

34. 排水機場ポンプ設備における AI による状態監視診断について

(国研) 土木研究所 ○ 平地 一典
(国研) 土木研究所 上野 仁土
(株) ニュージェック 八木 悟

1. はじめに

河川に設置されている排水機場ポンプ設備は、洪水被害防止を目的に設置された極めて重要な社会基盤設備であり、豪雨や異常出水時には確実に稼働することが要求される。そのため設備の万全な整備が不可欠であるが、設置後 40~50 年経過した設備も増加傾向にあり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念や管理担当者の高齢化や若手技術者不足による熟練技術者の減少、更にゲリラ豪雨増加による排水機場ポンプ設備の稼働頻度の増大が予想される中、災害防止を使命とする排水機場ポンプ設備等土木機械設備の「確実な稼働」は、絶対条件であり、これを国民の生命と財産を守るため将来に渡り担保し続ける必要がある。

そこで、故障の早期発見と確実な異常検知、健全性の診断や長寿命化に向けての取組は必要不可欠である。土木研究所では効率的で的確な設備の維持管理を行うため、これまでに常用設備で導入されている「状態監視保全」を「非常用設備」である排水機場ポンプ設備の維持管理において導入するための研究を進めてきた¹⁾。これまでの取組では、適切な状態監視保全を行うため、設備の月・年点検時に行う短時間運転でのスポットデータを可搬型の計測装置で計測して診断を行う傾向管理が主流であった。しかし、平時では管理運転時であっても水量不足で吐出弁の開度を絞りと、定格運転に達しない場合や運転時間が確保できないケースもあるため、診断精度に課題の残る状況であった。今回の取組では、設備の定格運転時の正確な状態を把握するため、排水機場ポンプ設備に常設センサを設置し、実排水運転時の定格運転データを自動取得することで、設備の状態を時系列データで監視できる「状態監視モニタリングシステム」を構築し、更に、取得した実排水運転時の膨大な時系列データを元に、機械学習等の AI により異常を検知することで、熟練点検者によらずとも一定レベルでの診断が可能となる「AI 異常検知システム」を試作したので報告する²⁾。対象となる排水機場ポンプの概要図を図-1 に示す。

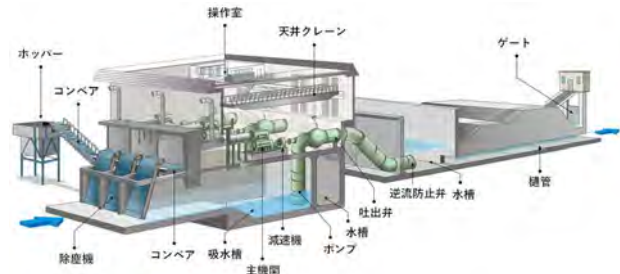


図-1 排水機場概要図

2. 状態監視モニタリングシステム

従来の状態監視保全では、設備の点検時に合わせて専門技術者が、振動であれば可搬型の加速度センサ等を用いて計測を行い、更に精密な診断をするには取得した波形データを別途、周波数解析することによって、異常の有無を判断するなど専門技術者による診断が不可欠であり、時間や手間がかかる状況になっている。

そこで、排水機場ポンプ設備の異常検知に適したセンサの検討を行い、テストベッドとして全国 5 か所の排水機場ポンプ設備に状態監視モニタリングシステムを常設することで、管理運転及び実稼働運転すべての稼働データを連続した時系列データとして計測することが可能となった。状態監視モニタリングシステムの設置事例を図-2、センサ一覧を表-2 に示す。表-3 には紙面の都合上テストベッドのうち 2 機場でのセンサ設置状況を示す。

状態監視モニタリングシステムは、排水機場の現地計測装置として、センサ類の計測データは計装盤（ロガー）を介して、1 分間ごとに TDMS ファイル形式で PC に保存している。従来の計測ではセンサ 1 つの計測データを 1 つの CSV ファイルに保存しており、センサの数が増えることで、データ整理が煩雑になっていた。計測器制御のプログラムである labVIEW に親和性が高く、すべてのセンサデータを 1 つのファイルにまとめることができる TDMS ファイルを用いることで、各センサ間の時間同期も比較的簡易に行えるようになった。また収録 PC には通信機能を持たせており、外部計測装置にデータを転送することができる。

表-1 センサー一覧

	センサ名	計測項目	計測により期待される効果
原動機 DE	A Eセンサ	弾性波	弾性波発生有無と頻度による内部損傷の早期把握
	排気ガス組成計	排気ガス組成 (CO,CO2,NOx等)	燃焼状態による機関状態の把握
	3方向加速度計	DE本体振動加速度	振動増加による設備異常兆候の把握
	熱電対	排気ガス温度 (各気筒、過給器出入口)	燃焼状態による機関状態の把握
	回転計	エンジン回転数	計測開始トリガ用
	オンライン鉄粉濃度計	潤滑油中铁粉濃度	内部摩耗兆候の早期把握
原動機 GT	3方向加速度計	GT燃焼器振動加速度	ガスタービンエンジンの異常兆候と状態の把握
	3方向加速度計	GT減速機振動加速度	状態の把握
減速機	3方向加速度計	減速機本体振動加速度	歯車、軸受異常兆候と状態の把握
中間軸受	3方向加速度計	振動加速度	軸受異常兆候と状態の把握
主ポンプ	A Eセンサ	弾性波	弾性波発生有無と頻度による内部損傷の早期把握
	3方向加速度計	ポンプ本体振動加速度	振動増加による設備異常兆候の把握
	回転計	ポンプ回転数	計測開始トリガ用
	圧力計	吐出圧力	主ポンプの異常兆候（軸曲がり、インペラ摩耗等）の発見と状態の把握
	渦電流変位計	主軸振動変位	



図-2 モニタリングシステム設置事例

表-3 センサ設置状況（2機場）

	センサ名	A排水機場		B排水機場	
		横軸斜流 ディーゼルエンジン		立軸斜流(中規模) ディーゼルエンジン	
		2号	3号	1号	2号
原動機 DE	A Eセンサ	-	-	○	○
	排気ガス組成計	○	○		
	3方向加速度計	○	○	○	○
	熱電対	○	○	○	○
	回転計	-	-	○	○
	オンライン鉄粉濃度計	-	-	○	-
減速機	3方向加速度計	○	○	-	-
中間軸受	3方向加速度計	○	○	-	-
主ポンプ	A Eセンサ	-	-	○	○
	3方向加速度計	○	○	○	○
	回転計	○	○	○	○
	圧力計	-	-	○	○
	渦電流変位計	○	○	○	○

3. AI 異常検知システム

状態監視モニタリングシステムにより、収集したデータを基に自動的に排水機場ポンプ設備の異常検知が出来るAI異常検知システムを試作した。ここで、排水機場ポンプ設備におけるAIを用いた異常検知を実施する際に問題となる主な項目を以下に示す。

- ・非常用設備であるため、設備の稼働に規則性がなく、いつ稼働するか不明であり、設備によっては月に一度の稼働や数か月に一度の稼働となる設備もある。

- ・地域により、設置場所の条件が異なるため、設備の仕様が千差万別である。

- ・故障時の社会的影響が大きい設備であり、予防保全を徹底するため、教師データになる故障データの取得が困難である。

このため、現状では点検や診断には熟練した専門技術者が不可欠であり、時間や手間がかかる状況にある。以上を踏まえ、現在点検に従事している管理者や専門技術者、更に今後増えると予想される経験の浅い技術者の補助となるようなAI異常検知システムの構築を目指した。試作したAI異常検知システムでは機械学習を用いたAIモデルをシステムの中に実装した。AIモデルには様々なアルゴリズムがあり、目的によって学習方法が異なる。本試作システムでは異常の種類を判別する必要があるため、RandomForestやSVM（Support Vector Machine）など、入力データがどの分類クラスに（正常、異常A、異常B…）に該当するかを示すアルゴリズムを検証した。本検討で取り扱う異常項目は、関連する装置の諸元によって、どのような周波数の異常が発生するかがある程度わかっている。その為、時系列データの分類に使用できるAIモデルの中でも、FFT（Fast Fourier Transform）後の周波数領域のデータを扱うモデルが適切であると考え、分類モデルは比較的精度が高く、GPUなどのアクセラレーションが無くても学習、推論速度が速いRandomForestを採用した。

3.1 AI異常検知システムの試作

AI 異常検知システムは、故障を確認した際、故障の有無だけではなく、故障の程度である異常レベルも判定できるシステムとした。

国土交通省の「河川ポンプ設備点検・整備・マニュアル（案）」では、健全度評価を表-5のとおり定めている。しかし、健全度評価は、数値による基準がないため、異常レベル判定の基準は、国土交通省「河川ポンプ状態監視ガイドライン」と国際規格であるISO振動規格を健全度評価の各段階と整合をとって、仮の閾値を定めた。そして、センサで収集したデータの値と閾値を比較することで、健全度評価の段階を判定することとした。異

常レベル判定については、上記のとおり、ある程度明確な定義があるため、本検討では計測データに各種フィルタやRMS値算出などの前処理を施し、ルールベースでの異常判定を行った。例として、試作システムでの各種異常を疑似的に与えた判定の事例を図-3に示す。システムによる判定は、異常レベルの判定が確認されると、次にどこに異常が発生しているかの異常種別判定が行われる。異常種別判定の詳細は次項に示す。

図-3 異常検知システムweb画面

3.2 疑似異常データの作成

上記でも述べたとおり、故障した排水機場ポンプ設備のデータ収集が困難なため、機械学習に使用する教師データとして正常データに疑似的な故障を付与した疑似異常データを作成した。異常データ作成の1例としてA排水機場3号機の「ポンプ-主軸異常-ミスアライメント」の異常データの作成方法を示す。「ポンプ-主軸」の正常時の時系列波形をFFT処理し、図-4に示す振幅変位周波数図を作成する。次に、ミスアライメント異常の場合に発生する振動周波数成分を振動法により式-1で計算し、その結果を図-4の振幅変位周波数図に加える。異常周波数を加えた振幅変異周波数図を図-5に示す。この方法により作られたデータを振動法の理論的なミスアライメントの学習用の異常データとした。

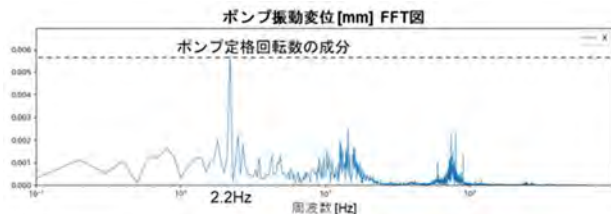


図-4 ポンプ主軸 振動変位周波数図 (正常)

$$F_m = n \times f_r \quad (1)$$

F_m : 高調波 (異常時発生周波数)

f_r : 回転数、 $n = 1, 2, 3$

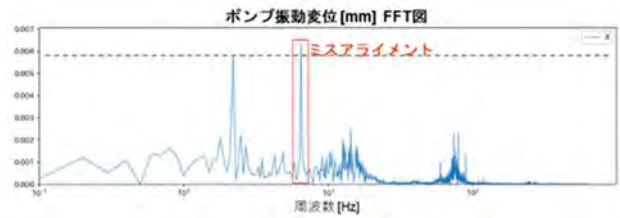


図-5 ポンプ主軸 振動変位周波数図 (ミスアライメント)

同様の考え方で作成した「緩み」、「がた」、「羽根異常」を付与した振幅変異周波数図を図-5に示す。これら疑似異常データを学習用データとしてAIモデルを学習させていくが、ここで、排水機場ポンプ設備の稼働について補足すると、大雨の時など出水の恐れがある場合に実排水を伴って稼働する本運転と、点検時など稼働水位が十分でなく、吐出弁の開度を絞るなど本運転時と違い定格運転に達しない管理運転の2つの稼働状況がある。そこで、1つのAIモデルでは精度よく判定が出来ない可能性が高いため、稼働状況を考慮し、本運転データと管理運転データの両方を用いて学習することで、実排水を伴う本運転モードと管理運転モードの2つのAIモデルを構築した。現在のシステムでは運転モードの自動判別はできないが、今後、稼働データがどちらの運転モードか自動で特定できるよう改良する予定である。図-6に転がり軸受の異常種別判定結果事例を示し、図-7には主軸異常の異常半径結果事例を示す。それぞれ、図-3に示した異常レベル判定の際、異常種別の判定がされていた場合に例のような結果を表示する。

排水機場	号機	設備	異常名称
蓮花川	2号機	ポンプ	転がり軸受振動異常
異常種別判定 予測確率			
転がり軸受振動異常#23132			
転動体異常 46%			
内輪異常 24%			
外輪異常 24%			
保持器異常 4%			
転がり軸受振動異常#29336			
外輪異常 80%			
転動体異常 34%			
内輪異常 30%			
保持器異常 15%			

図-6 異常種別判定結果 (転がり軸受)

排水機場	号機	設備	異常名称
鈴根五郎	2号機	ポンプ	主軸振動異常
異常種別判定 予測確率			
主軸振動変位			
緩み・ガタ	88%		
羽根異常	57%		
ミスアライメント	23%		
アンバランス	14%		

図-6 異常種別判定結果（主軸）

異常種別の判定は、部位ごとにまとめて表示され、予測確率の高い順に項目を並び替えて表示している。

3.2 異常種別の判定精度

試作した AI 異常検知システムの異常種別判定の判定精度について、「ポンプ-主軸異常」を1例として紹介する。状態監視モニタリングシステムの「ポンプ-主軸変位」の正常と考えられるデータを AI 異常検知システムで解析した結果は図-7 のとおりであり、正常データの場合、主軸異常で現れる各種異常の予想確率は突発的なノイズを除くと0%に近い確率で点検結果の健全度評価も健全であった。次に、疑似的にミスアライメントの異常データを作成し、作成したデータを AI 異常検知システムで解析した結果を図-11 に示す。この結果からは、疑似異常データであるが、ミスアライメント異常の予想確率は100%に近い確率となった。以上の結果からは試作モデルにおいて、AI 異常検知システムの異常種別判定がある程度機能していると考えられる。



図-7 ポンプ主軸の判定結果（健全）



図-8 ポンプ主軸の判定結果（ミスアライメント）

4. まとめ

状態監視モニタリングシステムは、主要機器の振動などの時系列データを自動的に取得、記録できる装置である。この装置は、管理運転のデータのほか、本運転のデータの取得を可能にした。また、AI異常検知システムは、主要機器の異常の有無だけではなく、故障の程度を表す異常レベル判定や、故障の原因を表す異常種別判定ができるものである。異常レベル判定の基準は、数値基準の「河川ポンプ状態監視ガイドライン」や国土交通省「河川ポンプ設備点検・整備・マニュアル（案）」の健全度評価を参考に閾値を設定した。今後もテストベッドでの様々な実稼働データの収集やシステムで解析するために最も適したデータ処理方法等AI異常検知システムの精度向上を目指して取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 平地一典、永長哲也：排水機場における状態監視自動モニタリングシステムについて、第64回（令和2年度）、北海道開発技術研究発表会、防48、2021。
- 2) 平地一典、永長哲也：機械設備のAIを活用した異常検知について、第65回（令和3年度）、北海道開発技術研究発表会、防56、2022。