

<論文>

監視・制御システムのオンラインデータを
活用した設備診断システムFACILITY DIAGNOSIS SYSTEM USING ONLINE DATA OF
MONITORING AND CONTROL SYSTEM岡村 整¹, 楮本 豊¹, 三好 哲²¹ 東京都水道局 / 〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号² 東京都下水道局 / 〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号HITOSHI OKAMURA¹, YUTAKA KAZUMOTO¹, AKIRA MIYOSHI²¹ Tokyo Waterworks Bureau / 2-8-1, Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-8001, Japan² Tokyo Sewerage Bureau / 2-8-1, Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-8001, Japan

Abstract

Water facilities which support urban activities as one of the important lifeline are required to operate steadily. Especially, mechanical and electrical facilities in the water facilities, are important to supply water continuously. Therefore, we are working continuously to maintain these facilities, such as inspection and repair. Recently, many systems for facility diagnosis have been developed. But most of these systems need to use special sensor for diagnosis. In this paper, we propose the Facility Diagnosis System without special sensors, using online data of Monitoring and Control System. The system consists of three diagnosis methods what we call Diagnosis by correlation, Diagnosis by tendency and Diagnosis of trouble part. The algorithm of the diagnosis is made on the basis of the analysis of trouble occurred in the past and Failure Mode and Effects Analysis. From the field test, we obtained that this system is one of the useful method for facility diagnosis.

Key Words : Facility Diagnosis , Online Data , Failure Mode and Effects Analysis

1 はじめに

水道施設は、住民生活の基盤をなす重要なライフラインの一つであり、常に安定した運用が求められている。特に水道施設の中でも電気・機械設備は、水道水を安定に供給するための要であり、その果たす役割は大きい。このため、東京都水道局（以下、当局と言う。）では日頃から電気・機械設備の巡視点検や補修等の保全業務に力を入れており、異常状態の早期発見、早期対応によって安定給水の維持に努めているところである。

しかし、水道施設は都内全域に点在し、最近では

遠隔制御による無人施設も多くなっている。また、場内の設備は多様化が進み、その機器台数も膨大な数に上る。これらの設備機器を適正に維持管理するには、機器の状況を的確に掴み、故障等により機能発揮ができなくなる前に、適切な保全作業を行うことが重要となる。

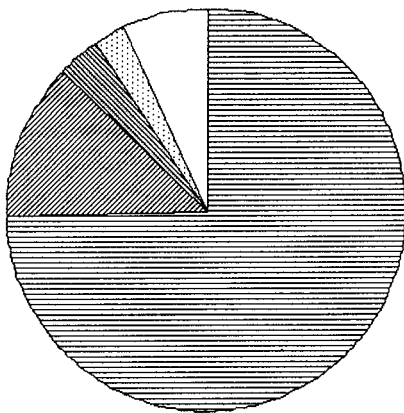
最近では、設備の異常を監視・診断する様々な方式の設備異常診断システムが開発されている。これらのシステムは、そのほとんどが専用のセンサ（振動センサ、温度センサ、臭いセンサ等）を設置し、これらのセンサからの情報に基づいて異常の有無を判

定する方式^{1, 2)}が一般的である。しかし、既存の設備に新たに個別のセンサやそれに付随する配線を設置することは、多額の費用や新たな設置スペースを必要とするなどの問題があった。

本稿では、専用のセンサを新たに設置することなく、プラントの監視・制御用に既に設置されている既存のセンサ（電流計、流量計等）からの情報と機器の運転状態に関する情報等を用いて、設備の異常の兆候を検知する診断システムの提案を行うものである。

2 設備故障等の現状

Fig.1 は、当局の浄水場や給水所等において、平成7年度～11年度の過去5年間に電気・機械設備の運転に異常を生じた事例について、その原因別に集計したグラフである。その発生原因を見ると、機器の不良・劣化等、機器そのものに原因があるものが約75%と全体のほとんどを占めている。



- Deterioration, Inferiority
- ▨ External factor (Extraneous substance, ect)
- Others
- ▩ External factor (Power failure)
- ▤ Disaster (Thunderbolt, Earthquake, ect)

Fig.1 Factor of trouble occurred in the water facilities for the past 5 years

これらの故障等は、設備の二重化や予備機対応等により、そのほとんどは断水や減水等の実質的な被害は少なかったものの、安定給水を維持するためには、設備の機能停止に至る前の段階における早期発見、早期対応が重要となる。

3 設備異常診断システムの開発

3.1 開発のコンセプト

東京都の水道施設は、昭和30年～40年代に集中して建設・整備が行われ、既に水道普及率は100%を達成し、現在は施設の維持管理の時代と云われている。この間、電気・機械設備においては、機器の更新・補修等が繰り返され、現在では新旧の機器が混在し、その更新時期もまちまちとなっている。

このため、今回の設備異常診断システムは、これら既存の様々な設備に容易に対応出来るシステムとするため、次の2つをコンセプトとして構築を行った。

1) 新たなセンサを必要としない設備異常診断

- ・新たに専用のセンサ等を設置することなく、プラントの監視・制御システムに使用されている既存のセンサの信号や制御ループ内の制御信号、状態変数等を利用して設備の異常を検知するシステムとする。
- ・既存のセンサ等から得られないデータについても、出来る限り他のデータを用いて推定を行う。

2) 浄水場、給水所等の各種設備に適用できる汎用システム

- ・各種の水道施設（浄水場、給水所等）の設備に汎用的に使用可能なソフトウェア構成とする。

3.2 開発のプロセス

開発のプロセスとしては、次の4つのステップに従って行った。

- ① 過去の故障事例やFMEA(Failure Mode and Effects Analysis)による故障原因や症状等の整理・

分析。

- ② これらの分析結果に基づく、異常診断手法の検討。
- ③ 検討した異常診断手法を用いたシステムの試作。
- ④ 試作システムを用いたフィールドにおけるデータ収集、診断手法の有効性の確認。

3.3 設備故障の分析

システムに起こり得る異常、故障等の種類やその影響度は、代表的な信頼性の解析手法であるFTA(Fault Tree Analysis)やFMEAなどによって想定、分析することが可能である。しかし、実際のフィールドでは、設計段階で想定した現象以外の故障も多く発生しており、また、発生頻度が高いと判断した故障もフィールドでは全く発生していないというものもある。

設備の異常を診断するシステムを構築するためには、診断するための知識が必要であるが、FTAやFMEAから得られる知識のみでは、前述のようにフィールドの故障発生状況からかけ離れてしまう可能性がある。

そこで、まず当局が蓄積している過去の故障事例による分析を行い、次に過去に発生していない故障について、FMEAによってシステム全体への影響度を加味して検出すべき故障モードの洗い出しおよびその分析を行った。

過去の故障事例については、故障の種類、故障発生個所、故障に伴う現象、故障原因を分析し、異常診断のために必要なプロセス値、診断手法等の検討を行った。また、FMEAを用いた分析については、解析の目的が設備の異常を診断するシステムの構築であるため、本来のFMEAの手法に加えて、診断方法の検討、診断に必要なプロセス値の選定も合わせて行った。

今回分析を行った故障事例の一例をTable.1に示す。

3.4 システムの構成

1) ハードウェア構成

Fig.2に今回開発した設備異常診断システムのハードウェア構成を示す。今回のシステムは機能検証用のプロトタイプであるため、プラントのオンラインデータを収集するためのデータ収集用PCおよび収集されたオンラインデータを用いて診断や通知等を行うUI/DB用PC(ユーザインタフェース・データベース用PC)の2台のPCから構成した。

データ収集用PCは、プラントの制御系LANに接続されており、アナログ、デジタルの各種オンラインデータを常時収集している。これらのオンラインデータには、各種のプロセス値や機器の制御信号、運転状況に関する状態変数等が含まれている。

UI/DB用PCでは、これらのデータを用いて異常の有無について診断を行い、その診断結果をCRTに表示する。

2) ソフトウェア構成

Fig.3に設備異常診断システムのソフトウェア構成を示す。浄水場、給水所等には多種多様の設備、機器があり、異なる機器を診断するために個別にソフトウェアを開発していたのでは膨大な作業量となる。このため、異常診断を行うアルゴリズムは各プラント共通に使用可能なものとし、異常の判定基準等を定めた診断ルールのみ個別の機器毎に定義してデータベース化する構成とした。

3.5 異常診断方式

本システムにおける異常診断は、複数のプロセス値の相関から診断を行う「相関関係異常診断」およびプロセス値の変化傾向をもとに診断を行う「傾向診断」から構成した。また、複数の異常判定結果を組み合わせることにより、プラントのどの機器に異常が発生したかを推定する「プラント異常診断」機能を有している。

Tab.1 Analysis of some troubles occurred in the distribution pump

対象機器	原因	故障内容	プロセス値	診断方法
配水ポンプ	回転速度計の故障	速度制御不能	電流、回転速度 電力、吐出流量	電流 \propto 回転速度、回転速度 \propto 吐出流量 電流 \propto 電力、電流 \propto 吐出流量
	羽根車の摩耗 接触、異物混入	吐出流量不足 吐出圧力不足	電流、回転速度 吐出流量・圧力	電流 \propto 回転速度、回転速度 \propto 吐出流量・圧力 電流が大きい場合は接触、小さい場合は摩耗

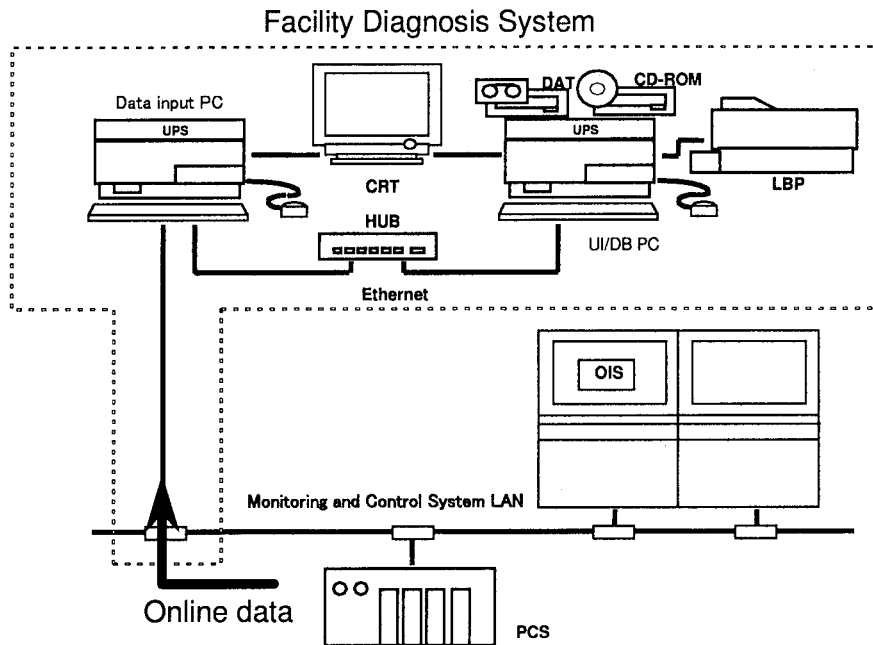


Fig.2 System of hardware configuration

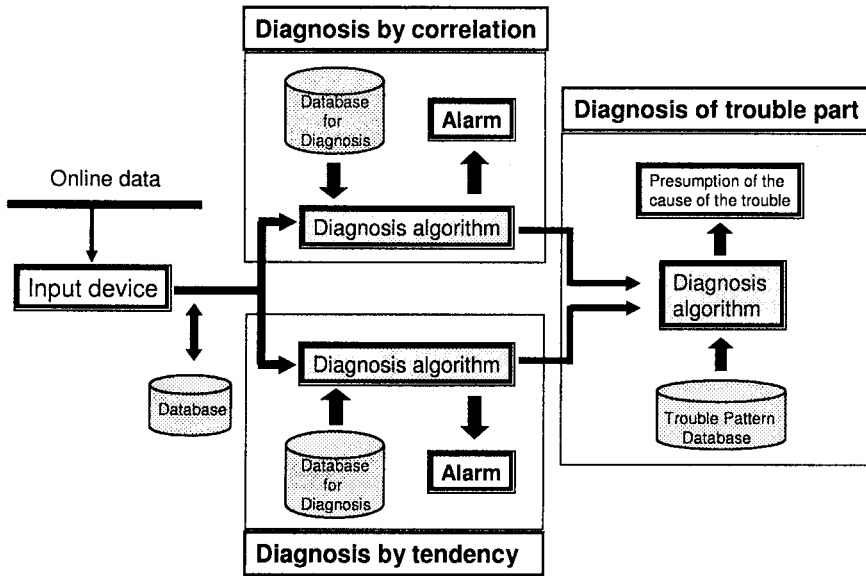


Fig.3 System of software configuration

1) 相関関係異常診断

相関関係異常診断とは、一定の条件のもとでは特定のプロセス値間等に一定の相関関係が存在することに着目し、設備の異常兆候を検知するものである。

例えば、Fig.4、5、6は正常時における配水ポンプの回転速度、電流、電力のそれぞれの関係（実測データ）を示したグラフである。これを見ると各プロセス値間には一定の相関があることが判る。本システムにおいては、これらの相関関係を監視し、相関が崩れた場合に何らかの異常があると判定する。ただし、グラフからも判るようにプロセス値は正常運転時においても多少の変動があるため、判定のしきい値はFig.7に示したように、ある程度の幅を持たせる必要がある。これは見方を変えれば、「回転速度に対応した電流値の適正範囲を設定する」ということになる。例えば、従来の電流値の警報設定では、同じくFig.7に示したように、正常運転時にとり得る最大電流よりも更に大きい値にしきい値を設定する必要があった。このため、警報が発報した段階では、ポンプ停止に至るような重大な故障に発展している可能性が高かった。今回のシステムでは、電流、流量、圧力等の適正範囲を機器等の運転状態

と関連させて監視することにより、異常の兆候を捉えやすくしていることが、大きな特徴の一つとなっている。

なお、実際のシステムにおいては、これらのしきい値は、通常の変動幅の2倍程度に設定し、単発的なノイズの影響を避けるためサンプリングデータが3回連続してしきい値を超えた場合に異常と判定している。

また、今回例として挙げた「回転速度と電流値」の関係においては、第2、第3のパラメータ（このケースでは、配水系統の切り替え等による管路抵抗曲線の大幅な変化等）によって相関が崩れることがある。このような例では、それらのパラメータも加味して診断を行う必要がある。

2) 傾向診断

傾向診断とは、対象信号の変化傾向を監視する事によって、システムの異常兆候を検出する機能である。

この傾向診断は、対象信号が指定された条件を満たすまでにかかる時間を監視する「時間要素による診断」、単位時間内に対象イベントの発生する回数を監視する「イベント要素による診断」、対象信号

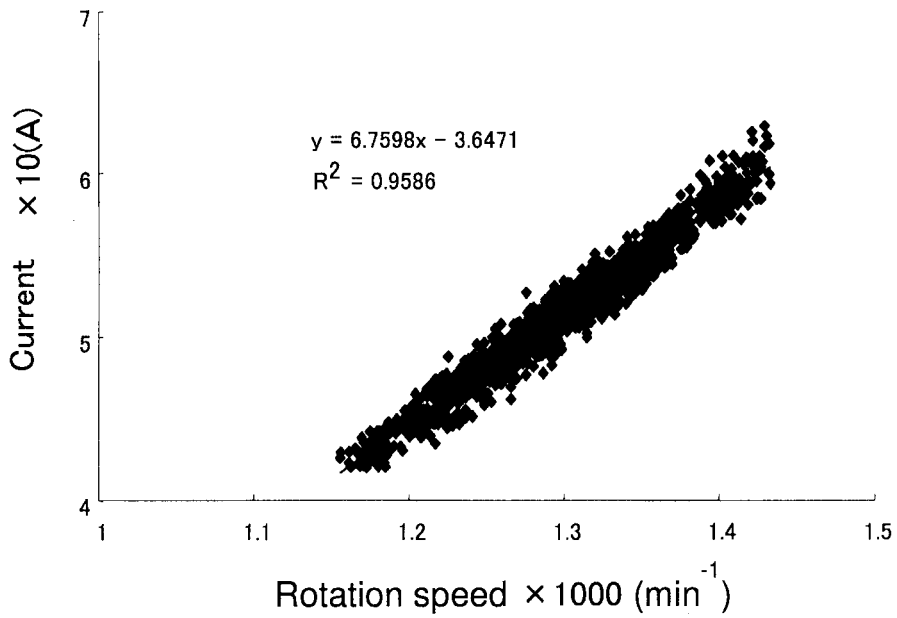


Fig.4 Correlation between rotation speed and current

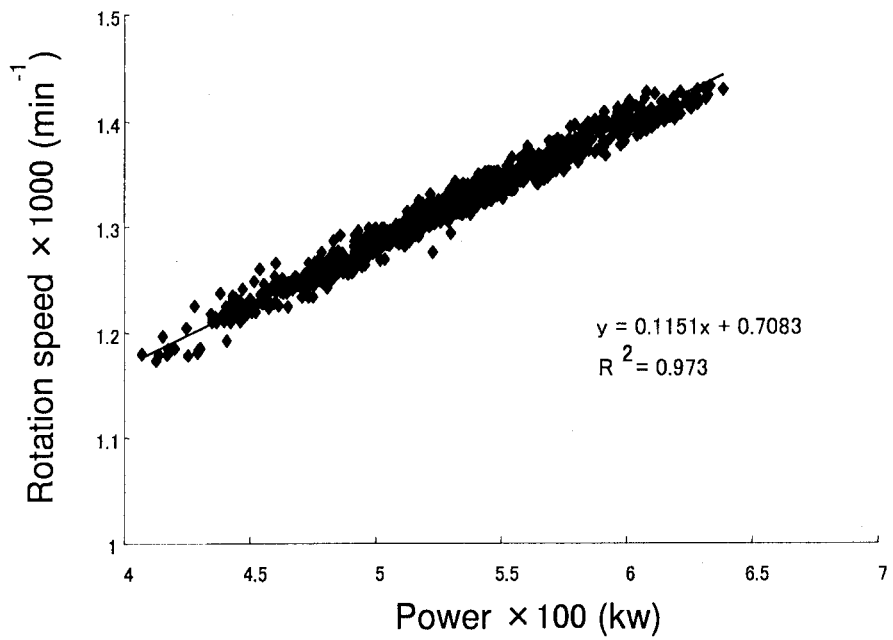


Fig.5 Correlation between power and rotation speed

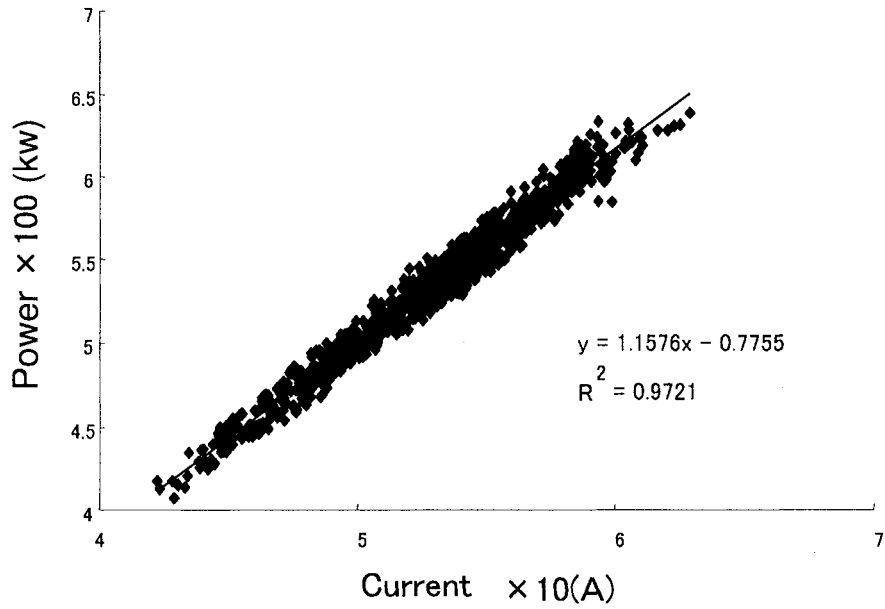


Fig.6 Correlation between current and power

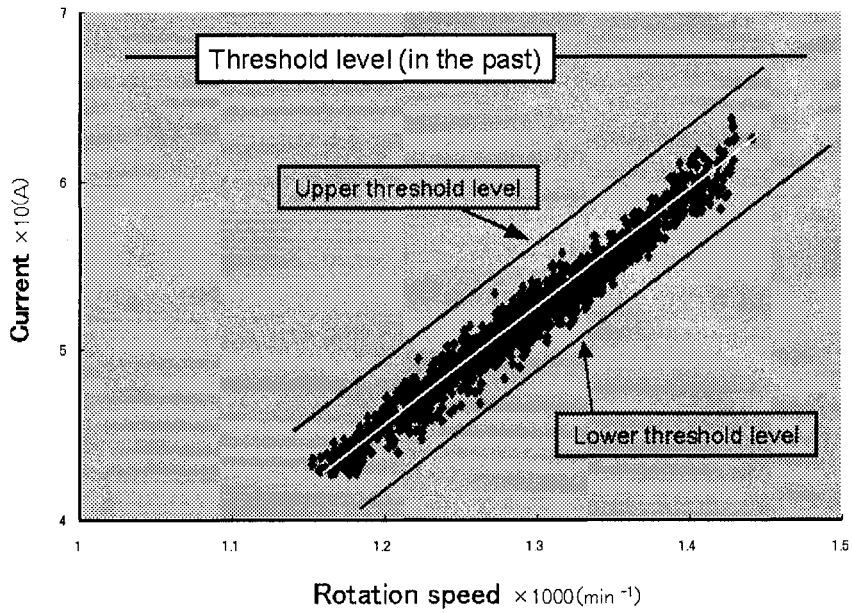


Fig.7 Example of proposed threshold levels

の変化率を監視する「値の変化率による診断」の3種類の診断方式から成る。

以下に各診断方式に関する説明を記す。

① 時間要素による診断

機器等に対して、ある動作の開始要求信号を出してから、動作完了の信号が返ってくるまでの時間を計測し、動作時間の変化から異常の兆候を検知するものである。

代表的なものとして、バルブの異常診断に適用した場合を例にとると、バルブの全開要求信号を出してから、リミットスイッチによる全開信号が返ってくるまでの時間を監視する。例えば油圧駆動式のバルブであれば、油圧系統などの異常の兆候を動作時間の変化として捉えることが出来る。

Fig.8は、配水ポンプの吐出側に実際に設置されている油圧駆動式の吐出弁の動作時間を測定した結果である。この例では、No.5バルブの動作時間が、他のバルブに比べ長く、また、そのバラツキも大きい。実際には、このバルブは機能停止までには至っていないが、異常の兆候があるとして、油圧系統等の点検の必要があると判断される。

② イベント要素による診断

指定したイベントの発生回数をカウントし、一定期間内に発生するイベント回数の変化を監視することにより異常を検知するものである。

例えば、排水ポンプ等の運転回数に適用することにより、逆止弁やレベルスイッチ等の動作不良を検知することが可能となる。

③ 値の変化率による診断

一定周期にてサンプリングしたデータについて、その値の変化率を監視して異常を検知するものである。

例えば、サージタンクの水位等に適用することにより、流入バルブの動作不良や漏水等による異常な水位変化を捉えることが可能となる。

以上、述べた診断方式のうちどの方式を適用するかは、それぞれ診断対象物の特性によって決定することになる。Table.2には、各診断方式の代表的な適用対象事例を示した。

3) プラント異常診断

複数のプロセス値の異常診断結果をもとに、どのプロセス値が異常であるかを同定し、さらに、同定されたプロセス値の異常の原因（故障箇所）を推定するものである。この故障箇所の推定は、先に述べた過去の故障事例およびFMEAによる分析から予め作成した故障パターンのデータベースに基づき行っている。

具体的な事例として、配水ポンプを例にとれば、「回転速度と電流」の相関が崩れた場合、これだけでは回転速度と電流のどちらが（または、両方とも）異常であるかの判断はつかない。しかし、「電流と電力」および「電流と流量」などの相関が保たれているとすれば、回転速度が異常であると推定できる。そして、その原因（回転速度のみ異常）としては、故障による異常データの組み合わせ等を規定した故障パターンデータベースから速度検出用機器不良の可能性があると推定される。

4 フィールド試験

本システムの有効性を確認するため、当局の稲城ポンプ所にシステムを実際に設置してフィールド試験を実施した。試験は、監視・制御システムからオンラインデータを収集し、相関関係のあるデータの組み合わせの洗い出し・検証を含め、約2年間に渡り行った。

その結果、正常運転時においては複数のデータに一定の「相関」または「傾向」があることが確認できた。しかし、今回のフィールド試験期間中（システム稼働中）には、実際に設備の故障が発生しなかったことから、本システムが異常を実際に検知した事例は得ることが出来なかった。

そこで、ここでは今回の異常診断手法の有効性を示す一つのデータとして、Fig.10にフィールド試験にて得た配水ポンプの起動時における回転速度と電力の実測データを示す。通常、配水ポンプは、吐出弁が全閉状態のまま始動し（図中①）、その回転速度を徐々に昇速させ（図中②）、規定速度に達した時点で（図中③）、はじめて吐出弁を徐々に開け（図中④）、全開となった後に定常運転状態（図中⑤）となる。この間（ポンプの起動中＝吐出弁が全開でない

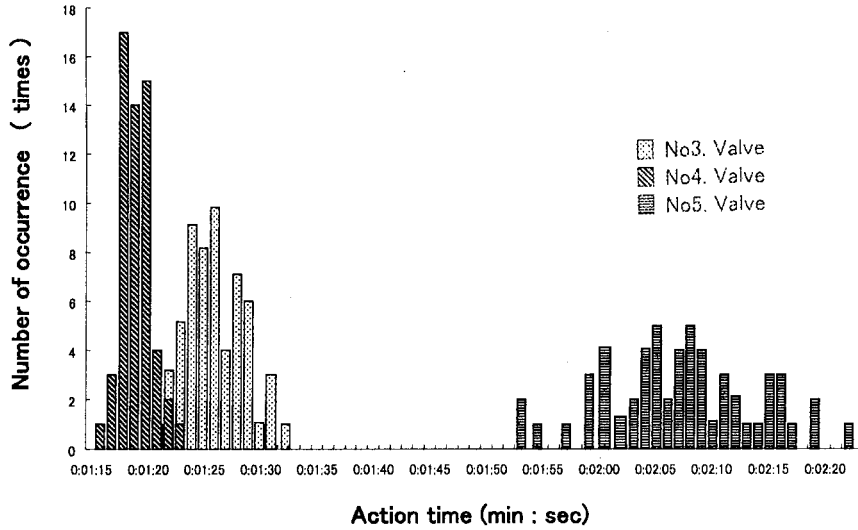


Fig.8 Action time of Delivery Valves

Tab.2 Example of application for each diagnosis method

相 関 関 係	○ポンプの電流・電力・流量・圧力 ○配管の圧力損失と流量 ○変圧器の R、S、T 各相の電流 ○変圧器の一次・二次電流 ○タンク液位と流入・流出量 ○その他
傾 ①時間要素	○バルブ動作時間 ○ポンプ起動時間、規定速度到達時間 ○その他
向 ②イベント要素	○排水ポンプ運転回数 ○コンプレッサ運転回数 ○その他
③変化率	○タンク、貯槽、配水池等の水位 ○その他

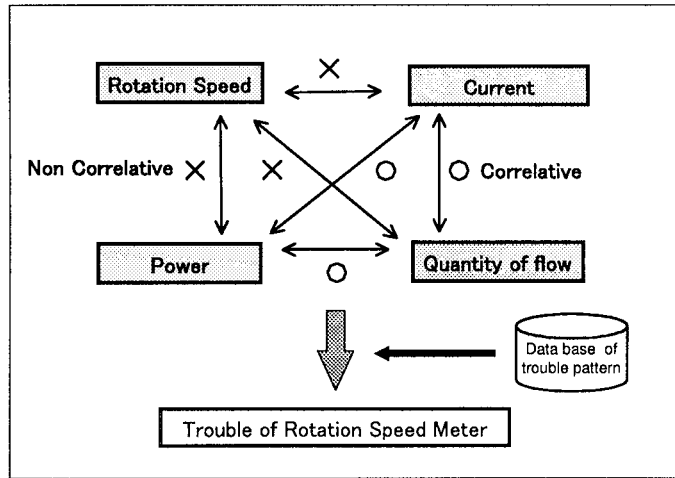


Fig.9 Application for the diagnosis to rotation speed meter trouble

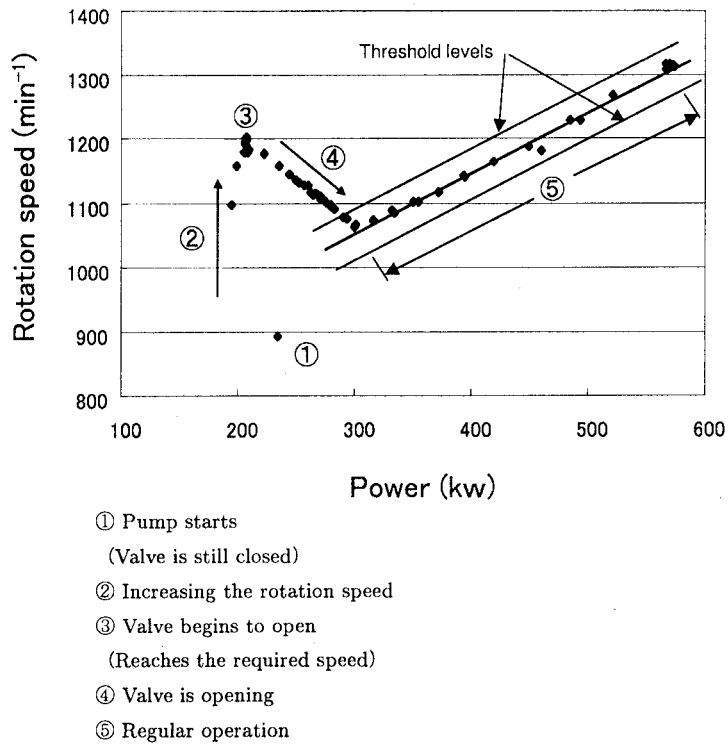


Fig.10 Correlation between power and rotation speed while starting up the pump

状態)の回転速度と電力との関係は、Fig.10に示したとおり定常運転時の相関関係から乖離した状況にある。すなわち、このように配水ポンプの負荷が異常な状態においては、相関関係が十分に検出可能なレベルで崩れることがわかる。この例においては、吐出弁が約90%の開度となって初めて設定したしきい値の範囲内に入る。

ただし、ここで示したデータは配水ポンプが起動中のものであり、その動作およびデータは正常状態であることから、実際のシステムにおいては、ポンプの起動中の相関関係異常信号は無視する仕組みとなっている。

5 おわりに

今回、既存の監視・制御システムのオンラインデータを活用して、設備の異常の兆候を検知する診断手法の提案を行った。本手法においては、新たなセンサ等の設置の必要がないことから、比較的安価に設備診断システムを構築することが可能である。

プラント施設の無人化や数多くの設備の集中管理化が進む中、監視業務・巡視点検等を補完し、機器等の異常を早期に発見するためのシステムの必要性は、

より一層高まっている。また、設備の集中管理化に伴い、より多くのデータが制御系LAN等を通して容易に取得可能となっており、オンラインデータを用いた今回の異常診断手法は、今後の設備管理を効率的、効果的に行う有効な手段の一つと思われる。

現在、本システムの有効性を更に検証するため、より規模の大きな施設への試験的導入を準備中であり、実証試験を重ね実用性の高いシステムとしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 楮本豊、高橋正彦、三好哲：光温度分布レーダを用いた閉鎖配電盤温度監視システムの開発、環境システム計測制御学会誌、3(4)、53-61(1999)
- 2) 石野和成、壁矢和久、西村宅一、他：音響による設備診断技術の開発と適用、材料とプロセス、8(5)、Page 1166(1995)

(受付 2001. 1. 4)

(受理 2001. 3. 1)