



2020年度

船舶用ポンプ状態診断システムの技術開発
成果報告書

2021年10月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACEの交付金による日本財団の助成金を受けて、2020年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「船舶用ポンプ状態診断システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2019年度、2020年度の2年計画で、株式会社浪速ポンプ製作所、イーグル工業株式会社に委託して実施しており、その最終年度の報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。次第である。

2021年10月
(一社)日本船用工業会

目次	頁
1. 事業の目的.....	2
2. 本事業の目標.....	2
2.1 2019年度の事業の目標.....	2
2.2 本事業の最終目標.....	2
3. 事業内容.....	3
3.1 2019年度の実施内容.....	3
3.2 2020年度の実施内容.....	4
4. 実施結果.....	5
4.1 ポンプ状態監視システムの製作	5
4.1.1 データ収集及びデータの分析.....	6
4.1.2 状態診断ソフトウェア製作.....	30
4.1.3 AEセンサデータ取得及び分析.....	45
4.2 メカニカルシール状態診断用基本データの収集と解析.....	60
4.2.1 メカニカルシール異常運転時のデータの取得、評価.....	60
4.2.2 試作型メカニカルシール状態診断システムの基本データ解析及びソフトウェア製作.....	72
4.2.3 試作型メカニカルシール状態診断システムによる実船搭載ポンプでの運転データ取得...	89
4.3 2019年度の課題	96
4.4 メカニカルシール状態診断システムの製作	97
4.4.1 試作型メカニカルシール状態診断システムの実船運転データ取得及びフィードバック...	97
4.4.2 故障モード検知率75%以上の検出アルゴリズム開発.....	104
4.5 陸側へのデータ転送量の最適化及びデータ受信側のシステム製作	119
4.5.1 データ受信側の装置製作	119
4.5.2 データ転送量の最適化	121
4.5.3 データ受信側のソフトウェア製作.....	124
4.5.4 データ受信側のシステム評価.....	132
5. 研究開発成果.....	134
5.1 2019年度の事業の目標1)に対する研究開発成果.....	134
5.1.1 データ収集及びデータ分析の成果	134
5.1.2 状態診断ソフトウェア製作の成果	135
5.1.3 AEセンサを用いたポンプ状態監視診断システムの拡張の成果	135
5.2 2019年度の事業の目標2)に対する研究開発成果	135
5.2.1 メカニカルシール状態診断用基本データ収集に対する成果	135
5.2.2 メカニカルシール状態診断用実船データ収集に対する成果	136
5.2.3 メカニカルシール状態診断用基本(実船)データ解析に対する成果	136
5.3 本事業の最終目標1)に対する研究開発成果.....	137
5.4 本事業の最終目標2)に対する研究開発成果.....	137
6. 今後の課題	138
7. 参考文献.....	139

1. 事業の目的

ユーザ（船管理会社、船運航会社）では、船陸間通信を用いて情報をリアルタイムで共有し、船の安全運航について様々な取り組みが行われている。その一つとして、主機関では、状態基準保全・船陸間での情報共有を実施し、船員の負担を軽減することがすでに始まっている。一方、船の運航上の重要な機器の一つである船舶用ポンプについては、未だに時間基準保全が一般的であり、状態基準保全等を導入するためには新たなツールの開発が必要となる。本開発ではIoT技術を活用した船舶用ポンプ状態診断システムを開発し、メンテナンスにおける船員負担の軽減を図るとともに、ポンプの不測の不具合を回避することにより、船の安全運航の更なる向上を目指す。この開発成果は、将来の自動運航船の実現にとっても不可欠なツールである。

< 補足説明 >

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について補足すると以下のとおりである。

本事業では、清・海水用渦巻きポンプ及びメカニカルシールを対象として技術開発する。

メカニカルシールは回転機械のシャフトに設置されるパッキンの一種で、ポンプの重要な部品である。また、補用部品割合の約50%を占め、船舶用ポンプのメンテナンス時期に影響を及ぼす部品である。

船舶用ポンプ状態診断システムの技術開発とは、船舶用ポンプの状態監視／診断技術、船舶用ポンプメカニカルシールの状態監視／診断技術、船陸間通信を用いたデータ共有化技術を示す。

状態診断には、故障後または一定時間ごとの保全（時間基準保全）を行う段階の異常検知、事故の未然防止のため、状態を基準に保全（状態基準保全）をおこなう段階の異常の予兆検知、現在までの状態から今後の状態を予測する余寿命診断の三つの段階があり、本開発では 項の状態基準保全にかかわる技術開発を実施する。

補用部品割合とは、実施者でのポンプの補用部品（修理のためにあらかじめ用意しておく部品）の供給割合を調査したものを示す。

ポンプは回転機械としての特徴と流体機械としての特徴を併せ持つ機器であり、異常の予兆を検知するためにはそれぞれの特徴をとらえるためのセンサが必要となる。これまでに行った基礎データ収集ではこの特徴を直接観測できるセンサを使って実施した。製品化にあたって、状態を二次的に観測できるセンサとして、これまでの加速度センサ（振動）だけではなく、AEセンサでの拡張を目指す。

二次的に観測とは、その状態が発生する条件を直接計測ではなくその状態が発生したことによる兆候の計測、例えばアンバランスによる振動、キャビテーションのバブルの破裂による振動などを指す。

AEセンサ（AE: Acoustic Emission）とは、材料が変形あるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを音波（弾性波、AE波）として放出する現象をとらえるためのセンサで、材料や構造の欠陥や破壊を発見・予知するために用いられる。加速度センサ（振動）と同様に状態を二次的に観測できるセンサであるが、微小な兆候をとらえることができ、振動より多くの兆候の検知、および早い段階での観測の二つの特徴がある。

但し、加速度センサからAEセンサへの移行は、微小な兆候を扱うための課題をクリアする必要がある。

2. 本事業の目標

2.1 2019年度の事業の目標

- 1) 一般的な船用ポンプに取り付けられるセンサに2種類のセンサを追加し、故障モードの80%以上をカバー可能なポンプ状態診断システムの確立
- 2) 船用ポンプ向けメカニカルシールで予期される故障モードの内、7項目（約85%）の運転状態を模擬し、メカニカルシールの状態診断に必要な基礎データを取得する

2.2 本事業の最終目標

- 1) 故障モード検知率75%以上のメカニカルシール状態診断システムの確立
- 2) 船陸間で共有するデータ量1MB/日以下

3. 事業内容

3.1 2019年度の実施内容

1)ポンプ状態監視診断システムの製作と拡張

1-1) データ収集及びデータ分析

ポンプ診断の判定に使用するため、協力者から提供されたばら積み船(90,000DWT)の約3年間のポンプ稼働データ(本事業の1年分及び本事業開始前の約2年分)を使用し、故障を表す兆候パラメータの分析を行う。

1-2) 状態診断ソフトウェア製作

2016年度に実施した陸上試験データ及び協力者から提供された約3年分のポンプ稼働データを元に故障を表す兆候パラメータの特徴をまとめた一覧(ポンプ診断マトリックス)の最適化を行う。ポンプ診断マトリックスを使用した状態診断ソフトウェアを製作する。

1-3) AEセンサを用いたポンプ状態監視診断システムの拡張

AEセンサを用いて広範囲な診断を行うため、自社設備を活用し新たに陸上でデータ収集を行い、ポンプ診断マトリックスの更新及び診断システムの拡張を行う。

2)メカニカルシール状態診断用基本データの収集と解析

2-1) メカニカルシール異常運転時のデータの取得、評価及び解析

陸上試験機を用いて、メカニカルシールの破損につながる異常運転モードでの回転試験を実施し、基本データを取得し、評価及び解析を行う。

異常運転モード

高圧運転試験、高温運転試験、ドライ運転模擬試験、フラッシング不足模擬試験、エア残留状態模擬試験、取付ミス模擬試験、異物混入模擬試験

基本データ(測定項目)

摺動材温度、シールカバー振動、メカニカルシール近傍温度、流体圧力、固定環背面振動

2-2) 試作型メカニカルシール状態診断システムの基本データ解析及びソフトウェア製作

2-1)で得られた基本データをもとに、メカニカルシール状態診断システムに有効なデータの検討及び、実船でのデータ取得が可能となる試作型メカニカルシール状態診断システムのソフトウェア開発を行う。

2-3) 試作型メカニカルシール状態診断システムによる実船搭載ポンプでの運転データ取得

主に評価データの取得を目的とした試作型メカニカルシール状態診断システムのハードウェアを製作し、実船搭載する。2-2)で製作した状態診断ソフトウェアにて実船搭載ポンプのメカニカルシール運転データの収集を行う。

3)報告書作成

2019年度の実施内容を評価し、報告書として取りまとめる。

3.2 2020年度の実施内容

1) メカニカルシール状態診断システムの製作

1-1) 試作型メカニカルシール状態診断システムの実船運転データ取得及びフィードバック

陸上試験機にて2019年度に収集した基本データ及び、実船搭載されたメカニカルシール状態診断システムで取得した連続運転データの解析結果をフィードバックして、システムの改善による信頼性向上を図る。

1-2) 故障モード検知率75%以上の検出アルゴリズム開発

故障モード検知率75%以上の検出アルゴリズムを開発し、実船搭載されたメカニカルシール状態診断システムでの評価を実施する。

2) 陸側へのデータ転送量の最適化及びデータ受信側のシステム製作

船陸間で情報を共有化する為のシステム製作を実施する。協力者からポンプ1台分の運転データを2MB/日で受け取っている。現在は遅延なく送信可能であるが、複数のポンプ及び他の機器からの通信が増えることを考慮すると、データ圧縮が必要となってくる。陸上からサポート可能なデータ量を確保する為、10秒間で送信可能なデータサイズを目標として1MB/日を目指す。

2-1) データ受信側の装置製作

ポンプ状態監視診断システムからのデータを陸上で受け取り処理する為の装置の製作を行う。

2-2) データ転送量の最適化

船陸間も同じ認識を持ち、船陸間で共有するデータ量を1MB/日とするための最適化を行う。

2-3) データ受信側のソフトウェア製作

2-1)、2-2)の実施結果を元に、船陸間のデータ共有化ソフトウェア製作を実施する。

3) 報告書作成

2020年度の実施内容を評価し、報告書として取りまとめる。

4. 実施結果

4.1 ポンプ状態監視システムの製作

ポンプ状態監視システムは以下の内容に沿って実施している。

- 1) 2016 年度～2018 年度の成果
 - 陸上模擬試験装置の製作
 - 陸上模擬試験でのデータ収集及び分析
 - 陸上模擬試験データ及び文献よりポンプ診断マトリックスの作成
 - 実船用計測装置の製作
 - 船陸間通信を用いたトレンド・ベクトルデータの転送
 - 実船運転でのデータ収集及び分析
- 2) 2019 年度の実施内容
 - 実船運転でのデータ収集及び分析（継続）
 - メカニカルシール計測システムの追加
 - 実船運転のデータを元にしたポンプ診断マトリックスの更新
 - センサの検討（AE センサ含む）
 - ポンプ状態監視ソフトの製作
- 3) 2020 年度の実施内容
 - メカニカルシール診断システムの製作
 - 実船運転でのデータ収集及び分析（継続）
 - 船陸間データを用いた陸上支援装置の製作
- 4) 2021 年度以降の実施予定内容
 - メカニカルシール診断システムの連携
 - ポンプ状態監視ソフトの実船搭載

4.1.1 データ収集及びデータの分析

1) 実船用計測装置の構成

データの分析に用いるデータは以下の実船搭載計測装置を用いてデータを収集した。

実船用計測装置で使用しているセンサは、ポンプが回転機械と流体機械の両方の機能を持つ機器であるため、振動をベースに圧力、電流値、軸変位で特徴を捉え分類することを目的としている。

データ収集は2016年10月1日に開始し、現在継続してデータ収集を実施している。

収録データは1日のデータ量が最大5.85GBとなるため、HDDの交換でデータの回収をすることとする。

また、後述の船陸間通信を行うため、収録用PCには2ポートを用意しNIC1側を船内LAN、NIC2側を機側パネルと通信する構成としている。

2016年10月1日～2019年4月までの実船配線系統図を図4.1.1(a)、ドック工事でメカニカルシール計測の改造を実施し、その実船配線系統図を同図(b)に示す。工事で追加した機器については太実線にて示す。尚、改造工事の詳細は、4.2メカニカルシール状態診断用基本データの収集と解析の項目参照のこと。

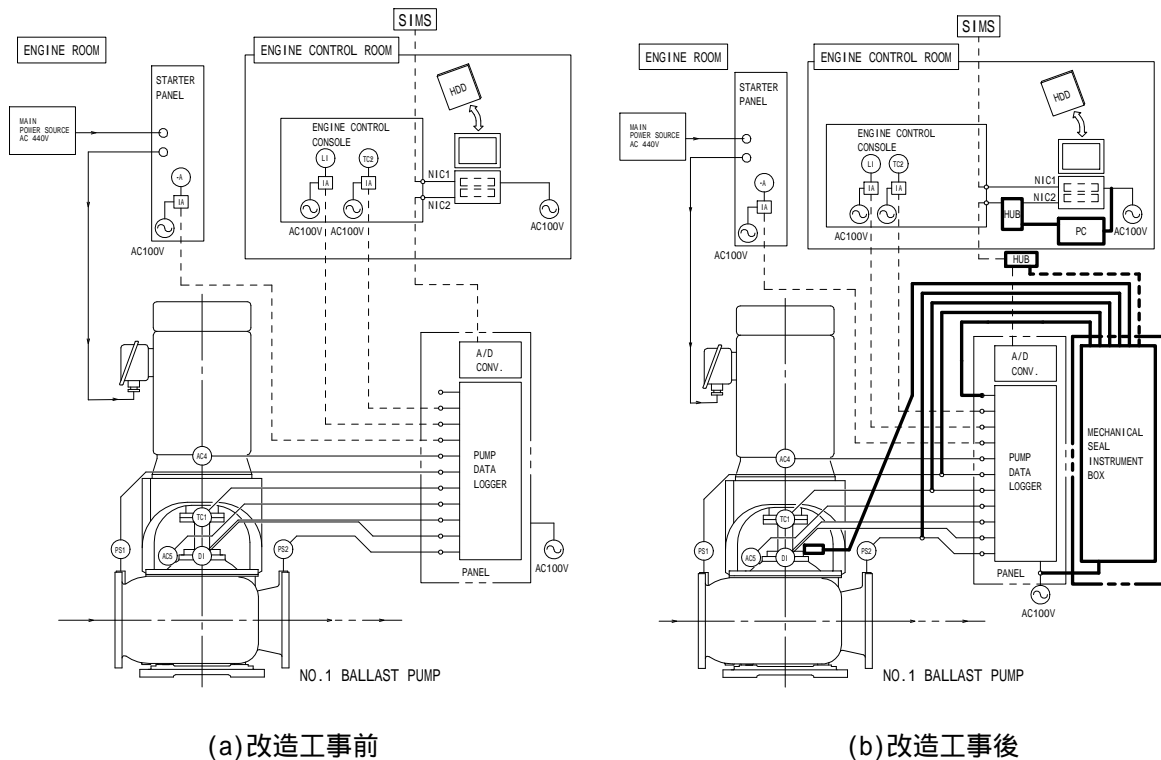


図 4.1.1 実船配線系統図

計測実施船要目

表 4.1.1 計測実施船要目

船種	Bulk Carrier
載貨重量	90,000DWT
就航	2016年10月
船級	NK 船級(MO 船)

計測対象ポンプ

表 4.1.2 計測対象ポンプ要目

用途名	NO.1 BALLAST PUMP
型式	立型両吸込渦巻式
型番	FEWV-400-3D
仕様	2000m ³ /h x 0.25MPa x 200kW x 1150min ⁻¹

実船計測項目

表 4.1.3 計測点

計測項目	計測点名称	計測点数
圧力	吸込揚程	1
	吐出揚程	1
振動	モータ下部振動	3
	ポンプケーシング振動	3
変位	軸変位	2
ポンプ回転数	1 パルス	1
	DC-rpm	1
電流	モータ電流	1
ロードインデックス	ロードインデックス	1
エンジン回転数	エンジン回転数	1
(空き)	-	1

ポンプ劣化状態の観察（メカニカルシール計測装置増設工事 2019年5月9～13日）

メカニカルシール計測装置増設の際に、ポンプの開放を行いイーグル工業製メカニカルシール及びシールカバーへの交換を実施し、ポンプ部品の確認を行った。ポンプ部品の状況を図 4.1.2 に示す。取り出したメカニカルシールの状況は図 4.1.3 に示す。

使用限界に達していない部品については、堆積物などを除去し、そのまま再使用した。メカニカルシールについては、回転環側にサーマルクラック、固定環側に貫通のクラックが確認された。

改造工事詳細については、4.2.3 試作型メカニカルシール状態診断システムによる実船搭載ポンプでの運転データ取得の項目参照のこと

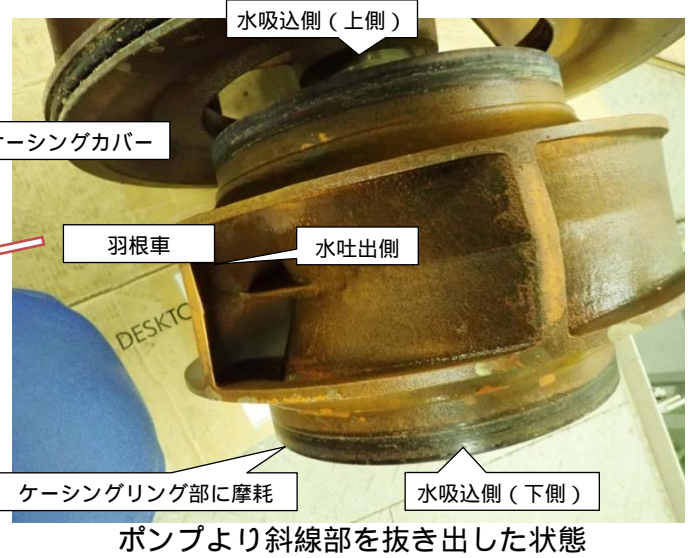
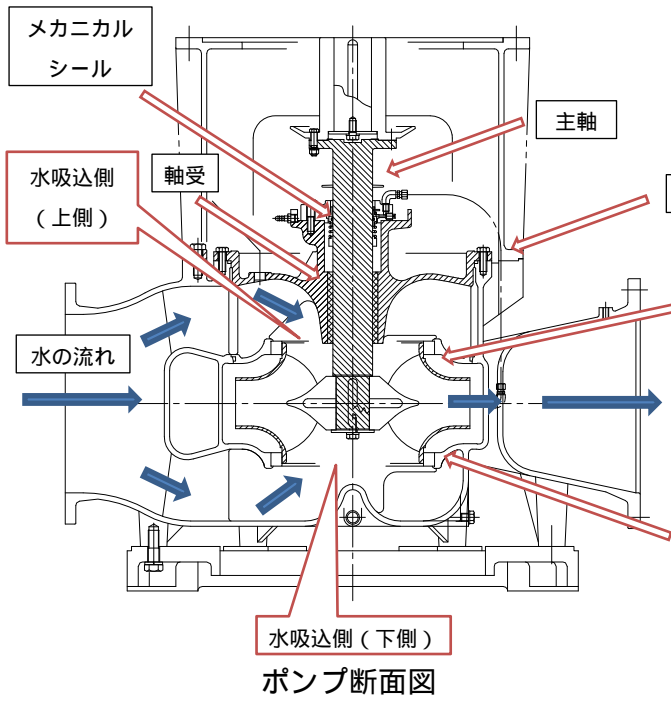


図 4.1.2 ポンプ開放状況 (ドック工事時)



回り止めピン用の切欠きがある部分に切欠きから摺動面まで貫通しているクラックがあることが確認された。



回転環の摺動面に内周から外周に向けて放射状のサーマルクラックの痕跡。



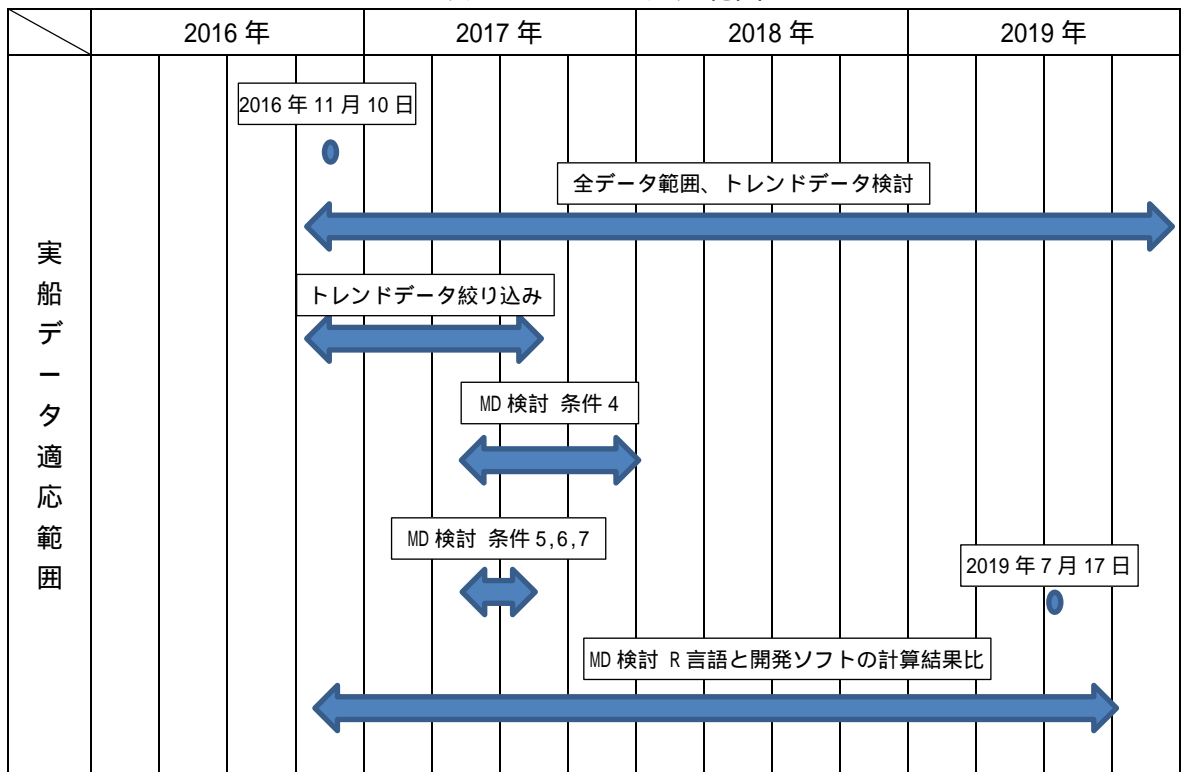
外周部に固着物が確認された。

図 4.1.3 交換前メカニカルシール

2) データ分析

データ分析に使用した実船データの範囲を表 4.1.4 に示す。

表 4.1.4 データ適応範囲



トレンドデータ絞り込み方法の検討

対象のバラストポンプには、多数の運転ポイントがあり、運転データには図 4.1.4 のように様々な運転パターンが見られたため、仕様点である全揚程 250kPa におけるトレンド傾向を分析した。

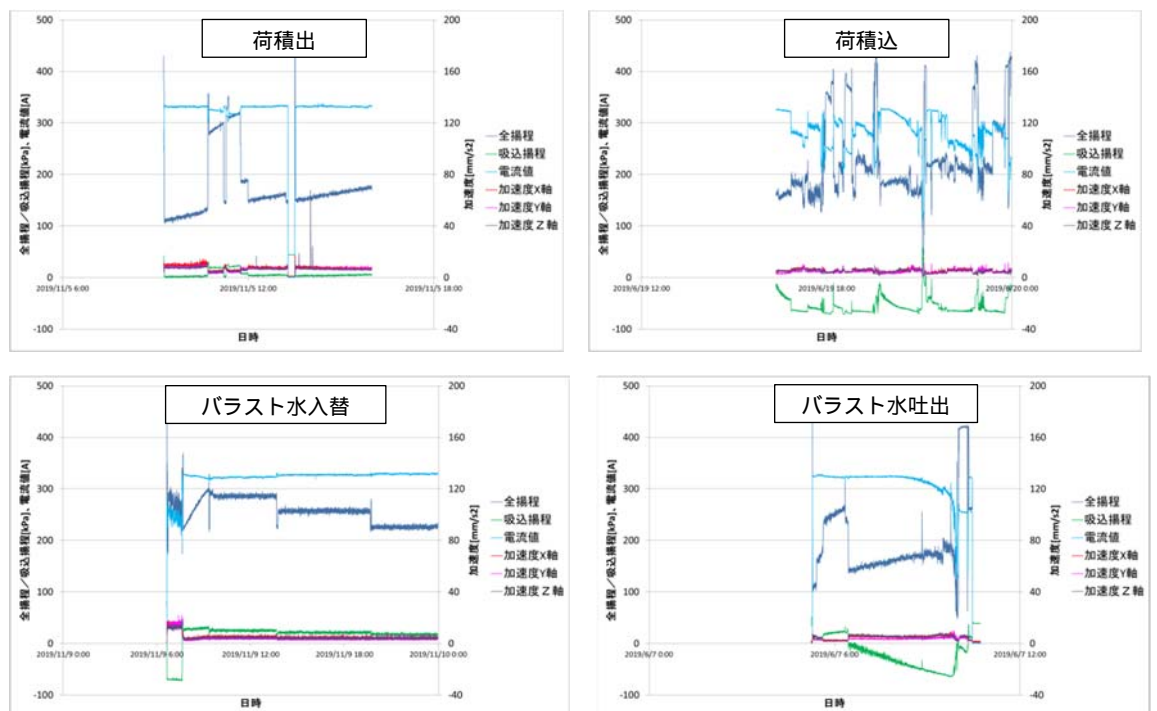


図 4.1.4 運転パターン

表 4.1.3 の計測点のデータのうち、機械的要素の代表値としてポンプ振動（加速度）の OA 値、流体的要素の代表値として電流値及び圧力の DC 成分をトレンドデータに用いた。それぞれのデータについては、現在保存している 10 秒毎のデータを圧縮しデータ容量を少なくする必要があるため、1 分間の平均値についても合わせて記載した。

バラストポンプは運転範囲が広く特徴を明確にするために、仕様点 250kPa を中心としたデータを下記の五つの条件 A ~ E で分類し、判別しやすい条件を検討した。

期間：2016 年 10 月 1 日 ~ 2017 年 8 月 31 日

絞り込み条件

条件 A	全揚程	バラツキ大、吸込み条件	全域
	全揚程	250 ± 25(kPa)、吸込揚程	指定なし (図 4.1.5)
条件 B	全揚程	バラツキ小、吸込み条件	全域
	全揚程	250 ± 5(kPa)、吸込揚程	指定なし (図 4.1.6)
条件 C	全揚程	バラツキ大、吸込み条件	押し込み運転
	全揚程	250 ± 25(kPa)、吸込揚程	DC 成分 吸込揚程 > 0kPa (図 4.1.7)
条件 D	全揚程	バラツキ大、吸込み条件	15kPa 以上押し込み運転
	全揚程	250 ± 25(kPa)、吸込揚程	DC 成分 吸込揚程 > 15kPa (図 4.1.8)
条件 E	全揚程	バラツキ小、吸込み条件	15kPa 以上押し込み運転
	全揚程	250 ± 5(kPa)、吸込揚程	DC 成分 吸込揚程 > 15kPa (図 4.1.9)

条件 A、B については吸込みの影響が大きく表れ、条件 D、E についてはデータ点数が少なくなり特徴が出にくいいため、トレンド検討には条件 C を使用することとした。

DC 成分...周波数スペクトル成分のうち、直流成分の値

OA 値.....全周波数スペクトル成分を合成した値

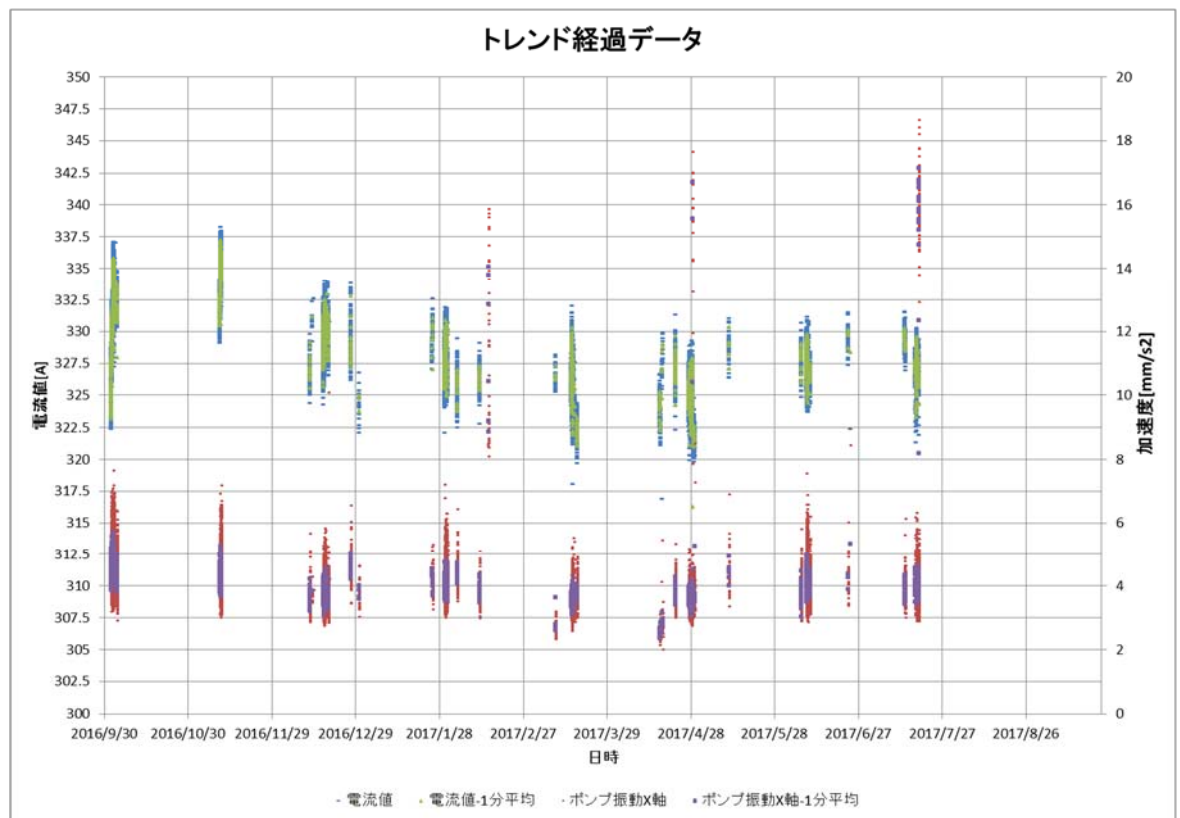


図 4.1.5 条件 A 全揚程 250 ± 25(kPa)、吸込揚程 指定なし

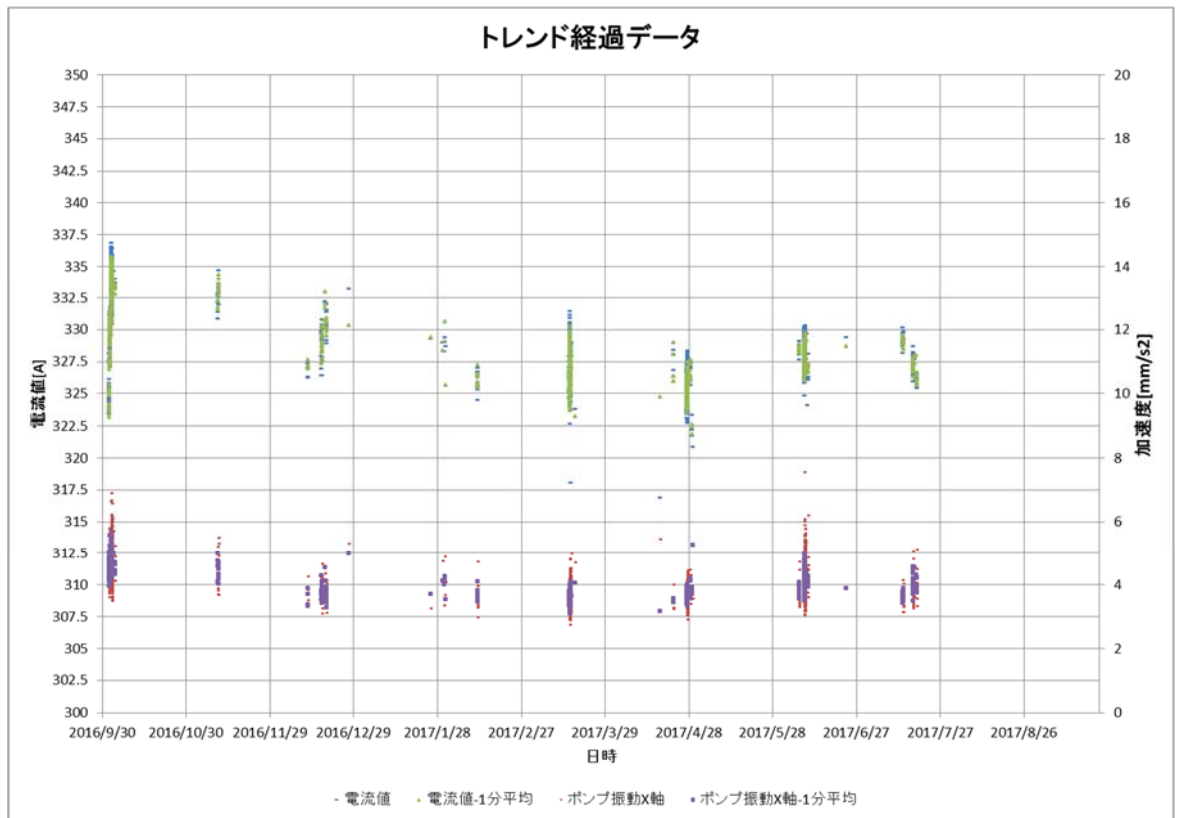


図 4.1.6 条件 B 全揚程 250 ± 5 (kPa)、吸込揚程 指定なし

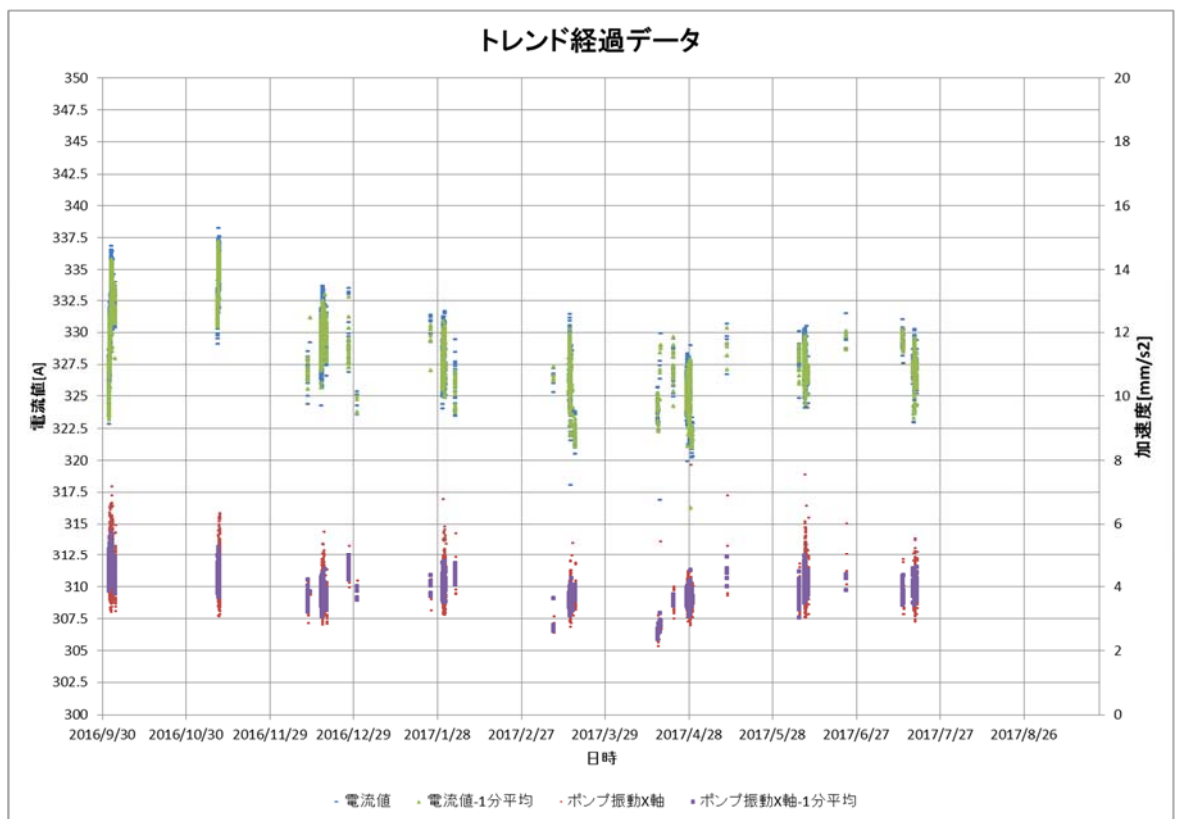


図 4.1.7 条件 C 全揚程 250 ± 25 (kPa)、吸込揚程 DC 成分 吸込揚程 > 0 kPa

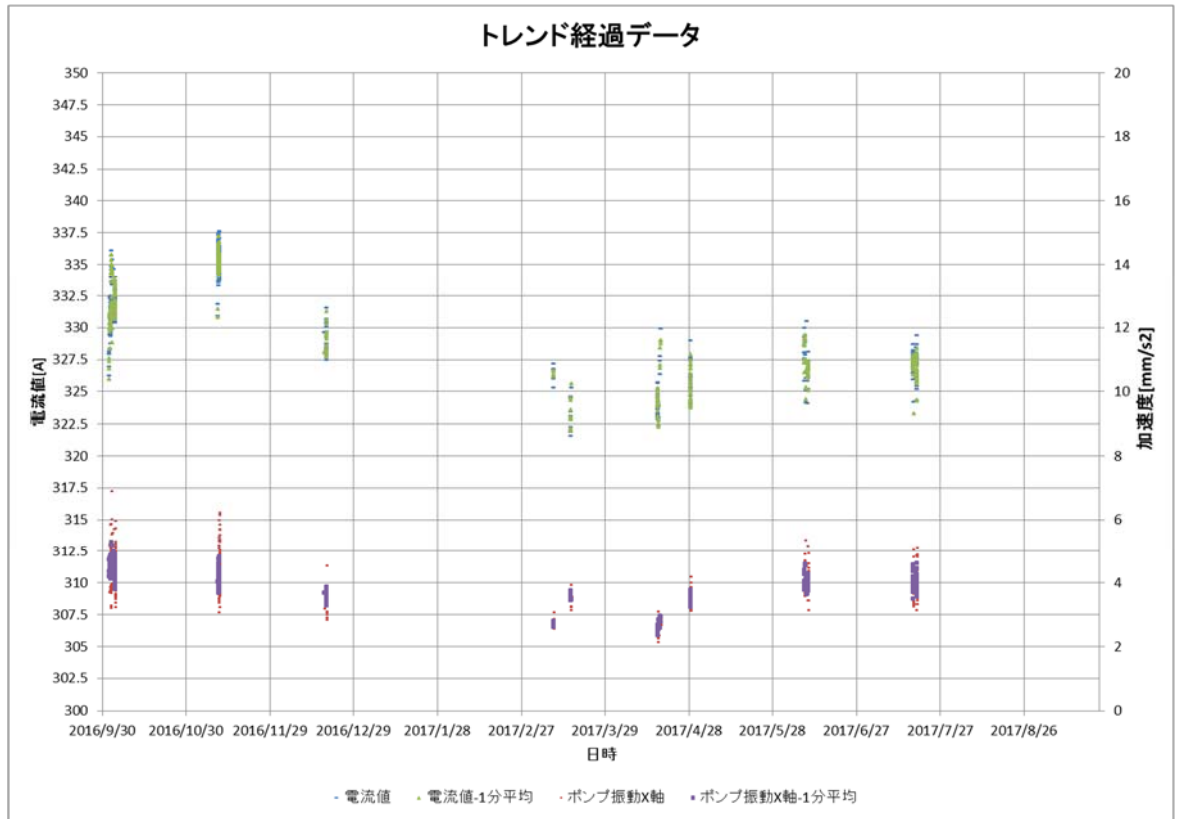


図 4.1.8 条件 D 全揚程 250 ± 25 (kPa)、吸込揚程 DC 成分 吸込揚程 >15 kPa

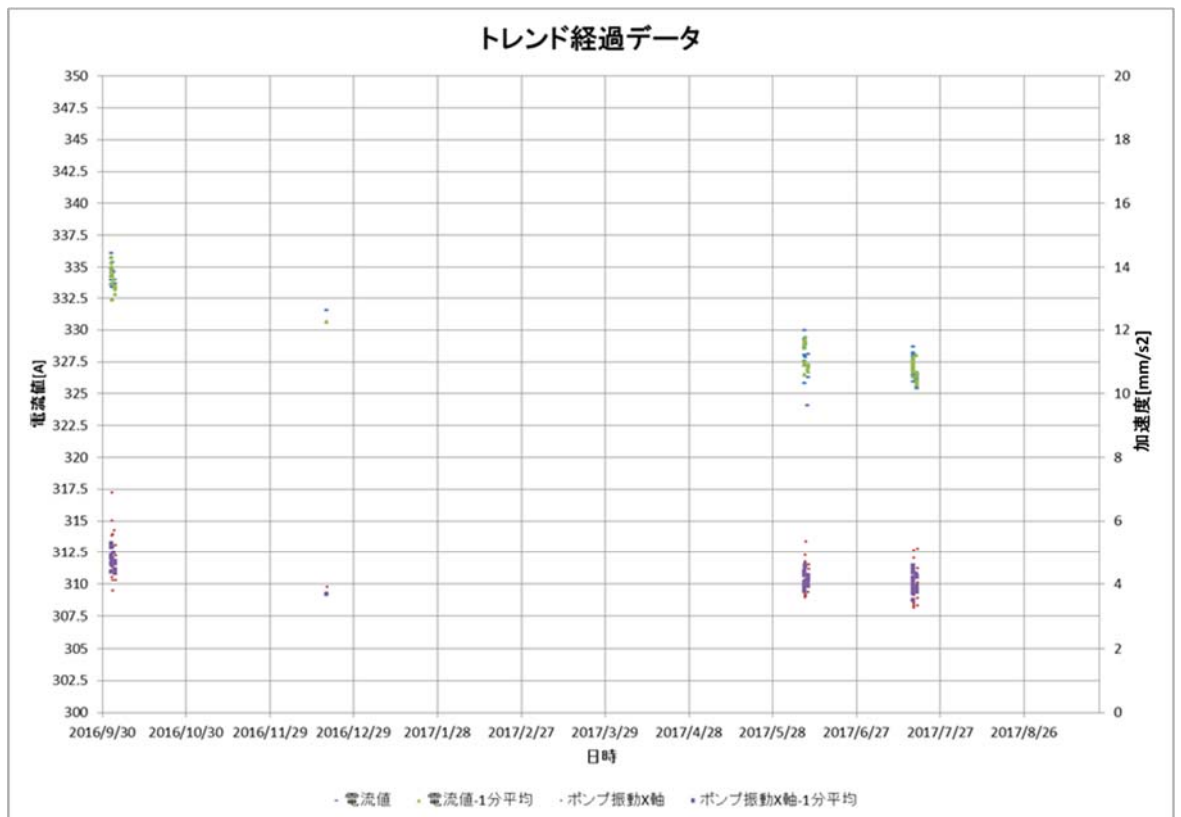


図 4.1.9 条件 E 全揚程 250 ± 5 (kPa)、吸込揚程 DC 成分 吸込揚程 >15 kPa

トレンドデータ検討

・ 条件Cでのトレンド検討

前項 で決めた条件Cにて検討を実施した。

期間：2016年11月10日～2019年12月18日

絞り込み条件C：全揚程 250 ± 25 (kPa)、吸込揚程 DC成分 吸込揚程 > 0 kPa

トレンドデータを図4.1.10に示す。

は電流値の1分間平均値から一日の最大電流値を求め、プロットしたものである。また、そのプロットした点の近似カーブを図4.1.10中に示す。

図4.1.10中から、x1,x2,x3,x4の四つの特徴的な傾向が確認された。

区間x1は、定常状態までの馴染み運転（実稼働日数30日（運転時間：200～300時間））と思われ、区間x1の後、定常値に落ち着いた。

x2とx3の時点は、電流値上昇の同一傾向が確認される。

x4は加速度センサの結線エラーによるものである。

また、x2の変化を確認する為、条件Aでもトレンド検討を実施し、結果を図4.1.11に示す。加速度の変化部分について、 でプロットした。プロットした加速度は1分間平均値の一日の最大値を示す。加速度の変化はx2の時点のあたりから上昇傾向が確認される。

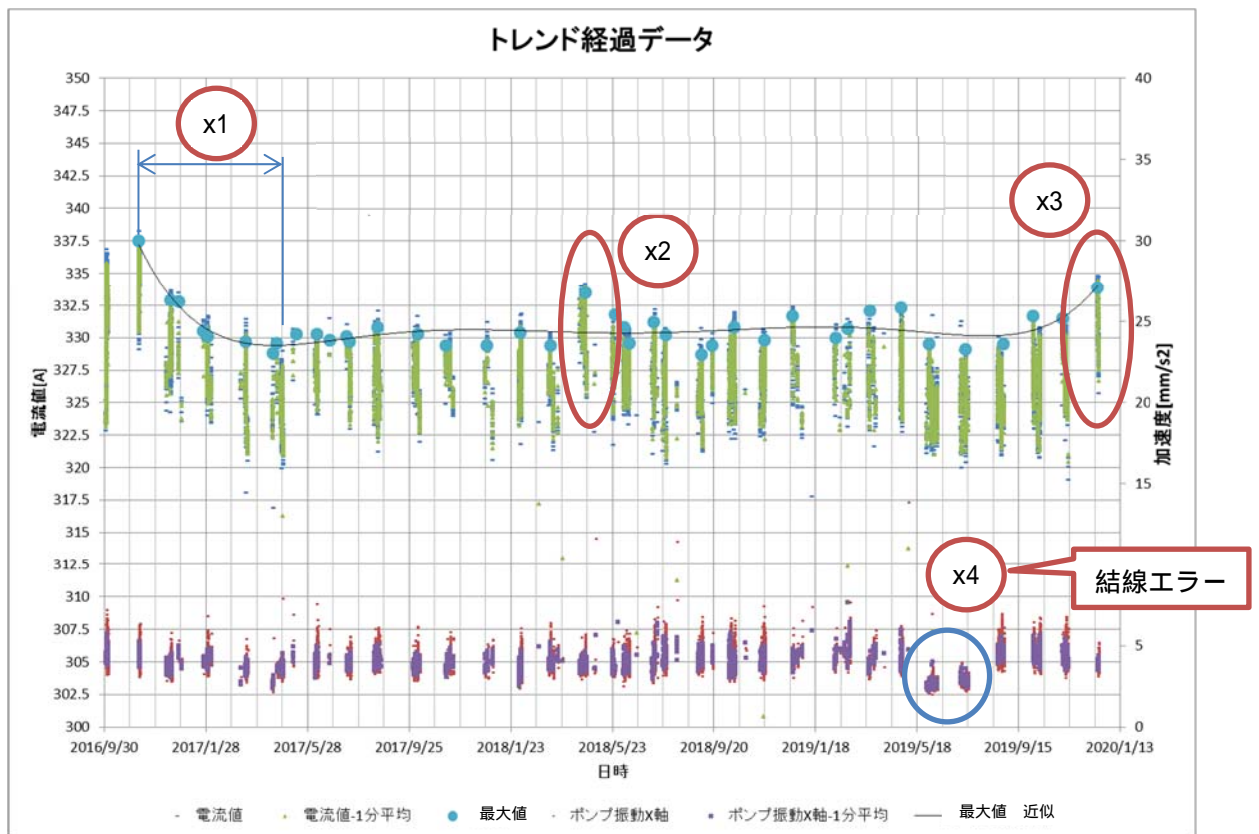


図4.1.10トレンド分析（条件C）

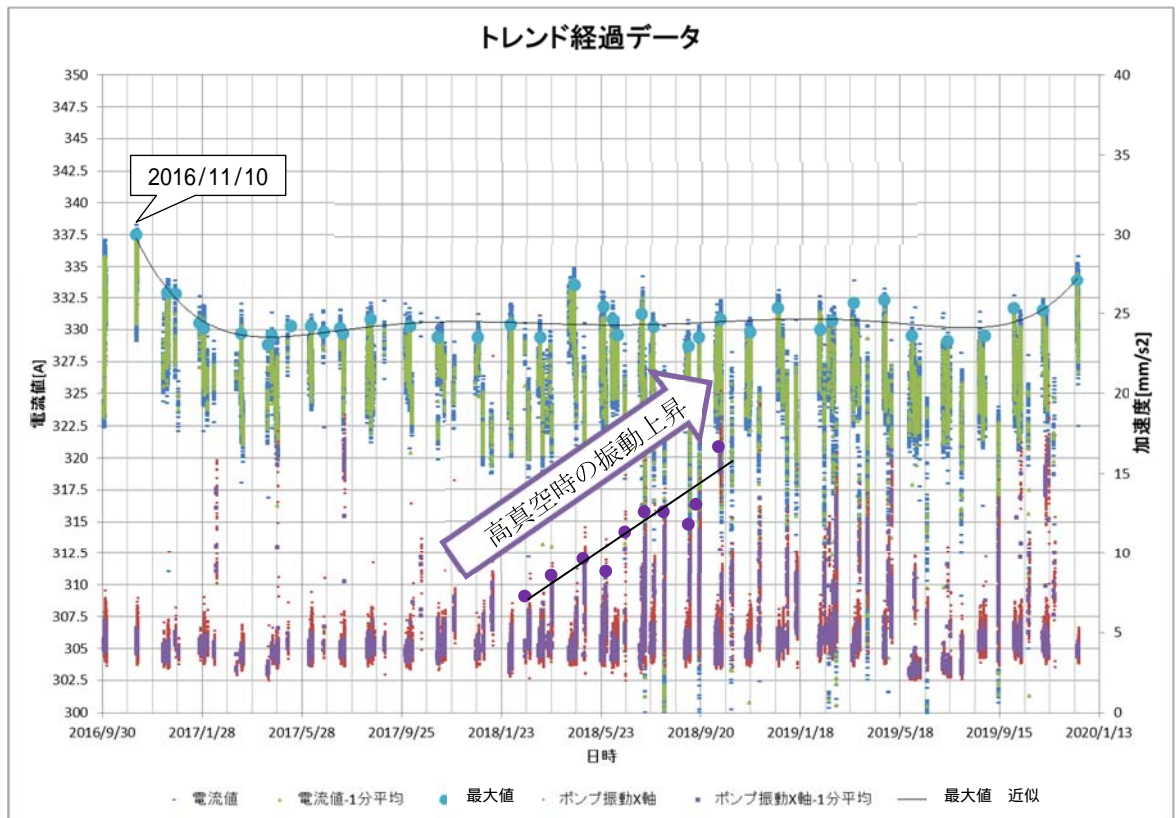


図 4.1.11 トレンド分析 (条件 A)

- ・ x2、x3 の時点の電流値上昇についての検討

x2 (2018 年 4 月 16 日) 近傍の運転データから代表的な運転パターンのスペクトルを約 3 分間の計測データを抽出し、そのデータの振動 X (速度) のスペクトルを図 4.1.12、ベクトルを図 4.1.13 に示す。

運転 a、b、c、d は異なる運転条件におけるスペクトルのパターンによる分類である。

- ・ 全揚程の違いによる振動スペクトル比較

運転 a	全揚程	200 ± 25kPa
運転 b	全揚程	250 ± 25kPa
- ・ 電流値の違いによる振動スペクトル比較

運転 c, d	は運転点 x2 から、全揚程が低下した区間を分類	
運転 c	電流値	150A 以上
運転 d	電流値	120A 以上 150A 未満

図 4.1.12 の振動スペクトルより、x2 の変化は N 成分のみの変化で ZN 成分には変化がないことが確認された。また、ベクトルの変化を表す図 4.1.13 においても 2018 年 2 月 2 日及び 4 月 16 日データが一点に集約していることが確認され、軸が流体力により変動していないことが推定できる。

N は同期回転周波数、Z は羽根車の羽根枚数

また、x3 (2019 年 12 月 17 日) 近傍のベクトル図を図 4.1.14 に示す。この電流値上昇時も同様の現象が起きていることが確認された。

- 運転 a
- 運転 b
- 運転 c
- 運転 d

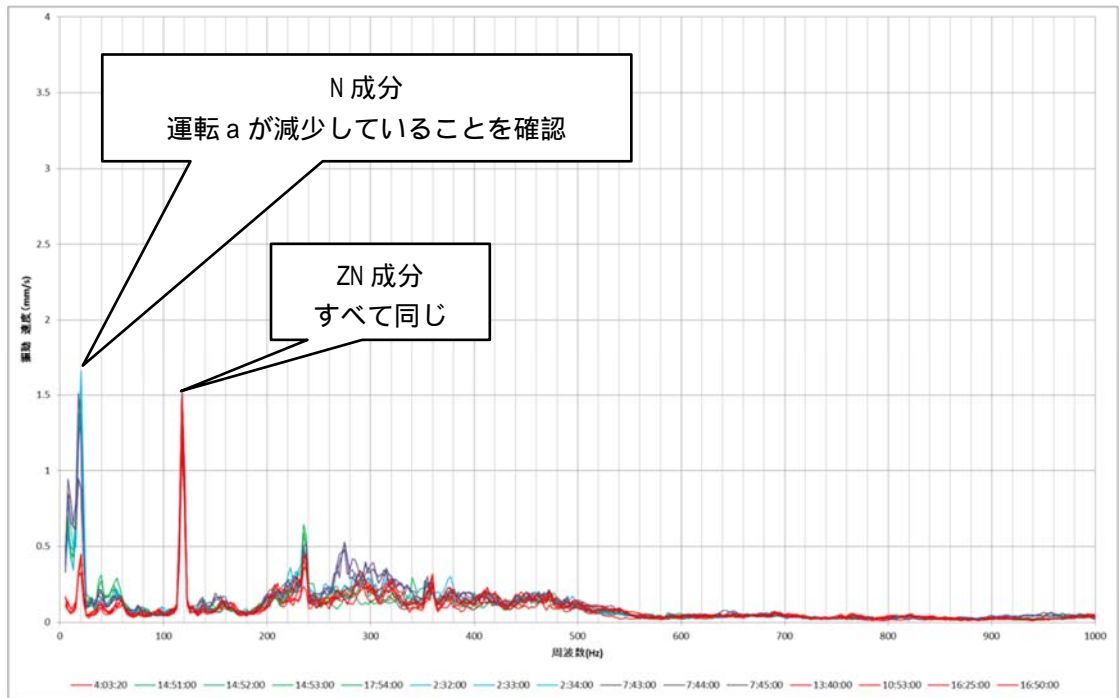


図 4.1.12 最大電流値上昇付近(x2)の振動（速度）スペクトル

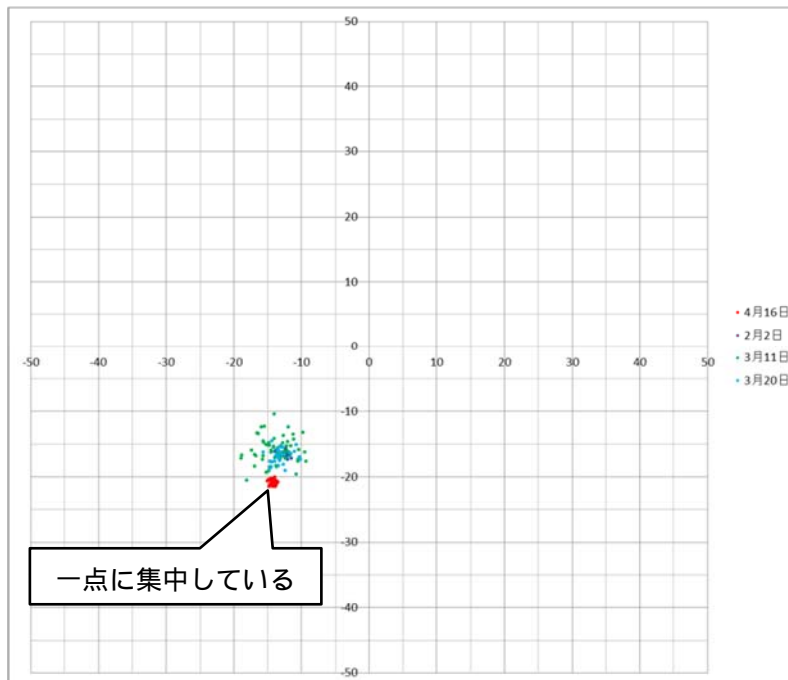
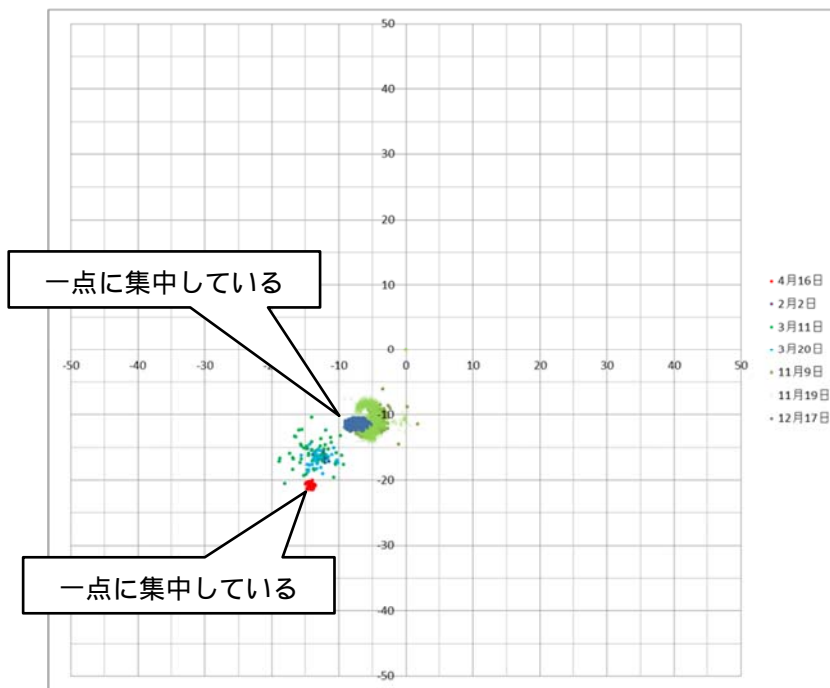


図 4.1.13 ベクトル図（最大電流値上昇付近(x2)）

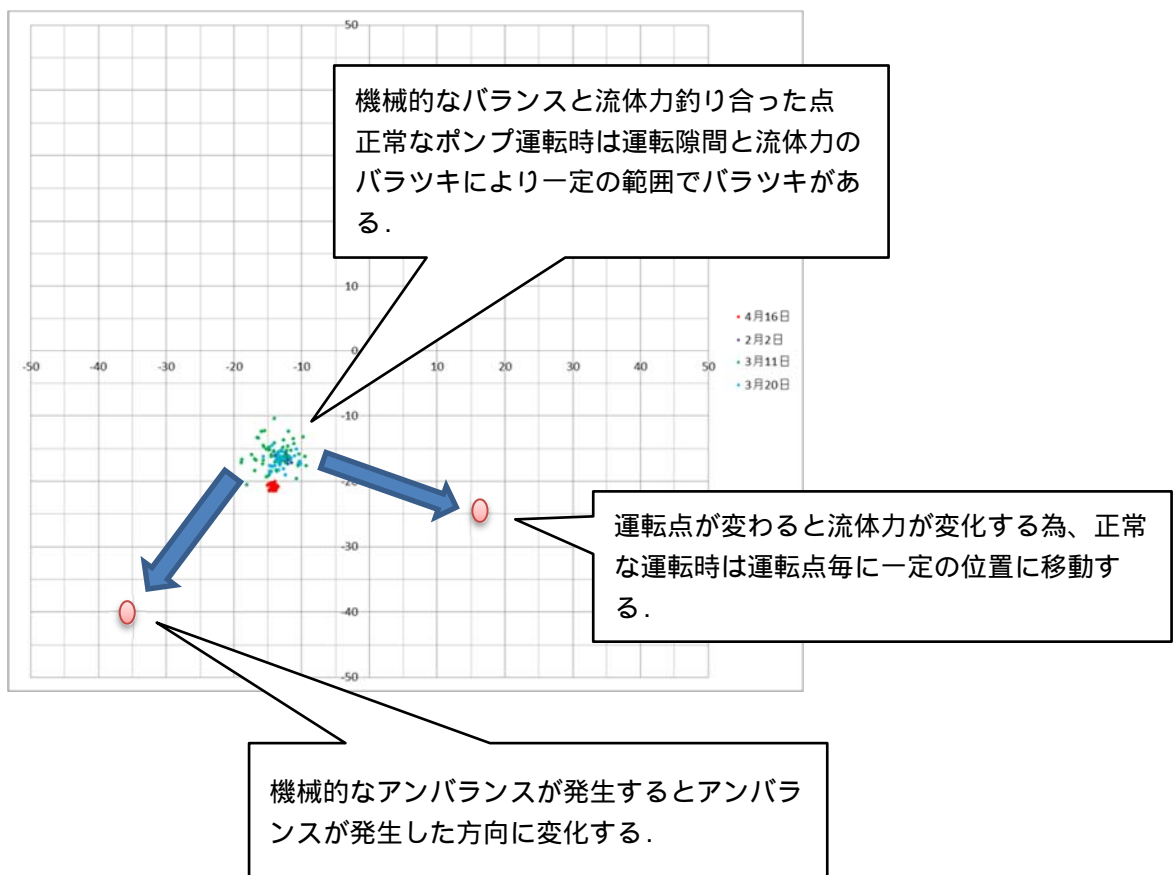
ベクトル位置は機械的なアンバランスと流体によって発生する力の合力によってポイントが移動する。通常、羽根車から発生する力は、羽根車の羽根の前後で発生する圧力が異なり一定ではない。そのため、ベクトル位置も2018年3月11日、同年3月20日のようにある程度ばらついた挙動を見せる。4月16日の挙動は一点に集中している。



2018年4月より約1年8か月後の2019年12月17日においても同様の傾向がみられる。但し、経年劣化による運転隙間の变化及び同年5月ドック工事で実施したポンプ開放・清掃によりベクトルの大きさは変化している。

図 4.1.14 ベクトル図 (最大電流値上昇付近(x3)データ追加)

ベクトル図の見方を下図に示す。



検討結果より、レンドデータ絞り込み方法の検討で設定した条件Cで分類することにより特異点 x2, x3 を抽出でき、での分類の有効性を確認した。

マハラノビス距離(Mahalanobis Distance, MD)による検討

マハラノビス距離は、任意の個体が既存のどの集団に帰属するかを判別する手法である。二つの集団 A,B があり、集団 C がどちらの集団に帰属するかをマハラノビス距離で判定を行う。MT 法では単位空間 (MD=1) からどの程度遠くなるかによって判定する手法である。

MT 法の概念図を図 4.1.15 に示す。

しきい値については、MD は 4 を超えると、未知 (対象) データが単位空間の仲間である確率が非常に小さくなるとしている¹⁾。ただし、データによっては誤判定が 5 割を超えるケースもある²⁸⁾が、今回は MD=4 をしきい値の目安値として検討を行った。

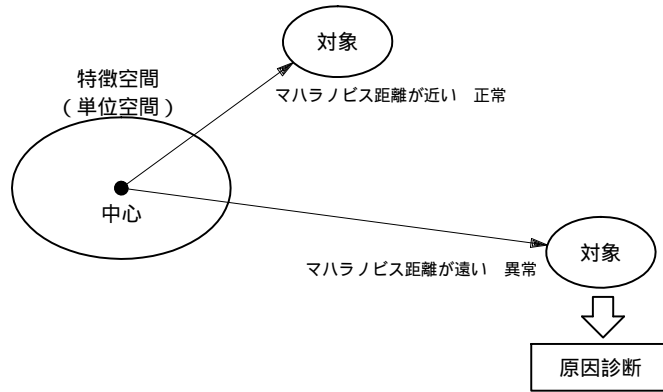


図 4.1.15 MT 法概略図

・ トレンドデータの検討

トレンドデータの吸込揚程、吐出揚程、全揚程、電流値、振動(X,Y,Z)について、マハラノビス距離の検討を実施した。

初期データについては、就航後初のバラスト運転時のデータ (2016 年 11 月 10 日 図 4.1.16) とした。なじみ運転区間であるが、流体的には影響が少ない範囲である。

使用する項目の検討をするために、表 4.1.5 の項目と以下の条件で検討を行った。

期間：2016 年 11 月 10 日～2019 年 12 月 18 日 (条件 4 2017 年 4 月 1 日～2017 年 12 月 31 日)

表 4.1.5 MD 計算用データ (絞り込み条件)

条件	吸込揚程	吐出揚程	全揚程	電流値	振動 X 軸	振動 Y 軸	振動 Z 軸
1	DC	DC	DC	DC	0A	0A	0A
2	DC	/	DC	DC	0A	0A	0A
3	DC	/	DC	DC	0A	/	/
4	差分	/	DC	DC	0A	/	/

DC...周波数スペクトル成分のうち、直流成分の値、

0A...全周波数スペクトル成分を合成した値、差分...0A 値から DC 成分を引いた値

maha1...マハラノビス距離、index...標本番号 (10 秒毎のデータセット)、時系列順

条件 1 計算不可

条件 2 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし (図 4.1.17)

条件 3 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし (図 4.1.18)

条件 4 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし (図 4.1.19)

条件 1 では吐出揚程と全揚程の相関係数 r が 1 に近いいため、逆行列が計算できない結果となった。マハラノビス距離による異常判定では、条件 4 にすることにより MD = 4 がしきい値として有効であることがわかった。

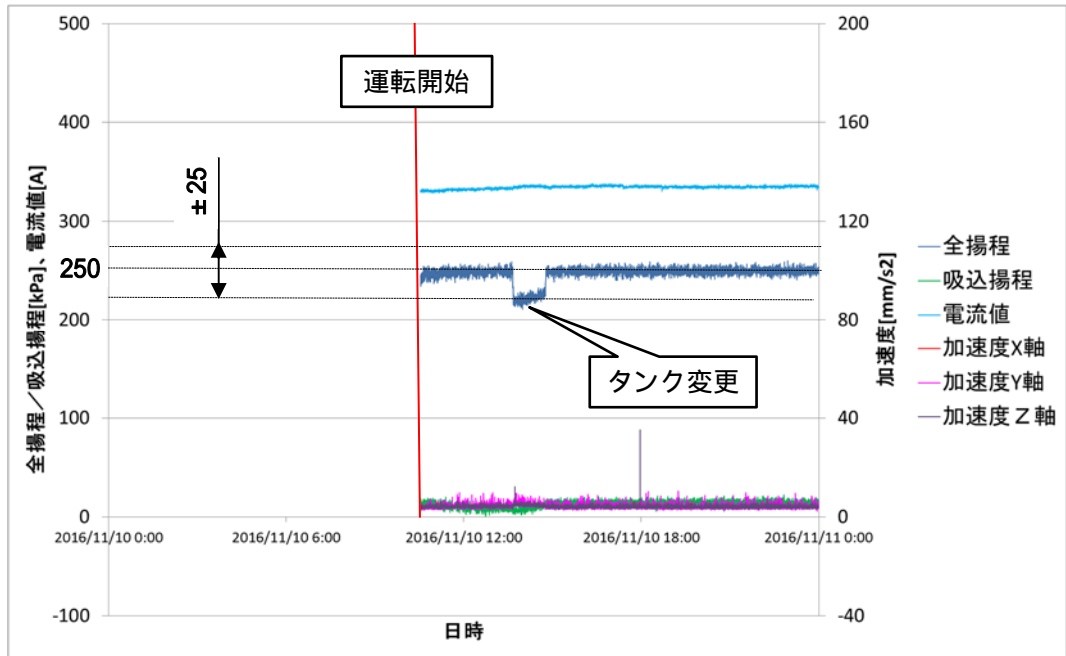
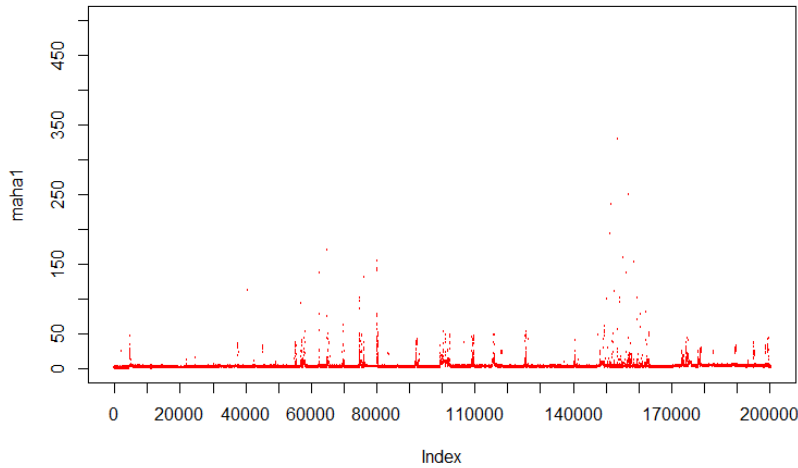
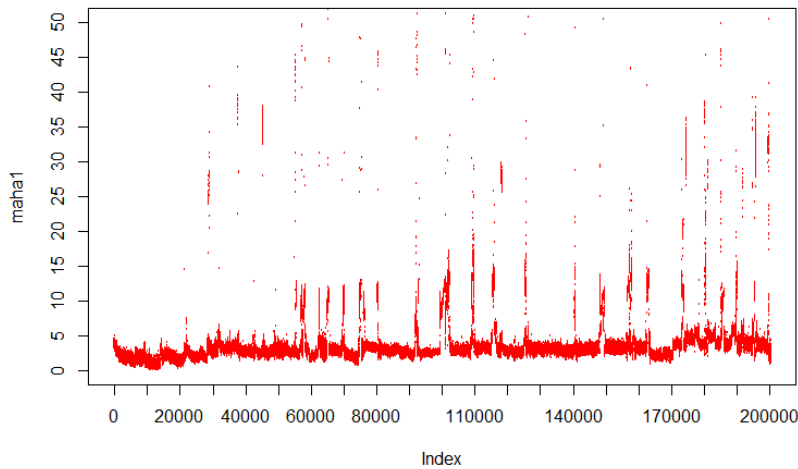


図 4.1.16 2016 年 11 月 10 日 トレンドデータ



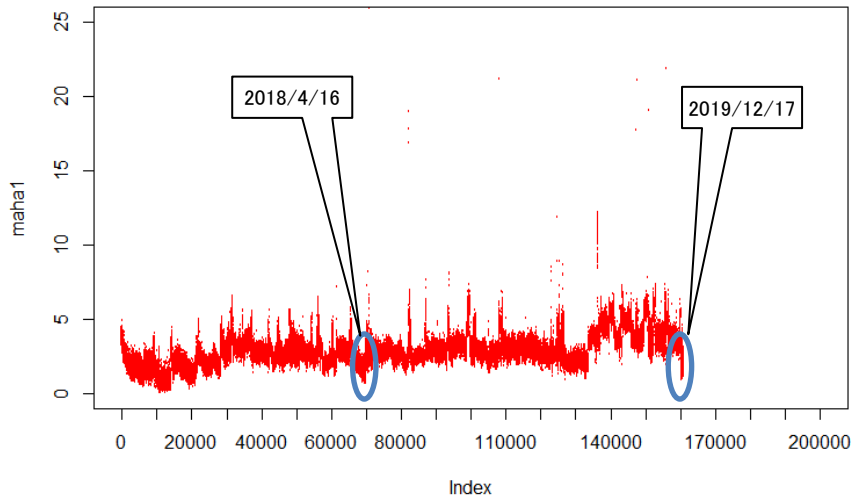
MD 値に大きな変動が確認された。
 吸上げ運転時においても MD 値の上昇が確認された。正常運転域でも MD>4 の判定が多く見られた。また、振動 Y, Z にも過敏に反応することが確認された。

図 4.1.17 条件 2 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし



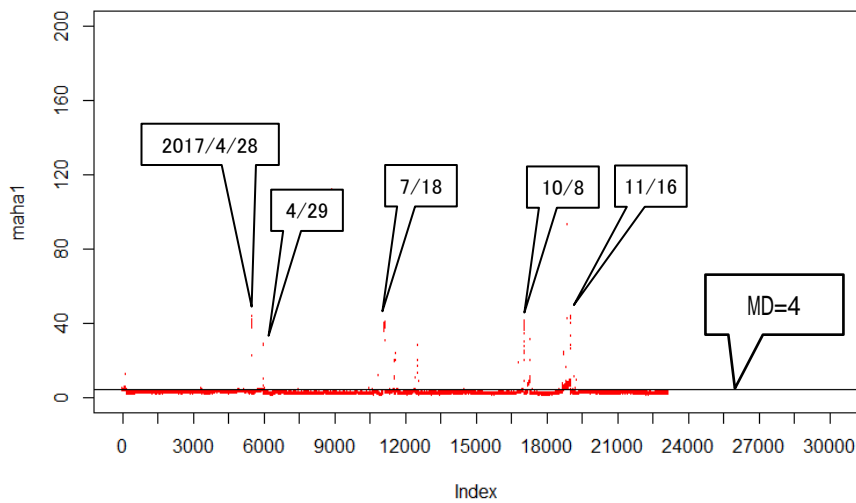
吸込揚程に影響されやすい結果となった。そのため、正常である吸上げ運転の多くが MD>4 となった。

図 4.1.18 条件 3 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし



押し込み運転に限定することにより、MD 値が一定の範囲内に収まることが確認された。電流値上昇時の MD 値が低下したため、異常を見つけることができなかった。

図 4.1.19 全揚程 250kPa ± 25、+ 吸込揚程 > 0



吸込揚程について OA 値と DC 成分の差分値を用いて計算を実施した。吸上げ運転(P.22 参照)時においても電圧降下が無い場合は目安値おおよそ MD < 4 が確認され、ドライ運転の目安である電流値降下のポイントも判定可能なことが確認された。

図 4.1.20 条件 4 全揚程 250kPa ± 25、吸込揚程 指定なし

条件 2、3、4 について MD と各信号の相関関係をまとめた相関行列を図 4.1.21 に示す。(相関行列の見方は右図)

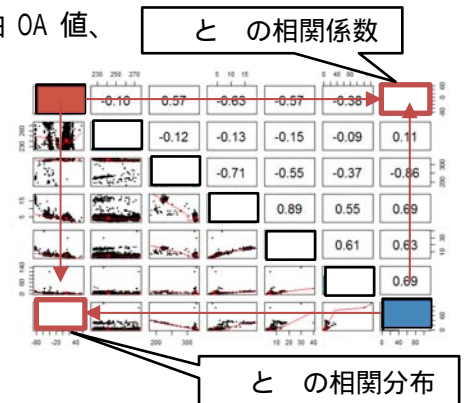
図中の記号は、PSDC...吸込揚程の DC 成分、PS 差分...吸込揚程の差分、THDC...全揚程の DC 成分、A...電流値 DC 成分、X,Y,Z...振動 X,Y,Z 軸 OA 値、X(Y,Z)-N...振動スペクトル回転周波数 N 成分、X(Y,Z)-ZN...羽根枚数 Z*振動スペクトル回転周波数 N 成分を示す。

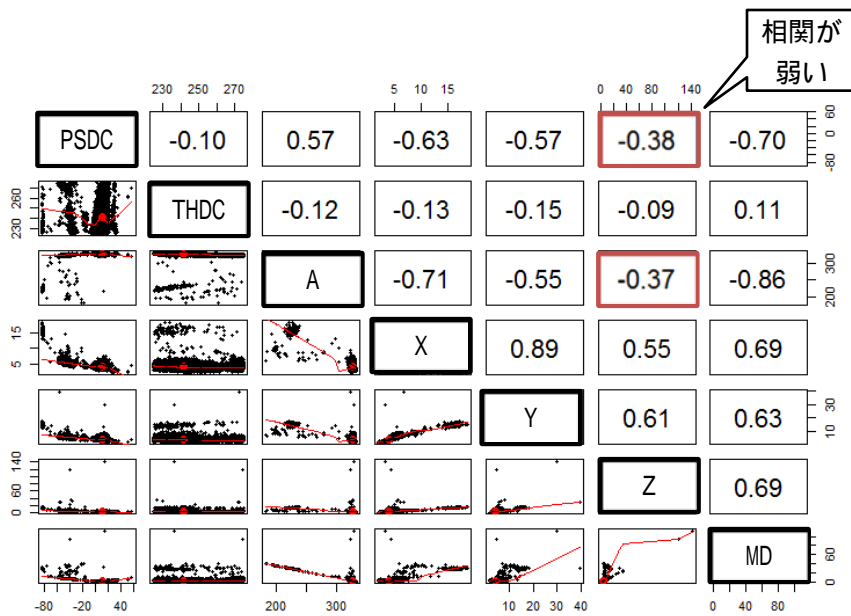
相関係数 r は、 $-1 < r < 1$ の範囲に収まり、目安として以下の関係がある。

- | r | = 0.7 ~ 1 かなり強い相関がある
- | r | = 0.4 ~ 0.7 やや相関あり
- | r | = 0.2 ~ 0.4 弱い相関あり
- | r | = 0 ~ 0.2 ほとんど相関なし

取り扱ったデータは、全揚程を絞ったデータであるため、

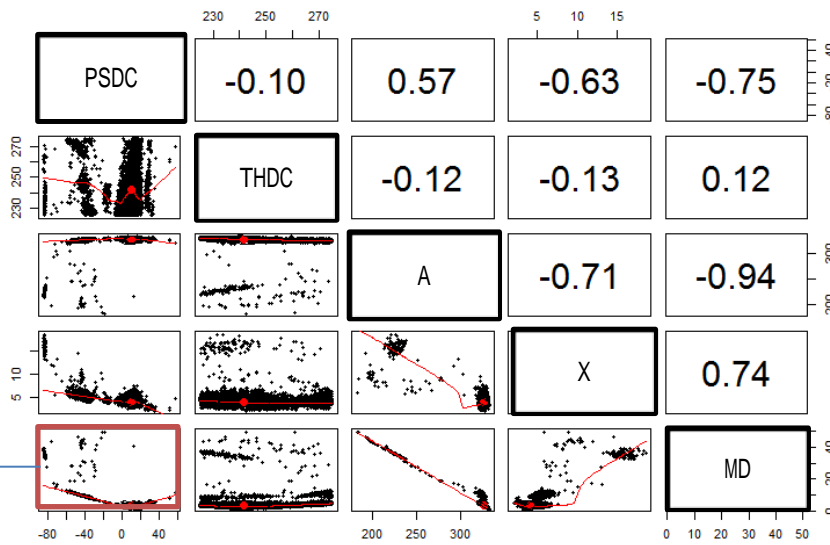
THDC と MD との相関関係は低いものとなっていることが確認された。このことにより、全揚程区分ごとに設定した場合 MD 値は、全揚程の影響を受けにくいものとなることを確認した。





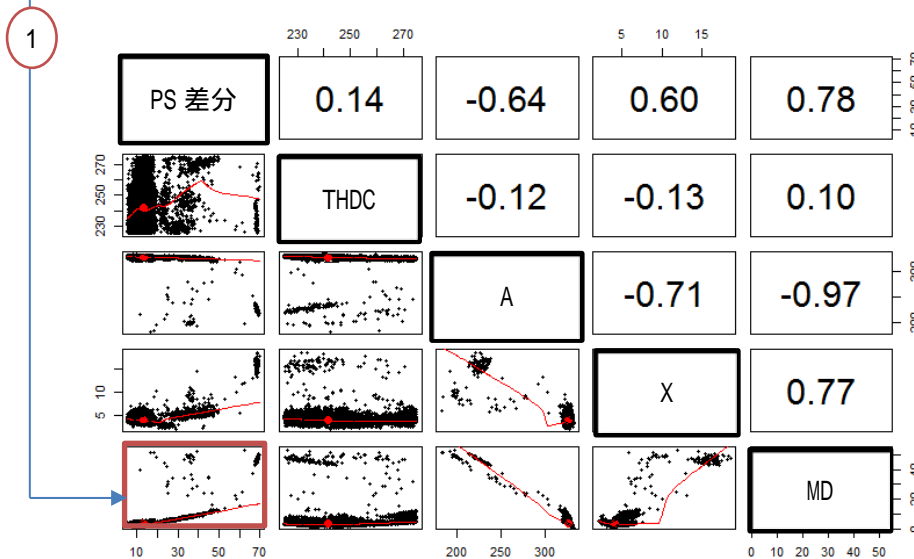
振動 Z については、圧力と電流値に対し（図中部分）相関が弱いことが確認された。THDC の相関が弱い理由はデータを一定の値に絞り込んでいるためである。

条件 2 (225 < THDC < 275)



吸込圧と MD の関係（部分）において、直線変化ではなく、PSDC=0 を中心に増加していることが確認された。

条件 3 (225 < THDC < 275)



吸込圧を差分とすることにより、MD と吸込圧が比例関係（図中の変化箇所）となったことを確認した。

条件 4 (225 < THDC < 275)

図 4.1.21 相関行列と相関係数

3) ポンプ診断マトリックスの実船データ反映

参考文献 1) の研究成果 (2016 年度実施) によりポンプ診断マトリックスを得た。これは参考文献及び陸上試験装置にて行った様々な異常模擬試験の結果を反映したものである。このマトリックスに実船運転から得られた運転パターンの分析結果を反映した。

今回検討した運転パターンについての模式図を図 4.1.22 に示す。

タンク内から液を移送する時に液面がポンプより上の位置を押し込み運転、液面が下の場合は吸い上げ運転とする。検討したパターンは の状態で発生し、圧力が低下し液体が気化したものをキャビテーション、空気吸入渦が発生したものをエア吸引とした。

検討項目は、

- キャビテーションでの運転
- エア吸引運転

となる。

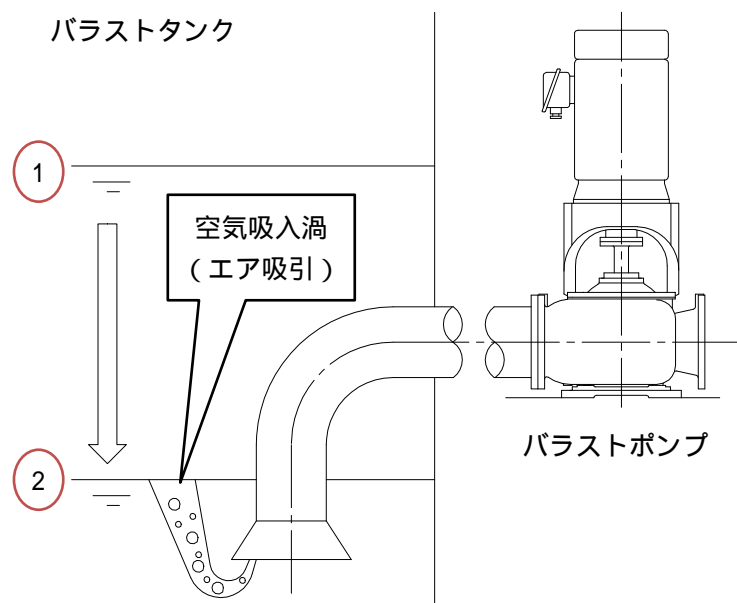


図 4.1.22 運転パターン模式図

キャビテーション領域の検討

キャビテーション運転では、液中に気体が混ざり羽根車からのトルクが低下するため、電流値の降下が起こる。キャビテーションが進行しケーシング内の液が低下または喪失した状態でドライ運転になりさまざまなトラブルが発生する。そのため、ドライ運転の状態について検討を行った。

- 全揚程の違いによる振動スペクトル比較
運転 a (a1, a2) 全揚程 200 ± 25kPa
運転 b 全揚程 250 ± 25kPa
- 電流値の違いによる振動スペクトル比較
運転 c, d, e は運転点 B から、全揚程が低下した区間を分類
運転 c (c1, c2) 電流値 150A 以上
運転 d (d1, d2) 電流値 120A 以上 150A 未満
運転 e 電流値 120A 未満

スペクトルデータを図 4.1.23, 4.1.24 に示す。

同全揚程帯（運転 a (a1, a2)）では押し込み運転と吸上げ運転の差はほとんどなかったが、全揚程が異なった場合（運転 a (a1 と a2) と b の比較）では、異なるスペクトルパターンが確認された。そのため、診断には全揚程を分けし区分ごとに検討する必要がある。

通常、全揚程が低い運転点（最高効率点から外れた大水量領域）では、流体の流れ角と羽根角との差が増すため、流体の衝突により N 成分、及び 2N 成分は拡大傾向にある

図 4.1.24 に示す運転 c、d、e は連続した運転区間であり、図 4.1.23 の運転 a1 からキャビテーションが進展した状態である。そのため、全揚程と電流値が低下している

図 4.1.24 では 150A 以上スペクトルにおいて、N、4N、5N の増大が見られた。これはキャビテーションが成長し羽根間通路の通過水量にアンバランスが生じているためと思われる。120A 以下ではすべての成分の低下が確認された。これは羽根から流体に仕事をしていないため、起振力が弱まったためと推定できる。

——— 運転点 a1 (デバラスト)
 ——— 運転点 a2 (バラスト)
 ——— 運転点 b

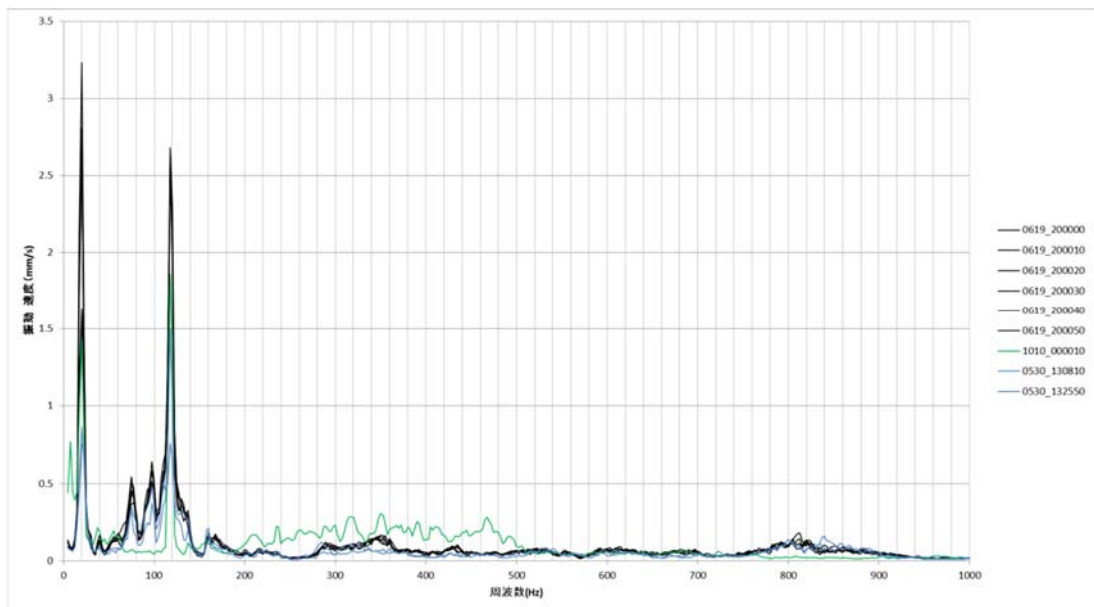


図 4.1.23 スペクトル 定格運転域

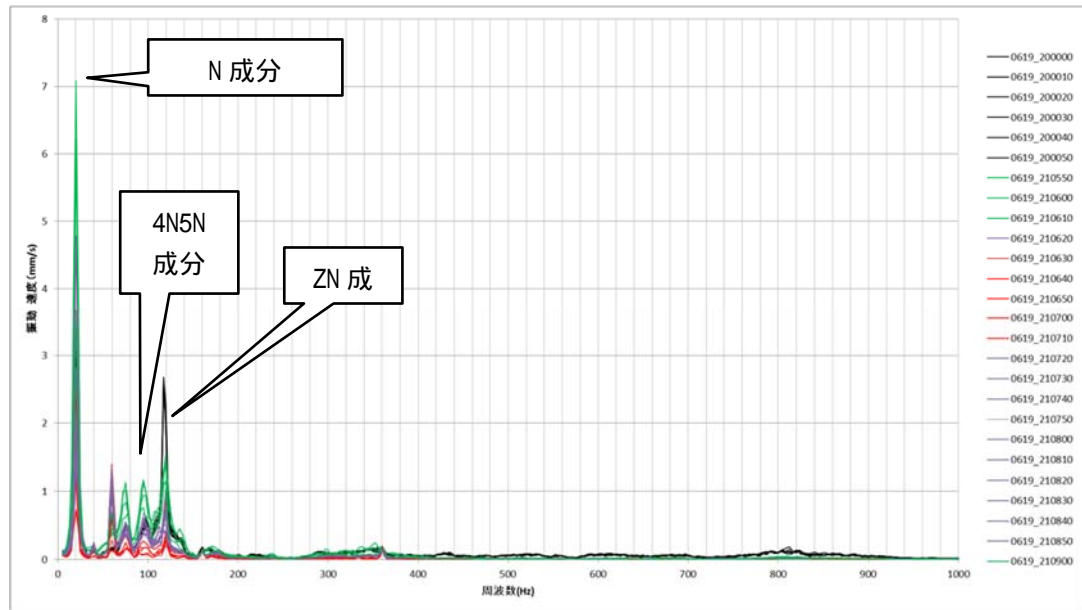
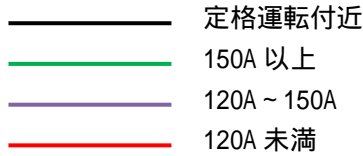


図 4.1.24 振動スペクトル キャビテーション域

これらのデータの評価結果を表 4.1.6 に示す。

評価結果から 3N、4N、5N、2ZN、3ZN において特徴的な変化は見られたが、変化量が小さいため、運転判定には、N (回転周波数) と ZN 成分 (羽根枚数 × 回転周波数) に絞って反映することとした。

ポンプ診断マトリックスへの反映するパラメータを表 4.1.7 に示す。

キャビテーション運転の判定が入った場合、全揚程が低下し異なる全揚程区分となるため、別の全揚程区分に入ることを考慮する必要がある。

表 4.1.6 各運転点と各点での変化量に対する評価

運転	N	2N	3N	4N	5N	ZN	2ZN	3ZN
Hz	20	37.5-42.5	57.5-62.5	75-85	95-105	115-125	235-245	355-365
a(平均)	1.43	0.220	0.166	0.079	0.604	1.52	0.224	0.250
c1(平均)		-	-		-	-	-	-
d1(平均)		-	-		-		-	-
e(平均)	-	-	-		-		-	-
d2(平均)		-	-		-		-	-
c2(平均)		-	-		-	-	-	-

N: 回転周波数、Z: 羽根枚数

: -1.0 以下変動

: -0.5 ~ -1.0 の間で変動

- : -0.5 ~ 0.5 の間で変動

: 0.5 ~ 1.0 の間で変動

: 1.0 以上の変動

表 4.1.7 キャビテーション ドライ運転判定

運転	電流値 A	吸込揚程 PSDC	全揚程 THDC	振動 N	振動 ZN
Hz				20	120
通常運転	各定格値				
キャビテーション	定格>A>200	-50>			
キャビテーション(過大)	200>A>150	15>PS>-20			
ドライ運転(ALARM)	150>A>120	15>	降下		
ドライ運転(TRIP)	120 >	15>	降下		

N: 回転周波数、Z: 羽根枚数

エア吸引の検討

今回検討したエア吸引は、図 4.1.22 の模式図の通り空気吸引渦が発生した場合を想定した。そのため、エア吸引までの途中経過はキャビテーションと同じとなる。エア吸引の状態では、振動値の低下が確認された。陸上模擬試験で空気を混入した実験でも同様の事象が確認されたため、ケーシング内に空気が充満したためと思われる。この状態をドライ運転として検討を行った。

- ・ 運転 b と振動 0A 値 3mm/s 以下の比較
 運転 b (b1, b2, b3) 電流値 150A 以上
- ・ 電流値での比較
 運転 a (a1) 定格運転 全揚程 200 ± 25kPa
 運転 c (c1, c2) 電流値 120A 以上 150A 未満

スペクトルデータを図 4.1.25、4.1.26 に示す。

運転 a (a1) と同様の運転からスタートした運転 b, c は連続した運転区間である。それぞれを電流値の大きさで分類した。

運転 b1(キャビテーション運転)から運転 a3 の区間では吸込揚程が上下を繰り返している。

運転 b と振動 0A 値 (速度) 3mm/s 以下のスペクトルを比較した結果、振動周波数の N 成分に変化がなく ZN 成分の値が低下していることが確認された。これは流体による起振力が低下していることを示しており、ケーシング内に空気が混入しダンパーの役目を行っているためと思われる。

運転 c では N 成分の増大が確認された。ZN 成分については、運転 a < 運転 c < 運転 b となり、キャビテーション域の運転 b で増大後、運転 c に向けて低下する傾向が確認された。運転 a と運転 c の値が近づくほど空気混入量が増加している結果となった。

— 電流値 150A 以上
— X 軸振動 3mm/s 以下 または 吸込圧 0kPa 以上

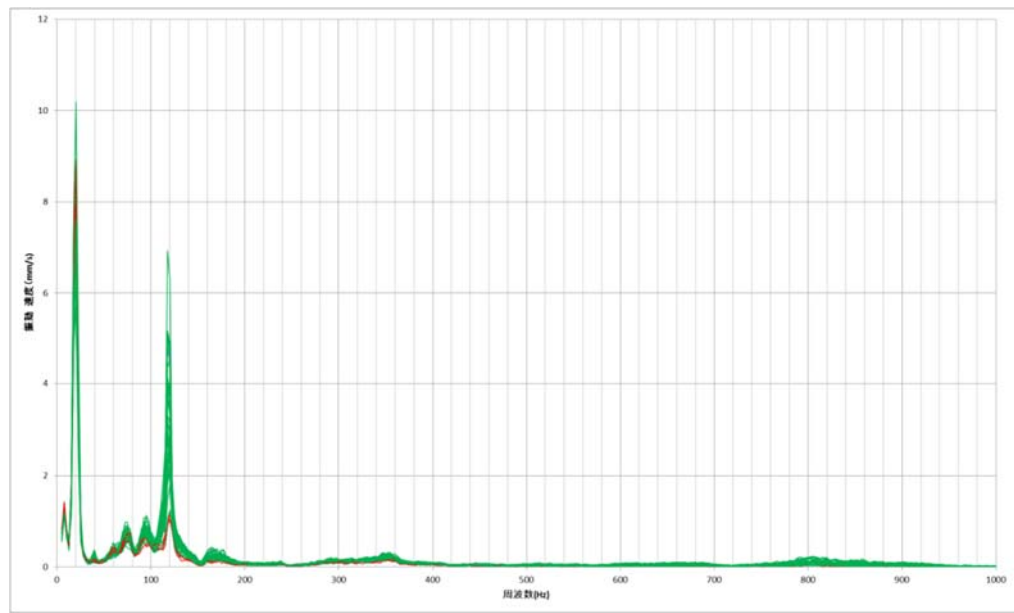


図 4.1.25 振動スペクトル (運転 B と X 軸振動減少時の比較)

— 定格運転付近
— 電流値 120A ~ 150A

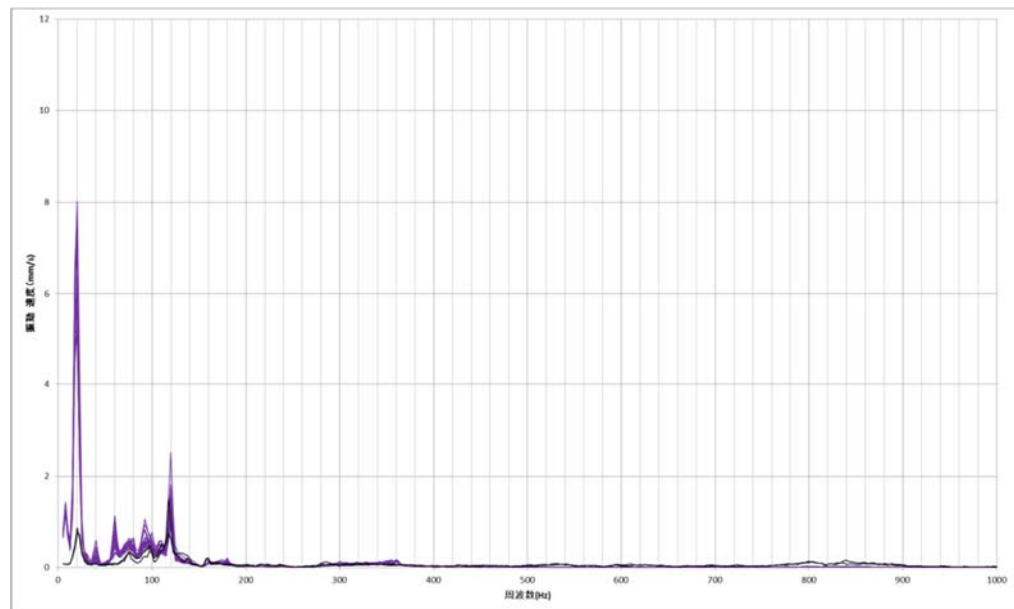


図 4.1.26 振動スペクトル (電流値降下大と定格運転時の比較)

これらのデータの評価結果を表 4.1.8 に示す。

評価結果から 3N において特徴的な変化は見られたが、運転判定には、N (回転周波数) と ZN 成分 (羽根枚数 x 回転周波数) に明確に表れたため、この成分に絞って反映することとした。

ポンプ診断マトリックスへの反映するパラメータを表 4.1.9 に示す。

エア吸引でも同様に全揚程が低下するため、別全揚程区分に入ることを考慮する必要がある。

表 4.1.8 各運転点と各点での変化量に対する評価

運転	N	2N	3N	4N	5N	ZN	2ZN	3ZN
Hz	20	37.5-42.5	57.5-62.5	75-85	95-105	115-125	235-245	355-365
a(平均)	1.43	0.220	0.166	0.079	0.604	1.52	0.224	0.250
b1(平均)		-		-	-		-	-
c1(平均)		-		-	-	-	-	-

- : -1.0 以下変動
- : -0.5 ~ -1.0 の間で変動
- : -0.5 ~ 0.5 の間で変動
- : 0.5 ~ 1.0 の間で変動
- : 1.0 以上の変動

表 4.1.9 キャビテーション エア吸引 ドライ運転判定

運転	電流値 A	吸込揚程 PSDC	全揚程 THDC	振動 N	振動 ZN
Hz				20	120
通常運転	各定格値				
キャビテーション	定格>A>200	-50>			
エア吸引	200>A>150	15>PS>-20			-
ドライ運転(ALARM)	150>A>120	15>	降下		
ドライ運転(TRIP)	120 >	15>	降下		

ポンプ診断マトリックス

ポンプ診断マトリックス⁵⁾に、2019 年度実施した実船運転パターンの分析結果（表 4.1.7、表 4.1.9）を反映したポンプ診断マトリックスを表 4.1.10 に示す．陸上模擬試験とは異なり実船では計測内容に含まれていない信号は除外した．

ポンプ FTA とポンプ診断マトリックスの番号との関係を表 4.1.11 に示す．

故障モード 24 項目に対し実船搭載のセンサ数でのポンプ診断マトリックスの適応が可能なことを確認した．

実用化に向けてセンサ数の調整が必要であるためセンサについての検討を実施した．

MO 船でルール上必要なセンサは圧力または流量センサであるため、これに電流及び加速度センサを加えたものを最小構成とした．回転位置の特定（回転検出器及び変位センサ）を除外した場合で分類が可能であるため、必要条件のセンサを満足することにより想定した故障原因の 100% を検知することができ、目標である故障モードの 80% 以上をカバー可能なことを確認した．

表 4.1.10 ポンプ診断マトリックス

異常内容		変位	振動							圧力		動力 (電流)
			方向 (OA)			周波数 (スペクトル)				吸込 DC	吸込 OA	
項目	NO	軸	前後 方向	左右 方向	軸方 向	< N	N	ZN	2ZN			
運転	3											
	4											
	5											
	6											
	25											
羽根車	9											
	10											
	11											
ケーシング リング	12											
	13											
軸	15											
	16											
	17											
軸受	18											
	19											
	20											
軸・軸継手	22											
	24											

...減少、 ...上昇、 N...回転同期周波数、 Z...羽根車羽根枚数

OA...オーバーオール値、 DC...DC成分

表 4.1.11 FTA と対象ポンプ診断マトリックスの関係

FTA		対象兆候 マトリックス NO			必要センサ		
故障の現象	故障原因 1				圧力	振動	電流
起動しない	ポンプが焼付いている	3	6	25			
起動するが							
水が出ない	呼水されていないか、あるいは不十分である	3	5				
	空気を吸っている	3					
	吸込管、ストレーナが詰っている	5					
	羽根車が詰っている	5	9				
	電動機の回転方向が逆になっている	7					
規定水量、 揚程が出ない	空気を吸っている	3					
	吸込管、ストレーナが詰っている	5					
	羽根車が詰っている	5	9				
	ケーシングリングが摩耗している	12					
	キャビテーションを起している	6					
	羽根車が摩耗している	9	10				
始め水が出る が、すぐ出なく なる	空気を吸っている	3					
	スタフィングボックスから空気を吸っている	3					
電動機が過負荷 になる	内部に異常な当りがある	11	16	24			
	結合不良	23					
	軸受の不良	20					
軸受が過熱する	結合不良	23					
	軸受の不良	18					
	羽根車のバランス不良	9	10				
ポンプが振動す る	羽根車のバランス不良	9	10				
	結合不良	23					
	キャビテーションが発生している	5	6				
	軸受が摩耗している	19					

4) データ収集及びデータの分析結果

ポンプ診断の判定に使用するため、協力者から提供されたばら積み船（90,000DWT）の約3年間のポンプ稼働データ（本事業の1年分及び本事業開始前の約2年分）を使用し、故障を表す兆候パラメータの分析を行い、表 4.1.7、表 4.1.9 の結果を得た。

4.1.2 状態診断ソフトウェア製作

1) 状態診断ソフトウェア概要

状態診断ソフトウェアでは、ポンプに設置したセンサからの信号を基に、トレンドデータ算出、保存及びポンプ診断マトリックス機能によるポンプ状態の診断を行う。

状態診断ソフトウェアは、「計測ソフトウェア」、「表示ソフトウェア」、「余剰データ削除ソフトウェア」、「SIMS 送信ソフトウェア」の四つのソフトウェアから構成されている。

ソフトウェアとデータベースの関係について図 4.1.27 に示す。

SIMS : Ship Information Management System. 本船モニタリングシステム
(日本郵船/MTI)

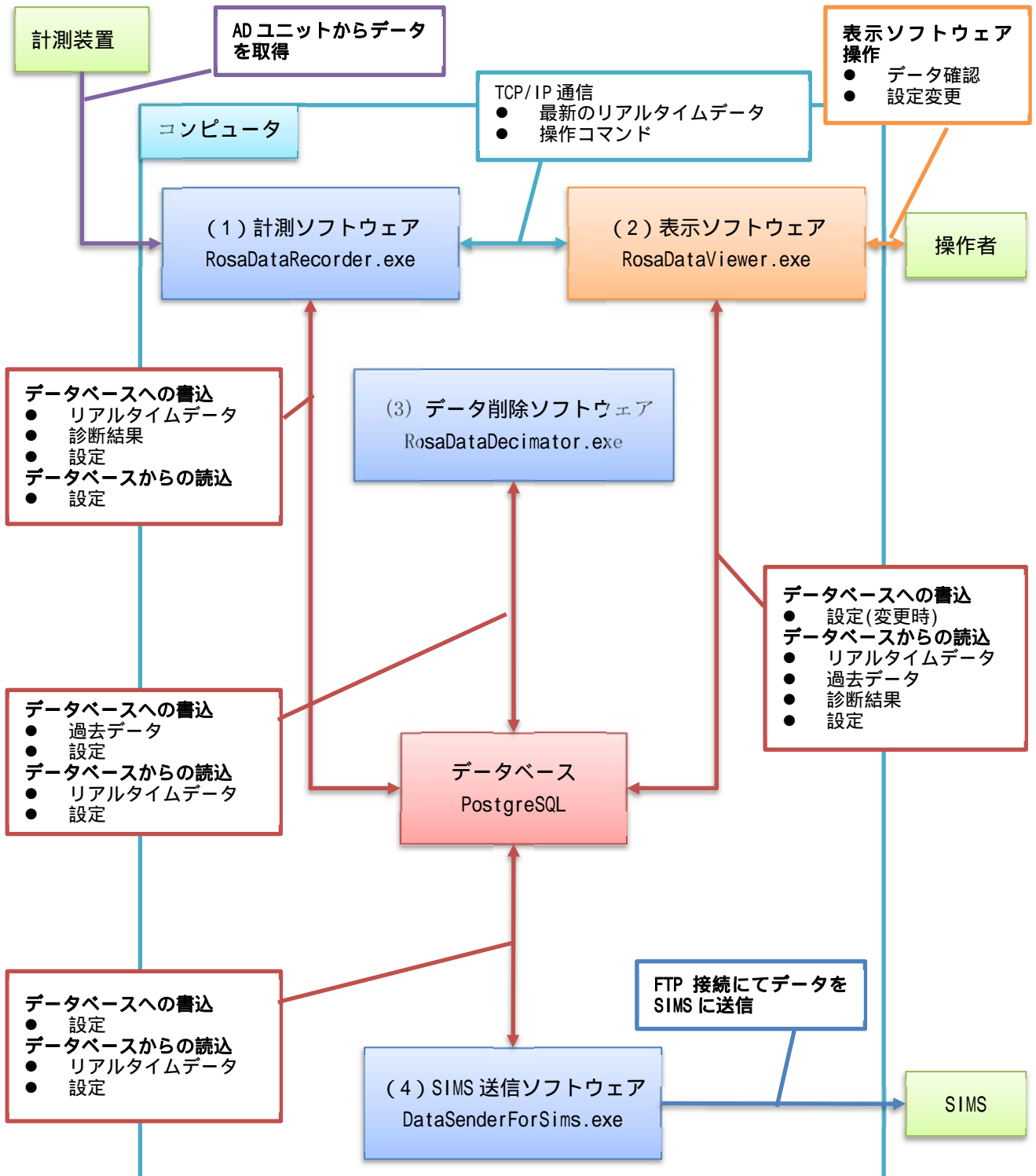


図 4.1.27 ソフトウェアとデータベースの関係

- ・ 計測ソフトウェア
 「計測ソフトウェア」では、計測装置に付随する AD 変換器からの信号を 10 秒毎に取得し、スペクトル算出や回転次数成分算出、ポンプ診断マトリックスによる診断処理を行う。10 秒毎の信号処理によって得られるトレンドデータをリアルタイムデータとし、リアルタイムデータをデータベースに保存する。2019 年度はポンプ診断マトリックスによる診断処理及び信号処理について開発を行った。
- ・ 表示ソフトウェア
 「表示ソフトウェア」では、リアルタイムデータや過去データをデータベースから読み込みグラフやリストで確認することができる。また、データベースに保存された他三つのソフトウェアの設定を確認することができる。
- ・ データ削除ソフトウェア
 「データ削除ソフトウェア」では、計測ソフトウェアがデータベースに保存したリアルタイムデータから過去データを生成し、不必要なリアルタイムデータを削除する。過去データは、リアルタイムデータが 10 秒毎の計測データであることに對して、1 分毎の計測データとなる。ただし、アラーム発生時は設定に応じてアラーム発生前後を 10 秒毎のデータで保存する。また、保存領域の容量が少なくなると、初期の過去データを削除する。
- ・ SIMS 送信ソフトウェア
 「SIMS 送信ソフトウェア」では、1 時間に 1 回設定した時間に前時刻 1 時間分の計測データを解析しポンプ動作中のデータを抽出する。データ解析後、SIMS に FTP 接続を行い、解析結果のログとポンプ動作時のデータを SIMS に保存する。2019 年度はデータベースから必要データを抽出する機能、及び、メカニカルシール側のデータを転送する機能を追加した。

ソフトウェアの機能一覧を表 4.1.12 に示す。

信号の取り込みについて、現在上流側（データロガー）の出力がサンプリング周波数 20,000 Hz であるため、25,600 Hz でデータロガー出力信号を取り込んでいる。25,600 Hz のデータに対してソフトウェア内部でデジタルフィルタを用いてダウンサンプリングを行い、12,800 Hz と 2,560 Hz の分析用信号を得る。

2,560 Hz のデータから DC 成分、オーバーオール (OA) 値、オーバーオール差分値 (OA') を算出する。ここでオーバーオール差分値とは、オーバーオール値と DC 値の差分である。

12,800 Hz のデータからベクトル値を算出する。ベクトル値とは回転速度に對した周波数成分の値である。

表 4.1.12 ソフトウェア一覧ソフトウェアの機能一覧

ソフトウェアタイプ	ファイル名	機能
計測ソフトウェア	RosaDataRecorder.exe	<ul style="list-style-type: none"> ● 信号計測 ● 信号処理 <ul style="list-style-type: none"> ◆ スペクトル算出 加速度信号スペクトル速度変換 スペクトルバンド最大値算出 Q 値推定 OA 差分算出 回転次数成分算出 トータルヘッド算出 ● ポンプ診断マトリックス処理 <ul style="list-style-type: none"> ABCD 判断 マハラノビス距離算出
表示ソフトウェア	RosaDataViewer.exe	<ul style="list-style-type: none"> ● 計測データ表示機能 <ul style="list-style-type: none"> トレンド画面 Q-H 画面 スペクトル画面 リスト画面 分析用画面(監視周波数集計画面) スペクトル(3軸)画面 ベクトル画面 診断画面
		<ul style="list-style-type: none"> ● シミュレータ機能 計測ソフトウェアの機能検証
データ削除ソフトウェア	RosaDataDecimator.exe	<ul style="list-style-type: none"> ● リアルタイムデータから過去データへの変換機能 ● 空き保存領域減少時における過去データ除去機能
SIMS 送信ソフトウェア	DataSenderForSims.exe	SIMS へのデータ送信機能

太字 2019 年度開発機能部分

2) 信号処理

加速度信号スペクトル速度変換

加速度センサで収録した計測値の単位は加速度のため、速度の次元に変換する場合、周波数積分として次式をもちいる。

$$V_i = \frac{1}{2\pi f_i} A_i$$

ここで、 f_i は*i*ライン目の周波数、 A_i は加速度信号の周波数 f_i でのスペクトル値、 V_i は速度変換した周波数 f_i でのスペクトル値である。

ただし、算出に当たり DC 成分及び 1 ライン目のスペクトル値は除外する。

速度変換対象のスペクトルデータの保存は速度変換後のデータとする。

ライン数は、周波数分解能の逆数のことを示し、0Hz から周波数レンジまでの点数を意味する。*i*ライン目の周波数は 0Hz から数えて*i*番目の周波数を示す。

スペクトルバンド最大値算出

単一チャンネルのポンプ診断マトリックスで設定した監視周波数成分の値をバ－グラフで表示する。(図 4.1.28 参照)

あらかじめ計測ソフトウェアで設定したチャンネルを加速度から速度に周波数積分で変換し表示する。

チャンネルは切り替えられるものとする。

ポンプ診断マトリックス対象のチャンネルの場合、ABCD 境界(表 4.1.13)を表示する。

画面モードはリアルタイムモードと時間指定モードの 2 種類である。一定期間での最大値を表示する。



図 4.1.28 スペクトル表示画面

流量 Q 値推定

・実船では陸上模擬試験と異なり流量 Q を計測していないため、ポンプ下流側に設置されているバラスト処理装置の流量を利用して電流値 A から流量 Q の予測検討を行った。ポンプ動力 P(kW)と流量 Q(m³/min)と全揚程 H(m)は、次式の関係がある。は揚液の比重

$$P = 0.163\gamma QH$$

また、ポンプ動力 P は電流値 A と電圧 V の積である。

電圧 V は一定であるため、流量 Q は変数の電流値 A と全揚程 H を実測から検討した。陸上試験データより、電流値 A と流量 Q のスプラインカーブを求め、該当する電流値から流量を推定し、全揚程 H と流量 Q の関係をプロットした結果を図 4.1.29、4.1.30 に示す。図中の黒実線は陸上試験データである。は予測流量 Q と全揚程 H、は実測流量 Q と全揚程 H、は実測電流値と実測流量の関係を示す。又、は NPSH を考慮しなかった場合の予測流量 Q と全揚程 H を示す。

キャビテーション域で運転した時にはで示す部分の計算が合致しなかった。これは吸上げ運転時に電流値が低下するからである。そのため、キャビテーション領域では NPSH から流量 Q を予測することとした。押し込み運転時は近似の値を示した。

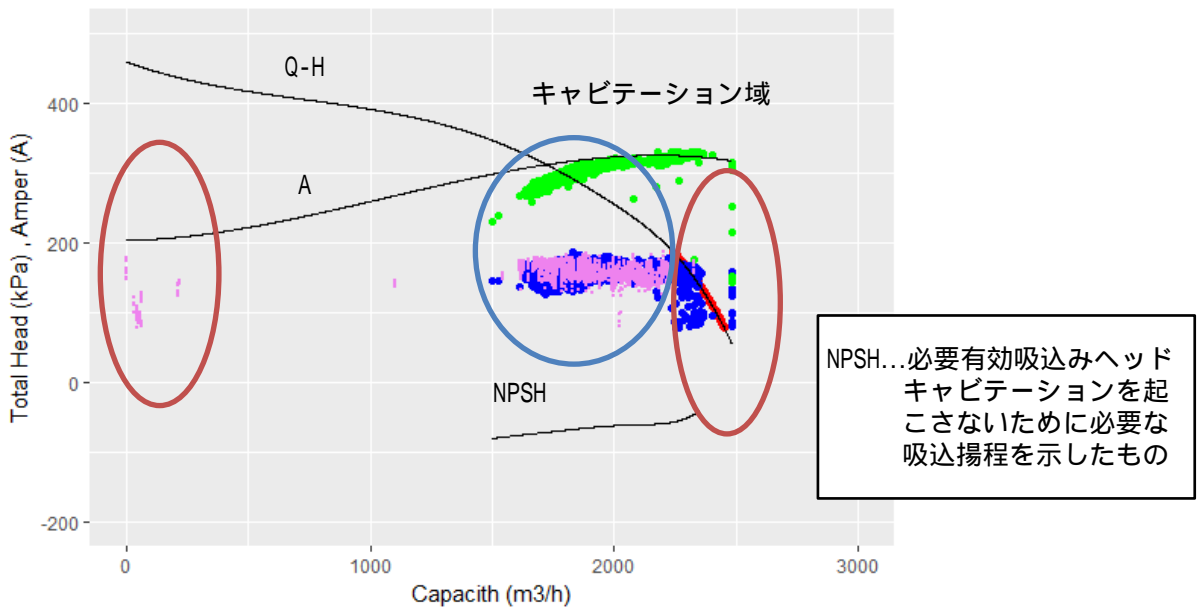


図 4.1.29 流量 Q 検討 (2017 年 10 月 18 日 吸上げ運転)

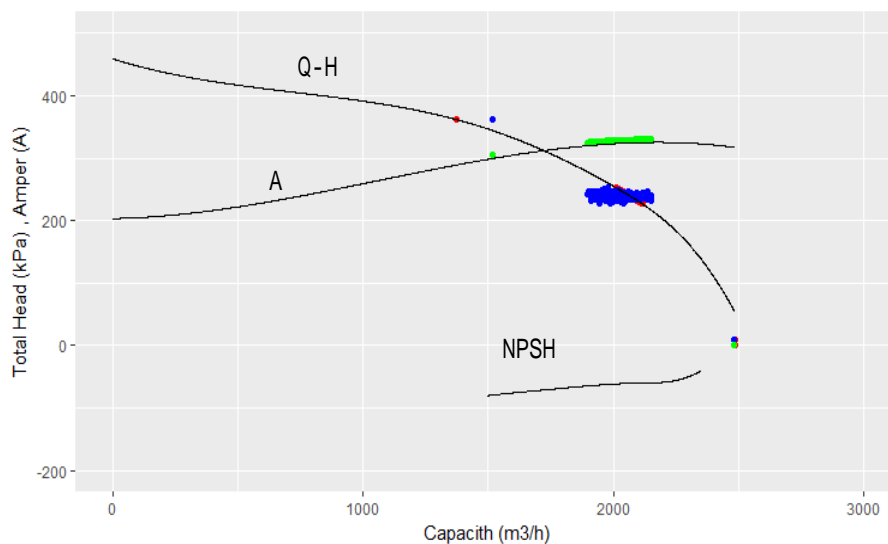


図 4.1.30 流量 Q 検討 (2017 年 11 月 13 日 押し込み運転)

回転次数成分算出

指定した周波数を監視するための機能である。周波数は速度変換したスペクトルをもちいる。

指定できる周波数成分は回転数成分 N の n 次成分 nN、1N 未満の成分、「羽枚数 × 回転数」成分である ZN 成分の 1 次及び 2 次成分、任意の周波数成分とする。

指定した周波数を中心周波数とし、中心周波数に対する幅を指定可能とする。その範囲内の最大値を指定周波数での振幅値とする。幅は N 未満を除き共通である。N 未満の場合、スペクトルの 2 ライン目の値から回転数成分未満までの値の周波数とする。

計測した周波数と振幅値を対として、トレンドデータに保存する。

トータルヘッド算出

全揚程 THDC は吐出揚程の DC 成分 PDDC と吸込揚程の DC 成分 PSDC との差として次式で求める。

$$THDC = PDDC - PSDC$$

3) ポンプ診断マトリックス処理

ABCD 判断

境界線算出法について、表 4.1.13 に示す。

初期データ（基準データ）から ABCD 判定のための境界値を算出する。

そのために、初期データから対象の平均値、最大値、最小値を求め、平均値を基点として変動幅を次式で定義する。

$$\text{正側の変動幅} = \text{最大値} - \text{平均値}$$

$$\text{負側の変動幅} = \text{最小値} - \text{平均値}$$

ABCD の各境界値は変動幅に定数をかけた値である。定数は設定可能とする。また電流の CD 境界値は別途設定可能とする。

ただし、ベクトルの境界値は原点を基点とし、回転数 N に依存する値である。

表 4.1.13 ABCD 境界値算出法一覧

監視項目	DC (電流以外), OA, OA 差分, OA 速度	DC (電流)	監視周波数		ベクトル
			正側	負側	
AB 境界	$^1 \times$ 変動幅 + 平均値		$^1 \times$ 最大値	$^1 \times$ 変動幅 + 平均値	$4800/N^{0.5}$
BC 境界	$^3 \times$ 変動幅 + 平均値		$^3 \times$ 最大値	$^3 \times$ 変動幅 + 平均値	$9000/N^{0.5}$
CD 境界	$^5 \times$ 変動幅 + 平均値	5 \times 変動幅 + 平均値	$^5 \times$ 最大値	$^5 \times$ 変動幅 + 平均値	$13200/N^{0.5}$

変動幅は正側と負側がある

ベクトルの N は定格回転数

ベクトルの境界値は原点からの距離

5 を CD 境界の値とし、は、正側、負側、TH 区分、各境界で共通

監視周波数は各境界、TH 区分で個別指定が可能

ABCD 判定結果画面を図 4.1.31 に示す。

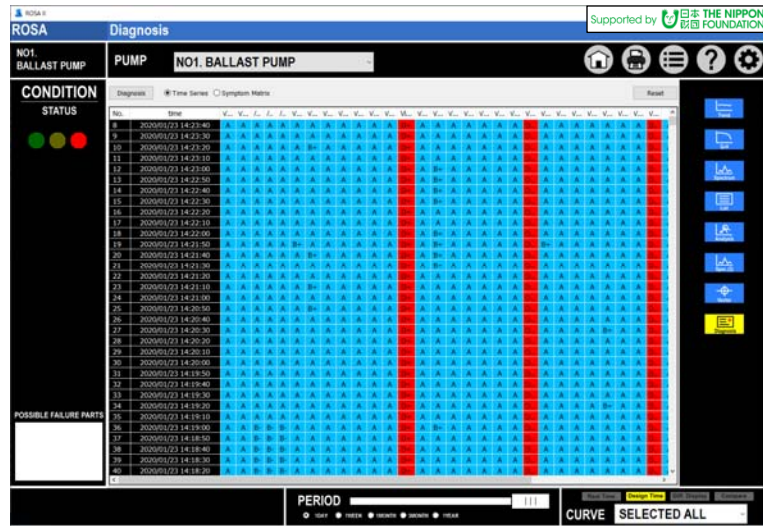


図 4.1.31 ABCD 判定結果画面

マハラノビス距離 (MD) 算出

マハラノビス距離は基準データから成る単位空間と計測データの「距離」である。

マハラノビス距離は、あらかじめ基準データから逆分散行列と基準データの平均値を算出しておき、これらをもちいて計測値から求める。

- 基準データから平均値と逆共分散行列算出

マハラノビス距離にもちいる計測点数を m とし、基準データの時系列データ数を n とする。

n 個の基準用時系列データから平均値と $m \times m$ の標本共分散行列を求め、この逆行列として逆共分散行列を求める。

- 逆共分散行列算出

1 番目の添え字をマハラノビス距離用計測点の番号、2 番目の添え字を時系列番号とする基準用計測データ X_{ij} から次式を用いて標本共分散行列 V_{ij} を求める (注意: 統計解析ソフトウェア「R」(以下、「R」で表示) を用いて共分散を算出する場合、「R」の共分散算出関数 (var 関数) は不偏共分散を求めるため、 $(n-1)/n$ との積をとり標本共分散に変換する)。

$$V_{pq} = \frac{\sum_{k=1}^n X_{pk} X_{qk}}{n} - \bar{X}_p \bar{X}_q$$

ここで、 $\bar{X}_p = \sum_{k=1}^n X_{pk}/n$ はマハラノビス距離用計測点番号 p の計測データの平均値である。この V_{pq} の逆行列として逆共分散行列 V_{pq}^{-1} を求める。

- マハラノビス距離算出

基準用計測データの平均値を \bar{X}_i 、基準用計測データではない計測データを Y_i とする。また基準用計測データから求めた標本共分散行列の逆行列を V_{pq}^{-1} とする。添え字はマハラノビス距離用計測点を表す。マハラノビス距離 MD は次式で求まる。

$$MD = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (Y_i - \bar{X}_i) V_{ij}^{-1} (Y_j - \bar{X}_j)}{m} \right)^{0.5}$$

「R」と開発ソフトでの計算結果の比較結果を図 4.1.32、表 4.1.14(一部抜粋)。
最大誤差は 9E-06 となり、問題ないことを確認した。

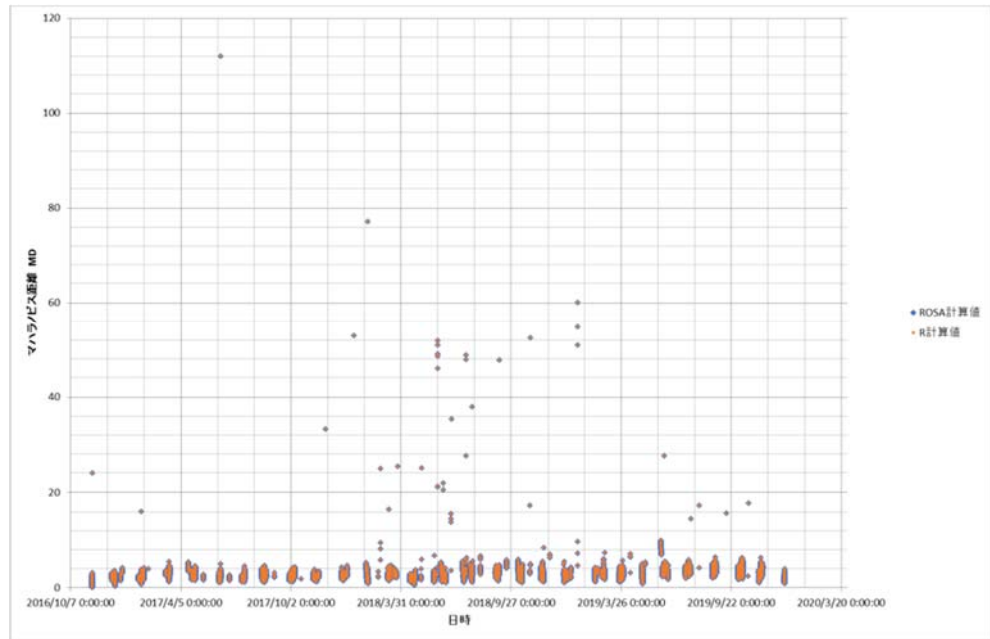


図 4.1.32 計算結果比較

表 4.1.14 計算結果比較 (一部抜粋)

日時	状態診断 ソフトウェア 内部計算	「R」計 算	差 (絶対 値)
2016/11/10 10:32:40	1.4586	1.4586	0
2016/11/10 10:32:50	1.371999	1.371999	0
2016/11/10 10:33:00	1.655342	1.655342	0
2016/11/10 10:33:10	1.615041	1.615041	0
2016/11/10 10:33:20	0.980735	0.980735	2E-07
2016/11/10 10:33:30	1.316289	1.316289	0
2016/11/10 10:33:40	1.542622	1.542622	0
2016/11/10 10:33:50	1.240665	1.240665	0
2016/11/10 10:34:00	1.181701	1.181701	0
2016/11/10 10:34:10	1.377962	1.377962	0
2016/11/10 10:34:20	1.287686	1.287686	0
2016/11/10 10:34:30	1.096817	1.096817	0
2016/11/10 10:34:40	1.242503	1.242503	0
2016/11/10 10:34:50	1.177059	1.177059	0
2016/11/10 10:35:00	1.080263	1.080263	0
2016/11/10 10:35:10	1.200162	1.200162	0
2016/11/10 10:35:20	0.960915	0.960915	2E-07
2016/11/10 10:35:30	1.368973	1.368973	0
2016/11/10 10:35:40	1.315857	1.315857	0
2016/11/10 10:35:50	0.971656	0.971656	3E-07
2016/11/10 10:36:00	0.733126	0.733126	1E-07
2016/11/10 10:36:10	0.953505	0.953505	2E-07

4) 計測データ表示機能

八つの画面タイプと四つの画面表示、リアルタイム、時間指定、差分表示、比較表示を選択可能とする。モニタ画面一覧を表 4.1.15、各画面を図 4.1.33 ~ 4.1.40 に示す。

表 4.1.15 モニタ画面一覧

Screen No	画面タイプ	今期実装有無	画面モード			
			リアルタイム	過去データ表示		
				時間指定	差分	比較
1	トレンド	有	有効	有効	有効	有効
2	Q-Hカーブ	有	有効	有効	無効	無効
3	スペクトル	有	有効	有効	無効	無効
4	リスト	有	前回表示画面タイプに依存			
5	分析(監視周波数)	有	有効	有効	無効	無効
6	スペクトル(3軸)	有	有効	有効	無効	無効
7	ベクトル	有	有効	有効	無効	無効
8	診断	有	有効	有効	無効	無効



図 4.1.33 トレンド表示画面

時系列データの監視画面。ALARM 値、TRIP 値を超えた数値について色を変更する。カーブの呼び出しを右下の CURVE のボックスにて行い、チェックボックスでカーブの表示/非表示を選択する。

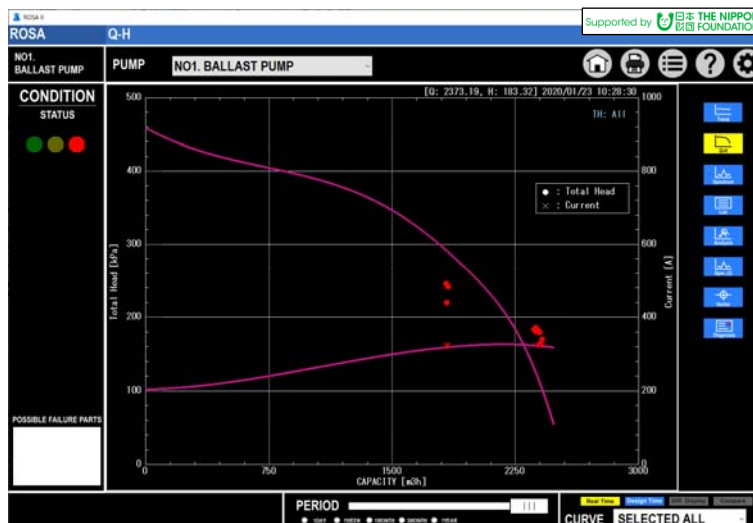


図 4.1.34 Q-H 表示画面

全揚程、電流値と流量の運転点をグラフ表示する。本船で流量を計測していない場合は推定流量にて表示を行う。



図 4.1.35 スペクトル表示画面

特徴周波数に範囲を持たせ代表値を特徴周波数の成分値とした振動スペクトルを表示する。現在値、一定期間の最大値及びしきい値を表示する。

No.	time	Total Head [DC]	SUCTION HEAD	DELIVERY HEAD	AXIS DISPLACEMENT	AXIS DISPLACEMENT	DC-SPIN [Dk]
1	2020/01/23 10:19	184.564	-9.781	174.780	7.947	47.091	1191.723
2	2020/01/23 10:19	184.491	-10.672	173.819	14.727	49.276	1191.146
3	2020/01/23 10:19	184.086	-9.251	174.836	9.993	46.501	1191.329
4	2020/01/23 10:19	184.562	-8.676	175.891	15.004	58.484	1191.116
5	2020/01/23 10:19	184.792	-12.340	172.452	9.725	41.424	1191.428
6	2020/01/23 10:19	186.461	-10.305	176.866	14.858	52.472	1191.701
7	2020/01/23 10:20	185.772	-10.284	175.488	16.691	49.186	1191.130
8	2020/01/23 10:20	182.941	-10.514	172.428	19.041	48.073	1191.510
9	2020/01/23 10:20	181.047	-9.262	172.311	13.972	44.684	1191.310
10	2020/01/23 10:20	181.406	-11.239	172.168	19.812	49.922	1191.220
11	2020/01/23 10:20	182.136	-7.812	174.326	14.499	53.536	1191.222
12	2020/01/23 10:20	184.481	-10.529	173.951	19.153	17.712	99.868
13	2020/01/23 10:21	184.792	-9.262	175.530	13.952	23.097	6.851
14	2020/01/23 10:21	184.792	-11.172	173.620	11.811	14.001	23.251
15	2020/01/23 10:21	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
16	2020/01/23 10:21	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
17	2020/01/23 10:21	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
18	2020/01/23 10:21	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
19	2020/01/23 10:21	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
20	2020/01/23 10:22	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
21	2020/01/23 10:22	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
22	2020/01/23 10:22	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
23	2020/01/23 10:22	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
24	2020/01/23 10:22	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
25	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
26	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
27	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
28	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
29	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
30	2020/01/23 10:23	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
31	2020/01/23 10:24	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
32	2020/01/23 10:24	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
33	2020/01/23 10:24	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654
34	2020/01/23 10:24	184.792	-10.660	174.132	10.331	13.376	23.654

図 4.1.36 リスト表示画面

直前に表示していた状態量のリスト表示を行う。



図 4.1.37 分析（監視周波数）表示画面

スペクトル表示画面のデータについて詳細な監視周波数スペクトル成分を表示する。データ量を軽減するため特徴量のみ表示、データ保存を行う。



図 4.1.38 スペクトル (3 軸) 表示画面

3 軸方向の振動周波数スペクトルを表示する。

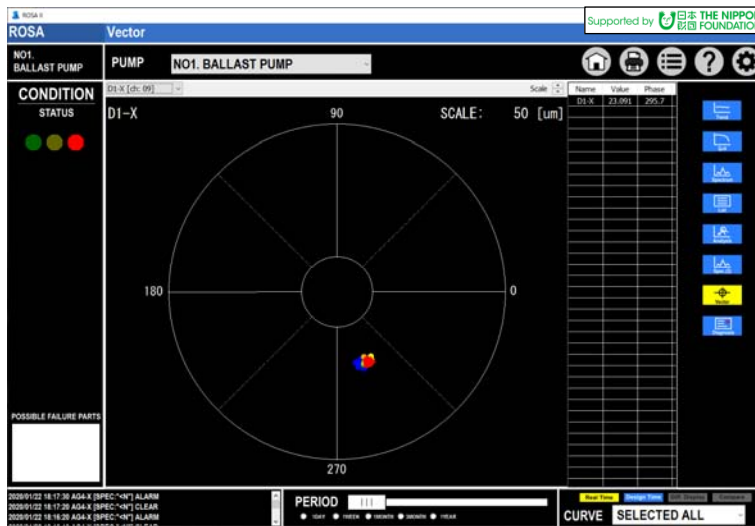


図 4.1.39 ベクトル表示画面

変位センサと回転検出器のパルス信号により算出したベクトル信号を表示する。0 度位置は該当変位計の位置を示す。表示位置は回転検出器と変位センサの位置を補正した数値である。変位データは変動値を用いる。

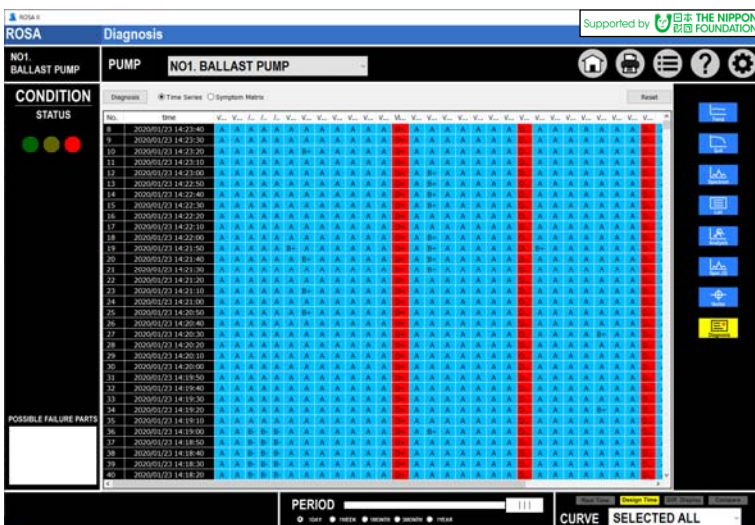


図 4.1.40 診断表示画面

各パラメータを ABCD 判定行った結果を表示する。判定結果を POSSIBLE FAILURE PARTS に表示を行う。

5) データ削除ソフトウェア

4.1.1 データ収集及びデータの分析結果より、1 分間平均値においても十分な傾向が確認されたため、データを圧縮する方法として以下のソフトウェアを開発した。

計測ソフトウェアがデータベースに保存したリアルタイムデータから過去データを生成し、不必要なリアルタイムデータを削除する。過去データは、リアルタイムデータが 10 秒毎の計測データであることに対して、1 分毎の計測データとなる。ただし、アラーム発生時は設定に応じてアラーム発生前後を 10 秒毎のデータで保存する。また、保存領域の容量が少なくなると、初期の過去データを削除する。

6) シミュレータ機能

シミュレータ機能概要

本機能は、実船で収集したデータを用いて疑似波形を生成し、ポンプ診断ソフトの計測ソフトウェアの機能を検証するための機能である。

模擬信号はあらかじめ計測した波形データと入力した振幅と周波数から生成する正弦波及びパルス信号である。正弦波とパルス信号はベクトル演算に用いる。

表 4.1.16 に生成する模擬信号の一覧を示す。

図 4.1.41 にシステムの動作イメージを示す。

表 4.1.16 模擬信号一覧

模擬信号タイプ	サンプリング周波数	模擬信号ソース	備考
DC・OA 用波形データ	2,560Hz	収録した波形ファイルの後半 1024 サンプリング	従来の収録ソフトウェアも DC, OA 算出時は最新の 1024 サンプリングの波形から FFT を行い算出している。
ベクトル用正弦波	12,800Hz	演算 (振幅と周波数を指定)	<ul style="list-style-type: none"> ● ベクトル演算に使用 ● 位相の再現は行わない

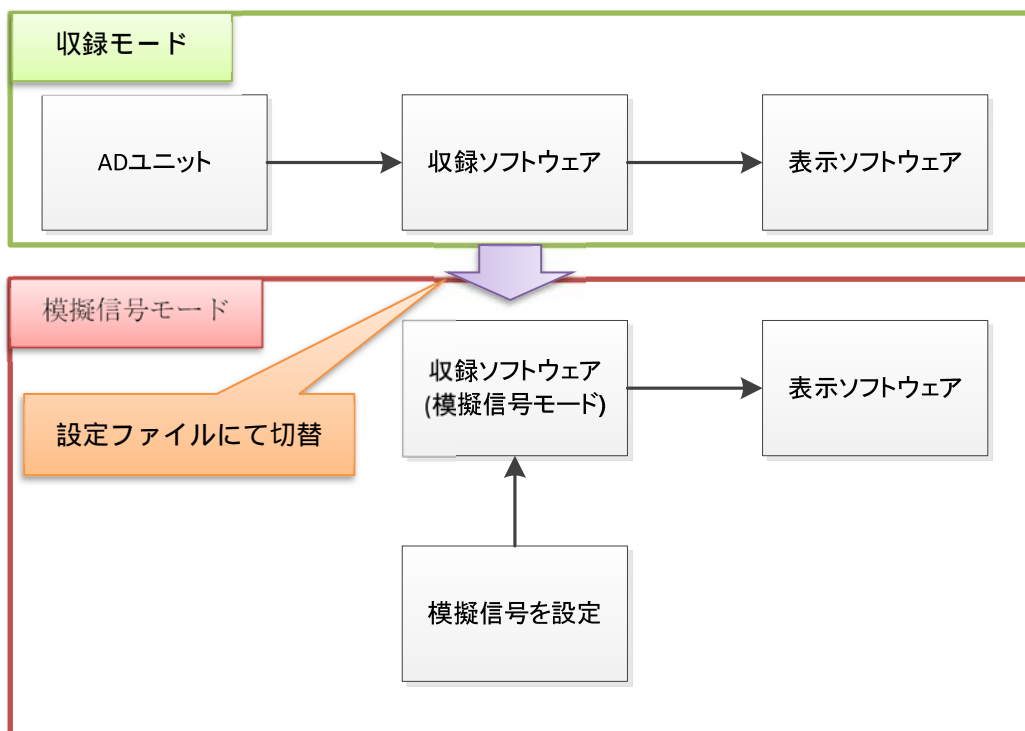


図 4.1.41 システム動作イメージ

ソフト検証

ソフト検証では実船で計測したデータをシミュレータソフトにて模擬信号へと変換し演算結果及び動作の確認を実施する。

検証に用いた初期データは実船の表 4.1.17 に示すデータ、運転データは図 4.1.42 に示すデータを使用した。

表 4.1.17 初期データ（実船データから抽出）

項目	トレンドデータ	振動 OA	ベクトルデータ	スペクトル 監視周波数
日付	2017年4月16日 ～同年6月24日	2017年4月16日 ～同年6月24日	2017年1月21日 ～同年3月28日	2017年3月10日

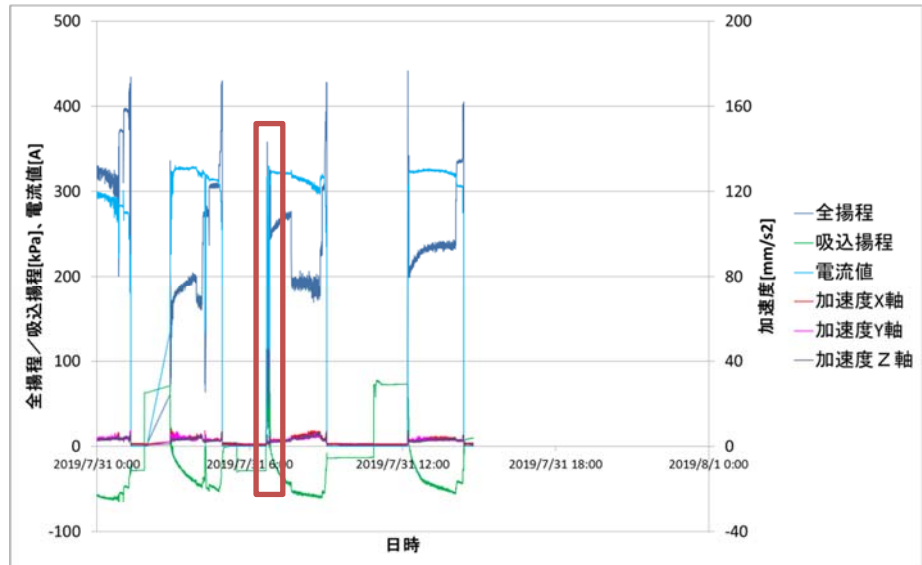
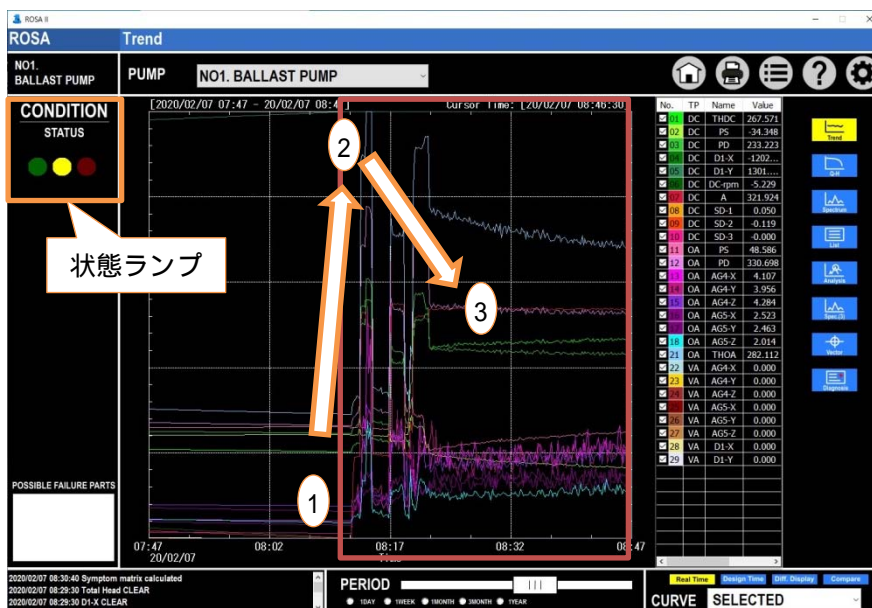


図 4.1.42 ソフト検証用データ（2019年7月31日 Unloading時）

各検証結果について、トレンド画面を図 4.1.43、Q-H 画面を図 4.1.44、分析画面を図 4.1.45、診断画面を図 4.1.46 に示す。

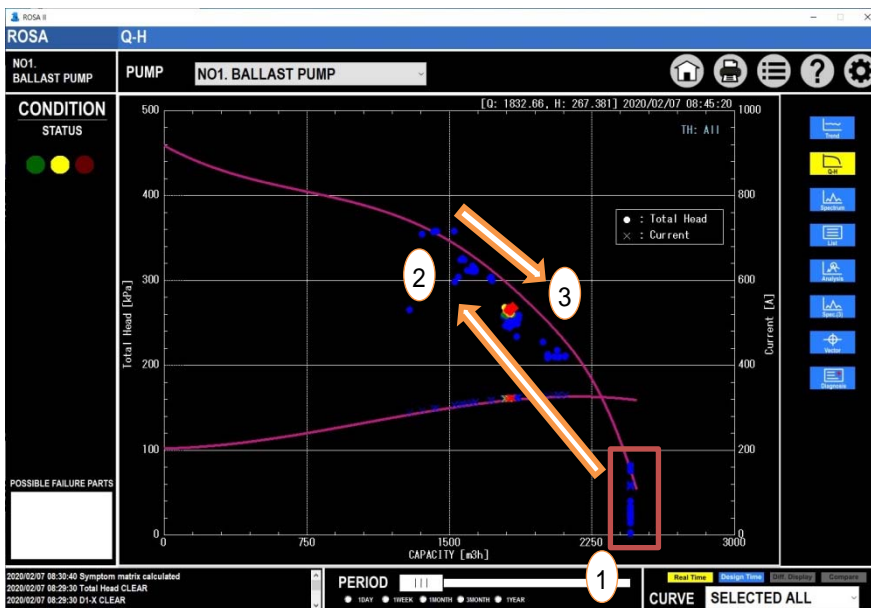
トレンド画面では状態ランプが点灯し、ポンプの状態異常の傾向が表れていることを示す。



ソフト検証用データの赤枠部分のデータ

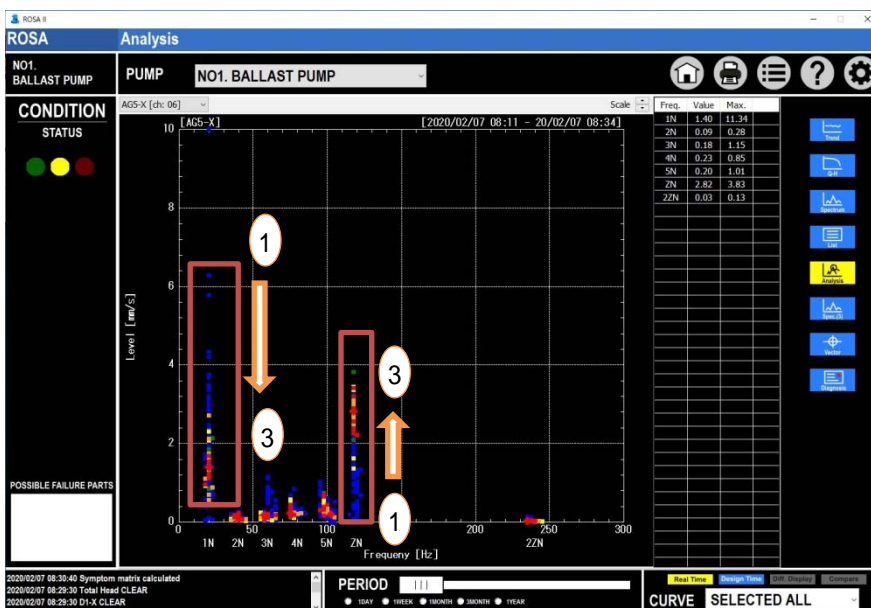
図 4.1.43 トレンド画面（2019年7月31日 Unloading時）

トレンド画面、Q-H画面及び分析画面より、運転は1 2 3の順に運転され、不安定な運転状態が定常状態に移行していることが確認された。このことは図4.1.46 診断画面にも現れており不安定なD判定からB判定に変化していることを確認した。



赤色の点が最近の10点データを示す。青色の点は40点(400秒)～360点(3600秒)前のデータを示す。
1は起動直後であるが、揚程が低く安定していないため、Qの計算値が異常値を示している。

図 4.1.44 Q-H (2019年7月31日 Unloading時)



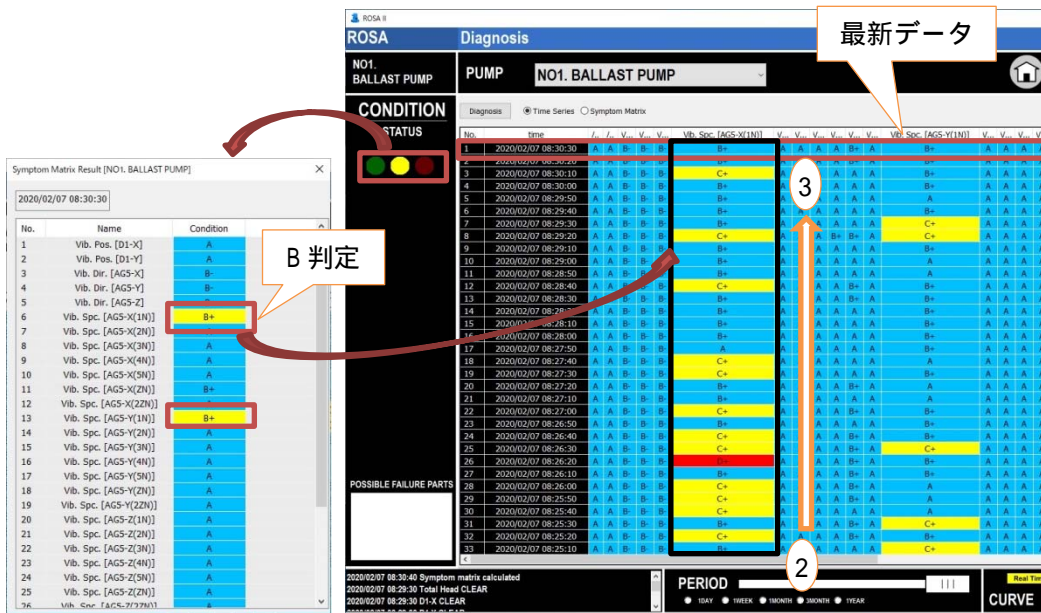
Q - Hカーブと同じ表示色。Q - Hの赤枠部分は1N成分が増大していることが確認された。

図 4.1.45 分析画面 (2019年7月31日 Unloading時)

状態ランプの表示は、A B C D判定の過去30分間を元に表示を決定する仕様となっている。判定基準を表4.1.18に示す。図4.1.46に示す通り正常動作していることを確認した。

表 4.1.18 状態ランプ判定基準

判定	基準	備考
青	C判定またはD判定4点以下	D判定優先
黄	C判定5点以上	
赤	D判定5点以上	



状態ランプをクリックすると、最新の結果が表示され、黄色表示の原因部分が同色示される。今回は一定数以上C判定があるため、最新データがB判定でも黄色判定となっている。



D判定が判定区間に一定数を超えたため、状態ランプは赤色表示に変更したことを確認した。

図 4.1.46 診断画面 (2019年7月31日 Unloading時)

今回C,D判定が出たパラメータは、振動X,Yの1Nスペクトル及び電流値であったため、該当する症状が多く出た。これは回転体の劣化が進行しアンバランス量が増大したためと思われる。

7) 状態診断ソフトウェア製作結果

運転区分を初期データから全揚程毎に区分し、各区分の最小値、最大値、平均値より各パラメータの境界値を計算し、表 4.1.10 の最適化したポンプ診断マトリックスを使用した状態診断ソフトウェアを成果物として得た。

どの部品が劣化しているかの特定については、分析方法の検討、専用のセンサ開発、各パラメータに重みづけを行い、症状の適合度割合を明確にして精度向上が必要である。

4.1.3 AE センサデータ取得及び分析

1) AE パラメータ

AE センサで検出・増幅された AE 信号は、突発型、連続型いずれの場合も背景雑音が含まれている。これを除去・軽減するためには、背景雑音の性質を事前に調査し、これに適したフィルタを使用し、更に残る雑音レベルに対して十分高いしきい値を設定し、これを越えた信号を抽出し AE 信号として計測する。抽出された AE 信号波形は波動の特徴から信号処理しパラメータ化し、AE の様々な情報を取得し、AE を発生させた事象の特性化を行う。

AE パラメータ²¹⁾について AE 事象の情報項目別に分けたものを表 4.1.19 に示す。

表 4.1.19 AE パラメータ分類

NO	情報区分	一次パラメータ	突発 B/連続 C	二次パラメータ
1	発生場所	到着時間	B	ゾーン標定
		到着時間差	B	位置標定
		接触時間	B	接触位置標定
2	発生頻度	AE カウント数	B、C	AE カウント
		AE 事象数	B	AE 事象計数
3	エネルギー	信号最大振幅値	B	AE エネルギー
		包絡線	B、C	AE エネルギー
				最大値/平均値/分散値
実効値	B、C	最大値/平均値/分散値		
4	性状	立上り時間	B	波形勾配
		持続時間	B	波形勾配
		AE 波形	B、C	波形重心値
				波形値/波高率
				歪度/尖度
		AE スペクトル	B、C	ピーク周波数値
				平均(重心)周波数
				平均周波数等価帯域
周波数波形率/波高率				
				周波数歪度/尖度

突発 ... 突発型 AE 波形、時間的に離散して発生する波形

連続 ... 連続型 AE 波形、個々に分離できないほど高頻度で連続的に発生した波形

1 の発生場所は複数のセンサまたは接触位置検出センサにより検出される。このパラメータは突発型 AE については有用である。

2 の発生頻度はしきい値を越えた波の数を数える方式である。AE 事象計数は突発 AE について有用である。

3 のエネルギーは連続型 AE を評価するパラメータとしてもちいられる。

4 の性状は AE の識別に有効なパラメータとなる。

今回製作した AE 収録システムは、表 4.1.19 の太枠の収録を目的としたものである。

2) AE 信号収録用ソフトウェア製作

• AE 収録システム概要

本機能は、AE センサをディスクリミネータに接続することで得られる三つのアナログ出力、エンベロープ信号（包絡線）、アベレージ信号（エンベロープ信号の平均値）、及びイベント信号（ディスクリミネータからのパルス出力でエンベロープ信号がしきい値を超えたことを判別するための信号）から AE センサの情報を分析する機能である。分析は 10 秒間の波形データを基に行う。回転位置とイベント信号を結びつけるため、回転パルス信号も同時に計測する。

ディスクリミネータは AE 信号を弁別するための装置である。

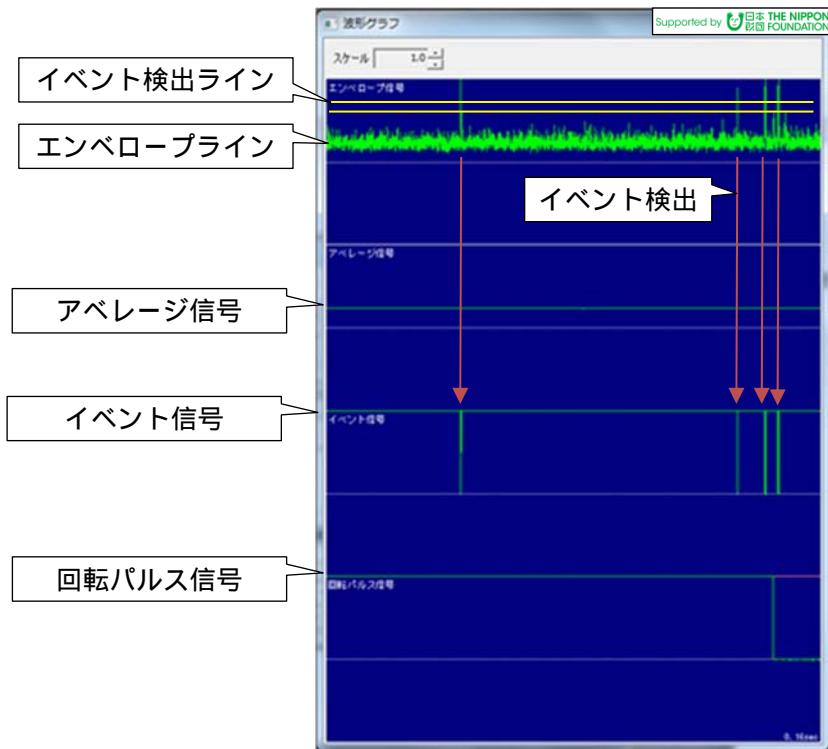
表 4.1.20 に分析項目、表示項目、及び保存項目をソフトウェア機能一覧として示す。

各表示画面を図 4.1.47～図 4.1.54 に示す。

図 4.1.55 に計測ブロック線図を示す。

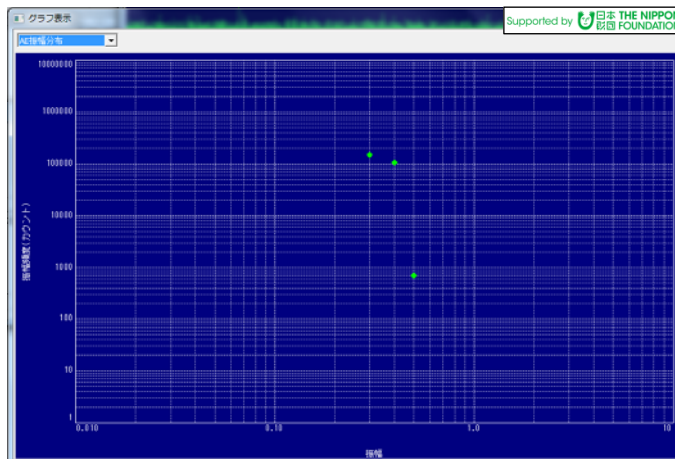
表 4.1.20 ソフトウェア機能一覧

項目	機能	備考
分析	最大値	エンベロープ信号から算出
	平均値	アベレージ信号から算出
	実効値	アベレージ信号から算出
	エネルギー計算	エンベロープ信号から算出
	AE 事象計数	イベント信号から算出
	回転位置事象計数計算	イベント信号と回転パルス信号から算出
	AE 振幅頻度	エンベロープ信号から算出
表示	AE 振幅分布	エンベロープ信号の振幅値から振幅頻度を算出し、両対数グラフにて、振幅分布を表示
	AE 回転位置事象計数	回転位置事象計数の結果を表示
	AE トレンド (平均値、実効値、最大値、エネルギー)	各値を時系列グラフとして表示
	AE 事象計数及び AE 事象計数総数	<ul style="list-style-type: none"> ● 事象計数を時系列グラフとして表示 ● 計数と総数は切り替えて表示
	エンベロープ信号波形	10 秒毎に波形データを更新して表示
	累積エネルギー	時系列グラフとして表示
保存	AE トレンド (平均値、実効値、最大値、エネルギー)、累積エネルギー、AE 事象計数及び総数	CSV 形式で保存
	AE 振幅分布	CSV 形式で保存
	回転位置事象計数	CSV 形式で保存
	エネルギー	CFD 形式で保存



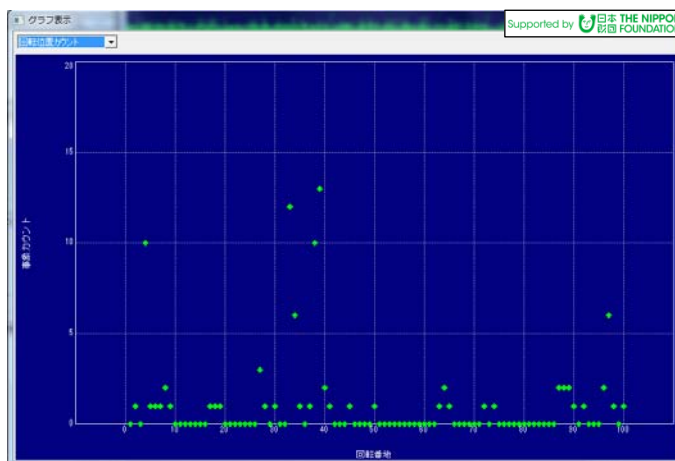
計測している波形の形状を確認する画面です。ディスクリミネータのイベント検出ラインをイベント信号とエンベロープ信号で確認し数値調整を実施した。

図 4.1.47 波形確認画面



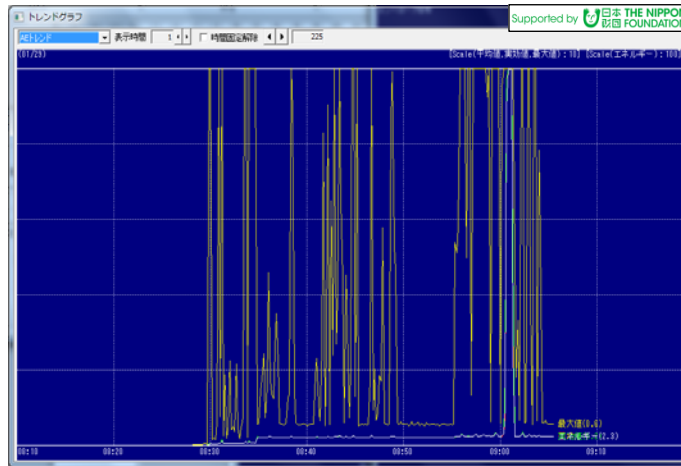
縦軸に 10 秒間に発生する事象計数、横軸に振幅の大きさを表示する画面

図 4.1.48 AE 振幅表示画面



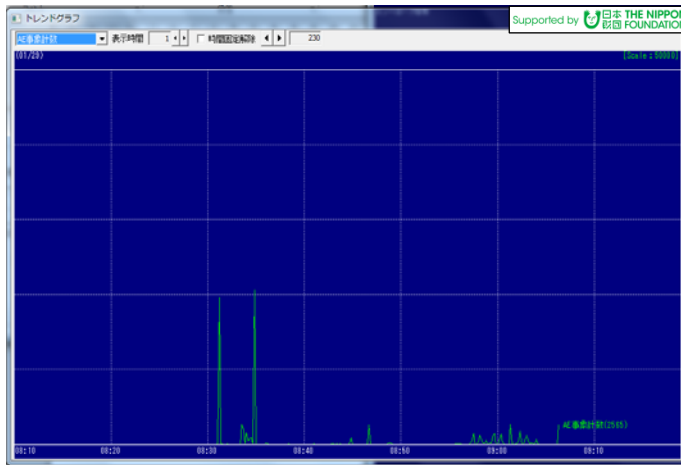
縦軸は 10 秒間に発生する回転位置における事象計数、横軸は一回転を 100 分割し、3.6 度毎の番地とした。0 番地は回転検出器のパルス信号検出時としている。
1 番地 = 3.6 度
0/100 番地 = 360 度

図 4.1.49 AE 回転位置事象計数 (計数) 表示画面



10 秒間に計測した各トレンド値の表示画面。

図 4.1.50 トレンド表示画面



10 秒間の事象計数の表示画面。

図 4.1.51 AE 事象計数表示画面



計測開始時刻から現在までの事象計数総数の表示画面。計数はリセットすることにより 0 からの開始となる。

図 4.1.52 AE 事象計数総数表示画面

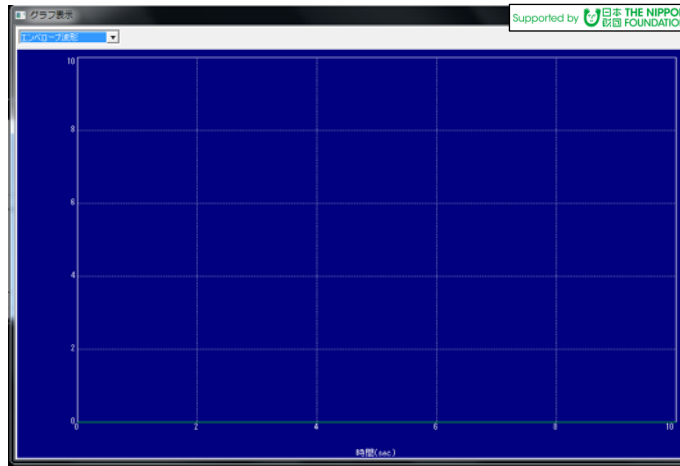


図 4.1.53 エンベロープ信号波形表示画面

計算に使用したエンベロープ波形を表示する画面。10 秒毎に更新する。

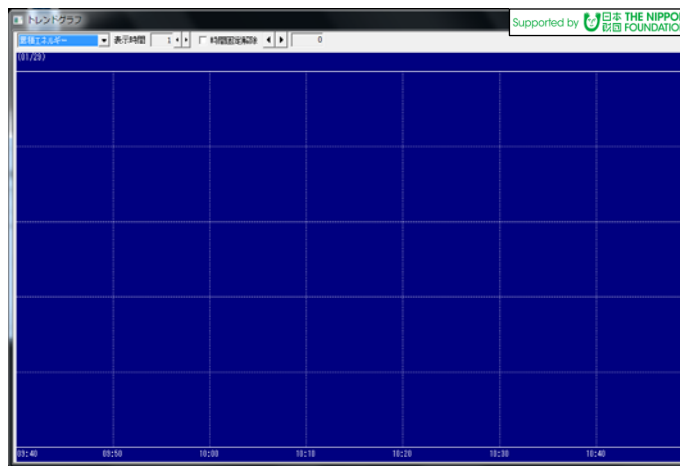


図 4.1.54 累積エネルギー表示画面

計測開始時刻から現在までの累積エネルギーの表示画面。累積値はリセットすることにより 0 からの開始となる。

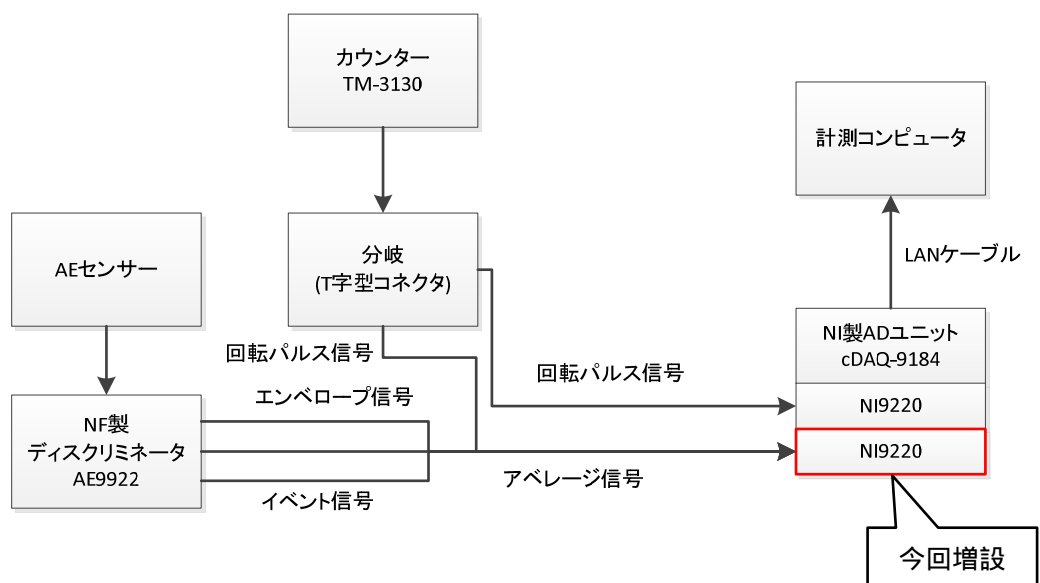


図 4.1.55 計測ブロック線図

3) AE 収録システム検証

以下のモータを使用し、AE 収録システムの機能を検証した。

モータ仕様：2.2kW/1140min⁻¹（正常、異常（1号機、3号機））

正常モータとベアリング異常モータ（ベアリング異音）について無負荷状態で比較検証を行った。プリアンプとディスクリミネータの設定は以下とした。

プリアンプ : GAIN = 40dB、HPF = 50kHz

ディスクリミネータ : GAIN = 40dB、HPF = 50kHz、LPF = 200kHz

AE センサ : 広帯域型

加速度センサ : 3 軸型

回転検出器 : 光学式

軸受：駆動軸側 6306ZZ(転動体数 8 個)

反駆動軸側 6306ZZ(転動体数 8 個)

実運転回転数(測定値)：1200min⁻¹

試験モータとセンサの位置を図 4.1.56、計測結果を図 4.1.57 に示す。計測した振動値を表 4.1.21 に示す。



図 4.1.56 試験モータとセンサ位置

計測結果より、AE 信号の回転位置発生パターンより外輪側で発生し、蓄積エネルギーが増大しているが頻度は低下傾向にあり、1号機より3号機の方が進行していることがこれよりわかった。このことは振動 OA 値からも同様の結果が得られた。但し、振動値は ISO 許容値内に収まっている。

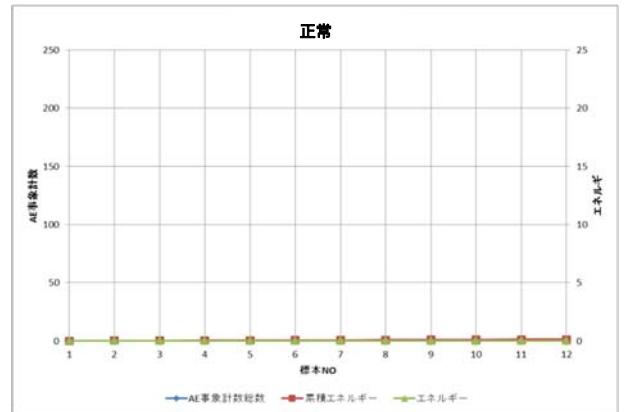
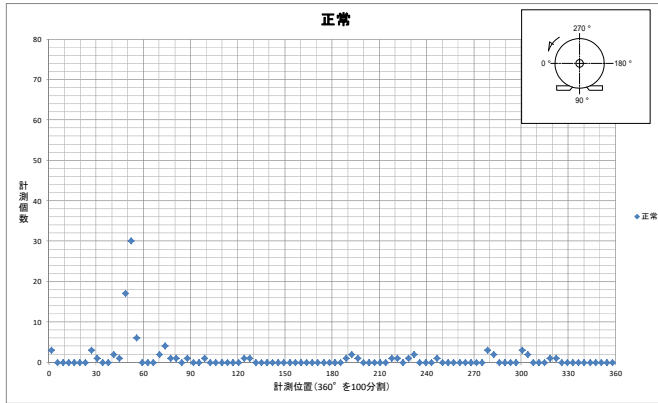
回転位置事象計数を重ね書きしたものを図 4.1.58 に示す。0 度位置は回転検出器の位置を示し、軸端側から見た検出位置となる。

30 度方向に正常品及び異常品共に AE 発生が見られた。3号機については 105 度方向に AE 発生源を確認した。

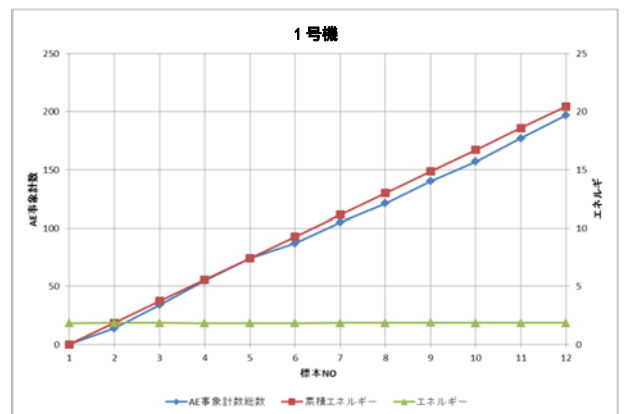
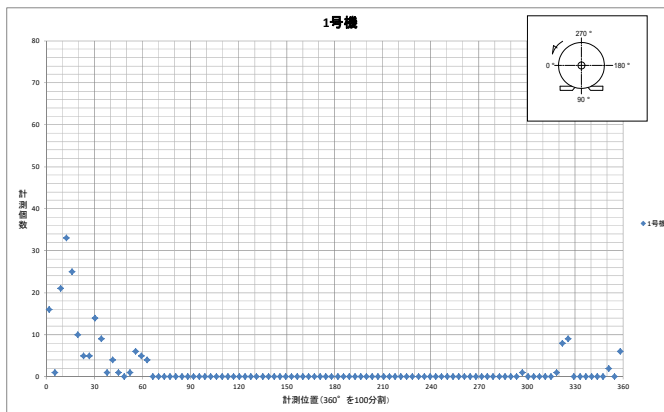
AE パラメータの挙動より、1号機より3号機モータの事象計数総数の検出数が低下しているが累計エネルギーについては増加していることが確認された。これは1号機より3号機の方がより損傷の程度が重いためと推定できる。

以上よりモータを用いた試験で AE 収録システムが目的した機能を有することを検証した。

正常モータ挙動



異常モータ挙動 (1号機)



異常モータ挙動 (3号機)

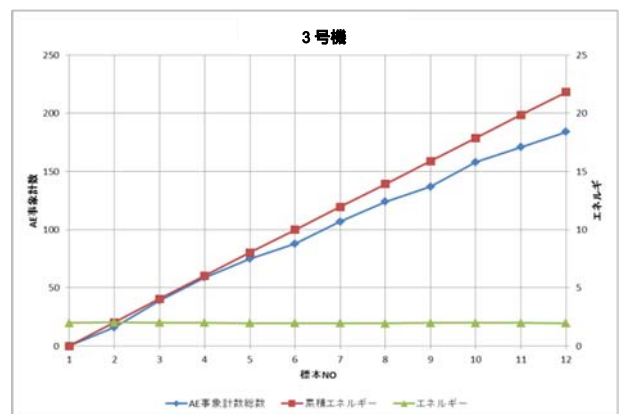
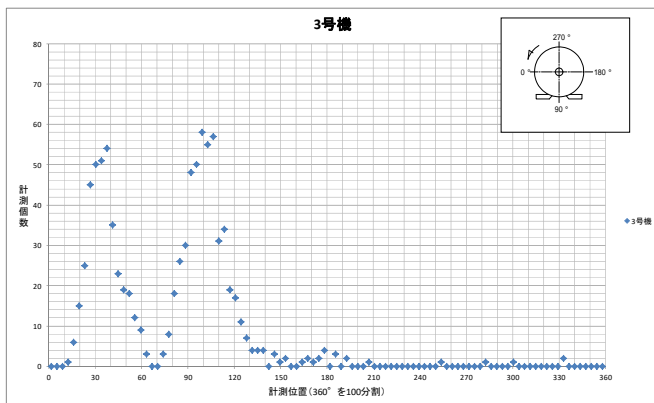


図 4.1.57 回転位置事象計数 (左)、エネルギー、AE 事象計数 (右)

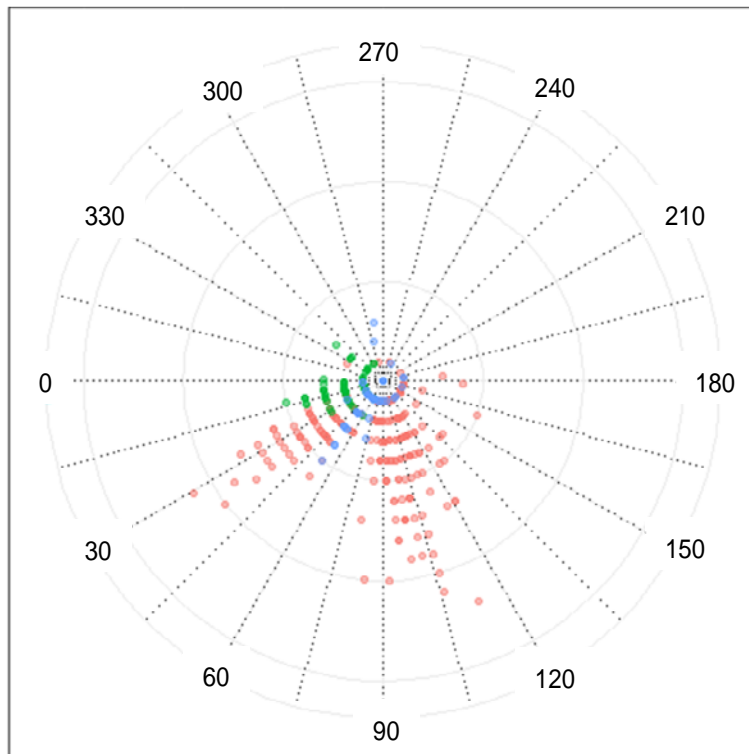


図 4.1.58 回転位置事象計数重ね書き
1号機、 3号機、 正常品

表 4.1.21 振動値表(オーバーオール) 単位(mm/s)

計測方向 モータ	X	Y	Z
1号機	1.5	1.4	1.4
3号機	2.3	2.2	1.3
正常品	0.5	1.1	0.3

以下にて、振動値よりベアリング損傷位置の検討を行った。

f_0 : 軸の回転周波数 [Hz] 20Hz
 D : 軸受のピッチ円直径 [mm] 52mm
 d : 転動体の直径 [mm] 12mm
 Z : 転動体数 8

内輪の傷によって発生する振動の周波数(2倍...3倍...)

$$f_{in} = \frac{Z}{2} f_0 \left(1 + \frac{d}{D} \cos a \right) : 98.5\text{Hz}$$

外輪の傷によって発生する振動の周波数(2倍...3倍...)

$$f_{out} = \frac{Z}{2} f_0 \left(1 - \frac{d}{D} \cos a \right) : 61.5\text{Hz}$$

転動体の傷によって発生する振動の周波数(2倍...3倍...)

$$f_{ball} = f_0 \frac{D}{2d} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 a \right\} : 41\text{Hz}$$

計算上の振動周波数と3号機実測データの比較結果を表4.1.22に示す。

以上の結果より、内輪もしくは外輪に傷が発生していることが分かった。

表 4.1.22 各損傷の振動周波数(n 倍)

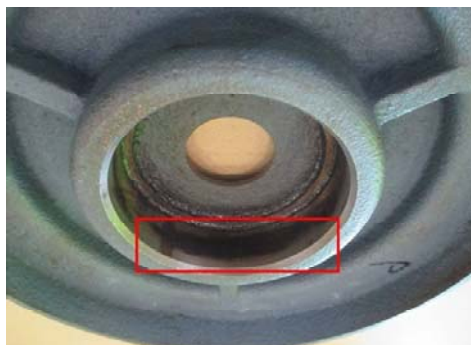
単位(Hz)

損傷	n							
	1	2	3	4	5	6	7	8
f_{in}	98.5	197	295.5	394	492.5	591	689.5	788
f_{out}	61.5	123	184.5	246	307.5	369	430.5	492
f_{ball}	41	82	123	164	205	246	287	328

赤字 ... 異常モータに特徴が確認された周波数

3号機の傷の状態を確認した結果を図 4.1.59 に示す。

振動及び AE センサの分析結果通りのハウジングの内周及びベアリングの外周にフレッチング痕が確認された。



ハウジングのベアリング装着部の下側にフレッチングが確認された。フレッチングは接触する二物体間に微小な往復滑りが繰返し作用したときに生じる表面損傷のことである。



ベアリング外周側にも同様のフレッチングが確認された。

図 4.1.59 3号機異常モータ開放

AE 振幅分布は材料特性を表す AE パラメータである。今回の計測では計測値にばらつきが多かったため特徴的な傾向を示した部分を抜粋したものを図 4.1.60 に示す。一定の傾向が確認されたが、材質特定については今後データ蓄積が必要と思われる。

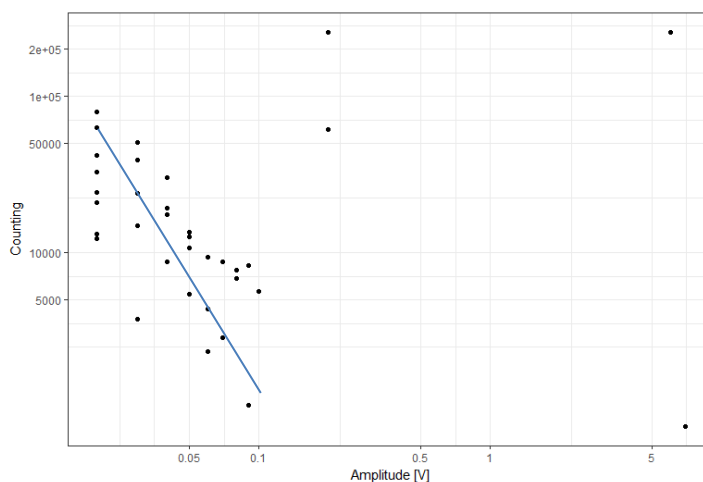


図 4.1.60 AE 振幅分布 (一部抜粋)

4) A E データ収集及び分析

図 4.1.61 に陸上模擬試験装置を示す．表 4.1.23 に模擬試験ポンプ仕様を示す．

既設の陸上模擬試験装置に AE センサ計測機器を増設した．回転検出器より信号を既設の試験装置より分波し共通の信号とした．AE 試験装置詳細図を図 4.1.62 に示す．

プリアンプ要目を表 4.1.24、ディスクリミネータ要目を表 4.1.25 に示す．

AE センサは共振型 AE-901S (固有振動数：140kHz)、AE-904S (固有振動数：200～500kHz) を使用し、固定は図 4.1.63 に示すものを使用した．AE センサホルダはホルダを対象面に接着して使用するタイプで、ホットメルトタイプグリースは常温で硬化し、30～40℃で軟化するグリースで振動センサに用いられるものである．

この試験で計測した信号項目を表 4.1.26、収録した AE パラメータ一覧を表 4.1.27 に示す．

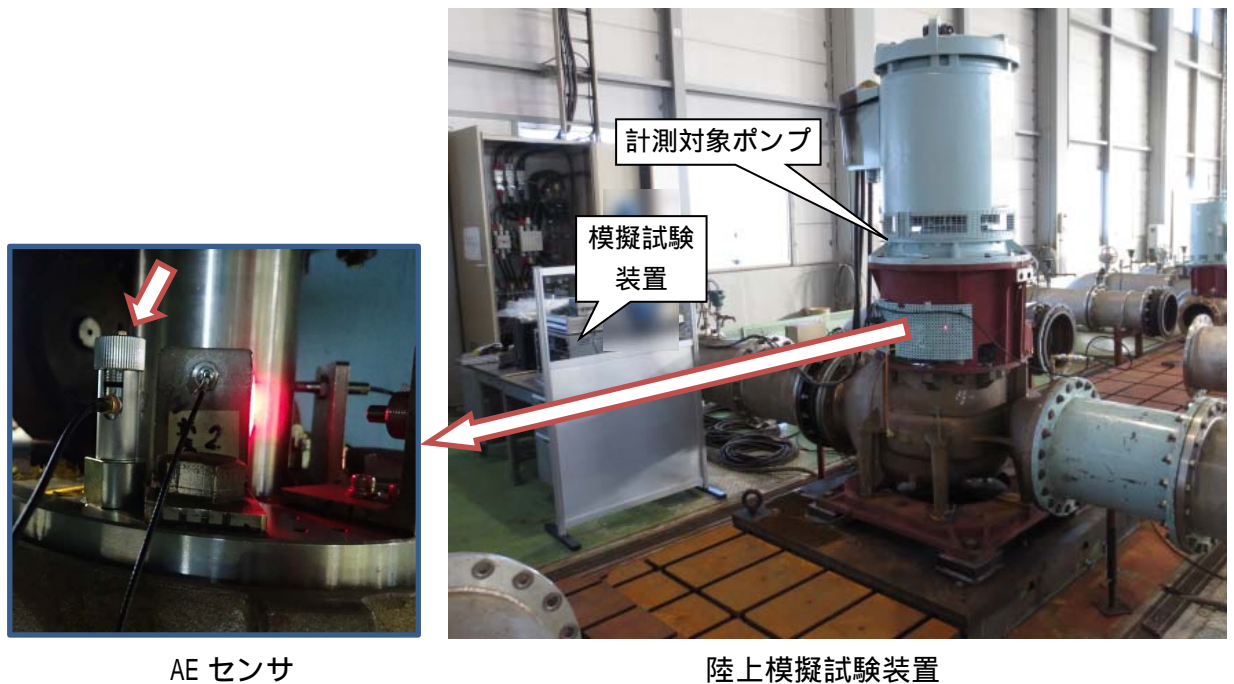


図 4.1.61 陸上模擬試験装置

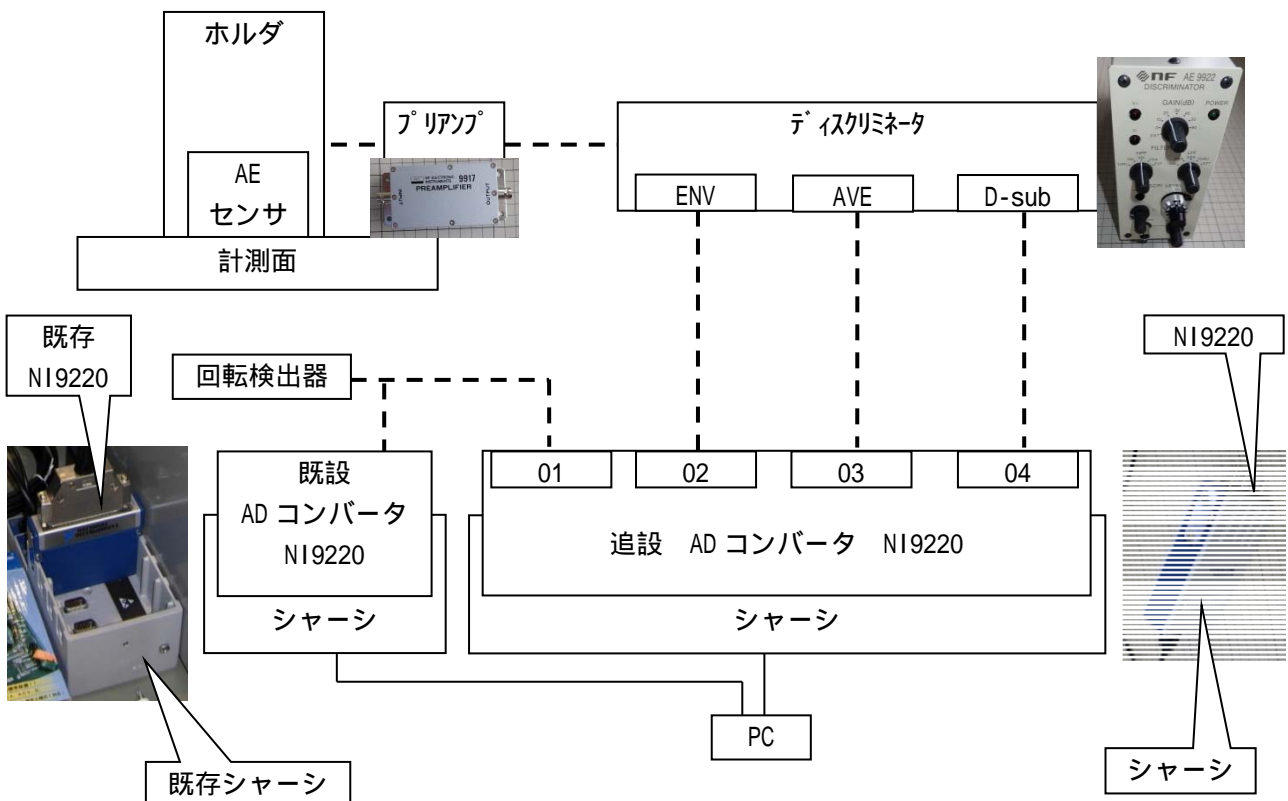


図 4.1.62 AE 試験装置図

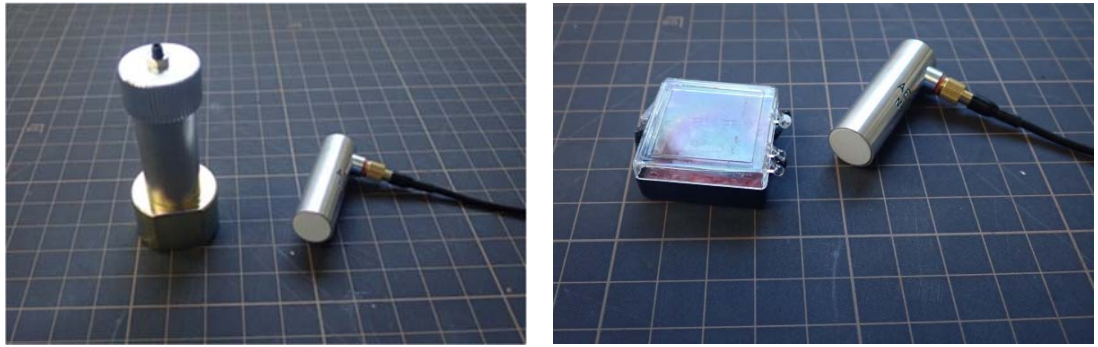


図 4.1.63 AE 固定方法 (左: AE センサホルダ、右: ホットメルトタイプグリース)

表 4.1.23 計測対象ポンプ要目

用途名	模擬試験ポンプ
型式	立型両吸込渦巻式
ポリュート数	2
羽根枚数	6
型番	FEWV-400-3D
仕様	2000m ³ /h x 0.25MPa x 200kW x 1150min ⁻¹

表 4.1.24 プリアンプ要目

型番	NF 回路設計ブロック製 9917
GAIN(dB)	20、30、40
HPF(kHz)	50、THRU

表 4.1.25 ディスクリミネータ要目

型番	NF 回路設計ブロック製 AE9922
GAIN(dB)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
HPF(kHz)	20、50、100、THRU
LPF(kHz)	100、200、500、THRU

表 4.1.26 計測信号項目

NO	項目	備考
1	既存計測信号	吸込揚程、吐出揚程、回転パルス
2	エンベロープ信号	ENV 出力
3	アベレージ信号	AVE 出力
4	イベント信号	EVENT 出力
5	回転パルス信号	計測装置から分岐

表 4.1.27 収録 AE パラメータ

NO	項目	使用信号
1	最大値	エンベロープ信号
2	平均値	アベレージ信号
3	実効値	アベレージ信号
4	エネルギー	エンベロープ信号
5	AE 事象計数	イベント信号
6	回転位置事象計数	イベント信号、回転パルス信号
7	AE 振幅頻度	エンベロープ信号

計測は、軸初期位置については通常運転（押し込み運転）を実施し、ミスアライメント（軸を 0.15mm 移動させた状態）については通常運転（押し込み運転）を実施した。また、軸初期位置については吸込み条件を変更した吸い上げ運転を実施した。

プリアンプとディスクリミネータの設定を以下とした。

プリアンプ : GAIN = 40dB、HPF = 50kHz

ディスクリミネータ : AE-901S GAIN = 10dB、HPF = 50kHz、LPF = 200kHz

: AE-904S GAIN = 30dB、HPF = 50kHz、LPF = 200kHz

今回の試験では AE-901S のセンサにおいて有効なデータが得られたため、このセンサを用いて分析を実施した。また、固定方法について、ホットメルトタイプグリースは運転中、振動状態によっては剥がれるケースがあった。そのため、計測はホルダを使用し接着剤（使用温度範囲() : 10 ~ 35）を使用し計測を実施した。

計測は領域分けをおこない、それぞれの運転は表 4.1.28 に示す条件にて計測を行った。インデックスは 10 秒毎のデータセットの番号を示す。

表 4.1.28 運転条件

運転領域	インデックス	全揚程 (kPa)	吸込揚程 (kPa)	吐出バルブ	吸込バルブ
A	01 ~ 12	520	押込	全閉	全開
B	13 ~ 24	350	押込	絞り	全開
C	25 ~ 36	250	押込	絞り	全開
D	37 ~ 48	150	押込	絞り	全開
E	49 ~ 60	50	押込	全開	全開
F	61 ~ 72	100	吸上 (-50)	全開	絞り
G	73 ~ 84	100	吸上 (-60)	全開	絞り

トレンドの試験結果について、最大値は図 4.1.64、平均値は図 4.1.65、実効値は図 4.1.66、エネルギーは図 4.1.67 に示す。

計数の試験結果については、事象計数は図 4.1.68 に示す。

計測値は 10 秒毎に生成し、分析では回転位置事象計数は 2 分間（12 個の連続するインデックス）の累積値を使用した。

回転位置事象計数の計測結果より流体流れの安定している運転領域 C（250kPa）、B（350kPa）付近では AE の発生が少なく傾向の確認は困難であったが、運転領域 D（150kPa）においては 1 回転あたり 6 回と羽根車の羽根枚数と同じ回数大きな変動が確認され、軸を 0.15mm ずらした試験ではこの変動幅は減少することが確認された。羽根車とケーシングの隙間が変動することにより圧力の変動幅が変化すること³¹⁾が示されており、この変動幅の変化は羽根車とケーシングの隙間が変化したためと思われる。

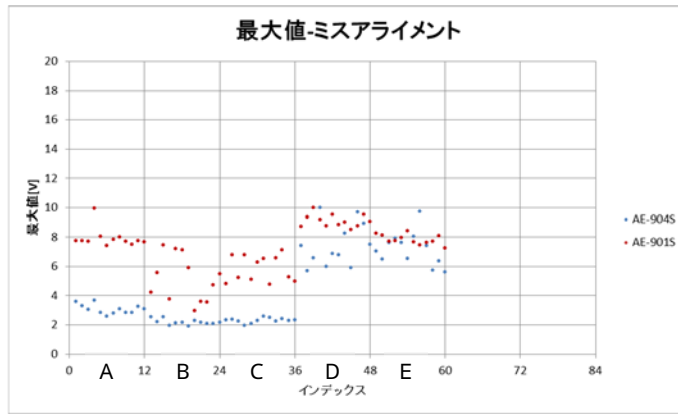
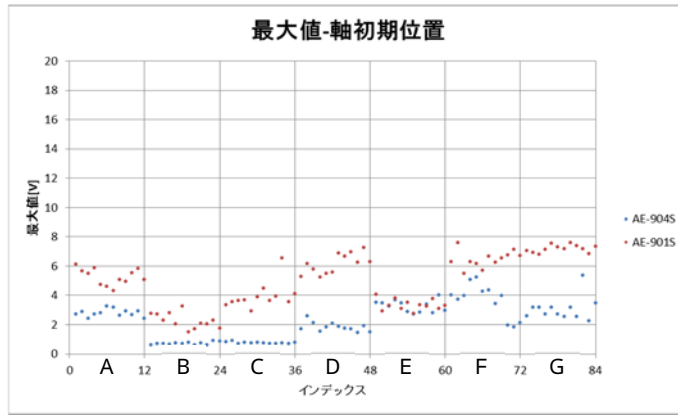


図 4.1.64 試験結果 (最大値)

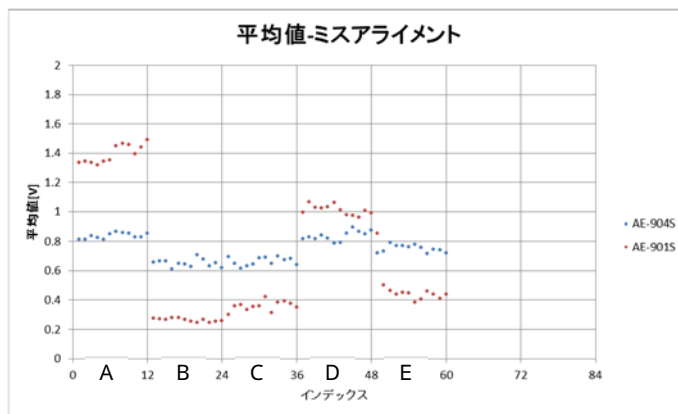
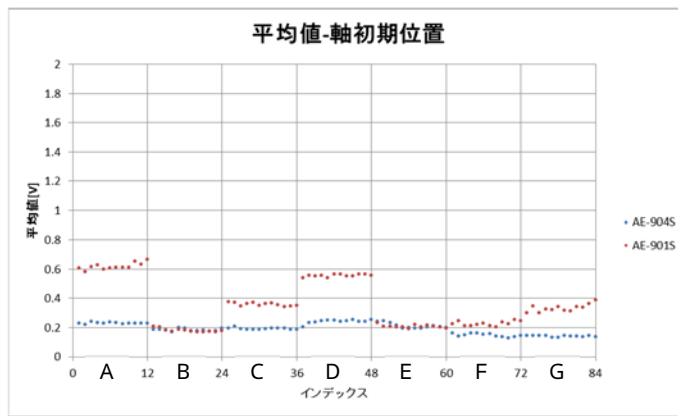


図 4.1.65 試験結果 (平均値)

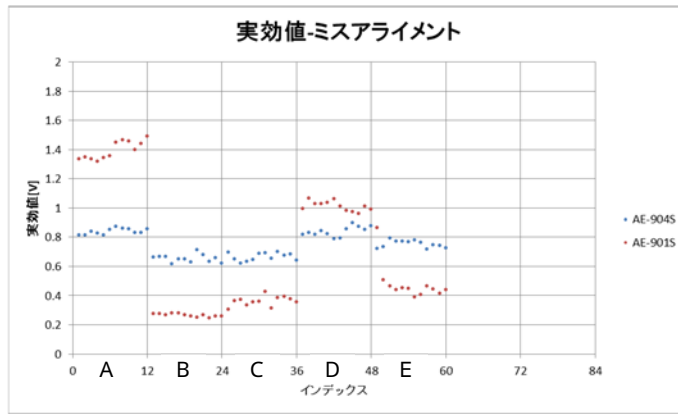
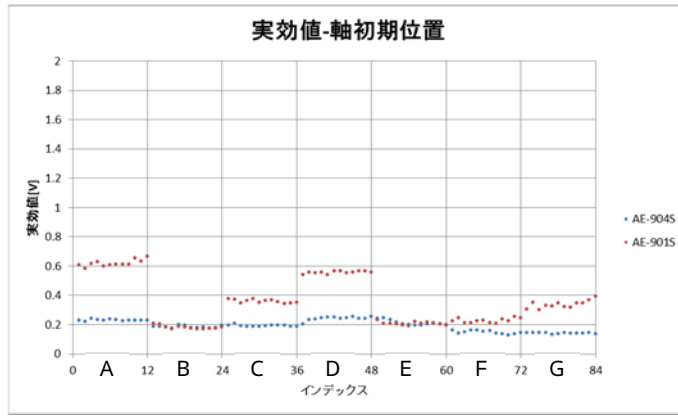


図 4.1.66 試験結果 (実効値)

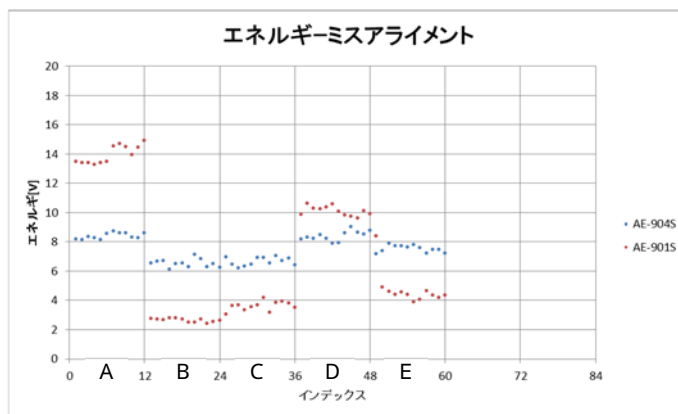
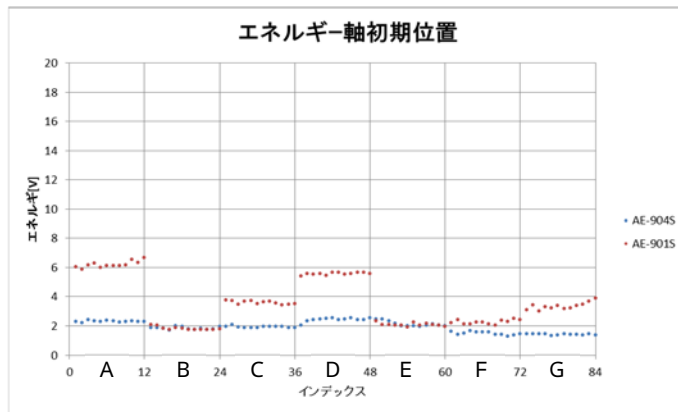


図 4.1.67 試験結果 (エネルギー)

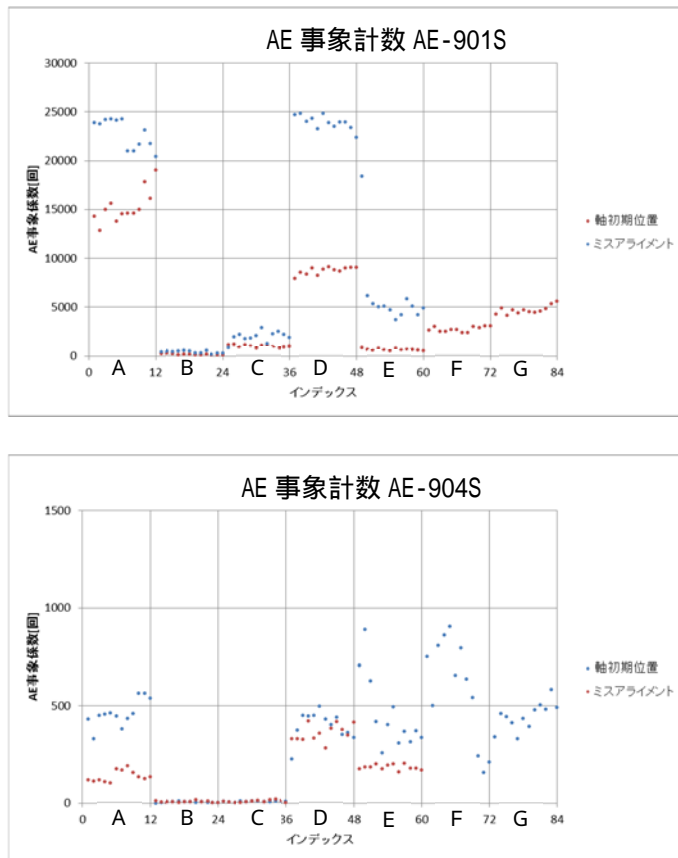


図 4.1.68 試験結果（事象計数）

5) AE データ収集及び分析結果

AE センサを用いて広範囲な診断を行うため、自社設備を活用し新たに陸上でデータ収集した結果、AE 収録システム検証より、以下のことが知見として得た。

- ・ 損傷の進捗及び回転損傷位置の推定が可能であること
- ・ 振動センサより早期に異常の検知が可能なこと
- ・ ポンプ流量とAEの各パラメータに傾向が確認されたこと

ポンプ診断マトリックスの更新及び診断システムの拡張については、変位、振動及び流量センサの代替し、センサ数の削減及びポンプ診断マトリックスの拡張の可能性を確認した。その適応範囲は運転、羽根車、ケーシングリング、軸、軸受、軸・軸継手等である。

適応範囲及びAEパラメータによる診断を行うために、今後は更なるデータ蓄積を行い検証が必要となる。

4.2 メカニカルシール状態診断用基本データの収集と解析

メカニカルシールの状態診断を行うためには、各種センサを用いてメカニカルシール運転時の挙動を把握できるデータを収集、解析し、計測データから運転状態を判定できるアルゴリズムを開発することが必要となる。

今年度は、メカニカルシール状態診断システム開発の第一ステップとして、試験機による回転試験を実施して各種データを収集解析するとともに、製作したデータ収集システムを実船に搭載し、実船運転データの収集を開始している。

4.2.1 メカニカルシール異常運転時のデータの取得、評価

1) 供試シール及び評価試験装置の構成

メカニカルシールの運転データ取得のための回転試験では、供試品として、図 4.2.1 に示す実船のバラストポンプに使用されているシールと同一サイズ、同一型式のメカニカルシールを使用している。また、試験装置は主としてイーグル工業保有の縦型回転試験機と水循環装置を用いて、評価試験を実施した。回転試験装置の外観を図 4.2.2 に示す。



図 4.2.1 供試シール



図 4.2.2 回転試験装置外観

回転試験装置のメカニカルシール取り付け部断面図と配管系統図を図 4.2.3 に示す。

試験装置の回転軸は上下方向に位置しており、シール室を形成するため、メカニカルシールは上下に2ヶ取り付けしているが、各種センサ類は上側シール近傍に設置しやすいため、供試品は上側のメカニカルシールとし、下側のメカニカルシールはダミーシールとして取り扱っている。

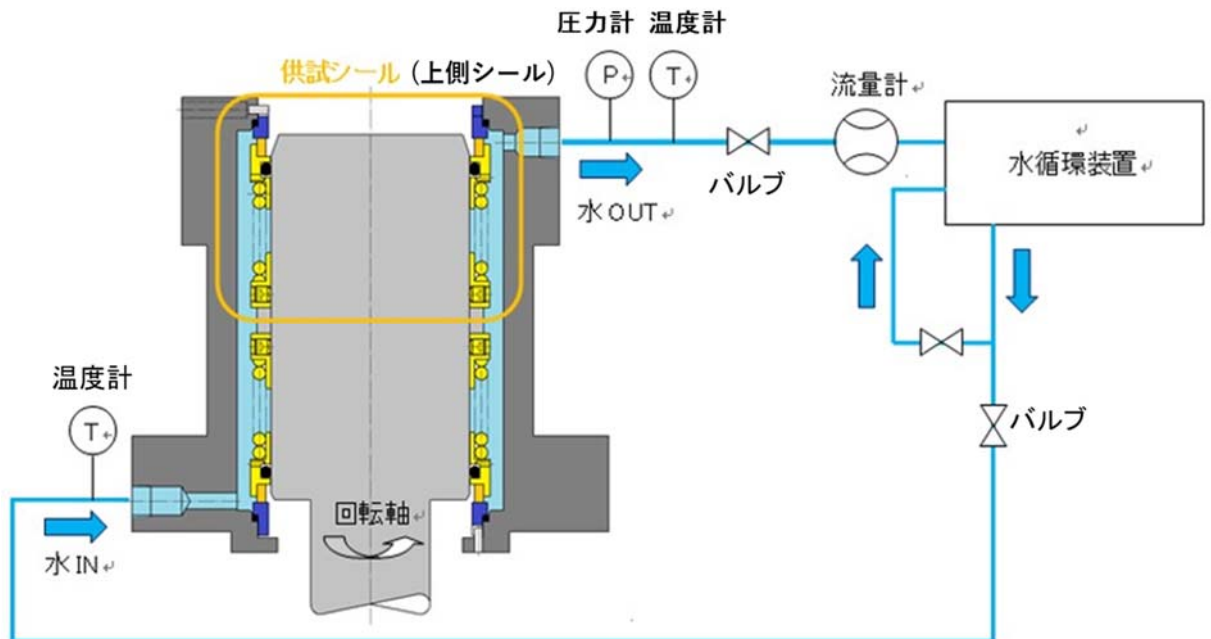


図 4.2.3 メカニカルシール取り付け部断面図及び配管系統図

回転試験に際し、計測するデータは、メカニカルシール固定環であるメイティングリング (M/R) の背面振動、M/R が挿入されている金属製シールカバー (S/C) の振動、各種温度、流体圧力、流量、軸回転数、しゅう動トルクとしている。各種センサ取り付けの模式図を図 4.2.4 に示す。

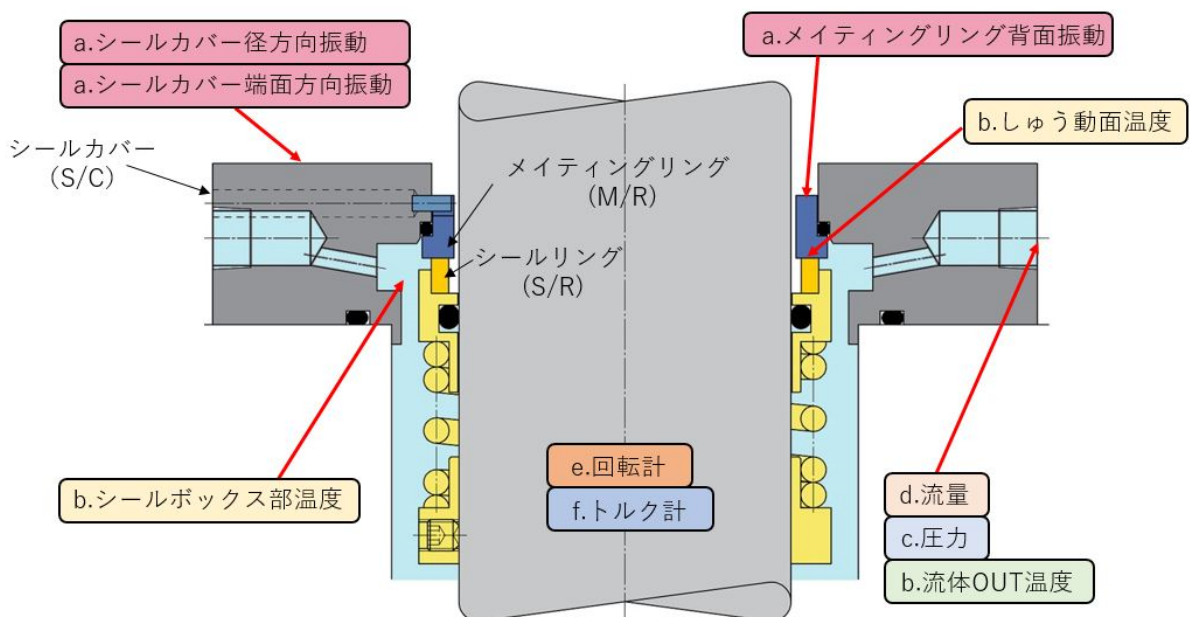


図 4.2.4 供試シール部へのセンサ取り付け模式図

2) 試験条件

メカニカルシール回転試験の正常運転模擬試験に関しては、供試メカニカルシールの仕様範囲から表 4.2.1 に示す試験条件としている。

表 4.2.1 正常運転模擬試験の回転試験条件

流体	水
流体温度	40
流体圧力	0.3 MPaG
回転数	1800 min ⁻¹
流量	11 L/min
試験時間	短時間～300 時間

また、異常運転模擬試験に関しては、図 4.2.5 に示すメカニカルシールの FTA 図より、各種異常要因を再現できるモード試験 7 種を決定している。

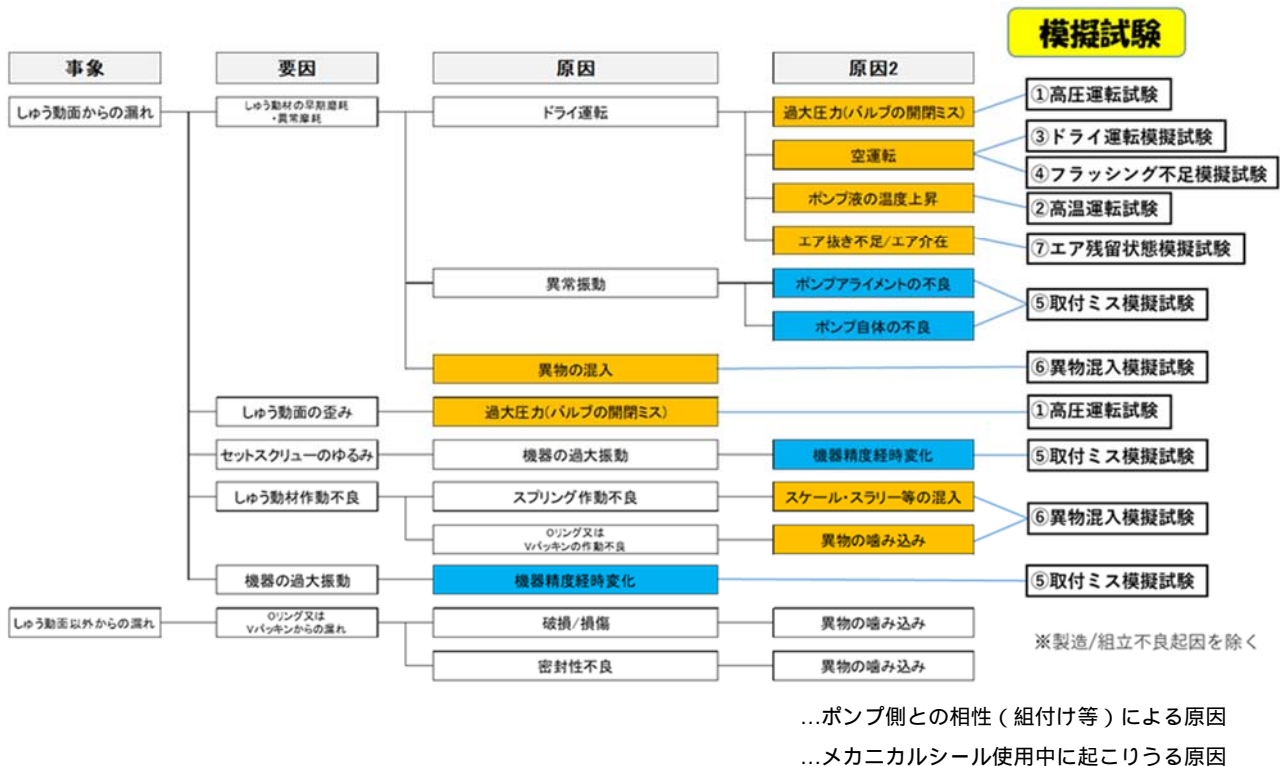


図 4.2.5 供試メカニカルシールの FTA 図

試験は、はじめにそれぞれ別の供試品を用いて、正常運転模擬試験と異常運転模擬試験 8 種 (FTA で決定した 7 種+実機ポンプ試験) を実施している。なお、各模擬試験はそれぞれ 1~3 回実施している。

続いて、運転中に試験条件を正常運転模擬から異常運転模擬に推移させる過渡データ取得試験を行い、その後、長時間の異常運転模擬試験、供試シールに異常を発生させる試験を実施している。回転試験の一覧を表 4.2.2 に示す。

表 4.2.2 回転試験一覧

No.	試験名称	内容
1	正常運転模擬試験	水, 40, 0.3MPaG, 1800min ⁻¹ 条件での基準条件試験
2	異常運転模擬試験 (1) 高圧運転模擬試験 (2) 高温運転模擬試験 (3) ドライ運転模擬試験 (4) フラッシング不足模擬試験 (5) 取付けミス模擬試験 (6) 異物混入模擬試験 (7) エア残留状態模擬試験 (8) 実機ポンプ試験	最高圧力 0.5, 0.7, 0.8MPaG までの試験 最高温度 90 までの試験 流体無し (大気雰囲気) での試験 最低流量 3 L/min までの試験 取付け長ミス、偏心取付け、面傾き取付け試験 スラリー1wt%水での試験 供試品, 試験機異なる 流体 (水) 中にエアを混入した試験 浪速ポンプ製作所 陸上試験装置による試験
3	過渡データ取得試験 (1) 高温運転過渡試験 (2) フラッシング不足過渡試験 (3) 高圧運転過渡試験	基準条件より水温を 80 まで上昇させる試験 基準条件より流量を 5 L/min まで減少させる試験 基準条件より圧力を 0.8MPaG まで上昇させる試験
4	長時間異常運転模擬試験	高圧運転模擬条件の 1 週間試験を 4 回継続
5	シール異常発生試験	シール破損時データ取得のための試験

3) 試験結果 (正常運転模擬試験)

正常運転模擬試験は 3 回実施している。正常運転模擬試験の中で、最も試験時間の長い 300 時間の試験時のシール各部の温度、圧力、回転数、流量、しゅう動トルクの運転データを図 4.2.6 に、試験後の供試メカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.7 に示す。

なお、加速度センサのデータに関しては、以降の試験も含めすべて、解析結果を含めた内容として、次 4.2.2 項の「試作型メカニカルシールデータ収集システムの基本データ解析」に示す。

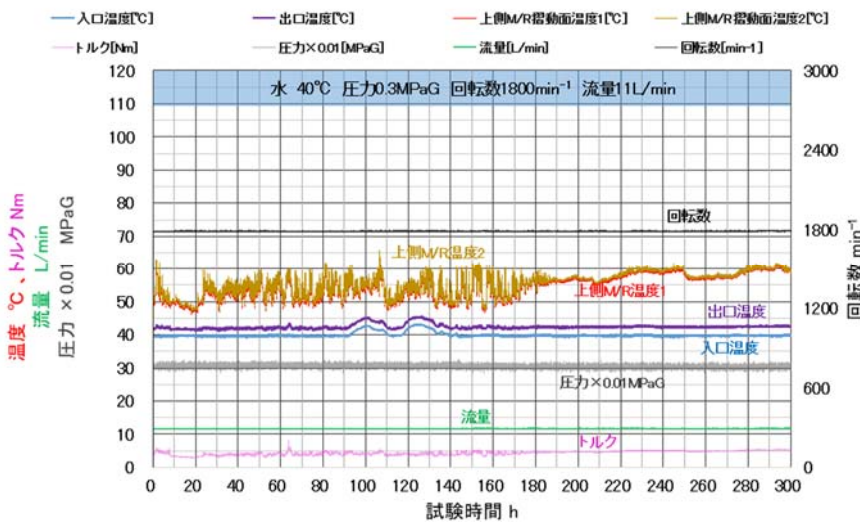


図 4.2.6 正常運転模擬試験の運転データ

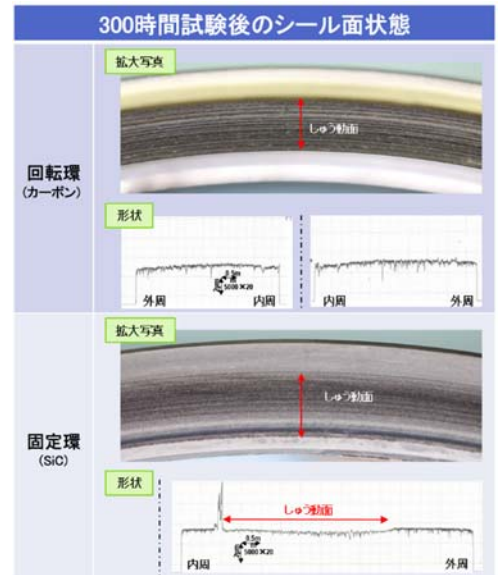


図 4.2.7 試験後シール面状態

正常運転模擬試験では、流体温度 40 に対し、しゅう動面近傍の温度は 47 ~ 62 の範囲に分布していた。また、試験開始より 180 時間までは、しゅう動面温度に若干の変動が認められるが、それ以降は温度変動が小さくなり、安定していた。

試験後のシール面状態は、面荒れや多大な摩耗も発生しておらず良好な結果が得られている。

4) 試験結果（異常運転模擬試験）

高圧運転模擬試験では、正常運転模擬条件の流体圧力 0.3 MPaG に対し、圧力 0.5 MPaG, 0.7 MPaG, 0.8 MPaG での回転試験を各 5~7 時間ずつ継続して行った。

高圧運転模擬試験時の、各圧力でのメカニカルシールのしゅう動面温度とトルクの比較を図 4.2.8 に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.9 に示す。

しゅう動面温度、トルクとも、基準流体圧力 0.3MPaG に対し、流体圧力が高圧の方が高くなっており、特に今回の試験では 0.7MPaG で顕著な変動が観察されている。試験後の面状態では、回転環であるカーボンに深い条痕が発生している。

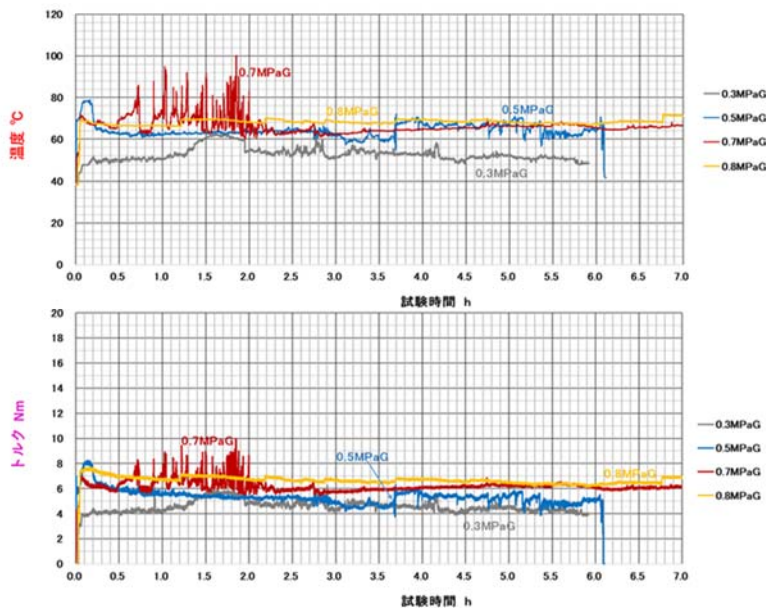


図 4.2.8 高圧運転模擬試験のしゅう動面温度とトルク

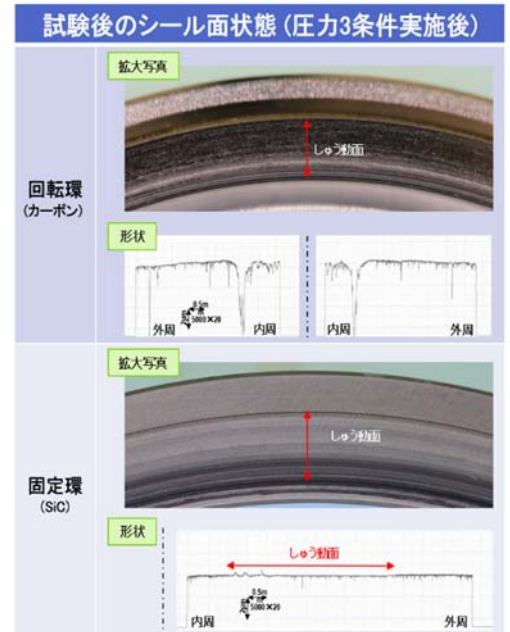


図 4.2.9 試験後シール面状態

次に、流体温度を 90 の高温運転模擬試験の運転データを図 4.2.10 に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.11 に示す。

しゅう動面温度は一時的に変動し、最高で 110 まで上昇しており、試験後のカーボン側しゅう動面には深い条痕が多数本発生している。

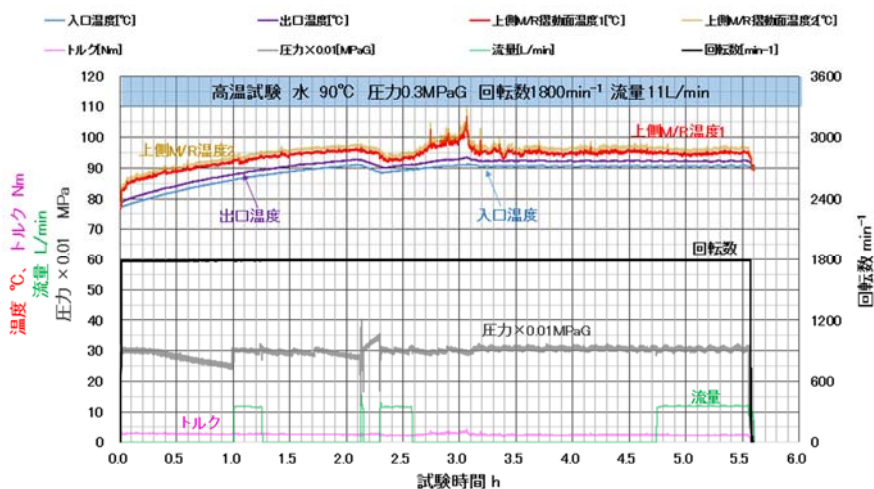


図 4.2.10 高温運転模擬試験の運転データ

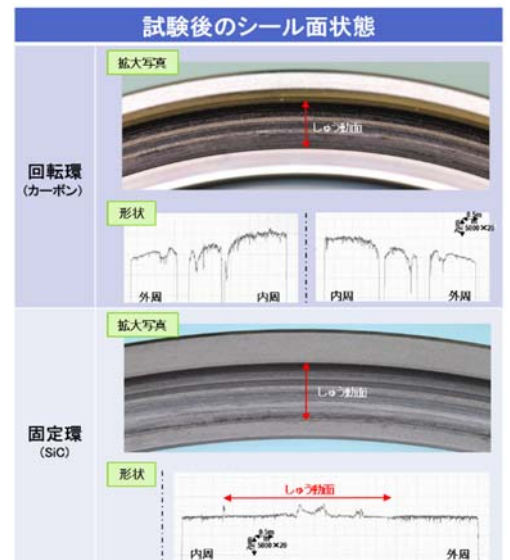


図 4.2.11 試験後シール面状態

ドライ運転模擬試験は、上側の供試シールのみを試験機に取り付け、大気雰囲気（大気圧）で試験を行っている。なお、回転後短時間でしゅう動面温度が200 を超えたため、試験は数分で停止している。運転データを図 4.2.12 に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.13 に示す。短時間のしゅう動試験であるが、カーボン回転環側のしゅう動面の面荒れが激しい結果となった。

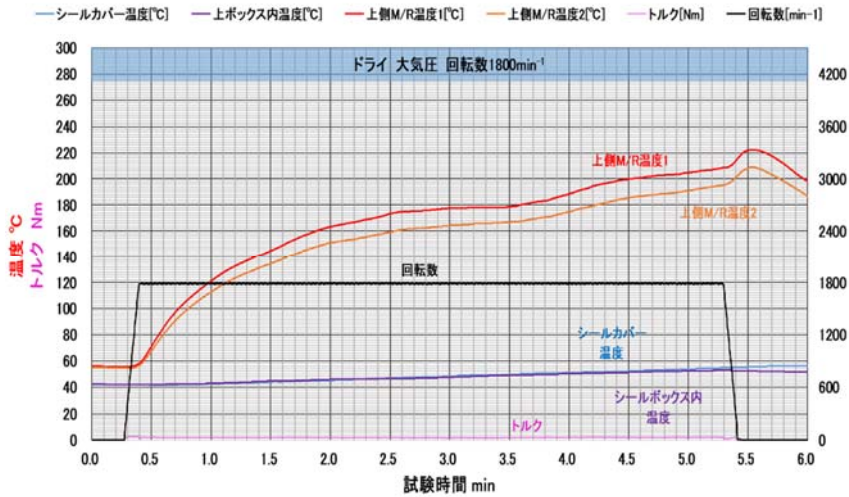


図 4.2.12 ドライ運転模擬試験の運転データ

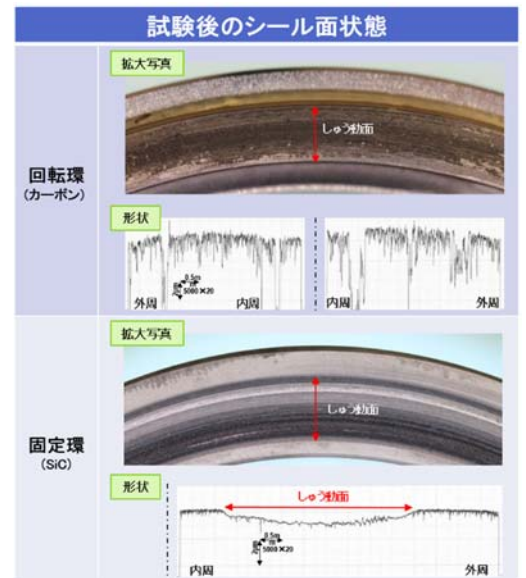


図 4.2.13 試験後シール面状態

フラッシング不足運転模擬試験は、シール部を循環するフラッシング流体（水）の流量を11 8 5 3 L/minと変化させた試験である。流量を11~3 L/min まで減少させた運転データを図 4.2.14 に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.15 に示す。

流量の減少に伴い、流体の出口温度及びしゅう動面温度ともわずかに上昇しているが、試験後の面状態は良好であった。

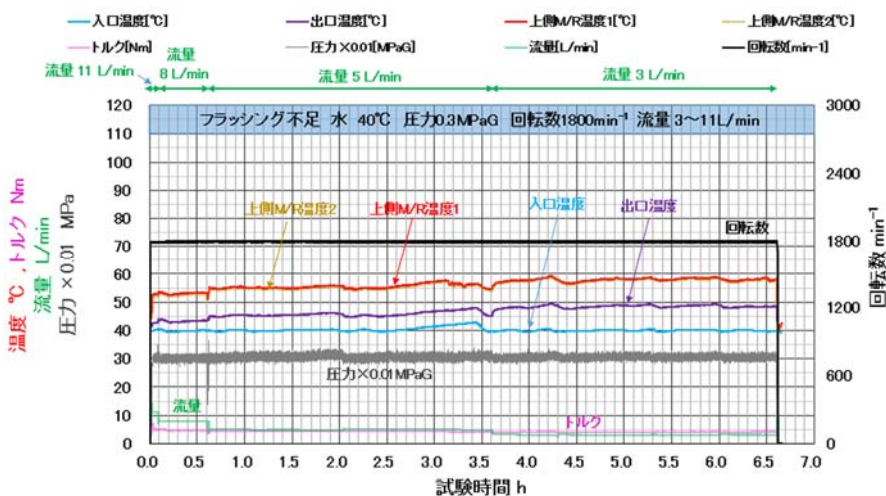


図 4.2.14 フラッシング不足運転模擬試験の運転データ

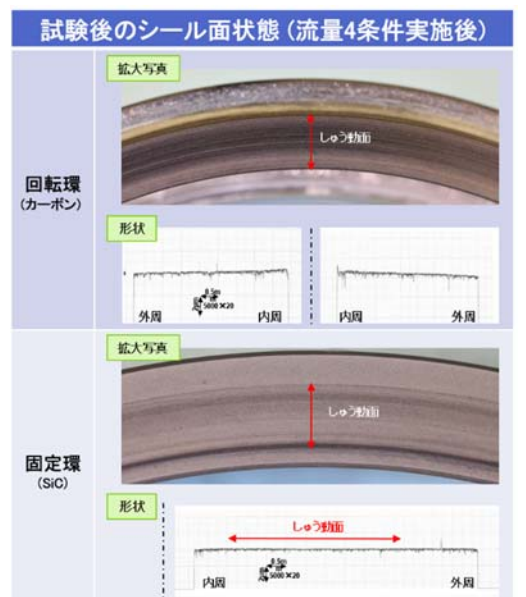


図 4.2.15 試験後シール面状態

取り付けミス模擬試験は、シール組み込み時の取り付け長の設定ミス、軸偏心大、シール固定側しゅう動材の取り付け不良の3種のパターンを想定し、図4.2.16に示す3種の試験を行った。

結果として、いずれの試験でも、計測された温度、トルクのデータは、正常運転試験時のデータと大きな相違はなく、試験後の面状態にも異常は発生していない結果となった。

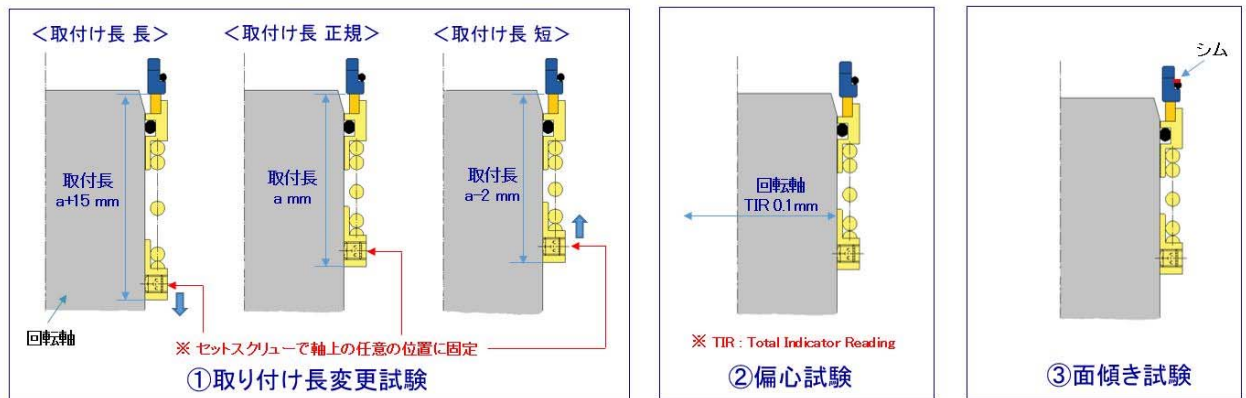


図 4.2.16 取り付けミス模擬試験

異物混入模擬試験に関しては、従来の試験と同一回転試験装置及び水循環装置での評価が困難であったため、別回転試験装置（横型）を用い、形式は同じであるがサイズの異なる供試品で試験を行った。また、流体は循環ではなく封入とし、ガス加圧による試験を行っている。封入であるため、しゅう動発熱や攪拌熱により、液温が容易に上昇してしまうため、圧力及び回転数条件は他の異常運転模擬試験とは大きく異なる数値としている。

異物混入模擬試験のシール取り付け部断面図を図4.2.17に示す。

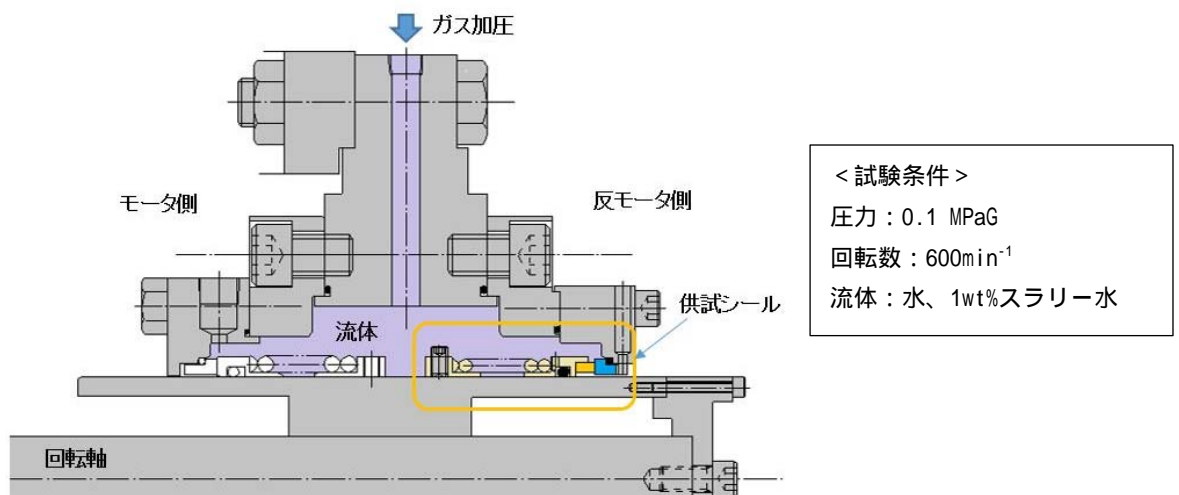


図 4.2.17 異物混入模擬試験シール取り付け部断面図

異物混入模擬試験では、比較のために、はじめに水条件での回転試験を行った後、1wt%の異物を水中に加えたスラリー水に入れ替えた試験を行っている。なお、混入させた異物はJIS試験用粉体8種を使用している。運転中の各種データを図4.2.18に、異物混入試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図4.2.19に示す。

水試験よりも、スラリー水試験の方が、明らかに流体及びしゅう動面温度が高く、試験後のしゅう動面にも面荒れが発生するという結果が得られている。

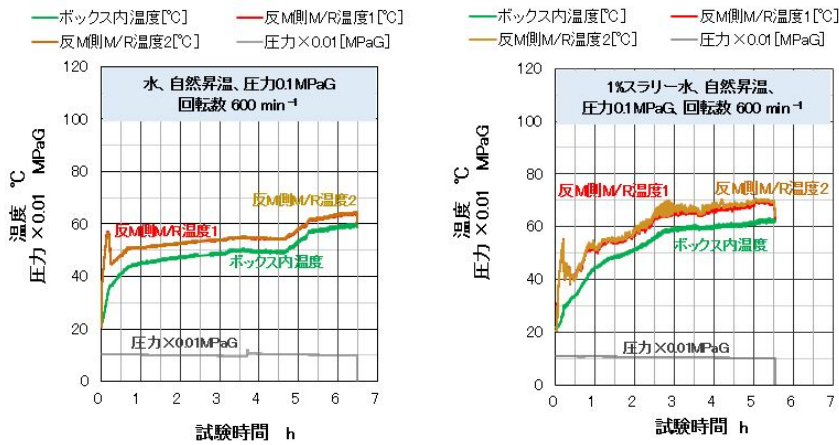


図 4.2.18 異物混入試験の運転データ

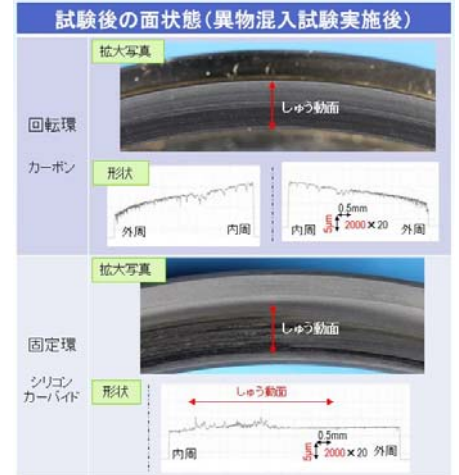


図 4.2.19 試験後シール面状態

エア残留状態模擬試験は、シール部を循環する水(11 L/min)配管中に、シールボックス入口直前で空気を1 L/minほど不定期に混入させて水+空気として流すという方法で行っている。

エア残留状態模擬試験の運転データを図4.2.20に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図4.2.21に示す。

空気の混入により、シールしゅう動部の潤滑が悪化し、しゅう動面温度やトルクの上昇が発生するのではと考えたが、結果としてしゅう動面温度やトルク上昇はほとんど観察されず、試験後のシールしゅう動面にも目立った損傷は発生していない。

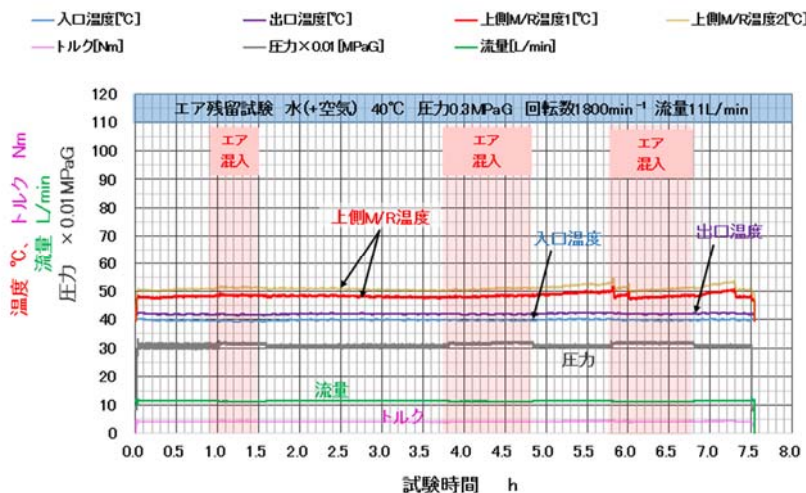


図 4.2.20 エア残留模擬試験の運転データ

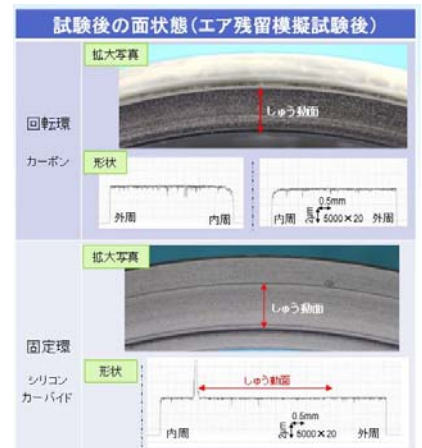


図 4.2.21 試験後シール面状態

実機ポンプ試験は、浪速ポンプ福井事業所のポンプ試験装置で行った試験であり、実際のバラストポンプと同型式の試験装置にメカニカルシールを取り付け、イーグル工業より持ち込んだ計測装置で、各種温度、圧力、振動等の計測を行っている。実機ポンプ試験の試験条件を表 4.2.3 に示す。

表 4.2.3 実機ポンプ試験 試験条件

試験内容	流体	流体温度	圧力 MPaG	回転数 min ⁻¹	備考
通常運転	水	自然昇温	0.25	1150	
閉め切り運転	水	自然昇温	実測による	1150	電動弁全閉
発停運転	水	自然昇温	0.25	1150	モータ ON / OFF
キャビテーション運転	水	自然昇温	吸い込み側-0.07	1150	吸い込み弁閉

計測例として、シールカバーに取り付けた加速度センサによる軸方向（Z方向）振動の周波数分析結果（3次元表示）を図 4.2.22 に示す。通常運転から閉め切り運転に変わることにより、振動の絶対値が大きくなり、周波数帯も広がっていることが明らかである。

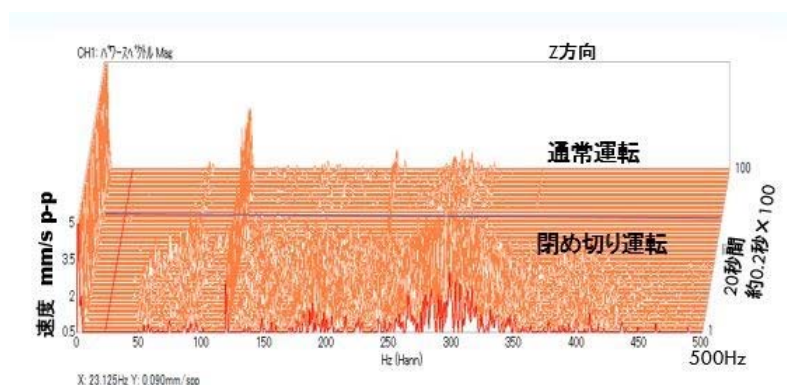


図 4.2.22 実機ポンプ試験 軸方向振動の計測例

5) 試験結果（過渡データ取得試験）

本項の試験は、これまでの正常運転模擬試験、異常運転模擬試験と異なり、一つの試験の中で試験条件を正常運転条件から異常運転条件に変化させた試験であり、正常から異常への過渡状態のデータ取得を目的としている。

本試験は、試験中に運転条件を変化させる必要があるため、異常運転モードの中から、高温運転、フラッシング不足運転、高圧運転の3種を選定している。

過渡データ取得試験の、高温運転過渡試験の運転データを図 4.2.23 に、試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.24 に示す。

また、フラッシング不足過渡試験の運転データと試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.25 と図 4.2.26 に、高圧運転過渡試験の運転データと試験後のメカニカルシールのしゅう動面の写真及び表面粗さデータを図 4.2.27 と図 4.2.28 に示す。

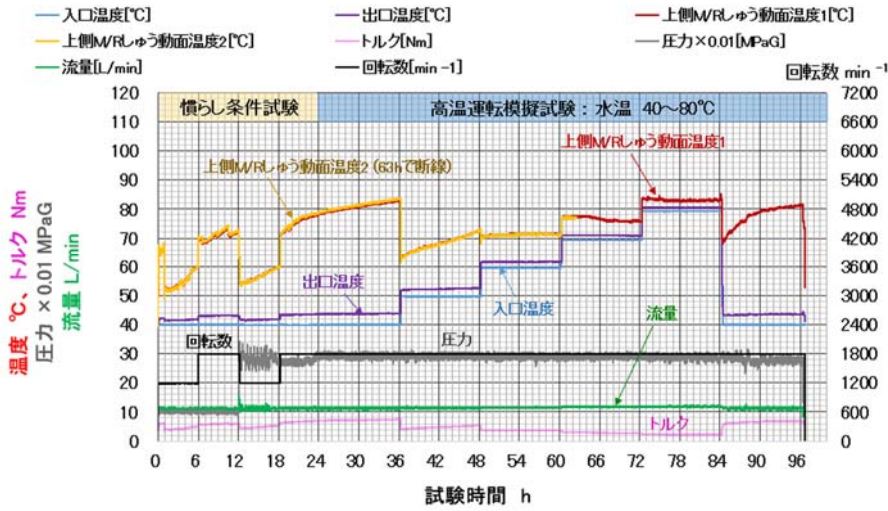


図 4.2.23 高温運転過渡試験の運転データ

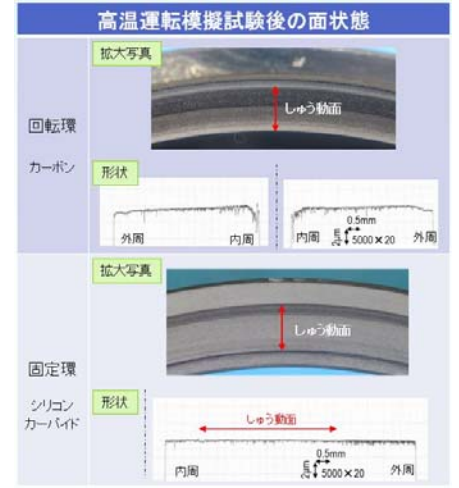


図 4.2.24 試験後シール面状態

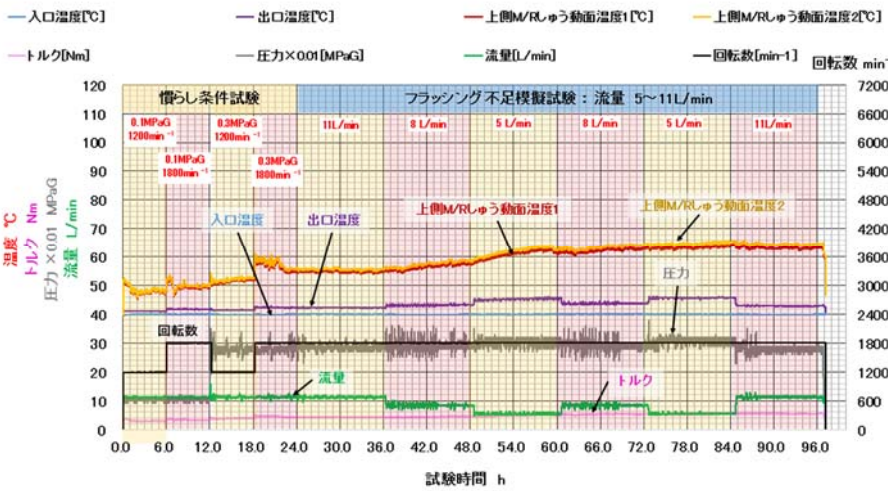


図 4.2.25 フラッシング不足過渡試験の運転データ

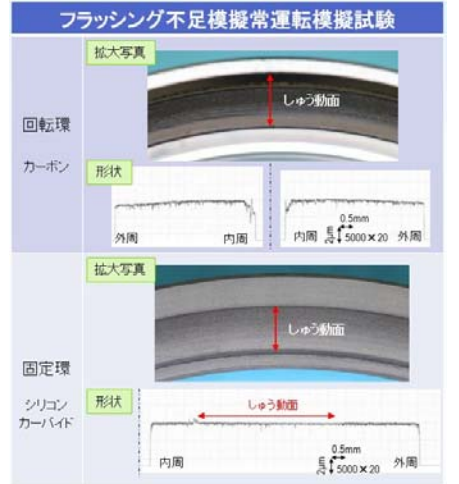


図 4.2.26 試験後シール面状態

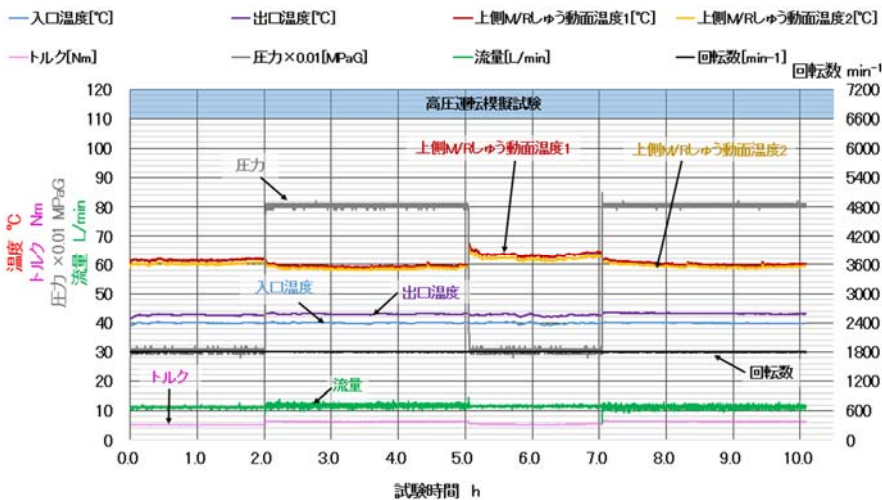


図 4.2.27 高圧運転過渡試験の運転データ（一部）

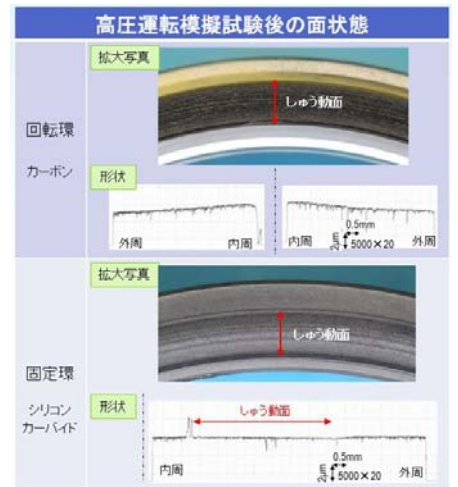


図 4.2.28 試験後シール面状態

3種類の過渡データ取得試験を行ったが、今回実施した試験では、流体温度を高温にする、フラッシング流量を減少させる、流体圧力を高圧にする、のいずれの条件変更においても、想定されたしゅう動面温度やトルクの上昇や変動発生が起きておらず、試験後の面状態には目立った異常はみられていない。

6) 試験結果（長時間異常運転模擬試験）

異常模擬運転、及び過渡データ取得試験は、比較的短時間の試験である。

そこで、続いて、長時間の異常運転模擬試験を行うこととした。異常条件としては高圧（0.8MPaG）を選定し、表4.2.4に示す運転条件で、初期慣らし条件試験を1日実施後、92時間の試験を実施し、試験後は一旦供試シールを分解してシール状況を確認後、再度シールを組み込み直して、再び92時間試験を行う、を4回繰り返している。

表 4.2.4 試験条件

試験の順序 →

		1. 初期慣らし条件試験		2. 高圧連続試験		3. 高圧連続試験		4. 高圧連続試験		5. 高圧連続試験	
		2-1 基準条件	2-2 高圧条件	3-1 基準条件	3-2 高圧条件	4-1 基準条件	4-2 高圧条件	5-1 基準条件	5-2 高圧条件		
試験条件	流体	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水
	圧力(MPaG)	0.1, 0.3	0.3	0.8	0.3	0.8	0.3	0.8	0.3	0.8	0.8
	回転数(min ⁻¹)	1200, 1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
	温度(°C)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	流量(L/min)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	時間(h)	6 h × 4条件	約 20	72	約 20	72	約 20	72	約 20	72	72

シール分解、面状態確認

長時間異常運転模擬試験の1回目と4回目の運転データ比較を図4.2.29に、試験後面状態の比較を図4.2.30に示す。

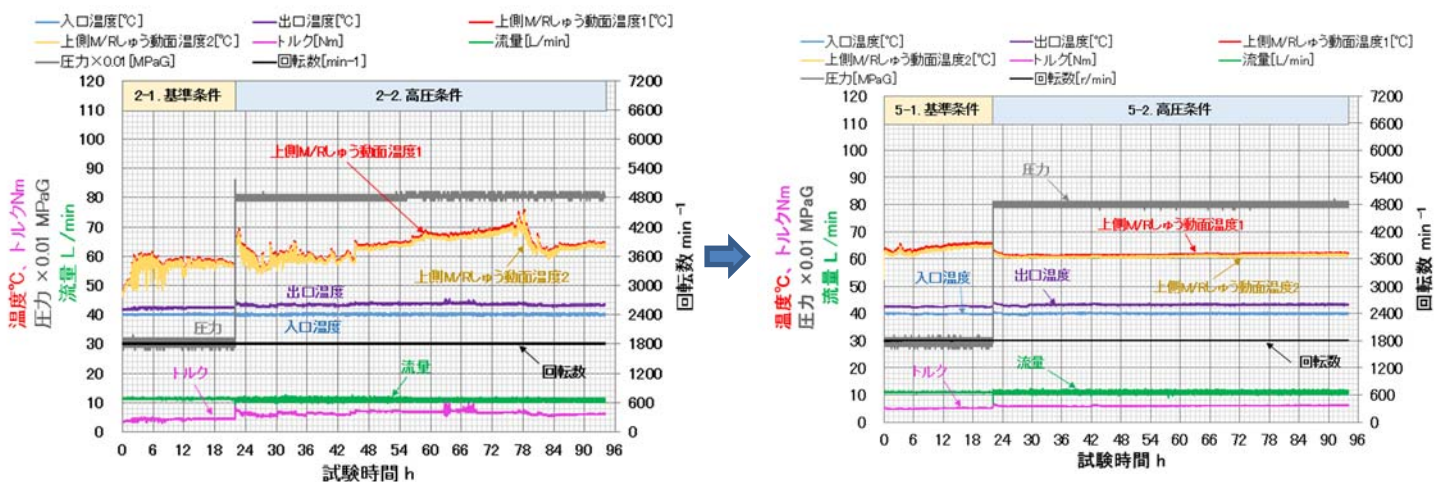


図 4.2.29 長時間異常運転模擬試験の運転データ（1回目と4回目のみ）

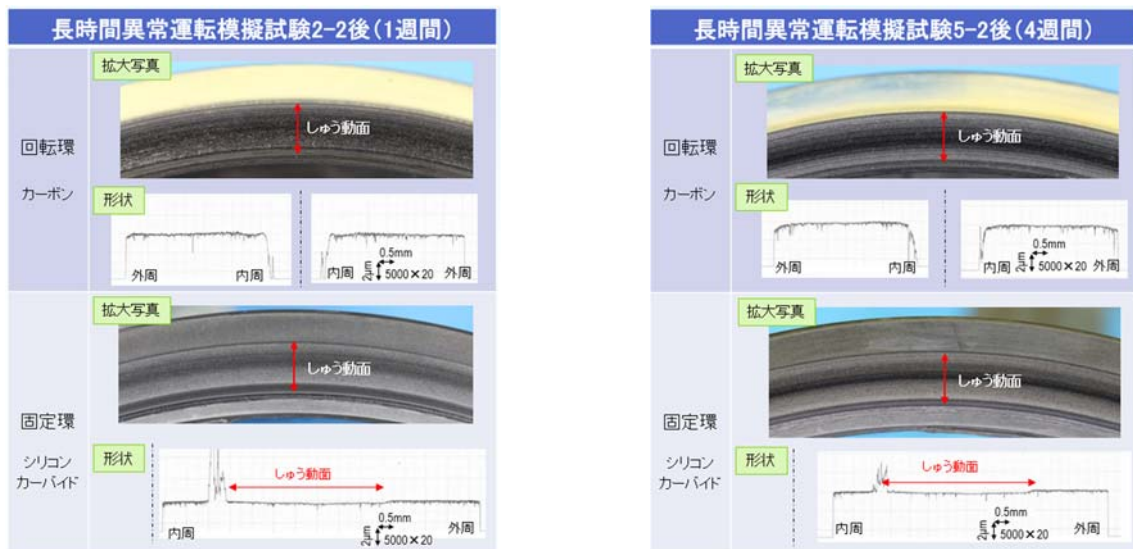


図 4.2.30 長時間異常運転模擬試験後の面状態（1 回目後と 4 回目後のみ）

本試験では、高圧という異常運転模擬条件試験 92 時間を 4 回繰り返すことにより、徐々にシールしゅう動面の損傷が進行し、それに伴い計測されるしゅう動面温度やトルクも高くなる、あるいは不安定になると想定していたが、実際は 1 回目が最も不安定で、4 回目の計測データは安定しており、しゅう動面にも期待したような損傷は発生していなかった。

4.2.2 試作型メカニカルシール状態診断システムの基本データ解析及びソフトウェア製作
 前項では、主に社内試験に用いた設備について記載したが、本項では社内試験設備に搭載した設備をベースに作製した実船搭載の試作型メカニカルシール状態診断システムについて記載する。

1) 試作型メカニカルシール状態診断システムについて

実船エンジンルームに設置したメカニカルシールセンサデータ収録用 P C (以降、データ収録用 P C) とエンジンコントロールルームでデータ収録用 P C の管理をするシステム管理 P C の 2 台構成となっている。図 4.2.31 に装置構成、図 4.2.32 にソフトウェア機能図を示す。

なお、社内評価システムではポンプ未接続のため、太字で記述したデータ収録用 P C 関連のみでデータ収集する。

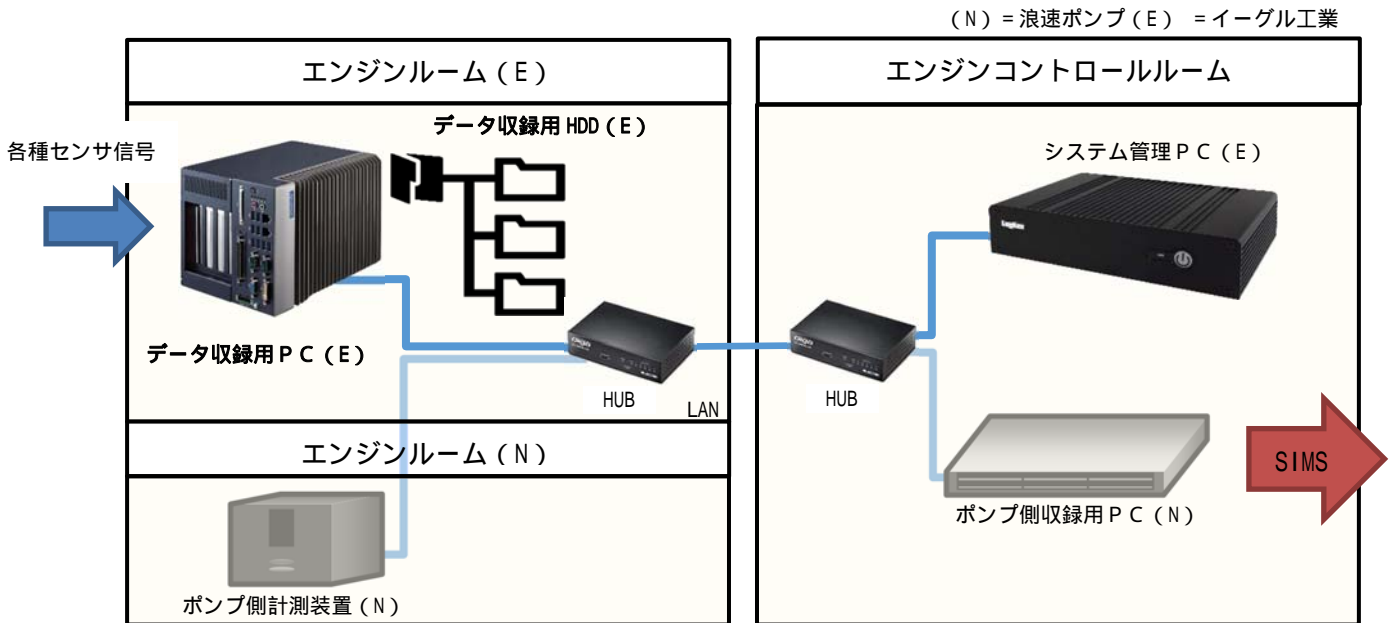


図 4.2.31 装置構成

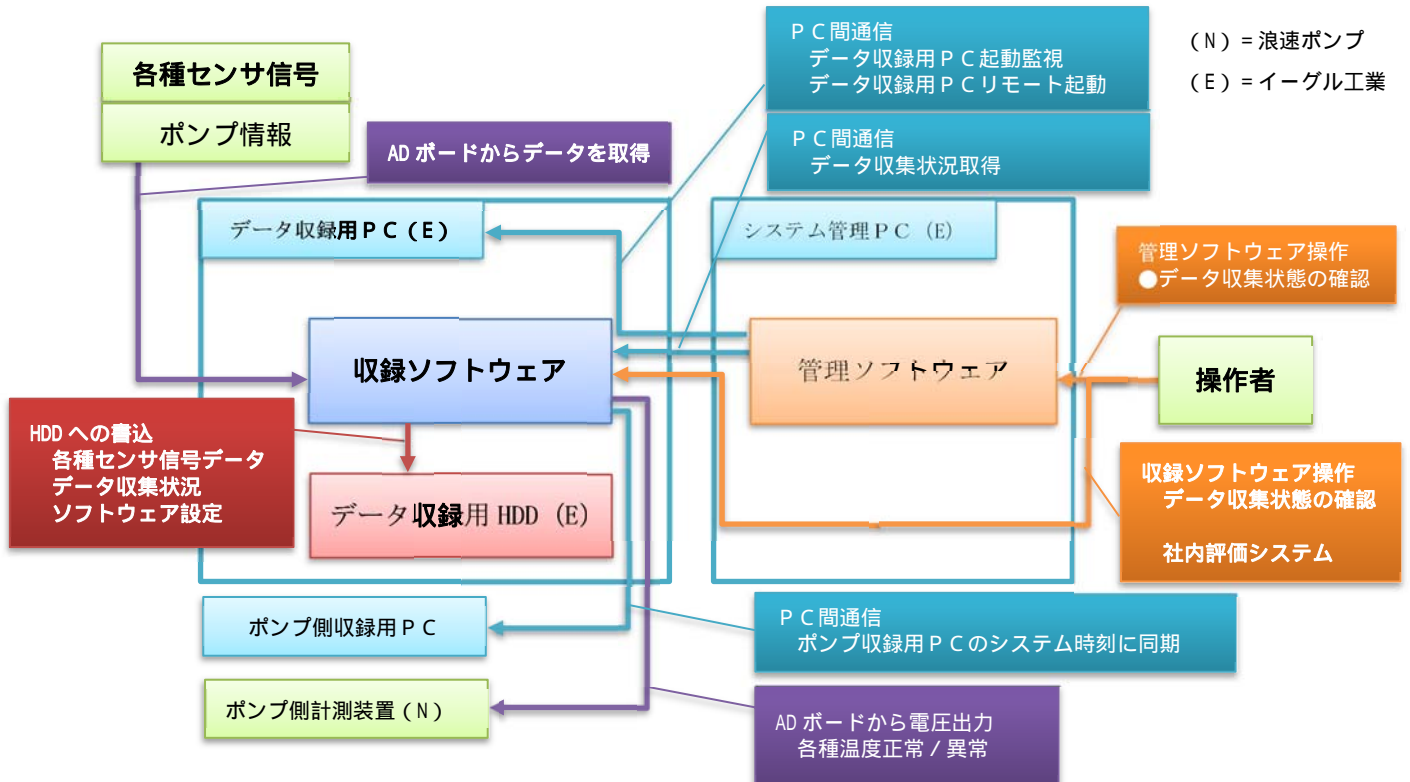


図 4.2.32 ソフトウェア機能図

2) データ収録用 P C

データ収録用 P C 上で起動する収録ソフトウェアについて、以下に示す。

収録ソフトウェア機能概要

- a . 各種センサの信号データの収集と、H D D へ記録
メカニカルシールの各種センサ表 4.2.16 参照と、ポンプ情報 (モータ電流・吐出 / 吸込揚程) 表 4.1.3 参照を収集し、H D D へ記録する。
- b . ポンプ稼働状況の監視
ポンプのモータ電流でポンプ稼働状況を監視し、非稼働中のデータ保存を制限する。
- c . ポンプ側収録用 P C との時刻合わせ
ログデータの整合性をとるため、ポンプ稼働検知時にポンプ側収録用 P C のシステム時刻に合わせる。
- d . 各種温度状態をポンプ側収録用 P C 経由でメール配信
各種温度にしきい値を設け正常 / 異常状態を電圧値としてポンプ側収録用 P C へ出力し、ポンプ側データと共にメールで配信する。

社内評価システムでは、ポンプ側には接続しないため、a のポンプ情報の収集と b、c、d については実施しない。




収録ソフトウェア機能一覧



メカニカルシールセンサデータ収録ソフトの画面表示される機能一覧を表 4.2.5 に示す。



図 4.2.33 ソフトウェア画面

表 4.2.5 収録ソフトウェア機能一覧

	機能名	機能説明																					
①	8CH 信号波形グラフ	<ul style="list-style-type: none"> 下記センサ出力信号波形を同時に表示する。 サンプリング周波数 10kHz で収集し、2 秒間隔で画面更新する。 <table border="1" data-bbox="914 282 1390 618"> <tr><td>CH1</td><td>加速度 X 軸</td></tr> <tr><td>CH2</td><td>加速度 Y 軸</td></tr> <tr><td>CH3</td><td>加速度 Z 軸</td></tr> <tr><td>CH4</td><td>モータ電流</td><td>ポンプ信号</td></tr> <tr><td>CH5</td><td>吐出揚程</td><td>ポンプ信号</td></tr> <tr><td>CH6</td><td>吸込揚程</td><td>ポンプ信号</td></tr> <tr><td>CH7</td><td>空き</td><td></td></tr> <tr><td>CH8</td><td>空き</td><td></td></tr> </table> <p style="text-align: center;">社内評価システムではポンプ信号とは未接続</p>	CH1	加速度 X 軸	CH2	加速度 Y 軸	CH3	加速度 Z 軸	CH4	モータ電流	ポンプ信号	CH5	吐出揚程	ポンプ信号	CH6	吸込揚程	ポンプ信号	CH7	空き		CH8	空き	
CH1	加速度 X 軸																						
CH2	加速度 Y 軸																						
CH3	加速度 Z 軸																						
CH4	モータ電流	ポンプ信号																					
CH5	吐出揚程	ポンプ信号																					
CH6	吸込揚程	ポンプ信号																					
CH7	空き																						
CH8	空き																						
②	8CH 信号電圧表示 / 選択機能	<ul style="list-style-type: none"> 一定間隔で取得した電圧値を表示する。  <ul style="list-style-type: none"> 赤枠数字をクリックしてチャンネルを指定する。  <ul style="list-style-type: none"> モータ電流しきい値を表示する。 (現状 : 1.5V に設定)  <p style="text-align: center;">社内評価システムでは未実施</p>																					
③	指定 1CH 信号波形グラフ	<ul style="list-style-type: none"> にて指定したチャンネルの信号波形を表示する。 																					
④	指定 1CH F F T 波形グラフ	<ul style="list-style-type: none"> で指定したチャンネルの FFT 波形を表示する。 																					
⑤	A E センサ信号波形グラフ	<ul style="list-style-type: none"> AE センサの信号波形を表示する。 サンプリング周波数 2MHz で収集し、1 秒間隔で画面更新する。 																					
⑥	A E センサ F F T 波形グラフ	<ul style="list-style-type: none"> AE センサの FFT 波形を表示する。 																					
⑦	4CH 温度表示	<ul style="list-style-type: none"> 下記 4 カ所での温度を表示する。 200ms 間隔で収集し、画面更新する。 <table border="1" data-bbox="920 1664 1334 1832"> <tr><td>CH1</td><td>シール (シース無)</td></tr> <tr><td>CH2</td><td>シールカバー (水温)</td></tr> <tr><td>CH3</td><td>シール (シース有)</td></tr> <tr><td>CH4</td><td>測定 BOX (気温)</td></tr> </table>	CH1	シール (シース無)	CH2	シールカバー (水温)	CH3	シール (シース有)	CH4	測定 BOX (気温)													
CH1	シール (シース無)																						
CH2	シールカバー (水温)																						
CH3	シール (シース有)																						
CH4	測定 BOX (気温)																						

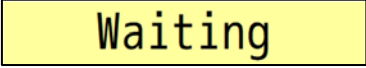
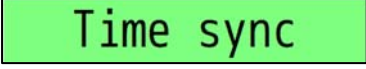
		<ul style="list-style-type: none"> ・規定しきい値以上の温度の場合、「」で表示し、対応する電圧を出力する。 (現状：CH1～CH3が80、CH4が50に設定)  <p>社内評価システムでは未実施</p>
⑧	4CH 温度グラフ	<ul style="list-style-type: none"> ・4CH分を直近1時間表示する。
⑨	データ収集状態表示	<ul style="list-style-type: none"> ・モータ電流値により状態移行した際表示を更新する。
⑩	HDD 残容量表示	<ul style="list-style-type: none"> ・E/Fドライブそれぞれ3TBの残容量を表示する。 Eの容量が一杯になると自動的にFドライブに移行し、Fドライブも一杯になると収録を停止する。

データ収集状態の遷移について

画面上表示されるデータ収集状態の遷移について表4.2.6で示す。

社内評価システムではモータ電流を接続していないため、画面上の開始/停止ボタンで状態を遷移させる。

表 4.2.6 データ収集状態の遷移

	状態	処理内容
①	待機中 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 遷移 ⑤ ① 必ず取込停止状態から遷移する。 ■ 動作内容 <ul style="list-style-type: none"> ・ログフォルダ(日時フォルダ)を作成する。 ・AEセンサ信号データ以外はすべて収録を実施する。
②	時刻同期 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 遷移 ① ⑤ ② モータ電流の電圧値がしきい値を超えた場合に遷移する。 現在の設定しきい値は1.2[V] ■ 動作内容 <ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ側収録用PCのシステム時刻同期実施 ※ ポンプ側収録用PCが立ち上がっていない場合は実施しない。 ・ログフォルダ(日時フォルダ)を作成する。 ・AEセンサ信号データ以外はすべて収録を実施する。

③	<p>動作中</p> <div style="border: 1px solid black; background-color: #90EE90; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 10px auto;">In operation</div>	<p>■ 遷移 ② ③ ④ ③</p> <p>モータ電流の電圧値がしきい値を超えた場合に遷移する。</p> <p>現在の設定しきい値は 1.5[V]</p> <p>■ 動作内容</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ AE センサ信号データの取得も実施する。
④	<p>終了中</p> <div style="border: 1px solid black; background-color: #FFFF00; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 10px auto;">End processing</div>	<p>■ 遷移 ③ ④</p> <p>モータ電流の電圧値がしきい値以下で遷移する。</p> <p>現在の設定しきい値は 1.5[V]</p> <p>■ 動作内容</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 一定期間モータ電流を監視し停止するかを確認する。 現在の設定は 60[Sec]
⑤	<p>取込停止</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 10px auto;">Stopped</div>	<p>■ 遷移 ④ ⑤</p> <p>一定期間モータ電流がしきい値以下で遷移する。</p> <p>現在の設定は 60[Sec]</p> <p>■ 動作内容</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ すべての取込を停止する。

3) システム管理 P C

システム管理 P C 上で起動する管理ソフトウェアについて示す。

管理ソフトウェア機能概要

- ・ データ収録用 P C の起動状態監視
定期的にデータ収録用 P C の起動状態を監視し、停電等外的な要因でパソコンが落ちていた際にリモート起動させる。
- ・ 収録ソフトウェアのデータ収集状態表示
定期的に収録ソフトウェアのデータ収集状態を取得し画面表示を行う。また、収集状態の更新を監視し更新が停止していた場合、パソコンを再起動させる。
メカニカルシール状態診断機能が実装された際は、ここに状態診断結果を表示する。

管理ソフトウェア画面内容

管理ソフトウェアの画面表示内容を図 4.2.34、収録ソフトウェア機能一覧を表 4.2.7 に示す。

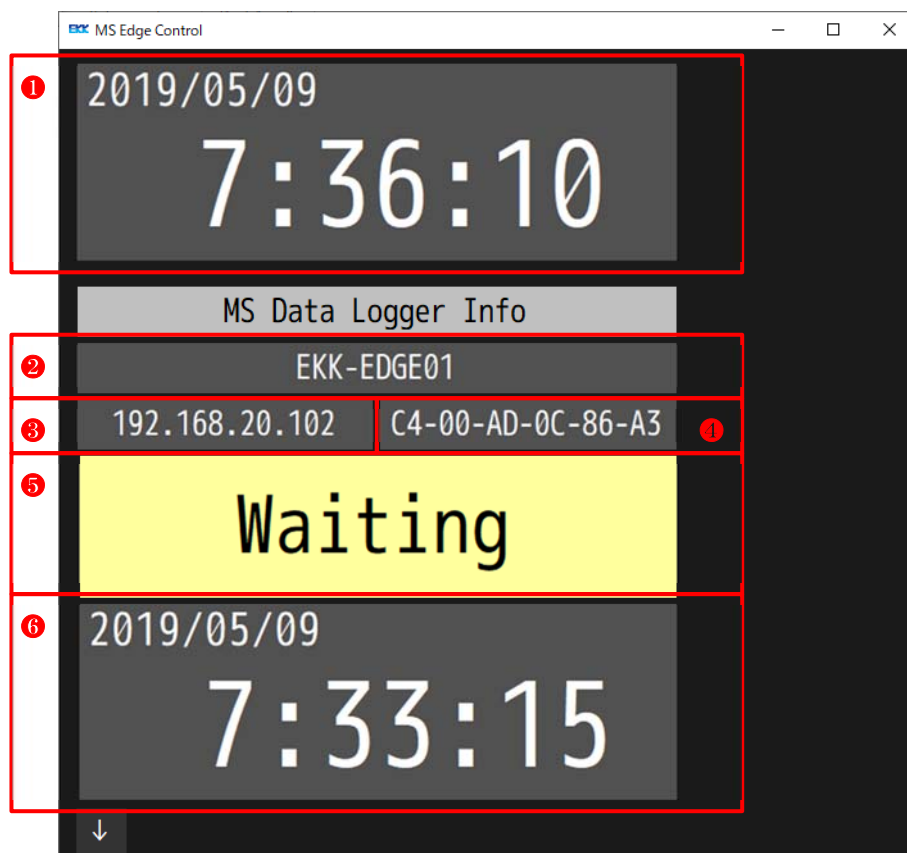


図 4.2.34 管理ソフトウェア画面

表 4.2.7 収録ソフトウェア機能一覧

	機能名	機能説明
①	現在の時刻	・システム管理 P C の現在の時刻を表示する。
②	パソコン名表示	・データ収録用 P C 名を表示する。
③	IP アドレス表示	・データ収録用 P C の IP アドレスを表示する。 パソコンの起動監視に使用
④	MAC アドレス表示	・データ収録用 P C の MAC アドレスを表示する。 リモートでパソコンを起動するのに使用
⑤	データ収集状態表示	・収録ソフトウェアのデータ収集状態を一定間隔で取得し表示する。
⑥	データ収集状態更新日時	・収録ソフトウェアがデータ収集状態を更した日時を表示する。

4) 異常運転模擬試験の振動データ解析 (表 4.2.2 項 1. ~ 項 2.) データの解析

縦型回転試験機で実施した異常運転模擬試験では、各種センサを取付けてデータを収集しているが、異常運転時のセンサデータの挙動により、振動データの有効性に着目して解析する事とした。

FFT 解析により、振動データはメカニカルシールの機械的挙動を表していると考えられる (加速度センサ Z 軸 51200 サンプル/秒) ので、表 4.2.8 にデータを解析した正常・異常試験項目 (加速度センサ位置...M/R:しゅう動面背面、S/C:シールカバー端面方向振動) と、表 4.2.9 にデータ解析に用いた 9 種類の特徴量 (1 秒ごとに算出) から有効なパラメータを抽出する。

表 4.2.8 データを解析した正常・異常試験項目

試験種類	試験略称	測定時間 [hour]	加速度センサ位置	
			M/R	S/C
正常試験模擬試験 (300 時間)	ok300h	219.2	○	○
正常試験模擬試験 (No13)	okno13	3.6	○	○
高圧運転模擬試験 (0.5MPaG)	高圧 0.5	5.3	○	○
高圧運転模擬試験 (0.7MPaG)	高圧 0.7	6.3	○	○
高圧運転模擬試験 (0.8MPaG)	高圧 0.8	6.3	○	○
高温運転模擬試験 (No1)	高温 1	3.1	-	○
高温運転模擬試験 (No2)	高温 2	4.6	-	○
高温運転模擬試験 (No3)	高温 3	5.0	-	○
ドライ運転模擬試験 (No2)	ドライ 2	0.9	-	○
ドライ試験運転模擬 (No3)	ドライ 3	0.6	-	○
フラッシング不足模擬試験 (No1)	フラ不足 1	6.3	○	○
フラッシング不足模擬試験 (No2)	フラ不足 2	6.0	○	○
取付けミス模擬試験 (取付け長 長)	取付長 3	5.8	○	○
取付けミス模擬試験 (取付け長 短)	取付長 20	5.5	○	○
取付けミス模擬試験 (偏心 No1)	偏心 1	6.3	○	○
取付けミス模擬試験 (偏心 No2)	偏心 2	2.7	○	○
取付けミス模擬試験 (面傾き No1)	傾斜 1	0.7	○	○
取付けミス模擬試験 (面傾き No2)	傾斜 2	5.7	○	○
エア残留状態模擬試験 (エア No1)	エア 1	2.4	○	○
エア残留状態模擬試験 (エア No2)	エア 2	4.3	○	○
エア残留状態模擬試験 (エア No3)	エア 3	0.1	○	○

機材都合で M/R 加速度センサ未設置

表 4.2.9 データ解析に用いた特徴量

特徴量名称	説明
Ave	平均値 (1 秒間 51200 サンプルで算出 以下同様)
Min	最小値
Max	最大値
Sigma	標準偏差
Skew	歪度
Kurtosis	尖度
FFT30	FFT スペクトル 30Hz の振幅
EKx	弊社手法により抽出した特徴量 x
EKy	弊社手法により抽出した特徴量 y

図 4.2.35 ~ 図 4.2.41 に各試験における特徴量(Min,Max を除く)のばらつきを箱ひげ図で示す。

(図 4.2.35 Ave、図 4.2.36 Sigma、図 4.2.37 Skew、図 4.2.38 Kurtosis、
図 4.2.39 FFT30、図 4.2.40 EKx、図 4.2.41 EKy)

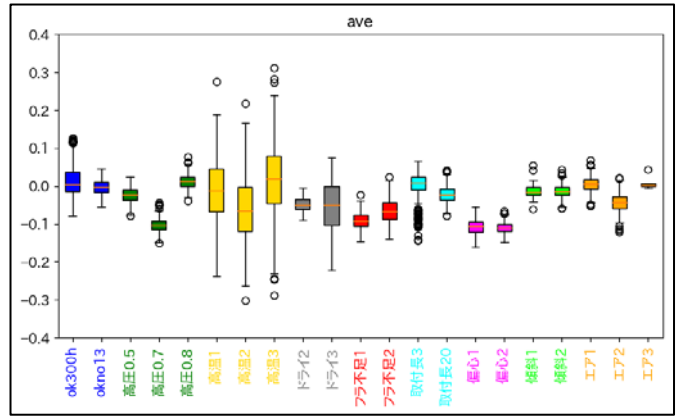
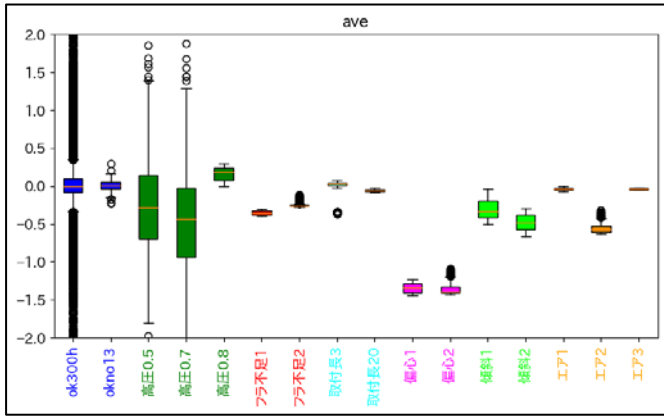


図 4.2.35 特徴量 Ave の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

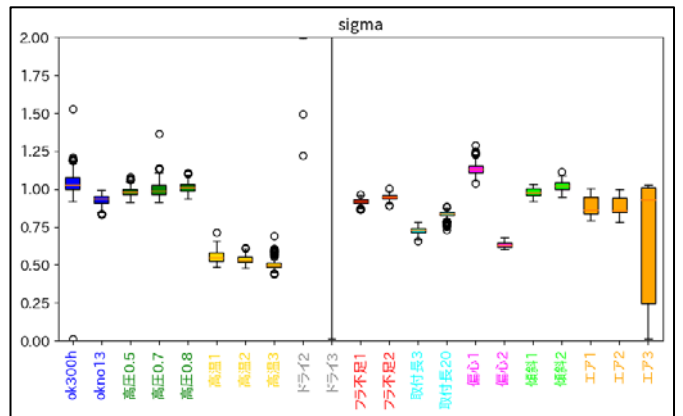
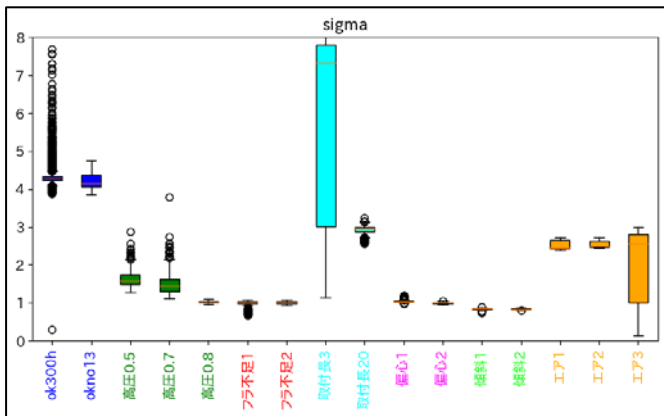


図 4.2.36 特徴量 Sigma の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

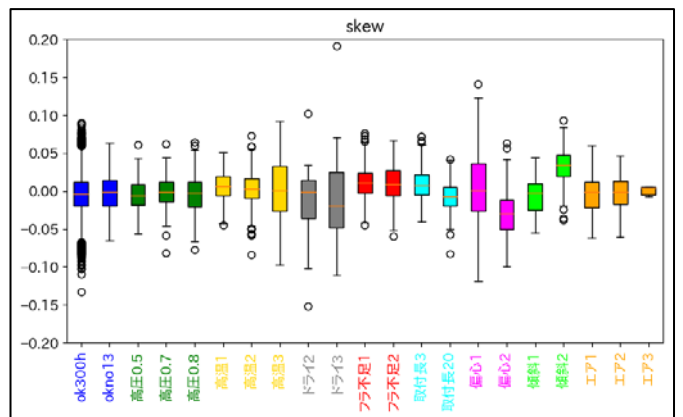
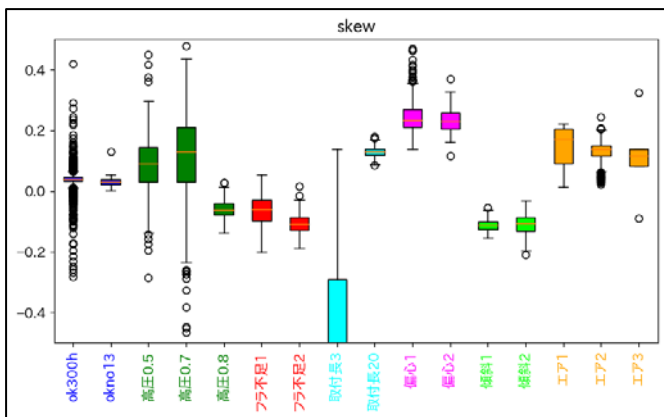


図 4.2.37 特徴量 Skew の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

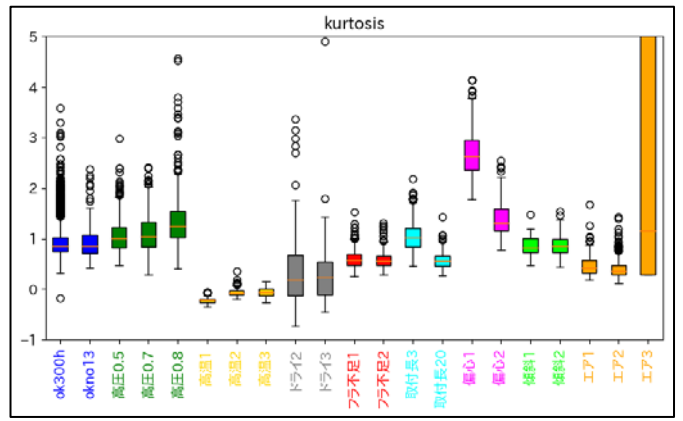
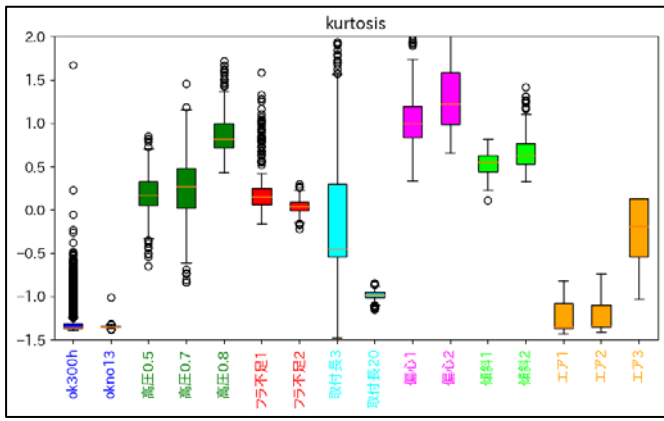


図 4.2.38 特徴量 Kurtosis の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

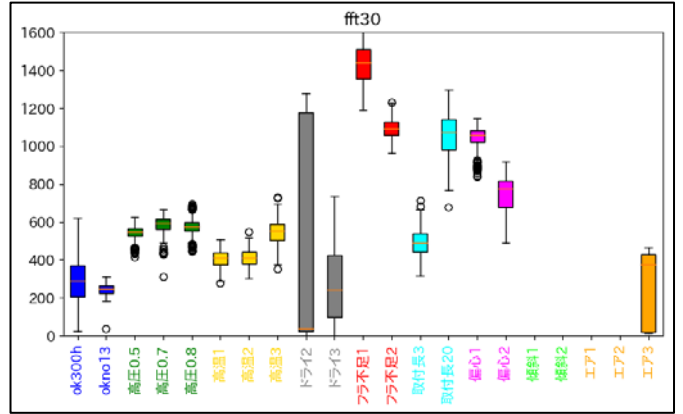
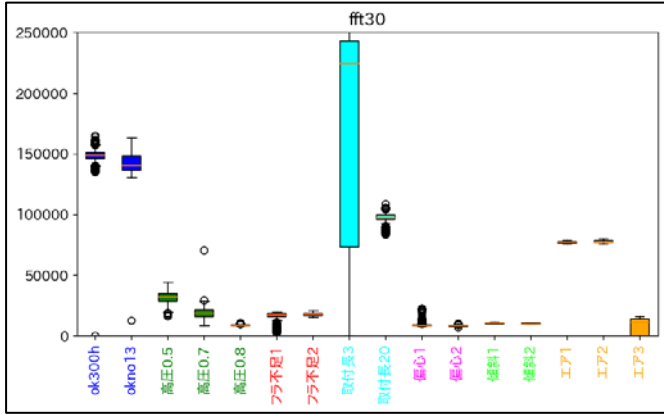


図 4.2.39 特徴量 FFT30 の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

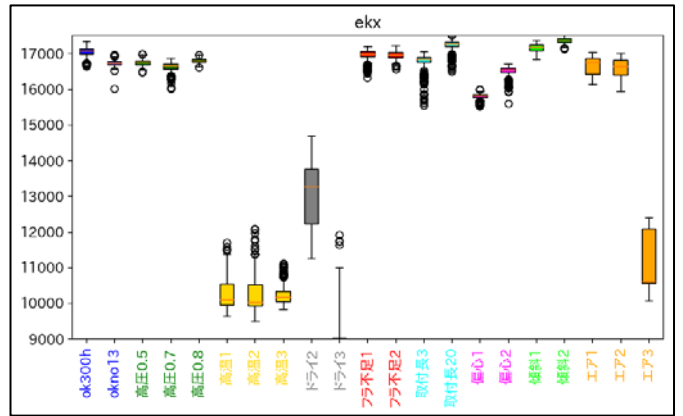
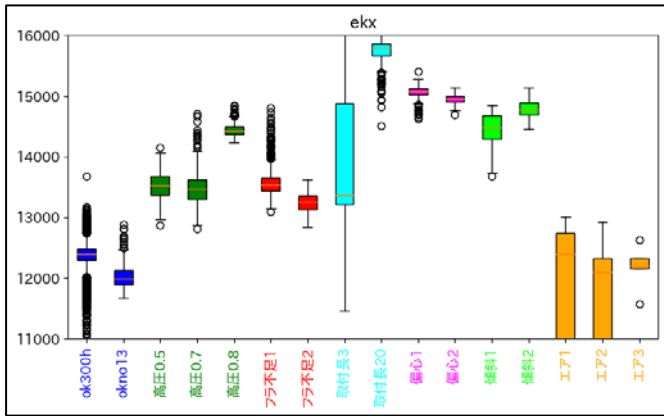


図 4.2.40 特徴量 EKx の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

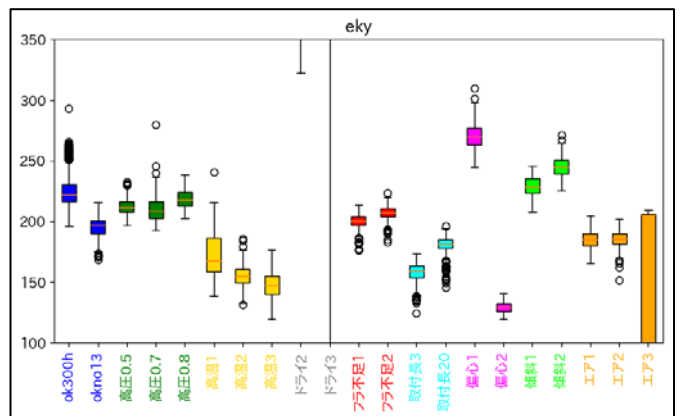
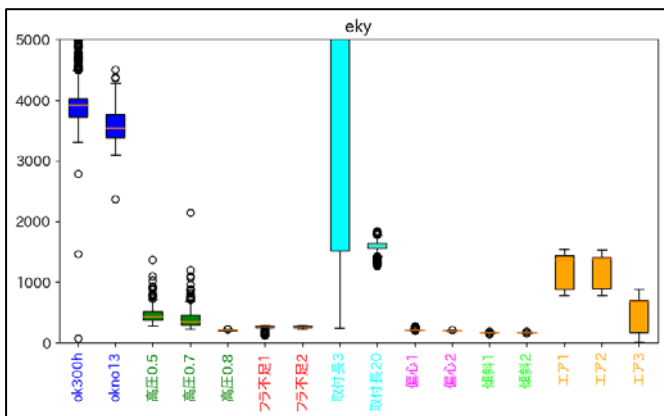


図 4.2.41 特徴量 EKy の箱ひげ図 (左 M/R、右 S/C)

箱ひげ図から判断する正常試験との判別度合いを表 4.2.10 に示す。
 各特徴量の箱ひげ図から特徴量 FFT30・EKx・EKy は正常試験と異常試験のばらつきが異なり、正常試験と異常試験を判別可能なパラメータであることがわかった。

表 4.2.10 箱ひげ図から判断する正常試験との判別度合い

センサ位置	特徴量	異常試験							
		高圧	高温	ドライ	フラッシング不足	取付長変更	偏心	傾斜	エア
M/R	FFT30	○	-	-	○	○	○	○	○
	EKx	○	-	-	○	○	○	○	○
	EKy	○	-	-	○	○	○	○	○
S/C	FFT30	○	○	○	○	○	○	○	○
	EKx	×	○	○	×	×	○	×	○
	EKy	×	○	○	×	○	○	○	○

各特徴量の箱ひげ図から判断．○：正常試験と判別可能、×：正常試験と判別困難

FFT30・EKx・EKy の 3 特徴量を組み合わせることでさらに判別能力が高まると考え、3 特徴量を主成分分析した．主成分分析の結果、第 2 主成分までの累積寄与率は 99%を超えており 2 次元平面で視覚化できることがわかった。

正常・異常試験の 3 特徴量を主成分分析した 2 次元グラフを図 4.2.42(M/R 加速度センサ)、図 4.2.43(S/C 加速度センサ)に示す．これらの図からも正常試験と異常試験を判別できる可能性があることがわかった。

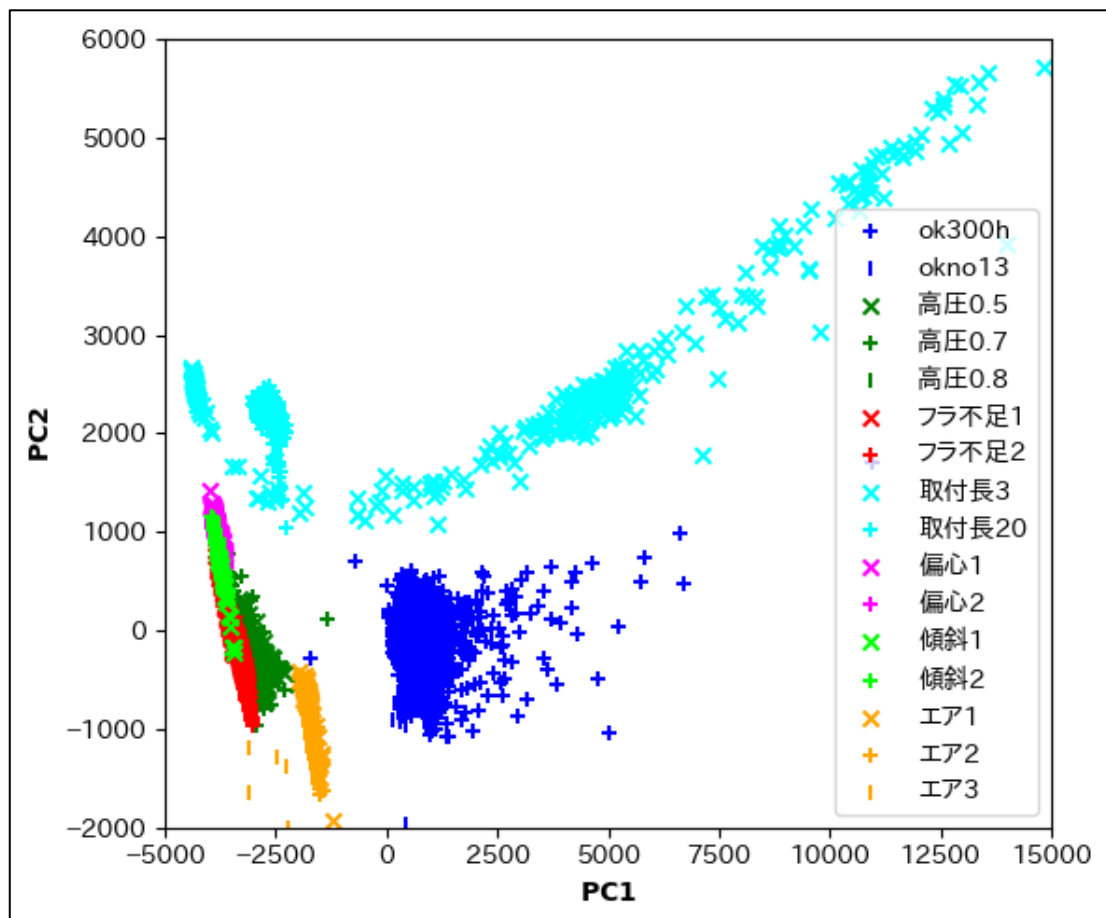


図 4.2.42 3 特徴量の主成分分析表示(M/R 加速度センサ)

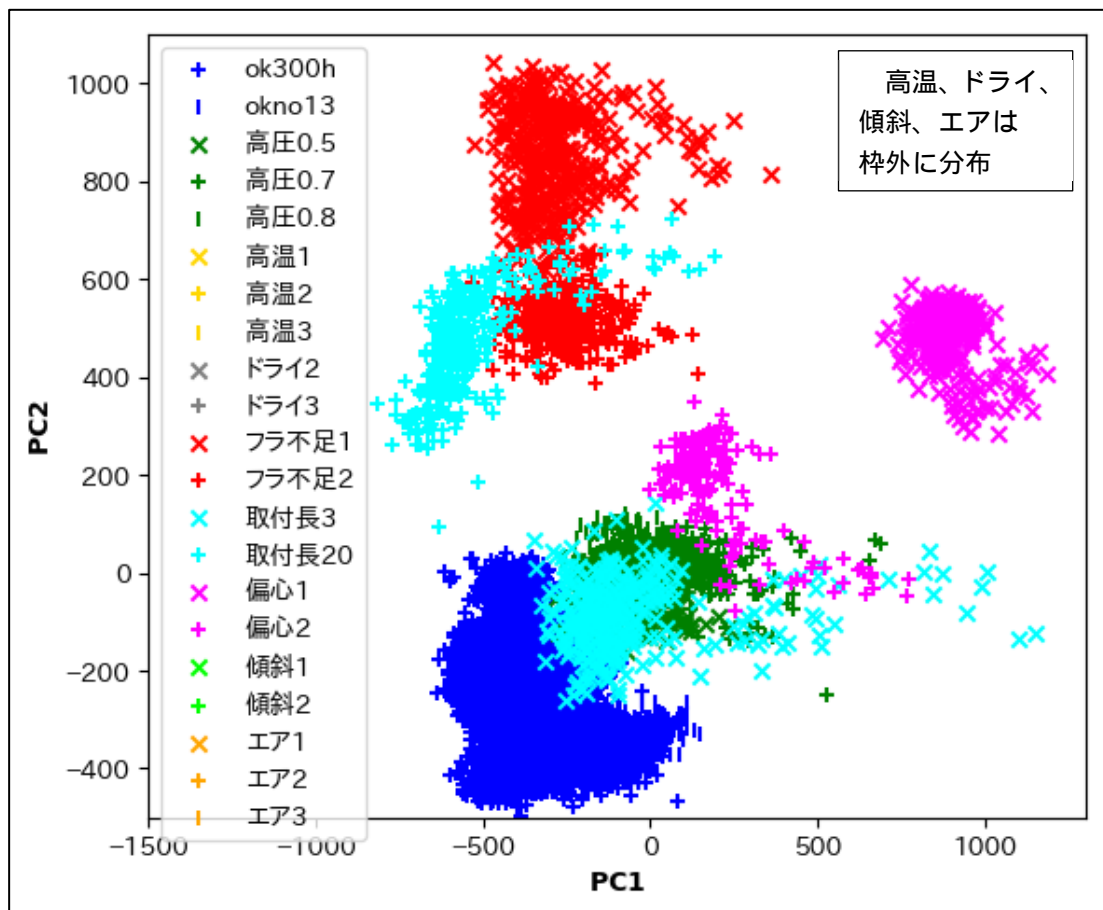


図 4.2.43 3 特徴量の主成分分析表示(S/C 加速度センサ)

5) 機械学習による正常・異常判別

機械学習手法のうち教師なし学習を使用して正常試験データと異常試験データの判別を行った。教師なし学習は正常試験データのみで学習を行い、判別モデルを作成する。判別モデルはデータ空間に正常試験データを取り囲むような境界面(線)を持ったもので、学習により境界面(線)が決定される。新たなデータを判別モデルに入れた際、境界面(線)より内側(正常試験データが含まれている側)と計算されれば正常試験データ、境界面(線)より外側と計算されれば異常試験データと判別される。

加速度センサデータの 3 特徴量を主成分分析したデータを用いて機械学習で学習と正常/異常判別を行った(正常試験データの 50%を使用して学習)。図 4.2.44 に M/R 加速度センサデータの機械学習の境界面表示、表 4.2.11 に作成された機械学習による正常/異常判別率を示す。また、図 4.2.45 に S/C 加速度センサデータの機械学習の境界面表示、表 4.2.12 に作成された機械学習による正常/異常判別率を示す。境界面は Decision Function が 0 のところにあり、Decision Function が正であれば正常試験データ、Decision Function が負であれば異常試験データと判別される。

M/R 加速度センサの正常/異常判別率はほぼ 100%で非常に良好な結果が得られた。また、S/C 加速度センサの正常/異常判別率もおおむね良好であったが、高圧運転模擬試験(0.5MPaG)、取付けミス模擬試験(取付け長 長)での異常判別率が 100%とならなかった。これは、異常度が正常試験(圧力 0.3MPa、取付け長 正規)に比較して小さい試験であり、S/C 加速度センサ取付位置が M/R 加速度センサ取付位置に比較して剛性が高い位置であるため異常判別率が下がったと考えられる。

実際のメカニカルシールへの影響度を考慮して判断した場合、M/R 加速度センサ、S/C 加速度センサ双方において同等の正常/異常判定結果が得られたこと、S/C 位置への設置が比較的容易であることから、実機ポンプへの設置は S/C 加速度センサが有望と考えられる。

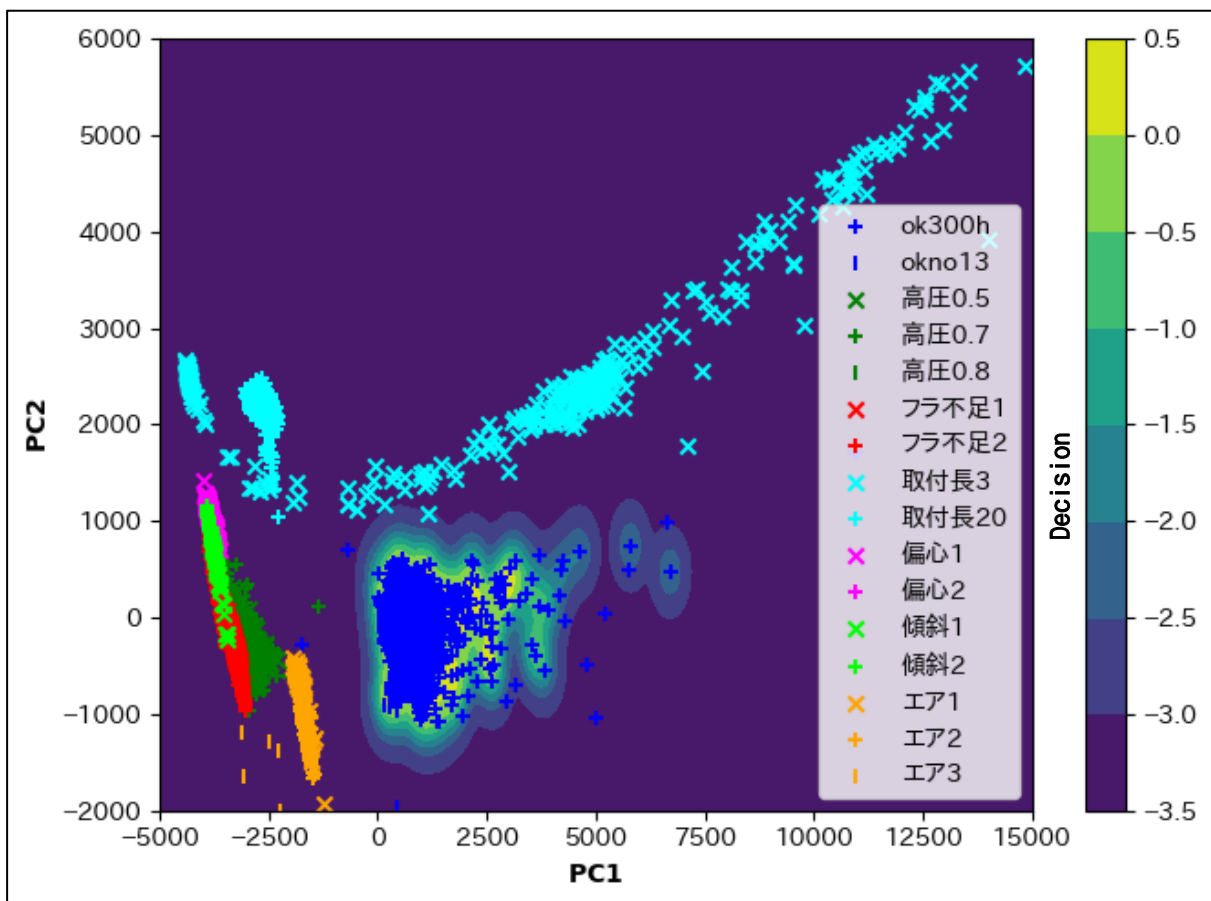


図 4.2.44 機械学習境界面(M/R 加速度センサ)

表 4.2.11 機械学習による正常/異常判別率(M/R 加速度センサ)

試験種類	試験略称	正常判別率	異常判別率
正常試験模擬試験(300 時間)	ok300h	99.19	0.81
正常試験模擬試験(No13)	okno13	96.30	3.70
高圧運転模擬試験(0.5MPaG)	高圧 0.5	0.00	100.00
高圧運転模擬試験(0.7MPaG)	高圧 0.7	0.00	100.00
高圧運転模擬試験(0.8MPaG)	高圧 0.8	0.00	100.00
フラッシング不足模擬試験(No1)	フラ不足 1	0.00	100.00
フラッシング不足模擬試験(No2)	フラ不足 2	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(取付け長 長)	取付長 3	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(取付け長 短)	取付長 20	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(偏心 No1)	偏心 1	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(偏心 No2)	偏心 2	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(面傾き No1)	傾斜 1	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(面傾き No2)	傾斜 2	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No1)	エア 1	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No2)	エア 2	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No3)	エア 3	0.00	100.00

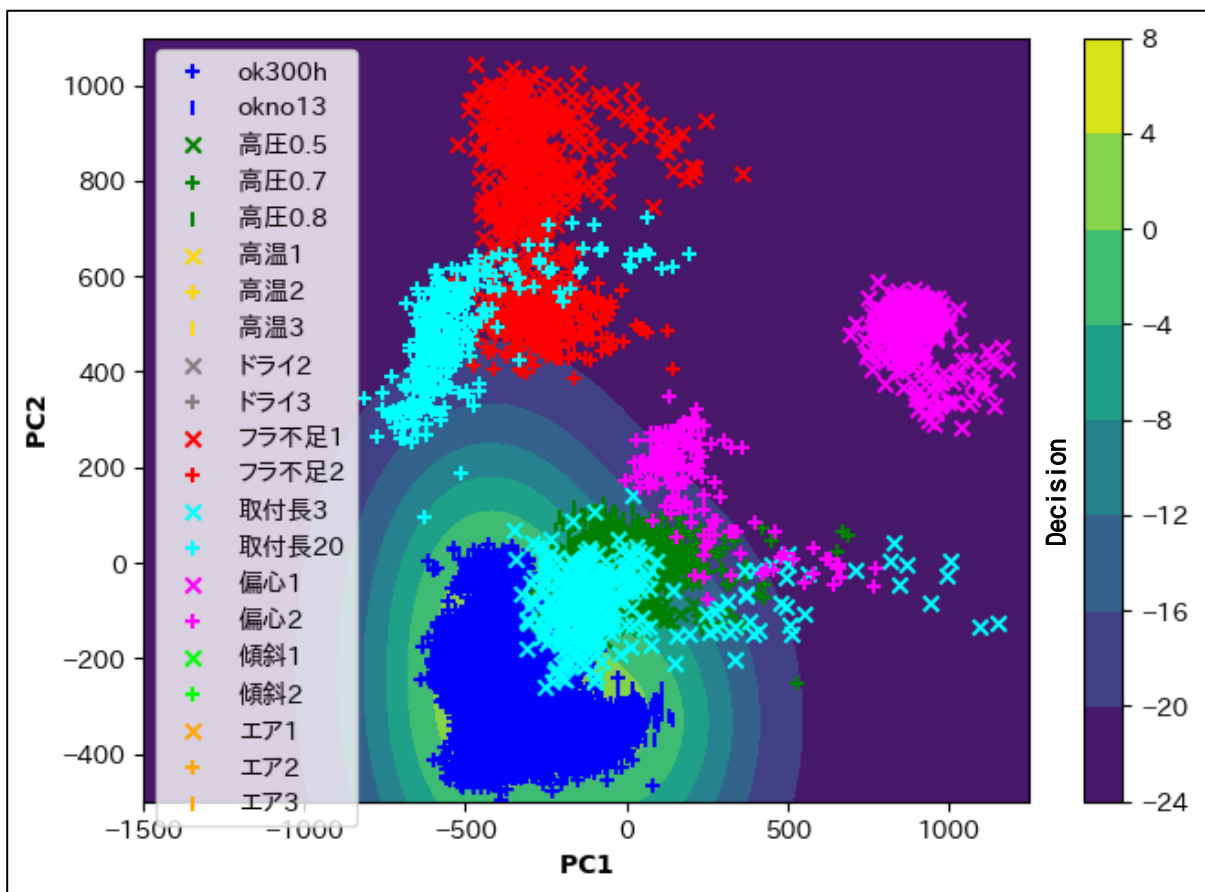


図 4.2.45 機械学習境界面(S/C 加速度センサ)

表 4.2.12 機械学習による正常/異常判別率(S/C 加速度センサ)

試験種類	試験略称	正常判別率	異常判別率
正常試験模擬試験(300 時間)	ok300h	99.19	0.81
正常試験模擬試験(No13)	okno13	89.81	10.19
高圧運転模擬試験(0.5MPaG)	高圧 0.5	1.58	98.42
高圧運転模擬試験(0.7MPaG)	高圧 0.7	0.00	100.00
高圧運転模擬試験(0.8MPaG)	高圧 0.8	0.00	100.00
高温運転模擬試験(No1)	高温 1	0.00	100.00
高温運転模擬試験(No2)	高温 2	0.00	100.00
高温運転模擬試験(No3)	高温 3	0.00	100.00
ドライ運転模擬試験(No2)	ドライ 2	0.00	100.00
ドライ試験運転模擬(No3)	ドライ 3	0.00	100.00
フラッシング不足模擬試験(No1)	フラ不足 1	0.00	100.00
フラッシング不足模擬試験(No2)	フラ不足 2	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(取付け長 長)	取付長 3	23.50	76.50
取付けミス模擬試験(取付け長 短)	取付長 20	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(偏心 No1)	偏心 1	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(偏心 No2)	偏心 2	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(面傾き No1)	傾斜 1	0.00	100.00
取付けミス模擬試験(面傾き No2)	傾斜 2	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No1)	エア 1	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No2)	エア 2	0.00	100.00
エア残留状態模擬試験(エア No3)	エア 3	0.00	100.00

6) 過渡データ取得試験の振動データ解析 (表 4.2.2 項 3.)

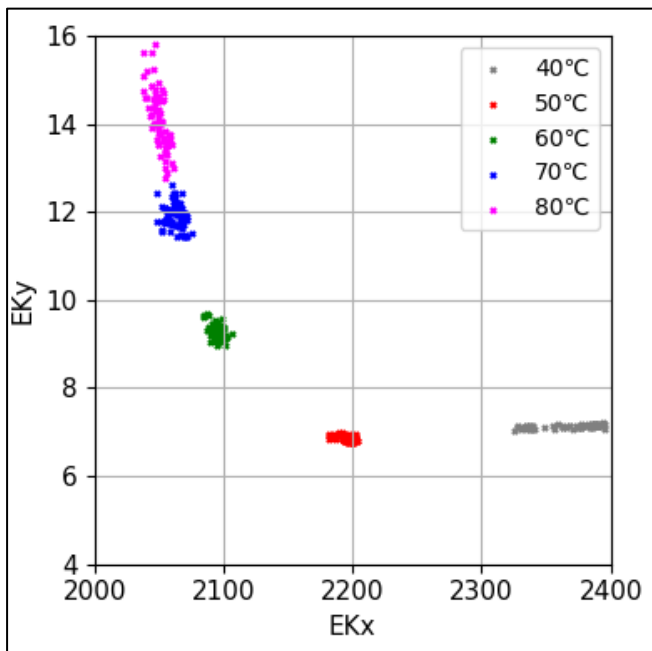
次に、過渡データ取得試験はメカシール異常となる兆候を捉えられるかの試験を表 4.2.13 に示す変動条件で行った。

図 4.2.46 に変動条件における Z 軸方向加速度センサデータの特徴量 EKx・EKy の移動を示す。

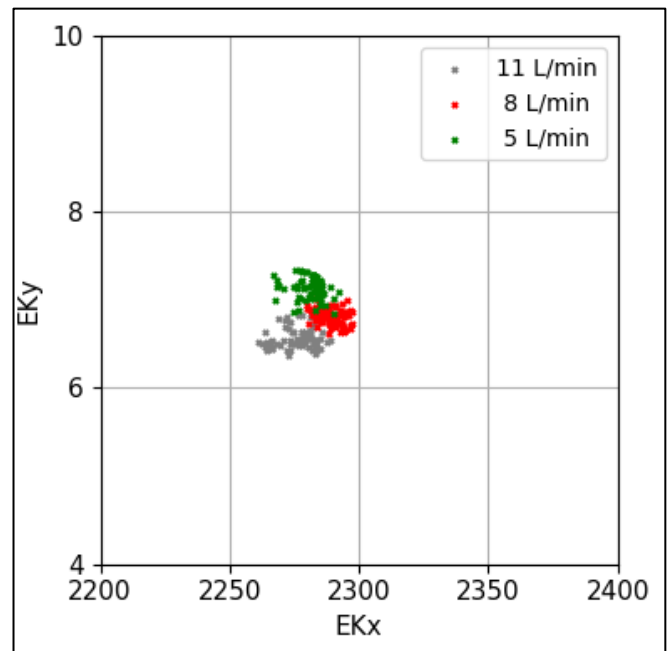
結果、本試験では条件変動により特徴量 EKx・EKy 移動変化は捉えられた。特に高温においての変化は顕著であった。

表 4.2.13 過渡データ取得試験の変動条件

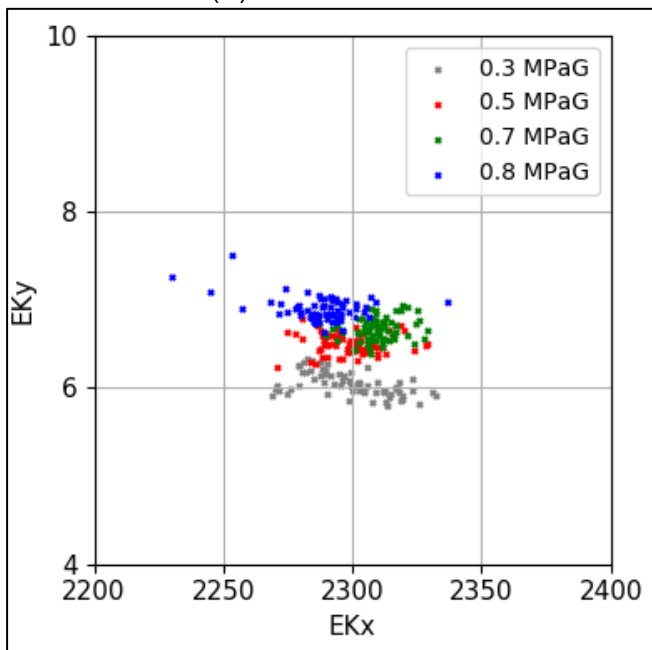
試験名	変動条件
高温運転過渡試験	温度 40(基準), 50, 60, 70, 80 []
フラッシング不足過渡試験	流量 11(基準), 8, 5 [L/min]
高圧運転過渡試験	圧力 0.3(基準), 0.5, 0.7, 0.8 [MPaG]



(a)高温運転過渡試験



(b)フラッシング不足過渡試験



(c)高圧運転過渡試験

図 4.2.46 過渡データ取得試験の Z 軸加速度センサ特徴量 EKx・EKy

7) 長時間異常運転模擬試験の振動データ解析 (表 4.2.2 項 4.)

長時間異常運転模擬試験は高圧の異常運転を 4 週間継続しその間のシール変化を捉えられるかの試験である。1 週目と 4 週目の Z 軸加速度センサの特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} 移動を図 4.2.47 に示す。長時間の異常運転で特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} が移動していることが捉えられた。

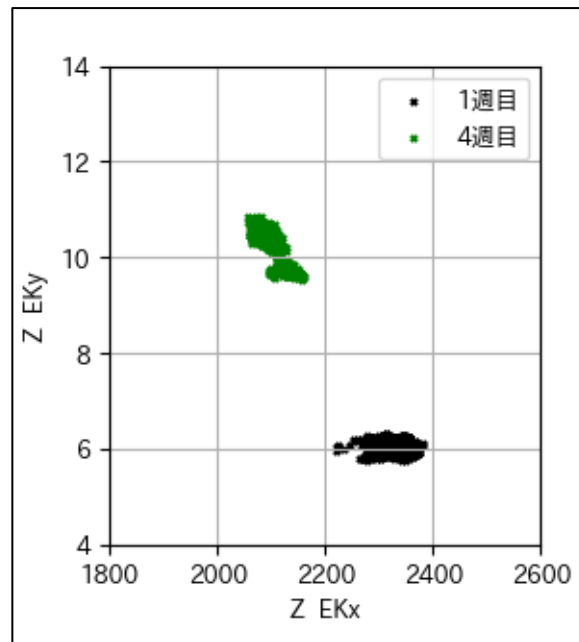


図 4.2.47 長時間異常運転模擬試験の Z 軸加速度センサ特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky}

8) 状態診断システムで得られたデータによる正常・異常判別(実機ポンプ試験)

試作型メカニカルシール状態診断システムで実機ポンプ試験機(浪速ポンプ製作所 - 陸上試験装置)のデータを取得し、機械学習による正常・異常判別を行った。状態診断システムで得られたデータを表 4.2.14 に示す。

表 4.2.14 状態診断システムで得られたデータ(実機ポンプ試験機)

試験種類	試験略称	測定時間[秒]
正常試験 No1 (定格運転)	OK1	1664
正常試験 No2 (定格運転)	OK2	2907
正常試験 No3 (定格運転)	OK3	1913
高圧試験 No1 (締切運転)	高圧 1	51
高圧試験 No2 (締切運転)	高圧 2	131
高圧試験 No3 (締切運転)	高圧 3	121
キャビテーション試験 No1	CAV1	1780
キャビテーション試験 No2	CAV2	1680
キャビテーション試験 No3	CAV3	1740

本判別ではZ軸加速度センサデータの特徴量 EKx、EKy を使用した。特徴量が2成分のため主成分分析は行わずに EKx、EKy をそのまま機械学習に使用した。図 4.2.48 に機械学習の境界面表示、表 4.2.15 に作成された機械学習による正常/異常判別率を示す。本データにおいても機械学習による正常・異常判別結果が良好であることがわかった。

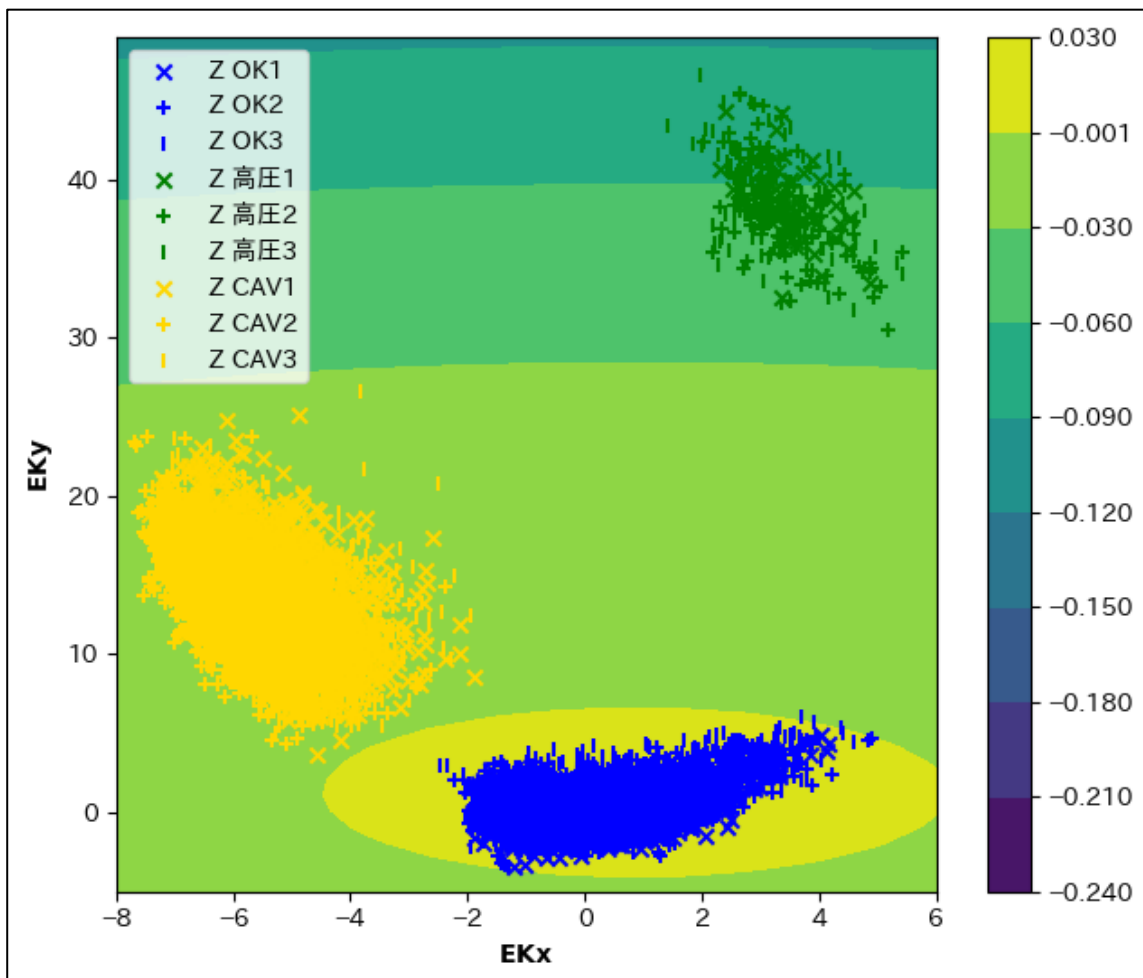


図 4.2.48 機械学習境界面(実機ポンプ試験機データ)

表 4.2.15 機械学習による正常/異常判別率(実機ポンプ試験機データ)

試験種類	試験略称	正常判別率	異常判別率
正常試験 No1 (定格運転)	OK1	99.58	0.42
正常試験 No2 (定格運転)	OK2	99.45	0.55
正常試験 No3 (定格運転)	OK3	97.28	2.72
高圧試験 No1 (締切運転)	高圧 1	0.00	100.00
高圧試験 No2 (締切運転)	高圧 2	0.00	100.00
高圧試験 No3 (締切運転)	高圧 3	0.00	100.00
キャビテーション試験 No1	CAV1	0.00	100.00
キャビテーション試験 No2	CAV2	0.00	100.00
キャビテーション試験 No3	CAV3	0.00	100.00

4.2.3 試作型メカニカルシール状態診断システムによる実船搭載ポンプでの運転データ取得

当初予定より早期に実船搭載予定の船主より、試作型システムの搭載について打診があったため、急遽実船用の試作型メカニカルシール状態診断システムを準備して2019年5月に実船搭載を行った。

1) 実船搭載用計測装置の構成

2019年5月に試作型メカニカルシール状態診断システムの増設を実施した。構成は図4.2.49に示す。センサ記号対応表を表4.2.16に示す。

モータ電流、吐出揚程、吸込揚程の3つの既設システムで使用している信号は、絶縁分配器で分岐し、既設パネルに戻した。

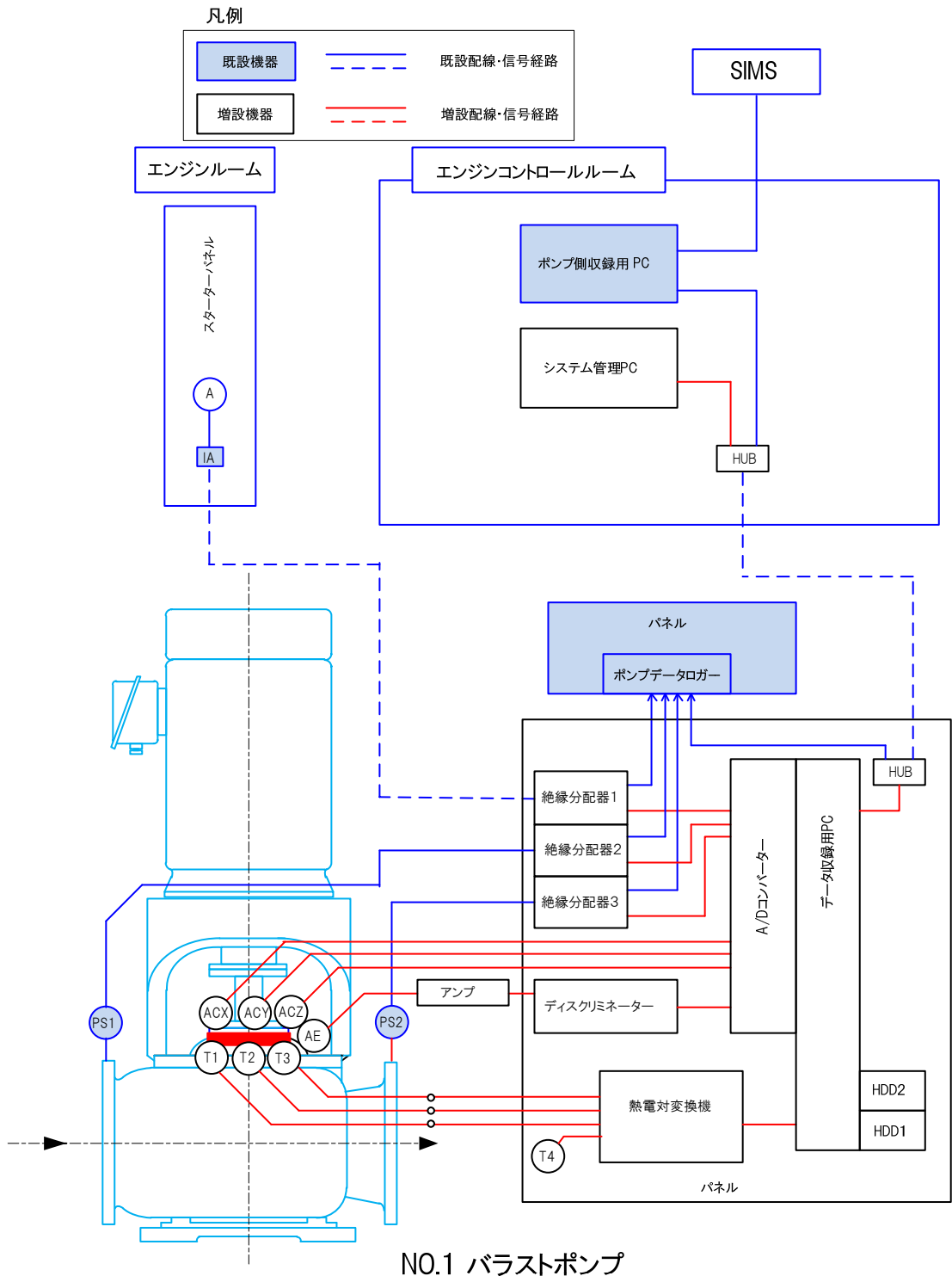


図 4.2.49 改造後の実船配線系統図

表 4.2.16 センサ記号対応表

計測項目	記号	計測名称	設置位置	センサタイプ
加速度	ACX	加速度X軸	シールカバー上	—
	ACY	加速度Y軸		
	ACZ	加速度Z軸		
温度	T1	シール（シース無）	メイティングリング内部	熱電対、シース無（収縮チューブ被覆）
	T2	シールカバー（水温）	フラッシング間内部	
	T3	シール（シース有）	メイティングリング内部	
	T4	測定BOX（気温）	パネル内部	
AE	AE	AE	シールカバー上	広帯域型

2) 実船搭載用計測装置の設置状況（改造工事）

増設したメカニカルシール状態診断システムのセンサ及び増設パネルの設置状況を図 4.2.50、図 4.2.51 に示す。

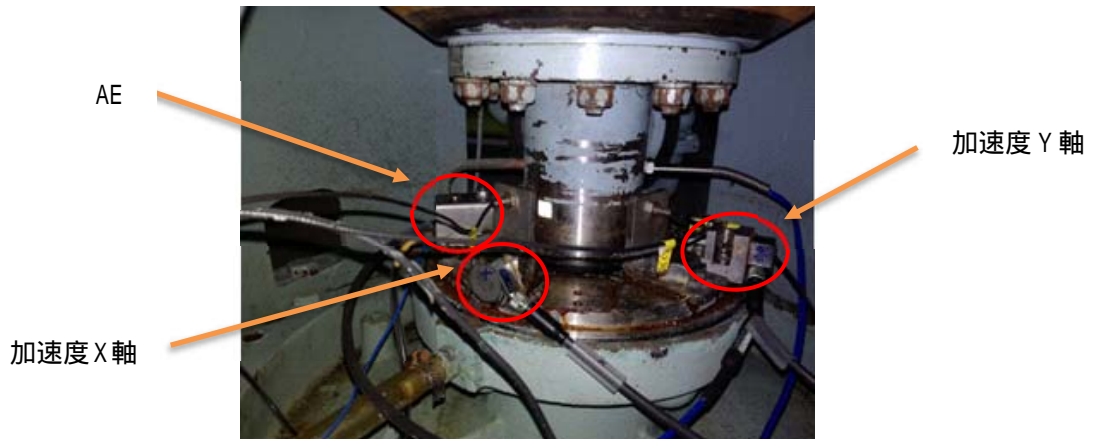


図 4.2.50 実船センサ類設置状況（一部のみ）

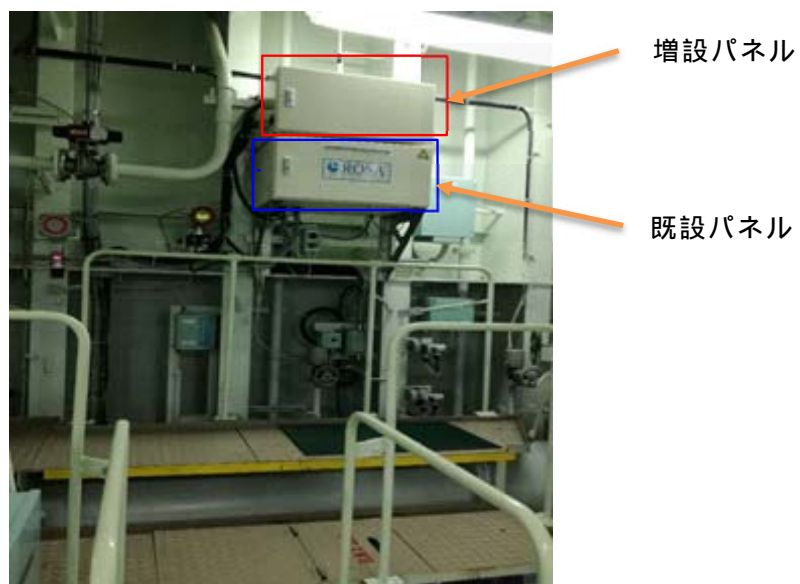


図 4.2.51 パネル設置状況

3) データ収集

実船でのデータは、データ収集用 PC に蓄積されるため定期的に HDD を交換して回収する必要がある。

下記日程で収集を実施した。

1 回目	2019 年 5 月 20 日
2 回目	2019 年 8 月 20 日
3 回目	2019 年 11 月 2 日
4 回目	2020 年 2 月 10 日

2 ヶ月に 1 回程度のデータ回収を目標していたが、実船のスケジュールが合わず上記日程での回収作業となっている。

4) 実船搭載のメカニカルシール状態診断システムで得られたデータの振動データ解析 試作型メカニカルシール状態診断システムを設置した実船搭載ポンプでの運転データを収集した。

期間 2019 年 5 月 28 日 ~ 2019 年 8 月 20 日 で取得した Z 軸振動データの一覧を図 4.2.52 に示す。取得期間のうちポンプが稼働した 22 か所(図中 ~ ㉔、表 4.2.17 に 22 か所の解析箇所を示す)について Z 軸振動データの特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の解析を行った。

取得期間中、実船は積出港と積込港を 2 往復しており、入港中または出航後でポンプ動作モードが異なり、特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の位置・動きが異なることがわかった。

また、1 往復目と 2 往復目でポンプ動作モードが同じ場合は特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の位置・動きは似ていることもわかった。

表 4.2.18 にポンプ動作モードの違いにおける特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の特徴を示す。

図 4.2.53 ~ 図 4.2.56 にポンプ動作モード毎の Z 軸加速度出力・モータ電流・特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} グラフを示す。

図のグレイスケールの等高線は全データの特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の頻度分布を表しており、白いほど頻度が大きい。

特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の位置・動きは通常動作時は安定しているが、キャビテーションが発生したと考えられる期間(モータ電流が下がったとき)は特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の大きな移動が見られる。これはキャビテーションにより異常振動が発生しているためだと推測する。

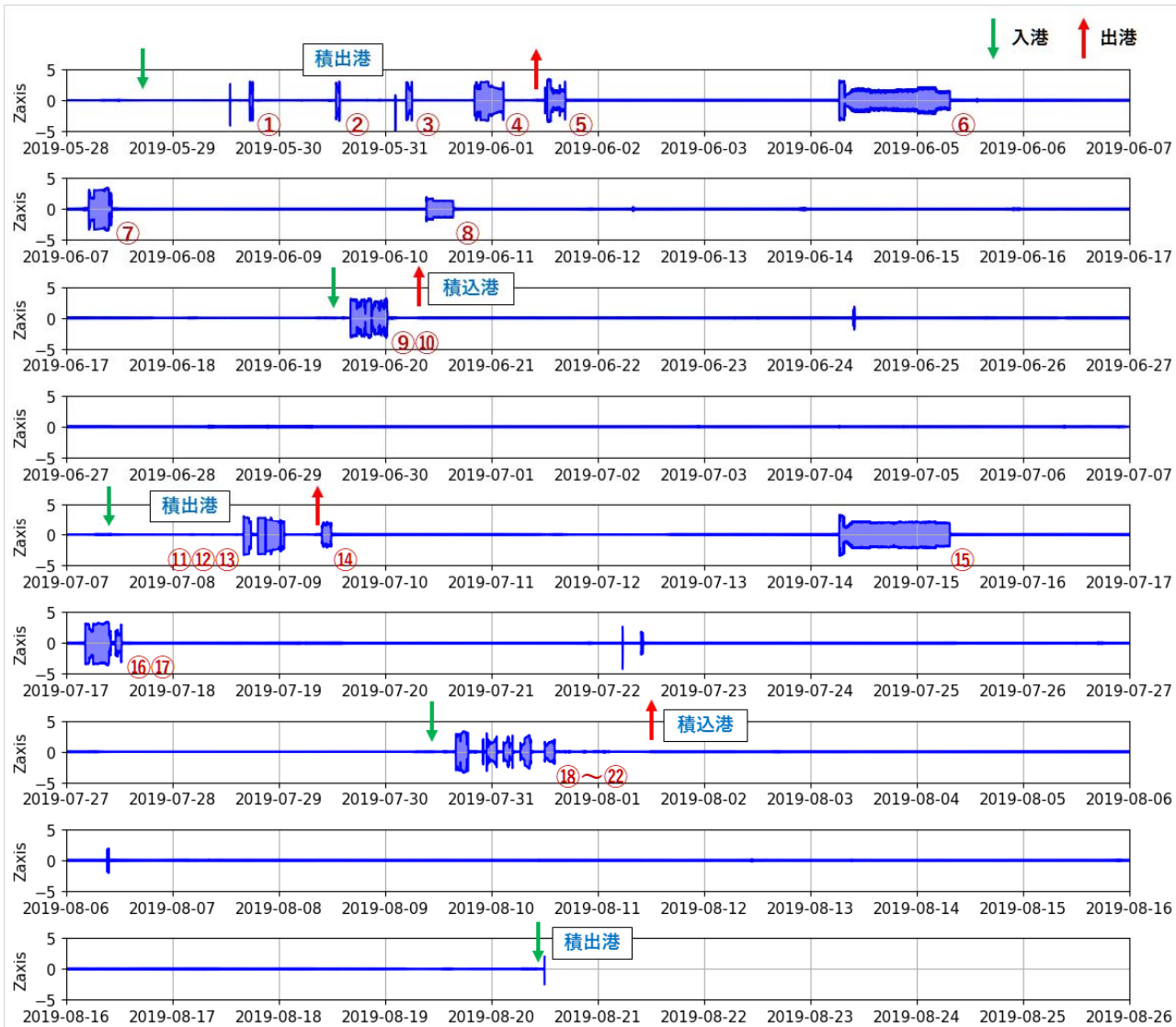


図 4.2.52 実船搭載ポンプで取得した Z 軸振動センサデータ一覧

表 4.2.17 実船搭載ポンプデータの解析箇所

番号	測定開始日時	測定時間 [hour]	状況
	19/05/29 17:09	0.7	積出港入港中
	19/05/30 12:40	0.9	積出港入港中
	19/05/31 04:29	1.4	積出港入港中
	19/05/31 19:55	6.6	積出港入港中
	19/06/01 12:32	4.2	
	19/06/04 06:12	25.0	バラスト水の水処理中(推定)
	19/06/07 04:50	5.2	
	19/06/10 09:04	6.1	
	19/06/19 15:54	4.8	積込港入港中
	19/06/19 21:00	3.6	積込港入港中
	19/07/08 15:47	1.7	積出港入港中
	19/07/08 18:59	1.8	積出港入港中
	19/07/08 21:05	3.3	積出港入港中
	19/07/09 09:45	2.1	
	19/07/14 06:27	25.0	バラスト水の水処理中(推定)
	19/07/17 04:19	5.8	
	19/07/17 11:11	1.4	
	19/07/30 15:42	2.8	積込港入港中
	19/07/30 22:36	2.4	積込港入港中
	19/07/31 02:27	2.1	積込港入港中
②①	19/07/31 06:36	2.3	積込港入港中
②②	19/07/31 11:46	2.2	積込港入港中

表 4.2.18 ポンプ動作モードの違いによる特徴量 EKx・EKy の特徴

ポンプ動作モード	データ番号 1 往復目/ 2 往復目	ポンプ動作モードの特徴	特徴量 EKx・EKy の特徴
1	/	積出港入港中 バラスト水を積込(推定) キャビテーション発生なし	特徴量 EKx・EKy グラフの右下 (EKx:1400、EKy:50 付近)で安定
2	/	積出港を出港して3~5日 バラスト水の水処理(推定)、24時間以上稼働 始動数時間後にキャビテーション発生	キャビテーション発生時は特徴量 EKx・EKy グラフの上側に移動する が、その後右下(EKx:1300、EKy:40 付近)で安定
3	/	ポンプ動作モード2が終了して2日後 作業は不明 ポンプ停止前にキャビテーション発生	起動前半は特徴量 EKx・EKy グラフの 右下(EKx:1400、EKy:40 付近)で安定し ていたが、後半徐々に上側に移動
4	/	積込港入港中 バラスト水を排出(推定) 数回キャビテーション発生	特徴量 EKx・EKy は不安定で左上方へ 散乱

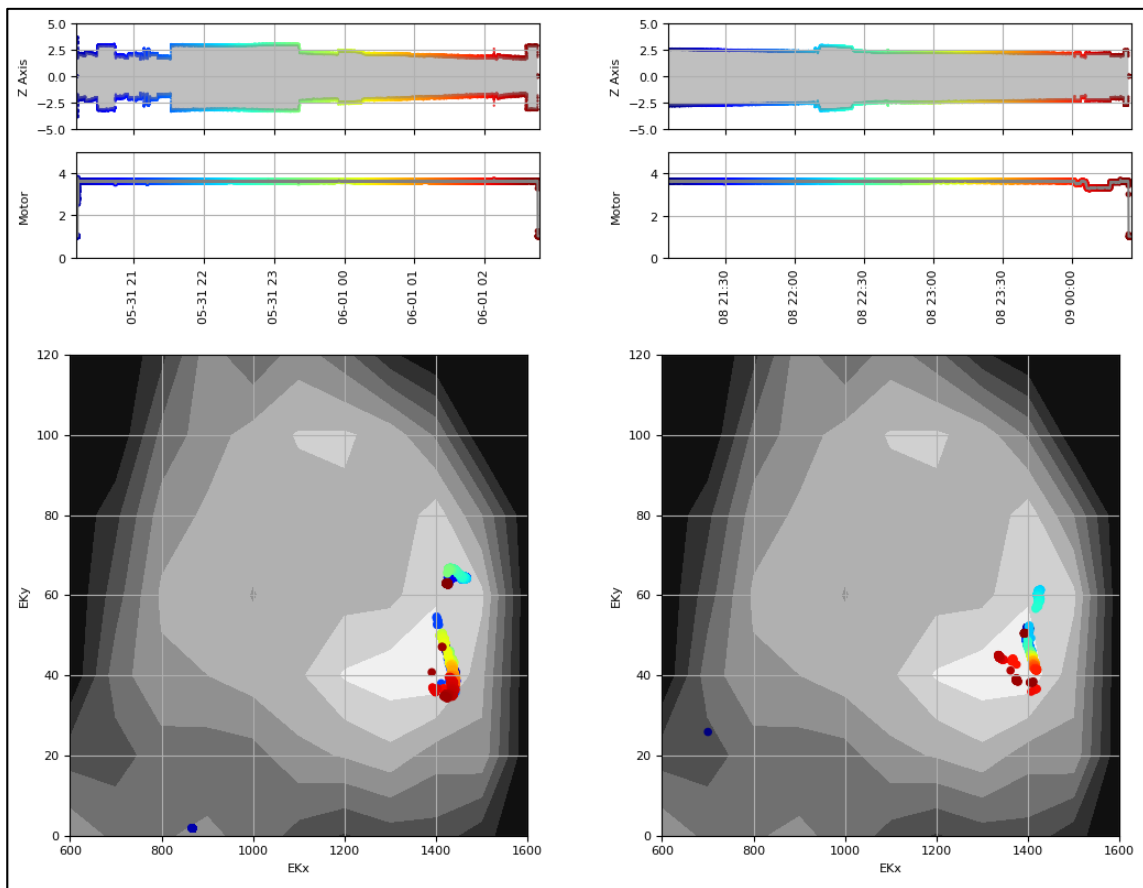


図 4.2.53 ポンプ動作モード 1 の Z 軸加速度センサ出力・モータ電流・特徴量 EKx・EKy(左: 、右:)

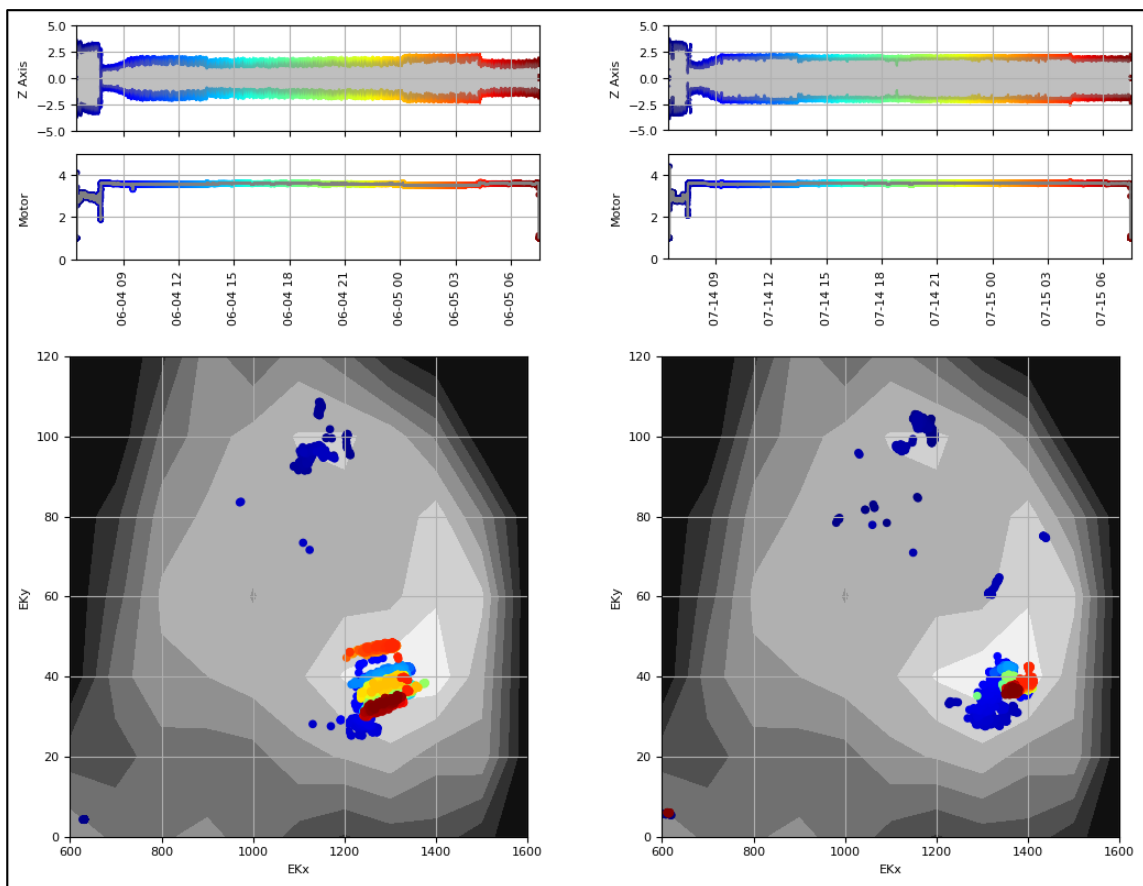


図 4.2.54 ポンプ動作モード 2 の Z 軸振動センサ出力・モータ電流・特徴量 EKx・EKy(左: 、右:)

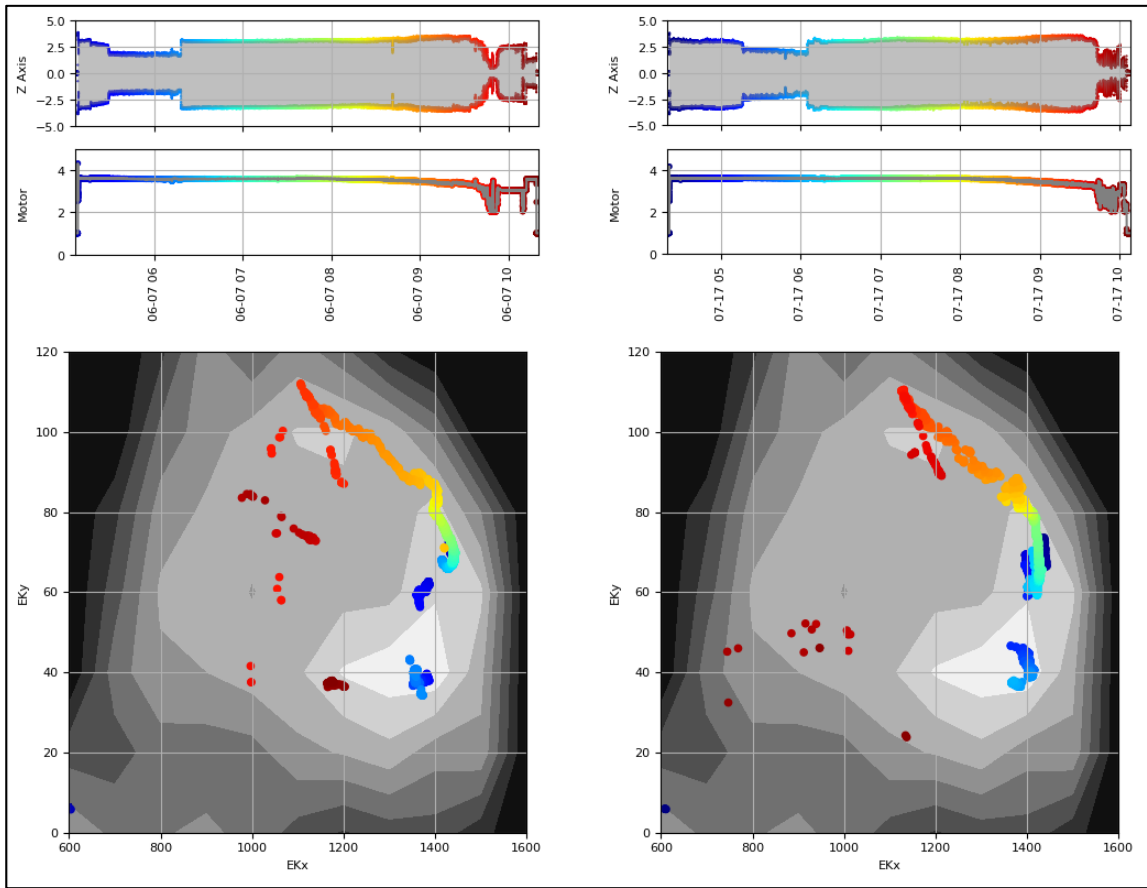


図 4.2.55 ポンプ動作モード 3 の Z 軸振動センサ出力・モータ電流・特徴量 EKx・EKy(左: 、右:)

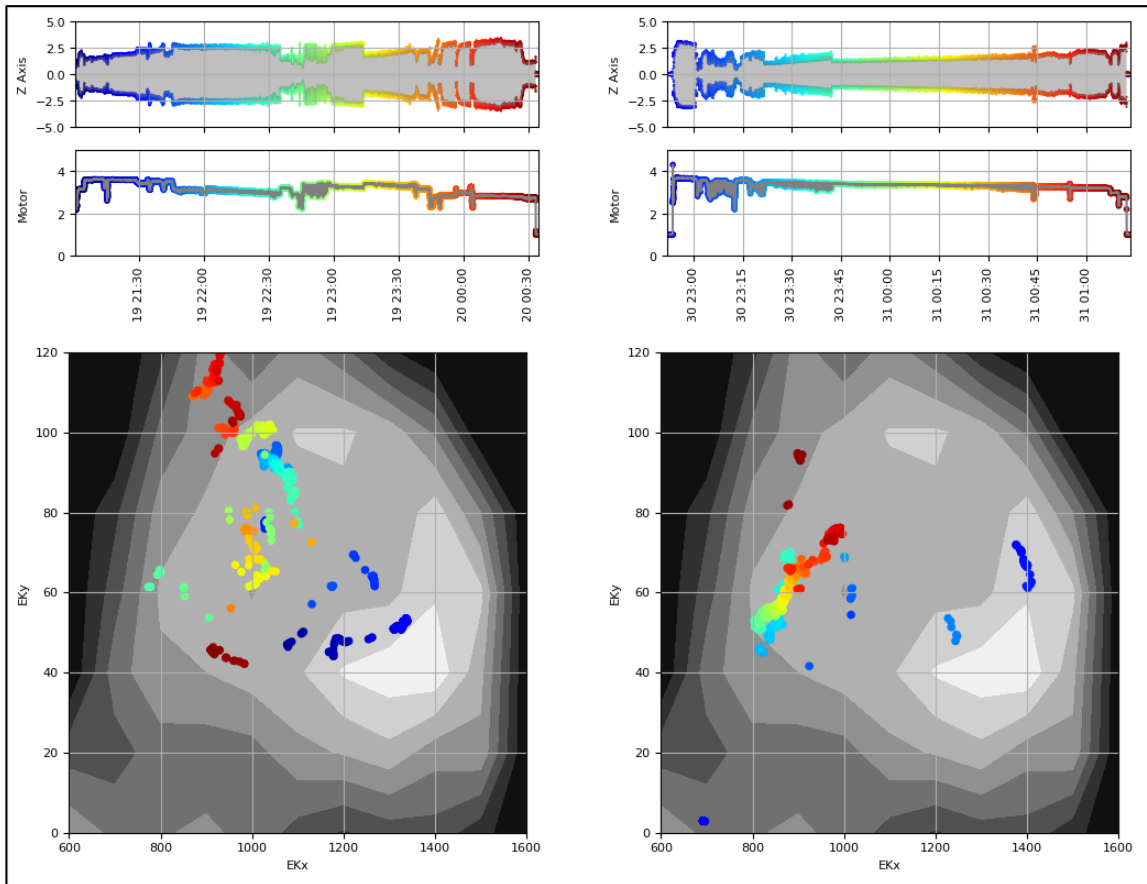


図 4.2.56 ポンプ動作モード 4 の Z 軸振動センサ出力・モータ電流・特徴量 EKx・EKy(左: 、右:)

4.3 2019 年度の課題

- 1) 2019 年度開発したシステムが実用可能であることを確認するため、実船搭載、及び実オペレーションで検証する必要がある。
- 2) AE 模擬試験では、AE センサの挙動が流量計、変位計及び振動センサと同様な傾向であることを確認した。(4.1.3 AE センサデータ取得及び分析の項目を参照。) 今後様々なパターンで運転計測し、これらのセンサを AE センサに代用したポンプ診断マトリックスを作成するために、更なるデータ収集が必要となる。
- 3) 実用化を進めるにあたり競争力を高めるため、『4.1.1 データ収集及びデータの分析』の電流値による傾向分析を進め、推定に必要なセンサ数を更に削減する必要がある。そのためには、実船データの収集を今後も継続し、確度を上げたデータ分析が重要である。
- 4) 『4.1.1 データ収集及びデータの分析』のマハラノビス距離 (MD) による検討結果より、MD 値の推定結果から劣化影響の傾向が現れつつある。そのため、MD 値の傾向分析のため継続してデータ収集が必要となる。
- 5) 診断結果は、パラメータの内、共通の反応を示すデータを選別するため、重みづけ処理の検討が必要である。
- 6) 陸上に送られるデータを活用し、船陸間で情報共有し実船のサポートをするためのシステム構築が必要となる。