

# AI技術を活用した排水機場ポンプ設備の予防保全に関する研究

平地一典・上野仁土

## 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、河川用機械設備は、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が懸念されている。また、気象のゲリラ化による河川用機械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土木機械設備の「確実な稼働」は重要な役割を担う。更に国民の生命と財産を守るため将来に渡り確実な稼働を担保し続ける必要がある反面、整備予算は厳しい状況にある。排水機場ポンプ設備概要図を図-1に示す。このうちポンプ、原動機、減速機を本取組の対象とした。

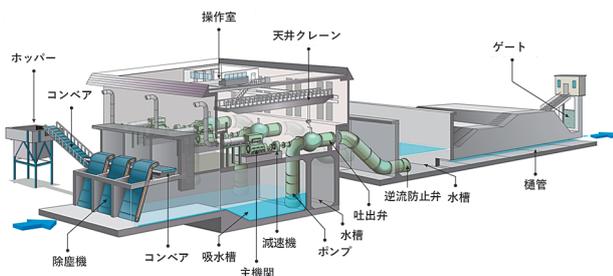


図-1 排水機場概要図 (横軸ポンプ)

この相反する状況下であっても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。そこで、土木研究所先端技術チーム及び寒地土木研究所寒地機械技術チームでは効率的で的確な設備維持管理を行うため、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<sup>1)</sup>。これまでの取組では、適切な状態監視保

全を行うため、設備点検のために実施される排水機場の管理運転による短い運転時間のスポットデータを計測し、診断を行う傾向管理が主流であった。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、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、設備の状態を連続的な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 (以下「モニタリングシステム」という。))」を構築した。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<sup>2)</sup>。

## 2. 状態監視モニタリングシステム

### 2.1 計測状況とセンサの種類

九州から北海道まで全国5か所の排水機場にテストベッドとして計測センサを常設し、管理運転及び実排水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になった。表-1にモニタリングシステムでの計測による効果及び各機場による計測項目を示し、写真-1に設置事例を示す。

表-1 計測項目と期待される効果

	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
減速機	3方向加速度計	GT減速機振動加速度	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	減速機本体振動加速度	歯車、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	

従来の点検では、上記の効果を得るためには、点検時に専門技術者が、可搬型の加速度センサ等を用いて振動計測を行う。更に精密な診断するには取得した振動波形データを別途、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が、このモニタリングシステムと以下のAI異常検知システムを実装することで、専門技術者の負担が軽減されるよう取り組みを進めている。実装にあたっては、現在のモニタリングシステムのセンサ類は全て有線接続となっているが、今後センサの無線化を検討し、設置にかかるコストや手間の軽減を目指す予定である。

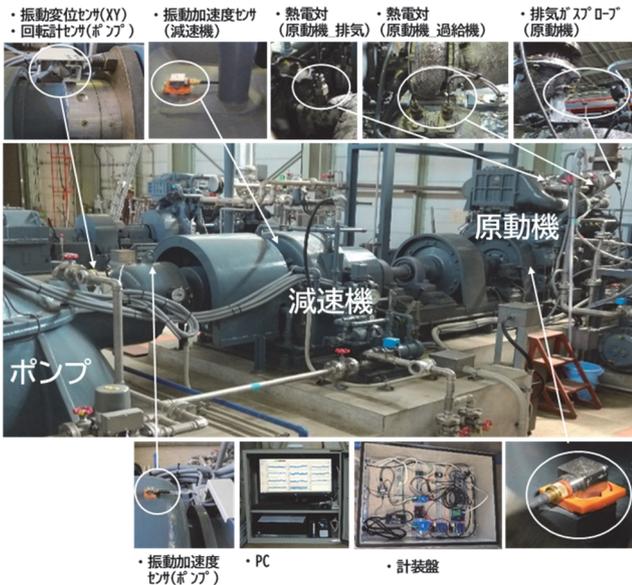


写真-1 状態監視モニタリングシステム設置事例

## 2.2 システム構成

モニタリングシステムのシステム構成図を図-2に示す。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。

また図-2に示すように収録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、現在は先端技術チームにテストベッドのデータを集約し、事務室にてモニタリングシステムの稼働状況の確認ができる。

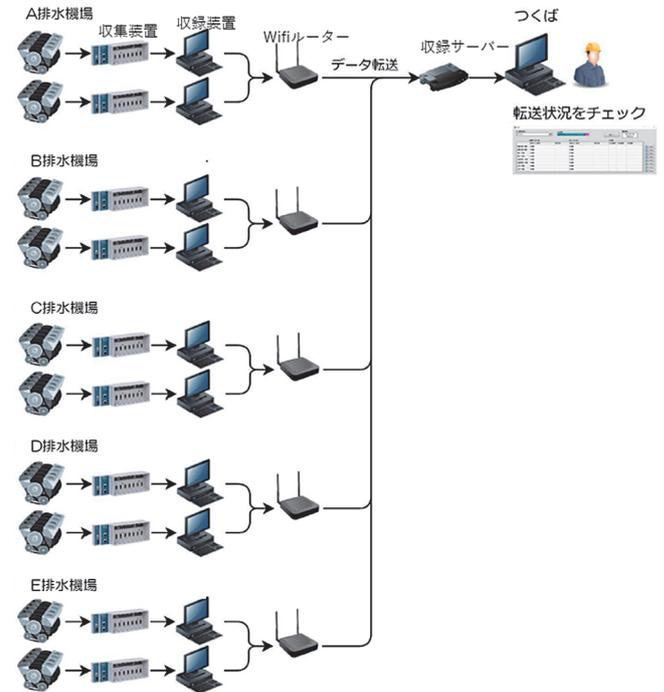


図-2 システム構成図

## 3. AI異常検知システム

### 3.1 AI異常検知システム

モニタリングシステムでデータを取得すると同時に、主要機器の異常の有無と程度を示す異常レベル判定と、異常の箇所を示す異常種別判定ができるよう機械学習を利用してAI異常検知システムを試作した。AI異常検知システムは、モニタリングシステムで収集した多種多様なデータを材料とし、現段階では理論が明確になっている振動法を主な手段に、AI技術という道具を使い、数少ない運転データから異常を見つけ出すことを目標とした。この3要素の組合せにより、単に異常という判断のみだけではなく、異常のレベルや設備のどこに異常が発生しているかを示す異常種別の判定が可能なシステムを目指すものである。

### 3.2 異常レベル判定

試作した異常検知システムでは、異常を確認したとき、異常の有無だけではなく、異常の程度で

ある異常レベルも判定できる仕様とした。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-2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」と国際規準であるISO振動規格(ISO20816-1)を健全度評価の各段階と整合をとり、仮の閾値を定めた。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。例として、健全度評価の判定基準(原動機の例)を表-3に示す。試作した異常検知システムでの判定事例を図-3に示す。

表-2 点検結果による健全度評価

健全度	評価	対処方法
措置段階	×	点検の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じており、緊急に措置(修繕・更新・取替)が必要な状態
予防保全段階	△1	点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じる可能性があり、予防保全の観点から緊急に措置(整備・更新・取替)を行うべき状態
予防保全計画段階	△2	点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが、2～3年以内に措置(整備・更新・取替)を行うことが望ましい状態
要監視段階	△3	点検の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが状態の経過観察が必要な状態
健全	○	点検の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていない状態。

表-3 健全度評価の判定基準(原動機)

設備箇所	監視対象	健全度評価	閾値	
原動機	本体振動	×	措置段階	7.5mm/s以上
		△1	予防保全段階	平常平均の6.3倍以上
		△2	予防保全計画段階	2.8mm/s以上
		△3	要監視段階	平常値平均の2.5倍以上
		○	健全	平常値平均の2.5倍未満

排水機場	号機	設備	異常名称	チャンネル	異常レベル
1号機	原動機	本体振動異常	X	措置段階	
1号機	原動機	本体振動異常	Y	予防保全段階	
1号機	原動機	本体振動異常	Z	措置段階	
1号機	原動機	本体振動異常	X	措置段階	

図-3 異常レベル判定事例

### 3.3 異常種別判定

異常種別判定には、いくつかのAIアルゴリズムの中で比較した結果、教師あり学習の「Random Forest(決定木が出した予想判定を集計し、多数決で予想判定)」をモデルに実装し異常検知システムの試作を行った。精度の高いモデルの構築を行うには、教師データとなる異常データが必要となるが、故障した排水機場ポンプ設備のデータ収集は困難なため、今回の取組では異常の教師データを人工的に生成することで、テストベッド毎にモデルを構築及び異常種別判定を行った。

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説明する。「ポンプ-主軸」の正常時の時系列波形をFFT(Fast Fourier Transform)処理し、図-4上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上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-4下に示す。この方法により作られたデータは、振動法の理論的なミスアライメントの異常データとなる。同様の方法でアンバランス、緩み・ガタ、羽根異常の振動理論に基づく異常データを作成する。そして、この方法で作られた異常データとモニタリングシステムが収集しているデータを「Random Forest」で学習させ、試作モデルを構築した。図-6にモデル構築フロー図を示す。異常種別判定は、このモデルを使い、現時点ではアンバランス、ミスアライメント、緩み・ガタ、羽根異常の判定が可能となっている。

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

F<sub>m</sub>:高調波(異常時発生周波数)

f<sub>r</sub>:回転数、n = 1、2、3

排水機場ポンプ設備の稼働は、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実排水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つのモデルでは精度よく判定が出来ない恐れがあるため、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つのモデルを図-5のフロー図により構築した。図-6に異常種別判定結果事例を示す。ここでの予測確率は、モデルでの種別異常の判定確率を示している。

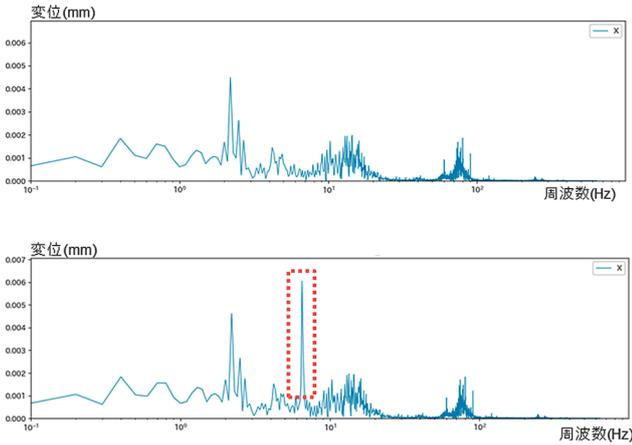


図-4 ポンプ主軸振幅変異周波数図（上:正常、下:異常）

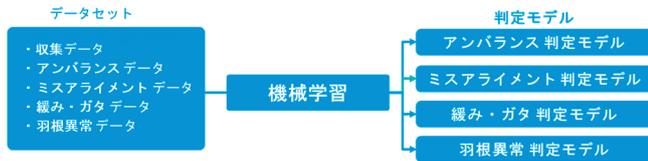


図-5 モデル構築フロー図

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
<b>異常種別判定 予測確率</b>			
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 異常種別判定結果事例

#### 4. まとめ

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、実排水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、従来、専門技術者に委ねていた計測、解析を一連の流れで自動的に行い、主要機器の異常の有無だけではなく、異常の程度を表す異常レベル判定や、異常の原因を表す異常種別判定が可能となった。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.

平地一典



土木研究所 技術推進本部  
先端技術チーム 主任  
研究員  
HIRACHI Kazunori

上野仁士



土木研究所 技術推進本部  
先端技術チーム  
主任研究員  
UENO Hitoshi