

## コンピュータ自動計測による水車発電機絶縁診断システムの開発

### Computer Automatic Aided Development of Insulation Deterioration in Stator Windings of Hydrogenerator

教授 金子 正光 (宮崎公立大学・人文学部)

学生 竹村 明人 (宮崎大学・工学部)

教授 本田 親久 (宮崎大学・工学部)

教授 大坪 昌久 (宮崎大学・工学部)

近年、電力の自由化により水車発電機の効率的保守に対する技術確立が重要課題として注目されている。水車発電機の保守点検技術は、これまでの時間計画保全が主流であったが、近年は機器の状態監視に基づく保守管理を行う状態監視保全に移行しつつある。

本研究では、超音波法の利点であるセンサの取り付け取り外しが容易であることを利用して、容易に水車発電機固定子巻線の部分放電発生位置が推定できる装置を開発するとともにその装置を用いて、運転中の水車発電機の固定子巻線から発する部分放電による超音波成分を検出して、固定子巻線の絶縁系の最弱点部を検出する必要がある。

超音波法では、ノイズ除去が比較的容易であるため高感度の測定が可能で、発電機巻線の絶縁最弱点部を検出することが可能である。現地でのデータ収集・解析のためにも、コンピュータ自動計測技術の導入が不可欠であり、著者らは、部分放電信号レベルが平均して一定である水車発電機定常運転時に、部分放電によるAE波を計測し、現場でのリアルタイム解析を可能するプログラムLabVIEWを用いた計測解析システムを開発し、その有効性を確認した。

その結果、開発したLabVIEWによる計測解析システムを用いて、AEセンサを数回取り付け作業を行うことで、水車発電機固定子巻線における部分放電の発生個所を推定することに世界ではじめて成功した。また、測定対象の水車発電機の固定子巻線は、垂直方向では中間の高さにおける部分放電によるAE信号が最も大きいことがわかった。この原因として、固定子の中間位置では最も温度が高くなり、熱的な劣化の進展に加え、空気に含まれる湿気も高くなるので、湿気による劣化も進展し固定子中間位置での部分放電によるAE信号が最も大きくなると考えられる。

キーワード：状態監視保全，オンライン絶縁診断，コンピュータ自動計測技術，  
部分放電、超音波法

## 目次

- I . はじめに
  
- II . コンピュータ自動計測技術
  - 2.1 プログラムLabVIEWの概要
  - 2.2 プログラムLabVIEWを用いた計測解析システム
  
- III . 実験の装置と方法
  
- IV . 実験結果と考察
  - 4.1 固定子巻線の超音波伝播特性
  - 4.2 固定子巻線の部分放電位置特性
    - (a) 水平方向
    - (b) 垂直方向
  - 4.3 オンライン中の部分放電特性に及ぼす影響
  
- V . まとめ

## 参考文献

## 謝辞

---

### I . はじめに

21世紀を迎え、経済成長の鈍化、規制緩和、国内外での競争の導入・拡大・激化、地球温暖化防止の観点からの環境問題など、社会的な諸情勢はきわめて大きな変化が生じている。このようななかで、高度成長時代における大量導入設備の経年劣化の問題を克服しながら、価格、品質の両面でのいっそう厳しい競争を勝ち抜いていくため、より効率的な戦略性を有する電気設備の保全方法を必要とする時代を迎えている<sup>(1)</sup>。

大容量発電機は現代社会を支える重要なインフラであり、各電力会社は、電力供給の信頼性を確保しつつ、大容量発電機の効率的運用を追求している。1950年代から発電機巻線の絶

縁方式としてエポキシレジン絶縁系が採用され、近年、巻き替え・更新実施の時期を迎えるプラントが増加してきている。そのため、老朽化したエポキシレジン絶縁方式のタービン発電機や水車発電機において、事故の未然防止、機器の効率的かつ経済的な運用などの観点から固定子巻線の余寿命診断技術が要求されている。発電機の保全方式としては、これまで時間計画保全が主流であったが、近年は機器の状態監視に基づく保守管理を行う状態監視保全に移行しつつある。運転中の発電機巻線の絶縁最弱点部の検出技術の確立は状態監視保全を行う上で、最も重要な研究課題の一つである<sup>(1)</sup>。近年における電力消費の昼夜間格差の増大に伴って、水車発電機は長い間負荷調整運転を行っている。このような起動・停止や負荷変動の頻繁な運転条件下では、水車発電機固定子巻線は、ヒートサイクルに伴う熱応力などの機械的ストレスと電氣的・熱的ストレスの複合作用により、絶縁耐力が経年的に急速に低下していくことが知られている<sup>(2)</sup>。このため、絶縁破壊事故の未然防止及び設備の有効利用などの観点から水車発電機固定子巻線の絶縁診断法の確立が重要である。

発電機巻線の内部で部分放電(PD: Partial Discharge)が発生した場合には、電氣的なパルスと同時に微小音響が発生する。一般にこれらの音響の周波数領域はかなり広いが、その超音波成分を検出するのが超音波法である。超音波法では、ノイズ除去が比較的容易であるため高感度の測定が可能で、発電機巻線の絶縁最弱点部を検出することが可能である<sup>(3)</sup>。

著者らのこれまでの研究成果から、運転中の発電機に生じる磁気振動や回転子の回転による機械的なノイズの除去方法を提案し、その有効性を実証した<sup>(3) (4)</sup>。さらに、水車発電機起動直後のPDレベルは大きく変化し、定常運転時のPDレベルは平均して一定であることなど多くの知見を得た<sup>(5)</sup>。

固定子巻線の取替計画は電気事業者にとって、経済的な面が特に重要である。その結果、水車発電機固定子巻線の劣化箇所が一部あるいは全体的なものかを調べることは、コイルの取替計画を考えるうえで重要な課題となっている。

そこで、本論文では、PD信号レベルが平均して一定である水車発電機定常運転時に、PDによるAE波を計測し現場でのリアルタイム解析を可能にするプログラムLabVIEWを用いた計測解析システムを開発し、その有効性を確認すると同時に、水車発電機固定子巻線における部分放電の発生位置を推定することができたので、以下に述べる。

## II. コンピュータ自動計測技術

### 2.1 プログラムLabVIEWの概要

一般に、計測・制御・データ処理のためのプログラム作成には、高度な数学的知識が必要である。さらに、その上に各種のプログラム言語を使用し、また、複雑な応用プログラムの

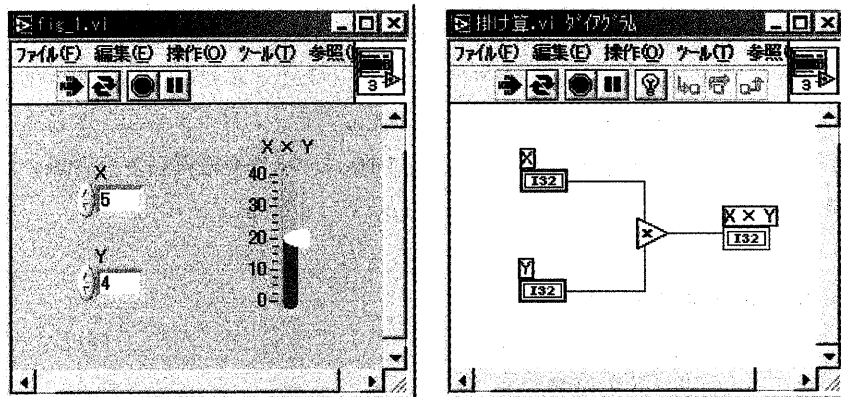
開発作業が一般的である。大学・企業などの研究開発では、コンピュータを使用した現象の計測、機器制御、データ解析は避けては通れないものであり、それに携わる研究開発者は、計測と制御、その後のデータ解析のプログラム作成に本来の研究と別の膨大な活動時間を奪われてしまうのが常である。

このような計測、制御、解析分野でのプログラム作成の煩わしさを一気に解決してくれるプログラミングツールとして世界中でプログラムLabVIEWの適用が注目されている。現在、LabVIEWは各種テストや計測、データ収集、制御科学的調査、プロセス監視、工場の自動化などに応用されている。日本ナショナルインスツルメンツは、LabVIEWグラフィカルプログラミング開発環境のメジャーアップグレード版「LabVIEW 7 Express」を平成15年7月22日にリリースした。

LabVIEWで実行されるグラフィカルプログラミングは、文字によるプログラム言語とまったく異なっている。電子回路の作成に例えれば、リード線とハンダを用いて基板上のICのピンをハンダ付けするのと同じように、ウィンドウ上で、コネクタを有するグラフィカルでさまざまな機能を持ったオブジェクト間をマウスで結線（ワイヤリング）すれば実行プログラムが作成できる。

LabVIEWを使用したプログラム開発作業は、まず、図1(a)に示すようにフロントパネル上にグラフィカルVIを配置し、作成しようとする機器の正面パネルをデザインすることからスタートする。そして、図1(b)に示すダイアグラム上で機能を持ったアイコンと組み合わせワイヤリングすることにより、プログラミングできる。図1(b)では乗算の機能を持ったアイコンを用いており、XとYの計算結果をスライドバーで表示するようにしてある。

LabVIEWにはこの他にも実際の計測・制御機器を連想させるノブ、スイッチ、ディスプレ



(a) フロントパネル

(b) ダイアグラム

図1 LabVIEWを用いた簡単なプログラミング例

イ等や高度な解析機能を持ったアイコンが多数用意されており、それらをワイヤリングすることで目的に合ったプログラムを容易かつ迅速に作成することができる。このようにLabVIEWプログラミングでは、一般の文字言語によるプログラミングとは違ったグラフィカルVI (VI: Virtual Instruments: 仮想機器) という新しいコンセプトを理解する必要がある。

## 2.2 プログラムLabVIEWを用いた計測解析システム

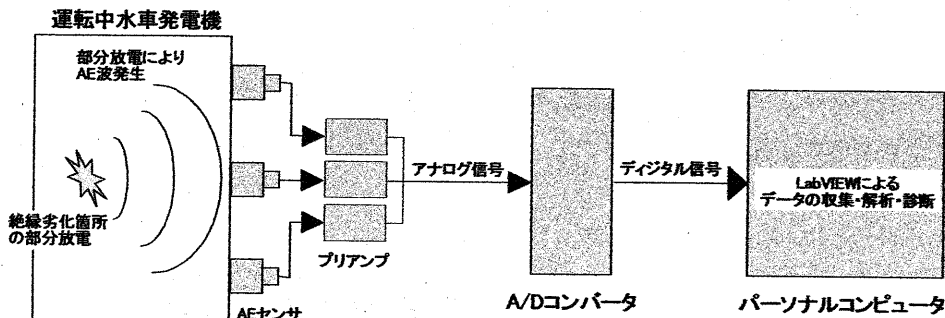


図2 LabVIEWを用いた運転中水車発電機のAE波計測解析システムの概要

図2はLabVIEWを用いた運転中水車発電機のAE波計測解析システムの概要を示す。この図に示すように、運転中水車発電機固定子巻線の絶縁劣化部分から生ずるAE波を複数のAEセンサで検出し、プリアンプにより解析できるのに十分な大きさまで増幅する。そして、A/Dコンバータを用いてアナログ信号をデジタル信号に変換し、本研究で開発したLabVIEWによる計測解析プログラムによりデータ収集・解析などを自動で行うことができる。

図3にLabVIEWによるデータ収集・解析プログラムのフローチャートを示す。A/Dボードによりデジタル化されたデータは、図3に示すようにパソコンのハードディスクドライブに保存され、そしてフィルター処理によりマシンノイズである10kHz以下をカットされる。続いてエンベロープ処

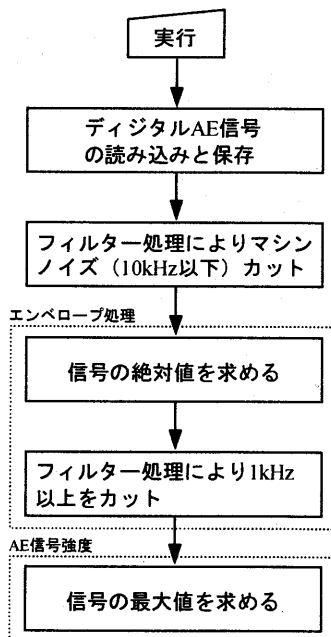


図3 LabVIEWによるデータ収集・解析プログラムのフローチャート

理を行い、ローパスフィルター処理（1kHz 以上をカット）した最大値を部分放電のAE 信号強度とする。

マシンノイズを除去する上で重要となるデジタルフィルターの種類には、無限インパルス応答フィルター（IIR）と有限インパルス応答フィルター（FIR）があり、本研究ではIIR フィルターであるバターワースフィルターを用いた。ここで、IIR フィルターを用いた理由としては、同じようなフィルター処理を行うのに通常IIR フィルターの方が必要な係数が少なく済むことにより、IIR フィルターの方が実行スピードははるかに速い上、その場で実行されるために余計なメモリが不要であるからである。また、部分放電による超音波信号は、単に信号を監視するだけであり、位相情報を必要としないのでIIR フィルターを用いた。さらに、バターワースフィルターは平坦性が最も高く、パスバンドでの均一性とストップバンドでのゼロが理想的な応答となっているので、マシンノイズ除去にはバターワースフィルターの使用が最適である。

図4はLabVIEWによるデータ収集・解析プログラムのユーザインターフェースの例を示す。図中の上部グラフはマシンノイズを除去したフィルター処理波形を示し、下部グラフはAE信号強度とその履歴を示す<sup>(6)</sup>。この図のように、プログラムLabVIEWを用いることで、現場で即座に部分放電によるAE信号のモニタリングが可能となる。

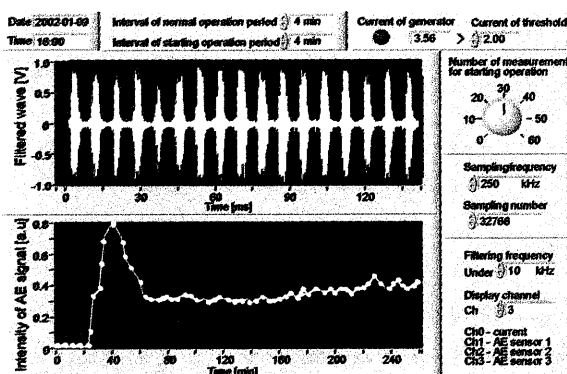


図5はAE信号読み込みからAE信号強度を求めて表示するまでのダイアグラムを示す。通常のプログラム言語を使って、信号を読み込んでから信号を保存しデジタルフィルター処理、エンベロープ処理、グラフ表示という流れのプログラミングをする場合、高度な数学的知識が必要で、さらに各種のプログラム言語の使用が必要で、複雑な応用プログラムの開発作業が要求される。しかし、LabVIEWを用いることで、図5に示すように簡単かつ迅速でグラフィカルなプログラミングで高度な計測解析プログラムが作成できる。また、LabVIEWでは高度な機能を持ったアイコンを並べワイヤリングするのでプログラムの流れがすぐわかる。そのため、現場などでプログラムの変更が要求される場合において、迅速にその要求に答えることができるなどの利点を有している。

図4 LabVIEWによるデータ収集・解析プログラムのユーザインターフェース（上部グラフ：フィルター処理、下部グラフ：AE信号強度を示す）

このように、コンピュータ自動計測としてLabVIEWを用いることで、運転中水車発電機固定子巻線の部分放電によるAE波を現場で即座にモニタリングできる。また、作業時間の限ら

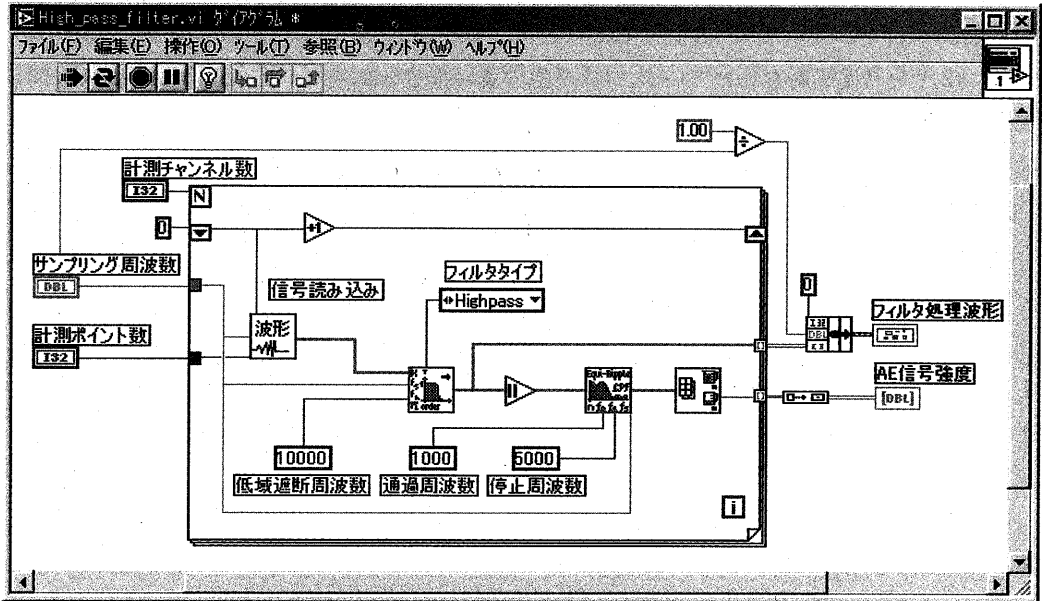


図5 AE信号読み込みからAE信号強度を求めて表示するまでのダイアグラム

れている現場でのプログラム変更も迅速に行えるので、LabVIEWは部分放電によるAE波のモニタリングに非常に有用である。

### III. 実験の装置と方法

定格電圧及び定格容量がそれぞれ 11.0kV/20700kVA の I- 発電所の運転中水車発電機を対象に、エポキシレジン絶縁系の固定子巻線の PD 発生位置を複数の AE センサを用いて調べた。I- 発電所の水車発電機は 1968 年に製造された発電機で、使用年数は 35 年である。図 6 は実機における実験装置の概略図を示す。本実験は、超音波法の利点である AE センサの取り付け取り外しが容易であることを利用している。図 6 に示すように、複数の AE センサをマグネットホルダにより固定子鉄心外枠に AE センサ間距離を 2 m とし取り付け付けた。そして、PD による AE 信号を最も大きく検出した位置を中心に AE センサ

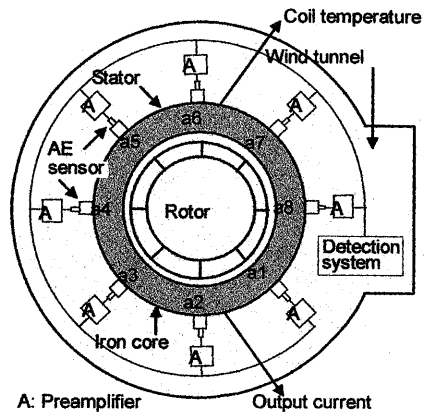


図 6 AE センサ測定技術を用いたフィールド試験における実験装置の概略図

間距離を0.5mとして取り付けた。そして、さらにPDによるAE信号を顕著に検出する位置を探し、AEセンサ間距離を狭めていき、PD発生位置の推定を試みた。このように、AEセンサの移動は複数回行い、センサ間の距離を2m, 0.5m, 0.2m, 0.1mに変化させた。

図7に固定子鉄心外枠の水平方向に複数個のAEセンサを取り付けたときの写真を示す。使用したAEセンサはtype-703 (703型, NF Electric Instruments, Model: AE 703S, 共振周波数: 70kHz)を用いた。AEセンサで検出した微弱なAE信号はプリアンプ (NF Instruments, Model: 9917,

周波数帯域: 2kHz ~ 1.2MHz)を用いて増幅し、A/Dボード (サンプリング周波数:

250kHz)を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。AE信号データについては、現場でパソコンに取り込んですぐに、第2章で述べたようにLabVIEWを用いた計測解析プログラムによりフィルター処理 (マシンノイズである10kHz以下をカット)をして、続いてエンベロープ処理を行い、ローパスフィルター処理 (1kHz以上をカット)した最大値によりAE信号強度を求めることができる携帯用AE計測装置を開発し、試作した。その写真を図8に示す。開発した携帯用AE計測装置を水車発電機内に持ち込むことにより、リアルタイムで、各センサの取り付け位置におけるPDによるAE信号強度を測定することができる。また、同時に固定子巻線の温度、発電機出力及び湿度を測定した。

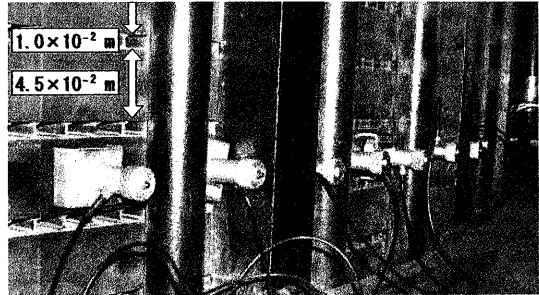


図7 固定子鉄心外枠へのAEセンサ取り付け写真

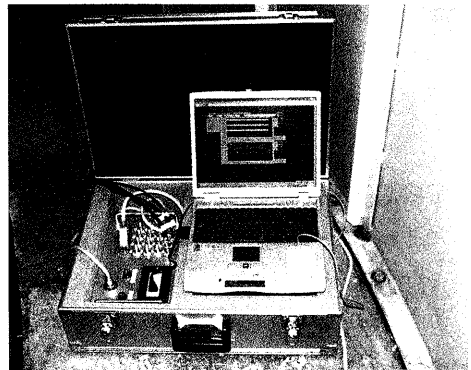


図8 携帯用AE計測装置の写真



#### IV. 実験結果と考察

##### 4.1 固定子巻線の超音波伝播特性<sup>(7)</sup>

図9はAEセンサを2m間隔に取り付けた時の各センサにおけるマシンノイズをカットした発電機運転中におけるPDによるAE信号のフィルター処理波形の例である。この図から、a4の取り付け位置の波形において運転中水車発電機固定子巻線の位置で発生するPDの特徴が最も顕著に現れていることがわかる。

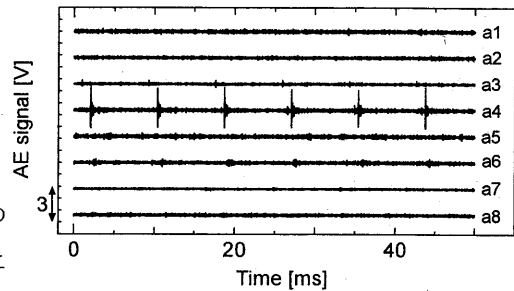


図9 PDによるAE信号のフィルター処理波形例 (10kHz以下カット、センサ間隔: 2m)

ここで、固定子鉄心を伝わる超音波の伝播特性を調べるために、発電機停止中に固定子巻線外枠の水平方向にAEセンサを取り付けて人為的に打撃を行って、打撃点から0mおよび1m, 2m, 3m, 4mの位置におけるAE信号を計測した。その打撃点から0mおよび1m, 2m, 3mの位置における解析波形の例を図10に示す。これまでの研究により、マシンノイズは主に10kHz以下であり、PDによるAE信号は10kHz以上の成分も含んでいることが分かっている<sup>(4)</sup>。そのため、10kHz以上のAE信号を対象とすることがノイズ分離に有効であり、PDの特性を調べる上で有効となる。そこで、PDの伝播特性を推測するにあたり、図10では打音によるAE波の10kHz以下をカットしたフィルター処理波形を示す。この図から、10kHz以上の帯域の信号は打撃点から遠くなるにつれて時間的な遅れと振幅の減衰を伴い伝播しているのが分かる。

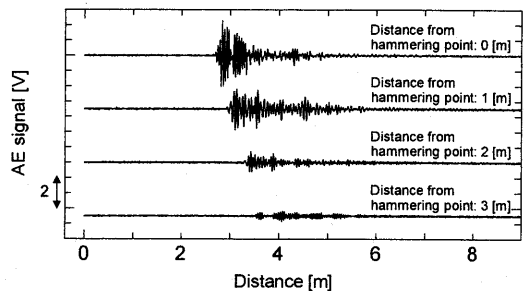


図10 打音によるAE信号のフィルター処理波形例 (10kHz以下カット、センサ間隔: 2m)

図11は打撃点0mを基準として、それぞれの位置におけるAE信号強度 (10kHz以下カット)の相対値の平均値と誤差値を示す。この図から、打撃点からの距離が長くなるに従い打音によるAE波の10kHz以上の成分は減衰する。打

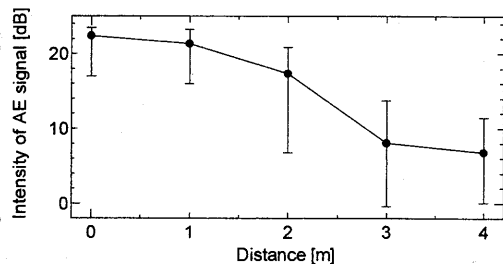


図11 打音によるAE信号強度の伝搬特性

撃点から1mのところでは減衰は約90%と小さいが、打撃点から2m以降になると約55%と半分以上も信号が小さくなっているのが分かる。そのため、PD発生箇所を推測するにあたりまず、図6のようにセンサ間距離を2mで設置することで、あるPD発生点から一番近いAEセンサまでの距離が1m以内となる。そして、図9から位置a4において強いPDによるAE信号を検出しており、その他の位置では信号が小さいか、または検出されていないので、位置a4に非常に近い点で最も大きいPDによるAE波が発生していると考えられる。そこで、固定子巻線の部分放電位置推定においては、取り付け位置a4付近を中心にしてAEセンサを移動させ、実験を行った。

#### 4.2 固定子巻線の部分放電位置特性<sup>(7)(8)</sup>

(9)

##### (a) 水平方向

図12は取り付け位置a3で、起動から定常運転における水車発電機のAE信号強度と巻線温度、出力の時系列特性である。この図から水車発電機起動時にAE信号強度は約15dBのピークを示した後に、定常運転時では平均して約13dBの安定した値を示すことがわかる。このことから、定常運転時の間にAE信号を多く測定し平均を取ることで、複数のAEセンサ間でPDによるAE信号強度の比較を行いPD発生箇所の推定をすることができると考えられる。

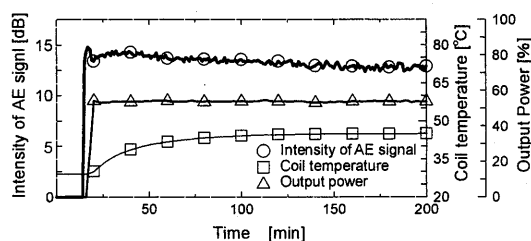


図12 AE信号強度及び巻線温度、出力の時系列特性

そこで、図6のAEセンサ取り付け位置でa4が最もPD発生箇所に近いかどうかを調べるために、PDによるAE波を多く測定して調べた。

図13に各取り付け位置でのAE信号強度の強さを表す。図中において定常運転時のAE信号強度を200回測定した時の平均値及び誤差値を示す。この図からa4の位置が最も高いAE信号強度を示しており、平均しても位置a4が固定子巻線のPD発生箇所に最も近いことが推測できる。図13から位置a4がPD発生箇所に最も近いと推測できるので、次に、図13の位置a4を中心に0.5m間隔でAEセンサを配置した。

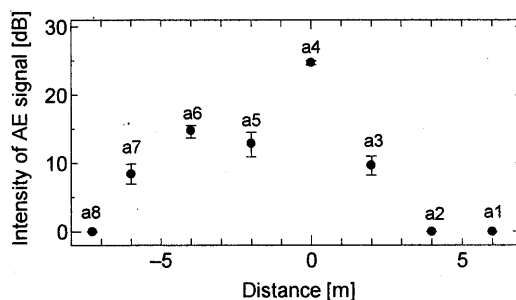
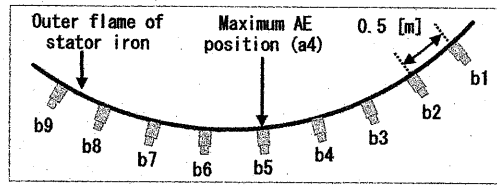
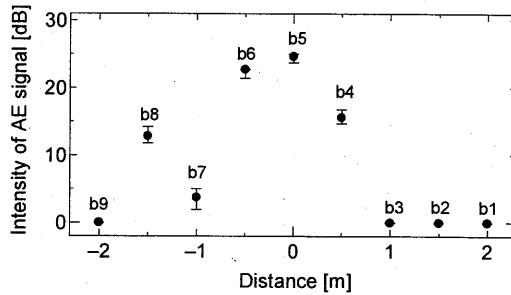


図13 センサ間隔2mにおけるAE信号強度の水平位置特性

図14(a)にa4(ここではb5とした)を中心に0.5m間隔でAEセンサを配置した場合の固定子鉄心外枠へのAEセンサ取り付け位置の概略図を示す。また、図14(b)に、0.5m間隔でAEセンサを配置したときの定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。この図からb5の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置b5が固定子巻線のPD発生個所に最も近いことが推測できる。図14(b)から位置b5がPD発生個所に最も近いと推測できるので、さらに、図14の位置b5を中心に0.2m間隔でAEセンサを配置した。



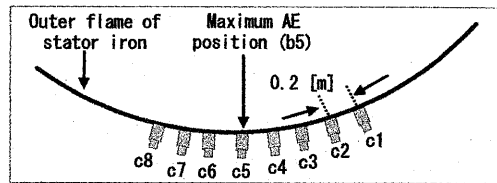
(a) Setting position of AE sensor



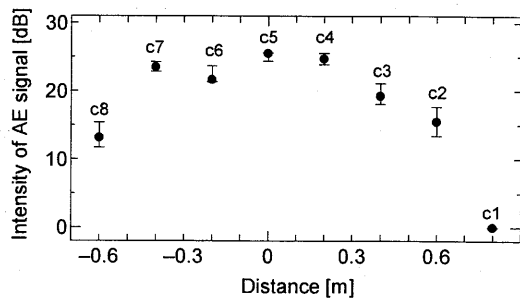
(b) Intensity of AE signal at each position

図14 センサ間隔0.5mにおけるAE信号強度の水平位置特性

図15(a)にb5(ここではc6とした)を中心に0.2m間隔でAEセンサを配置した場合の固定子鉄心外枠へのAEセンサ取り付け位置の概略図を示す。図15(b)に0.2m間隔でAEセンサを配置して、定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。この図からc5の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置c5が固定子巻線のPD発生個所に最も近いことが推測できる。図15(b)から位置c5がPD発生個所に最も近いと推測できるので、次に、c5(ここではd5とした)を中心に0.1m間隔でAEセンサを配置した。



(a) Setting position of AE sensor



(b) Intensity of AE signal at each position

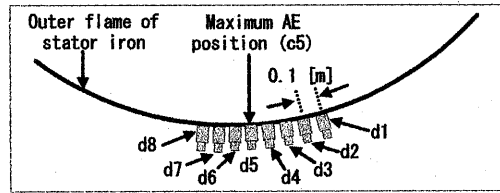
図15 センサ間隔0.2mにおけるAE信号強度の水平位置特性

その場合の固定子鉄心外枠へのAEセンサ取り付け位置の概略図を図16(a)に示す。図16(b)に、0.1m間隔でAEセンサを配置して、定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。図16(b)よりd6の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置d6が固定子巻線のPD発生個所に最も近いことが推測できる。

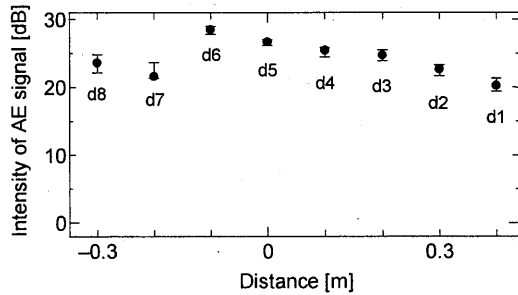
一連の結果により、水車発電機固定子巻線外枠にAEセンサを同じ高さ位置に複数回取り付けを行い、PDによるAE信号強度を測定し、その強度を比較することで水車発電機固定子巻線から発する最大PDの水平方向の発生個所を推定することができた。

(b) 垂直方向

続いて、水平方向で、最も強いPDによるAE信号を検出した取り付け位置d6における垂直方向のPDによるAE信号強度の比較を行った。図17に位置d6(図中の固定子鉄心外枠10番目の位置にあたる)の垂直方向にAEセンサを取り付けて、PDによるAE信号強度を調べた結果を示す。垂直方向は固定子鉄心外枠が、全22層からなっており、センサの数に限りがあることから、2回に分けて測定を行った。センサの取り付け位置は図17の左図に示してある。図17のAE信号強度は垂直方向のAEセンサ取り付けを行ったときの、定常運転時におけるAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。図17のAE信号強度より鉄心外枠10番目の位置が最も高いAE信号強度を示しており、鉄心外枠10番目の位置が固定子巻線のPD発生個所に最も近いことが推測できる。鉄心外枠10番目の中間位置で最も大きいPDによるAE信号強度を検出している。



(a) Setting position of AE sensor



(b) Intensity of AE signal at each position

図16 センサ間隔0.1mにおけるAE信号強度の水平位置特性

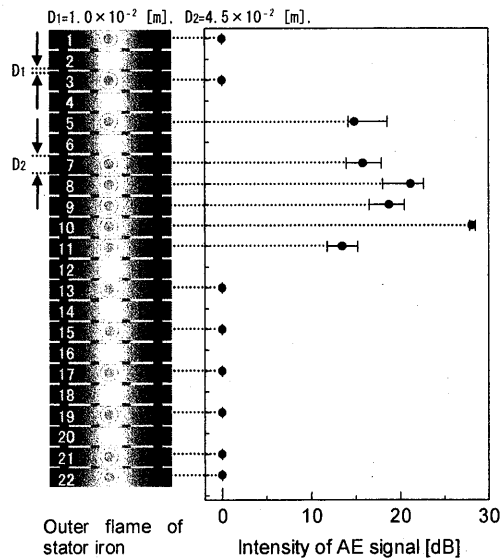


図17 各センサにおけるAE信号強度の垂直方向特性

4.3 オンライン中の部分放電特性に及ぼす影響<sup>(7)(10)(11)</sup>

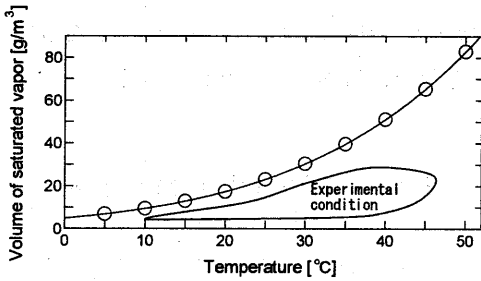


図18 飽和水蒸気量の温度特性

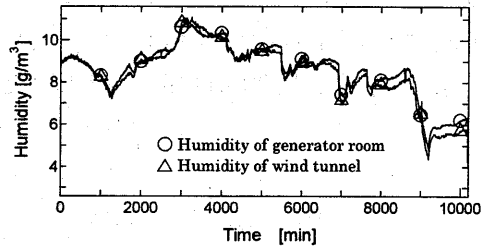


図19 発電機室内湿度と風洞内湿度の関係

図18に飽和水蒸気量の温度特性を示す。一般に気温が高くなると図に示すように、通常、気温の低い状態よりも、飽和水蒸気量が大きく、空気中により多くの湿気を含みやすいといえる。図19は発電機室内湿度と風洞内湿度の関係を示す。この図から、発電機室内湿度及び風洞内湿度はほぼ同じ特性を示すことが分かる。ここで、本実験対象とした発電機の冷却方式は、出口管通風型であり、発電機上部側面と下部から発電機室内の空気を取り込む。それにより定子巻線などの加熱部分を冷却した後に、温まった空気は風洞そして出口管を通り屋外に排出される。つまり、空気の流れは、発電機室内から固定子巻線へ、そして風洞となっているので、巻線のPD発生個所の湿度は図19の湿度とほぼ同じ特性であると考えられる。

図20はPDによるAE信号強度と出力の概略図を示す。ここで、図中のPDsは発電機起動時におけるAE信号強度の最大値を示し、PDnは定常運転時におけるAE信号強度の平均値を示す。図21は取り付け位置a3(図6

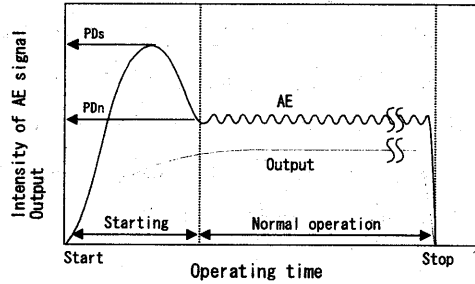


図20 PDによるAE信号強度の概略図

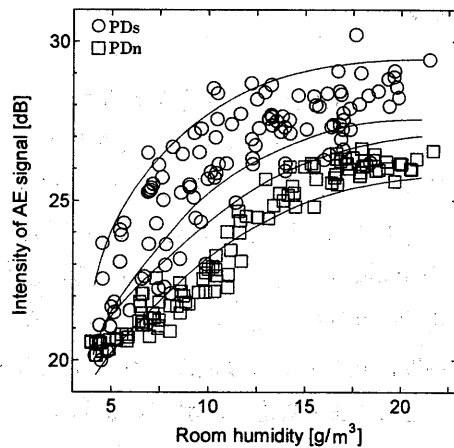


図21 PDsとPDnの湿度特性

中)における約4ヶ月間の運転データを整理して、湿度対PDs及び湿度の平均とその時のPDn特性を示す。この図から分かるように、PDs及びPDnは湿度の上昇とともに増加し、相関が見られる。このことから、起動時におけるPD特性は湿度が高いほど大きな値を示し、定常運転時におけるPD特性の平均値も湿度が高いほど大きな値に落ち着くことが分かる。

表1は、部分放電特性に影響を及ぼす発電機の運転環境である湿度および発電機室内湿度、巻線温度とPDsおよびPDnとの相関係数の比較である。この表から分かるようにPDsおよびPDnはそれぞれ、湿度との相関係数が最も高くなっている。このことから、発電機の運転環境においてPDに最も顕著に影響をおよぼすのは湿度であると考えられる。なお、鉄心外枠10番目の中間位置で最も大きいPDによるAE信号強度を検出した原因として、I-発電所では発電機の上側側面と下部から空気を取り込みその外部取り込み空気により固定子巻線を冷却していることが主な要因であると考えられる。そのため、固定子端部は冷却方式による冷却効果が著しいが、それに対して、固定子の中間位置では最も温度が高くなり、熱的な劣化の進展に加え、空気に含まれる湿気も高くなるので、湿気による劣化も進展し、鉄心外枠10番目の中間位置でのPDによるAE信号が最も大きくなったためと考えられる。

表1 部分放電特性と運転パラメータの相関関係の比較

	PDs	PDn
湿度	0.86	0.96
発電機室内温度	0.84	0.95
巻線温度	0.72	0.93

## V. まとめ

本研究では、超音波法の利点であるセンサの取り付け取り外しが容易であることを利用して、水車発電機固定子巻線のPD発生位置を推定した。その結果、複数のAEセンサを回取り付けを行うことで、水車発電機固定子巻線におけるPD発生箇所を推定できた。そして、実験対象としたI-発電所の水車発電機においては、垂直方向では中間の高さにおける部分放電によるAE信号が最も大きかった。この原因として、固定子の中間位置では最も温度が高くなり、熱的な劣化の進展に加え、空気に含まれる湿気も高くなるので、湿気による劣化も進展し固定子中間位置での部分放電によるAE信号が最も大きくなったと考えられる。

今後、さらに実験を進め、水車発電機固定子巻線の絶縁劣化判定基準を見出す予定である。

## 参考文献

- (1) 編集主査 河村, 他: 電気設備の診断技術, 社団法人 電気学会, 2003年10月
- (2) IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000
- (3) 竹之内, 他: 超音波センサを利用した水車発電機の部分放電観測, 電気設備学会誌, 20, 10, pp.820-827(2000)
- (4) 辻, 他: AEセンサを用いた水車発電機運転中部分放電測定, 電学論B, 122, 4, pp.513-517(2002-4)
- (5) T.Kaneko, et al.,: Characteristics of Partial Discharge in Stator Winding for Starting Hydrogenerator by Acoustic Emission Detection Method, 2002 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.491-494, Seoul, Korea(2002-11)
- (6) T.Kaneko, et al.,: On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Techniques, 電学論B, 124, 2, pp.274-280(2004)
- (7) 竹村, 他: 超音波法による水車発電機固定子巻線の部分放電位置推定, 第4回九州・電力技術研究会, pp.31-36, 平成15年9月
- (8) 竹村, 他: 超音波法を用いた水車発電機固定子巻線における部分放電発生位置推定, 平成15年度電気関係学会九州支部連合大会, p.03-2P-01, 平成15年9月
- (9) A.Takemura, et al.,: Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques, 2003 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage, E1, pp.85-88, 平成15年11月
- (10) 竹村, 他: 水車発電機固定子巻線の部分放電特性におよぼす運転条件の影響, 平成15年電気学会 電力・エネルギー部門大会 (東京電機大学), pp.B389-B390, 平成15年8月
- (11) T.Kaneko, et al.,: Development of On-line Insulation Diagnosis in Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Method, The XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, pp.1-4(2003)

## 謝 辞

最後に、本研究の一部は、宮崎大学及び宮崎公立大学と九州電力(株)宮崎支店の産業共同研究費（研究題目：超音波センサによる水車発電機固定子巻線の余寿命診断の研究）、宮崎公立大学と(株)興電舎との産学共同研究費（研究題目：コンピュータ自動計測による水車発電機絶縁診断システムの構築）によって行われたことを記し、関係者各位に謝意を表す。また、宮崎県企業局施設管理課からの委託業務（事業名：岩瀬川発電所ステータコイル絶縁観測業務）と関連して研究が実施された。