第66回(2022年度)　北海道開発技術研究発表会論文

排水機場ポンプ設備のAI異常検知システムについて

（国研）土木研究所　寒地土木研究所　寒地機械技術チーム　　○戸川　卓治
中島　淳一
永長　哲也

河川用排水機場ポンプ設備は、内水被害を軽減する重要な社会基盤設備である。国土交通省では、機械設備の整備や更新を適切な時期に行うため、定量的に設備の状態を把握し、故障の発生を未然に防止する「状態監視保全」を推進している。寒地機械技術チームにおいても、排水機場ポンプ設備の状態監視保全に関する研究を行っており、ポンプの運転にあわせて、振動などのデータを自動的に取得できる状態監視モニタリングシステム及びAI異常検知システムを開発した。

キーワード：機械設備、維持管理、状態監視、AI

1. はじめに

河川に設置されている河川用排水機場ポンプ設備は、豪雨による内水被害を軽減する重要な社会基盤設備である。

国土交通省では、機械設備の維持管理に影響する整備や更新を適切な時期に行うため、定量的に機械設備の状態を把握し、故障の発生を未然に防止する「状態監視保全」を推進している。

このことより、寒地機械技術チームにおいても、排水機場ポンプ設備の状態監視保全に関する研究を行っている。ポンプの運転開始にあわせて、排水機場ポンプ設備の主要機器の振動などのデータが、自動的に取得できる状態監視モニタリングシステムを開発した。さらに、状態監視モニタリングシステムがデータを取得すると、排水機場ポンプ設備の原動機、減速機、ポンプの故障の有無と程度を解析する異常レベル判定と、故障の原因を見つけ出す異常種別判定を行う、AI 機械学習を利用したAI 異常検知システムを開発した。

本稿では、令和 4 年の運転データを使って、AI 異常検知システムが、異常判定を行った結果を報告する。

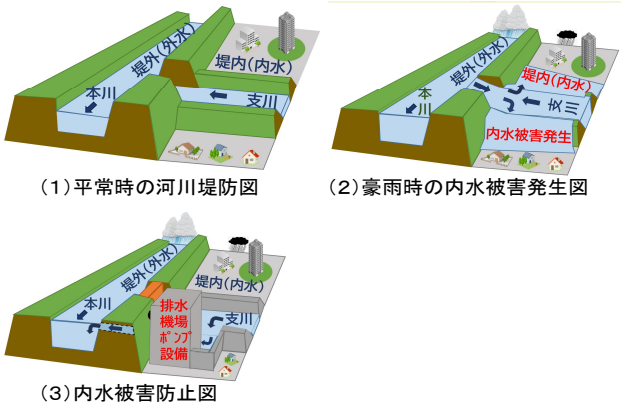
なお、本研究は、つくば中央研究所先端技術チームと連携し、内閣府の官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）の支援を得て実施している。

2. 排水機場ポンプ設備の役割

平常時の河川は、堤内側の支川から堤外側の本川に流下する（図-1（1））。

しかし、本川水位が上昇したとき、本川の水は支川へ逆流する。また、堤外側の支川の水も本川に流れ込めず、支川水位が上昇する。よって、内水氾濫が起きる（図-1（2））。

そこで、内水氾濫を防ぐため、ゲートを堤防に設置し、本川の水が支川に入ることを防ぐと同時に、排水機場ポンプ設備を設置し、ポンプ運転により、支川の水を本川に移す。この方法で、豪雨のとき、内水氾濫を防いでいる（図-1（3））。



（1）平常時の河川堤防図　（2）豪雨時の内水被害発生図　（3）内水被害防止図

図-1　内水被害防止図

3. 排水機場ポンプ設備の構造

排水機場ポンプ設備の三大要素は、ポンプの動力となる原動機、ポンプに適正な回転数とトルクを伝える減速機、河川の水を支川から本川へ移すポンプである。

原動機は、主に船舶用ディーゼル機関が使用されている。減速機は、歯車と軸受から構成されている。ポンプは、様々な羽根車構造があり、主に横軸形式と立軸形式がある。なお、北海道地域は、冬季の水路凍結があるため、羽根車が、水没していない横軸形式が多い。

原動機、減速機、ポンプからなるポンプ設備は、危機分散のため、並列に複数台設置される。

排水機場ポンプ設備は、設置場所の条件により、個別に設計される。製造会社、規模、機種、年代も違うので、保守管理のためのデータ基準値も異なる。

TOGAWA Takuji, NAKAJIMA Junichi, EINAGA Tetsuya

また、製造ラインのように、常に動いている設備は、常用設備と呼ばれているのに対して、排水機場ポンプ設備は、常に動いていないので、「非」常用設備と呼ばれている。

排水機場ポンプ設備（横軸）の概要図を示す(**図-2**)。

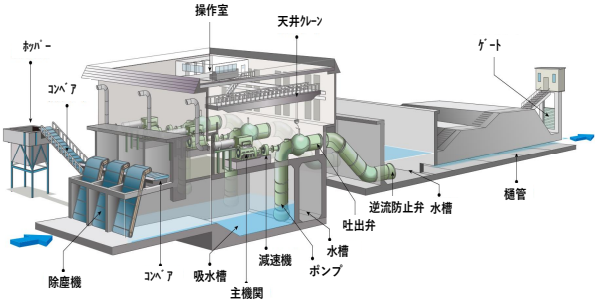


図-2　排水機場ポンプ設備（横軸）の概要図

4. 状態監視モニタリングシステムと AI 異常検知システムの開発

国土交通省は、排水機場ポンプ設備の年点検を専門業者に発注し、その点検結果により傾向管理を行っている（**表-1**）。したがって、点検結果の報告を受けるまでに時間がかかっている。

表-1　国土交通省における保守管理の現状

現状の点検・診断・管理（Before）

点検：専門技術者等による月･運転時･年点検
目視、**携帯測定器**による**スポットな計測**
→故障症状の把握が**断片的**かつ**限定的**
→予兆検知が**未開拓**
（症状が進行しないと検知できない）
→本運転データの**取得が困難**
（災害対応の緊急時は、点検どころではない）

診断：**専門技術者等**による**精密診断**
（異常等の場合に**必要に応じて**）
携帯型計測器による計測･解析

管理：設備管理職員は点検･診断を外注し、
点検データにより傾向管理を実施する と共に、
健全度評価を実施（**遅延の発生**）

また、地方自治体には機械系職員が少ないため、土木系職員が排水機場ポンプ設備の点検を行っている。そのため、故障の有無の確認に苦労をしている。

これらの問題を解決するため、機械の専門的な知識がなくても、故障時に、ただちに故障の程度と内容を見つけ出せる状態監視モニタリングシステムと AI 異常検知システムを開発した。

状態監視モニタリングシステムと AI 異常検知システムの導入による保守管理の将来展望を**表-2** に、恩恵を**表-3** に示す。

表-2　システム導入による保守管理の将来展望

今後の点検・診断（After）

点検：主たる点検項目について、**常設計測器**による
無人での時系列データ自動計測
→故障症状の把握が**全体的**かつ**網羅的**
→予兆検知が**一定程度可能**
→本運転データの**取得が可能**

診断：主たる診断部位について、**自動計測時系列**
データによる常時自動精密診断

管理：主たる部分の**外注点検項目、診断項目の削減**
主たる部分の点検・診断結果並びに健全度評価
（**自動判定**）の**遅延のないリアルタイム把握**

表-3　システム導入による保守管理現場への恩恵

恩恵（Benefit）

- 設備不稼働の回避
- 主たる部分の異常の早期把握
- 早期対応による不稼働時間の軽減
- 職員の負担軽減
- 管理経費節減

5. 状態監視モニタリングシステムの概要

状態監視モニタリングシステムは、平成 30 年度より、老朽化、稼働率が高い排水機場ポンプ設備に設置されている。設置場所は、東北、関東、九州、北海道の 4 地域 5 機場 10 基である。センサの取り付け位置は、主要機器である原動機、減速機、ポンプである。なお、センサは、異常を見つけるため、振動などのデータを収集している。

状態監視モニタリングシステムは、排水機場ポンプ設備のポンプ運転が開始されると、自動的に主要機器の振動などのデータ収集と記録が始まり、ポンプの運転が停止するとデータの収集と記録が止まる装置である。この装置により、ポンプの管理運転（点検のとき、ポンプを動かす運転）のほか、本運転（内水被害を防止するため、ポンプを動かす運転）のデータ取得も可能になった。

状態監視モニタリングシステムの構成例として、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌河川事務所月寒排水機場 2 号機のセンサ設置状況を**写真-1**、センサ諸元を**表－4** に示す。

写真-1 状態監視モニタリングシステム センサ設置状況

TOGAWA Takuji, NAKAJIMA Junichi, EINAGA Tetsuya

表-4　状態監視モニタリングシステム　センサ諸元

設置場所	番号	名称	数量	会社名	規格
原動機	①	排気ｶﾞｽﾌﾟﾛｰﾌﾞ	8	testo	testo350
	②-1	熱伝対(過給機)	6	坂口電熱	T-35型
	②-2	熱伝対(排気)	2		
	③	振動加速度ｾﾝｻ	1	電子応用	SA12ZSC-TI
	－	熱伝対中継ﾎﾞｯｸｽ	1	－	－
	－	排ガス分析計	1	testo	testo350
	－	温度表示機	1	村山電機	SM-9T
減速機	④	振動加速度ｾﾝｻ	1	電子応用	SA12ZSC-TI
ﾎﾟﾝﾌﾟ	⑤	振動変位ｾﾝｻ(XY)	2	SENTEC	HA-101S
	⑥	回転ｾﾝｻ	1	小野計測器	LG-930
	⑦	低周波数振動ｾﾝｻ	1	小野測器	NP-7310
	⑧	振動加速度ｾﾝｻ	1	電子応用	SA12ZSC-TI
計測装置	⑨	PC	1	－	－
	⑩	計測盤	1	－	－

6. AI 異常検知システム

(1)　AI 異常検知システムの概念

AI 異常検知システムは、機械学習を利用している。状態監視モニタリングシステムがデータを取得すると同時に、主要機器の故障の有無と程度を示す異常レベル判定と、故障の原因を示す異常種別判定ができるものである。なお、異常レベル判定で異常を検知したときのみ、異常種別判定を行う仕組みである。

図-3 のとおり、AI 異常検知システムは、状態監視モニタリングシステムで収集したデータを材料とし、振動法という手段を拠り所に、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、異常のレベルや異常の種別の判定まで行える特徴を持つ。

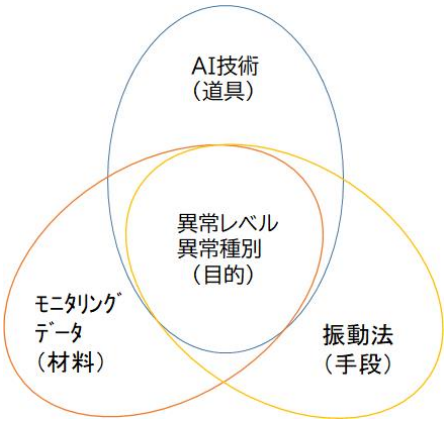


図-3　AI 異常検知システムの三要素概念図

なお、AI 異常検知システムの試作対象である排水機場ポンプ設備は、規模や特徴により 3 機場 6 基あり、収集データ数は、原動機、減速機、ポンプを対象に 10 種類である（**表-5**）。

表-5　排水機場ポンプ設備の収集データ

	原動機（ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ機関）				ポンプ			減速機		
排水機場名	本体振動 X,Y,Z	気筒温度	排気ガス温度	排気ガス成分濃度	本体振動 X,Y,Z	主軸変位 X,Y	転がり軸受振動	本体振動 X,Y,Z	歯車振動 X,Y,Z	軸受振動 X,Y,Z
蓮花川 1,2号機	○				○					
鈴根五郎 1,2号機	○				○	◎				
月寒 2,3号機	○	○	○	○	○	◎	◎	○	◎	□

○：異常レベル判定のみ 、□：異常種別判定のみ、◎：両方

AI 異常検知システムの動作環境は、OS が Ubuntu18.04LTS および Ubuntu20.04LTS である。

以下に、異常レベル判定が正常に終了した場合の表示を**図-4** に示す。

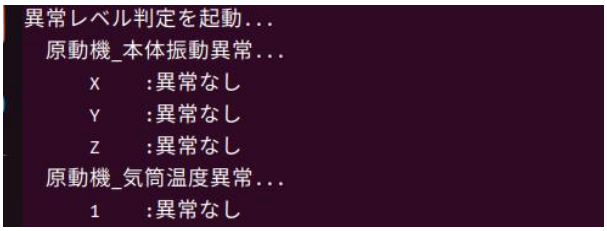


図-4　正常に終了した場合の表示

(2)　異常レベル判定（モニタリングデーター材料）

AI 異常検知システムは、故障を確認したとき、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表示するものである。

国土交通省の「河川ポンプ設備点検・整備・マニュアル（案）」は、健全度評価（**表-6**）を定めている。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 振動規格を健全度評価の各段階と整合をとって、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。

例として、健全度評価の判定基準（原動機の例）を**表-7** に示す。

表-6　点検の結果による健全度評価

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早急に措置(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。

TOGAWA Takuji, NAKAJIMA Junichi, EINAGA Tetsuya

表-7　健全度評価の判定基準（原動機の例）

設備箇所	監視対象	異常レベル判定基準(閾値) 判定指標：振動シビアリティ（振動速度実効値の平均）	
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

(3) 異常種別判定

a) 異常種別判定の概要

異常種別判定は、AI 技術のいくつかのアルゴリズムを比較した結果、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）」を使用した。その理由は、判別精度が高く、高度な CPU 処理能力も必要がないためである。

AI 異常検知システムの異常種別判定の項目を、**表-8** に示す。

表-8　異常種別判定の項目

ポンプ		減速機		
主軸異常	転がり軸受異常	歯車異常		軸受異常
		平歯車減速機	遊星歯車減速機	平歯車減速機内蔵4種軸受
アンバランス ミスアライメント 緩み・ガタ 羽根異常	内輪異常 外輪異常 転動体異常 保持器異常	噛み合い異常 歯車偏心異常 歯車偏角異常 歯形異常 歯車欠損異常	噛み合い異常 太陽歯車異常 遊星歯車異常 内歯車異常	内輪異常 外輪異常 転動体異常 保持器異常

b) 異常データの作成（振動法―手段）

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、異常種別判定に使用する教師データを作成した。

例として、月寒排水機場 3 号機の「ポンプ-主軸異常-ミスアライメント」の異常データの作り方を説明する。

「ポンプ-主軸」の正常時の時系列波形を FFT 処理し、振幅変位周波数図を作成する（**図-5**）。次に、振動法を使い、ミスアライメントのとき、発生する高調波成分を計算する（**式-1**）。さらに、（**式-1**）で計算した高調波成分を（**図-5**）で作成した振幅変位周波数図に加える（**図-6**）。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。

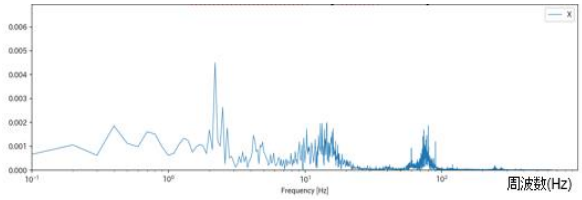


図-5　ポンプ主軸　振幅変位周波数図(正常データ)

$$Fm = n \times fr \qquad (式-1)$$

Fm：高調波、fr ：回転数、n = 1、2、3

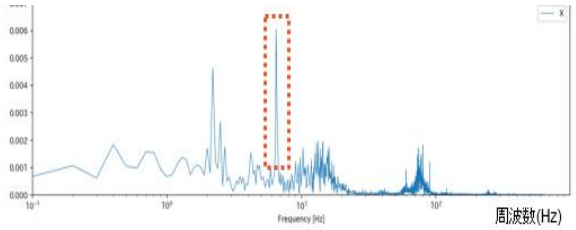


図-6　ポンプ主軸　振幅変位周波数図（異常データ）

c) 異常種別判定の AI 機械学習（AI 技術―道具）

機械学習には、多くの教師データが必要である。しかし、本運転と管理運転の異常の教師データは、希少であり、機械学習に使用できるデータの数は限られている。そのため、異常の教師データを人工的に生成する必要がある。

例として、「ポンプ-主軸」の異常データの生成方法を示す。

前頁 b）において、「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と同じ方法で、正常データと振動法を使い、アンバランス、緩みガタ、羽根異常の異常データを作成する。そして、この方法で作られたアンバランス、ミスアライメント、緩みガタ、羽根異常の異常データと状態監視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、判定モデルを作り出す。

異常種別判定は、この判定モデルを使い、アンバランス、ミスアライメント、緩みガタ、羽根異常の判定確率で示される（**図-7**）。

なお、データセットは、水量が十分で定格負荷で運転できる本運転と、水量が少なく負荷が小さい管理運転では異なる。そのため、AI 異常検知システムでは、本運転と管理運転の選択設定を行い、分けて解析する。

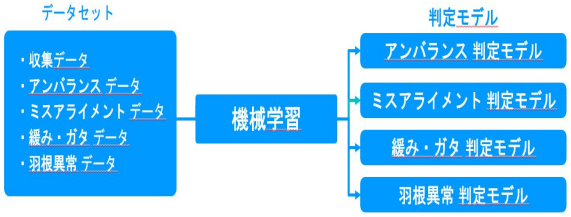


図-7　ポンプ主軸異常の機械学習

d) 異常種別判定の判定確率精度

AI 異常検知システムの異常種別判定の判定確率精度は、以下の方法により調べた。

例として、「ポンプ-主軸異常」を示す。

状態監視モニタリングシステムの「ポンプ - 主軸変位」のデータを AI 異常検知システムで解析を行った。

まず、正常データを使いシステムで解析したところ、ミスアライメントの予想確率は、約 0%であった（**図-8**）。なお、このデータは正常である。点検結果の健全度評価も健全である。次に、この正常データを前頁 b）の方法で、ミスアライメントの入った異常データに作り直す。さらに、そのミスアライメント異常データを、AI 異常検知システムで解析を行った（**図-9**）。その結果、ミスアライメント異常の予想確率は約 100%となった。

すなわち、点検結果で健全とされたデータを使い、AI 異常検知システムで解析された結果は、異常である確率が約 0%であるのに対して、正常データと振動法を合わせて作られた異常データを解析した結果は、異常である確率が約 100%であった。この結果は、AI 異常検知システムの異常種別判定が機能していることを示している。

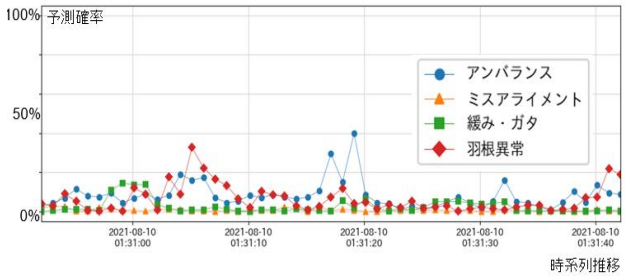


図-8　ポンプ主軸の判定結果（健全度評価-健全）

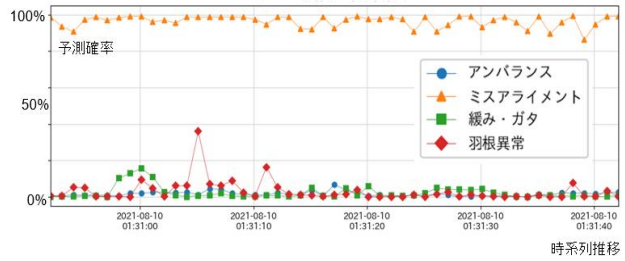


図-9　ポンプ主軸の判定結果（アンバランス）

7. AI 異常検知システムによる運転データを使った異常判定

（1）AI 異常検知システムによる本運転の異常判定

月寒排水機場 3 号機の令和 4 年度の本運転データの中から任意データ（1 分単位の 20 件）を抽出し、異常判定を行った。異常判定は、以下の結果が得られた。なお、異常判定件数は重複を含んでいるため、延べ数である。

①原動機-本体振動異常	6 件
②減速機-本体振動異常	8 件
③ポンプ主軸-転がり軸受異常	4 件
④減速機-歯車振動異常	8 件
⑤異常なし	2 件
⑥エラー	4 件

AI 異常検知システムの表示例として、「原動機-本体振動異常」の異常レベル判定を**図-10**、「減速機-歯車振動異常」の異常種別判定を**図-11** に示す。

図-10　レベル判定（原動機-本体振動異常）

図-11　種別判定（減速機-歯車振動異常）

（2）異常判定となった原因

異常判定に使用した本運転データは、正常データであることを確認している。これに対して、AI 異常検知システムが、異常を示した原因は以下のとおりである。

a）原動機-本体振動異常と減速機-本体振動異常の原因

原動機-本体振動異常の判定方法を**図-12** に示す。原動機-本体振動異常は、振動シビアリティという値で異常判定を行っている。

異常判定を行う方法は、まず、振動加速度データを積分し、速度データに変換する。次に、RMS 算出式で計算を行い、振動シビアリティ値にする。最後に、この値と異常レベルの各段階の閾値を比較し、異常レベルの判定の結果が得られる。

上記の処理過程において、正常データが異常データと判定された原因は、以下の 3 点が考えられる。

①原動機の始動と停止時の動きは、不安定な状態であり、振動も不安定になる。すなわち、異常判定に、この状態のデータが含まれているためと考えられる。よって、異常判定から、このデータを取り除く必要がある。

②振動加速度データを積分し、速度データに変換するとき、電気信号の直流成分のため、振動加速度の波形が右肩上がりになる。この中心化の方法が不適切だったと考えられる。

③振動加速度データにノイズが入るため、判定に影響を与える。これを防止するため、ハイパスフィルターでノイズを取り除いている。この取り除く振幅範囲が不十分だったと考えられる。

減速機-本体振動異常の原因も基本的に同じである。

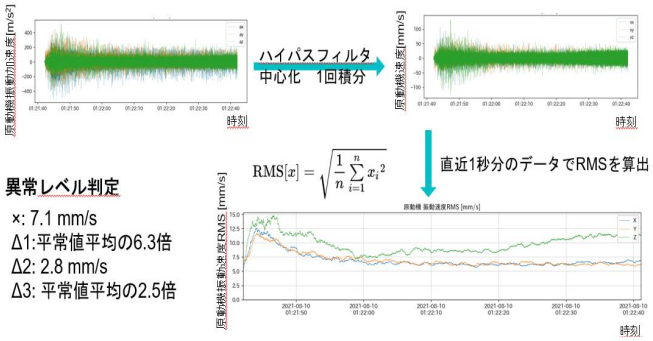


図-12　原動機-本体振動異常の解析方法

ｂ）ポンプ主軸-転がり軸受異常

ポンプ主軸-転がり軸受け異常の判定方法は、振動加速度データの波高率という指標で行っている。なお、波高率は、振動加速度振幅値のピーク値と実効値の比である。この計算は、瞬間値で行っている。そのため、ノイズ等による突発的な大きな値が、ピーク値になるので、波高率が大きくなる。そこで、この影響を少なくするため、一定範囲の平均値をピーク値とする必要がある。

ｃ）減速機-歯車振動異常

減速機-歯車振動異常の判定方法は、振動加速度データの過酷度という指標で行っている。なお、過酷度は、歯車の噛合い周波数の卓越値と噛合い周波数側帯波の卓越値の比である。各卓越値と周波数値を誤認して計算したためと考えられる。

(3) 今後の予定

今後、上記 (2) の修正を行うとともに、異常検知システムの解析時における入力の自動化する。そして、排水機場ポンプ設備に異常があったとき、寒地土木研究所と施設管理者に自動的に通知が行えるシステムを検討する予定である。

8. 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データを自動的に取得、記録をできる装置である。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」などを、国土交通省「河川ポンプ設備点検・整備・マニュアル（案）」の健全度評価に整合させた。AI 異常検知システムの運用をとおして、判定基準値の適合性を調べていく必要がある。

理論的に作られた異常データを使い、異常種別判定を解析した。しかし、実際に排水機場ポンプ設備が故障したときの異常データと理論的な異常データと比較し、正しいものであるかの検証が必要である。

今後は、状態監視モニタリングシステムと AI 異常検知システムにより、排水機場ポンプ設備の故障があったとき、寒地土木研究所と施設管理者に自動的に通知が行えるシステムを検討する予定である。

謝辞：本研究にあたり、施設と資料の提供等のご協力を頂いた国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所、関東地方整備局利根川上流河川事務所及び北海道開発局札幌開発建設部施設整備課、札幌河川事務所に多大なる謝意を表します。

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.

2) 排水機場ポンプ設備における異常検知システムの研究開発について（JCMA 支部だより）

4) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課･水管理国土保全局河川環境課、河川ポンプ設備点検・整備・マニュアル（案）（平成 27 年 3 月）、PP･4･4-4･16、

5) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課施工安全室、河川ポンプ状態監視ガイドライン（案）（平成 30 年 4 月）、pp. 84-104、

6) 岩壺卓三、古池治孝：ISO 基準に基づく機械設備の状態監視と診断（振動カテゴリーⅢ）【第 3 版】、振動技術研究会、pp. 422-430、pp. 334