

空気作動制御弁の状態推定型オンライン診断

On-line Diagnostic Techniques for Air-operated Control Valves Based on Time Series Analysis

伊藤 健治 (Kenji Ito)* 松岡 由了 (Yoshinori Matsuoka)†

南川 茂 (Shigeru Minamikawa)‡ 小松 泰樹 (Yasuki Komatsu)‡ 佐藤 雄 (Takeshi Satoh)‡

要約 この研究の目的は、PWRプラントで多数使用されている空気作動制御弁について、時系列解析による状態推定型のオンライン診断の適用性を明らかにすることにある。

状態推定型診断は、従来の直接測定可能なプロセス量の監視では把握が困難な初期段階で異常を検知することを可能とする技術であるが、その適用性は診断対象であるシステムに依存する。

空気作動制御弁への適用上の課題は、油圧制御システムに比べ応答性が悪いこと、および、わずかな定常変動しか示さない低い信号レベルにあるプラントオンライン状態での異常の識別性にある。

本研究では、実際のプラントと同一仕様の供試体弁に各種故障モードを設定し、実機の運転状態での制御信号を入力したシミュレーション試験を実施した。その結果、空気作動制御弁について状態推定型オンライン診断の適用できる可能性が確認された。

キーワード オンライン診断, 空気作動制御弁, 状態推定, 時系列解析, シミュレーション試験

Abstract The objective of this research is to study the feasibility of applying on-line diagnostic techniques based on time series analysis to air-operated control valves - numerous valves of the type which are used in PWR plants.

Generally the techniques can detect anomalies by failures in the initial stages for which detection is difficult by conventional surveillance of process parameters measured directly. However, the effectiveness of these techniques depends on the system being diagnosed.

The difficulties in applying diagnostic techniques to air-operated control valves seem to come from the reduced sensitivity of their response as compared with hydraulic control systems, as well as the need to identify anomalies in low level signals that fluctuate only slightly but continuously.

In this research, simulation tests were performed by setting various kinds of failure modes for a test valve with the same specifications as of a valve actually used in the plants. Actual control signals recorded from an operating plant were then used as input signals for simulation.

The results of the tests confirmed the feasibility of applying on-line diagnostic techniques based on time series analysis to air-operated control valves.

Keywords on-line diagnosis, air-operated control valve, parameter estimation, time series analysis, simulation test

1. はじめに

プラントが定格出力で定常運転中に、すなわち未だ有意な異常の認められていない状態において、機器の機能の異常が徐々に進展していく状態を想定する。その際、異常が顕在化する以前に、オンライン診断法によって故障の発生とそのモードを予測することは可能であろうか。本研究においては、この可能性を追及する。短時間に破局に進展する場合は想

定しない。

現在、原子力発電所の中央制御室には、直接測定が可能なプロセス諸量の計測値が表示されており、それらの状態量を監視することによって異常診断を行っている。しかし、頭記の目的に適合した診断設備はない。

一方、産業界では、新しい「状態推定型の診断システム」を採用して油圧制御機器の異常監視を行い、従来の状態量監視では把握し難い初期段階における

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
現日本原燃(株) 再処理建設部

† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

‡ 三菱重工業(株) 電子・宇宙技術部

異常を検知できるようになり，安全運転や最適保全の面で多大な成果を得ている例⁽¹⁾がある．

状態推定型の機器異常診断法とは、入出力の相互パワースペクトル密度関数等のシステムの性状を表すパラメータの正常値からの偏差を測定し，異常を検出し，その原因を判定する診断法である．

この研究では，PWRプラントにおいて流量制御に多数使用されている空気作動制御弁に状態推定型の診断技術を適用するためのフィジビリティ・スタディを実施した．対象制御弁としては，プラントの安定運転への影響が大きいという理由で主給水制御弁を選ぶ．

現在，原子力発電所あるいは鉄鋼プラントで実用化または研究段階にある新しいオンライン診断技術をシステムの構成および原理に基づいて分類すると図1のとおりである．

これらを主給水制御弁の異常診断に適用する場合の診断性能，得られる効果，保守性および経済性について，総合的に検討した結果，制御弁の構成部品各部での多数のプロセス信号を処理する多変数による状態監視⁽²⁾⁽³⁾は複雑さに見合った効果が期待できないという理由で，また，オンライン診断の場合の定常プラント運転状態での状態量の変動はわずかであり，正確な規範モデル⁽⁴⁾を構築することが困

難であるという理由で，「入出力信号による状態推定型」による診断システムについて研究を進めることとした．

状態推定型診断の原理は次のとおりである．

- (1) 正常の運転状態における状態推定量のデータを蓄積し，正常な状態でのデータ変動幅を求め，それと有意に異なることをもって異常と判定する閾値を設定する．
- (2) 運転中の診断対象システムへの入出力信号から状態推定量を逐次求めておき時系列データとする．先に求めた閾値とそれぞれの値および変動の態様を比較し，その閾値を超える時，システムの異常と診断する．

この診断法の適用性，すなわちこの方法が給水制御弁の異常診断に適用できるかどうかという判定は，次のように行う．

- (1) まず，正常モード及び故障モードでの供試体弁でのシミュレーション試験を行い，各々の状態推定量データを求め，状態推定量毎に正常モードと故障モードの識別性の評価と，診断のために最も有効な状態推定量を選定する．
- (2) 選定した状態推定量について，実機の正常な運転状態におけるデータに基づく正常な状態

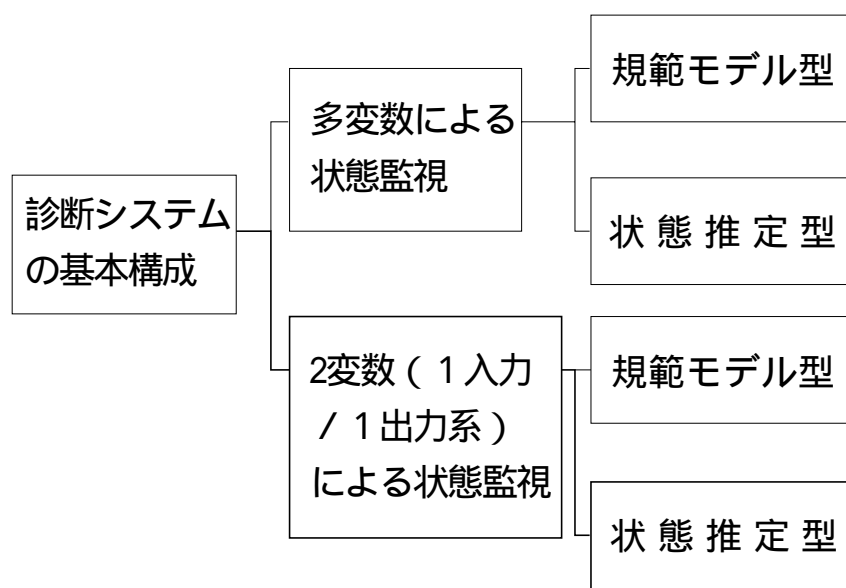


図1 診断システムの基本構成および原理に基づく分類

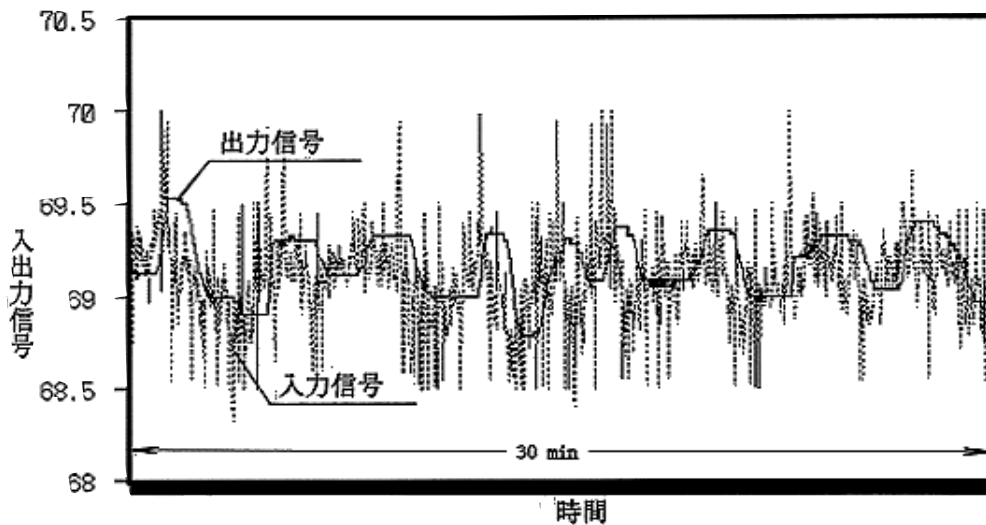


図2 実機プラントでの弁の入出力信号

での変動幅を求め、故障時に有意な偏差が観察されるかどうか評価する。

2. 供試体弁によるシミュレーション試験

2.1 試験方法

実機プラントの開度指令信号（入力信号）は、図2に示すようにシステムのノイズを含む不規則なパルスのような変動が連続した信号であり、弁開度信号（出力信号）は、弁の駆動機構の応答特性により全体的には指令信号に従うが、高周波成分には追従せずある時間遅れをもった出力信号となっている。

次に、この正常状態から何らかの故障モードが発生し徐々に進展した場合、弁の応答そのものに異常が発生する以前に入出力信号による状態推定量の特性変化により、異常を早期に発見することが可能かどうか本研究のテーマであることより、シミュレーション試験では1000MWeクラスPWRプラントに使用されている主給水制御弁と同一仕様の供試体弁を用い、これに弁開度指令信号としては、正常状態として実機プラントで採取した信号を入力し、弁を応答させたもとの、弁各部に異常を発生させることにより実機模擬を行った。試験装置の外観を図3に、構成を図4に示す。

設定した故障モード、磨耗、漏れ、摺動抵抗増加（スティック）等は、徐々に進展する事象であり、

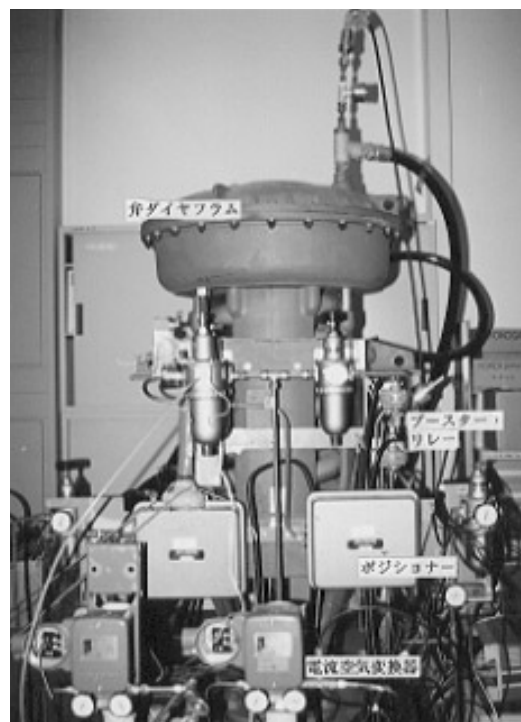
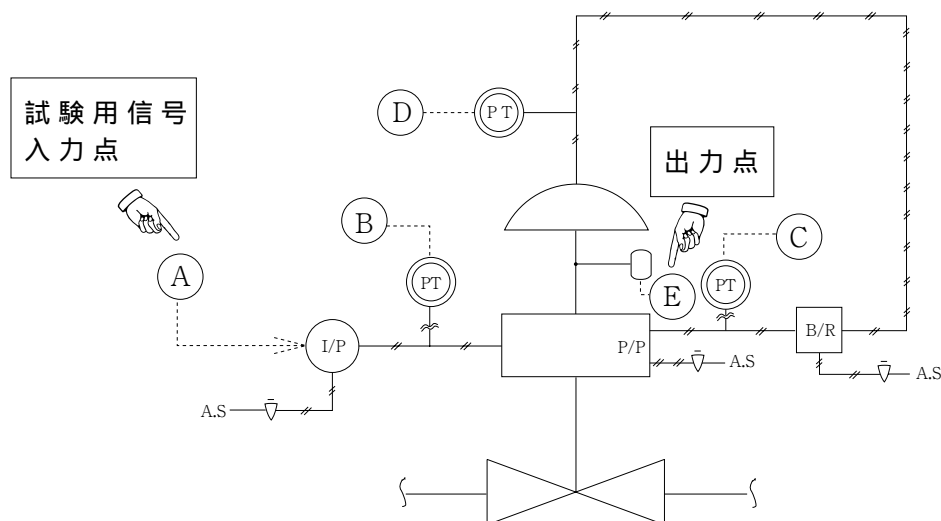


図3 供試体弁

かつ、定量的に故障程度を表現することは困難であることから、弁の開度の応答が追従しなくなる、または、ハンチングが発生する状態の手前の条件、つまり、流量制御のシステムとしてはまだ異常が顕在化していない故障程度を設定した。



データ測定

- Ⓐ : I/P 変換器入力信号
- Ⓑ : P/P 入力信号
- Ⓒ : B/R 入力信号
- Ⓓ : 弁ダイヤフラム空気圧力
- Ⓔ : 弁開度信号

機器略称

- I/P : 電流空気変換器
- P/P : ポジショナー
- B/R : ブースター・リレー
- A.S : 空気供給系統
- PT : 圧力伝送器

図4 供試体弁の試験装置の概略構成

実機との違いは温度条件の違い、流体がないことおよび、系統よりのフィードバック信号がないことがあるが、温度条件についてはグランド部の摺動抵抗の大きさに影響するが、弁開度指令信号と弁開度挙動の関係がホットとコールドとで差のない調整状態であることを事前確認試験で把握していること、流体についてはその抗力に対して弁の駆動力は十分に大きいこと、また、異常状態とはいえ弁の応答としては入力信号に追従している範囲であり、系統全体に与える影響を介して弁へフィードバックがかかることは無視できると考えられることより、試験目的達成のために支障とはならない。

2.2 供試体弁事前確認試験

試験実施にあたっては、まず供試体弁が実機プラントの弁と同様な調整状態であることを静特性試験および動特性試験確認により確認した。確認試験方法は次のとおりである。

静特性試験では、各弁開度指令値（0, 25, 50,

75, 100%）を入力信号として与え、一方、動特性試験では、特定開度（指令状態）において、 $\pm 10\%$ および $\pm 0.5\%$ の開度指令値ステップ変動を与えたときの弁の応答状態、すなわち弁開度を測定した。具体的には、図4のA点に入力信号として開度指令値を与え、E点において弁開度を出力信号として計測した。

2.3 試験内容

入力信号である弁開度指令信号と出力信号である弁開度信号を使った各種の状態推定量に対し、対象弁の各故障モードを模擬し、故障モードの識別性の特性を調べた。

状態推定量としては、

- (1) 弁開度信号による自己相関関数
- (2) 弁開度指令信号と弁開度信号による相互相関関数
- (3) 弁開度信号による自己パワースペクトル密度関数

- (4) 弁開度指令信号と弁開度信号による相互パワースペクトル密度関数
- (5) 弁開度指令信号に対する弁開度信号の伝達関数
- (6) 弁開度指令信号と弁開度信号のコヒーレンス関数

の6種を試験対象とした。

故障モードとしては、これまでのプラント運用実績に基づき緊急停止や出力低下に至ったもの等、次の4つを選定しシミュレーション試験の対象とした。

- (1) ポジショナパイロット弁磨耗 [摺動抵抗増加]
- (2) グランド・パッキン締付力異常 [摺動抵抗増加]
- (3) ブースタリレーの感度調整弁の不調 [異物閉塞]
- (4) ポジショナ出力信号配管空気漏れ

設定した故障モードとその部位を図5に示す。

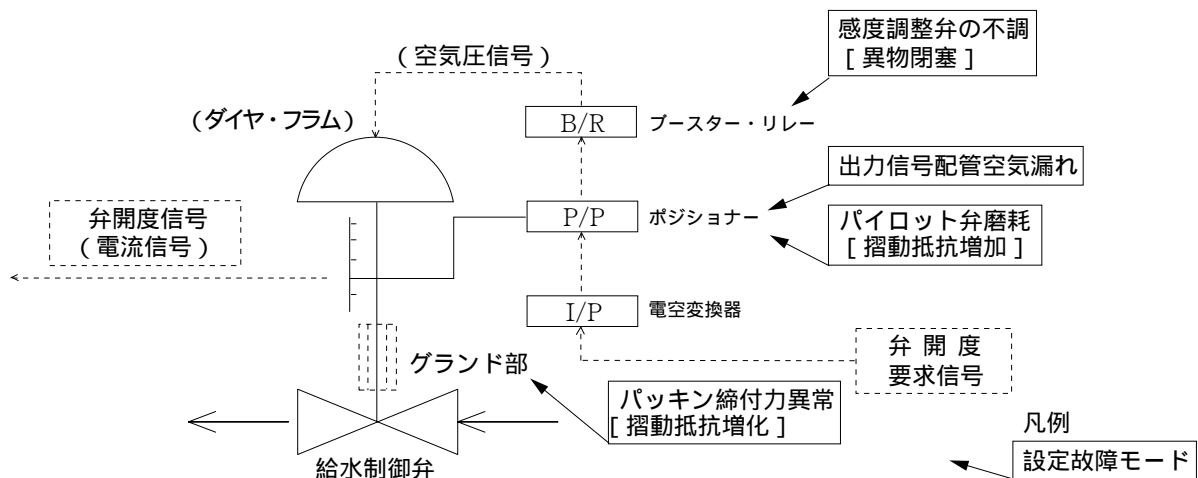


図5 各種の故障を模擬したシミュレーション試験

2.4 試験結果

各故障モードに対するシミュレーション試験の結果から得られた各状態推定量による異常の識別性を表1にとりまとめて示す。いずれの状態推定量についても何らかの識別性を有しているが、相互パワースペクトル密度関数、伝達関数（およびコヒーレンス関数）については、安定した周波数領域のデータを得るのに長時間を要すること、また定量的な評価値とし難く診断処理上に難点がある。

残る自己相関関数、相互相関関数および自己パワースペクトル密度関数については、比較的容易に識別が可能であり、中でも相互相関関数は、故障モードによる遅れ時間や、ピーク値の特性により識別が可能であり最も有力といえる。図6に正常状態における主給水制御弁の相互相関関数（実機データ）の解析例を示す。

従って以後は、状態推定量としての相互相関関数

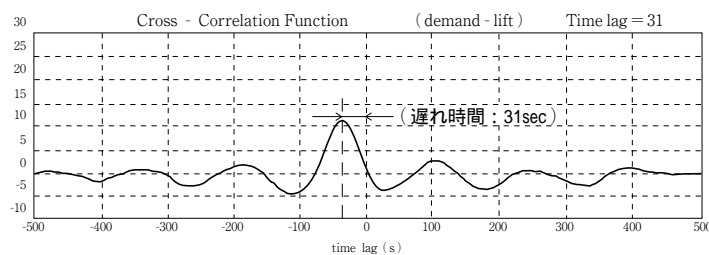


図6 正常状態の主給水制御弁の相互相関関数の例

状態 推定量	故障モード		・ポジションパイロット弁摩耗 ・グランドパッキン締付力異常 ・ブースターリレー感度調整弁の不調	・ポジション出力信号配管空気漏れ
	自己相関関数 (弁開度)		・ピーク値の時間幅拡大	・ピーク値の時間幅縮小
解析 パラ メ ー タ	相互相関関数 (開度指令, 弁開度)		・遅れ時間増加 ・相関度低下 ・ピーク値の時間幅拡大	・遅れ時間減少 ・ピーク値の時間幅縮小
	自己パワースペクトル密度関数 (弁開度)		・ピーク値低下 ・高周波成分の減少	・低周波成分の減少
タ	相互パワースペクトル密度関数 (開度指令, 弁開度)		・ 7.0×10^{-3} Hz 以下の周波数でピーク 値減少	・ ピーク周波数高周波側へ移動
	伝達関数 (開度指令, 弁開度)	大きさ	・ 1.0×10^{-2} Hz 付近のゲイン減少	・ $2.0 \sim 3.0 \times 10^{-2}$ Hz 付近のゲイン増加
		位相	・ $4.0 \sim 10.0 \times 10^{-3}$ Hz 付近の位相遅れ 増大	・ $4.0 \sim 10.0 \times 10^{-3}$ Hz 付近の位相遅れ 減少
コヒーレンス関数 (開度指令, 弁開度)		・ 2.0×10^{-2} Hz 以下で相関度低下	・ 1.0×10^{-2} Hz 以下で相関度低下	
総合評価			入力信号に対して出力信号の追従性が 悪化する。	見かけ上、入力信号に対して出力信号の追 従性が良くなる。

表 1 各解析パラメータの変化

評価データ 弁種別	卓越周期	1/3 波高値	遅れ時間	卓越周期	1/3 波高値	遅れ時間
制御弁 - A	160sec	0.361%	34.4sec	173sec	0.586%	33.4sec
制御弁 - B	205sec	0.539%	43.3sec	182sec	0.834%	44.2sec
制御弁 - C	120sec	0.313%	29.4sec	169sec	0.518%	43.2sec
制御弁 - D	146sec	0.360%	28.9sec	179sec	0.586%	38.1sec
備考	定期検査前データ			定期検査(弁分解、再組立) 後データ		

卓越周期 : 弁開度信号のパワースペクトルにおいてピークを示す周波数成分
 1/3 波高値 : 弁開度信号の 1/3 波高値。不規則な波に対する統計的代表値, 観察
 期間の波の大きい順に全体の 1/3 個の波高を算術平均
 遅れ時間 : 弁開度指令信号と弁開度信号の相互相関関数の遅れ時間

表 2 卓越周波数(周期), 1/3 波高値および遅れ時間

の利用という観点で議論を展開する。

なお、故障モードと状態推定量の特性変化の関係
 についての物理的説明については、一通りチェック
 はして矛盾のないことを確認している。詳細につい
 ては割愛する。

3. 状態推定量としての相互相関関数に 関する実機プラントの定常運転状態 データ評価

制御弁の応答特性は、定期検査時の弁の分解、再

評価項目	データ評価方法	評価結果
短時間における遅れ時間の変動量 (約2時間)	データ(2048点)の解析値の約2時間中(256秒毎)の最大値と最小値との比率をデカード表示	0.15デカード (A,B,C,Dの4弁の最大値)
長期間における遅れ時間の変動量 (約4か月)	データ(6144点)の解析値の4か月前の値と現在値との比率をデカード表示	0.13デカード (A,B,C,Dの4弁の最大値)
定期検査前後における遅れ時間の変動量	データ(6144点)の解析値の定期検査前の値と定期検査後の値との比率をデカード表示	0.17デカード (A,B,C,Dの4弁の最大値)

表3 実機プラントにおける定常運転状態のデータ変動量

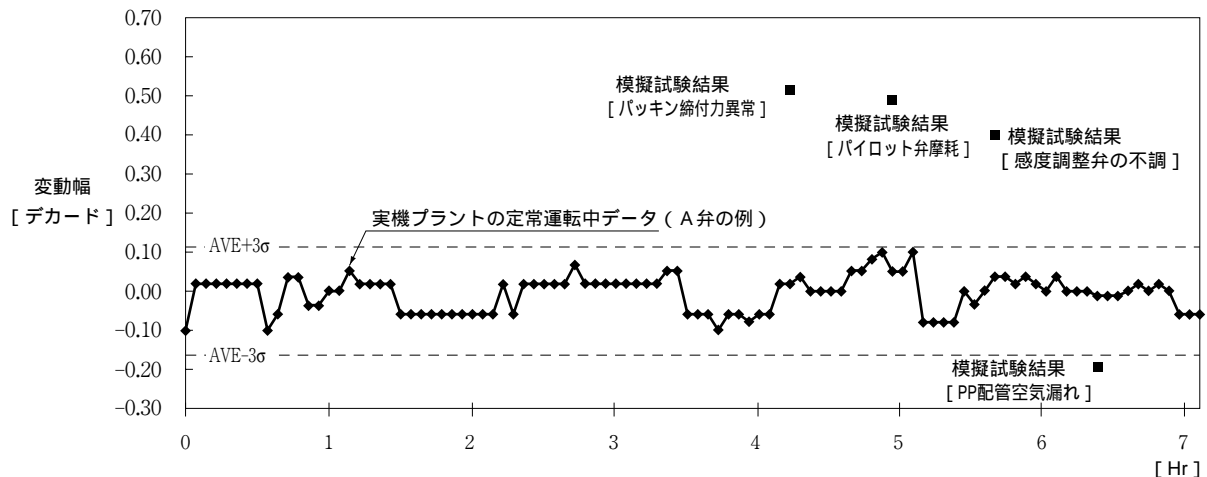


図7 実機プラントの定常運転中データと模擬試験結果

組立て、運転中の弁グランド部等のなじみ、あるいは弁の構成部品の個体差等により微妙に影響を受けていることが知られており、結果として、状態推定量の診断用パラメータにも定常的な変動幅が存在すると推定される。

ここでは、相互相関関数の遅れ時間について、これらの変動幅の評価結果を示す。

表2では、定期検査前後における定常運転状態における弁データの採取結果を弁個体毎に示す。本研究では、徐々に進展する劣化型の故障を想定しており、劣化の進展は数時間から数日、数か月の場合がありえることから、それぞれの時期において遅れ時間のデータが安定していることが必要であり、その

評価結果を表3に示す。

実機の評価結果は、短時間および長期間の測定期間、あるいは定期検査時での分解組立てを経た後も、いずれも0.15デカード程度の変動幅であることが確認された。

4. シミュレーション試験結果と実機プラントの定常運転状態データの比較評価

状態推定量としての相互相関関数の遅れ時間について、実機プラントの定常運転状態データの定常的な変動を示すデータにシミュレーション試験時の異常モード/正常モードの変動幅(比率をデカード表示したものを)をプロットしたものを図7に示す。

この図からわかるように、主要な故障モードを設定した場合のパラメータは、定常の変動幅（ ± 3 ）に比較して有意に変動していることを確認することができた。

更に、実際のプラントにおいて故障の進展する過程での診断を仮定するならば、瞬時の故障パラメータ1点のみのデータを観察するのではなく、傾向監視のためのトレンド画面等で徐々に劣化が進展（パラメータの漸増，漸減）する様を観察することにより、比較的容易に異常の識別が可能となると考えられる。

5. まとめ

本報告においては、一部の産業分野で油圧制御系機器の異常監視の手段として実用化され成果を得ている状態推定型の診断システムに対して、油圧制御システムに比較して応答性の悪い空気圧作動制御弁のオンライン（定常変動幅が小さい使用状態での）診断技術としての適用性を検討するため、その代表例としての主給水制御弁についてシミュレーション試験を実施し、状態推定量として特に相互相関関数が制御弁の各故障モードに対して異常の識別性において優れていることを示した。

しかしながら、シミュレーション試験で設定した故障モードについては、実機に基づいて故障をモデ

ル化しているものの、故障の発生個所，進展速度，発生の物理的形状等，実機でおこるであろう変化を広く模擬したものとはいえず，実機適用にあたっては，本異常診断をより信頼性のあるものにするには，運転中パラメータの兆候とその後の点検で明確になったそれに関連する部品レベルでの不具合とをデータベースとして蓄積していくことが重要である。

参考文献

- (1) 北村章 中山万希志 小西正躬 藪本淳，パラメータ推定による圧延機の電気油圧サーボ系動特性のオンライン診断技術，システム制御情報学会論文誌 Vol.4.1991
- (2) 岡町正雄 阿部浩 村田良一 佐藤雄，PWRプラント主給水系異常診断エキスパートシステムの開発，第16回技術講演会 日本機会学会講演論文集No.870-1
- (3) 野上たけき 横井良秀 笠井雅夫 河合勝則 高浦勝寿，ニューラルネットによる空気式制御弁故障診断，第44回情報処理学会
- (4) 花崎一治 小淵隆久 西村文生 吉岡大祐 細田光司 片淵博，タンデムコールドミル油圧圧下故障診断エキスパートシステム，CAMP-ISIJ Vol.2 1989