

# 水車発電機用簡易異常診断装置の開発

## POTABLE CONDITION DIAGNOSIS SYSTEM FOR WATER TURBINE AND GENERATOR

須郷康史\*・小池秀明\*・芝野桂一郎\*\*

Yasushi SUGOW, Hideaki KOIKE, Keiichiro SHIBANO

Generally, peculiar vibrations and noises of the water turbine and generator are observed in the cause of mechanical, hydraulic and electrical factor. It is difficult for a customer to catch and analyze these phenomena because of insufficient experiences. To solve above problems, we developed potable diagnosis system of operating condition for water turbine and generator with low cost and it is very helpful for customers to patrol work.

Condition diagnoses of the system consist of two different methods by comparing with basis data and measured data. If measured data is diagnosed as abnormal by the system, orbit analysis, coherence function analysis and FFT analysis are carried out.

It had been confirmed that all the functions of the system were useful in patrol work by actual field-tests. In this paper, we will present various functions of this system delivered on March 1999.

*Key Words* : *water turbine and generator , vibration or noise , diagnosis system , orbit, coherence function , FFT analysis*

### 1. はじめに

水車・発電機は、経年劣化や外乱等により異常振動・音を発生することがある。このような異常状態は、各部に設置した検出装置によって振幅や音響の絶対値を測定して、ある管理値を超えた場合に異常として扱う方法が主流となっている。しかしながら、事故や障害に至る事前の徴候は、巡視点検者の経験と点検記録の傾向分析判断に頼るところが多く、早期発見が実質的には非常に困難である。

また、各発電所は、有効落差、使用水量、製作者などが異なるためそれぞれ個性があり、ある運転状態に対して正常・異常を一義的に判断することができない。しかしながら、このような問題を解決するために、各発電所に高度な異常診断機能を持った監視装置を設備することは、トータルの保守費用のアップにつながる。

そこで、簡易的なシステムによる巡視作業の効率化と異常の早期発見を目的として、平成7年～9年度にかけて、

関西電力(株)との共同研究で簡易異常診断装置を開発した。

本稿では、装置のシステム構成と診断方法およびフィールド試験結果について報告する。

### 2. システム構成

一般に、回転機器の異常診断システムは、各部位に変位・振動センサなどを取付け、アンプユニットを介してデジタルテープレコーダにデータを集録し、FFTアナライザを用いてデータを解析するものが多い。しかし、一般水力発電用の水車・発電機の巡視点検では、測定準備や各機器の操作に手間を要するため、このようなシステムはほとんど使用されておらず、点検者の経験と五感により異常の発見と対策を実施しているのが実状である。

そこで、デジタルテープレコーダやFFTアナライザを使用せずに、持ち運びの容易なノートパソコンと各種センサを用いて、水車発電機の異常診断を行うために、最低限必要なデータ収集とそのデータの解析機能を持たせるシステムとした。また、異常要因を推定する機能を付加して、簡易的な診断を可能とした。図-1に開発した簡易異常診

\* (株)日本工営横浜事業所 事業開発部  
\*\* 生産事業部

断装置の外観を示す。

装置内部には、変位・振動センサのアンプユニット、センサ用の直流電源装置、信号収集ボードなどを、重量バランスを考慮して、コンパクトで持ち運びが容易となるように設置してある。また、センサ接続では、センサケーブル末端をコネクタ処理し、工具不要で簡単に接続できるように工夫した。

図-2は、平成10年度に納入した簡易異常診断装置を用いたシステム構成図である。図-2に示すシステム構成は、簡易異常診断装置の基本構成とそのオプション構成を示している。オプション機能としては、制御所から保安回線を使用して遠隔操作（ファイル転送含む）をする。異常音を取り込む。計器または部品腐食状況などを画像に取り込む。温度計測器のデータを取り込むことが可能である。全てのオプション機能を含めると、現場での作業はより省力化されて、迅速な対応が可能となる。次に、診断方法について説明する。

### 3. 診断方法

水車発電機で発生する異常現象の主な要因は、主軸の曲がり・たわみ、ランナなどの回転部接触等による機械的要因、キャピテーション・カルマン渦・ドラフト旋回流の影響等による水力的要因、磁気吸引力差の影響、固定子鉄心の緩み等による電氣的要因に大別される。これらの要因の有無を追求するために、軸振れ、軸受・ケーシング振動、水圧脈動に着目し、変位・振動・圧力センサを用いて、ノートパソコンにデータを収集する。

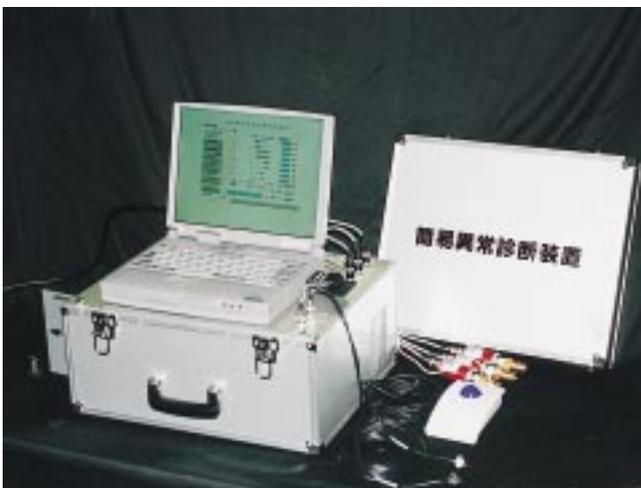


図-1 簡易異常診断装置

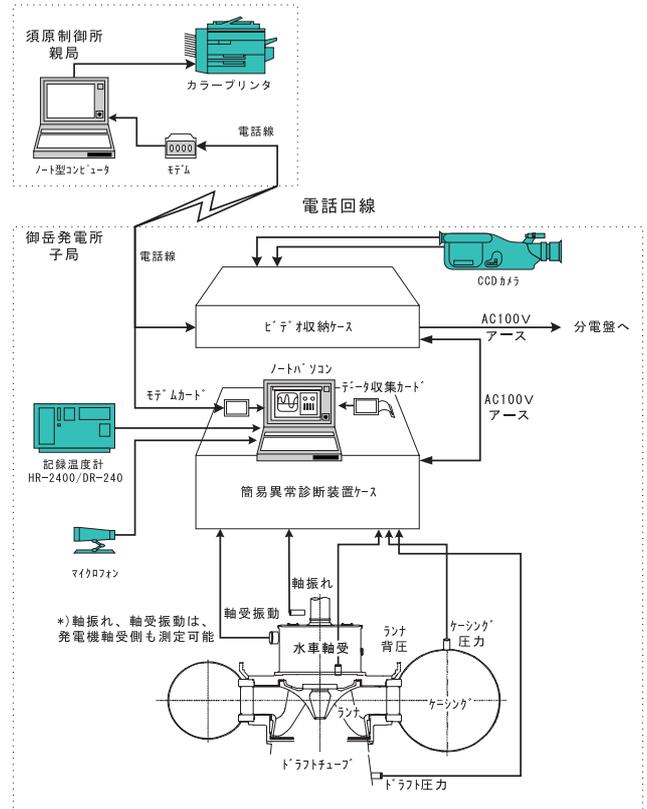


図-2 システム構成

データとしては、あらかじめ水車発電機新製または、分解点検直後の正常運転時のデータ（基準データ）を収集しておき、これと比較するために巡視点検時のデータ（点検データ）を収集する。基準データは、発電機出力の無負荷～定格負荷まで、10%出力毎に測定し、これらのデータと点検データを後述する判断1と判断2の方法により比較して、正常・異常の判定をする。異常と判定されたデータに対しては、リサーチ解析（軸振れ異常）・コヒーレンス関数（2項目以上の異常）・周波数解析などを用いて分析し、異常現象の要因を推定する。

#### (1) 正常・異常判断

正常・異常を判定する上で、2つの時系列データを想定した。データ全体の平均振幅量に比べて、遅い周期で大きく振幅する。データ全体がほぼ一定の振幅量で振幅する。これらデータの特徴から、判断1ではデータの最大振幅量を、判断2ではデータの平均振幅量をもとに基準値を設定し、点検データと比較する。どちらか一方で、点検データが基準値を超えた場合に異常と判定する。判断1と判断2について、以下に示す。

##### 1) 判断 1

本判断に用いる基準値は、軸振れ・振動データの最大振

幅および水圧データの絶対平均値に、一定の設定値を設けた。初期的設定値は、フィールド試験結果より140%としているが、水車発電機の体格、性能、運用方法により異なるため、巡視点検者が適宜決定することが可能となっている。したがって、これまでの点検者の経験的判断基準を定量化して判定することができる。図-3は、判断1において振動データの比較方法を示す。

2) 判断 2

本判断では、前項同様にフィールド試験結果より軸振れ、振動、水圧の基準値は、片振幅に変換した基準データの絶対平均値の200%を基準値とした。図-4に示すように、この基準値と片振幅に変換した点検データの絶対平均値を比較して、基準値を超えた場合に異常と判定する。

図-3、図-4より、2つの判断方法は、同じように軸振れ・振動データの片振幅で比較しているが、判断1はデータの最大最小値を用いるため瞬時値を含んだ基準値、判断2はデータを平均することにより瞬時値を除去した基準値で比較していることにもなる。

(2) リサーチ解析

水平、垂直方向の軸振動振幅を合成して得られる仮想軸中心の軌跡を示すリサーチ波形は、形によって振動現象の要因を推定することが可能である。軸振れと軸受振動で異常と判定した場合、軸振れのデータを用いてリサーチ波形を表示し、波形を識別して要因を推定する。波形は、図-5に示すパターンを想定した。表-1には、各パター

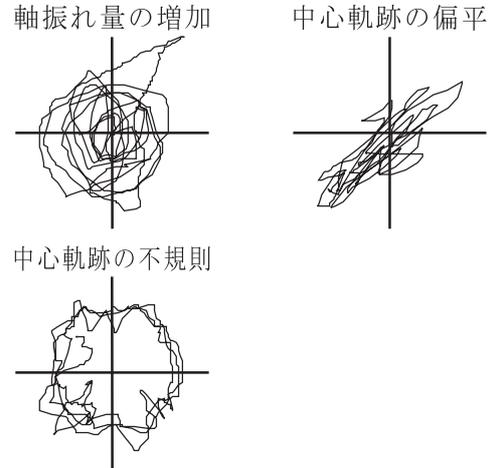


図-5 波形パターン

表-1 波形の識別方法と要因

波形	識別方法	要因
軸振れ量の増加	中心 (0,0)、半径 r の円の中に 90%以上データが存在する。	軸受メタルの摩耗 油膜厚さの変化
中心軌跡の不規則	中心 (0,0)、半径 R1 の小円と半径 R2 の大円に挟まれた部分に 90%以上データが存在する。	軸振れ回り量の増加
中心軌跡の偏平	$\Delta X$ と $\Delta Y$ (振幅量) の比率が 1.5 倍以上となる。	アンバランス 軸曲がり

ンの識別方法と推定する要因について示し、図-6では、軸振れ現象の推定画面を示す。

(3) コヒーレンス関数

ある部位から起因する異常振動は、構造物、流体などを介して伝播し他の部位が共振する。コヒーレンス関数は、この2つの部位の伝達関数を求めて、異常振動が共振によ

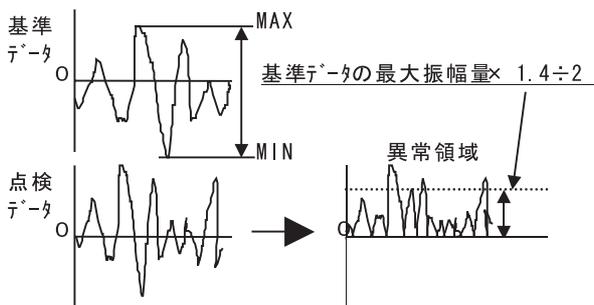


図-3 判断1の異常判断

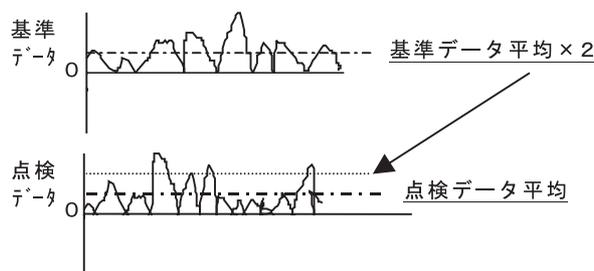


図-4 判断2の異常判断

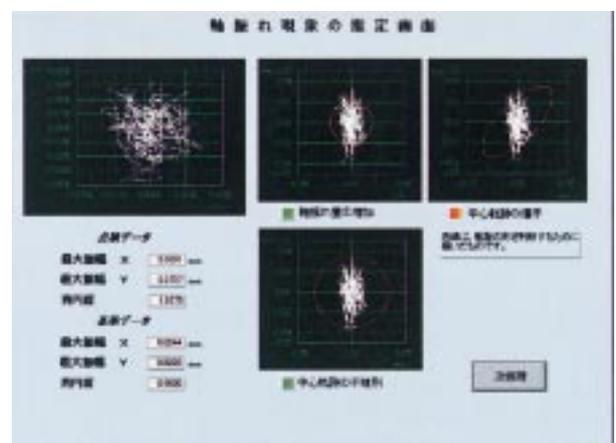


図-6 軸振れ現象の推定

るものであるかなど加振源の影響を相関率で判断する関数である。

式(1)に示すコヒーレンス関数は0から1までの値をとり、 $\gamma^2(f) = 1$ では、応答信号Yは入力信号Xに100%起因し、 $\gamma^2(f) = 0$ では両信号とも無関係であると判断する。<sup>1)</sup>

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f)} \quad (1)$$

- $G_{XX}(f)$ : 入力Xのパワー・スペクトラム
- $G_{YY}(f)$ : 応答Yのパワー・スペクトラム
- $G_{XY}(f)$ : 応答Yに対する入力Xのクロス・スペクトラム

異常データが2項目以上検知された場合に、式(1)を用いて相関率を求めて、 $\gamma^2(f) = 0.8$ 以上の場合、応答信号Yと入力信号Xに相関があると判断し、入力信号Xの項目と応答信号Yの項目から過去の事例に基づいて推定できる異常要因を表示する。

図-7、図-8は、フィールド試験で異常判定した軸振れYとケーシング水圧について計算した結果である。計算結果より、相関率0.8以上の周波数があることから、ケーシ

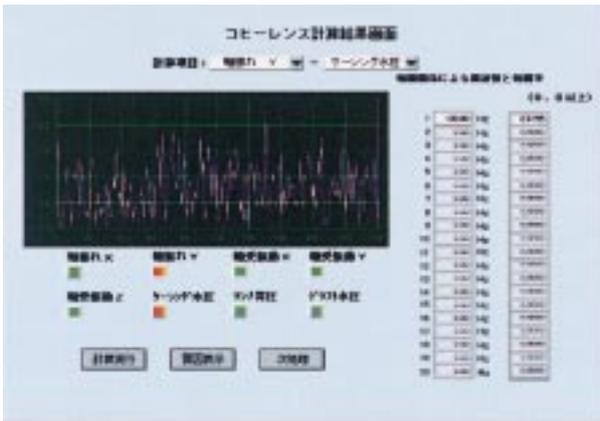


図-7 コヒーレンス計算結果画面

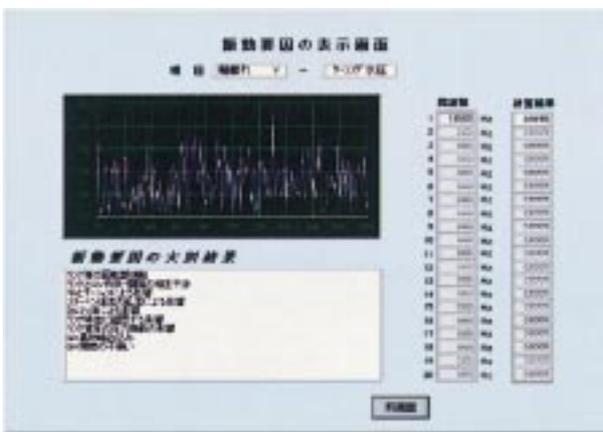


図-8 振動要因の表示画面

ングの水圧脈動が軸振れに大きな影響があると判断できる。

#### (4) 周波数解析

異常と判定した項目の基準データと点検データを周波数成分に変換し、基準より振幅量の大きい周波数成分(異常振動周波数)から過去の事例および構造上発生する振動に基づいて異常要因を推定する。図-9は、異常要因を推定するフローチャートである<sup>2)</sup>。

### 4. 機能

ここでは、『3. 診断方法』で説明した以外の機能について説明する。

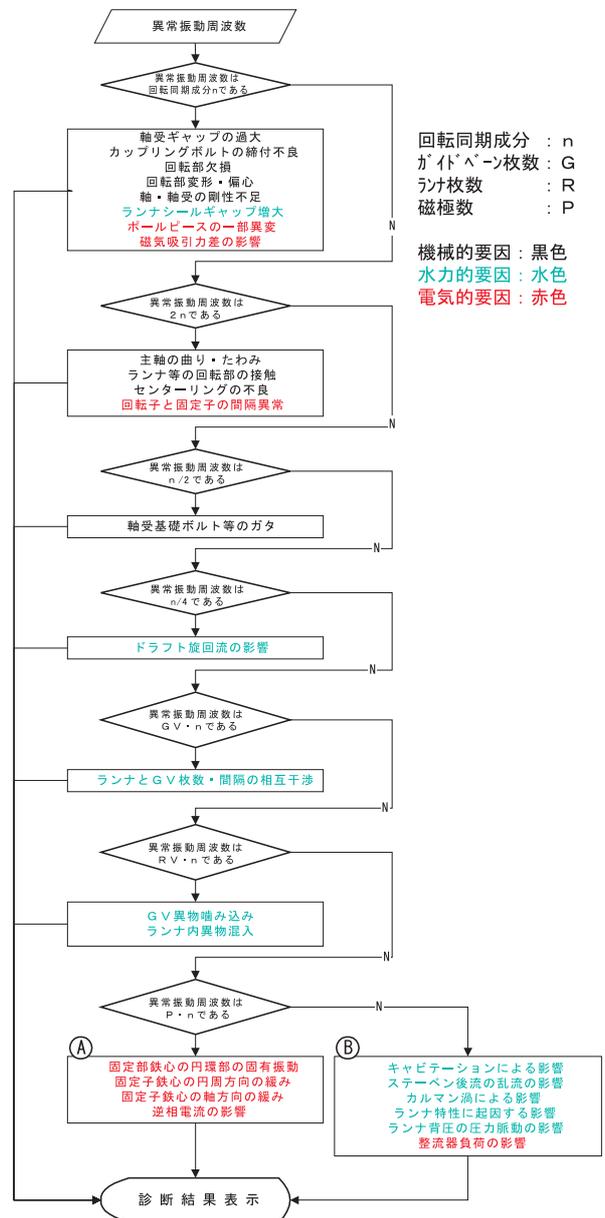


図-9 異常要因の推定フローチャート



図 - 10 水車発電機簡易異常診断初期画面

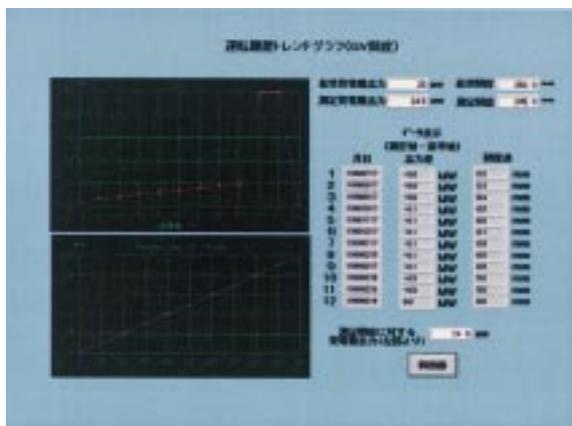


図 - 11 運転履歴トレンドグラフ (GV開度)

(1) 初期画面

初期画面は、基準データ用と図 - 10に示す点検データ用があり、発電所の選択と巡視作業で管理するデータ（ガイドベーン開度など）を入力し、ファイルに保存する。また、センサ取付けミスを防ぐために、収集データをセンサ出力範囲内で監視するセンサ自己診断機能がある。

(2) 運転履歴トレンドグラフ

初期画面で入力した軸受温度、ガイドベーン開度、各水圧データを用いて、時系列変化をプロットする。図 - 11では、ガイドベーン開度 - 発電機出力の関係から、ランナ性能低下を評価し、ランナ補修または更新要否の情報を提供する。また、ランナ背圧の変化量から、ライナ摩耗量を推定し、ライナ取替時期の情報も提供する。

5. フィールド試験

(1) 試験内容

既設発電所の立軸フランシス水車を用いて、診断方法の検証をするために試験を実施した。水車仕様は以下の通り

である。

水車仕様

- 定格出力 : 1200kW
- 回転数 (n) : 600 r/min
- ガイドベーン枚数 (G) : 16枚
- ランナ枚数 (R) : 13枚
- 磁極数 (P) : 12ポール

約6ヶ月にわたりフィールド試験を実施した結果、1度だけ異常を判定した。この時の診断結果を表 - 2にまとめた。

図 - 12は、判断1で異常判定した軸振れのデータを、時系列波形と周波数波形で表示した結果である。図 - 12より、基準データに比べて振幅量大きい周波数成分は、68、94、120Hz (Pn) である。一方、ケーシング水圧は130Hz (Rn) であった。

図 - 13は、リサージュ解析、コヒーレンス計算、軸振れの卓越周波数成分によって、振動要因を推定した結果である。卓越周波数による異常部位の特定は、図 - 9のフローチャートA、Bを表示した。

(2) 試験結果の考察

診断の結果、異常要因として別記されたものについて考察すると、それまでの運転実績より、設計・施工ミスによ

表 - 2 フィールド試験結果

判断1 異常項目	軸振れ 異常周波数	判断2 異常項目	ケーシング 水圧 異常周波数	周波数 (コヒーレンス)	最高 相関率 (コヒーレンス)
軸振れ	68Hz 94Hz 120Hz	ケーシング 水圧	130Hz	130Hz	0.92

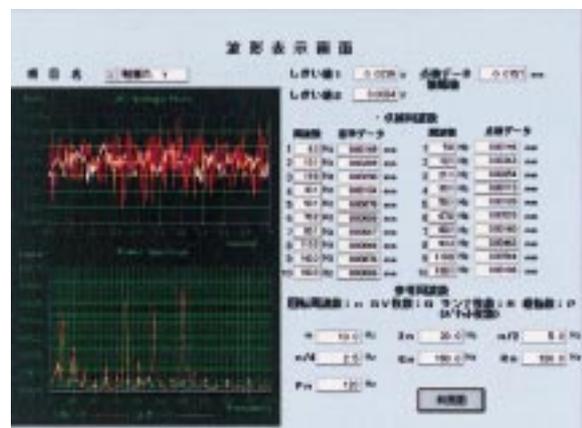


図 - 12 軸振れの波形表示画面

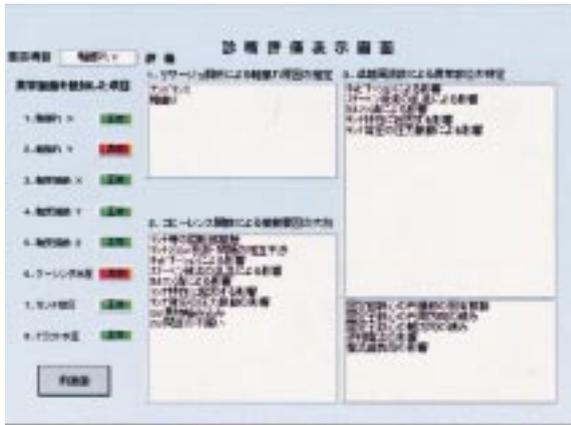


図 - 13 異常要因の推定結果

る先天的な異常および経年劣化による異常はないと推定された。また、軸振れ過大が検出されたのは水車軸受付近であることから電気的要因の異常も可能性が低いと推定された。このような考察によって消去法により要因を絞り込んだ結果、GV（ガイドベーン）異物噛み込みが最も可能性の高い異常要因と推定された。

このため、現地では巡視点検者がガイドベーンを数回開閉したところ振動振幅が小さくなった。このことから、ランナまたは、ガイドベーンに詰ったごみ等が、ガイドベーンの開閉によって放水路へ排出され、正常に復帰したと考えられ、本システムの判定に基づく処置が妥当であることが確認された。

このように、フィールド試験によって、判断のフローは

正常に機能し、巡視点検者の判断を助けて振動要因の推定ができたことから、実用化への見通しが得られたものと考えることができた。

## 6. おわりに

本装置の開発によって、以下の成果を得ることができた。

- 巡視管理データのペーパーレス化
- 現場での解析により迅速な対応
- 分析方法の追加により異常発見精度の向上
- 小型化（他の発電所へ持ち運び可能）
- 立軸フランシス水車への適用
- ペルトン水車への適用（机上検討まで）

フィールド試験で明らかのように現システムでは異常要因を推定するにあたり、まだ相当に巡視点検者の経験的な考察が必要不可欠である。したがって今後の課題は、様々な異常要因のデータを蓄積し、要因を絞り込む診断方法の改善が必要と考えている。さらに、主機だけでなく、水車発電機用の補機の異常診断への拡張についても、今後検討する計画で、ここで開発した簡易的な異常診断システムが水力発電所の保守、点検を行う上で現場技術の一助となるものと確信している。

### 参考文献

- 1) 経営開発センター出版部：回転機械の振動・騒音その原因と対策・解析・調査・診断、川井良次他
- 2) 水力発電調査専門委員会：水車および発電機の軸振れと振動に関する調査研究、電気学会技術報告（部）第142号