累積破壊確率は上昇することが分かる。例えば、パルス数が60の場合、累積破壊確率は0.008[%]であり、パルス数480では18.131[%]まで上昇していることが分かる。そして、3 $\sigma$ 管理法では残存破壊電圧最低値がコイル絶縁の寿命を決定することから、このコイルの残存破壊電圧最低値 59.52[kV]以上を示す総パルス数が約70以上である場合、特に危険な状態であると把握できる。

よって、絶縁破壊前のコイルの劣化状態をGH $\zeta$ 帯放射電磁波のパルス数で捉えることが可能であるといえ、上記の段階にて発電機停止を行うことにより、コイル絶縁破壊事故を回避できると考えられる。

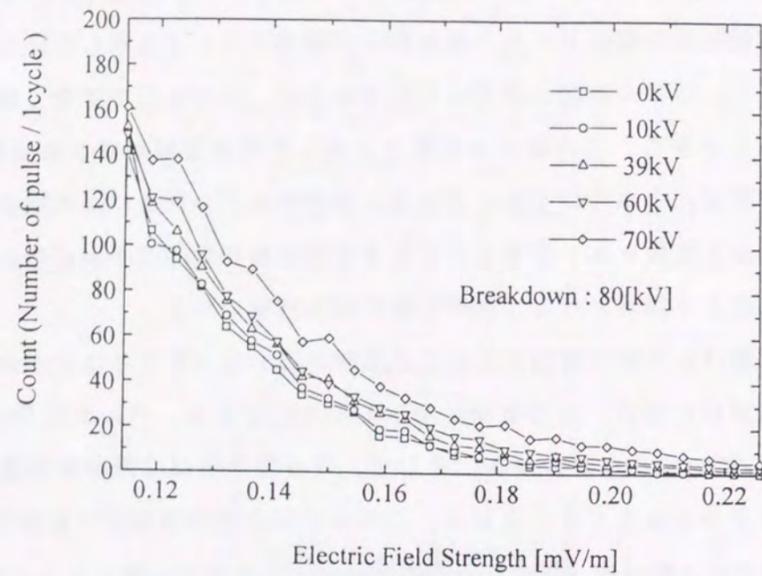


図4.6 放射電磁波強度ヒストグラム

Fig.4.6 Histogram of intensity of microwave

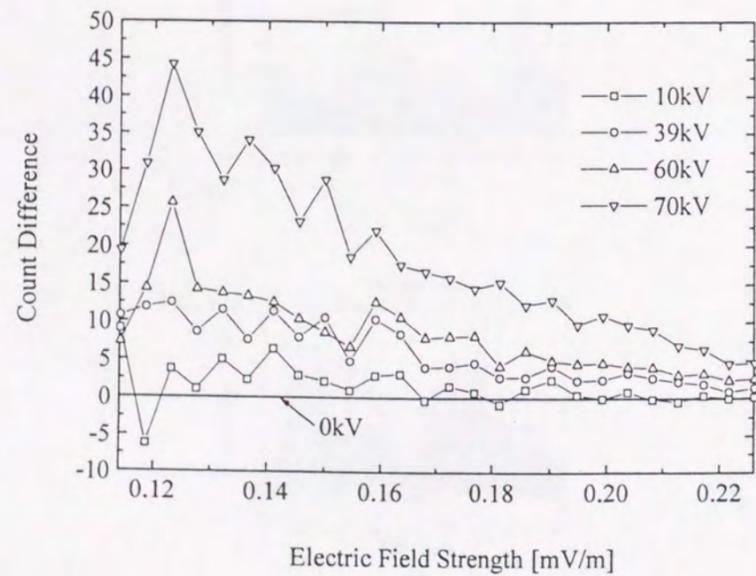


図4.7 放射電磁波強度の背景雑音による差分ヒストグラム

Fig.4.7 Histogram of pulse count difference between microwave and background noise

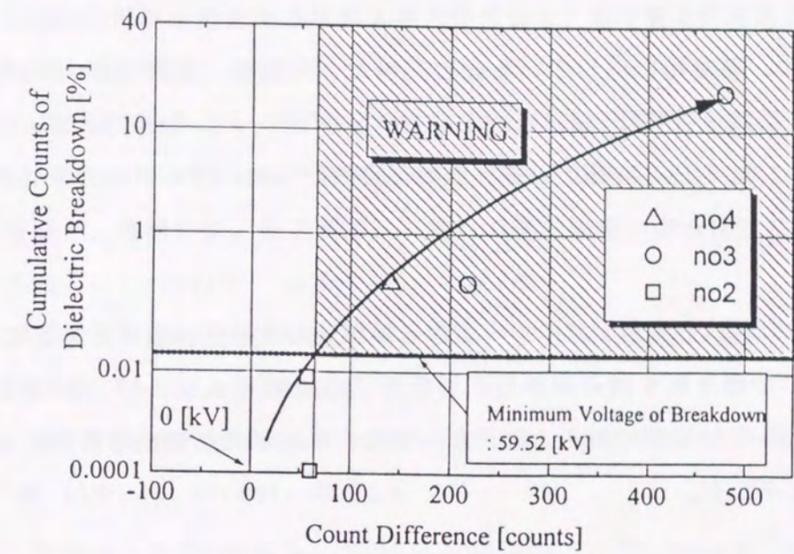


図4.8 放射電磁波パルス数によるコイル劣化診断

Fig.4.8 Insulation diagnosis by the counts of microwave

### 4. 3 結言

本章では、発電機固定子コイルの絶縁破壊事故を未然に防止するという観点から、絶縁破壊直前のGH $\alpha$ 帯放射電磁波を開発したシステムにより測定し、コイルの劣化状態を評価する診断法を検討した。運転中発電機における固定子コイルの劣化要因としては複数上げられるが、特に、電氣的劣化にのみ着目し、絶縁破壊試験によってコイルの劣化進展を模擬した。

実験としては、実運用に供していた火力タービン発電機（定格容量156[MVA]、定格電圧18[kV]、累積運転時間145,578[h]）よりサンプリングした固定子コイルの絶縁破壊試験を行い、そのGH $\alpha$ 帯放射電磁波の測定を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) 破壊実験に用いた固定子コイルの絶縁破壊電圧の分布は、ほぼ正規分布であり、従ってコイルの寿命を示す残存破壊電圧最低値は3 $\sigma$ 管理法から59.52[kV]と求められた。そして、各印加電圧に対するコイルの絶縁劣化状態を正規分布関数により累積破壊確率として示した。

(2) GH $\alpha$ 帯放射電磁波の強度と発生部分放電パルス数が破壊直前に急増することが分かった。放射電磁波の印加電圧に対する発生位相角より、絶縁破壊の初期段階では印加電圧の微分値が大きい位相角(0, 180[deg])において部分放電による破壊が進展し、破壊直前では部分放電発生位相角がシフトし、印加電圧の最大値となる位相角付近(20~90, 200~270[deg])において大きい部分放電パルスが発生し、全路破壊に至ることが分かった。

(3) GH $\alpha$ 帯放射電磁波のパルス数と3 $\sigma$ 管理法から求め得る累積破壊確率とを照らし合わせることで、コイルの劣化状態を推定し、発電機運転停止の一つの基準となる可能性を示した。

### 第4章 文献

- (1) 絶縁材料微小放電劣化調査専門委員会：“部分放電劣化”，電気学会技術報告（II部）第164号，1985年4月
- (2) 運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会；“電力設備の運転中絶縁診断技術”，電気学会技術報告（II部）第402号，1992年1月
- (3) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会：“電力設備の絶縁余寿命推定法”，電気学会技術報告 第502号，1994年7月
- (4) 特別高圧回転機・ケーブル絶縁の劣化診断技術調査専門委員会：“特別高圧回転機・ケーブルの絶縁劣化診断技術”，電気学会学術報告 第267号，1988年3月
- (5) 松浦虔士，岡部成光，金子英男，“電力機器の絶縁余寿命推定法の現状”，電学論A，114巻12号，pp. 845-852，平成6年
- (6) 岡本達希，“絶縁計測におけるコンピュータ応用の最近の動向”電学論A，116巻6号，pp. 481-487，平成8年
- (7) 木村健：“高電圧回転機のオンライン絶縁診断技術の動向”，電学論B，110巻 12号，pp. 991-994，平成2年
- (8) H. G. Sedding, S. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 700-706, December 1991.
- (9) G. C. Stone, H. G. Sedding, N. Fujimoto, and J. M. Braun: "Practical Implementation Ultrawideband Partial Discharge Detectors", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, pp. 70-81, February 1992
- (10) Wilfried Hutter, "Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 3, pp. 21-32, May/June 1992
- (11) A. Contin, G. Rabach, "PD Analysis of Rotating ac Machines", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, December 1993
- (12) S. R. Campbell, G. C. Stone, H. G. Sedding, W. McDermid, R. Busse, "Practical On-line PD Tests for Turbine Generators and Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 281-287, June 1994.
- (13) G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding, W. McDermid: "Unusual PD Pulse Phase

Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 567-577, August, 1995

- (14) Sher Zaman Khan, Zhu Deheng, Jin Xianhe, Tan Kexiong: "A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 700-707, August 1995
- (15) K. Ito, Y. Kaneda, S. Kitamura, K. Kimura, A. Nishimura, T. Tanaka, H. Tokura, I. Okada : "New Noise Rejection Techniques on Pulse-by-pulse Basis for On-line Partial Discharge Measurement of Turbine Generators", 96 WM 154-5 EC, IEEE PES Winter Meeting 1996
- (16) G. C. Stone, "The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12 No. 4, pp. 23-27, July/August 1996
- (17) V. K. Agarwal et al., "The Mysteries of Multifactor Ageing", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12 No. 4, pp. 37-43, July/August 1996
- (18) 電気学会編：電気設備の診断技術，オーム社，pp. 7-38, 38-59, 129-143, 1988年
- (19) 木村喬，春浪隆夫，金万直広，斉藤宗敬：”外部アンテナを用いたGISの絶縁診断方法”電学論B，115巻10号，pp. 1199-1207, 1995年10月
- (20) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：”GHz帯電磁波による非接触部分放電検出法の検証”平成7年電気学会・電力エネルギー部門大会，No. 520
- (21) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏男，音羽克則，黒木悟，森山隆：”GHz帯電磁波空間位相差法を用いた発電機固定子コイルの非接触部分放電検出システムの開発”，電学論B，117巻2号，pp. 224-232, 1997年2月
- (22) 岡部成光，財満，河野，”ワイブル分布関数による変電機器の絶縁の信頼度評価について”，電学論A，113巻11号，pp. 791-792, 平成5年
- (23) 広瀬英雄，”長時間 V-t (電圧-寿命) 特性に用いられる数学モデルについての一考察”，電学論A，106巻4号 pp. 37-44, 昭和61年

## 第5章

# 画像処理技術とニューラルネットワークによる自動診断法

### 5.1 緒言

近年，発電機・電動機といった同期機の大容量化・高機能化等に伴い，始動・停止頻度の増大など使用条件は一段と過酷になっており，また，我が国では電気事業法における規制緩和により定期点検間隔が延長される傾向にあることから，精度の高い診断技術の開発・適用が望まれている。同期機において発生し得る事故は，固定子コイルの絶縁破壊事故，軸受部の損傷，ブラシおよびスリップリングの事故，振動問題等であり<sup>(1)~(11)</sup>，特に，固定子コイルと軸受部の事故は，長期間の運転休止を余儀なくされることから，最も重要な診断箇所となっている。前章において発電機の固定子コイルに対して，その絶縁破壊の予兆現象であるPD（部分放電）を，PDより放射されるマイクロ波帯電磁波を受信処理することで計測可能とした<sup>(12), (13)</sup>ことを述べた。

一方，軸受部の劣化診断法としては，低周波振動法，分光分析法，振動加速度法，フェログラフィー分析法等があげられる<sup>(14)~(16)</sup>。なかでも，フェログラフィー分

析法は、摩擦部分の致命的な損傷を未然に防止することを目的として開発された摩耗粒子分析法であり、他の方法では発見し得ない損傷形態（摩耗、焼付き、疲労はく離）を検出できることから、有効な軸受部劣化診断法となっている<sup>(15)</sup>。なお、フェログラフィー分析法は航空機のジェットエンジン、鉄道、自動車をはじめとして油圧機械や精密機械等、摩擦面の損傷が問題となる多くの産業分野に適用されている。

しかしながら、フェログラフィー分析法は摩耗粒子の種類・量・大きさ等を光学（2色）顕微鏡による分析官の目視により計測し、これらを劣化状態の判定基準としていることから、欠陥の有無を判定するにはかなりの経験を必要とする。熟練者の不足、疲労による誤診、診断時間の短縮等の問題を解決するという点から、その自動化の必要性が増大している。

そこで本研究では、フェログラフィー分析法の摩耗粒子の検出・判定の自動化を実現するために、コンピュータによる画像処理技術とニューラルネットワークを用いたシステムを開発したので本章において述べる。具体的には、まず2色顕微鏡に取り付けたCCDカメラによりデジタル画像をコンピュータに取り込む。次に、この画像データに画像処理技術<sup>(17)</sup>、<sup>(18)</sup>、<sup>(22)</sup>を適用し、各摩耗粒子の特徴を抽出する。粒子の特徴としては、分析官が経験的に粒子の色合い（反射度合い）、大きさや形状等に基づいて検出・判別を行っていることから、粒子の色情報から得られる輝度情報と面積・周囲長・円形度を粒子判別のための特徴量とする。そして、この特徴量をニューラルネットワーク<sup>(19)~(22)</sup>に入力し摩耗粒子の自動判別を行う。ニューラルネットワークはパターン認識や非線形マッピング等に有効である<sup>(19)~(22)</sup>と報告されており、本システムはニューラルネットワークにより各摩耗粒子の特徴量の相互関係に基づいた認識・判別を実現している。

なお、中形～大形や周速の早い同期機は、図5.1に示すホワイトメタルを鋳入したすべり軸受が使用されており、また、発電機等の大容量化に伴い、すべり軸受方式が使用されていることから、すべり軸受の損傷過程において生じる摩耗粒子に着目し、本システムの有効性を示すこととする。

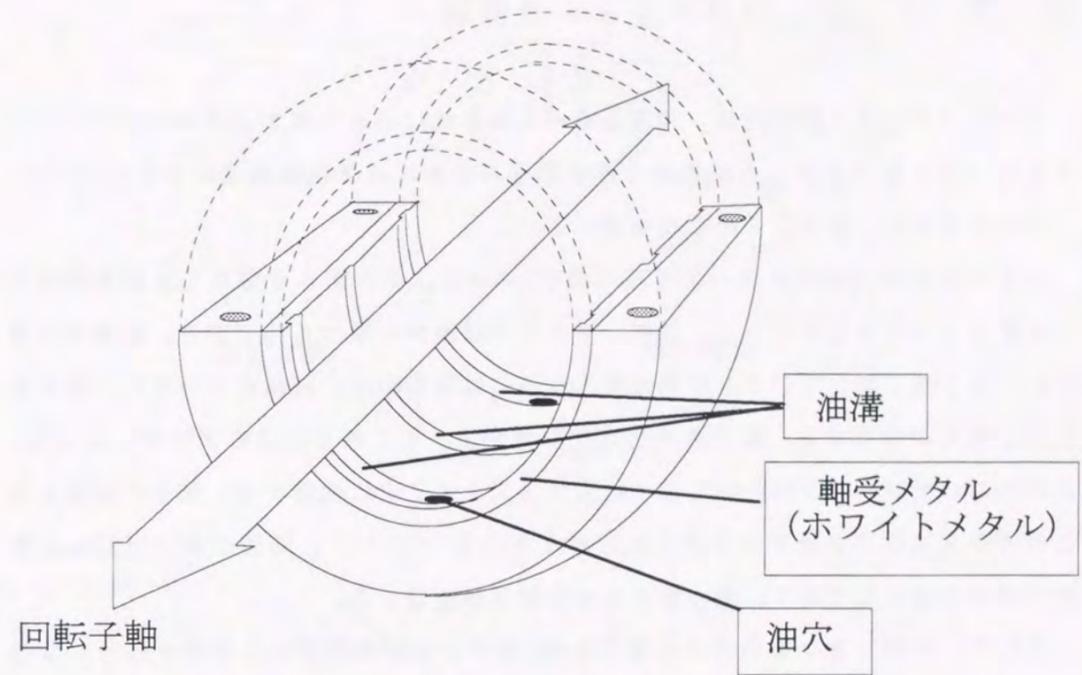


図5.1 すべり軸受

Fig.5.1 Bearing

## 5.2 同期機すべり軸受の潤滑油中摩耗粒子検出

### 5.2.1 フェログラフィー分析法

フェログラフィー分析法は、潤滑油中から各摩耗粒子を分離するフェログラフアナライザーと、その分離した結果から摩耗粒子を分析する2色顕微鏡により実現<sup>(13)</sup>、<sup>(14)</sup>されており、以下にその原理を述べる。

フェログラフアナライザーの原理を図5.2に示す。軸受部より採取した潤滑油をポンプによりガラススライド上に流す。スライドは僅かに傾けられており、磁場は下流にいくほど強くなっている。試料油中の粒子には磁力の他、流体によって押し流される力と重力が作用する。粒子の大きさや材質によってこれらの力の受け方が異なり、これらのバランスがとれた所で粒子はガラススライド上に沈着する。粒子が沈着したこのガラススライドをフェログラムと呼んでいる<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。同図において56[mm]付近が試料油の入口であり、磁性体の大きな粒子が沈着する。

そして、作成したフェログラムを図5.3に示す2色顕微鏡により分析を行う。2色顕微鏡はフェログラムに対して、上から白色反射光、下から緑色透過光と上下方向から2色の光を照射できる様になっており、これにより粒子の形状だけではなく材質までも鮮明に観察できる様になっている。分析官は経験的に各粒子の色合い（反射度合い）とその大きさ、形状の複雑さにより判別している。

すべり軸受の潤滑不良としてフェログラフィー分析法により検出される主な摩耗粒子と発生要因について表5.1に示す。なお摩耗粒子の種類により、軸受部の欠陥の種類が判別でき、かつ、その大きさ・個数により摩耗劣化の度合いが診断できる。特に、切削摩耗粒子、球形粒子、シビヤースライディング粒子、黒色酸化粒子の4種類の粒子は注意しなければならないとされている<sup>(15)</sup>。

しかしながら、分析官は目視により各粒子を判別し、顕微鏡接眼レンズ内に写る格子面積を100として、粒子が占有する表面積・個数をカウントする方法を行っていることから、自動化が望まれている。

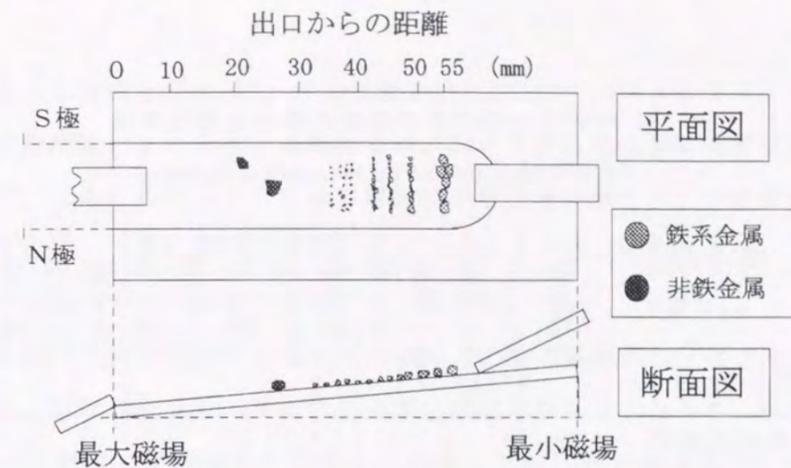


図5.2 フェログラムスライド

Fig.5.2 Ferrogram slide

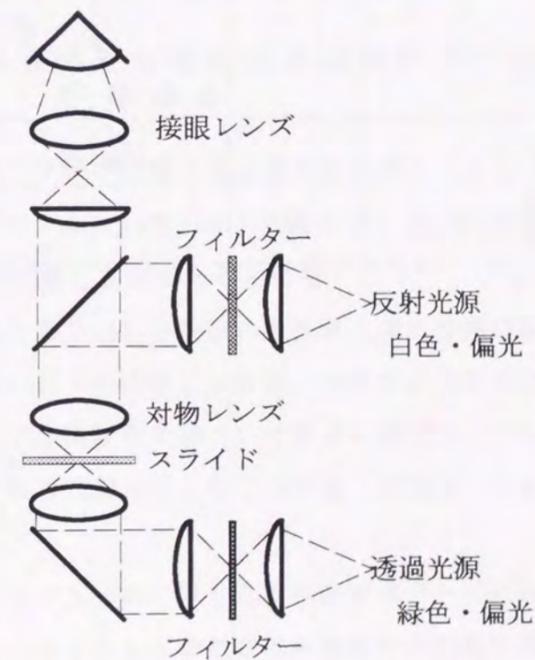


図5.3 2色顕微鏡

Fig.5.3 Ferrograph microscope

表5.1 分析フェログラフの摩耗粒子と発生要因

Table5.1 Wear particles and the causes of occurrence

発生原因 摩耗粒子分類	1. 境界潤滑	2. なじみ運転	3. 表面の突起	4. 砂等の混入	5. 疲労	6. 過負荷	7. 加速度	8. 加熱	9. 潤滑不良	10. 腐食	11. 電食	12. 油劣化	13. 溶解
1. 正常摩耗粒子	●	●											
2. シビヤースライディング粒子						●	●	●					
3. 切削摩耗粒子			●	●									
4. 球形粒子					●						●		●
5. 腐食粒子										●		●	
6. 黒色酸化粒子						●	●	●	●				
7. 非鉄金属粒子								●	●				
8. 非金属結晶質粒子(無機質)				●									

## 5. 2. 2 システム構成

本システムの構成を図5.4に、その仕様を表5.2に示す。フェログラフィー分析法は通常、2色顕微鏡により目視計測を行うが、本システムは2色顕微鏡にCCDカメラを取り付け、このCCDカメラにより摩耗粒子画像を取得する。この画像は画像ボードによりコンピュータに読み込まれ、デジタルデータとして取り扱う。このデジタル画像データは512×480画素の各色(赤, 緑, 青)8bit, つまり, 512×480×8×3bitのデータ形式となっている。なお各摩耗粒子は上述した様に、種類によりフェログラムスライド上で分布する位置が異なることから、各場所において特定の粒子に着目して画像を取得する。取得した摩耗粒子の画像データの代表例を図5.5に示す。顕微鏡の倍率は500倍である。なお非金属結晶質粒子は、他の粒子と比較して大きい為、顕微鏡の倍率は200倍である。

## 5. 2. 3 画像処理技術による摩耗粒子の特徴抽出法

種類判別といったパターン認識の基本的な考え方は、入力パターンと標準パターンとの近さ(似ているか、似ていないか)をはかり、近ければ近いほど入力パターンは標準パターンと確実に同じものであると判断する<sup>(17), (18)</sup>。そこで、距離の概念を導入し、パターンから取り出した複数の特徴から成る特徴空間を形成することで、摩耗粒子の判別を行う。粒子の特徴としては、分析官が経験的に粒子の色合い(反射度合い)、大きさ、形状の複雑さに基づいて検出・判別を行っていることから、本論文では色情報から得られる輝度情報と粒子の面積・周囲長・円形度を粒子判別のための特徴量とする。

本システムは、コンピュータに取り込まれた画像データに対して、画像処理技術の適用による摩耗粒子の切り出し・特徴量の計算を行う前処理部と、その種類を判別する3層ニューラルネットワーク<sup>(17)~(21)</sup>の2つの処理過程から構成されている。なお、ニューラルネットワークを用いて学習・認識を行う際、画像データそのものを入力データとする方法も考えられるが、画像データをそのまま用いるとネットワークが

大規模になり、学習が困難となる場合が多いことから、本システムでは各粒子の特徴を抽出することで種類の判別を行う。

この特徴量による空間分布を形成する前処理部のフローチャートを図5.6に示し、以下にその処理について述べる。前処理部ではまずコンピュータに取り込まれた画像データに対して各画素の輝度 (Intensity) を計算する。なお輝度は HSI Color Model (色相 :Hue, 彩度 :Saturation, 輝度 :Intensity) の定義<sup>(22)</sup>から算出している。この輝度値によるヒストグラムにより、各粒子の切り出しを行うための2値化のしきい値 (上限値と下限値) を最初に設定する。このしきい値は、各摩耗粒子固有の値となることから、この値を輝度の特徴量とする。

次に、このしきい値を用いて画像中の摩耗粒子を2値化し、その粒子のラベリング<sup>(17), (18)</sup>を行う。なおラベリング処理により、画像中 (512×480画素中) の粒子の個数が分かる。その際、画像データ中に背景ノイズが含まれていることから、ノイズ除去処理を行う。そして、ラベリングされた各粒子に対して、粒子の形状に関する特徴である面積・周囲長・円形度を以下の様に計算する<sup>(18), (19)</sup>。

- (a) 面積 : 図形に属する画素数を計算。
- (b) 周囲長 : 図形の輪郭線の画素数を計算。斜め方向は垂直・水平方向に対して $\sqrt{2}$ 倍して補正。
- (c) 円形度 : 面積, 周囲長を元に、形状の複雑さを測る特徴量。

$$\text{円形度} = 4\pi (\text{面積}) / (\text{周囲長})^2$$

よって特徴量は、2値化処理における輝度ヒストグラムの上限値・下限値, 図形形状である面積・周囲長・円形度の5つとなり、この5つの特徴量により特徴空間分布を形成することとする。

しかしながら、特徴をそのまま特徴空間の軸にとって良いかどうか問題となる。すなわち、特徴軸の取り方により、ユークリッド距離が異なることから、特徴軸は何らかの形で正規化する必要がある。正規化には種々の方法が考えられているが、平均値の周りの分散を各軸について等しくする方法<sup>(16), (17)</sup>を適用する。この正規化手法を以下に述べる。

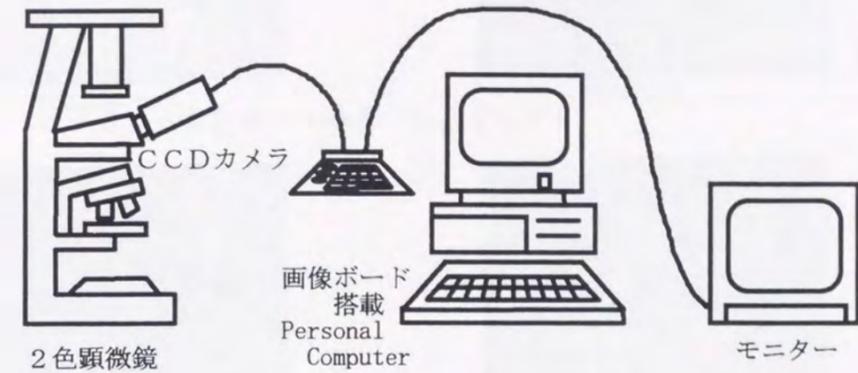


図5.4 摩耗粒子画像の取得・処理システム

Fig.5.4 The system to get and process digital images

表5.2 画像データ取得システムの仕様

Table5.2 Specificaiton of the system

2色顕微鏡	: OLYMPUS社製 BH-2
CCDカメラ	: 島津理化器社製 CCD-21
画像ボード	: サイバーテック社製 CT-9801E
コンピュータ	: 日本電気社製 PC98シリーズ

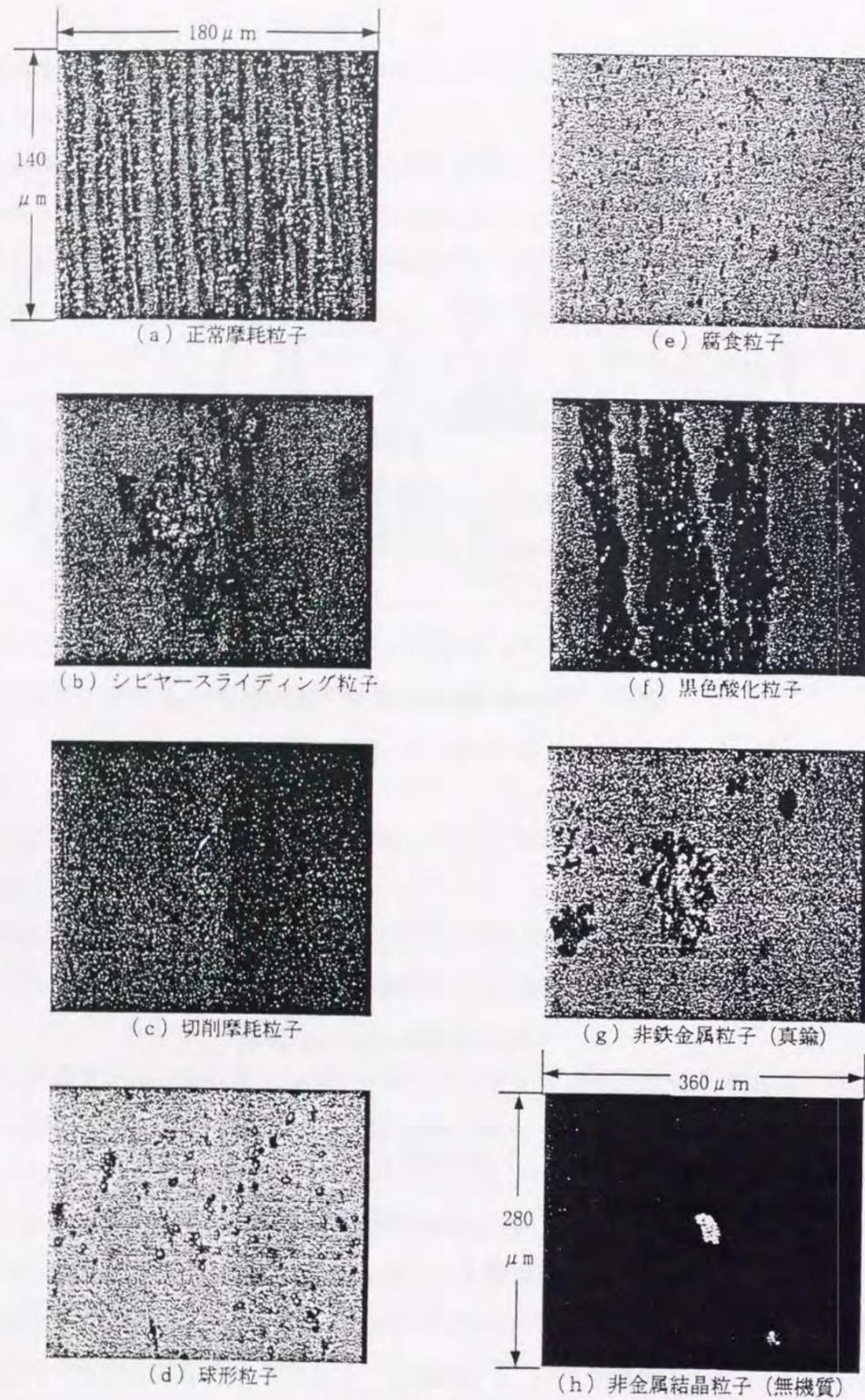


図 5.5 摩耗粒子画像

Fig.5.5 Wear particle images

n次元空間における標準パターンによるサンプル集合を

$$\{X_1, X_2, \dots, X_M\} \quad (5.1)$$

とし, 各サンプル点は

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (5.2)$$

とする。このとき, 各特徴量の平均値・分散として

$$\bar{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_{ik} \quad (5.3)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 \quad (5.4)$$

を求める。新しく正規化された軸は, 各サンプル点を

$$X_i = \left( \frac{x_{i1}}{\sigma_1}, \frac{x_{i2}}{\sigma_2}, \dots, \frac{x_{in}}{\sigma_n} \right) \quad (5.5)$$

と表すことになる。なお本論文では, 識別する摩耗粒子数を 8種, 特徴量を 5 としていることから,  $M=8, n=5$  として特徴軸を正規化している。

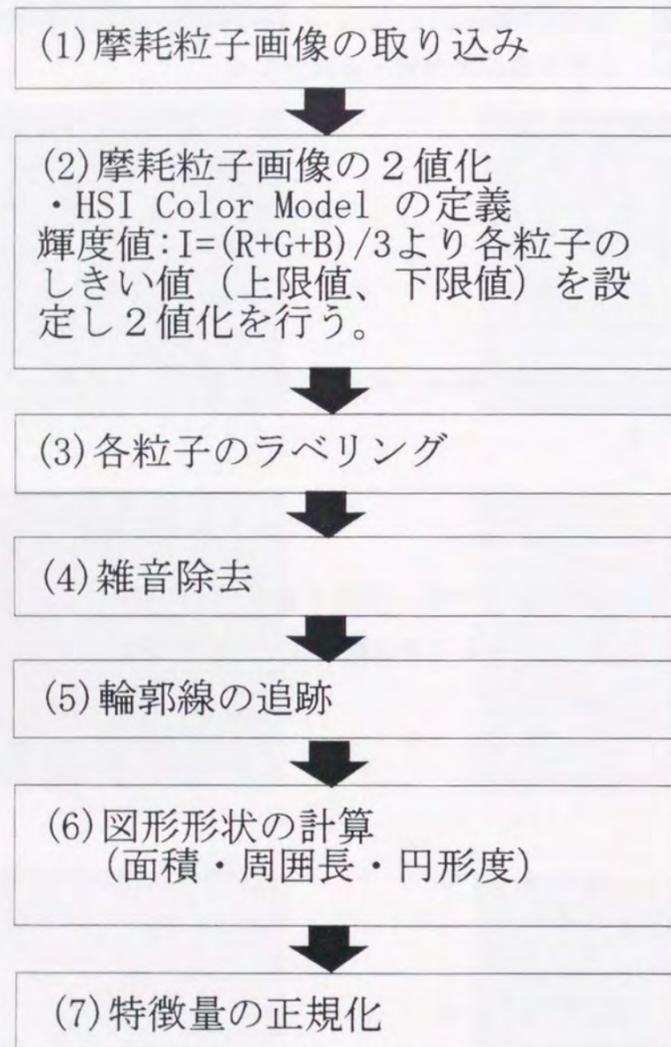


図5.6 前処理部のフローチャート

Fig.5.6 The flowchart of pre-processing

## 5.2.4 ニューラルネットワークによる認識法

上記において正規化された特徴データを用いて、摩耗粒子の種類判別を、図5.7に示す3層の階層型ニューラルネットワークにより行う。ニューラルネットワークの各パラメータは表5.3の通りとした。入力層ユニット数は、特徴量が5であることから5とした。中間層ユニット数は、学習・認識に影響を及ぼすことから、10~60で検討を行った。出力層ユニット数は摩耗粒子が8種であることから8とした。なおユニットの入出力変換関数はシグモイド関数であり、学習は逐次修正によるバックプロパゲーション(誤差逆伝搬法)学習則を用いた”教師あり学習”である<sup>(17)・(21)</sup>。学習の収束条件は最小2乗誤差が0.1以下か、最大学習回数が1000回となった場合とした。

学習を行う際、標準データである学習データの決定が重要となる。すなわち、学習データが各摩耗粒子の特徴を表現していることが必要であることから、本論文では各摩耗粒子数個の特徴量の平均値を、上述した様に正規化し学習データとした。表5.4に学習データを作成する際に用いたデータ数と認識(判別)データ数を示した。なお同表の学習データを作成した際のデータと認識データは重複していない。各摩耗粒子のデータ数における相違は発生頻度に関係しており、データ数が少ない粒子は発生頻度が低く、取得データ数が少なく、一方、データ数が多い粒子は発生頻度が高く、データ取得が容易であったことに因っている。また、認識データの特徴量の正規化は、標準データである学習データから求めた分散値を用いている。

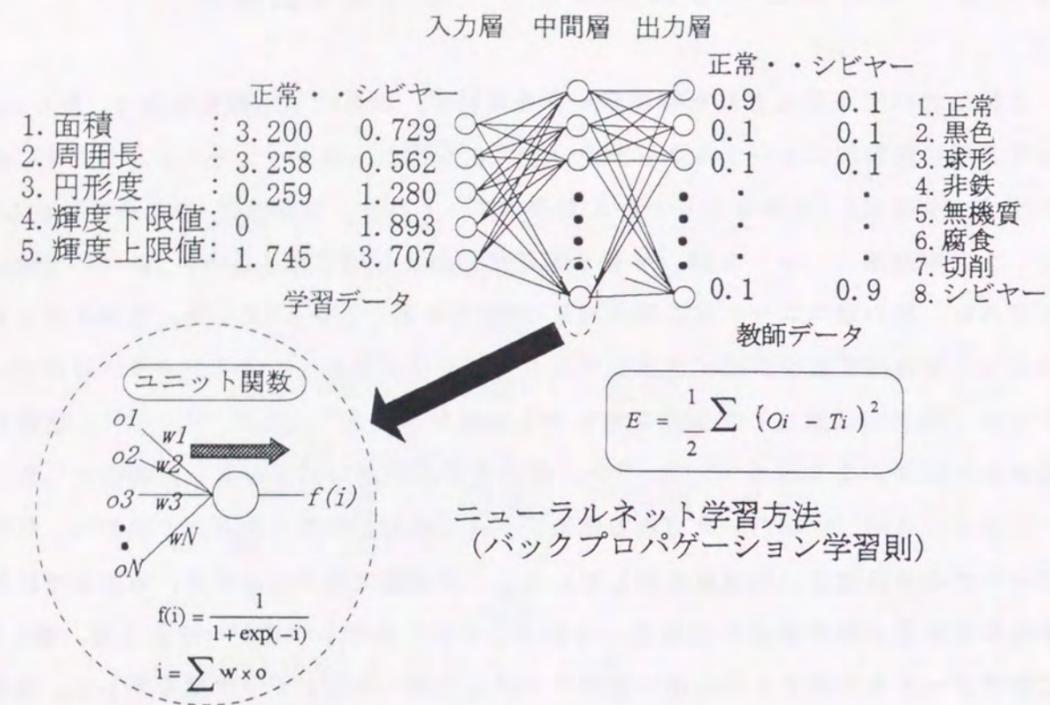


図5.7 3層構造ニューラルネットワーク

Fig. 5.7 3-layered Neural Networks

表5.3 3層ニューラルネットワークの各パラメータ

Table5.3 The parameter of 3-layered Neural Networks

入力層ユニット数	: 5
中間層ユニット数	: 10~60
出力層ユニット数	: 8
ラーニングレート $\eta$	: 0.2
モーメントム $\alpha$	: 0.9
最小2乗誤差	: 0.1
最大学習回数	: 1000
ユニット変換関数	: シグモイド関数

表5.4 学習・認識データ数

Table5.4 The number of training and recognizing data

摩耗粒子の種類	学習データ作成の際のデータ数	認識データ数
1. 正常摩耗粒子	20	57
2. シビヤースライディング粒子	4	5
3. 切削摩耗粒子	5	6
4. 球形粒子	20	90
5. 腐食粒子	20	67
6. 黒色酸化粒子	8	9
7. 非鉄金属粒子	3	4
8. 非金属結晶質粒子 (無機質)	6	6
粒子数の合計 (330)		244

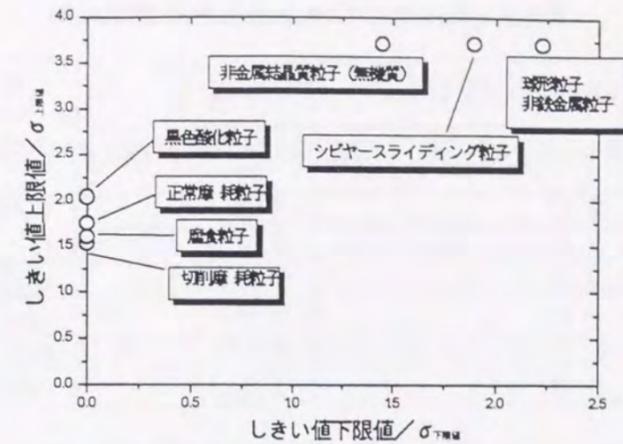
### 5. 2. 5 摩耗粒子の検出・認識結果

前処理部により得られた摩耗粒子標準データ（学習データ）の特徴空間マッピングを図5.8に示す。本論文では、輝度における2値化のしきい値（上限値・下限値）と、形状を示す面積・周囲長・円形度の5つを摩耗粒子の特徴量としたことから、5次元空間表現（5本の特徴軸）を示す必要がある。しかしながら、5次元空間を示すことは表現上困難なことから、5次元特徴空間を分割して表現し、同図(a)に輝度値による2次元マッピング、同図(b)に形状による3次元マッピングを示した。なお同図(b)の面積・周囲長・円形度の各軸は互いに従属関係にあることは明らかであることから、各軸は正確には直交していないが、本論文では直交系と仮定して取り扱うこととした。

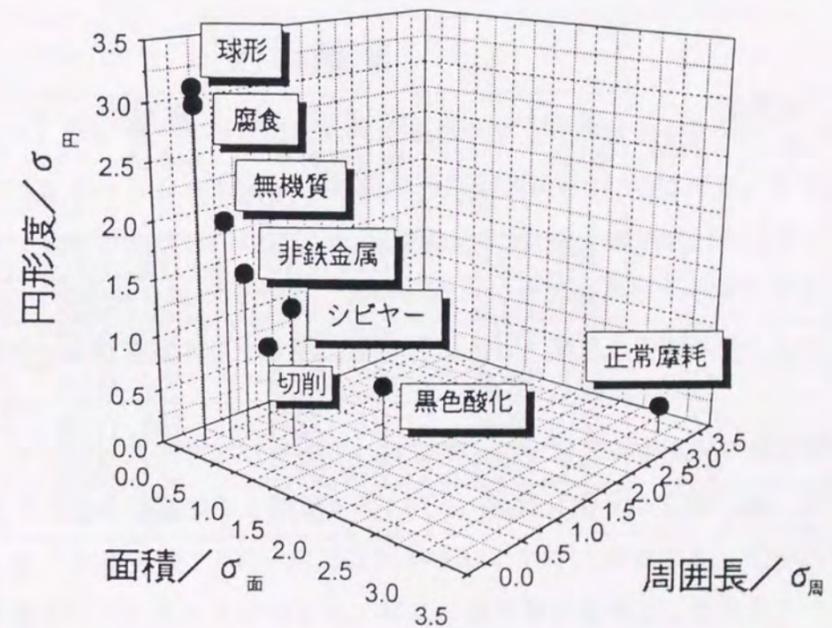
同図(a, b)より、各摩耗粒子間にある程度の距離が保たれてはいるが、各摩耗粒子を認識する距離を任意に決定することは難しいことが分かる。ニューラルネットワークは、このような空間分布に対して学習によりクラス分けを実現するとされている<sup>(18)</sup>~<sup>(22)</sup>。

実際に、この標準データによる5次元特徴空間分布を3層型ニューラルネットワークに学習させた結果を表5.5に示す。同表は、各ネットワークの学習収束時における学習回数と最小2乗誤差値を示しており、各ネットワークは中間層ユニット数によらず、学習収束条件である最小2乗誤差0.1以下を満たしたことが分かる。

これらのネットワークを用いて入力データを認識させた結果を表5.6に示す。同表の認識に用いた入力データは、学習データを作成した際に用いたデータ群を含めたデータ（粒子数；86）と、学習データ群を含まない認識データ（全粒子数：244）である。認識条件は各摩耗粒子に対応する出力層ユニットが最大値を示す場合とした。



(a) 輝度値による2次元マッピング



(b) 形状による3次元マッピング

図5.8 摩耗粒子標準データの特徴空間マッピング

Fig.5.8 The feature's map expression of the training data

表5.5 各ネットワークにおける学習結果

Table5.5 The training results

中間層ユニット数	学習回数[回]	収束2乗誤差
10	144	0.09999
20	132	0.09973
30	194	0.09978
40	350	0.09926
50	113	0.09971
60	111	0.09986

表5.6 中間層ユニット数と認識率

Table5.6 The relation between the number of hidden units and the recognition rate

中間層 ユニット数	認識率[%]		
	学習データ のみ :86	学習データ を含む :330	認識データ のみ :244
10	89.535	83.030	82.787
20	88.372	85.455	84.426
30	93.023	86.364	83.607
40	91.860	85.758	84.016
50	90.698	85.758	84.016
60	91.860	86.667	84.836
平均	90.891	85.505	83.948

表5.7 各粒子ごとの認識率

Table5.7 The recognition rate of each wear particle

中間層 ユニット数 / 摩耗粒子分類	認識率 [%] (学習データを含む : 330)						
	10	20	30	40	50	60	平均
1. 正常摩耗粒子	68.831	67.532	70.130	70.130	70.130	70.130	69.481
2. シビヤースライ ディング粒子	55.556	100.000	100.000	100.000	88.889	88.889	88.889
3. 切削摩耗粒子	100.000	90.909	100.000	90.909	100.000	100.000	96.970
4. 球形粒子	87.273	89.091	87.273	88.182	87.273	88.182	87.879
5. 腐食粒子	100.000	100.000	98.507	98.851	97.700	100.000	99.176
6. 黒色酸化粒	76.471	76.471	88.235	76.471	88.235	88.235	82.353
7. 非鉄金属粒子	57.143	57.143	57.143	57.143	57.143	57.143	57.143
8. 非金属結晶質 粒子(無機質)	83.333	83.333	91.667	83.333	83.333	83.333	84.722

同表より、学習データ作成の際に用いたデータ（”学習データのみ”，粒子数：86）のニューラルネットワークによる認識率の平均値は約91[%]であり、学習データを含むデータ（全粒子数：86+244=330）の認識率は約86[%]、認識データ（粒子数：244）のみで約84[%]であることが分かる。実際に本システムを適用する場合には、学習データと認識データは異なるデータ群であることから、実用上の本システムの認識率は84[%]である。

また、本システムがどのような粒子に対して有効であるかを検討する必要があることから、粒子ごとの認識率として表5.7に示す。同表における認識率は、学習データを含むデータ（全粒子数：330）による値を示している。同表より、粒子の種類により認識率が異なっていることが分かる。特に、異常摩耗粒子として注意すべきとされているシビヤースライディング粒子、切削摩耗粒子、球形粒子、黒色酸化粒子を認識率82~97[%]という高い値で検出していることから、本システムは十分に実用化できるといえる。一方、認識率が低い粒子（正常摩耗粒子、非鉄金属粒子）は、その特徴量による分布の分散が大きいことに起因していると考えられる。なお、フェログラフ

ィー分析法の診断は摩耗量を None, Few, Moderate, Heavy の4段階に分けて判定する<sup>(15, 16)</sup>ことから, 本システムは摩耗粒子を自動検出・判別し, 劣化状態(摩耗粒子の個数・大きさより)を判定する上で有効であることが分かる。

### 5. 3 結言

本章では, 同期機すべり軸受の劣化診断法であるフェログラフィー分析法の摩耗粒子自動検出を実現するため, コンピュータによる画像処理技術とニューラルネットワークを用いたシステムを提案した。

具体的には, フェログラフィー分析法で使用される2色顕微鏡に取り付けたCCDカメラによって得たデジタル画像から, 画像処理技術を適用することで各摩耗粒子の特徴量の抽出を行い, ニューラルネットワークを用いてこの特徴量から摩耗粒子の判別を行うものである。得られた結果は次のとおりである。

(1) 本システムは認識率 84[%] 以上で摩耗粒子を判別し, 同時にその摩耗粒子の個数, 大きさ(面積)を計測していることから, 軸受部の劣化状態の自動判定を可能とした。

(2) 発生機構から特に注意すべき異常摩耗粒子とされているシビヤースライディング粒子, 切削摩耗粒子, 球形粒子, 黒色酸化粒子を認識率 82~97[%]という高い値で検出していることから, 本システムは十分に実用化可能であることを示した。

## 第5章 文献

- (1) 電気学会編: 電気設備の診断技術, オーム社, 1988年
- (2) 絶縁材料微小放電劣化調査専門委員会: "部分放電劣化", 電気学会技術報告(II部)第164号, 1985年4月
- (3) 運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会; "電力設備の運転中絶縁診断技術", 電気学会技術報告(II部)第402号, 1992年1月
- (4) 電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会: "電力設備の絶縁余寿命推定法", 電気学会技術報告 第502号, 1994年7月
- (5) 特別高圧回転機・ケーブル絶縁の劣化診断技術調査専門委員会: "特別高圧回転機・ケーブルの絶縁劣化診断技術", 電気学会学術報告 第267号 1988年3月
- (6) 木村健: "高電圧回転機のオンライン絶縁診断技術の動向", 電学論B, 110巻12号, pp. 991-994, 平成2年
- (7) G. C. Stone, H. G. Sedding, N. Fujimoto, and J. M. Braun: "Practical Implementation Ultrawideband Partial Discharge Detectors", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, pp. 70-81, February 1992
- (8) Sher Zaman Khan, Zhu Deheng, Jin Xianhe, Tan Kexiong: "A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 700-707, August 1995
- (9) H. G. Sedding, S. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 700-706, December 1991.
- (10) S. R. Campbell, G. C. Stone, H. G. Sedding, W. McDermid, R. Busse, "Practical On-line PD Tests for Turbine Generators and Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 281-287, June 1994.
- (11) G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding, W. McDermid: "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4, pp. 567-577, August, 1995
- (12) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, Akira Nishimura, Hideki Tokura,

Iwao Okada : "Verification of the Detection of Partial Discharges by Microwave", 1995

International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp. 311-314

- (13) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 音羽克則, 黒木悟, 森山隆 :  
” G H z 帯電磁波空間位相差法を用いた発電機固定子コイルの非接触部分放電  
検出システムの開発” 電学論 B, 117巻2号, pp. 224-232, 1997年2月
- (14) 野呂瀬進, ” フェログラフィーとその応用”, 機械の研究 第37巻 第1号,  
pp. 9~14, 1985年
- (15) 野呂瀬進, 菊池正孝, 凌家杭, 笹田直, ” フェログラフィーによる軸受損傷過  
程の追跡”, 潤滑 第33巻 第7号, pp. 533~539, 1987年
- (16) 日本潤滑学会編, ” 潤滑故障例とその対策”, 養賢堂,
- (17) 長尾真, ” 画像認識論”, コロナ社, pp. 114~126
- (18) 安居院猛, 長尾智晴, ” 画像の処理と認識” 昭晃堂 pp. 83~114, pp. 176~189
- (19) 小路祐吉, 高津直由, 王征成, ” ニューラルネットによるはんだ外観検査”,  
信学論 D- II, Vol. J78-D- II No. 4 pp. 589-596 1995年4月
- (20) Christian Cachin, Hans Jurg Wiesmann, "PD Recongition with Knowledge-based Preprocessing  
and Neural Networks", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 4,  
August 1995 pp. 578-589
- (21) N. Hozumi, T. Okamoto, T. Imajo, " Discrimination of Partial Discharge Patterns Using a Neural  
Network", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 3, pp. 550-556, June 1992
- (22) Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods "Digital Image Processing pp. 221-251, Addison  
Wesley Publising Company

## 第6章

### 結 論

本論文は、電力機器の診断技術開発の一環として、現在この分野で重要な課題とな  
っているGIS（ガス絶縁開閉装置）と発電機の固定子コイルの絶縁破壊の予兆現象  
であるPD（部分放電）の検出技術の開発と、発電機・電動機等の回転機軸受部の自  
動診断技術の開発を目的として行った研究成果を纏めたものである。以下に、第2章  
から第5章において得られた成果を述べ結論とする。

#### <第2章>

第2章では、絶縁劣化の予兆現象であるPD（部分放電）から放射される電磁波に  
着目し、その電磁波を検出する電磁波空間位相差法の提案と、検出システムの開発を  
行った。電磁波空間位相差法は放射電磁波を複数のアンテナで受信することにより、  
各アンテナ間の到達時間差を求める方法である。本手法をGIS（ガス絶縁開閉装置）  
と、発電機の固定子コイル絶縁に適用した。なお、GISではVHF帯（MHz）電  
磁波、発電機ではSHF帯（GHz）電磁波を受信・解析した。得られた結果は次の  
とおりである。

(1) SF<sub>6</sub>ガスで絶縁されたGIS内において発生させたPDより放射されるVHF帯広帯域電磁波(20[MHz]~200[MHz])を複数(4本)の検出用アンテナで受信し、電磁波空間位相差法によりPDの検出を行った。放射電磁波の到達時間差が、電磁波空間位相差法より求まることから、部分放電発生スパンの位置標定を非接触で行うことが可能となった。

また、検出電荷量はアンテナとの距離に依存するが、アンテナをよりGISの近傍(数[m]程度)に配置して測定を行うことにより、数100[pC]の部分放電を検出できることが可能となった。

(2) 発電機固定子コイルにおいて発生したPDを非接触計測可能とするシステムを開発した。本システムは、PDによって放射されるマイクロ波帯電磁波を2本のアンテナで受信し、マイクロ波プリアンプを通した後に、独自に設計・製作したGHz帯相関型受信機(ダウンコンバータ)で周波数変換し、電磁波空間位相差法を適用することで、PDの検出を行うものである。

固定子コイル部分モデルに対して本システムを適用した結果、本システムは固定子コイル部分モデルのPD(数1000[pC])から放射されたマイクロ波帯電磁波を検出した。すなわち、本システムは固定子コイルと非接触で、放電電荷量が数1000[pC]程度のPD検出を可能とすることを示した。

また、実運用に供している火カタービン発電機の定期分解点検時において、本システムを用いたPD検出を実施した結果、本システムは実機においても、放電電荷量が数1000[pC]のPDを検出可能であることを示した。そして、発電機運転中のPD検出を行うために、発電機内に2本のアンテナを取り付けて計測を行った結果、本システムは発電機運転中においても、放電電荷量が数1000[pC]程度のPDを検出可能とすることを示した。

### <第3章>

第3章では、SF<sub>6</sub>ガス中におけるPDの放電電荷量とPDにより放射される電磁波の周波数時間変化(ダイナミックスpektrum)との関係について検討した。なお、PDの時間-周波数解析を行うにあたり、ウェーブレット変換を用いる手法を提案し

適用した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 同一の欠陥に対し、電圧を増減させてPD放電電荷量を増減させた場合、PDの放電電荷量と放射電磁波の周波数成分との間に相関関係が存在することが明らかになった。すなわち、PDの放電電荷量が小さい場合は、その放射電磁波は主に高周波成分(140-200[MHz])から成っており、放電電荷量の増加に伴い、低周波成分(20-80[MHz])が増加し、且つ、その低周波成分の持続時間も増加することが分かった。また、この結果は統計的にも再現性があることが確かめられた。

(2) 本手法は放電電荷量が数100[pC]レベルである場合においても、その生起時間を正確に検出することが可能であることを示した。よって、電力機器の絶縁劣化の予知方法として、PDの放射電磁波の周波数時間変化(ダイナミックスpektrum)を常時監視することの可能性が示された。

### <第4章>

第4章では、発電機固定子コイルの絶縁破壊事故を未然に防止するという観点から、絶縁破壊直前のGHz帯放射電磁波を開発したシステムにより測定し、コイルの劣化状態を評価する診断法を検討した。運転中発電機における固定子コイルの劣化要因としては複数上げられるが、特に、電氣的劣化にのみ着目し、絶縁破壊試験によってコイルの劣化進展を模擬した。

実験としては、実運用に供していた火カタービン発電機(定格容量156[MVA]、定格電圧18[kV]、累積運転時間145,578[h])よりサンプリングした固定子コイルの絶縁破壊試験を行い、そのGHz帯放射電磁波の測定を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) 破壊実験に用いた固定子コイルの絶縁破壊電圧の分布は、ほぼ正規分布であり、従ってコイルの寿命を示す残存破壊電圧最低値は3σ管理法から59.52[kV]と求められた。そして、各印加電圧に対するコイルの絶縁劣化状態を正規分布関数により累積破壊確率として示した。

(2) GHz帯放射電磁波の強度と発生部分放電パルス数が破壊直前に急増することが分かった。放射電磁波の印加電圧に対する発生位相角より、絶縁破壊の初期段階では印加電圧の微分値が大きい位相角(0, 180[deg])において部分放電による破壊が進展し、破壊直前では部分放電発生位相角がシフトし、印加電圧の最大値となる位相角付近(20~90, 200~270[deg])において大きい部分放電パルスが発生し、全路破壊に至ることが分かった。

(3) GHz帯放射電磁波のパルス数と3 $\sigma$ 管理法から求め得る累積破壊確率とを照らし合わせることで、コイルの劣化状態を推定し、発電機運転停止の一つの基準となる可能性を示した。

#### <第5章>

第5章では、同期機すべり軸受の劣化診断法であるフェログラフィー分析法の摩耗粒子自動検出を実現するため、コンピュータによる画像処理技術とニューラルネットワークを用いたシステムを提案した。

具体的には、フェログラフィー分析法で使用される2色顕微鏡に取り付けたCCDカメラによって得たデジタル画像から、画像処理技術を適用することで各摩耗粒子の特徴量の抽出を行い、ニューラルネットワークを用いてこの特徴量から摩耗粒子の判別を行うものである。得られた結果は次のとおりである。

(1) 本システムは認識率84[%]以上で摩耗粒子を判別し、同時にその摩耗粒子の個数、大きさ(面積)を計測していることから、軸受部の劣化状態の自動判定を可能とした。

(2) 発生機構から特に注意すべき異常摩耗粒子とされているシビヤースライディング粒子、切削摩耗粒子、球形粒子、黒色酸化粒子を認識率82~97[%]という高い値で検出していることから、本システムは十分に実用化可能であることを示した。

以上より、著者が行った研究は電力機器・設備の事故の未然防止、保守業務の合理化を促進するとともに、効率的な更新計画に反映できるという点で、工業的にもきわめて意義が大きいものであるといえる。

## 謝 辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻電力工学領域において、行われたものである。

本研究を遂行し、論文を作成するにあたって、自由な研究環境を与えて下さり、御指導を頂きました大阪大学大学院教授、松浦虔士先生に衷心より謝意を表し、御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、直接御指導、御鞭撻を頂き、また、研究者の生き様を御教示して下さいました大阪大学助教授、河崎善一郎先生に衷心より謝意を表し、御礼申し上げます。

論文の作成にあたり、御指導を頂きました大阪大学大学院教授、熊谷貞俊先生、同教授、辻毅一郎先生に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、御助言を頂きました大阪大学講師、松原一郎先生、同助手、舟木剛先生に深く感謝の意を表し、御礼申し上げます。

研究者としての基礎を御指導頂きました武蔵工業大学教授、光井英雄先生、同教授、曾祢元隆先生、同講師、飯島伸一先生に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

本研究に対して、多大なる御助力、御指導を頂きました関西電力株式会社の関係者各位に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

実験、計測に際し、有益な御討議、御助力を頂きました三菱電機株式会社の関係者各位に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

計測システムの製作にあたり、有益な御討論、御助言を頂きました日本通信機株式会社の関係者各位に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

実験に際し、御助力を頂きました関西テック株式会社の関係者各位に感謝の意を表し、御礼申し上げます。

本研究の途上、熱心な御討論と御協力を頂きました、東芝株式会社、和田将一博士（大阪大学修了）、牛尾知雄氏、大貫淳氏、道平雅一氏、李鍾浩氏、内海真志氏、鈴木雄一氏、Tungkanawanich Ampol 氏、近藤憲司氏、阿部淳一氏をはじめとする電力工学領域の諸兄に感謝の意を表し、御礼申し上げます。

最後に、心置きなく研究に打ち込ませてくれた両親に、心から感謝致します。

## 研究業績

### 学会誌掲載論文（査読あり）

- (1) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法”，電気学会B部門誌，115巻10号，pp. 1168-1173，1995年10月
- (2) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏男，音羽克則，黒木悟，森山隆：“GHz帯電磁波空間位相差法を用いた発電機固定子コイルの非接触部分放電検出システムの開発”，電気学会B部門誌，117巻2号，pp. 224~232，1996年2月
- (3) 川田昌武，和田将一，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“SF<sub>6</sub>ガス中における部分放電現象のウェーブレット変換を用いた時間周波数解析”電気学会B部門誌，117巻3号，pp. 338~345，1997年3月
- (4) 川田昌武，内海真志，廬毅，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“画像処理技術とニューラルネットワークを適用したフェログラフイー分析法による同期機すべり軸受の潤滑油中摩耗粒子検出”，電気学会B部門誌，117巻8号，pp. 1132-1139，1997年8月
- (5) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定”，電気学会B部門誌，1998年2月
- (6) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏男，黒木悟，大澤輝也，田中宏毅：“発電機固定子コイルの絶縁破壊現象に伴うGHz帯放射電磁波測定による絶縁劣化診断法”，電気学会B部門誌，1998年3月

### 博士論文の内容とは直接関係無い論文（査読あり）

- (7) 和田将一，牛尾知雄，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“冬季雷放電に伴う電界変化のウェーブレット解析”，電気学会B部門誌，116巻4号，pp. 469-474，1996年4月

### 投稿中論文 (査読あり)

- (8) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura, "Detection of Wide-band E-M signals Emitted from Partial Discharge Occurring in GIS using Wavelet Transform", IEEE Power Engineering Society (Submitted, 18 September, 1997)
- (9) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 黒木悟, 大澤輝也, 田中宏毅: GHZ帯電磁波空間位相差法を用いた火力タービン発電機の運転中における部分放電検出, 電気学会B部門誌, 1997年12月投稿

### 英訳論文

- (1) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, Makoto Kawasaki, "Noncontact Detection of Electromagnetic Noise Occurrence Due to Partial Discharge by Spatial Phase Difference Method", Electrical Engineering in Japan, Vol. 118, No. 4, March 1997, Scripta Technica, Inc.,
- (2) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, Toshio Musashiya, Katsunori Ooba, Satoru Kuroki, Takashi Moriyama, "Development of a New System for Detecting Microwave Associated with a Partial discharge of the Stator Coil in Generator Using Spatial Phase Difference Method", Electrical Engineering in Japan, Scripta Technica, Inc., (印刷中)

### 国際会議講演論文集 (査読あり)

- (1) Masatake Kawada, N. Iijima, Y. Akima, M. Sone: "Singularity of Multi-Layered Neural Networks on Back-Propagation", IJCNN'93, 名古屋, 1993年10月
- (2) Masatake Kawada, A. Taguchi, N. Iijima, H. Mitsui, M. Sone: "Recognizing Pale Letters and Color Letters with Multi-Layered Neural Networks", ICNN'94, オーランド (USA), 1994年6月
- (3) Masatake Kawada, R. Yi, Z. Kawasaki, K. Matsuura: "An Experiment of the Detection of Partial Discharges by Microwave", JCI-5, pp. 383~386, 26th Symposium on Electrical Insulating Materials, 大阪, 1994年9月 JCI-5
- (4) Masatake Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura: "Verification of the Detection of Partial Discharge by

Microwave", pp. 311~314, 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 東京, 1995年9月 N1

- (5) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, "A New Non-Contact Insulation Insulation Diagnostic System for High-Voltage Electrical Power Apparatus", IEE Japan Power & Energy '96 139 (EE01 High Voltage and Insulation) pp. 225~230, 大阪 (大阪大学), 1996年8月7日~8月9日
- (6) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, "A New On-Line Insulation Diagnostic Technique for Power Apparatus by Detecting Electromagnetic Signals Emitted from PD", 1996 Asian International Conference on Dielectrics And Electrical Insulation, 1996年10月8日~11日 西安 (西安交通大学: 中国)
- (7) Yu-ichi Suzuki, Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, "Three-dimensional Location of Partial Discharges", 1996 Asian International Conference on Dielectrics And Electrical Insulation, 1996年10月8日~11日 西安 (西安交通大学: 中国)
- (8) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura, "Time-Frequency Analysis of E-M signals Emitted from a Partial Discharge Occurring in Gis using Wavelet Transrorm", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington, D. C., USA 7-10 June 1998 (Submitted, 13 September, 1997)
- (9) Masatake Kawada, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura, "Diagnostic Technique to Assess the Condition of Stator Insulation by Measuring Microwave Associated with Dielectric Breakdown", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington, D. C., USA 7-10 June 1998 (Submitted, 13 September, 1997)

### 口頭発表

- (1) 川田昌武, 酒井晃, 飯島伸一, 田口亮, 曾禰元隆: "多層構造ニューラルネットワークの特異性", 電気学会全国大会, 熊本, 1993年3月
- (2) 川田昌武, 田口亮, 光井英雄, 曾禰元隆: "多層構造ニューラルネットワークを用いた濃淡文字, 色文字認識" 電子情報通信学会全国大会, 東京, 1994年3月
- (3) 川田昌武, 盧毅, 河崎善一郎, 松浦虔士: "空間位相法を用いた絶縁故障点の標

- 定” 電気学会，大阪，1994年11月
- (4) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“電磁波空間位相差法を用いた絶縁診断”，電気学会，1995年2月 誘電・絶縁材料研究会 DEI-95-32 (Insulation Diagnosis using Spatial Phase Difference Method)
- (5) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“電磁波空間位相差法を用いた部分放電検出法”，電気学会，北海道大学 札幌，1995年3月 887 産業計測・制御
- (6) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“GH $\alpha$ 帯電磁波による非接触部分放電検出法”，電気学会，名古屋（名城大学），1995年8月 520 機器診断・監視システム 電力・エネルギー部門大会
- (7) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“部分放電現象のウェーブレット解析”，電気学会全国大会，東京（早稲田大学），1996年3月 936 産業計測・制御（産業計測・解析・診断）
- (8) 内海真志，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“空間周波数画像解析による摩耗粒子識別法”，電気学会全国大会，東京（早稲田大学），1996年3月 931 産業計測・制御（産業計測・解析・診断）
- (9) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“配電線における部分放電活線検出法”，電気学会全国大会，東京（早稲田大学），1996年3月 935 産業計測・制御（産業計測・解析・診断）
- (10) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“部分放電現象の時間周波数解析”，電子情報通信学会総合大会，東京（東京工業大学），1996年3月 SA-4-6 ウェーブレットとその応用
- (11) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法”，第98回電気材料技術懇談会 1996年5月 大阪
- (12) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“3次元的部分放電位置標定法” 電気学会 電力・エネルギー部門大会，大阪（大阪大学），1996年8月7日～8月9日 684 G210 機器診断・監視システム
- (13) 内海真志，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士：“軸受摩耗診断のための空間周波数画像解析”，電気学会 電力・エネルギー部門大会，大阪（大阪大学），1996年8月7日～8月9日 629 G204 機器診断監視システム
- (14) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“部分放電に伴うVHF帯電磁波の

- ウェーブレット解析” 第28回電気絶縁材料シンポジウム pp.115～118，平成8年9月 東京（武蔵工業大学）
- (15) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠：“配電線碍子の部分放電位置標定に関する研究” pp.231～234第28回電気絶縁材料シンポジウム 平成8年9月，東京（武蔵工業大学）
- (16) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏男，音羽克則，黒木悟，森山隆：“発電機固定子コイルの絶縁破壊時におけるマイクロ波帯放射電磁波測定，平成9年（1997年）3月電気学会全国大会，同志社大学 1815 サージ・高電圧（高電圧計測）
- (17) 内海真志，近藤憲司，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“二次元空間位相差法を用いた軸受部摩耗粒子の検出”，平成9年3月電気学会全国大会，同志社大学 1036 産業計測・制御，産業情報・制御
- (18) 近藤憲司，内海真志，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“形状及び色情報用いた摩耗粒子の識別”，平成9年3月 電気学会全国大会，同志社大学 1109 回転機（直流機・回転機技術）
- (19) 内海真志，近藤憲司，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“回転機軸受部における摩耗粒子識別法”，第109回電気材料技術懇談会 1997年3月 大阪
- (20) 鈴木雄一，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，川崎誠，“SPOT（位置標定重畳最適法）による部分放電空間標定”，第111回電気材料技術懇談会 1997年6月，大阪
- (21) 川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，武蔵谷敏夫，音羽克則，黒木悟，森山隆：“GH $\alpha$ 帯放射電磁波測定による発電機固定子コイルの絶縁劣化診断”，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会 661（G213 部分放電）1997年7月 島根大学
- (22) 川田昌武，内海真志，近藤憲司，河崎善一郎，松浦虔士，岡本智行：“画像処理技術とニューラルネットワークを適用したフェログラフィー分析法による摩耗粒子検出”，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会 570（G203 回転機等）1997年7月 島根大学
- (23) Tungkanawanich Ampol，川田昌武，河崎善一郎，松浦虔士，久納仁史，奥清司：“ウェーブレット変換を用いた配電線地絡故障時の零相電流の時間周波数解析”

### 講演

- (1) 川田昌武：“21世紀における研究開発の展望 ～分野の境界を越えた交流とその環境整備の必要性～”，電気学会A部門総合研究会特別講演・シンポジウム（若手研究者の提言）1997年11月19日 大阪ライフサイエンスセンター

### 受賞等

- (1) 1995年電気学会優秀論文発表賞受賞

