

4.4 メカニカルシール状態診断システムの製作

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

1) 試作型メカニカルシール状態診断システム及び、ソフトウェア作成

社内試験設備に搭載した設備をベースに実船搭載の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作成を実施

a) 試作型メカニカルシール状態診断システム

データ収録用 P C (図 4.4.2) に各種センサ(表 4.4.1) を接続しデータ収録用 HDD へ収録、寄港時に回収し状態診断解析アルゴリズムの検討を実施。

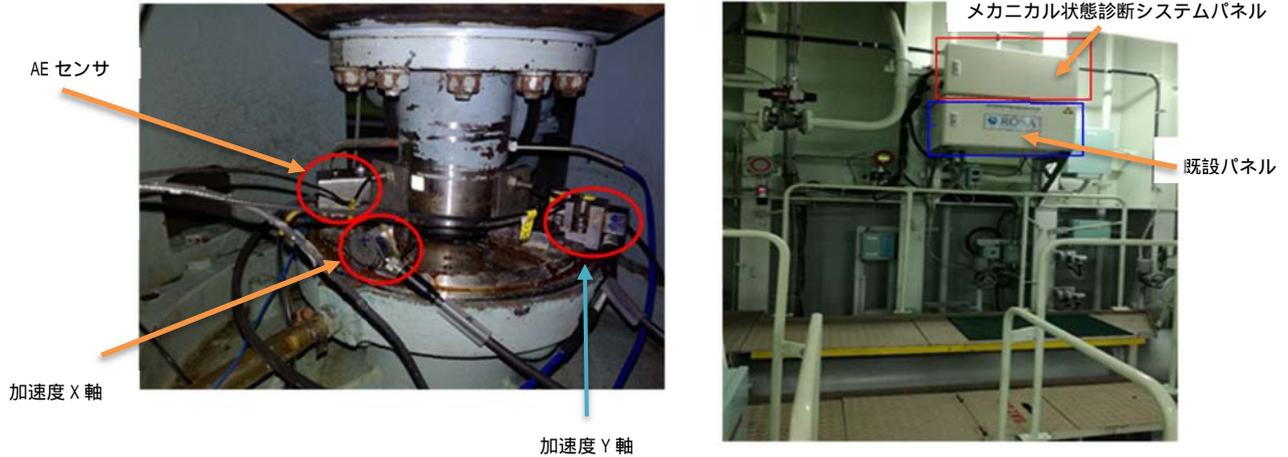


図 4.4.1 実船状態診断システム設置図

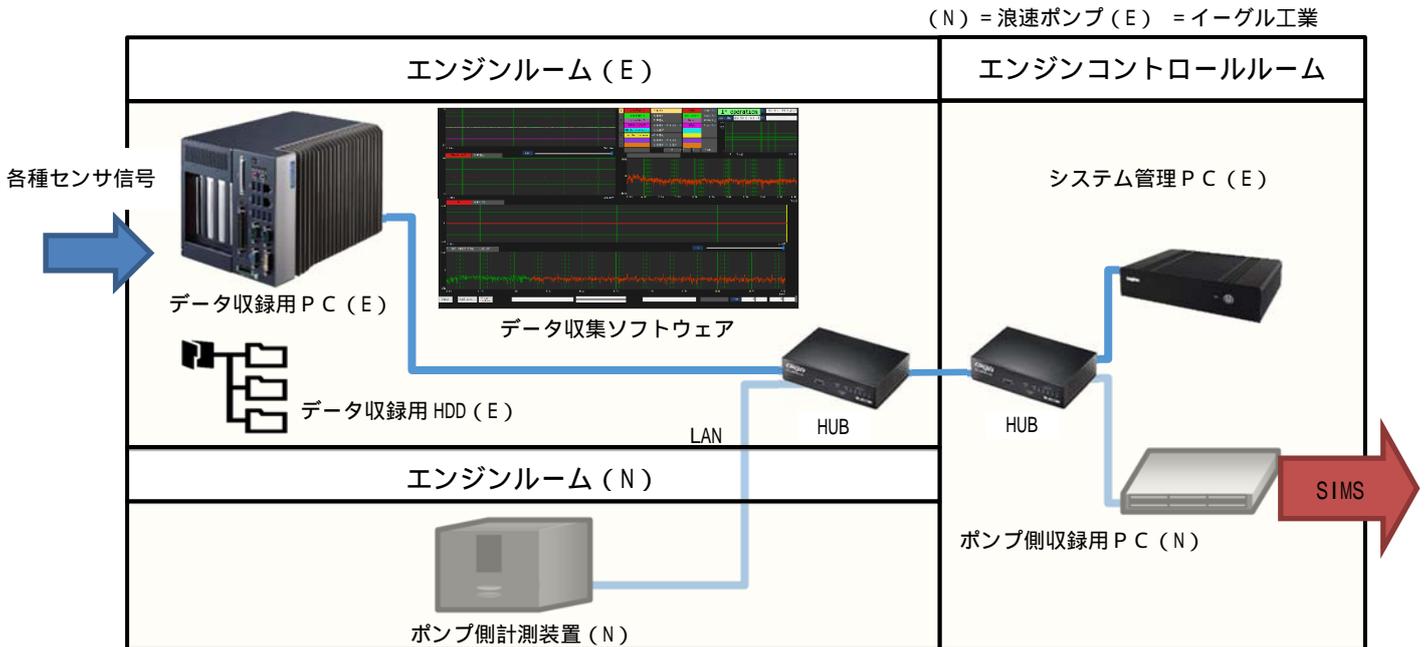


図 4.4.2 データ受信側の装置の外観

表 4.4.1 設置センサー一覧

測定項目	計測名称	設置位置	センサタイプ
加速度	加速度 X 軸	シールカバー上	
	加速度 Y 軸		
	加速度 Z 軸		
温度	シール(玉)	メイティングリング内部	熱電対、露出型(収縮チューブ被覆)
	シールカバー	フラッシング管内部	
	シール(シース)	メイティングリング内部	熱電対、シース型
	測定 BOX	パネル内部	
AE	AE	シールカバー上	広帯域型

実船には AE センサも搭載しているが、その後のデータ解析で加速度センサデータの状態診断への有効性が確認された為、AE センサデータは使用していない。

2) 実船データ収集結果と解析結果

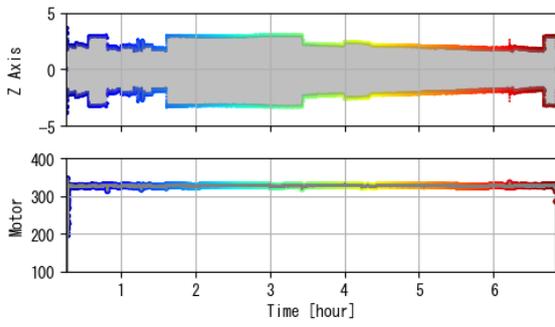
これまでに実船搭載ポンプの運転データを記録した HDD を 6 度回収している。回収された運転データを表 4.4.2 に示す。[回]は取得期間のポンプの運転回数、[hour]はポンプ運転の合計時間を表す。また、それぞれの回収でのポンプ動作モード 1 から 4 の運転回数と合計時間も併記する。ポンプ動作モードは実船の出入港の時間と運転時間、特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} などから主観により推定したもので、それぞれのポンプ動作モードと特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky} の特徴を表 4.4.3 に示す。また各ポンプ動作モードの代表波形(Z 軸加速度センサ出力・モータ電流・特徴量 E_{Kx} ・ E_{Ky})を図 4.4.3 に示す。表 4.4.2 の総計がポンプ動作モード 1 から 4 の合計より多い理由は、ポンプ動作モード 1 から 4 と判断できず他の共通する特徴を見いだせないポンプ運転を含むためである。

表 4.4.2 実船搭載ポンプの運転データ

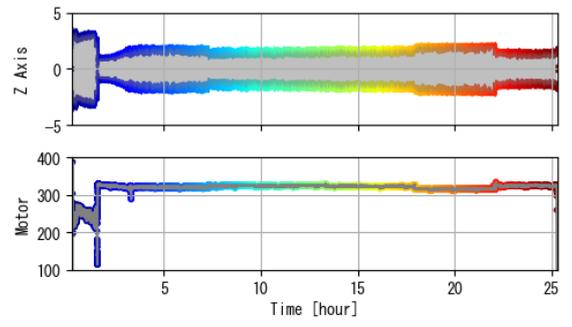
回収	データ取得期間	総計 [回/hour]	モード 1 [回/hour]	モード 2 [回/hour]	モード 3 [回/hour]	モード 4 [回/hour]
1	19/05/11 ~ 19/05/25	10/ 52.7	0/ 0.0	1/ 28.2	0/ 0.0	3/ 7.9
2	19/05/29 ~ 19/07/31	22/111.4	7/ 16.4	2/ 50.0	2/ 11.0	7/ 20.2
3	19/08/21 ~ 19/10/11	19/ 97.7	2/ 19.4	2/ 42.7	1/ 5.4	1/ 7.1
4	19/11/04 ~ 20/01/31	39/107.3	9/ 24.5	2/ 43.1	4/ 15.0	9/ 12.3
5	20/02/11 ~ 20/05/09	17/101.1	4/ 36.1	1/ 24.5	0/ 0.0	5/ 18.3
6	20/08/24 ~ 21/02/17	76/264.5	20/ 42.8	5/132.5	3/ 14.9	13/ 43.5
計	-	183/734.7	42/139.2	13/321.0	10/ 46.3	38/109.3

表 4.4.3 ポンプ動作モードと特徴量 EKx・EKy の特徴

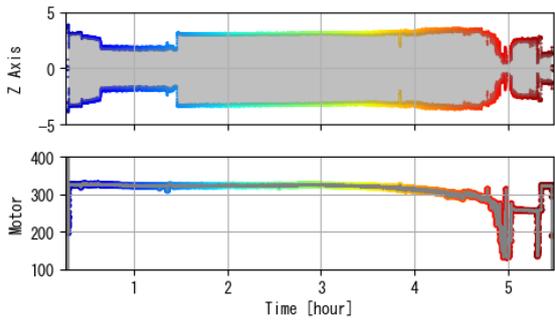
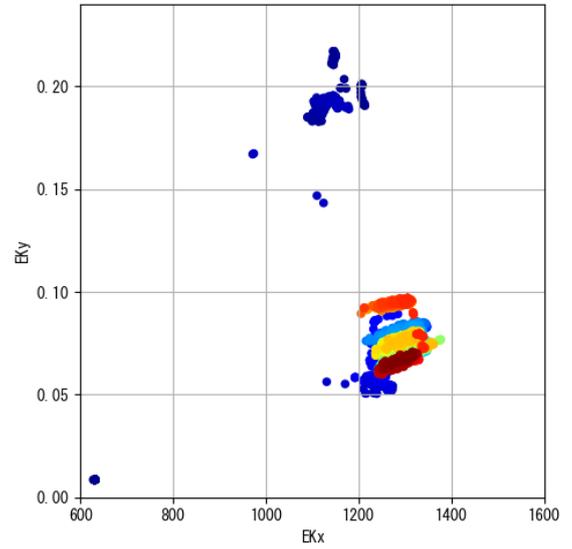
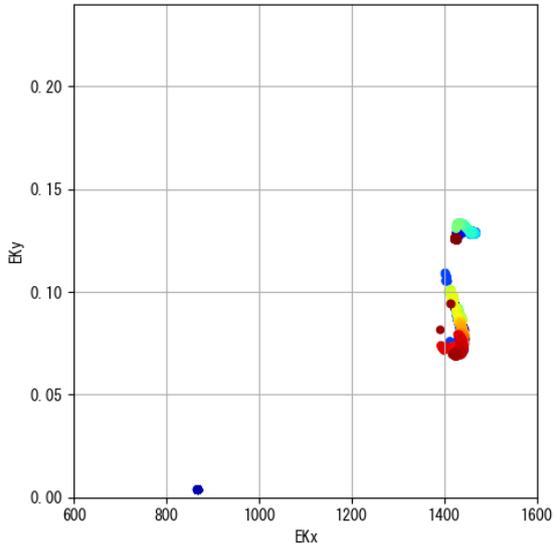
ポンプ 動作 モード	ポンプ動作モードの特徴	特徴量 EKx・EKy の特徴
1	<ul style="list-style-type: none"> ・荷下ろし港に入港中 ・バラスト水を積込(推定) ・キャビテーション発生なし 	特徴量 EKx・EKy グラフの右下で安定
2	<ul style="list-style-type: none"> ・荷下ろし港を出港して3~5日後 ・バラスト水の水処理(推定)、24時間以上稼働 ・始動数時間後にキャビテーション発生 	キャビテーション発生時は特徴量 EKx・EKy グラフの上側に移動するが、その後右下で安定
3	<ul style="list-style-type: none"> ・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 グラフの右下で安定していたが、後半徐々に上側に移動
4	<ul style="list-style-type: none"> ・荷積み港に入港中 ・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



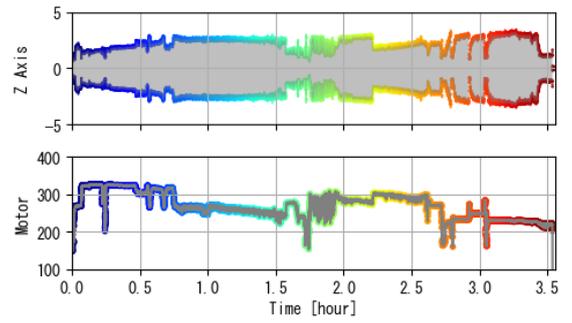
(a) ポンプ動作モード 1



(b) ポンプ動作モード 2



(c) ポンプ動作モード 3



(d) ポンプ動作モード 4

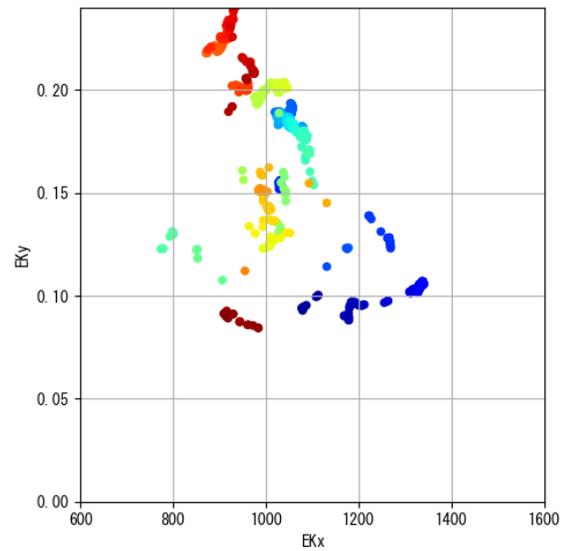
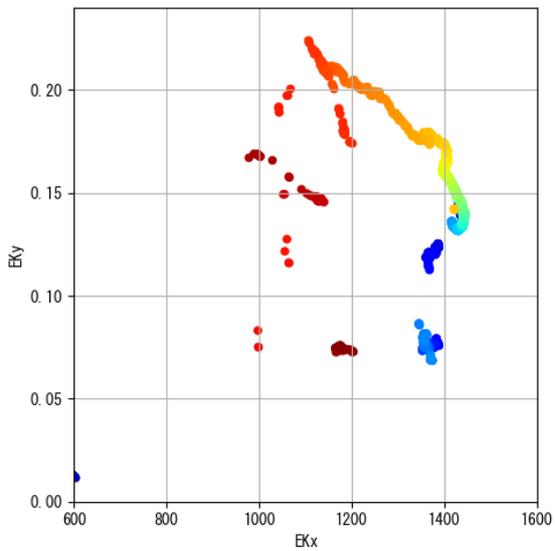
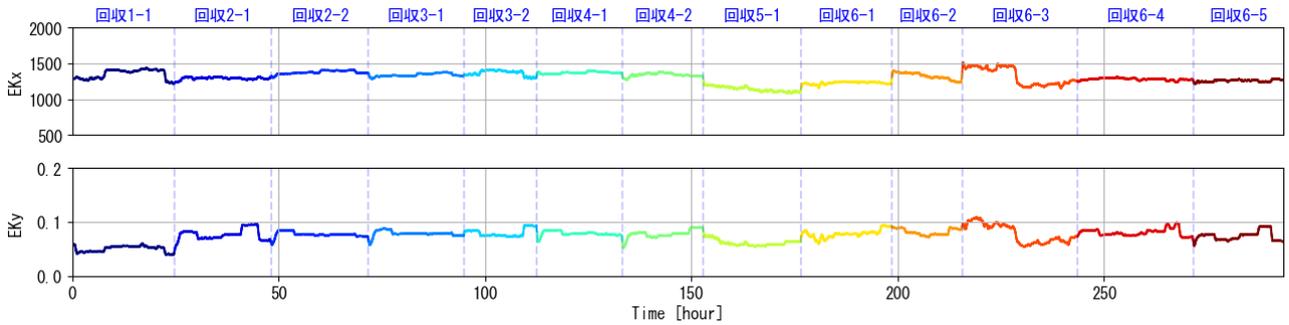


図 4.4.3 ポンプ動作モード毎の Z 軸加速度センサ出力・モータ電流・特徴量 EK_x ・ EK_y

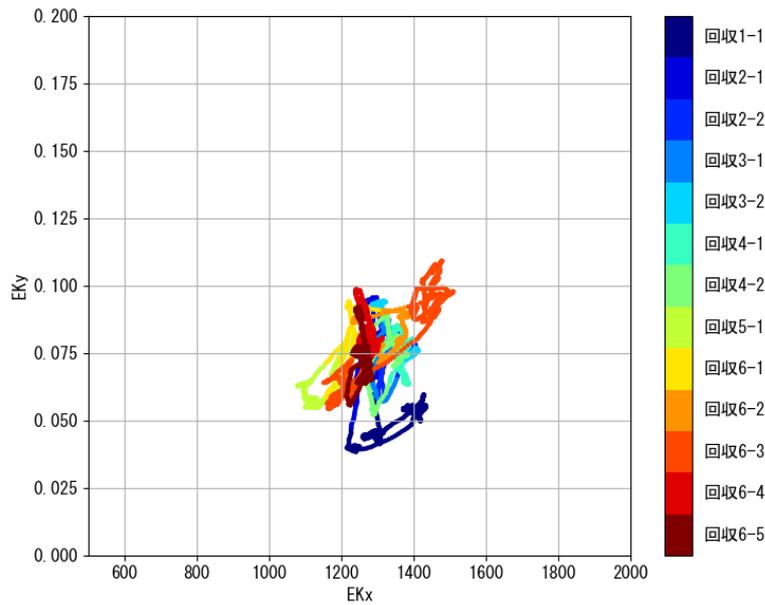
3) 状態診断に適したポンプ動作モードの特定

状態診断において異常状態を検出するためには、特徴量の激しい変化や突発的な変化による異常状態の誤検出を防ぐため、比較的長く信号変化が少ない安定した区間を使用するのが望ましい。その点において、ポンプ動作モード4はキャビテーション発生による特徴量変化が大きく、またポンプ動作モード1や3は特徴量が安定している期間はあるがポンプ運転時間に対する安定時間が短いため、状態診断には適さない。ポンプ動作モード2は長時間安定した特徴量を取得できるので、状態診断に適していると考えられる。

図4.4.4に全回収データからポンプ動作モード2のみを抽出して時間方向に結合した特徴量 $EK_x \cdot EK_y$ を示す(a:時間プロット、b: $EK_x \cdot EK_y$ の2次元プロット、回収1-1は回収1回目の1つめモード2データを表す)。図4.4.4より、特徴量は激しく変化しておらず狭い範囲に収まっていることがわかる。



(a)時間プロット



(b) $EK_x \cdot EK_y$ の2次元プロット

図4.4.4 モード動作モード2の特徴量 $EK_x \cdot EK_y$ 全波形

4) 機械学習によるモード2の推定

ここでポンプ動作モード2は人間により判断されたもので、状態診断システムにより検出する仕組みが必要となる。取得している信号(メカニカルシール測定用センサだけではなくポンプ本体のデータ含む)を調査したところ、吐出圧力信号とモータ電流信号を使用することでポンプ動作モード2が特定できることが判明した。

図4.4.5に回収3,4回目の吐出圧力とモータ電流の分布を示す。全分布(青)のうち人間が判断したポンプ動作モード2(緑)はある範囲に集中している。逆に吐出圧力とモータ電流がこの範囲に入るとポンプ動作モード2であると判断できると考えられる。吐出圧力とモータ電流がある範囲に入っている判断は機械学習モデルにより実現した。図4.4.6に機械学習モデルによるポンプ動作モード2の判定結果を示す。青が回収3,4回目の全特徴量 $E_{Kx} \cdot E_{Ky}$ 、緑が人間または機械学習モデルによって判別されたポンプ動作モード2の箇所を表す。機械学習モデルが判定したポンプ動作モード2は人間が判断するものとほぼ同等であることがわかる。

また、本機械学習モデルによって、回収された運転データの中でポンプ動作モード1から4へ判断されなかった運転データの中からもポンプ動作モード2と同等の運転データを判断可能となり、回収データの有効な活用ができると考える。

ポンプ動作モード2を有効活用してポンプにおけるメカニカルシールの状態診断が有効である事は、回収データの3~4回目のフィードバックで確認できたが、システム改修による継続したデータのフィードバックを行う事で、更にシステムとしての信頼性向上が期待できる。

補足 回収3,4回目使用理由: 回収1,2回目でポンプ動作モード2が判定に有効であることが解析により判明した。回収3回目以降より継続してポンプ動作モード2に注目してデータを取得したが、回収5回目以降は接続不良のシステム不具合により取得不可となった。

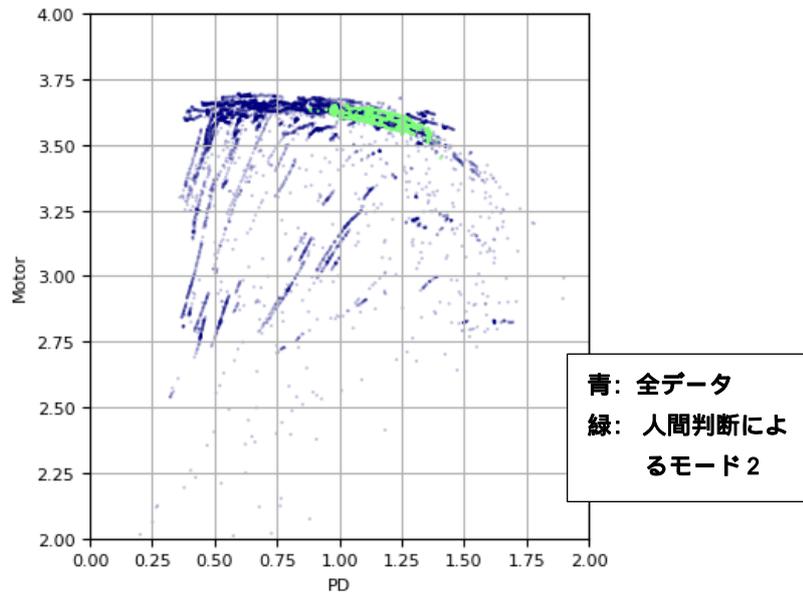
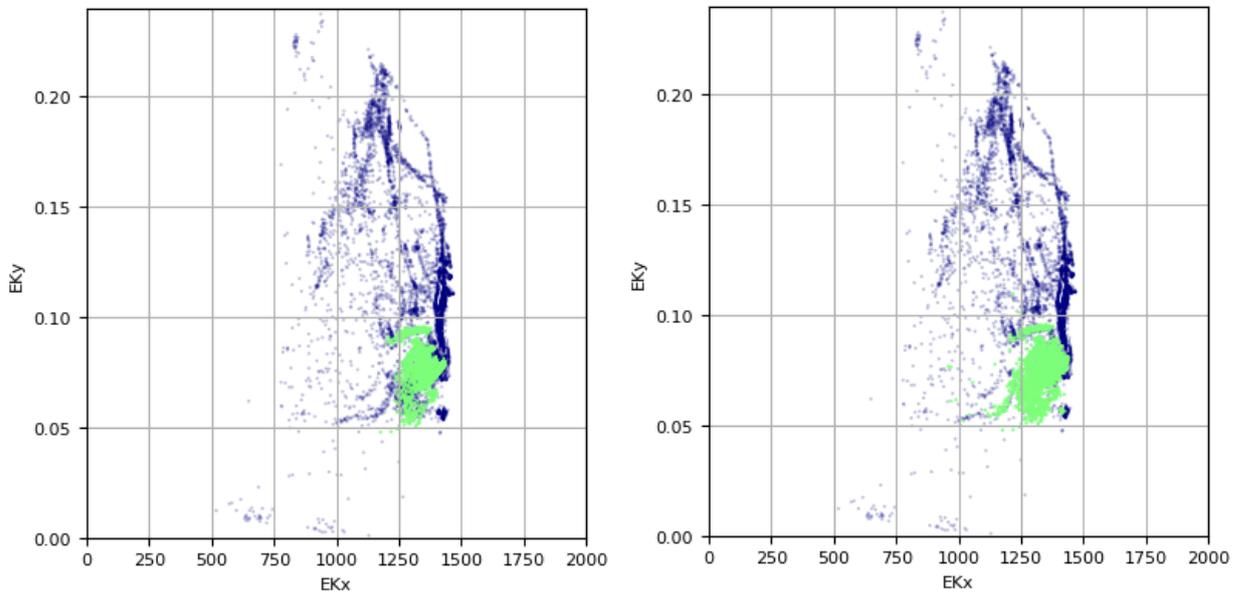


図 4.4.5 回収 3,4 回目の吐出圧力(PD)、モータ電流(Motor)分布



(a)人間判断によるモード 2(緑)

(b)機械学習モデル判定によるモード 2(緑)

図 4.4.6 機械学習モデルによるポンプ動作モード 2 の判別結果(EKx-EKy プロット)

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

1) 陸上試験機による実船データの補完

a) 試験目的

2019年度は、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各種異常運転モードでの回転試験を実施し、シールの運転状態を判定するための基礎データ取得を行った。

2019年度の計画では、陸上試験は予定されていなかったが、実船運転データの取得の補完を目的として、陸上試験によるデータ取得も行うことにした。

本試験は、シールの劣化状況の診断に必要なデータ取得のため、徐々にシールが劣化するような試験を行う。

b) 試験条件

試験条件の選定にあたり、仕様内の環境では実船含めシールの劣化までは相当の時間を要すると考えられるため、本試験では、高負荷でシールの劣化を促進させる条件(日中条件)と、データが安定し解析に適する条件(夜間条件)の2条件をサイクルで繰り返す高負荷連続回転試験を行うこととした。高負荷連続回転試験は、月～金曜日までを連続で試験し、土日の停止期間をはさんで翌月曜日から次週の試験を行っている。なお、本試験は2020年4月から2021年7月までの計54週間継続して実施し、その間シールの分解は行っていない。試験条件詳細を表4.4.4に、試験モードを図4.4.7に示す。

表 4.4.4 試験条件詳細

	静圧試験	回転試験	
		夜間条件	日中条件
流体	水		
流体温度[]	40	70	88
流体圧力[MPaG]	0.3	0.5	0.7
回転数[min^{-1}]	-	1800	
流量[L/min]	11	6	
試験時間[h]	0.5	3 or 15.5	3 or 6



図 4.4.7 1 週間の試験モード

c) 試験結果

< 運転データ >

図 4.4.8 に回転試験 1~54 週(4692 時間)全体のしゅう動面温度・トルクデータを、図 4.4.9 に代表例として 40 週目のみの運転データを示す。なお、全体運転データの赤・緑線はそれぞれ 1 分間の最大・平均値を示す。

図 4.4.9 より、夜間条件・日中条件のしゅう動面近傍の温度はそれぞれ 75~90、90~150 の範囲に分布しており、高負荷の日中条件では、しゅう動面温度に大きな振れ幅があることがわかる。

図 4.4.8 では、1 回目の日中条件ではしゅう動面温度が約 96 で安定しているが、2~4 回目のしゅう動面温度は約 100~135 になり不安定な傾向にある。

日中条件にて、特にしゅう動面温度の振れ幅が大きい理由は、日中条件の流体(水)温度が 88 設定であるため、しゅう動面間の温度が水の沸点である 100 を超える状況が発生しやすく、そのため、しゅう動面間での発熱量の大小で、良好な潤滑状態としゅう動面間に流体がなくなる状態を繰り返し、不安定な潤滑状態を示していると推測される。

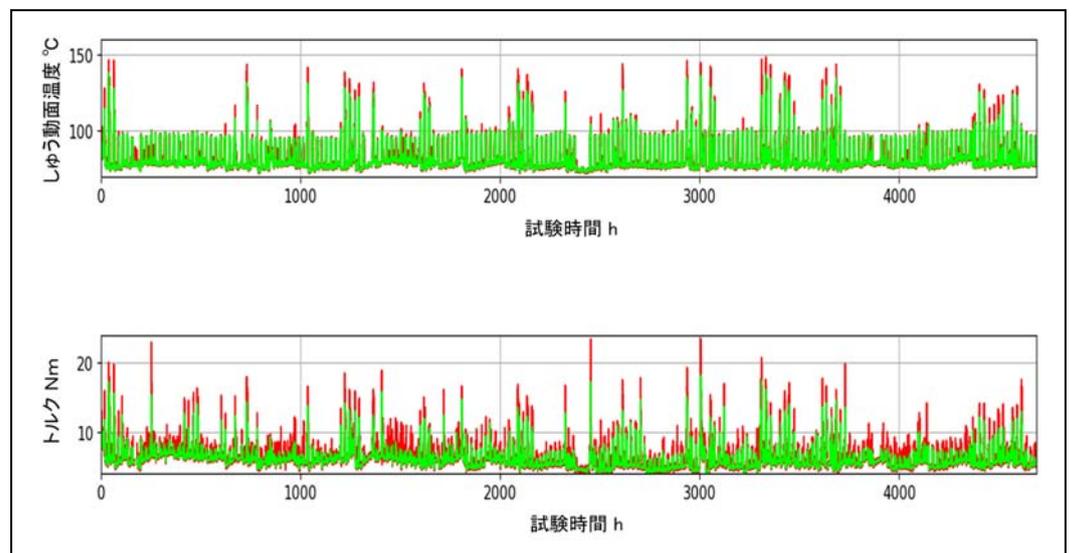


図 4.4.8 しゅう動面温度・トルクデータ

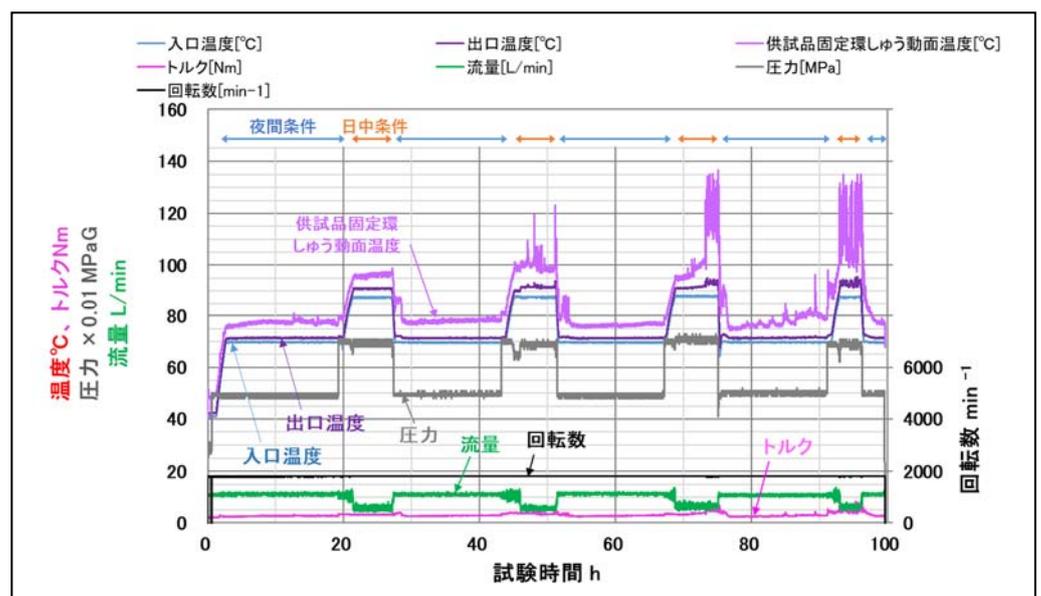


図 4.4.9 40 週目運転データ

また、日中条件の時間を省き夜間条件時間だけの加速度センサより算出した特徴量 EK_x , EK_y の推移を図 4.4.10 に示す。高負荷の日中条件を繰り返すことで夜間に取得した特徴量が変化していることがわかる。

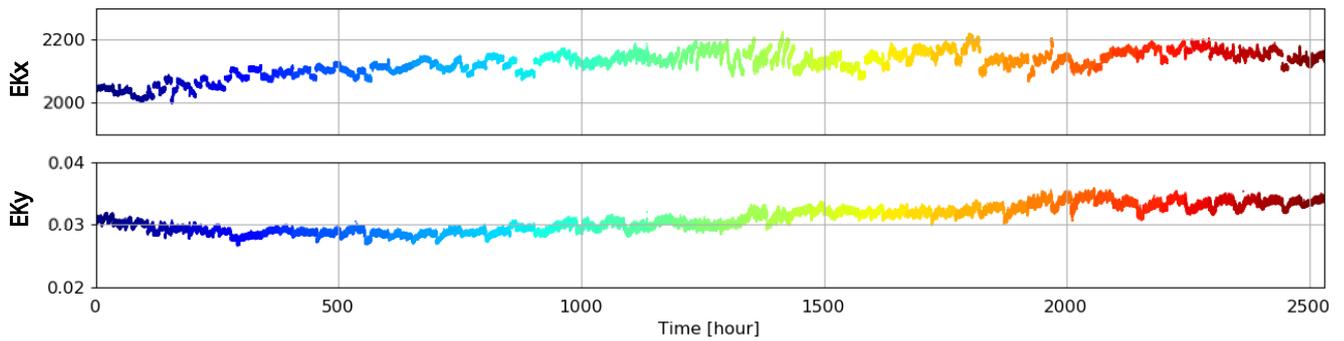


図 4.4.10 夜間条件特徴量の推移

< しゅう動面からの漏れ >

高負荷連続回転試験において、回転試験中の漏れは 1~54 週の全ての試験で確認されていない。一方、回転試験前に行う静圧試験では 17 週以降の試験で漏れが検出されている。しゅう動面からの漏れ状況及び計測方法の写真を図 4.4.11 に、静圧試験での漏れ量の推移を図 4.4.12 に示す。

図 4.4.12 より、17 週目以降の静圧時漏れ量は各週で増減を繰り返している。漏れの推移を明瞭にするため、図 4.4.12 には過去 5 週の漏れの移動平均近似線を加えているが、近似線で判断すると漏れ量が徐々に増加していく傾向が明らかであり、試験時間の増加と共にシール性能の低下が進んでいると推測される。

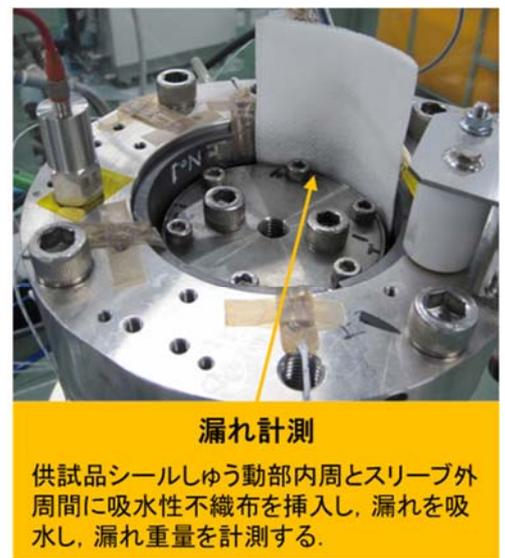


図 4.4.11 静圧試験漏れ及び計測方法

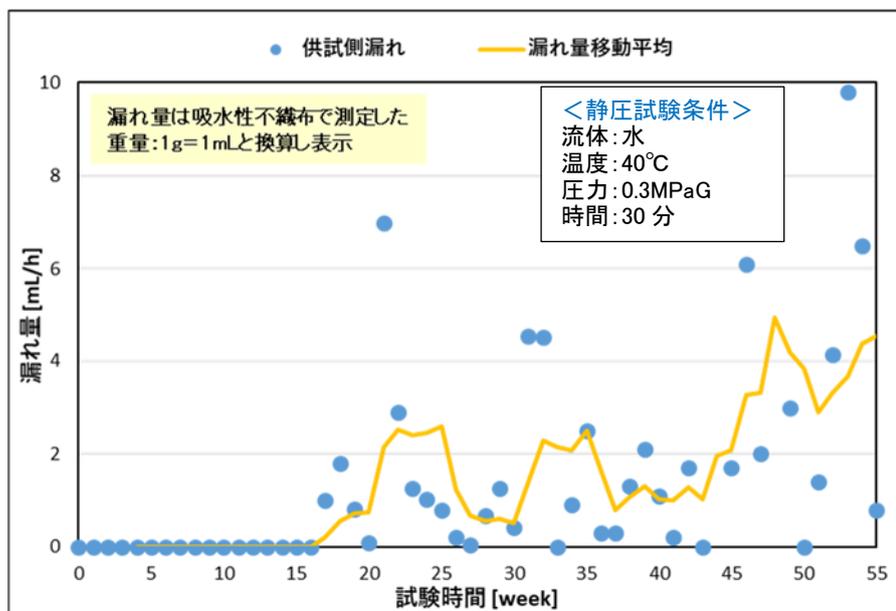


図 4.4.12 試験前静圧試験漏れ量

d) 試験後のメカニカルシール状態

54 週の試験終了後にメカニカルシールを分解し、状態の確認を行った。

<しゅう動面外観・形状>

試験後の供試メカニカルシールのしゅう動面外観写真を図 4.4.13 (左：しゅう動材リング全体、右：マーキング部拡大)に、接触式表面粗さ計によるしゅう動面形状(計測場所はリング全体の各点に対応)測定結果を図 4.4.14 に示す。

図 4.4.13、4.4.14 より、カーボン回転環には深い条痕が多数発生し、SiC 固定環も面荒れ発生とともに約 $4.5 \mu\text{m}$ ほどの深さの摩耗が認められている。

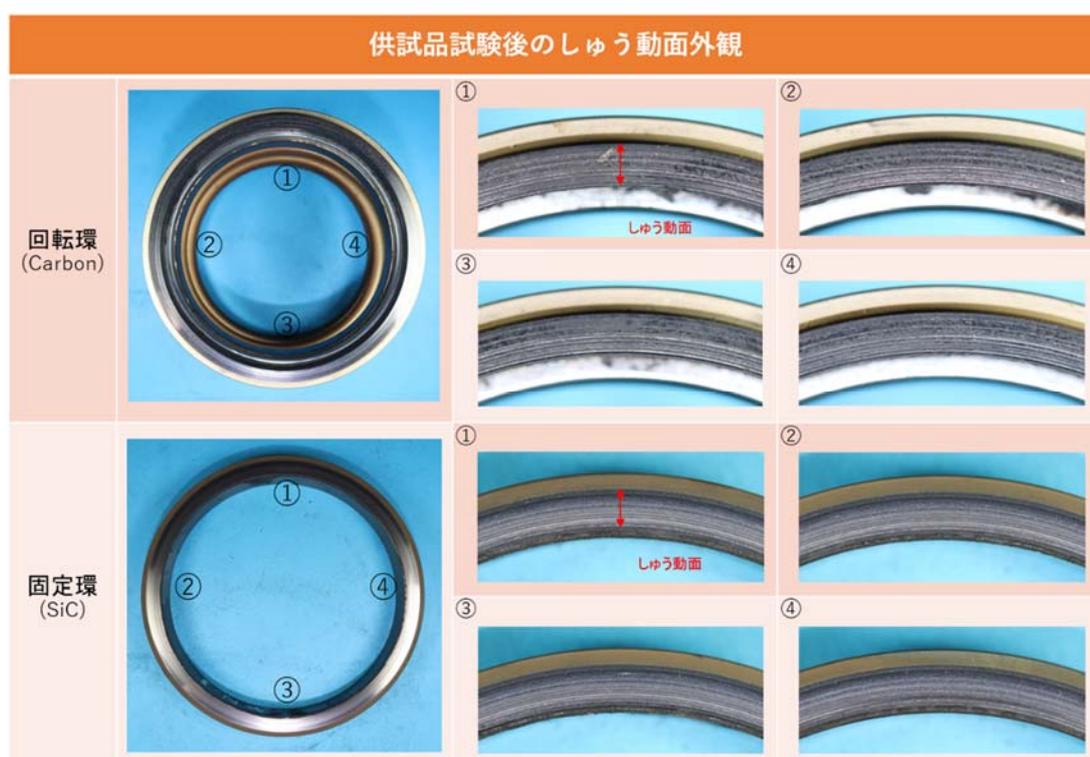


図 4.4.13 しゅう動面外観

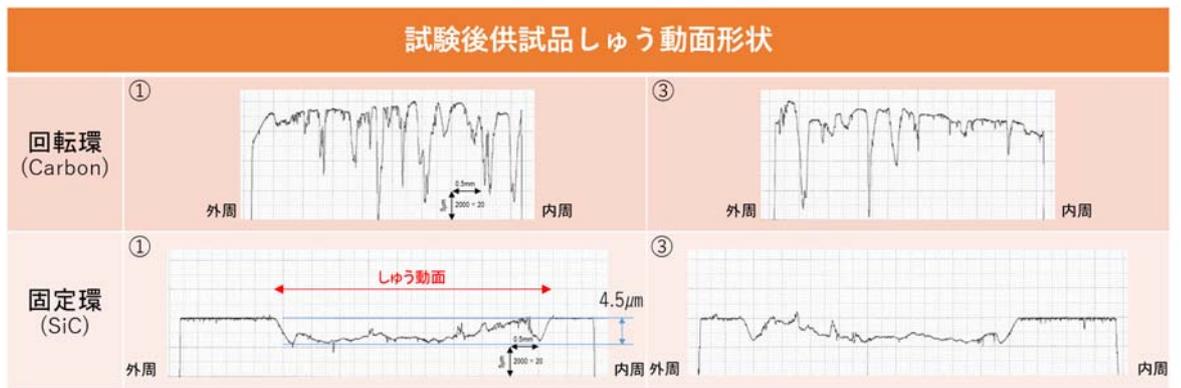


図 4.4.14 しゅう動面形状

< カーボン回転環ノーズ摩耗量 >

メカニカルシール回転環(Carbon)はシール面全体が接触して摩耗するため、試験後の形状から部分的な摩耗(凹み)は計測出来るが、全体の摩耗量を求めることは出来ない。そのため摩耗量は、試験前後のしゅう動材のノーズ高さ(金属部材から Carbon の突出している寸法)を変化量より求める。

摩耗量の計測結果を表 4.4.5 に示す。カーボンしゅう動材の摩耗量の4点平均は0.479mmであった。また、4点の測定位置の摩耗量の最大と最小値には0.268mmの違いがあり、偏摩耗が発生した。

表 4.4.5 回転環のノーズ摩耗量

測定位置	摩耗量 [mm]
	0.350
	0.372
	0.618
	0.574
平均	0.479

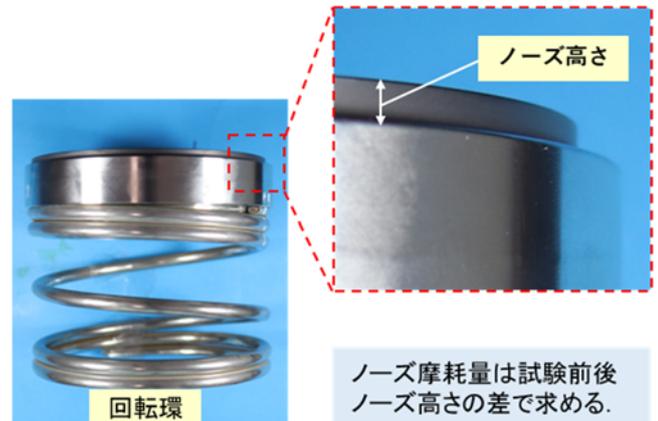


図 4.4.15 回転環ノーズ部

< 回転側しゅう動部材の動作不良 >

供試シールは、回転環と結合されたワンコイルスプリングを組み込み時に圧縮して、しゅう動面に押し付け荷重を発生させる構造となっており、スプリングを圧縮するスラスト方向の拘束力が無ければスプリングは伸びきった状態(自由長状態)となるのが通常である。

本試験後の分解途中の回転環及びスプリングの外観写真を図 4.4.16 右図に示すが、写真の状態ではスラスト方向への荷重が加わっていないにもかかわらず、供試側のメカニカルシールはスプリングが自由長まで伸びなかった。よって、図 4.4.17 に示すように試験運転中に作動0リングまたはスプリングが固着し、シールの作動不良が発生していると考えられる。

回転側しゅう動材の作動不良は、しゅう動面の押し付け荷重に不均一性をもたらすため、カーボン偏摩耗の一つの要因としてシールの作動不良が考えられる。



図 4.4.16 スリーブ (治具) 上への回転環取り付け状態

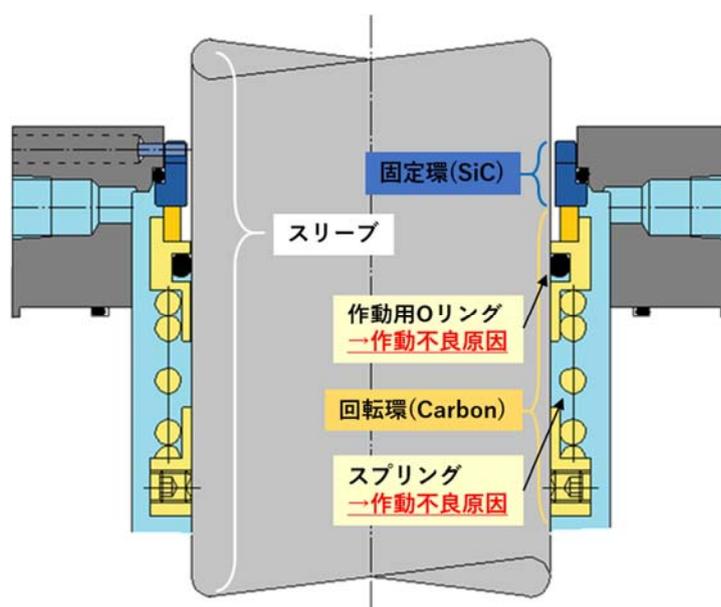


図 4.4.17 しゅう動材作動不良原因

e) まとめ

陸上試験機による高負荷連続回転試験は、長期間のメカニカルシール運転により、シールに異常を発生させ、その時までのデータを取得することを目的として実施している。

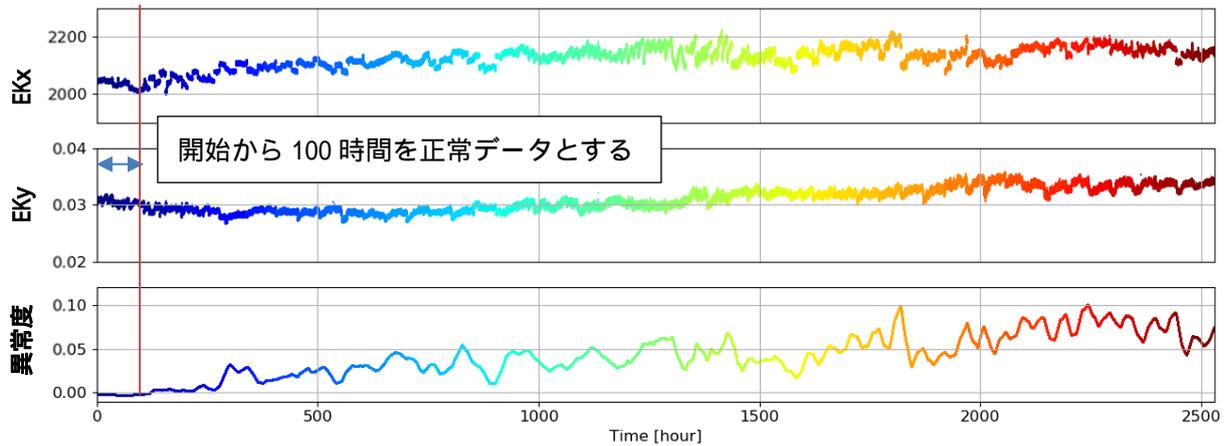
試験では、主に高負荷の日中条件時にシールの潤滑が不安定な状態を引き起こすことで、17週目の静圧試験よりメカニカルシールの漏れが発生するとともに、分解後のシールにはFTAで漏れの要因と定義したしゅう動材の異常摩耗、作動不良を発生させることができ、本試験ではシールの状態診断に有用なデータの取得が出来たと判断している。

2) 状態診断アルゴリズムの説明

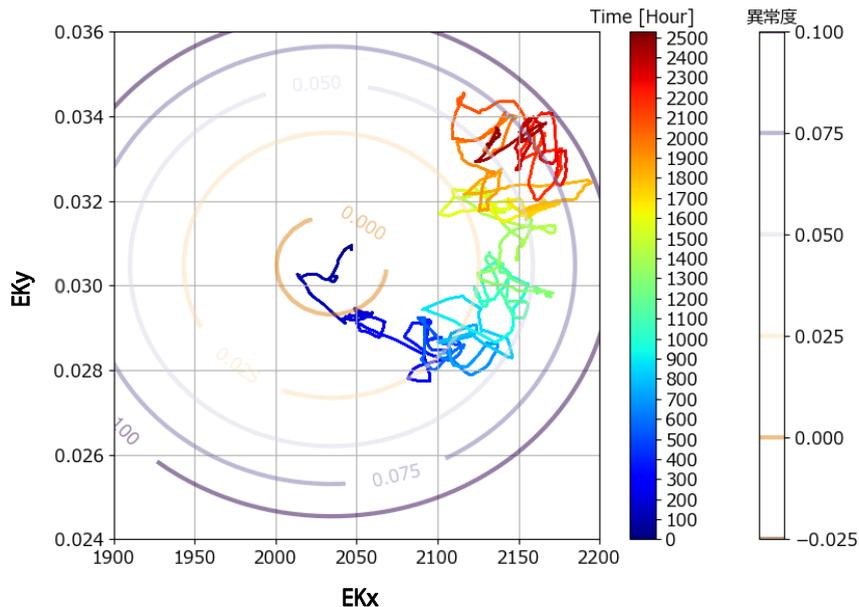
a) 機械学習モデルによる異常度の作成

状態診断の手段として、特徴量 $EKx \cdot EKy$ の変化を捉える機械学習モデルを使用した。機械学習モデルは教師なし学習手法を採用し特徴量空間($EKx \cdot EKy$)のある範囲を正常データとして作成し、作成された機械学習モデルは新たな特徴量データから異常度を出力する。異常度は正常範囲からの逸脱度を表しており、負値が正常、正值が異常で値が大きいほど正常範囲よりかけ離れた状態になっていることを示す。

前述の高負荷連続回転試験データを用いて機械学習モデルを作成し異常度を評価した。正常データとして試験開始から 100 時間分の特徴量を使用した。作成された機械学習モデルに全データを入力し異常度を特徴量と共にプロットしたものを図 4.4.18(a) に示す。また特徴量 $EKx \cdot EKy$ を縦軸・横軸として異常度を等高線としてプロットしたものを図 4.4.18(b) に示す。等高線の中央が正常範囲で値が 0 の等高線を超えて外側に向かうほど異常度が高いことを示している。このようにシールの劣化を進行させるに従い異常度が上昇し、シール状態が異常に向かって進んでいることが捉えられている。



(a)時間軸プロット



(b)EKx-EKy プロット

図 4.4.18 高負荷連続回転試験データにおける異常度の推移

b) 異常進行度予測モデルの作成

実船状態診断システムでは最適な交換時期を提示するため、異常の進行度や故障までの残された時間を予測する必要がある。そのためには実際のデータからメカニカルシールの状態と異常度の関係を把握する必要があるが、現段階では実船のデータが不足しているため高負荷連続回転試験データを使用することとした。

異常進行度の予測モデルの概要を図 4.4.19 に示す。異常度 100%を 0.1 と定義し(高負荷連続回転試験データの最終異常度から)、過去蓄積された異常度の多項式近似から異常進行度と故障までの時間を推定する。異常度 100%は今後蓄積されるメカニカルシール異常状態と異常度の蓄積から最適な値を決定する。

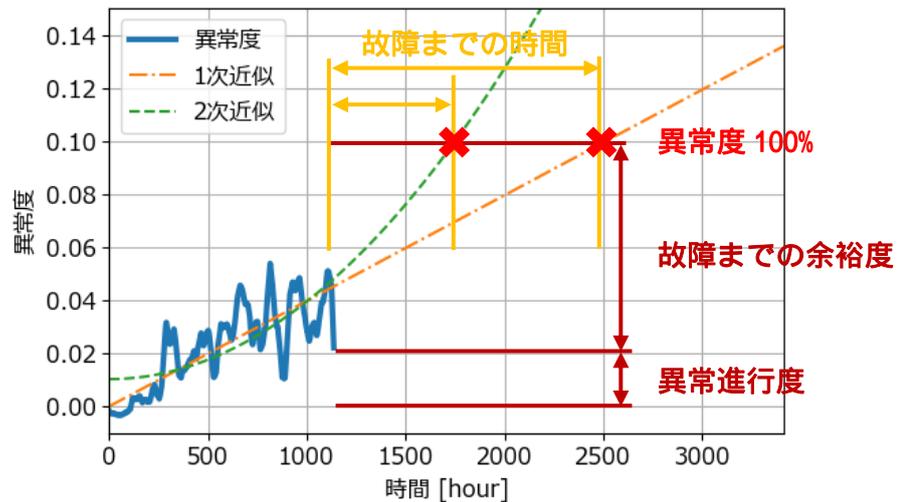


図 4.4.19 最新データ取得時における異常度 100%までの異常進行度と故障までの時間

本予測モデルを高負荷連続回転試験データに適用したものを図 4.4.20 に示す。図中段が異常進行度を表し、異常度が大きくなった際に異常進行度が進む(大きくなる)ことがわかる。また図下段は故障までの時間を表しており、異常度が大きくなった際に減少していることが確認できる。また、異常進行度が減少し、故障までの時間が増える逆転箇所が見られるが(例えば 1800 時間付近)、メカニカルシールの状態が異常状態から正常状態へ回復したことで異常度が小さくなり異常進行度・故障までの時間が回復したことを示している。

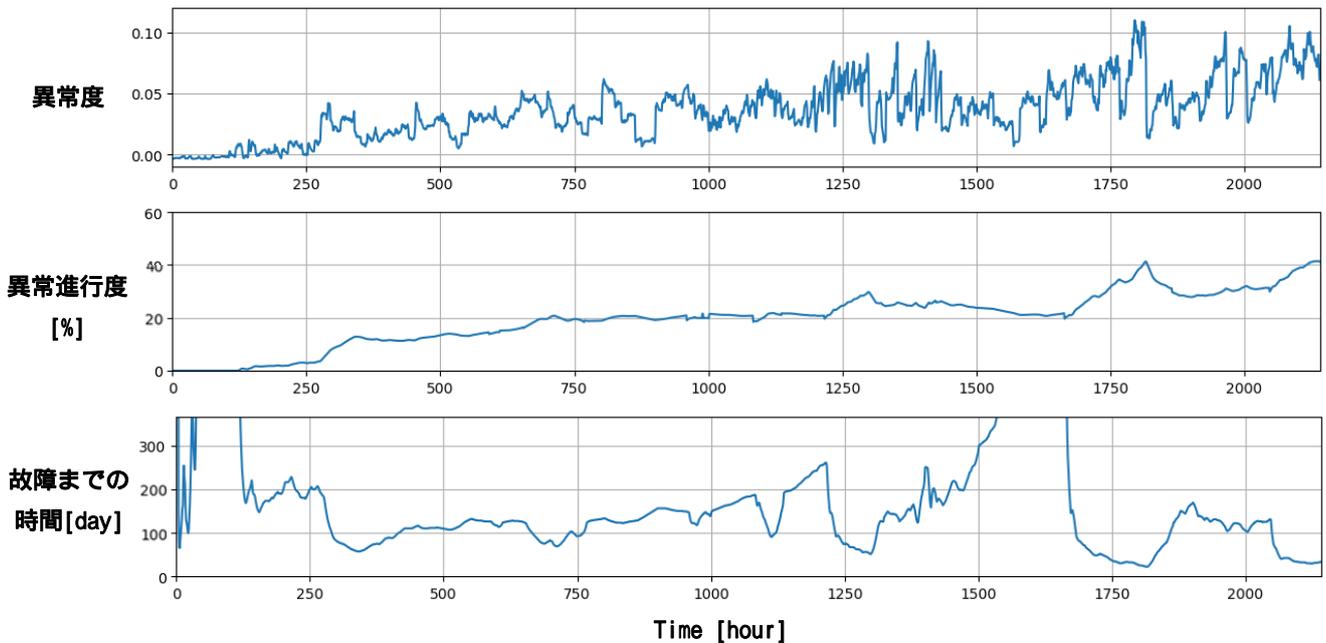


図 4.4.20 高負荷連続回転試験データにおける異常進行度と故障までの時間

c) 状態診断アルゴリズム

以上をまとめた状態診断アルゴリズムを下記に示す．準備で正常データから機械学習モデルを作成し、運用では作成された機械学習モデルで異常度を出力し、予測モデルで異常進行度を予測する．

[準備]

0. OK データを定義して機械学習モデルを作成する．

[運用]

1. 加速度センサデータから特徴量 $E_{Kx} \cdot E_{Ky}$ を出力する．
2. 特徴量から機械学習モデルが異常度を出力する．
3. 過去の一定時間の異常度から予測モデルで異常進行度・故障までの時間を予測する．

d) 異常運転模擬試験での評価

状態診断アルゴリズムを 2019 年度に行った異常運転模擬試験に適用した．ただし、異常運転模擬試験は過渡試験ではないため異常進行度・故障までの時間を予測する部分は省き、下記のような評価を行った．

[準備]

0. OK データを正常運転模擬試験データ(約 200 時間)として機械学習モデルを作成

[評価]

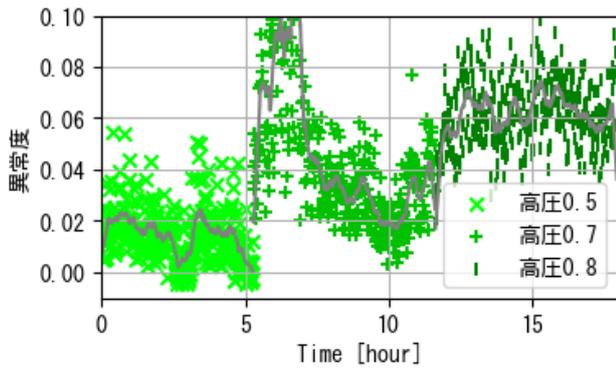
1. 加速度センサデータから特徴量 $E_{Kx} \cdot E_{Ky}$ を出力する
2. 特徴量から機械学習モデルが異常度を出力する．
3. 異常度平均が正の値になっているかで異常状態を検出しているかを確認する．

表 4.4.6 に状態診断アルゴリズムによる異常検出結果を、図 4.4.21 に各異常模擬試験における異常度プロットを示す。本異常度による状態診断アルゴリズムによってすべての異常運転模擬試験中に異常度平均が正の値となり、模擬試験中は正常状態と異なる状態であることを判定できていることがわかった。

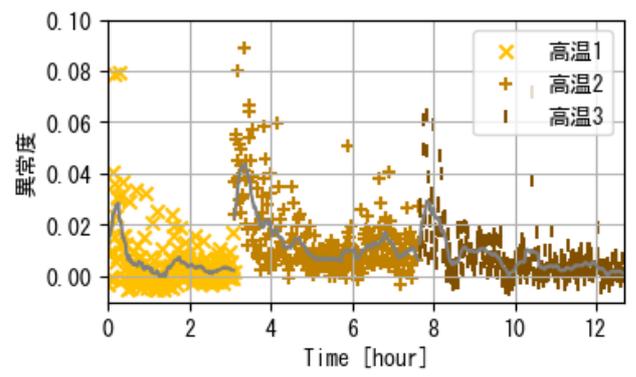
表 4.4.6 の模擬試験結果はメカニカルシールで予期される故障モードの内 79%(図 4.2.5 FTA 図における異常要因 14 件の内 11 件。異物混入模擬試験は供試品・試験機が異なるため含めていない)においてすべて検知可能であることを示している。よって本アルゴリズムを用いることで 75%以上のメカニカルシール故障モードを検知可能であることが確認できた。

表 4.4.6 各異常状態模擬試験における状態診断アルゴリズムによる異常度平均

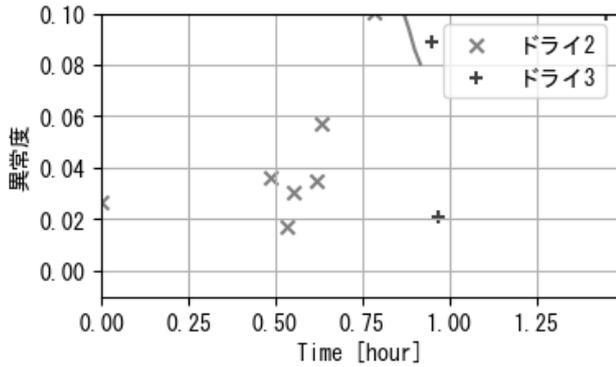
試験種類	試験略称	データ時間 [hour]	異常度平均
高圧運転模擬試験(0.5MPaG)	高圧 0.5	5.3	0.0148
高圧運転模擬試験(0.7MPaG)	高圧 0.7	6.3	0.0460
高圧運転模擬試験(0.8MPaG)	高圧 0.8	6.3	0.0617
高温運転模擬試験(No1)	高温 1	3.1	0.0062
高温運転模擬試験(No2)	高温 2	4.6	0.0149
高温運転模擬試験(No3)	高温 3	5.0	0.0079
ドライ運転模擬試験(No2)	ドライ 2	0.9	0.2058
ドライ運転模擬試験(No3)	ドライ 3	0.6	58.3910
フラッシング不足模擬試験(No1)	フラ不足 1	6.3	0.0389
フラッシング不足模擬試験(No2)	フラ不足 2	6.0	0.0417
取付けミス模擬試験(スペーサ 3mm)	取付長 3	5.8	0.0491
取付けミス模擬試験(スペーサ 20mm)	取付長 20	5.5	0.0460
取付けミス模擬試験(偏心 No1)	偏心 1	6.3	0.0360
取付けミス模擬試験(偏心 No2)	偏心 2	2.7	0.6432
取付けミス模擬試験(面傾き No1)	傾斜 1	0.7	0.0143
取付けミス模擬試験(面傾き No2)	傾斜 2	5.7	0.0209
エア残留状態模擬試験(エア No1)	エア 1	2.4	0.1081
エア残留状態模擬試験(エア No2)	エア 2	4.3	0.0883
エア残留状態模擬試験(エア No3)	エア 3	0.1	0.2154



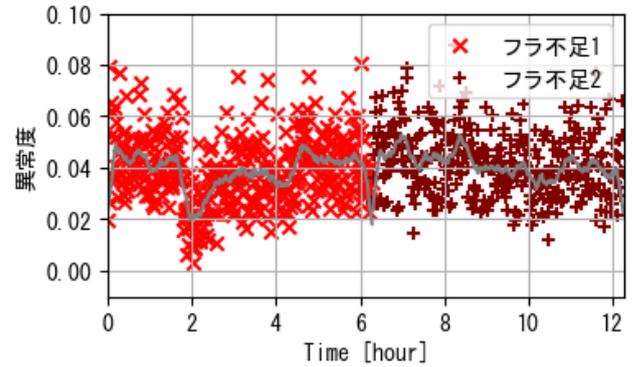
(a) 高圧運転模擬試験



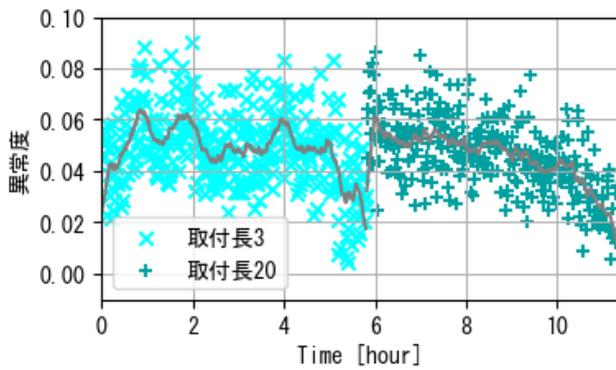
(b) 高温運転模擬試験



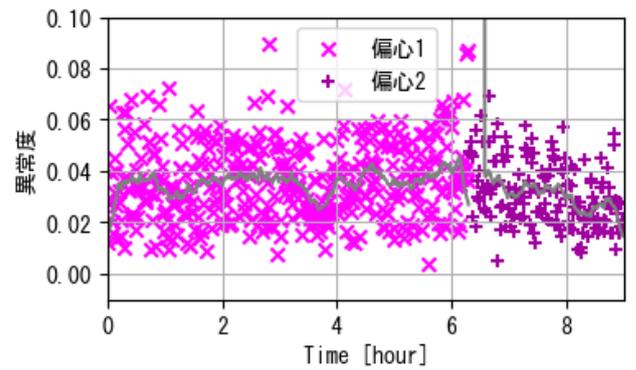
(c) ドライ運転模擬試験



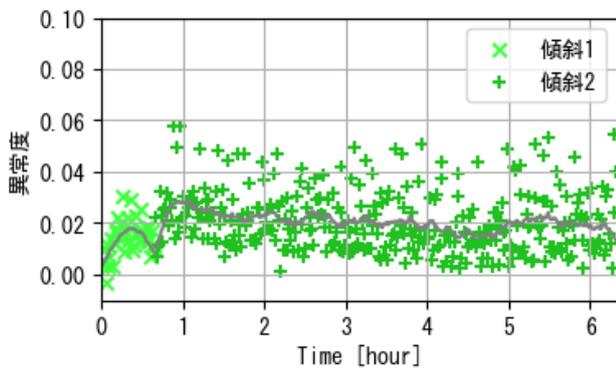
(d) フラッシング不足模擬試験



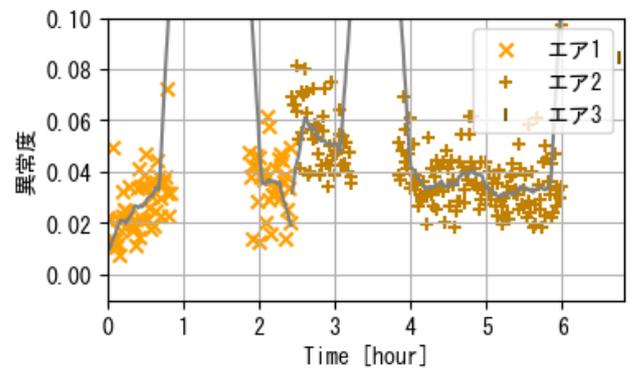
(e) 取付ミス模擬試験(スペーサ)



(f) 取り付けミス模擬試験(偏心)



(g) 取付ミス模擬試験(面傾き)



(h) エア残留状態模擬試験

図 4.4.21 各異常状態模擬試験における状態診断アルゴリズムによる異常値プロット

3) 状態診断アルゴリズムの実船データへの適用

a) 状態診断アルゴリズムの実船対応

前項で示した状態診断アルゴリズムにポンプ動作モード2の推定を含めた実船向け状態診断アルゴリズムは下記ようになる。

【実船向け状態診断アルゴリズム】

[準備]

0. OK データを定義して機械学習モデルを作成．メカニカルシール使用開始からの一定期間を OK データとする．

[運用]

1. 吐出圧力・モータ電流からポンプ動作モード2であることを判断する．
2. 加速度センサデータから特徴量 EK_x ・ EK_y を出力する．
3. 特徴量から機械学習モデルが異常度を出力する．
4. 過去の一定時間の異常度から予測モデルで異常進行度・故障までの時間を予測する．

b) 状態診断アルゴリズムの実船データへの適用

上記実船向け状態診断アルゴリズムを実船データに適用したものを図

4.4.22 に示す．OK データは回収3,4 回目データを使用した．実船データにおいても異常度が大きくなった際に異常進行度が進み(中段)、故障までの時間は減少している(下段)ことが確認できる．

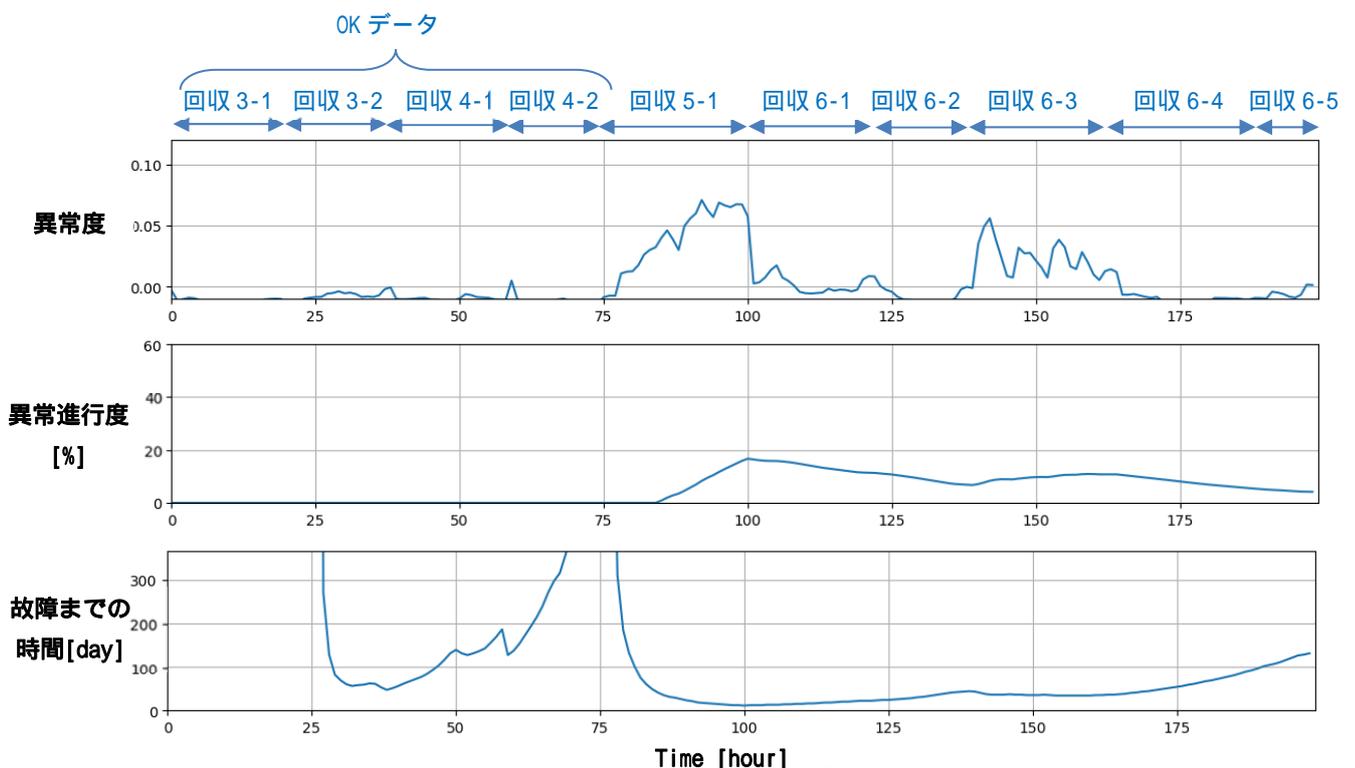


図 4.4.22 実船データポンプ動作モード2における異常進行度と故障までの時間

- b) 取得した各種センサデータを用いた状態診断と結果の画面表示
 状態診断ソフトウェア画面(図 4.4.24)に新たに追加される機能一覧を表 4.4.7
 に示す。

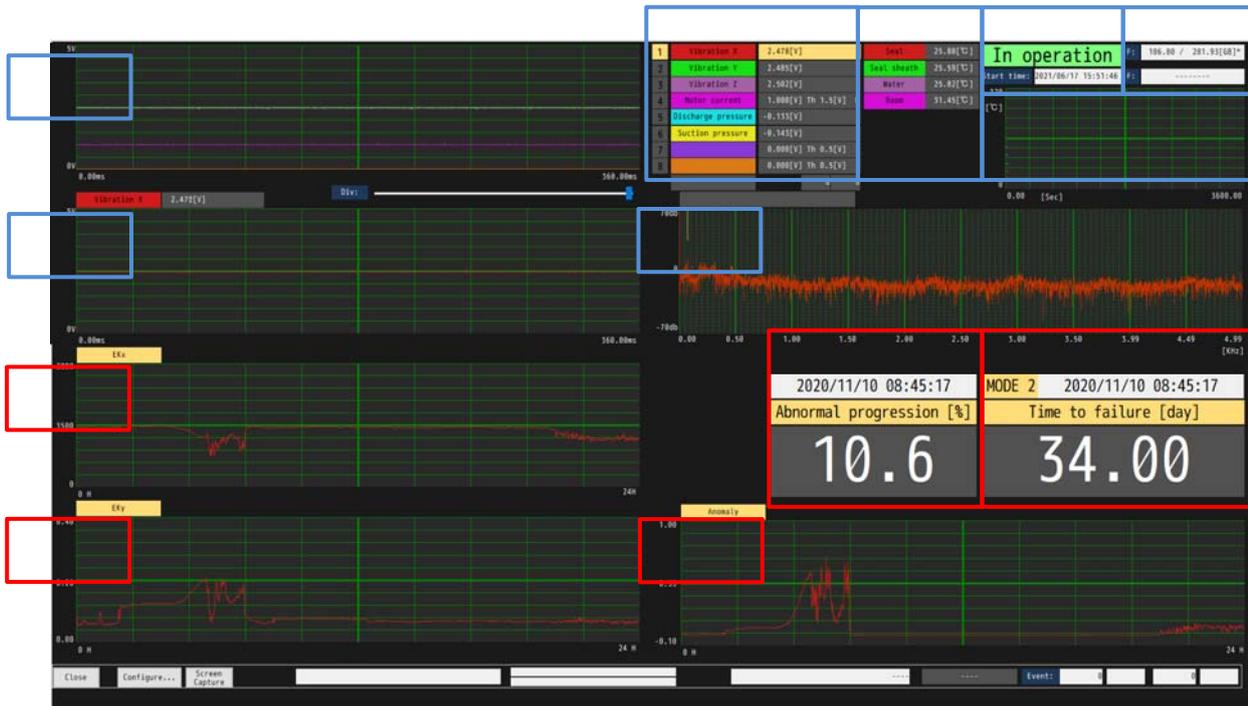


図 4.4.24 ソフトウェア画面

表 4.4.7 収録ソフトウェア機能一覧

機能名	機能説明						
特徴量 EKx グラフ	で選択した加速度 XYZ 軸 1ch の特徴量 Ekx を直近 24 時間で表示する <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>CH1</td> <td>加速度 X 軸 EKx</td> </tr> <tr> <td>CH2</td> <td>加速度 Y 軸 EKx</td> </tr> <tr> <td>CH3</td> <td>加速度 Z 軸 EKx</td> </tr> </table>	CH1	加速度 X 軸 EKx	CH2	加速度 Y 軸 EKx	CH3	加速度 Z 軸 EKx
CH1	加速度 X 軸 EKx						
CH2	加速度 Y 軸 EKx						
CH3	加速度 Z 軸 EKx						
特徴量 EKy グラフ	で選択した加速度 XYZ 軸 1ch の特徴量 Eky を直近 24 時間で表示する <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>CH1</td> <td>加速度 X 軸 EKy</td> </tr> <tr> <td>CH2</td> <td>加速度 Y 軸 EKy</td> </tr> <tr> <td>CH3</td> <td>加速度 Z 軸 EKy</td> </tr> </table>	CH1	加速度 X 軸 EKy	CH2	加速度 Y 軸 EKy	CH3	加速度 Z 軸 EKy
CH1	加速度 X 軸 EKy						
CH2	加速度 Y 軸 EKy						
CH3	加速度 Z 軸 EKy						
異常度グラフ	で選択した加速度 XYZ 軸 1ch の異常度を直近 24 時間で表示する <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>CH1</td> <td>加速度 X 軸 異常度</td> </tr> <tr> <td>CH2</td> <td>加速度 Y 軸 異常度</td> </tr> <tr> <td>CH3</td> <td>加速度 Z 軸 異常度</td> </tr> </table>	CH1	加速度 X 軸 異常度	CH2	加速度 Y 軸 異常度	CH3	加速度 Z 軸 異常度
CH1	加速度 X 軸 異常度						
CH2	加速度 Y 軸 異常度						
CH3	加速度 Z 軸 異常度						
異常進行度 [%]	異常進行度を数値表示する						
故障までの時間 [日]	故障までに時間は日単位で表示する						

については 4.4.2 2) 参照

c) ポンプ側収録用 P C 経由でメール配信機能

状態診断内容をリアルタイムに確認する為、1 時間毎に状態診断データファイルを保存し、ポンプ側経由で状態診断データをメール送信する機能を追加した。

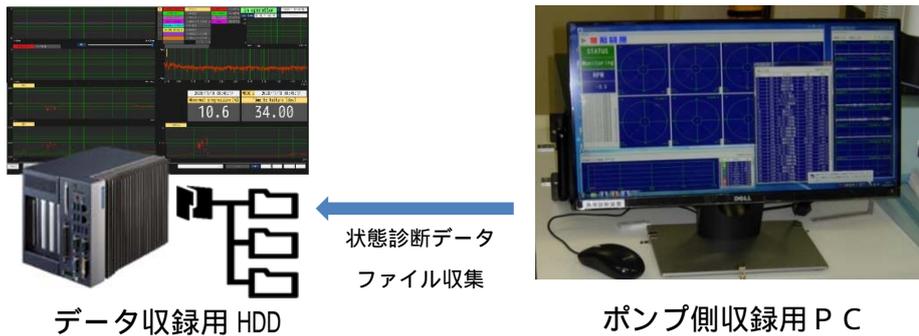


図 4.4.25 状態診断ファイルの受け渡し図

受け渡す状態診断のデータ構成を、表 4.4.8 に示す

表 4.4.8 状態診断転送データ構成

項目	データ
データ列	計測時刻
	EKx EKy EKz データ
	異常度
	異常進行度
	故障までの時間
	ポンプ動作モード 2 の判定値
	各種温度 (シール・水温・室温)
	ポンプ側モータ電流
	ポンプ側吐出圧力
総列数	5 列
1 時間 最大行数	360 行
データ桁数	17 桁 (浮動小数点)
1 時間 データサイズ	非圧縮時 32kB (圧縮時 約 7kB)

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

4.5.1 データ受信側の装置製作

1) データ受信側の装置の構成

実証船から定期的に配信されるデータを自動でデータベースに登録し、データをグラフ化およびデータベースを管理するための装置を製作した。

外観を図 4.5.1、構成を図 4.5.2 に示す。

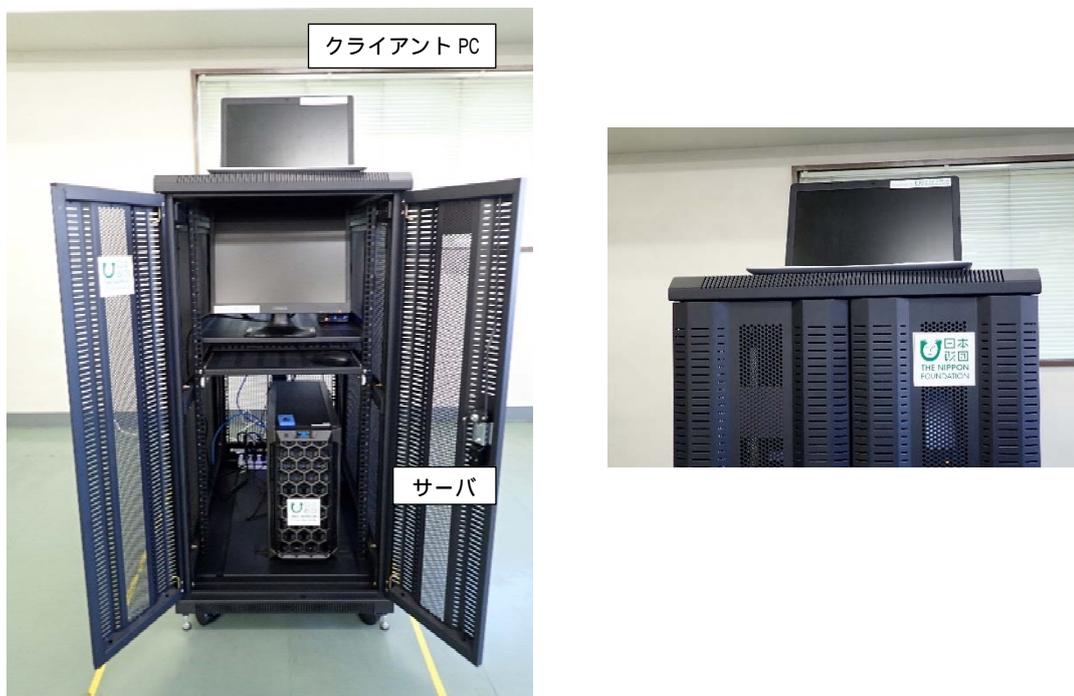


図 4.5.1 データ受信側の装置の外観

図 4.5.2 中の、青実線は既存のデータ処理経路、赤実線は新たに製作したデータ処理経路になる。

既存の処理では、実船でデータファイルを圧縮処理し ZIP ファイルで送信したものを受け取るまでの処理だったが、2020 年度の実施内容はサーバにデータベースを構築しそのデータを利用して船陸間の情報共有化を可能とするものとした。

登録されたデータは定期的に NAS (Network Attached Storage) にバックアップを行う。NAS では RAID1 (Redundant Arrays of Inexpensive Disks) で、冗長性を持たせて運用している。

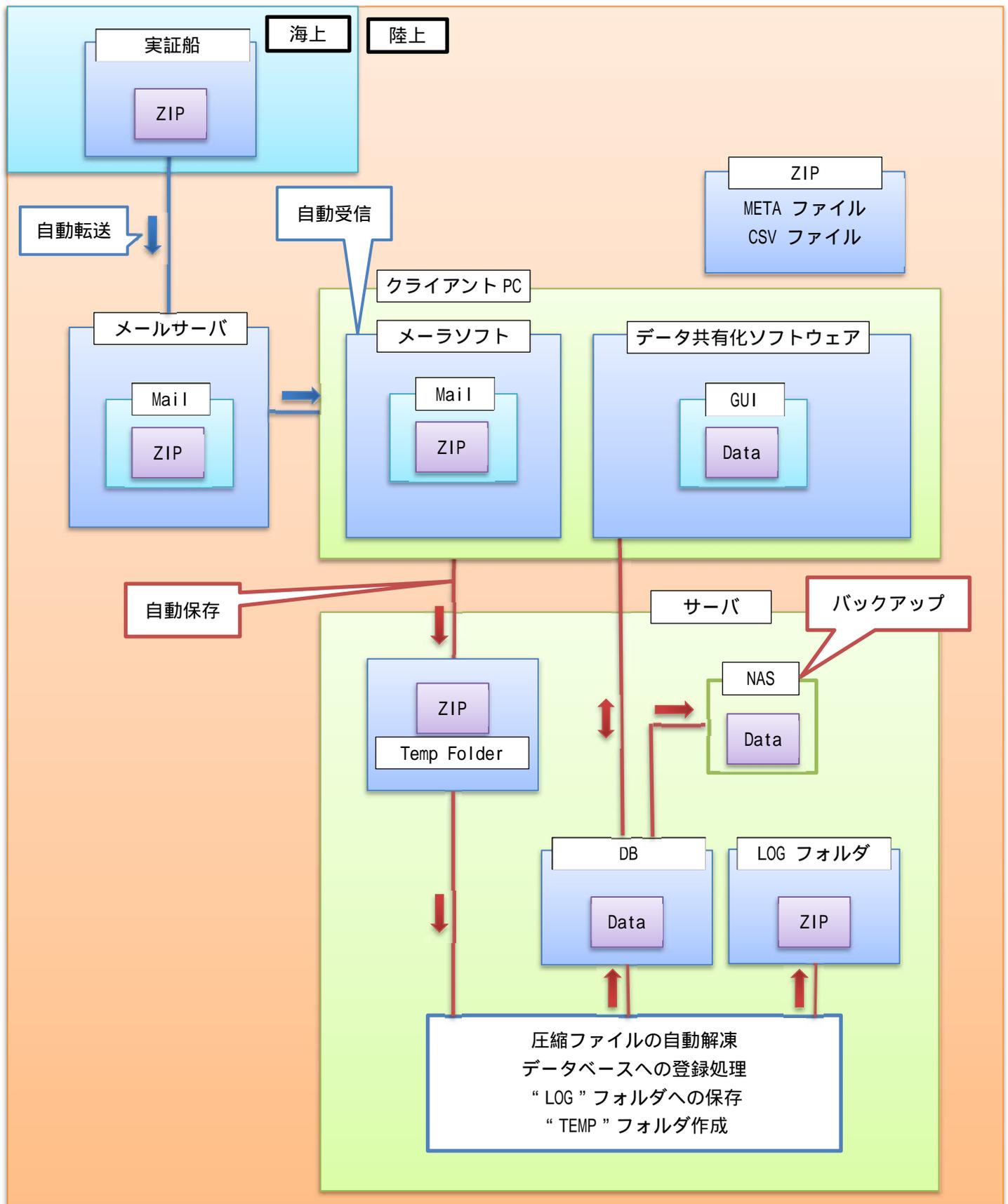


図 4.5.2 データ受信側の装置の構成

4.5.2 データ転送量の最適化

1) 既存の転送データ構成及びデータ量

実証船ではポンプ特徴量を捉えるためのセンサを設置し、全センサ信号について一次解析後、データを実船内の HDD に保管している。

転送データは、実証船にて収録しているデータのうち、トレンドデータ、ベクトルデータについて、転送データ量軽減のため、ポンプ稼働/停止の判定を行いポンプ稼働状態のみを抜き出したデータである。転送データは一時間ごとに陸上に送信し、1日最大24回送信を行っている。

既存のデータ構成を、表 4.5.1 に示す。

表 4.5.1 既存の転送データ構成

項目	データ
データ列	計測時刻
	トレンドデータ
	ベクトルデータ
総列数	52 列
1 時間 最大行数	360 行
データ桁数	10 桁 (浮動小数点)
1 時間 データサイズ	非圧縮時 187kB (圧縮時 87kB)

2) 最適化後の転送データの構成及びデータ量

診断に必要なデータおよびデータの基本ステータスを入れたメタデータファイルの構成で最適化を行った。検討結果を表 4.5.2 に示す。

条件 1 では既存の転送データに加え加速度センサの周波数成分のうち 1N~6N (N は回転同期周波数、数字は次数を表す) の数値を追加し、診断において優先度の低いデータ列を削除した。これにより 52 列から 30 列に最適化を行った。

条件 2 では条件 1 に加え加速度センサの軸数を 3 軸から 1 軸へ減らした。これによりデータ列を 24 列に最適化を行った。

表 4.5.2 転送データ量検討

項目	条件 1	条件 2
データ列	計測時刻	計測時刻
	トレンドデータ	トレンドデータ
	ベクトルデータ	ベクトルデータ
	特徴量 (1N~6N 成分)	特徴量 (1N~6N 成分)
加速度センサ	3 軸	1 軸
総列数	30 列	24 列
1 時間 最大行数	360 行	360 行
データ桁数	10 桁 (浮動小数点)	10 桁 (浮動小数点)
1 時間 データサイズ	107kB	87kB
メタデータファイル	1kB	1kB
圧縮時データサイズ	47kB	38kB
圧縮率	44%	44%
最大転送量 (1 日)	1.1MB	0.89MB

本事業の最終目標である“船陸間で共有するデータ量 1MB / 日以下”を達成するためには条件 2 での最適化を行う必要がある。

3) 最適化後のデータ検証

図 4.5.4 は計測している各信号（DCSP...吸込圧、DCTP...全揚程、A...電流値、AX (Y、Z) ...加速度）およびマハラノビス距離（maha）^{1) 2)}の相関行列を示した図である。相関行列の見方を図 4.5.3 に示す。

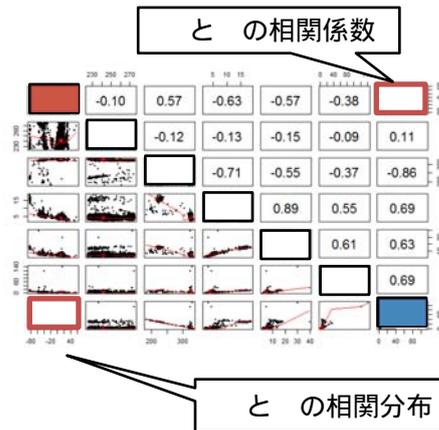


図 4.5.3 相関行列の見方

マハラノビス距離は状態を示す係数として用いている。図中の数値は、相関係数 r である。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 かなり強い相関あり
- | 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

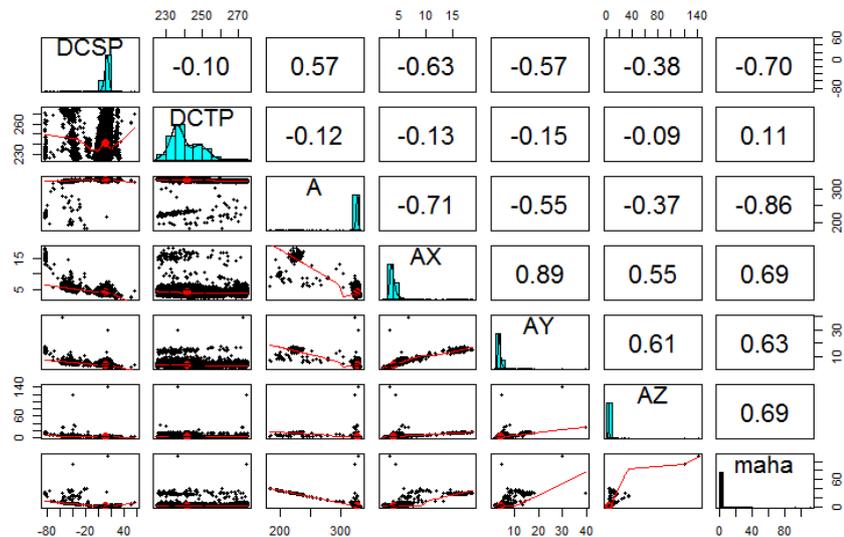


図 4.5.4 相関行列 (条件 1) ⁴⁾

AZ はポンプ性能を示す DCSP、DCTP、A との相関係数が低く、AX と AY の相関関係が高い。そのため、AY と AZ を除いた相関行列（条件 2）を図 4.5.5 に示す。

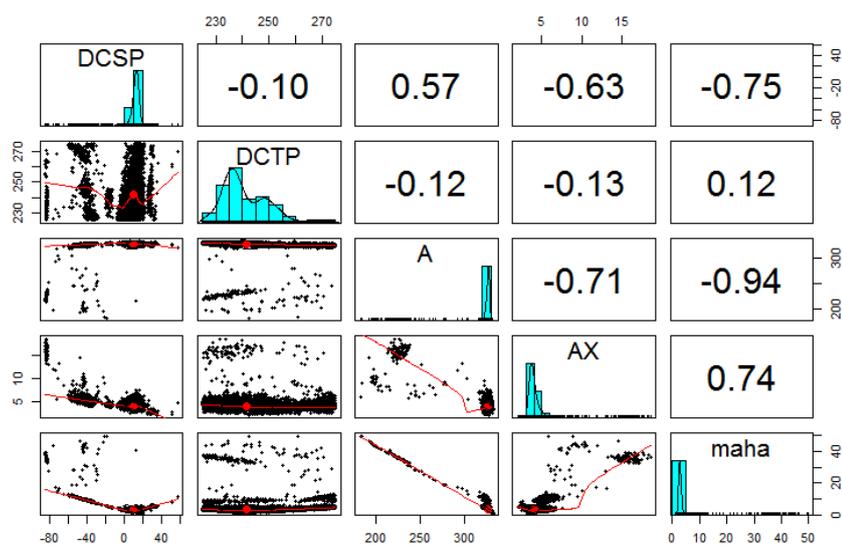


図 4.5.5 相関行列（条件 2）⁴⁾

条件 2 においても強い相関が確保されているため、この情報を船陸間で情報共有することにより、“船陸間で共有するデータ量 1MB / 日以下” が達成可能であることを確認した。

4.5.3 データ受信側のソフトウェア製作

ソフトウェアの構成は、以下の構成している。図 4.5.6 に装置の構成を示す。

データベース登録部
 データ管理部
 グラフ表示部

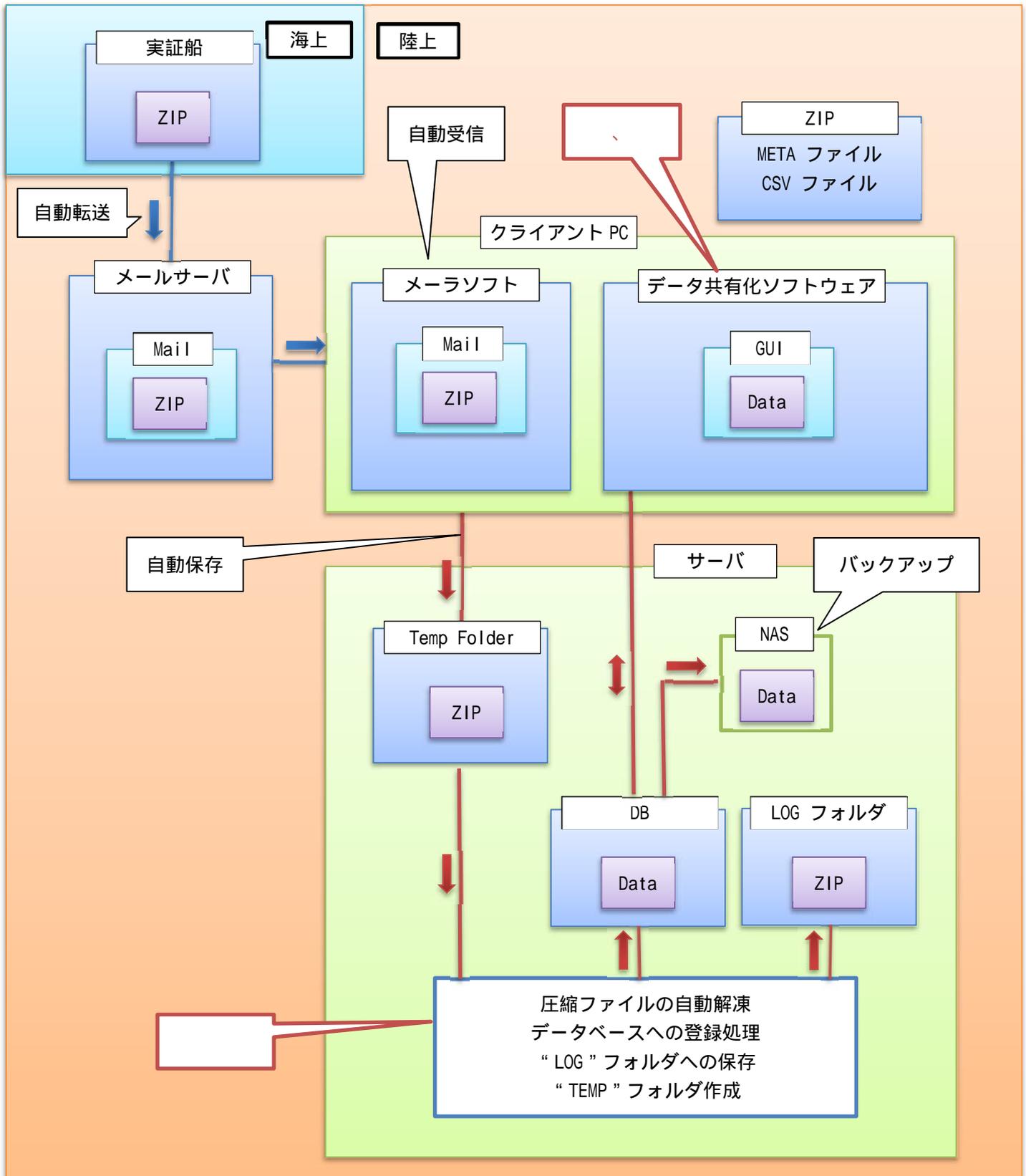


図 4.5.6 データ受信側の装置の構成(ソフトウェア)

1) データベース登録部

データ登録部は実船より定期的に送られるデータを処理しデータベース "DB" に登録するソフトウェアで主な機能は下記となる。

表 4.5.3 にデータベース "DB" のテーブル構成を示す。

表 4.5.3 データベース "DB" のテーブル構成

テーブル名	説明	項目数	備考
USER	ユーザ情報	9	
SHIP	船情報	10	
PUMP	ポンプ情報	10	
DATA	時系列 DATA	38 (最大数)	不足データは NULL

38 項目はテーブル紐づけ用であるため、データは 37 項目まで登録可能

(a) 圧縮ファイルの自動解凍

実船から送られてきた圧縮ファイルを自動解凍し、"TEMP" フォルダ (一時保存用フォルダ) にファイルを自動保存する。

(b) データベース "DB" への登録処理

保存されたファイル (メタデータファイルとデータファイル) を用いて実施し、メタデータファイルを元に "USER"、"SHIP"、"PUMP" のテーブル情報と紐づけを行い、データファイルをデータベース "DB" に登録する。

この際メタデータファイルとテーブルの情報がマッチしない場合、ファイルはエラーフォルダに保存される。エラー処理されたファイルはメタデータファイルを修正後マニュアル操作にて登録が可能である。

(c) "LOG" フォルダへの保存

エラー処理及び登録作業のログを "LOG" フォルダに保存する。

(d) "TEMP" フォルダ作成

実船より送られてきた圧縮ファイルを "TEMP" フォルダ (一時保存用フォルダ) に保存する。

2) データ管理部

データベース "DB" は 4 つのテーブルから構成されている為、テーブル情報とメタデータファイルと照合するためのデータ登録と修正を行うためのソフトウェアである。

操作画面を図 4.5.7~4.5.11 に示す。

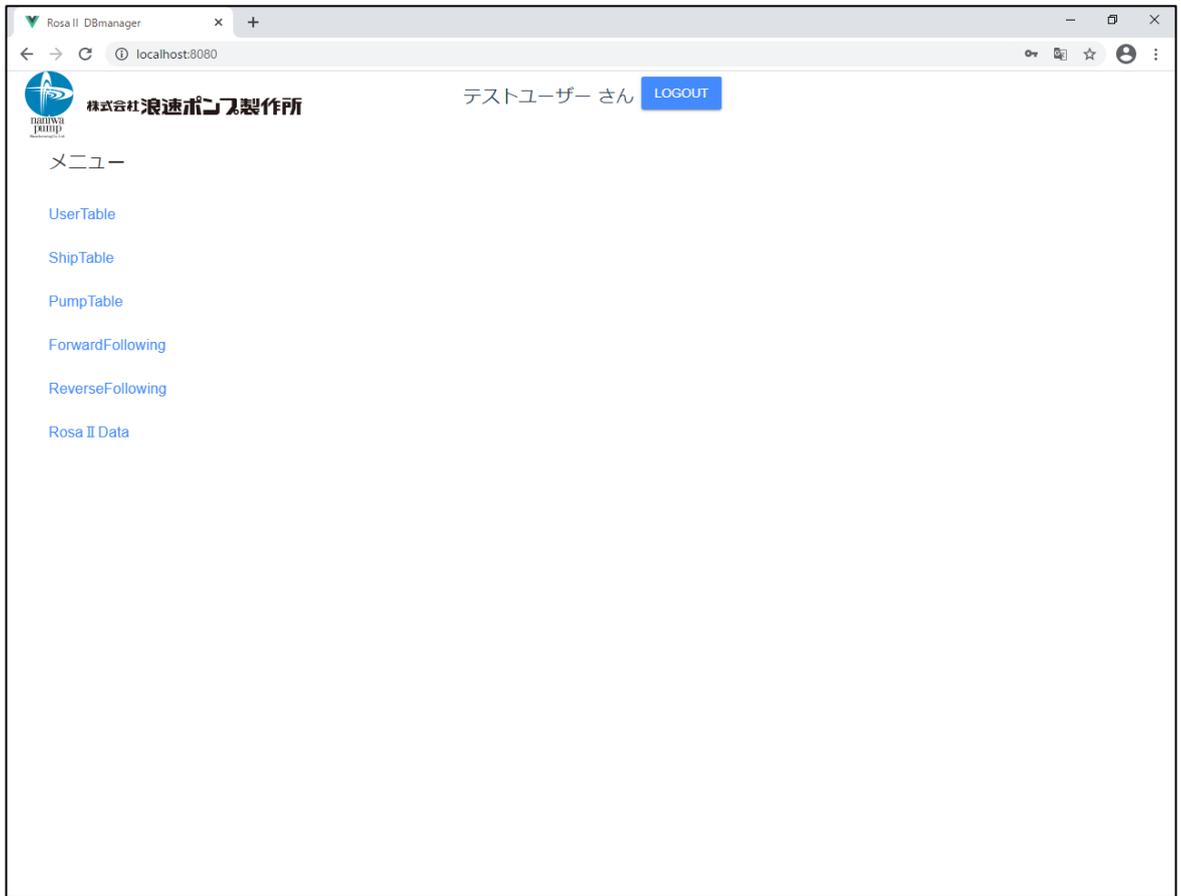


図 4.5.7 データ管理部 メニュー画面

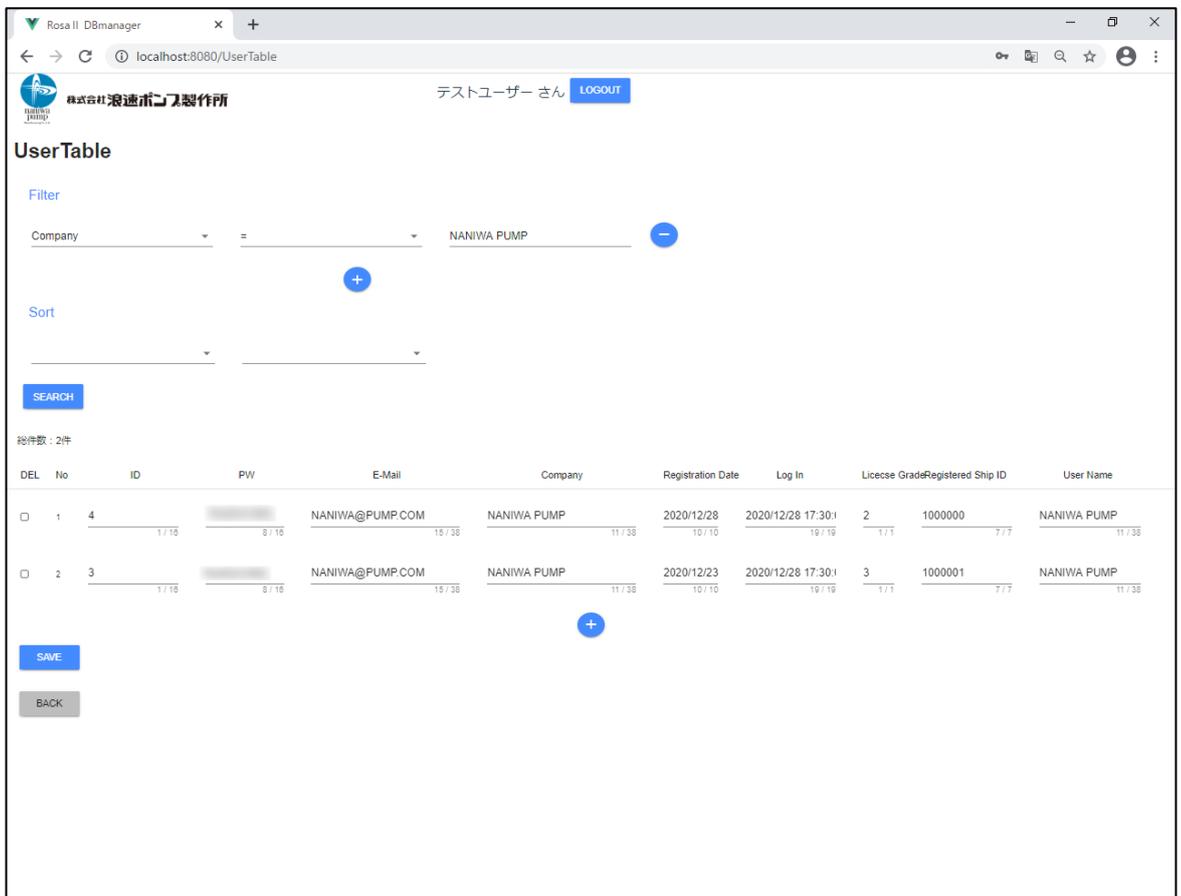


図 4.5.8 データ管理部 “USER” テーブル 管理画面

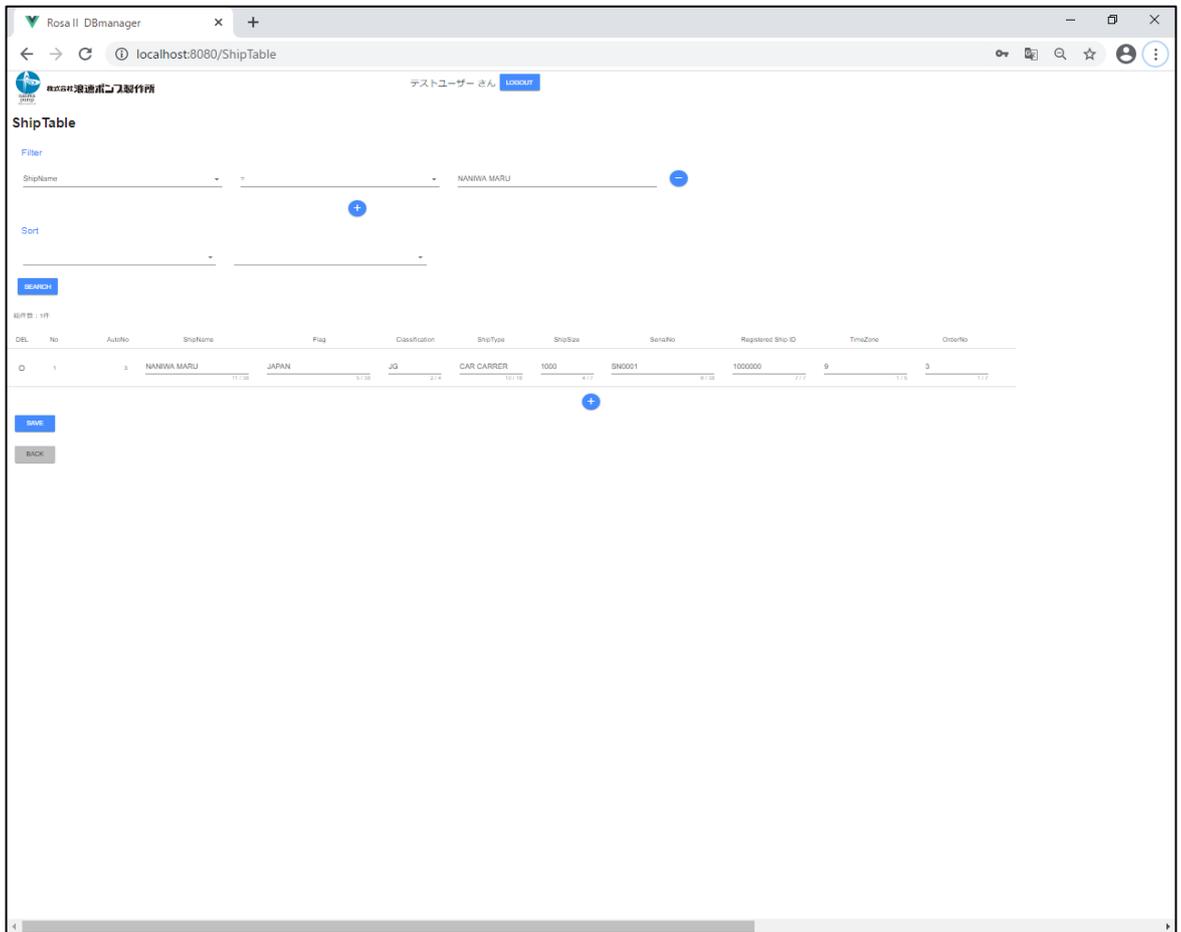


図 4.5.9 データ管理部 “ SHIP ” テーブル 管理画面

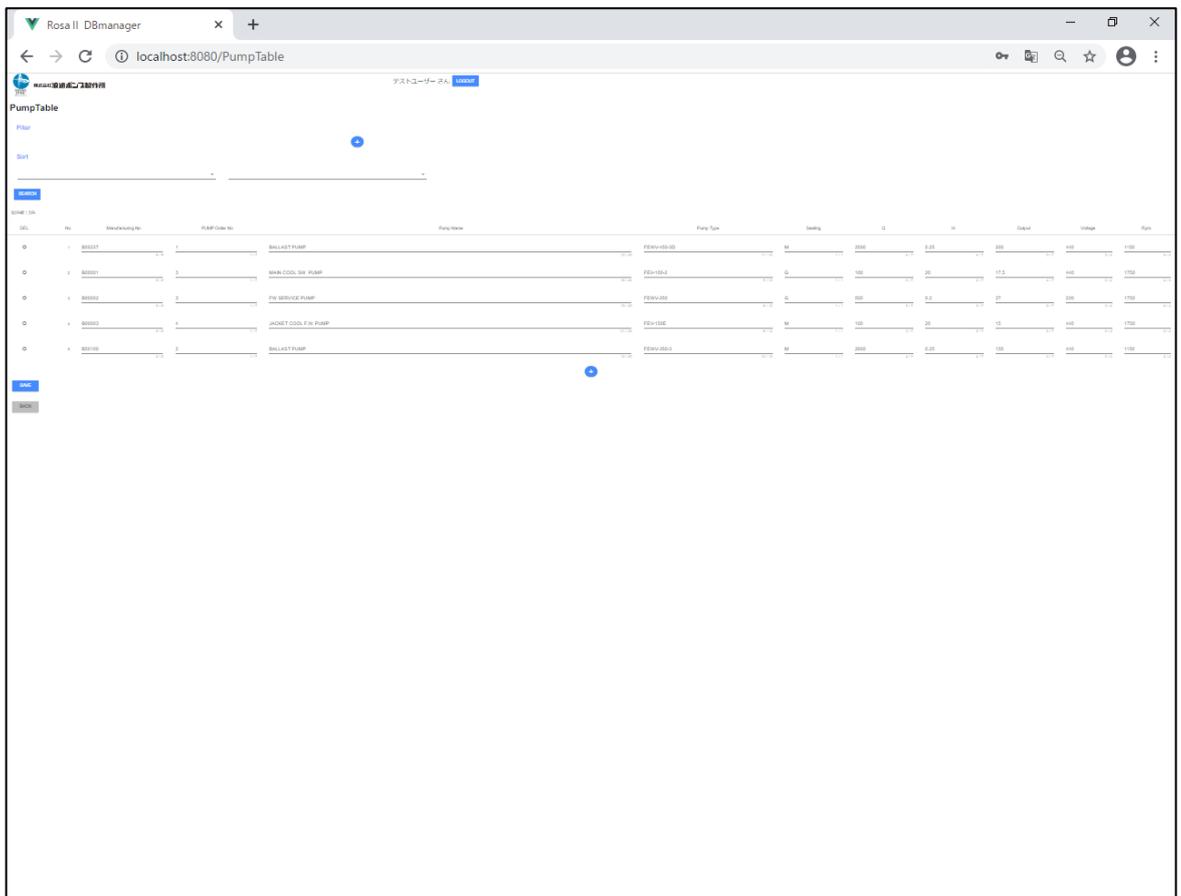


図 4.5.10 データ管理部 “ PUMP ” テーブル 管理画面

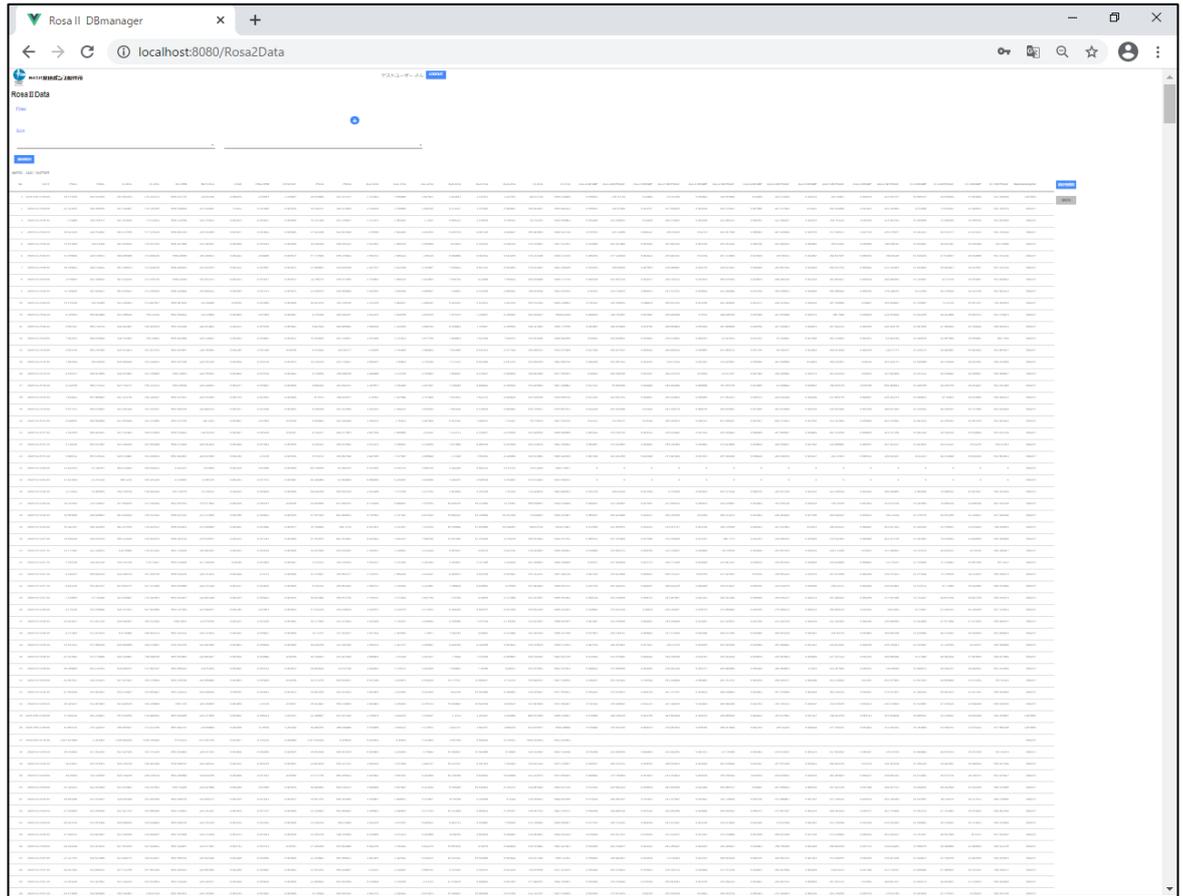


図 4.5.11 データ管理部 “DATA” テーブル 管理画面

3) グラフ表示部

ソフトウェアはポンプ選択とグラフ表示部に分かれている。

グラフ表示部は転送データを元に実船の内容と同じグラフを表示するためのソフトウェアである。データベース “DB” の “DATA” および “SHIP” テーブルからデータを取り出し表示を行い、各種共有化情報項目のグラフ表示およびリスト表示から構成されている。

時系列表示では、任意の時系列表示及び二種類の任意の時系列（比較）表示画面から構成されている。これにより同一オペレーション時の比較が可能なものとなっている。

操作画面の代表例を図 4.5.12～4.5.16 に示す。

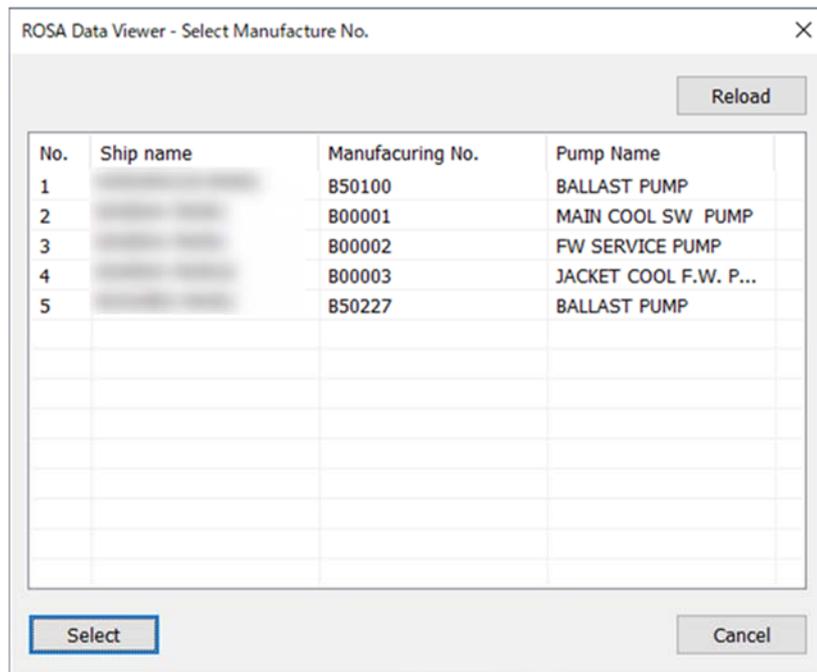


図 4.5.12 グラフ表示部 ポンプ選択画面

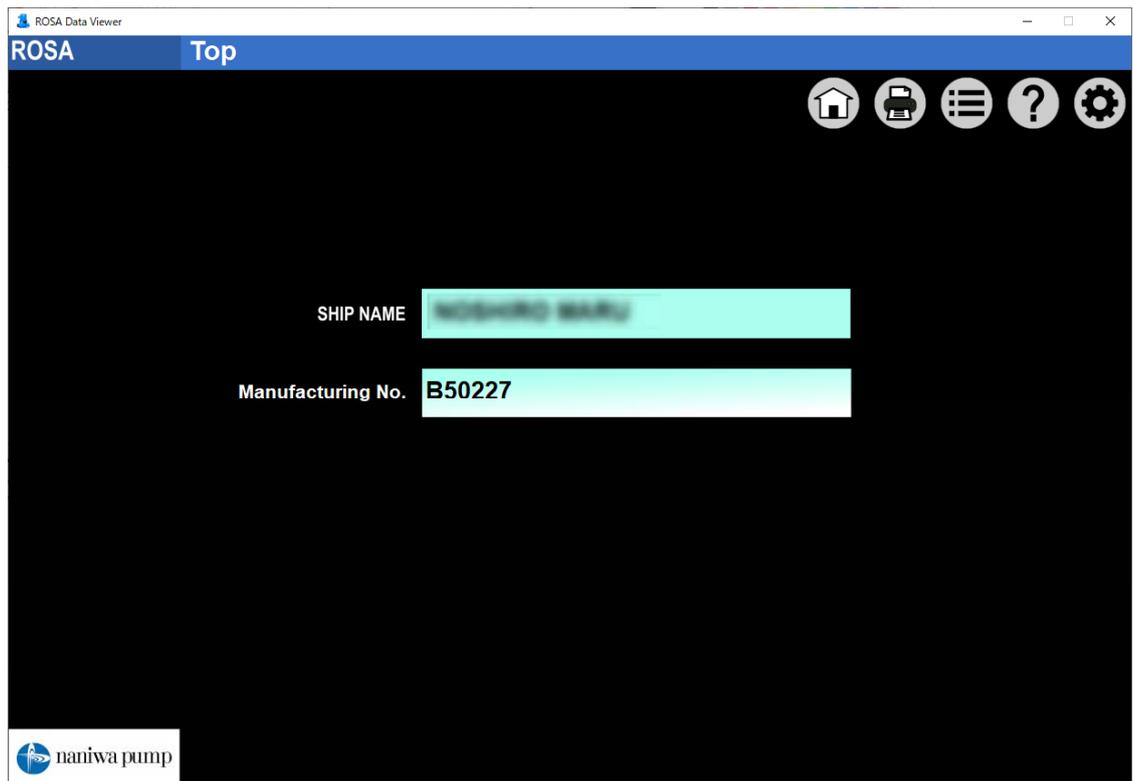


図 4.5.13 グラフ表示部 TOP 画面



図 4.5.14 グラフ表示部 時系列表示画面



図 4.5.15 グラフ表示部 時系列表示画面（比較画面）

ROSA Data Viewer

ROSA **List**

B50227 **SHIP**

Home Print List Help Settings

No.	time	Total Head [DC]	SUCTION HEAD [...]	DELIVERY HEAD [...]	AXIS DISPLACEME...	AXIS DISPLACEME...	DC
1	2020/03/05 18:00:...	103.499	-22.396	81.103	521.118	735.124	1
2	2020/03/05 22:30:...	117.877	-62.962	54.915	538.085	738.815	1
3	2020/03/28 16:30:...	264.007	17.724	281.731	520.734	741.071	1
4	2020/03/28 18:00:...	208.336	11.116	219.453	519.636	740.498	1
5	2020/03/29 12:00:...	119.273	3.451	122.723	508.774	712.304	1
6	2020/03/29 13:30:...	118.283	-1.321	116.963	509.080	717.239	1
7	2020/03/29 15:00:...	99.390	-1.728	97.662	512.080	724.485	1
8	2020/03/29 16:30:...	132.391	3.040	135.431	513.374	730.517	1
9	2020/03/29 18:00:...	193.522	10.797	204.319	525.035	750.342	1
10	2020/03/30 13:30:...	211.387	15.278	226.666	518.835	745.169	1
11	2020/03/30 15:00:...	145.800	-41.837	103.963	522.449	714.021	1
12	2020/03/30 16:30:...	171.009	-36.433	134.575	510.182	729.803	1
13	2020/04/13 13:30:...	139.964	-45.518	94.446	533.708	754.629	1
14	2020/04/13 15:00:...	140.935	-46.369	94.567	537.890	751.871	1
15	2020/04/14 13:30:...	187.738	-48.983	138.755	550.295	765.836	1
16	2020/04/14 19:30:...	133.052	-13.830	119.222	513.259	766.728	1
17	2020/04/14 21:00:...	143.143	-33.578	109.566	530.775	760.327	1
18	2020/05/03 15:00:...	102.102	12.156	114.258	495.649	719.149	1
19	2020/05/03 16:30:...	262.802	27.574	290.377	516.569	749.441	1
20	2020/05/03 18:00:...	98.223	13.591	111.814	503.732	728.782	1
21	2020/05/03 19:30:...	116.135	15.069	131.204	501.521	716.507	1
22	2020/05/03 21:00:...	133.840	14.982	148.823	510.107	743.246	1
23	2020/05/03 22:30:...	147.881	17.405	165.287	511.226	734.791	1
24	2020/05/09 18:00:...	229.331	19.379	248.710	510.218	768.184	1
25	2020/05/09 19:30:...	226.849	25.706	252.555	506.016	769.771	1
26	2020/05/09 21:00:...	229.162	25.014	254.176	505.937	767.592	1
27	2020/05/09 22:30:...	230.168	21.741	251.909	504.926	774.186	1

Graph Tools: Trend, Q-H, List, Vector

Pump Name: BALLAST PUMP

PERIOD: | 1DAY ● 1WEEK ● 1MONTH ● 3MONTH ● 1YEAR

Design Time Diff. Display Compare

CURVE: **SELECTED ALL**

図 4.5.16 グラフ表示部 リスト表示画面

4) ソフトウェア検証

ソフトウェア検証は、図 4.5.6 に示すデータ受信側の装置の構成から、実証船部分をテスト PC に変更して実施した。

(a) データ登録検証

ダミーデータとメタデータファイルを作成しテスト PC から圧縮ファイルを送信した。検証に用いた圧縮ファイルの構成を表 4.5.4 に示す。

表 4.5.4 検証ファイル構成及び検証結果

番号	メタデータファイル	データファイル	検証結果
1	正常	ダミーデータ	DB 登録完了
2	記載間違いあり	ダミーデータ	エラー処理
3	なし	ダミーデータ	エラー処理

又、エラー処理されたデータのメタデータファイルを修正後、マニュアル操作での登録は問題ないことを確認した。

(b) データ動作検証

3 年分の計測データをデータベース " DB " に登録し最大行数表示時の動作検証を行った。

検証結果を表 4.5.5、検証画面例を図 4.5.17 ~ 4.5.18 に示す。

表 4.5.5 検証結果

番号		最大値	検証結果
1	データ管理部	38,000 行	○
2	グラフ表示部 (時系列)	8,640 行	○
3	グラフ表示部 (Q-H)	160 点	○
4	グラフ表示部 (ベクトル)	160 点	○

4.5.4 データ受信側のシステム評価

図 4.4.6 の流れに沿ってのデータベース登録処理、グラフ表示、データ管理部の各機能について問題なく処理したことを検証し、データ受信側のシステムが予定通りの機能を有していることを確認した。

製品化にあたっては、グラフ表示部の画像処理に多くのリソースを使い、高性能 PC を必要とするため、表示点数などを調整し、市販性を向上させる必要がある。

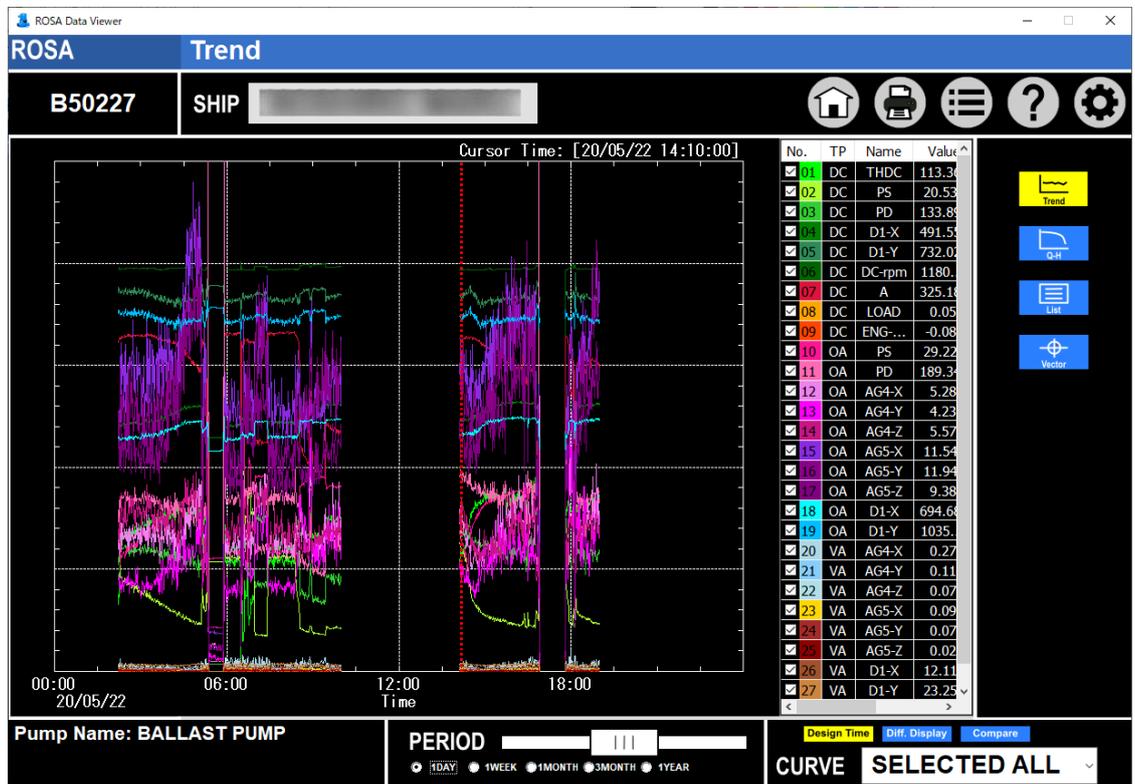


図 4.5.17 グラフ表示部 時系列表示画面

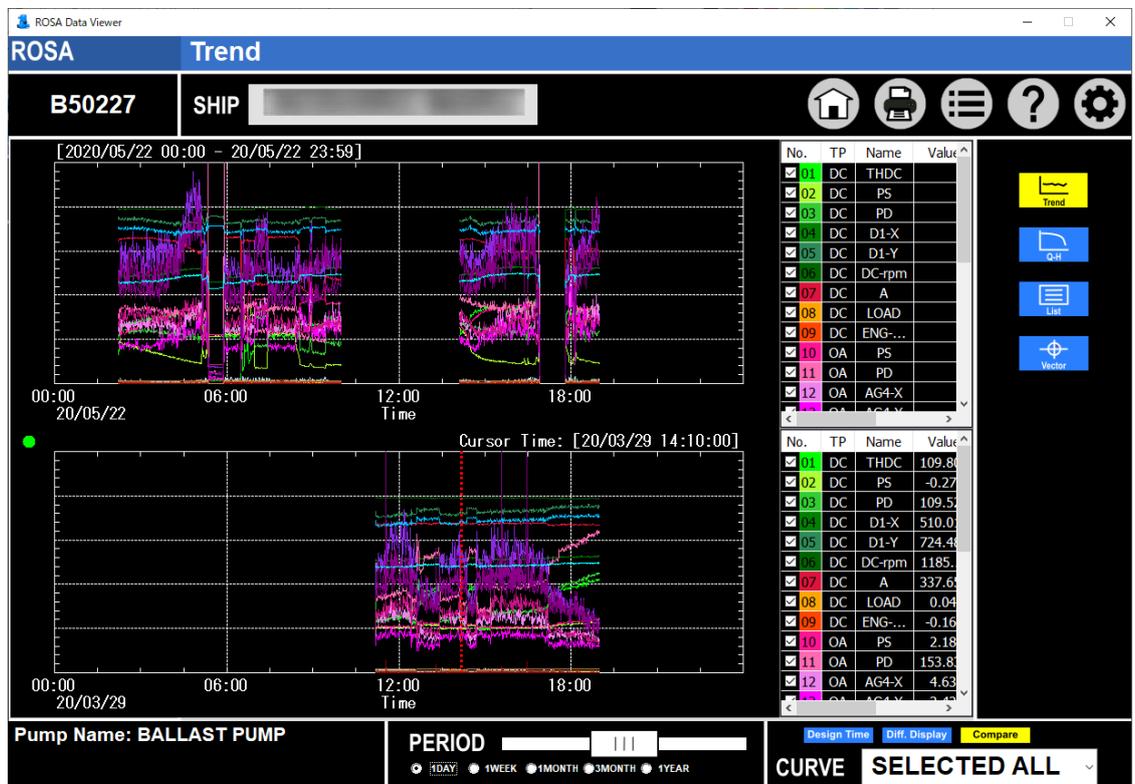


図 4.5.18 グラフ表示部 時系列表示画面（比較画面）

5. 研究開発成果

5.1. 2019年度の事業の目標1)に対する研究開発成果

表4.1.10 ポンプ診断マトリックスと故障原因の関係を表5.1.1に示す。は兆候を知るために最低限必要なセンサを示す。

故障モード24項目に対し、模擬機のセンサ数において兆候マトリックスの適応が行われることを確認した。また、最小構成のセンサ（圧力、電流値、振動値）においても、必要条件のセンサを満足することにより100%カバー可能であることを確認した。

一般的な船用ポンプに取り付けられる圧力センサに電流、加速度の2種類のセンサを追加し、故障モード24項目の100%以上をカバー可能なポンプ状態診断システムの確立することができた。

表5.1.1 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					

5.1.1 データ収集及びデータ分析の成果

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。

5.1.2 状態診断ソフトウェア製作の成果

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を成果物として得た。

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

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、AEA E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。

5.2 2019年度の事業の目標2)に対する研究開発成果

事業目標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した。

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

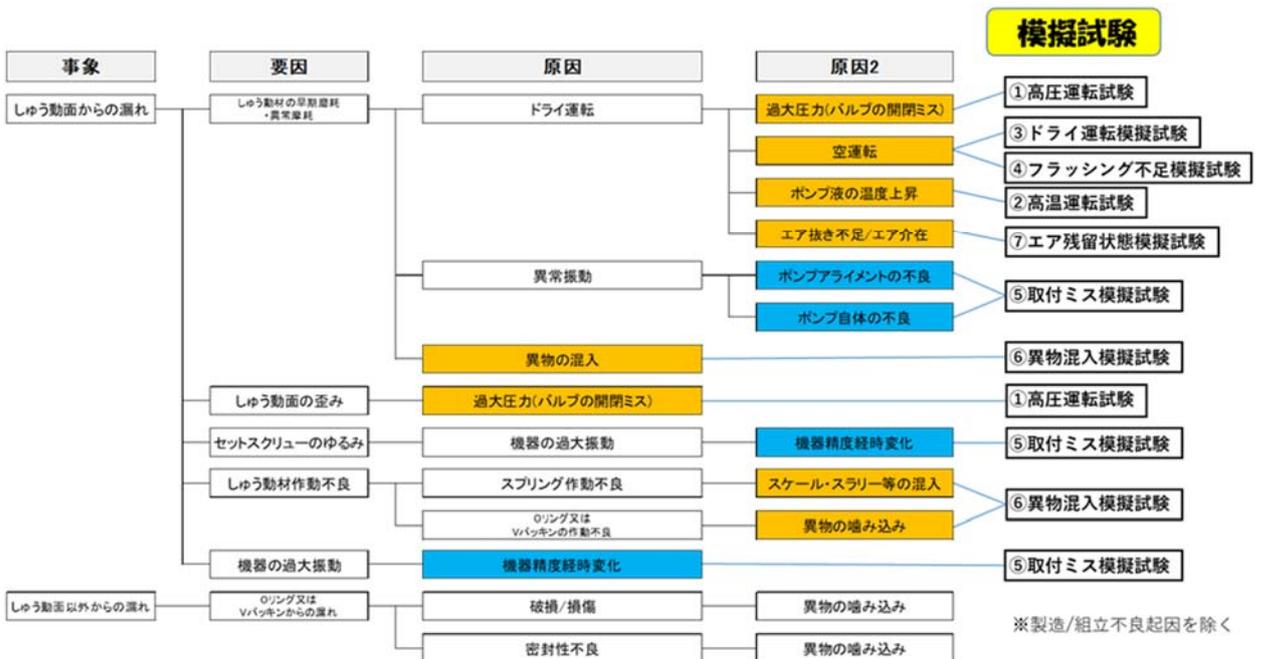


図 5.2.1 メカニカルシールの FTA 図 (再表示)

2019年度に計画していたメカニカルシールの正常運転模擬試験及び異常運転模擬試験7項目(+実機ポンプ試験)を実施することにより、船用メカニカルシールで予期される故障モードの内、約85%を占める「しゅう動面からの漏れ」事象すべてに係わる試験の基礎データを、シール部に取り付けた各種センサにより取得できた。

さらに、基礎データを補完する目的で、過渡データ取得試験、長時間異常運転模擬試験もを行い、メカニカルシールシール状態診断システム用ソフトウェアの検討に寄与するデータ収集が実施できた。

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

社内回転試験機での知見を元に、実船搭載用の試作型メカニカルシール状態診断システムを早期に構築する事で、2019年度内に多くの実船データ収集ができた。

また、実船搭載検討を行う事で、製品化に必要なソフトウェア上の以下改善点を早い段階で進める事ができた。

- ・実船では、操作者から離れた場所での測定になるため、エンジンコントロールルームから遠隔で状況を把握出来るような仕組みを構築する必要がある。
- ・実船では、効率的なデータ収集が求められるため、ポンプのモータ電流を監視して稼働時のみメカニカルシールのセンサデータを保存するような仕組みを構築する必要がある。

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

基本データの解析において、各種センサデータの挙動から振動データが最もメカニカルシールの状態診断に有効なセンサデータである事が抽出できた。

この振動データを解析していく中で、特徴量FFT30と特徴量EKxと特徴量EKyが正常試験と異常試験を判別するためのデータとして適している事がわかった。

この特徴量を組み合わせて機械学習を行うことで正常状態と異常状態を判別できる可能性を確認できた事より、本手法を解析アルゴリズムとして確立したソフトウェア開発を次年度の目標とする。

また、実船データにおいても特徴量EKx・EKyは、ポンプ動作モード毎の共通・相違点を捉えており、メカニカルシールの状態診断に有効であると想定される。

2020年度以降も本報告書に記載した解析手法を用いたメカニカルシール状態診断システムの開発方針を継続して推進する。

5.3 本事業の最終目標 1) に対する研究開発成果

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
メカニカルシールの状態診断アルゴリズムとして、

- ・機械学習によるバラストポンプの運転モード推定とデータ抽出方法
- ・メカニカルシールの状態診断に活用可能な独自特徴量 EKx・EKy の算出及び、
機械学習モデルによる EKx・EKy の判定アルゴリズムを構築した。

本アルゴリズムを、図 5.2.1 に示すメカニカルシールの各種故障モードを再現するために設定した異常状態模擬試験に対して適用した結果、本書 113 頁 表 4.4.6 に示す通りメカニカルシールの各異常状態に応じた異常度が確認できたことから、本アルゴリズムを用いることでメカニカルシールの故障モード 79%すべて検知可能であることを検証した。

また、本書 101 頁以降に記載した高負荷連続回転試験データに本アルゴリズムを適用し、長期間運転下での負荷に応じて異常進行度が増加し、試験後にメカニカルシールにダメージが蓄積されていることを確認できた。

現時点では実船データに対する検証数は少ないものの、同様の手法でメカニカルシール故障までの時間予測が可能であると考えられる。

5.4. 本事業の最終目標 2) に対する研究開発成果

本事業の最終目標 2) 船陸間で共有するデータ量 1MB / 日以下

- 1) 目標達成するためのデータ数量の検討した結果、下記の条件を満たすことにより達成できることを確認した。

表 5.4.1 に事業目標を達成するための転送データ量についての条件を記載する。

表 5.4.1 転送データ量

項目	条件
データ列	計測時刻
	トレンドデータ
	ベクトルデータ
	特徴量 (1N ~ 6N 成分)
加速度センサ	1 軸
総列数	24 列
1 時間 最大行数	360 行
データ桁数	10 桁 (浮動小数点)
1 時間 データサイズ	87kB
メタデータファイル	1kB
圧縮時データサイズ	38kB
圧縮率	44%
最大転送量 (1 日)	0.89MB

N : 回転同期周波数、数字 : 次数

- 2) 図 5.4.1 にセンサ数を削減前の相関図を示す。
 図 5.4.2 にセンサ数を削減後の相関図を示す。

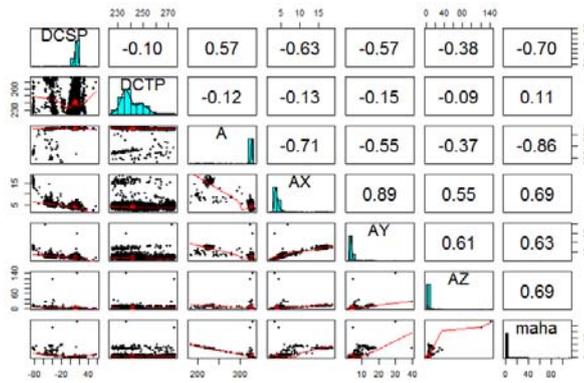


図 5.4.1 相関行列⁴⁾

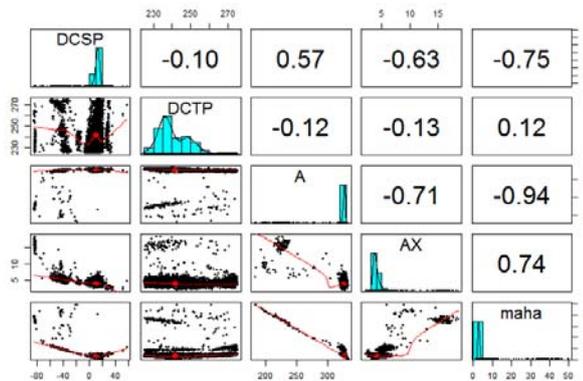


図 5.4.2 相関行列⁴⁾

状態判定パラメータに対して、3つのパラメータ(DCSP,A,AX)について強い相関関係があることを確認し、1つのパラメータ(DCTP)については独立した動きをしていることを確認した。

図 5.4.2 が示す通りセンサ数を削減した判別についても強い相関関係が保たれていることを確認した。これにより、センサ数の調整によるデータ列数の削減を行った場合においても、相関関係が崩れたことを利用した診断をすることが可能であることを確認した。

6. 今後の課題

- 1) 2021 年秋ごろより、システムの実船ローカライズを行い、搭載試験で評価を行う予定である。
- 2) 実用化を進めるに当たり競争力を高めるため、今後とも実船でのデータ収集及び傾向分析を進め、データ精度を高める必要がある。そのためには実船データの収集を引き続き実施し、精度を上げたデータ分析が重要なものとなる。
- 3) 現在の診断システムは実船完結型であるが、船陸間で共有情報に診断情報を含め更なる診断技術の向上を進める必要がある。
- 4) メカニカルシール状態診断システムとして、故障モード検知率 75%以上を安定して実現、及び故障までの時間予測の精度向上について、引き続き社内試験の回数増しと、実船データを用いて検証を進める。
- 5) 現在のメカニカルシール状態診断システムは試作型として PC ベースで動作しており、今後コストダウン・安定動作の観点からモジュール化を進めていく必要がある。

7. 参考文献

- 1) 立林、手島、長谷川：「入門MTシステム」、日科技連出版
- 2) 安部将成、松田眞一、“MT法におけるしきい値設定法の提案と比較”、南山大学大学院、2011
- 3) “メカニカルシールハンドブック　メカニカルシールの損傷例と対策”、社団法人　日本産業工業会
- 4) 浪速ポンプ製作所、“Introduction of Development of Innovative Marine Pump Diagnostic System- Remote Observation Service & Action (ROSA)”、ISME2017、D24-310
- 5) 「船舶用ポンプ遠隔状態監視保全システムに関する研究開発」報告書、日本海事協会助成事業管理番号：16-11、2016.3、浪速ポンプ製作所
- 6) 「船舶用ポンプ状態診断に関する研究開発計画策定のための調査事業」報告書、平成29年度先進船舶導入等計画策定支援事業、2018.3、浪速ポンプ製作所
- 7) 金光、日向：ポンプ・送風機・圧縮機の診断技術、ターボ機械、13-3、1985.3、157
- 8) 木村、山内：振動徴候マトリックス、ターボ機械、10-10、1982.10、620
- 9) C. Jackson：THE PRACTICAL VIBRATION PROMER、5.Taking Field Data、1979、p.21-30
- 10) 後藤、小瀧：変動圧力によるポンプ羽根車の異常診断、ターボ機械、16-10、1988.10、558
- 11) 鈴木、内田　他：ポンプの故障モードと振動解析（第3報：軸受けメタル焼損・空気侵入・キャビテーション）、ターボ機械、17-9、1989.9.597
- 12) 鈴木、内田　他：ポンプの故障モードと振動解析（第2報：ミスアライメント・軸受損傷）、ターボ機械、17-6、1989.6.388
- 13) ISO7919-3 非往復動機械の機械振動 - 回転軸における測定及び評価基準 - 第3部：産業機械、2009
- 14) 神吉：振動の監視と異常診断、日本機械学会、第631回講習会資料、1986.10、P29-34
- 15) 岩壺、松久、神吉他：振動工学の基礎、森北出版株式会社、2015.1
- 16) 松下、田中、小林、小池、神吉：続　回転機械の振動　実機の振動問題と振動診断　、コロナ社、2014.3
- 17) 鶴他：Pythonによる機械学習入門、オーム社、2016.11
- 18) 栗原、大西、進士：テレメータリングによるレース車両の異常検出システムの構築、品質工学、Vol12、P81-88
- 19) 清水：ターボ機械の振動管理、ターボ機械、10-10、1982.10、606
- 20) 中佐博裕、“アコースティック・エミッションの理論と実際”、地人社、1994
- 21) 塩谷、他32名、“アコースティック・エミッションによる機械診断”、日本非破壊検査協会、2014
- 22) 大津政康、“アコースティック・エミッションの特性と理論”、森北出版、2005
- 23) 迫孝司、“軸受における異常兆候の早期検知を診断に関する研究”、早稲田大、修士論文、2012.9
- 24) 吉田義樹、他3名”AEセンサーによるポンプのキャビテーション衝撃パルスの計測”、ターボ機械、18-6、1990.6、P.321-326
- 25) 中田毅、他2名“AEセンサを用いた流体流量計測法”、日本フルードパワーシステム学会論文集、2013-5、P.49-54
- 26) 井手剛、“入門　機械学習による異常検知”、コロナ社、2015
- 27) 井手剛、他1名、“異常検知と変化検知”、講談社、2015
- 28) 救仁郷誠、“マハラノビスの距離　入門”、品質工学、2001、9-1、P.13-21
- 29) 北川英夫、“寿命予測とその現状”、安全工学、1991、30-6、P.378-391
- 30) ISO 13381-1 Condition monitoring and diagnostics of machines - Prognostics-Part 1:General guidelines、2002
- 31) 川田裕、神吉博、川上孝、“遠心ポンプ羽根車に作用する流体励振力に関する実験的研究（第一報　羽根枚数・ケーシング型式の影響について）”、日本機械学会論文集（C編）49-437、1983.1

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本舶用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>