

多属性類似度に基づく異常診断技術の研究

Experimental Study on Anomaly Diagnosis Method based on
Multi-Attribute Similarity

○市原暢明, 高橋信, 若林利男

○Nobuaki Ichihara, Makoto Takahashi, Toshio Wakabayashi

東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻

Department of Quantum Science and Energy Engineering

School of Engineering Tohoku University

キーワード(keywords): 異常診断技術(Anomaly Diagnosis Method), 状態監視保全
(Condition-based Maintenance), 保守支援(Maintenance Support), 多属性類似度
(Multi-Attribute Similarity), EDS(Exponential Distribution-based Similarity)

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 若林・高橋研究室 TEL:022-795-7921 E-Mail: n.ichihara@luke.qse.tohoku.ac.jp

1. 緒言・研究背景

福島第一原子力発電所の事故を受けて原子力発電所の危険性に対する不安は更に強まり、さらに高い安全性と健全性が強く求められている。そのためには設計上の安全性だけではなく、安全な原子力発電所の運用も重要である。ゆえに運転中の機器の故障の防止は必要事項であり、我が国の原子力発電所では予防保全が保守管理の主体となっている。

予防保全の中でもプラントの状態監視保全の考え方が注目されている。状態監視保全は、機器の運転状態の監視により獲得された情報に基づき性能の低下などの異常兆候を発見し、それに対応する形で行われる保全策である。状態監視保全の利点は機器の分解点検回数を減らすことで、点検時のトラブルを減らすことと、運転停止期間の縮小による稼働率の向上である。原子力発電所の運転員は日常点検の範疇で機器の状態や冷却材流量・温度などをモニタリングしているが、異常徴候をより早い段階で見つけ、さらにその異常の原因を的確に診断するためには、より多くの属性に着目する必要がある。さらに状態監視を行うために計測されるログデータ量は膨大で、微かな兆候を捉えるのは困難なのが現状である。

先行研究では本学工学研究科に設置されているシステム安全尤度テストベンチ(System Safety Benchmark Facility: SSBF)を対象にして研究を行ってきた[1]。

本研究では、実際にシステムに異常を生起させて多属性類似度に基づく異常診断技術の有効性の検証をした。

2. 目的

先行研究で検証に用いた異常時のデータは計測した正常状態のデータから模擬したもので、異常時の実際のデータについて検証を行っていない。事例ベースのシステムを構築する上では異常兆候の種類による特徴を把握する必要がある。

また実際の異常時のデータについて本研究グループの提唱する手法を用いてどの程度まで検出可能なのかについても検証する必要がある。

本研究ではシステム構成機器で起こる異常事象のデータについてその特徴および検出可能性について検証する。

3. 診断手法

3.1. 多属性類似度に基づく診断のフレームワーク

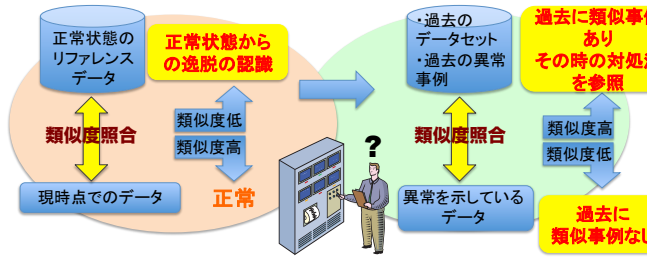


図1 多属性類似度に基づく事例ベース診断システム

図1に本研究グループで提唱する多属性類似度に基づく事例ベース診断システムの概念図を示す。

このシステムではプラントを構成する機器や系統のデータについて、現在のデータを正常状態時のデータとの類似度を照合することで運転中のプラントが正常状態なのか、そこから逸脱しているのかを監視する。正常状態からの逸脱が確認された場合には過去の異常時の事例データとの類似度を照合することで、現在の異常状態が過去に起きた異常と同じものなのかそうでないのかを判定する。過去に類似事例がある場合、その時の対処法を参照し、過去に類似事例がない場合はさらに調査をする必要がある状況だと判断することができる。

このシステムを導入することで状態監視保全において運転員、現場作業員の情報獲得活動をより効果的にする事ができる。

3.2. 類似度定義

異なる2つのデータベクトルの類似度の定義として、本研究グループでは指数分布に基づく類似度定義 (Exponential Distribution-based Similarity: EDS)を用いた[2]。EDSは次式(1)で表される。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp \left[\frac{-|f_i - g_i|}{S} \right] \quad (1)$$

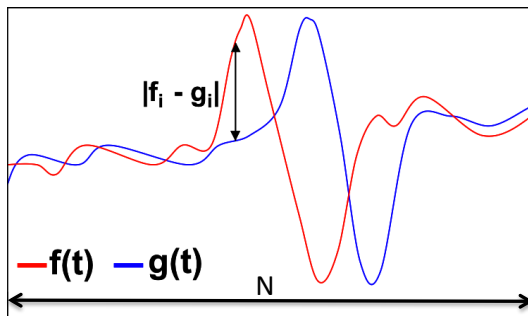


図2 データベクトルの分布

f と g は異なる2つの N 個のモーメントを持つデータベクトルで図2の様に分布していると仮定する。式(1)はベクトル f と g 間の距離を考慮し、指数関数により類似度を求める式である。 f と g の類似度が

高いほど EDS の値は1に近づき、類似度が低い場合には EDS の値は0に近づき、 n と S はマッチングパラメータで類似度の厳密さを調節する役割を果たしている。図3と図4に n と S の値による類似度変化を示す。

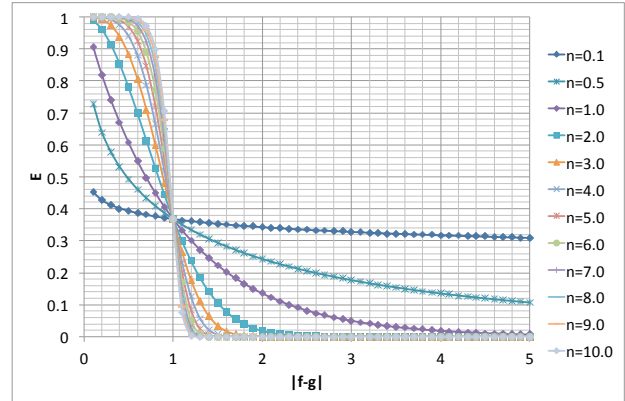


図3 マッチングパラメータによる類似度変化($S=1$)

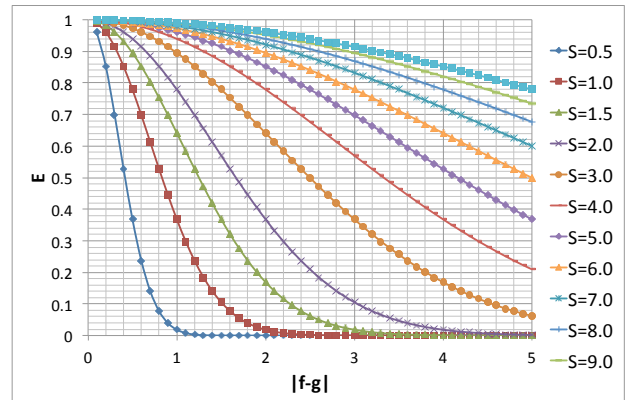


図4 マッチングパラメータによる類似度変化($n=1$)

3.3. 多属性類似パラメータの定義

通常一定出力に制御されているプラントのルーブや機器の冷却材温度、ポンプ回転数、蒸気圧力などの各機器の計測データは、それぞれある値を平均値とした一見ランダムな値を示す。システムの状態に関する情報が含まれており、周波数スペクトルを解析すると機器毎に特有な分布になる。また各機器の計測データは特定のサンプリング周期で得た離散データであり、その度数分布をとると概ね正規分布になることが分かっている。

定常状態からの逸脱を検知するために計測データそのものではなく、計測データから算出した属性値について3.1の類似度を適用する。属性値として周波数領域の属性値と時間領域の属性値を考える。

周波数領域の属性値

周波数領域の属性値として、計測データより得られるスペクトル密度を高周波数周波数帯と低周波数帯域に分けて属性値とした。機器の計測データに含まれる各周波数成分 $f_1, f_2, \dots, f_n$ の強度を $P_{f1}, P_{f2}, \dots, P_{fn}$ としたとき、スペクトル密度 (図5) は横軸に

$f_1, f_2, \dots, f_n$ 縦軸に $P_{f_1}, P_{f_2}, \dots, P_{f_n}$ をプロットしたものである。

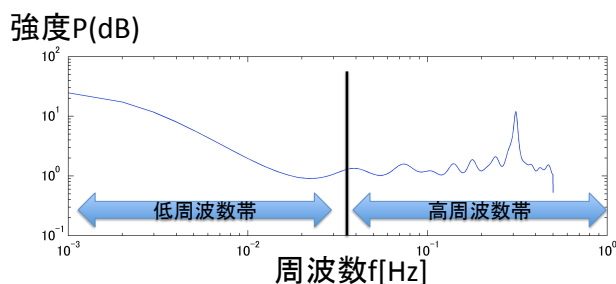


図5 スペクトル密度

周波数領域の属性値の類似度を計算する場合には属性値データベクトル F を

$$F = (P_{f_1}, P_{f_2}, \dots, P_{f_n}) \quad (2)$$

と定め、これを高周波数周波数帯 F_H と低周波数帯域 F_L についてそれぞれ求めて式(1)を適用する。(図8)

時間領域の属性値

時間領域属性では各機器の計測データの統計量、平均(μ_1)、分散(μ_2)、歪度(μ_3)、尖度(μ_4)を属性値とした。

歪度とは分布の正規分布からの歪みの度合いの指標である。図6に示すように正規分布では0であり、平均から右方遠くにデータがある場合には負の値で大きくなり、平均から左方遠くにデータがある場合には正の値で大きくなる。

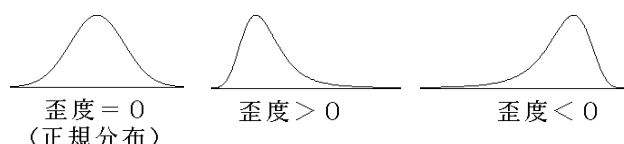


図6 歪度と度数分布の形状

尖度とは分布内の外れ値の多さの指標である。図7に示すように正規分布の尖度は3であり、尖度が3よりも大きい場合には外れ値が多く分布が広がっていることを意味する。逆に尖度が3よりも小さい場合には外れ値が少なく分布が平均周りに集中していることを意味している。

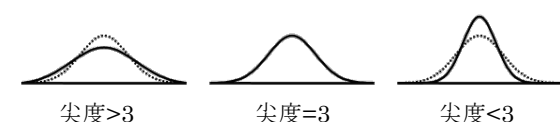


図7 尖度と度数分布の形状

時間領域の属性値の類似度を計算する場合には、属性値データベクトル T を

$$T = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4) \quad (3)$$

と定めて式(1)を適用する(図8)。

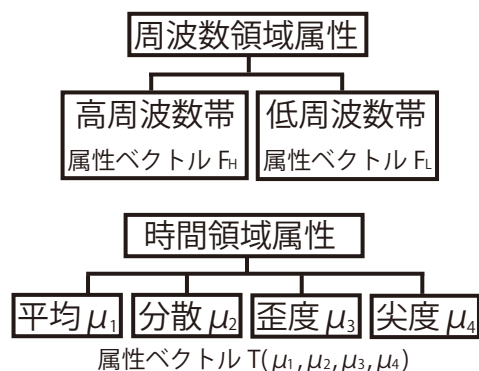


図8 各属性値データベクトル

4. 本手法の適応対象

4.1. 実験装置

本研究では図9に示す装置を用いてデータを計測した。ポンプを用いて2つの流量調節弁を介して水を循環させる。制御PCでは流量計の値を参照し流量調節弁を制御し流量を一定に保つように制御する。データ計測PCでは温度センサによって循環水温度を、超音波マイクと振動センサでポンプの状態を監視する。サンプリング周波数は超音波マイクと振動センサは10k[Hz]、温度センサについては1[Hz]で計測を行った。

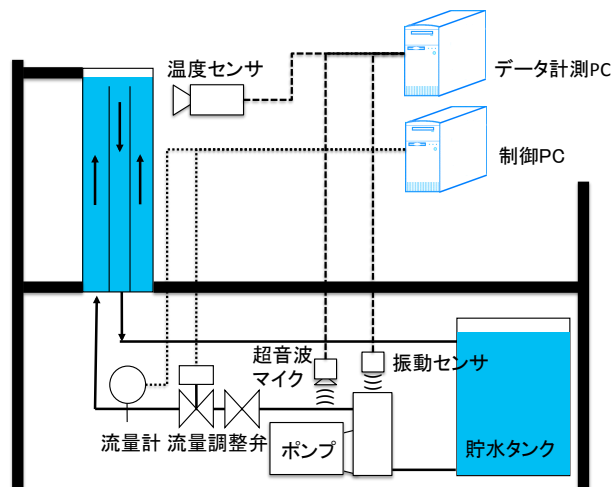


図9 装置略図

4.2. 模擬する異常

上記実験装置で次の6種類の異常について測定を行う。異常はどれも現実には起こりうるものとした。それぞれの異常についてバルブ開度を小(殆ど閉:0)・中(開度半分:128)・大(最大開度:256)の三通りで検証する。

① ポンプ台座固定用ネジ締結ミス

ポンプ台座固定用ネジを緩めた状態(図10)で装置を運転させた。これによってポンプは半固定状態となり、機器の組付けミスの状態を模擬したものである。

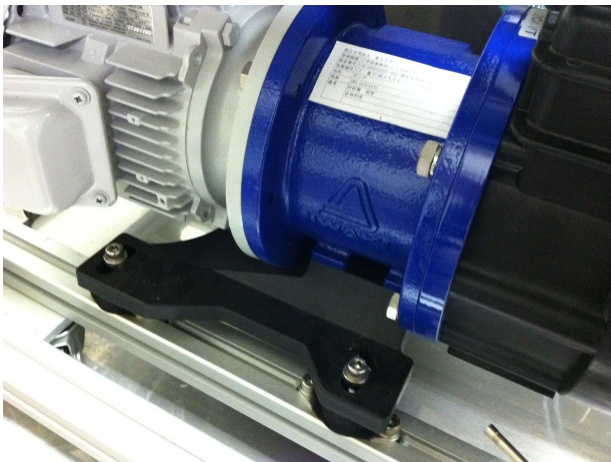


図 10 ポンプ台座

② 作動流体異常

図 8 の貯水タンクの給水口から空気を混入させた状態(図 11)で装置を運転させた。この状態はタンクの水位異常低下の状態に起こるものである。

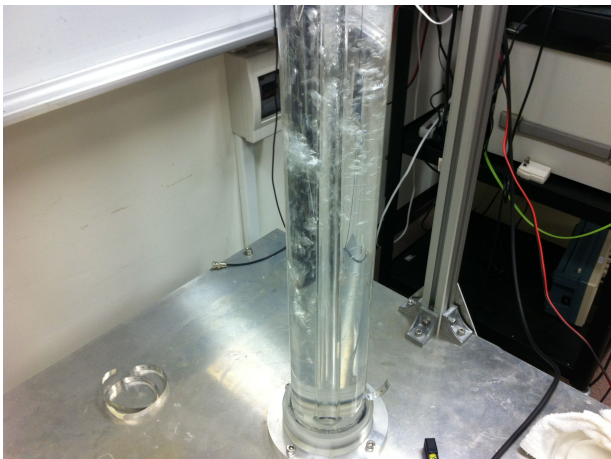


図 11 作動流体中に空気が混入した状態

③ ポンプ回転軸異常

傷をつけた回転軸をポンプに使用し、装置を運転させる。この状態はポンプの経年劣化によって回転軸が損傷した状態を模擬したものである。

④ 流路異常

作動流体の経路に異物を混入させた状態で装置を運転させる。これは運転中に部品の破断が発生し、破断した部品の一部が流路に入った状態を模擬したものである。

⑤ ポンプ瞬停

正常状態で装置を動かし、ポンプを瞬停させる。これはポンプ制御系の故障でポンプの挙動が不安定になった状態を模擬したものである。

⑥ センサ異常

センサを検出範囲と範囲外の境界の状態にセッティングをし、センサ以外は正常状態で装置を運転させる。これは、装置の運転時の振動でセンサの固定位置が変動し正確な計測ができない状態を模擬したものである。

本報告では①と②についてデータの特性と検出可能性について検証する。

5. 解析結果・考察

解析結果と考察を以下に示す。

類似度を算出する場合にはマイクと振動センサについては 100-5000[Hz]を高周波数帯、0.1-100[Hz]を低周波数帯、温度センサについては 0.01-0.5[Hz]を高周波数帯、0.001-0.01[Hz]を低周波数帯とした。

また類似度算出のパラメータは $n=0.03$, $S=0.001$ とした。

ポンプ台座固定用ネジ締結ミス

図 12、図 13、図 14 に各センサの調整弁開度中で計測したデータの周波数領域のデータベクトルを、図 15、図 16、図 17、図 18 に調整弁開度中で、マイクで計測した時間領域データベクトルの各モーメントの推移を示す。時間領域の各モーメント推移は 10k[Hz]のサンプリング周波数で 60[m]計測して得られたデータを 72 等分し、1 ブロック 50[s] (500000 サンプル) から算出した各モーメントの値を 72 ブロック分プロットしたものである。

図 12 に示すようにマイクで計測したデータの周波数スペクトルに正常状態にはみられないピークが出現していることが分かる。また低周波数帯のスペクトルの強度が全体的に下がっていることも分かる。一方で振動センサ(図 13)と温度センサ(図 14)の周波数スペクトルについては大きな差はみられなかった。また調整弁開度を変化させても大きな変化はみられなかった。

周波数領域で変化のあったマイクで計測データの時間領域属性値についても平均値(図 15)については大きな変化はみられなかったが、分散(図 16)、歪度(図 17)、尖度(図 18)には大きな変化がみられた。

これは台座の締結ネジが緩んだことでネジが振動し、マイクで検出されたと考えられる。これはポンプ自体の振動は変化していないことから考察される。

表 1 に正常状態との類似度を示す。各属性値とも類似度が下がり正常状態との判別ができていることが分かる。

表 1 正常状態との類似度

異常	開度	周波数領域 (高周波数帯)	周波数領域 (低周波数帯)	時間領域
ネジ緩み	0	0.59	0.26	0.35
	128	0.59	0.23	0.32
	256	0.59	0.25	0.36

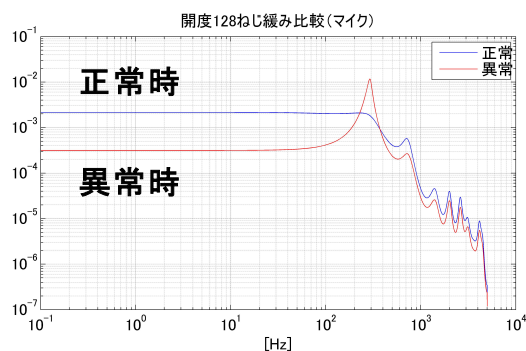


図 12 開度中マイク計測スペクトル

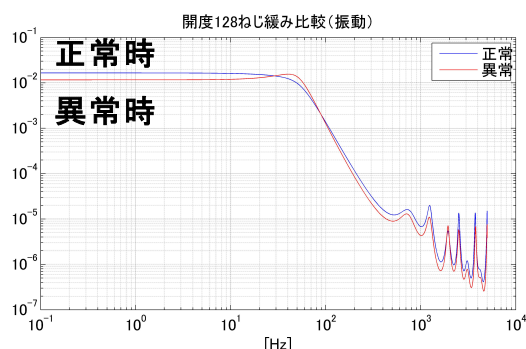


図 13 開度中振動センサスペクトル

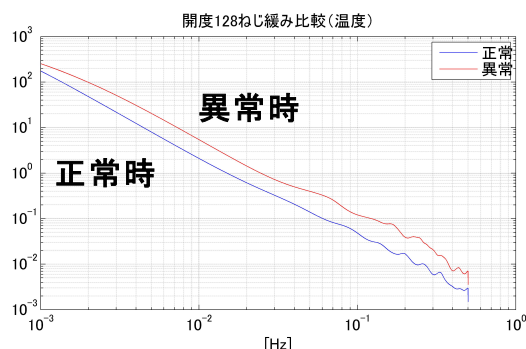


図 14 開度中温度センサスペクトル

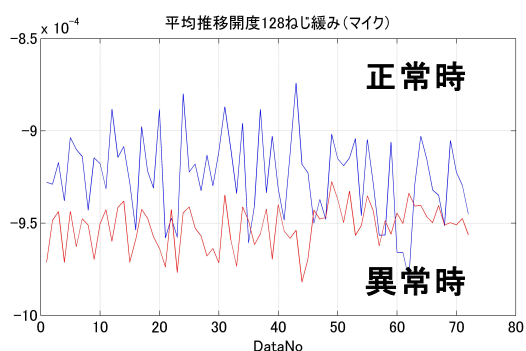


図 15 開度中マイク計測平均値推移

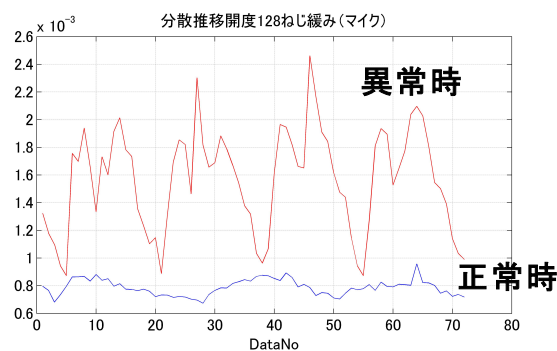


図 16 開度中マイク計測分散値推移

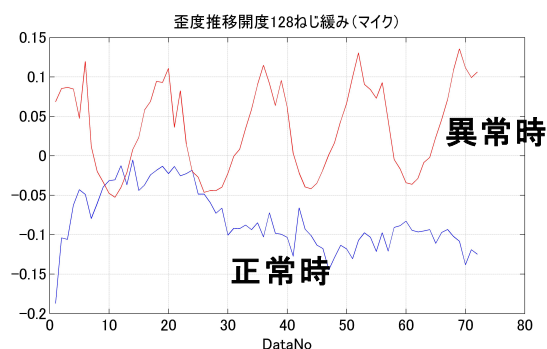


図 17 開度中マイク計測歪度推移

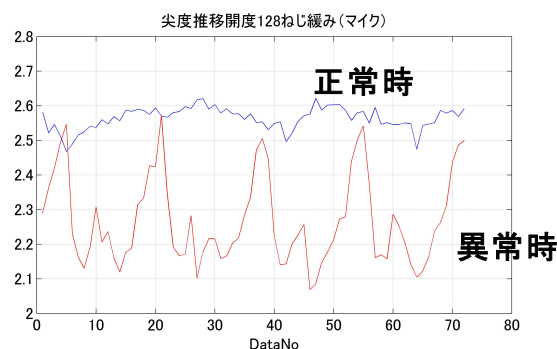


図 18 開度中マイク計測尖度推移

作動流体異常

図 19、図 20、図 21 に各センサの調整弁開度中で計測したデータの周波数領域のデータベクトルを、図 22、図 23、図 24、図 25 に調整弁開度中で、マイクで計測した時間領域データベクトルの各モーメントの推移を、図 26、図 27、図 28、図 29 に調整弁開度中で、振動センサで計測した時間領域データベクトルの各モーメントの推移を示す。時間領域データベクトルの各モーメントの算出法についてはポンプ台座固定用ネジ締結ミスの場合と同じである。

図 19 に示す様にマイクで計測したデータの周波数スペクトルに正常状態にはみられないピークが出現していることが分かる。また図 20 の振動センサで計測したデータの周波数スペクトルの低周波数帯の強度が全体的に下がっていることも分かる。温度センサ(図 21)については大きな変化はみられなかった。また調整弁開度を変化させてもこの傾向に大きな変化はみられなかった。

波数領域で変化のあったマイクで計測データの時間領域属性値についても平均値(図 22)については大

きな変化はみられなかったが、分散(図 23)、歪度(図 24)、尖度(図 25)には大きな変化がみられた。振動センサで計測したデータの時間領域特性については分散値(図 27)については傾向の差がみられたが、ほかのモーメントについては大きな変化はみられなかった(図 26、図 28、図 29)。

これは流体中に空気が混入したことでポンプ内のインペラに空気が巻き込まれ、その結果がマイクと振動センサで検出されたと考えられる。

表 2 に正常状態との類似度を示す。各属性値とも類似度が下がり正常状態との判別ができていることが分かる。

表 2 正常状態との類似度

異常	開度	周波数領域 (高周波数帯)	周波数領域 (低周波数帯)	時間領域
空気流入	0	0.57	0.22	0.30
	128	0.64	0.23	0.29
	256	0.64	0.25	0.32

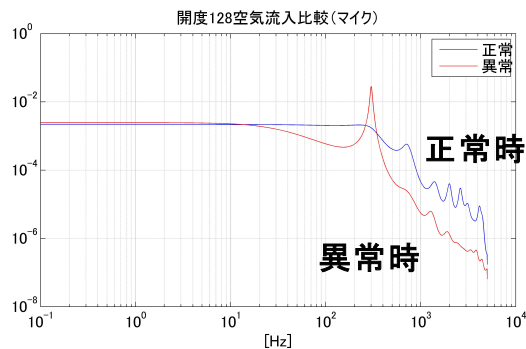


図 19 開度中マイク計測スペクトル

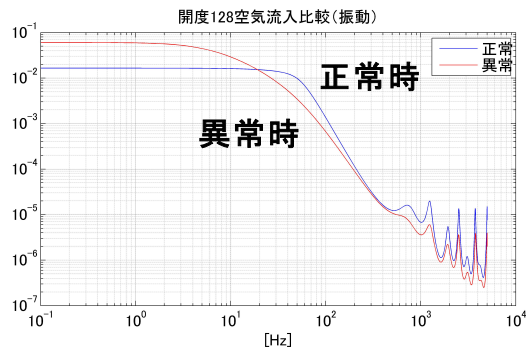


図 20 開度中振動センサスペクトル

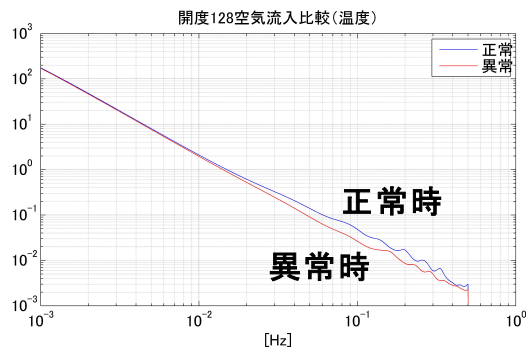


図 21 開度中温度センサ計測スペクトル

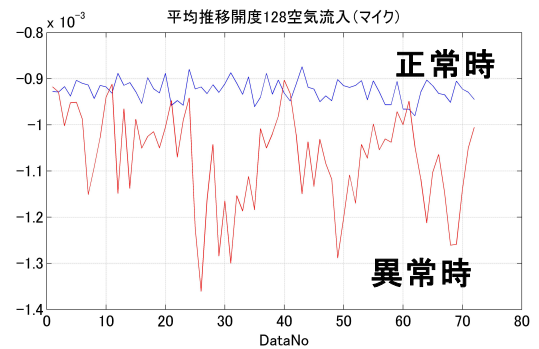


図 22 開度中マイク計測平均値推移

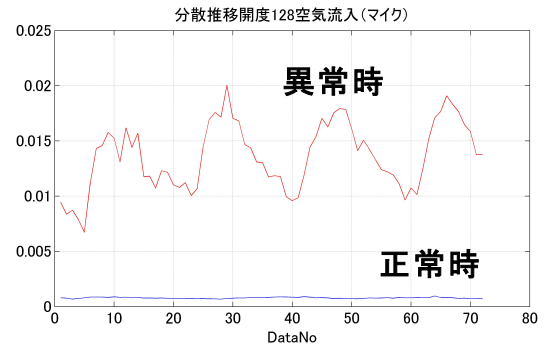


図 23 開度中マイク計測分散値推移

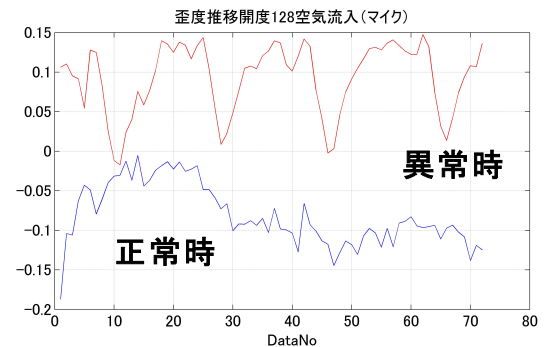


図 24 開度中マイク計測歪度推移

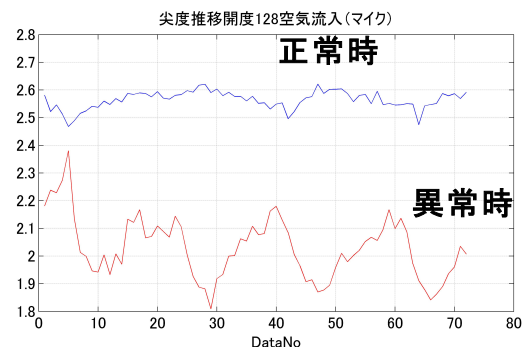


図 25 開度中マイク計測尖度推移

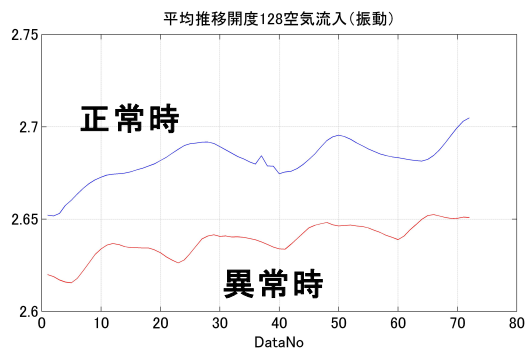


図 26 開度中振動センサ計測平均値推移

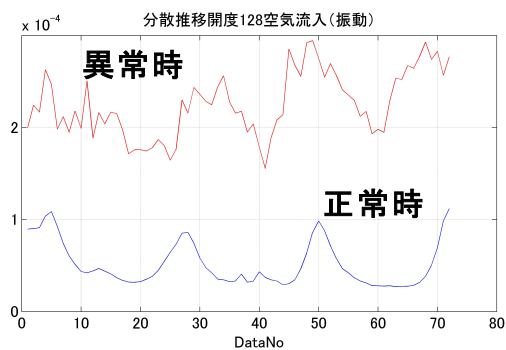


図 27 開度中振動センサ計測分散値推移

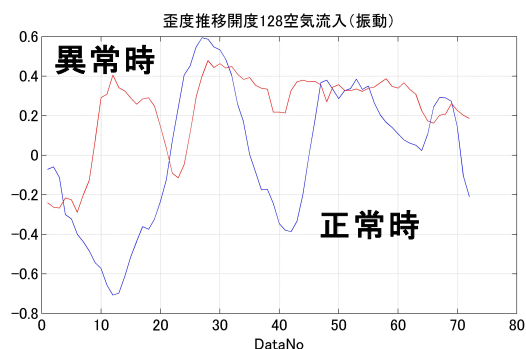


図 28 開度中振動センサ計測歪度推移

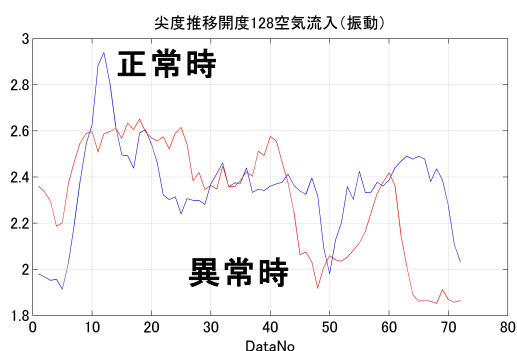


図 29 開度中振動センサ計測尖度推移

6. まとめ

今回比較をしたポンプ台座固定用ネジ締結ミスと作動流体異常について正常状態との類似度は下がり、異常検出は可能であると結論づけられる。

正常状態との類似度の変化の度合いから各異常状態の判別は難しい結果となった。各異常状態との類似度について検証し、異常状態の判別がどの程度まで可能なのかをさらに検証する必要がある。

また属性値によってはモーメント毎の強度に大きな差があるので類似度計算のマッチングパラメータの選定方法についても更に検討する必要がある。

7. 今後の展望

今後は 4.2 の③以降の異常についてデータを解析し状態判別能力と異常検出までに要する時間についても検証していく予定である。

また検出が困難な事象に対する方策を検討していく予定である。

8. 参考文献

[1]原田淳一：プラント状態監視保全支援システムに関する研究、平成 18 年度 修士論文

[2]Catur DIANTONO：原子力プラントにおける知的情報統合のための情報検索手法、日本原子力学会誌、Vol.42、No.11 (2000)