

## 資料編

### 1. 実証研究結果

#### 1.1 実証研究概要

〈受託者〉

(株) ウォーターエージェンシー・日本電気(株)・旭化成エンジニアリング(株)  
・日本下水道事業団・守谷市・日高市共同研究体

〈事業名〉

振動診断とビッグデータ分析による下水道施設の劣化状況把握・診断技術実証研究

〈事業実施場所〉

茨城県守谷市守谷浄化センター、埼玉県日高市日高市浄化センター

〈委託研究期間〉

平成27年7月29日～平成28年3月31日 平成28年7月2日～平成29年3月31日  
平成30年8月2日～平成31年3月29日 令和元年7月2日～令和2年3月31日

〈事業の趣旨〉

下水道施設においては改築更新需要が増加しており、また、老朽化の進行に伴い適正な維持管理に必要な経費も増加していくことが考えられる。一方で、維持管理を支えてきた技術者の減少はとまらず、脆弱な管理体制や技術力の継承が懸念されている。

そのため、下水道施設について効率的な予防保全を実施し、施設のライフサイクルコストを考慮した修繕計画や更新計画を立案するなど、計画的・効率的な下水道施設の維持管理の推進が必要となっている。

このような背景をもとに、本実証研究では、ICTを活用したセンシング技術とビッグデータ分析技術により、下水道施設の状態を自動で監視、分析し、施設の劣化状況を定量的に把握・診断することを目的としている。

センシング技術では、主に振動センサのデータをオンラインで収集、分析することで設備の劣化状況を診断する。

ビッグデータ分析技術では、過去のデータをモデル化して設備の異常予兆検知、劣化状況の予測を行う。

さらに、センシング技術とビッグデータ分析技術を組み合わせることにより、設備の異常予兆検知の精度向上が期待できる。

## 1.2 実証規模

### (1) 実証規模

センシング技術では、守谷浄化センター（現有処理能力 48,000m<sup>3</sup>/日）において、回転型機械設備を対象に、実験装置と実機の振動値を測定し、測定データをもとにして機器の劣化検知を実施する。実験装置では人為的に異常を発生させて、振動値測定、分析を行う。

また、電源周波数の違いによるモータ振動の影響を調査するため、A 浄化センター（現有処理能力 175,000m<sup>3</sup>/日、電源周波数 60Hz）にも協力いただき、実機の振動値を測定し、測定データをもとにして機器の劣化検知を実施した。（表資 1-1 参照）

ビッグデータ分析技術では、日高市浄化センター（現有処理能力 18,800m<sup>3</sup>/日）で収集した運転データ、維持管理データを自動分析し、設備の劣化予測、故障の予兆検知を行う。

さらに、ビッグデータ分析の対象にセンシング技術の振動データを加えることで、設備の異常予兆検知の精度向上を図る。（表資 1-2 参照）

### (2) 実証範囲

センシング技術では 600rpm 以上の回転機器と、回転数 600rpm 未満の機器のうち一軸ねじ式ポンプと横軸渦巻ポンプを評価範囲とし、ビッグデータ分析技術では、分析に必要な条件を満たしている設備および機器を評価範囲とした。

表資 1-1 実証フィールド別の振動センサ設置機器対象台数

設備分類	機器種別	主な用途	対象台数 (守谷市)	実験装置 (守谷市)	対象台数 (A市)
沈砂池ポンプ	縦軸斜流ポンプ	汚水主ポンプ	5	-	4
水処理	横軸渦巻ポンプ	返送汚泥ポンプ	25	4	-
汚泥処理	一軸ネジ式ポンプ	汚泥供給ポンプ	17	-	-
送風機	ターボブロワ	曝気送風機	4	-	2
脱水機	遠心式脱水機	汚泥脱水機	3	-	-
濃縮機	遠心式濃縮機	汚泥濃縮機	2	-	-
脱臭装置	片持ち遠心ファン	脱臭ファン	4	-	-
対象機器台数			60	4	6

表資 1-2 ビッグデータ分析用サーバ等設置台数

設備名称	設置場所 (日高市)	OPCサーバ	カートリッジ・ 分析サーバ	クライアントPC
沈砂池ポンプ	沈砂池ポンプ棟電気室	2	-	-
水処理	水処理棟電気室	1	-	-
消毒・用水処理	処理水再利用棟電気室	1	-	-
汚泥処理	汚泥処理棟電気室	2	-	-
送風機	送風機棟電気室	1	-	-
管理棟本館	中央監視室	-	1	1
対象機器台数		7	1	1

### 1.3 本技術の実証計画、手順

#### 1.3.1 センシング技術

センシング技術では、機器の構成、扱う流体の特性、負荷変動といった下水道施設に特有の事象により、センシング技術を導入する上で考慮が必要になると考えられる項目について検証した。

守谷浄化センターに設置されている汚水主ポンプ、送風機、汚泥ポンプ、遠心濃縮機、遠心脱水機など 56 台の機器にオンライン振動センサを設置し、検証を行った。

表資 1-3 にオンライン測定対象機器を示す。

表資 1-3 オンライン測定対象機器

設置場所	機器名称	種別	設置場所	機器名称	種別	
汚泥濃縮設備B1F ポンプ室	濃縮汚泥引抜ポンプA	一軸ねじ式		汚水ポンプNo.1-A	立軸斜流	
	濃縮汚泥引抜ポンプB	一軸ねじ式		汚水ポンプNo.1-B	立軸斜流	
ボイラ棟B1F 補機室	No.1汚泥循環ポンプ	一軸ねじ式	沈砂池ポンプ棟B2F 汚水ポンプ室	No.2汚水ポンプ	立軸斜流	
	No.2汚泥循環ポンプ	一軸ねじ式		No.3汚水ポンプ	立軸斜流	
	No.4汚泥循環ポンプ	一軸ねじ式		No.4汚水ポンプ	立軸斜流	
水処理B1F 初沈管廊	生汚泥ポンプA	横軸渦巻		エアタン消泡水ポンプA	横軸渦巻	
	生汚泥ポンプB	横軸渦巻		エアタン消泡水ポンプB	横軸渦巻	
	生汚泥ポンプC	横軸渦巻		No.1返送汚泥ポンプ	横軸渦巻	
	生汚泥ポンプD	横軸渦巻		No.2返送汚泥ポンプ	横軸渦巻	
砂ろ過棟B1F 補機室	濃縮汚泥移送ポンプ1	一軸ねじ式	水処理B1F 終沈管廊	返送汚泥No.3ポンプA	横軸渦巻	
	濃縮汚泥移送ポンプ2	一軸ねじ式		返送汚泥No.3ポンプB	横軸渦巻	
	No.1濃縮機給泥ポンプ	一軸ねじ式		余剰汚泥ポンプA	横軸渦巻	
	No.2濃縮機給泥ポンプ	一軸ねじ式		余剰汚泥ポンプB	横軸渦巻	
	ろ過水送水ポンプ1	横軸渦巻		余剰汚泥ポンプC	横軸渦巻	
	ろ過水送水ポンプ2	横軸渦巻		余剰汚泥ポンプD	横軸渦巻	
	砂ろ過No.1原水ポンプ	横軸渦巻		機械棟1F 送風機室	ターボブロワ1-A	送風機
	砂ろ過No.2原水ポンプ	横軸渦巻			ターボブロワ1-B	送風機
	砂ろ過No.3原水ポンプ	横軸渦巻			ターボブロワ2-A	送風機
	機械棟用No.1散水ポンプ	横軸渦巻			ターボブロワ2-B	送風機
機械棟用No.2散水ポンプ	横軸渦巻	機械棟2F 脱水機室	No.1遠心脱水機	遠心式		
機械棟B1F 薬品注入ポンプ室	No.1汚泥投入ポンプ		一軸ねじ式	No.2遠心脱水機	遠心式	
	No.2汚泥投入ポンプ		一軸ねじ式	No.3遠心脱水機	遠心式	
	No.3汚泥投入ポンプ	一軸ねじ式	砂ろ過棟B1F 補機室	生物脱臭塔散水ポンプNo.1	横軸渦巻	
	No.4汚泥投入ポンプ	一軸ねじ式		生物脱臭塔散水ポンプNo.2	横軸渦巻	
	No.1薬液注入ポンプ	一軸ねじ式	砂ろ過棟1F 遠心濃縮機室	遠心濃縮機No.1	遠心式	
	No.2薬液注入ポンプ	一軸ねじ式		遠心濃縮機No.2	遠心式	
	No.3薬液注入ポンプ	一軸ねじ式				
	No.4薬液注入ポンプ	一軸ねじ式				
冷却水ポンプNo.1	横軸渦巻					
冷却水ポンプNo.2	横軸渦巻					

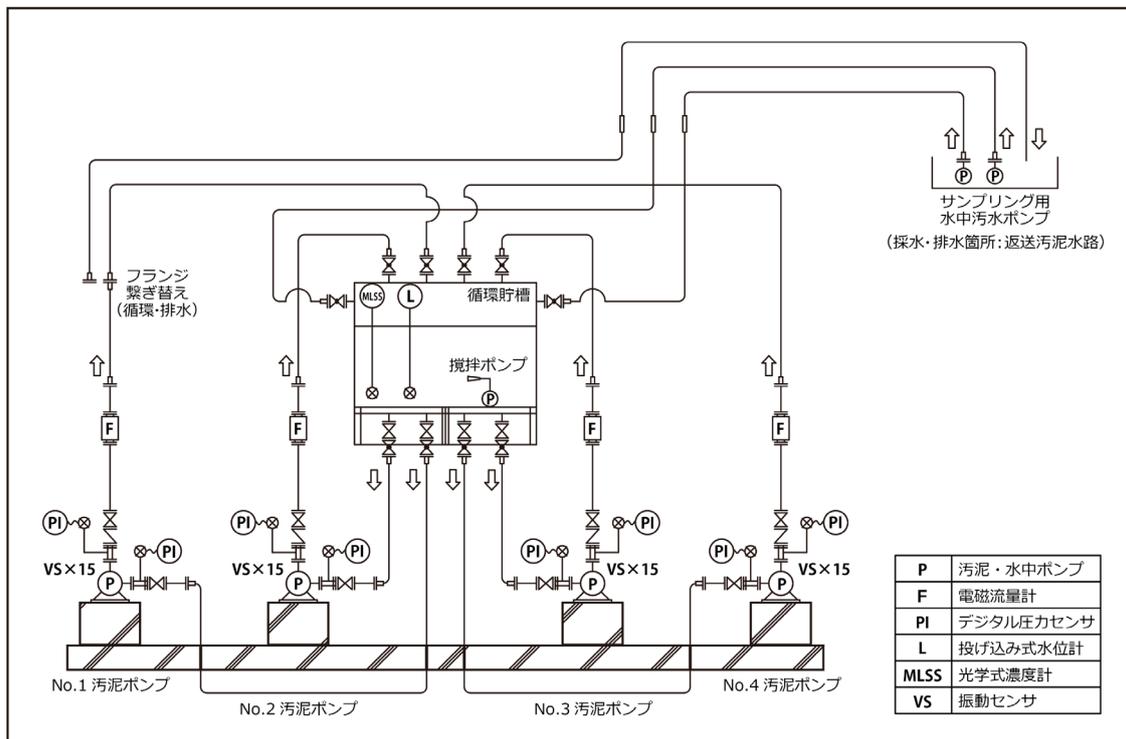
オンラインセンサ設置対象機器については、平成 27 年度、センサ設置に先立ち、機器の状態を事前に把握するためポータブル振動計によるオフライン測定を実施している。なお、守谷浄化センターの脱臭ファン 4 台については設置環境の関係から実験中もオフライン測定のみ実施することにした。

A 浄化センターにおいては、守谷浄化センターと同じ形式の汚水主ポンプ 4 台、送風機 2 台に対し、オフライン測定を実施している。(平成 27 年度および平成 28 年度)

また、人為的劣化状態における検証を実施するために、平成 27 年度、守谷浄化センターに汚泥ポンプ 4 台からなる実験装置を設置した。表資 1-4 に実験装置の機器リストを、図資 1-1 に実験装置のフローシートを示す。

表資 1-4 実験装置機器リスト

No.	名称・項目	規格・形状・寸法・仕様	単位	数量
1	汚泥ポンプ	吸込スクリュウ付汚泥ポンプHSP2-30C/0.75kW	台	4
2	サンプリング用水中ポンプ	水中ポンプCR65-F80N/1.5kW	台	2
3	攪拌ポンプ	水中ポンプCR501S-VF50/0.15kW (100V)	台	1
4	循環貯槽	鋼板製開放型1800mm□×2450mmH	基	1
5	電磁流量計	電磁式流量計EGM4100C 7.5k水協フランジ 口径80mm	台	4
6	圧力計	デジタル圧力センサ GP-M001 ±100kPa	台	4
7	連成計	デジタル圧力センサ GP-M001 ±100kPa	台	4
8	MLSS計	高濃度SSチェッカー 0~50,000mg/L	台	1
9	水位計	ガイドパルス式 0~2.0m	台	1
10	動力操作盤	屋外自立型鋼板製1400W×2050H×600D	面	1
11	振動解析装置	屋内壁掛鋼板製	面	1
12	オンライン振動センサ	圧電式加速度ピックアップ 専用ケーブル付	個	60



図資 1-1 実験装置フローシート

実験装置では、機械故障の主要因である流体異常、軸受きず、軸受潤滑不良について加速試験を実施する。

守谷浄化センターの機器と実験装置に設置したオンラインセンサによる測定値、守谷浄化センターとA浄化センターでのポータブル振動計による測定値をもとに以下の検証を行う。

#### (1) オンラインセンサ取付方向の検証

一般的に、オフラインでの振動測定は垂直方向 (V)、水平方向 (H)、軸方向 (A) の3方向で実施されるが、本技術のオンラインの振動測定においては、代表的な一方向で測定を行うこととし、その最適な取付方向を検証する。

#### (2) オンライン／ポータブルの比較

機器の振動測定の手法には、オンラインによるものと、オフラインによるものがある。

本研究では、検証段階においてはオンライン (連続的なデータの収集が可能) およびオフライン (オンラインセンサの設置箇所以外の補足的な測定も可能) の両者の特徴を活かして、必要に応じて使い分けを行う。本検証では、オフラインデータとオンライントレンドデータの比較により、両者に本質的な差異がないことを確認することで、オンラインデータで検証した事象と、オフラインデータで検証した事象とが整合することを検証する。

### (3) オンラインセンサ取付方法の評価

実験装置 No.3 および No.4 汚泥ポンプにおける振動計測において、センサ設置手法の比較を行い、計測誤差の有無やセンサ設置箇所による影響を検証し、劣化診断及び劣化予測の精度を向上させることを目的とする。振動計に用いるセンサは、数 10kHz までの高周波数の振動を計測できる加速度センサを使用している。このため、センサ取付面の状態によって振動レベルが左右されることが想定される。

本検証では、センサ取付方法、センサ取付面の組み合わせにより、どの条件が振動測定に最適であるかを検証する。なお、本評価は軸受劣化を模擬した実験装置にて行う。軸受劣化は変位、速度では検知できないため、検知可能な加速度のみで評価を行う。

### (4) 振動モードによる劣化検知感度の比較

実験装置における振動計測において、正常運転ポンプ（実験装置 No.1 汚泥ポンプ）と人為的に劣化状態を模擬したポンプ（実験装置 No.2、No.3、No.4 汚泥ポンプ）の機器毎に各振動モードの振動値を比較し、振動レベルの測定値によって、想定された機器の劣化状態が的確に捉えられていることを確認する。

### (5) 測定場所による評価

軸受きずを模擬した実験装置 No.3 汚泥ポンプの測定場所（軸受部近傍と軸受部でない場所）による振動加速度値の測定感度を比較し、測定場所による劣化検知感度の違いを確認する。なお、本評価も軸受きずが評価対象であるため、(3)と同様、加速度で比較を行う。

### (6) 実験装置による人為的劣化状態の測定

実験装置 No.4 汚泥ポンプの本体軸受部のフラッシングを行い、強制的な軸受潤滑不良による人為的劣化状態を模擬し、劣化進展の状態変化がオンライン振動計測によつて的確に捉えられることを検証する。なお、(3)、(5)と同様、軸受劣化であるため、加速度で検証を行う。

### (7) 実験装置「人為的劣化状態」の機器における、振動測定値と他測定値による比較

実験装置 No.3 および No.4 汚泥ポンプにおいて、振動計、電流計、流量計、圧力計の測定値を比較することで、機器に劣化が生じた際に、他の測定値（電流、流量、圧力等）に比べ、振動レベルに顕著な変化が現れることを確認する。

#### (8) 他メーカーセンサとの比較

オンラインで使用する振動センサについて、仕様（電圧感度、周波数範囲、最大加速度、構造等）の異なる3種類のセンサを適用することでセンサ特性の違いによる検出精度の有意差の有無の確認を行う。比較検証用のセンサとして研究体採用センサ以外の2種類のセンサを選定し、計3種類のセンサによるオンライン測定結果を比較することで、本研究体が採用したセンサ以外でも、同様の測定値が得られることを確認する。表資 1-5 に本研究で使用したセンサの仕様を示す。

表資 1-5 センサの仕様

	研究体採用	A社	B社
型番	SAF11-20K	SAF51	2450
構造	シエア型	シエア型	圧縮型
電圧感度(mV/m/s <sup>2</sup> )	1	5	5
周波数範囲(Hz)	5~20,000(±3dB)	5~10,000(±3dB)	3~8,000(±3dB)
電源電圧電流	0.5~5mA, 15~25V	0.5~5mA, 12~25V	0.5~5mA, 15~25V
最大加速度(m/s <sup>2</sup> )	3,500	450	700
耐衝撃加速度(m/s <sup>2</sup> )	9,800	10,000	10,000
本体質量(g)	≒53	≒53	≒49
使用温度範囲(℃)	-20~+110	-20~+110	-20~+110

#### (9) 正常値分布、異常値分布の把握

守谷浄化センターおよびA 浄化センターにおいて、オフライン計測により、複数回、対象機器の各モード（変位、速度、加速度）の振動値データを収集する。AMD 基準を踏まえて得られたデータより、下水道施設における振動測定値の正常値分布、異常値分布を把握することで、振動診断のためのしきい値を決定する。

#### (10) 人為的劣化状態機器における運転後のベアリング検証

実験装置 No.3 汚泥ポンプにおいて、人為的に劣化させた軸受を使用することで、一般的なポンプの劣化（ベアリングの摩耗による損傷）を模擬的に再現する。また、実験装置 No.4 汚泥ポンプにおいて、本体軸受部の潤滑油を抜き取り、潤滑油の漏れや潤滑油への水の混入による潤滑不良状態を模擬的に再現する。劣化状態を一定期間継続した後、取り外したベアリングの状態を電子顕微鏡により観察することで、センシング技術で捉えられた現象と、実際のベアリングの状態とを比較し、振動測定結果の妥当性を評価する。

#### (11) 600rpm 未満の低速回転機器の基準値の設定

600rpm 未満の低速回転機器の振動は変化量が少ないため、平成 27 年度 600rpm 以上の機器に対して設定した加速度の基準値を適用することが難しいものと考えられる。

しかし、下水道施設では一軸ねじ式ポンプなどの低速回転機器が多く採用されていることから、下水道施設におけるセンシング技術の適用範囲を広げることを目的として、600rpm 未満の低速回転機器について AMD 基準適用対象外機器の専用基準を定める。

#### (12) インバータ駆動機器の基準値の検討

インバータ駆動機器では、インバータのキャリア周波数（PWM 制御方式のインバータにおいて、パルス幅変調周期を決定する周波数）の帯域と、加速度の帯域が重なることから、インバータノイズにより加速度の数値が誤った値となる傾向がみられる。

そのため、守谷浄化センターの実機 18 台と実験装置の汚泥ポンプ 1 台において、インバータノイズが加速度に与える影響を確認する。

インバータノイズの影響はモータ部のみに生じることから、本検証ではモータ部のみを対象とする。

#### (13) オーバーヘッド型ポンプの基準値の設定

オーバーヘッド型機器ではポンプ本体上部に鋼材で構成された基礎にモータが設置されており、コンクリート製の基礎に設置されているポンプ本体と比較すると、モータ部の変位および速度が高めとなる傾向がみられる。

守谷浄化センターの実機 22 台を対象に、基準値をオーバーヘッド型機器に適用することを検討し、適用が難しい場合には、統計法によりモータ部の変位および速度の AMD 基準適用対象外機器の専用基準を設定する。

#### (14) 防振構造機器の基準値の設定

遠心脱水機、遠心濃縮機などは、回転体の質量中心がアンバランス状態での運転を前提として設計されているため、変位および速度が高めとなる傾向がみられる。

本検証では、基準値をこれらの防振構造機器に適用することを検討し、適用が難しい場合には、統計法により AMD 基準適用対象外機器の専用基準を設定する。

#### (15) 季節変動による振動測定値への影響確認

石油化学プラントに代表される、工業プラント設備では、扱う流体の性状は一定であることが普通であるが、下水道施設においては、季節変動により、汚水や汚泥などの流体の性状（水温、濃度など）が変化する。このような流体の性状変化が振動測定値に与える影響を実機と実験装置で得られた通年データを用いて確認する。

#### (16) ミスアライメントによる振動測定値への影響確認

センシング技術では、変位、速度、加速度の 3 つのモードによる測定値をもとに、機器の部品単位での劣化を捉える。このうち、速度で捉えられると考えられる異常のひとつにミスアライメントがあげられる。ミスアライメントとは、軸継ぎ手で結ばれた二本の回転軸の中心線がずれている場合に発生する振動現象をいう。

しかし、下水道施設で多く採用されているベルト駆動機器では、ベルトによる緩和作用が働くため、ミスアライメント状態を振動測定で捉えることが困難となることが想定された。

そのため、ベルト駆動型機器でミスアライメントが発生した場合に、センシング技術により、ミスアライメントが捉えられるか、確認する必要があると考えられた。

このような理由から、本研究では、実験装置 No.2 汚泥ポンプを用いて、ミスアライメント（芯ずれ、面ずれ）を実際に発生させて、ミスアライメント状態が振動測定値に与える影響を確認する。

#### (17) 実機分解点検前後の振動測定値比較

基準値の妥当性を評価するため、初期診断で良好域と診断された軸受や、要処置域と診断された軸受を分解し、加速度の診断結果と軸受の劣化状態が合致していることを、目視によって確認する。

ここで、加速度を用いるのは、加速度は軸受の劣化を捉えるのに適しているからである。

本検証では、平成 27 年度に守谷浄化センターの No.1 遠心脱水機、No.3 汚水主ポンプ、ターボブロワ 2A、ろ過水送水ポンプ 1、ろ過水送水ポンプ 2 の 5 台の実機を対象とした。

このうち、ろ過水送水ポンプ 1 は初期診断で要処置域と診断された機器であり、それ以外の機器は良好域と診断された機器である。

#### (18) 実証設備の設置環境下における劣化及び耐久性に関する調査（分解調査）

本研究期間に使用した実験装置の汚泥ポンプに対し、劣化及び耐久性に関する調査を行うため、ケーシング内部や軸受等の分解目視調査を実施する。

また実験期間中に使用した振動センサ（計 304 本）の劣化状況を確認するため、加振器を使って模擬信号を入力し、振動センサの経年劣化による数値ずれを検証する。

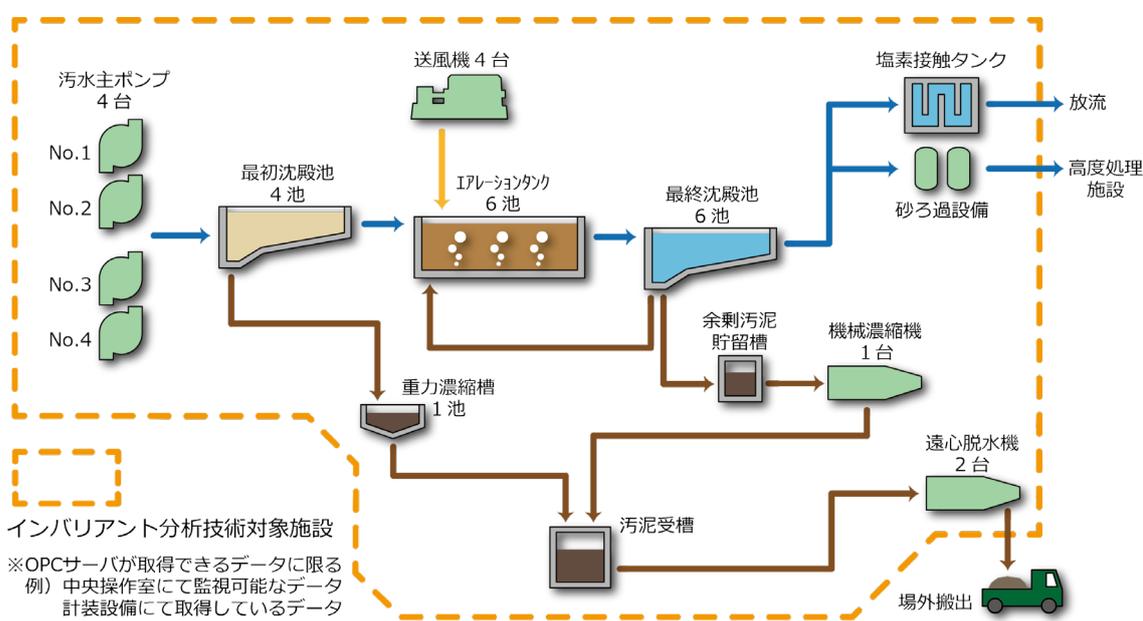
なお、誤差の許容範囲は、振動センサ規格感度の $\pm 10.0\%R.D.$ 以内とした。

### 1.3.2 ビッグデータ分析技術（インバリエント分析）

インバリエント分析では、プラント施設内の設備が正常に動作している期間のセンサデータを学習してインバリエントモデル（正常モデル）を作成し、計装データの相関性の崩れを監視することで「いつもと違う」状態を検出する。検出結果は、相関性の崩れの時系列変化と異常しきい値を超えた異常検知アラートとして得ることができる。

本実証では、下水道施設の各種のセンサデータをもとにインバリエント分析による各施設の異常予兆検知の精度評価と技法（手順、留意事項）確立の検証を行った。正常モデルの作成、異常検知しきい値を設定し、施設の実取得データにて実証を行った。

図資 1-2 に本研究におけるインバリエント分析技術の実証対象施設のフローを示す。



図資 1-2 インバリエント分析技術の実証対象設備

#### (1) 正常モデルの作成

設備や計装機器の故障、特殊運転等のデータを学習対象から除外し、いつもの動きを学習し正常モデルを作成する。実証では、正常モデルの作成条件について、検証と改良評価を行った。

##### 1) 使用センサの選定と異常定義の確認

対象設備のセンサをデータの対象とする。ただし、センサのデータ値に変動が無い場合は、インバリエントを形成せず、モデルから除外されるため、変動があるセンサ値を含むことに留意する。また、センサ単体での異常しきい値を確認し、正常モデル作成の際は、異常値の運転データは除外する。

## 2) 学習期間の選定

対象設備の運用状態・データ蓄積状況に合わせて設定する。学習対象期間と学習データ量について、仮設検証し適切な設定を定義する。

## 3) データクレンジング・特殊運用データの除去

特殊運用期間、故障期間のデータは正常モデルの作成には使用しない為、具体的な除去条件をデータ観察にて設定する。また、汚水主ポンプ等の交互運転する運用設備の同時稼働期間の除去を検証する。また、ポンプ設備等の原動機を含む設備は、起動時の立ち上がりや運転停止までの立ち下がりがあり、安定運転域の考慮を要するため、このデータの除去についても検証する。

## (2) インバリエント分析 モデルの検証

作成した各設備の正常モデルに対して、異常事象を含む過去の記録データを用いてインバリエント分析を行い、相関性の崩れを検証する。関係性の崩れの積算値を示す **Anomaly Score** の時系列変化状況を得る。

## (3) 異常検知しきい値の設定

インバリエント分析の結果で算出される **Anomaly Score** において、異常検知のしきい値を設定する。前項で異常事象を含む過去の記録データを用いたインバリエント分析を行った結果の **Anomaly Score** の変動と、実際の故障報告記録を比較照合し評価を行う。照合結果により①正常状態の **Anomaly Score** の最大値と異常記録の **Anomaly Score** の最小値から、異常検知しきい値の設定方法を検証する。

## (4) 相関性の崩れの正常検知と誤検知の整理

インバリエント分析における相関性の崩れの事象としては、以下がある。

- A) 運用における特異事象
- B) 設備の故障・異常

検知精度の評価として誤検知については、以下を確認する。

- A) 過剰検知
- B) 検知漏れ

実証では、インバリエント分析における **Anomaly Score** のしきい値超過の相関性の崩れと、中央監視記録を比較照合し、結果を分類整理する。

#### (5) 検知漏れの削減、誤検知の削減実証

異常予兆検知の精度向上のため、ビッグデータ分析装置を使った実設備でのオンライン検証を行う。対象施設ごとに異常検知しきい値の初期値を設定し、分析精度の検証（検知精度、誤検知率の測定）を行い、以下の項目について確認することで分析精度を評価する。

- 1) 検知精度の確認（検知漏れの確認）
- 2) ビッグデータ分析装置を使ったオンライン分析による誤検知率の確認

評価指標は、本技術の使用目的（保守点検工数の削減、計装点検費用の縮減）をもとに、以下とする。

- 1) 検知精度：検知漏れ回数 0 回（異常予兆の 100%検知）
- 2) オンライン分析による誤検知率：1 回/日以下

#### (6) 異常予兆を検知する環境の構築

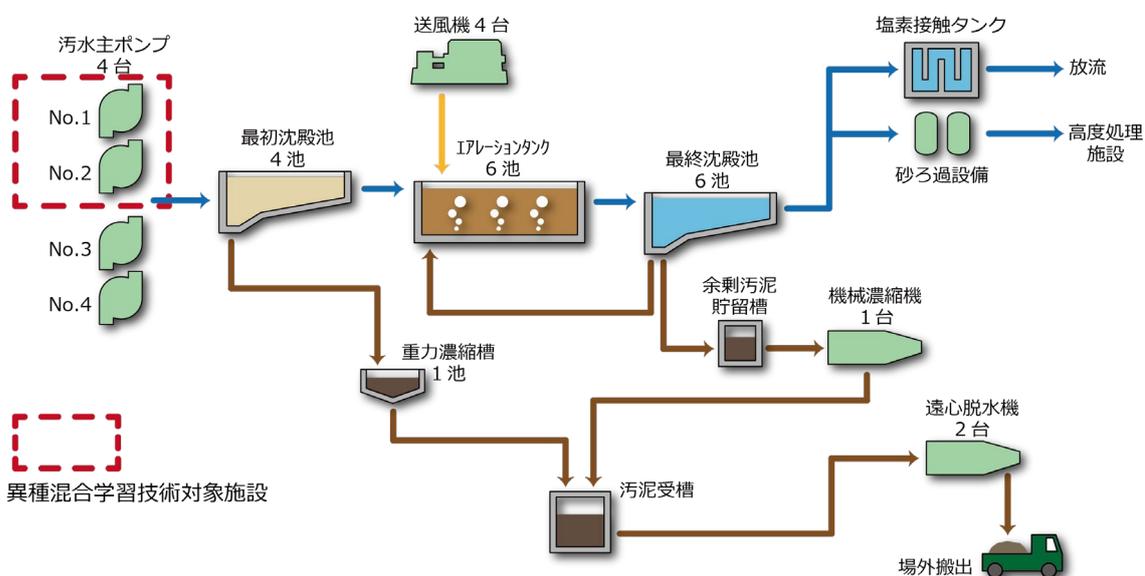
オンラインデータ収集とリアルタイム分析評価を行うために、日高市浄化センターにビッグデータ分析装置を設置する。日高市浄化センターの中央監視システムに追加接続することで、既存の下水処理施設の取得データを収集し、異常予兆を捉えられる環境が構築できることを確認する。

### 1.3.3 ビッグデータ分析技術（異種混合学習）

下水処理施設における機器に対してそれぞれ劣化指標を選定し、それらの劣化指標に対する予測モデルを作成し、将来の劣化進行の予測を行う。劣化予測は、データ観察、性能状況推定モデル作成と推算、性能状況推定結果に基づく劣化進行予測、長期劣化予測の順番に行う。

平成 27 年度、平成 28 年度、平成 30 年度及び令和元年度に、日高市浄化センターにおける各施設について性能推定のモデル化と劣化進行予測のモデル化についての適用性検討を行った。経年での性能低下推定要因と運用調整やメンテナンスの観点から、ポンプ設備に有効な評価結果を基に令和元年度の実証では、汚水ポンプ設備を対象に異種混合学習技術による劣化進行予測の技法（手順、留意事項）確立の検討を行った。

図資 1-3 に本研究における異種混合学習技術の実証対象施設のフローを示す。



図資 1-3 異種混合学習の実証対象設備

#### (1) 関連データの収集・整理 データ観察

劣化予測を行うためには、予測対象の指標となるデータ（劣化指標）を決める必要がある。汚水主ポンプでは、ポンプの能力低下を劣化として考えるためポンプの揚水能力を示す値を劣化指標とする。また、予測モデルの作成には、関連する汚水主ポンプの計装データと気象データ（気温、降水量）を使用し、設備や計装機器の故障、特殊運転等のデータを学習対象から除外する。

1) 対象設備の分析所要データ

性能状況推定及び劣化予測を行うには、過去の蓄積データを用いて予測分析を行うため、対象設備に関して、計装データ点数やデータ期間等の所要データ条件について、検証を通して整理する。

2) データクレンジング・特殊運用データの除去

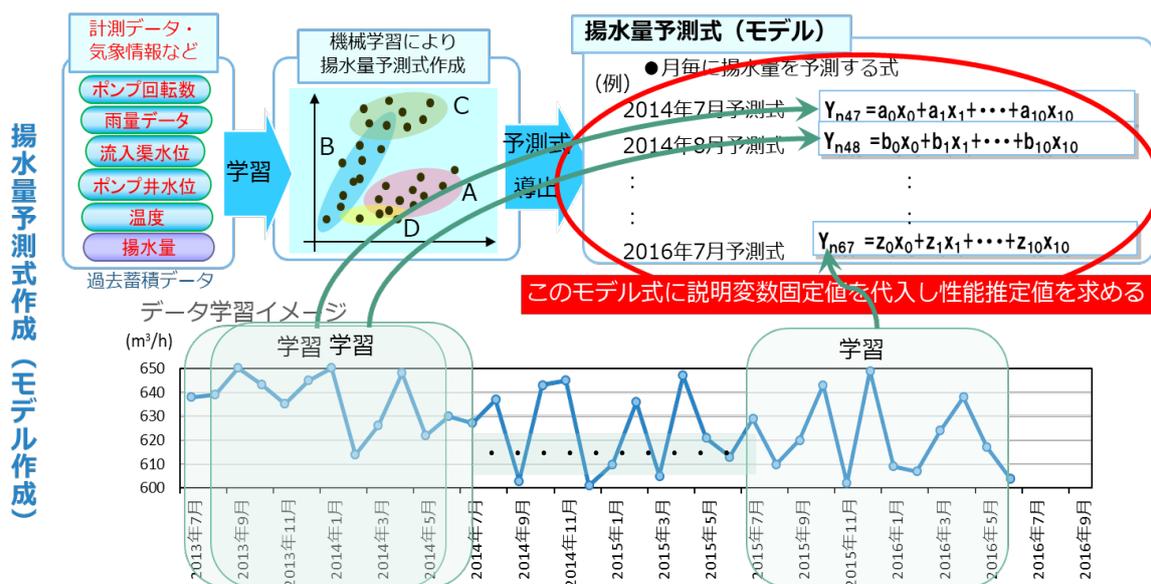
性能状況推定及び劣化進行予測では、故障や特殊運転等の特異な事象を有する場合、性能指標の傾向把握と将来の予測が行えない可能性がある。また、日々の運用においても、ポンプ設備等の原動機を含む設備は、起動時の立ち上がりや運転停止までの立ち下がりがあり、安定運転域のデータ使用に対して考慮を要する。これらのモデル式の作成において除去するデータ条件について、検証を通して整理する。

(2) 性能状況推定値の推算（異種混合学習技術による推算）

汚水主ポンプの揚水量実測値は常に数値が変動しており、実測値の観察では性能低下を把握することは困難である。これに対して性能状況推定は、汚水主ポンプの性能を表す揚水量を目的変数とし、因果関係のある気温・降水量・ポンプ井水位・ポンプ回転数を説明変数として、過去の運転データにつき機械学習（異種混合学習技術）を行い、性能状況推定モデル式を作成する。

作成したモデル式に変動要因である気温・降水量・ポンプ井水位・ポンプ回転数に固定値を代入し、異種混合学習技術にて再計算することで、標準化された揚水量性能値を示すことができ、時系列変化を比較することで、性能の低下状況を評価することを可能とする。

図資 1-4 に性能状況推定値のモデル作成の概念を示す。

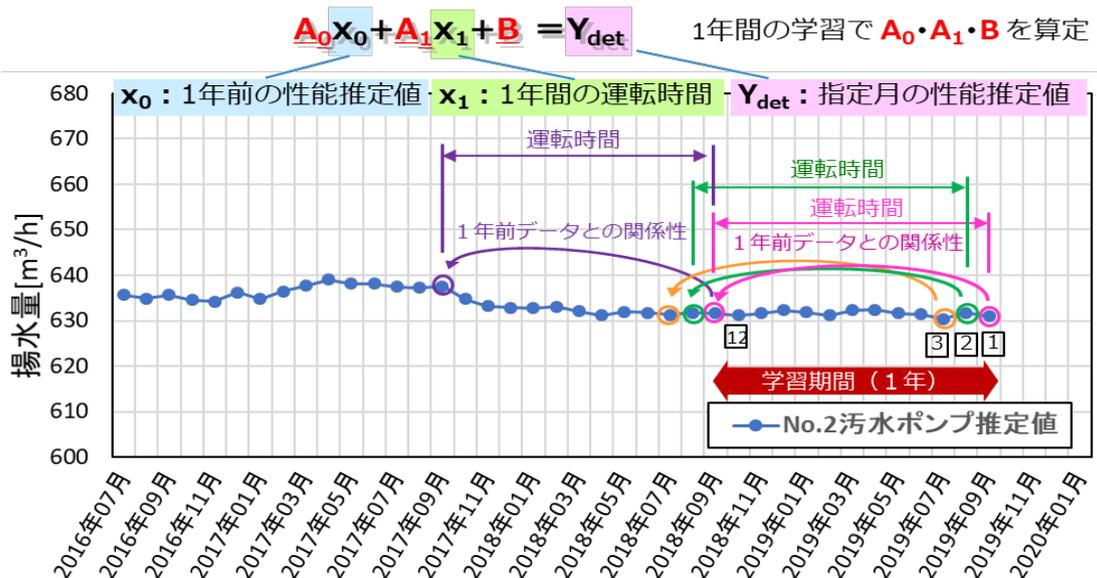


図資 1-4 汚水主ポンプの性能状況推定値を求めるモデル作成の概念図

(3) 劣化進行予測式の作成・予測値の推算（異種混合学習技術による推算）

劣化進行予測式は、性能状況推定値を用いて作成する。

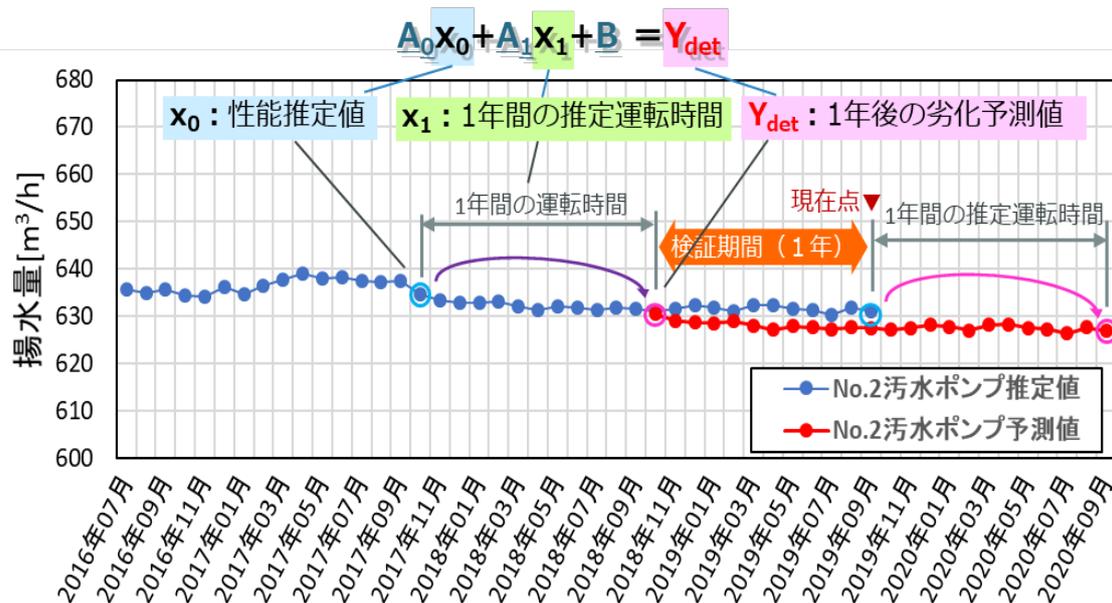
予測式の作成について、図資 1-5 に1年先予測1年間学習の予測式を作成するモデルを示す。ある月の性能状況推定値と1年前の性能状況推定値を、その間の安定運転回転速度域で運転した同期間の運転時間の関係性を学習する。この関係性を1年分学習することで予測式が作成される。



図資 1-5 劣化進行予測式の作成例（1年先予測1年間学習）

1年先予測2年間学習の場合は、1年前との関係性を2年間分の学習を行い作成した予測式となる。2年先予測1年間学習の場合は、2年前の関係性を1年間分の学習を行い作成した予測式となる。何年先の予測を行うか及び学習期間は、蓄積データに基づき推算された性能状況推定値が何年分のデータを有するかにより決定する。

劣化進行予測値の推算では、作成した劣化進行予測式により、異種混合学習技術にて将来の劣化予測値を推算する。図資 1-6 に、1年先予測1年間学習の劣化進行予測式を用いた1年後の予測推算を繰り返し、劣化傾向を求める例を示す。求めたい時期の劣化予測に対して、その1年前の性能推定値（実績）と将来となる1年間の推定運転時間を劣化進行予測式に入力して推算する。



図資 1-6 劣化進行予測の実施例（1年先予測1年間学習の予測式使用）

1年先予測2年間学習の予測式でも予測先が1年後につき、同様に予測先の1年前の性能推定値と1年間の推定運転時間を用い、2年先予測1年間学習の予測式の場合は、予測先の2年前の性能推定値と2年間の推定運転時間を用いて推算する。

劣化進行予測では、将来予測だけでなく実績期間についても実施することにより、劣化進行予測値と性能推定値（実績）の比較検証を行う。検証期間は1年間を推奨する。

実証では、劣化進行予測に必要な適正学習期間および予測先を求めるため、学習期間と予測先の組合せを変化させての複数パターンにつき予測精度の比較検証を行う。

評価指標は以下とする。

- 1) 1年後劣化進行予測 精度誤差率：0.5%以下（目標値）
- 2) 2年後劣化進行予測 精度誤差率：1.0%以下（目標値）

#### (4) 長期劣化進行予測 設備更新時期の推定

劣化進行予測は近い将来の数年先までの性能劣化推定を行うことができるが、設備の更新時期までの、より長期の劣化進行予測を行うには、求めた劣化進行予測の推移から近似線で外挿することにより、更新時期の検討を行う。

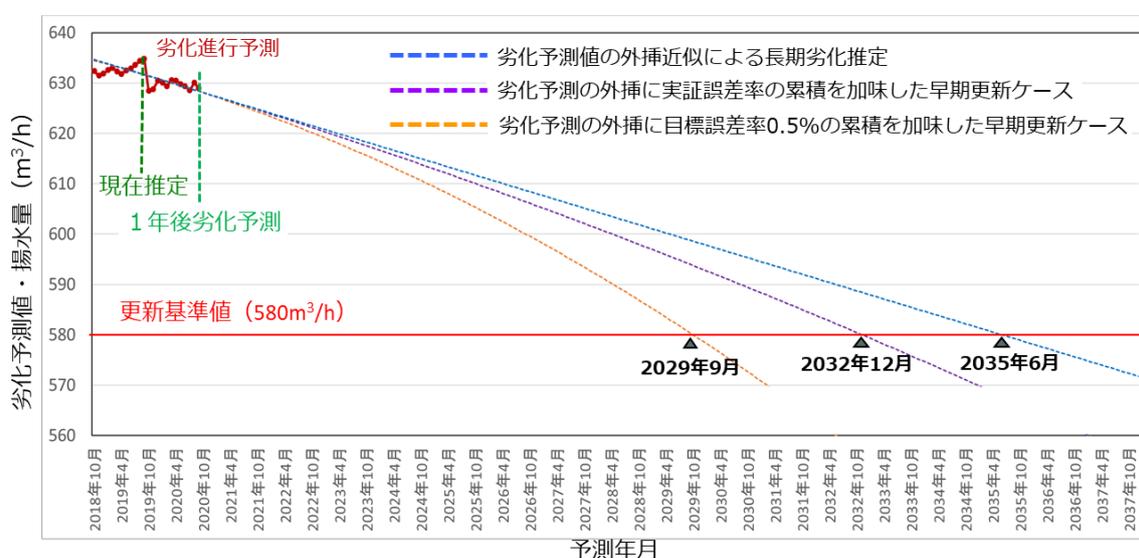
外挿近似は、線形近似に累積誤差を考慮した推定検討を行う。

- ・累積誤差を考慮の近似式

$$y = a \cdot x \cdot (1 + s \cdot t) + b$$

$$[\text{長期劣化予測値}] = a \cdot [\text{経過月数}] \cdot (1 + [\text{誤差率}] \cdot [\text{将来予測月数}]) + b$$

図資 1-7 に、劣化進行予測の外挿による更新時期の検討例を示す。



図資 1-7 劣化進行予測の外挿による更新時期の検討例

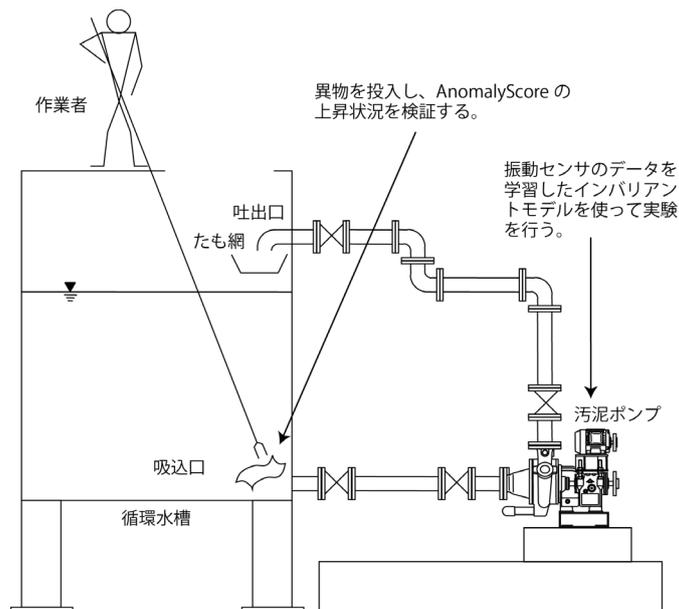
#### (5) 異種混合学習技術を用いた劣化進行予測の実施形態

異種混合学習技術による劣化進行予測は、設備の更新計画の検討に活用いただくことを想定し、分析作業委託の形態を予定する。実証では、日高市浄化センターに設置するビッグデータ分析装置の OPC サーバに蓄積されたデータを使用し、分析を行い結果に関する評価と技法の検証を行う。

### 1.3.4 センシング技術と組み合わせたインバリエント分析技術

センシング技術とインバリエント分析を組み合わせることで、各技術単体では捉えにくい、より細かい異常予兆の検知が期待できる。

本実証では、センシング技術で得られたデータを含めたインバリエント分析モデルを作成し、**図資 1-8**に示すように、汚泥ポンプ実験装置で異物詰まりやVベルトの緩み等の運用異常を再現実験し、各技術単体の異常検知結果と比較検証を行った。



図資 1-8 組合せ技術の評価における異常再現実験

#### (1) 異常再現実験

守谷浄化センターに仮設した汚泥ポンプ実験装置にて、1) 異物の詰まりと、2) Vベルトの劣化事象（緩み）を再現する実験を行い、取得データをオフラインにてインバリエント分析を行い、異常予兆検知の状況を検証する。

##### 1) 異物の詰まり

タオル、軍手、軍手+小石の複数種の異物を投入し実験

##### 2) Vベルトの劣化事象（緩み）

4年間使用のVベルトに架け替えた運転実験

#### (2) 異常予兆検知の検証

異常再現実験にて取得したデータに対して、振動センサデータの有無を比較分析し、効果の検証を行った。また、汚泥ポンプは、通常、間欠運転であるため、インバリエント分析のモデル化において、①ポンプ停止状態も含めた学習モデル（間欠運転学習モデル）と、②停止状態を除いた学習モデル（稼働時学習モデル）の2種のモデル化技法について評価を行う。

1.3.5 計画・工程

平成27年度から令和元年度にかけて計画・実施した各技術の実験内容を表資1-6に示す。

表資1-6 本研究の5カ年実施計画実績表

面接者の組み合わせ	ヒューマン分析技術		平成27年度 (2015)	平成28年度 (2016)	平成29年度 (2017)	平成30年度 (2018)	令和元年度 (2019)
	異種混合学習技術	ヒューマン分析技術					
ヒューマン分析技術	異種混合学習技術	<p>Bh-1: 守衛浄化センター、日高市浄化センターにおける異常発生モジュールの作成、検証</p> <p>Bh-2: 振動データを急めばセンターデータによるモジュールの作成</p> <p>Bh-3: OPC-UA(遠隔)でのデータ収集</p>	<p>S-1: オンライセンタ取得方向の検証</p> <p>S-2: オンライセンタ/ホータクルの比較</p> <p>S-3: オンライセンタ取得方法の評価</p> <p>S-4: 振動センタによる劣化検知感度の比較</p> <p>S-5: 測定場所による評価</p> <p>S-6: 実験装置による人為劣化状態の測定</p> <p>S-7: 実験装置「人為劣化材料」の機器における振動測定値と他測定値による比較</p> <p>S-8: 他センサーセンタとの比較</p> <p>S-9: 正常値分布、異常値分布の把握</p> <p>S-10: 人為劣化状態機器における運転後の「データ」の検証</p>	<p>S-1: 600rpm未満の機器の振動測定継続実施</p> <p>S-2: インバータ機器の振動測定継続実施</p> <p>S-3: オートヘルプ下駆動型の基礎係数検討</p> <p>S-4: 防振構造型の基礎係数検討</p> <p>S-5: 季節変動による振動測定値への影響確認</p> <p>S-6: SIMULINKによる振動測定値への影響確認</p> <p>S-7: 振動測定標準値の妥当性評価</p>	<p>S-1: 概要評価と分解前後の振動比較 (実験 No.1,3と投入ボック)</p>	<p>S-1: 概要評価と分解前後の振動比較 (実験 No.1,2,3と投入ボック) (実験 No.3は投入ボック) (実験 No.1,2は投入ボック)</p>	<p>S-1: 劣化および耐久性に関する調査 (実験装置 No.1,2投入ボック) (実験装置 No.3投入ボック) (実験装置 No.4投入ボック) (振動センタの精度確認) (振動センタの測定値の精度確認) (インバータ測定値の精度確認)</p>
		<p>Bh-1: 過去の記録と運転管理データをを用いたモジュールの作成</p> <p>Bh-2: 過去の記録と運転管理データをを用いた、予測性を自動検出し、長期的な性能劣化予測を行う</p>	<p>Bh-1: 1年後劣化予測の精度検証</p> <p>Bh-2: 2年後の劣化進行予測</p> <p>Bh-3: 1年後の劣化進行予測の更なる精度向上</p>	<p>Bh-1: 振動目的別の検知モジュール作成</p> <p>Bh-2: 検知遅れの低減、誤検知の低減検証</p> <p>Bh-3: オンライセンタシステム構築</p> <p>Bh-4: 計測設備点検後の効率化</p>	<p>Bh-1: ヒューマン分析装置の設置・動作確認 (実験、日高市浄化センター)</p>	<p>Bh-1: 3年後の劣化予測検証 (2年分蓄積データで分析)</p> <p>Bh-2: 4年までの1年後予測検証 (4年分蓄積データで分析)</p> <p>Bh-3: 逆動機設備の劣化進行予測手法の確立</p>	<p>Bh-1: 取得データの継続分析 (期間中の蓄積データで分析)</p>
面接者の組み合わせ			※要素技術検証を優先したため未実施	※要素技術検証を優先したため未実施	MX-1: 組合せ技術運用ユーザー取得 (異常再現実験) ※データ取得のみ、分析は次年度	MX-1: 組合せ技術運用ユーザー分析 (異常再現実験)	MX-1: 組合せ技術運用ユーザー分析 (異常再現実験)

カイコトへの作成

## 1.4 実証研究結果

### 1.4.1 センシング技術

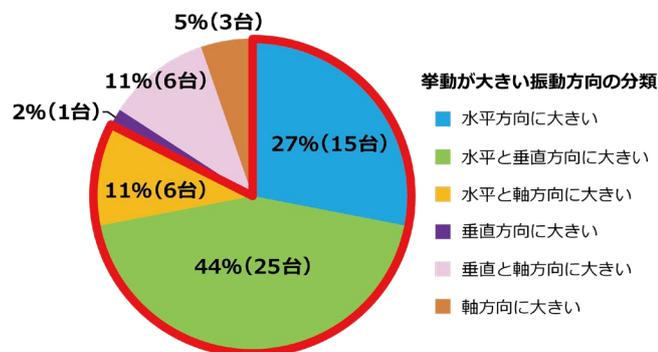
守谷浄化センターの機器と実験装置に設置したオンラインセンサによる測定値、守谷浄化センターとA浄化センターでのポータブル振動計による測定値をもとに、センシング技術を下水処理施設に適用するうえで必要と考えられる検証を行った。平成27年度に実施した検証結果の概要を表資1-7に示す。

表資 1-7 検証結果の概要(H27 センシング技術)

	実証内容	実証目的	実証結果
(1)	センサ取付方向の検証	オンラインセンサの最適な取付方向（鉛直、水平、軸方向）の確認	取付方向は「水平方向が望ましい」ことが確認できた
(2)	オンライン／ポータブルの比較	オンラインおよびポータブルの測定結果が同一であることを確認	測定結果は概ね一致することが確認できた
(3)	センサ取付方法の評価	オンラインセンサ取付方法による測定感度確認	「塗膜なし+ねじ込み式」が最適な取付方法であることが確認できた
(4)	振動モードによる劣化検知感度の比較	振動モード（変位、速度、加速度）による劣化検知感度確認	振動モードと検知可能な異常の関係を確認できた
(5)	測定場所による評価	測定場所による測定感度確認	軸受近傍が測定感度が高いことを確認できた
(6)	実験装置による人為的劣化状態の測定	劣化を的確に捉えられるかどうかの確認	機器劣化状況を的確に捉えられていることが分かった
(7)	実験装置「人為的劣化状態」の機器における、振動測定値と他測定値による比較	機器劣化把握における、振動測定の優位性提示	振動測定による優位性が確認できた
(8)	他メーカーセンサとの比較	センサ間による測定誤差の有無確認	センサメーカー間による測定感度に差はないことが確認できた
(9)	正常値分布、異常値分布の把握	振動基準値、しきい値の決定	振動基準値、しきい値を決定した
(10)	人為的劣化状態機器における運転後のベアリング検証	振動測定結果の妥当性評価	劣化状況と測定結果の妥当性を確認できた

#### (1) オンラインセンサ取付方向の検証

図資1-9に示すように、8割以上の機器でH方向に振動傾向を示しており、残りの2割弱についてもH方向の挙動を示していることから、オンラインセンサの設置に最適な方向が水平（H）方向であることが確認できた。



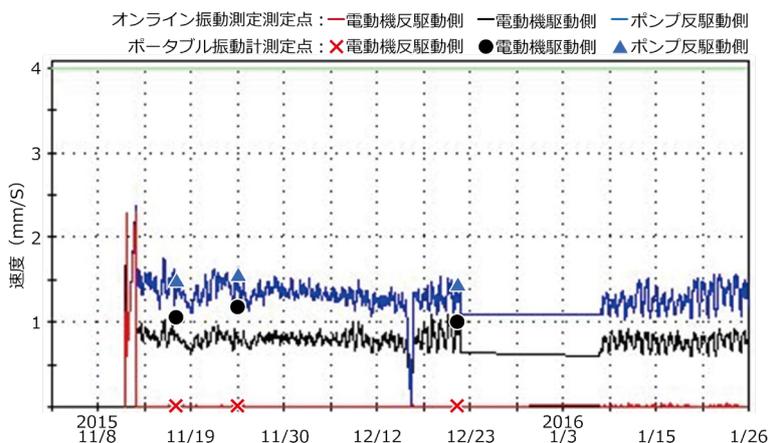
図資 1-9 顕著であった測定方向の分類

## (2) オンライン／ポータブルの比較

図資 1-10 に示すようにオフラインでの測定結果とオンラインでの測定結果は概ね一致することを確認した。

折れ線グラフは、オンライン振動測定装置の測定結果。同色の記号（×●▲）は、ポータブル振動計を用いて測定したときの測定結果をプロットしたものである。

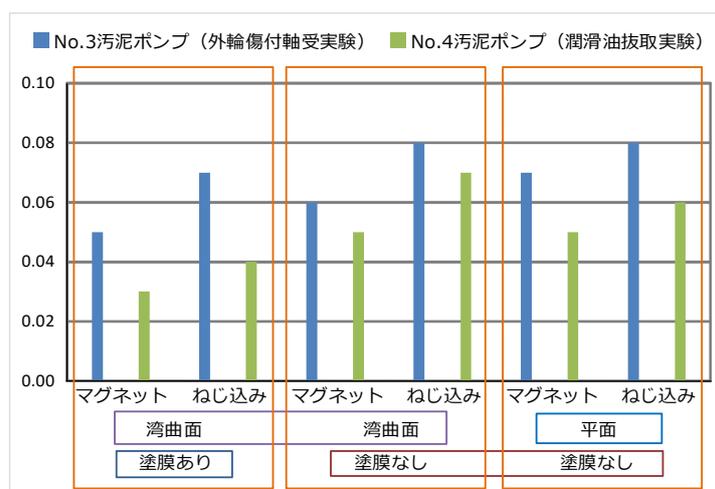
4 台の汚泥ポンプに対し測定点を変えながら測定した結果、測定箇所のおよかな違いや、測定タイミングのずれなどに起因する振動レベルの差異が見られたが、これらの測定値のずれは、しきい値のスケールからは誤差範囲内であると考えられる。



図資 1-10 No.1 汚泥ポンプの速度を使った比較グラフ

## (3) オンラインセンサ取付方法の評価

図資 1-11 に示すように、「塗膜なし+センサねじ込み」が最も感度良く、振動加速度値を捉えることができ、最適であることが確認できた。



図資 1-11 センサ設置方法による加速度測定値の比較

(4) 振動モードによる劣化検知感度の比較

図資 1-12 に No.2 汚泥ポンプの流量と速度を示す。No.2 汚泥ポンプは吸込弁を寸開とすることにより流体異常を模擬したポンプである。流量の低下とともに速度が上昇していることがわかる。

図資 1-13 に No.3 汚泥ポンプの加速度を、図資 1-14 に No.4 汚泥ポンプの加速度を示す。No.3 汚泥ポンプは軸受きずを、No.4 汚泥ポンプは軸受潤滑不良を模擬したポンプである。

No.3 汚泥ポンプでは軸受をきずのついたものに交換した 11 月 25 日以降、No.4 汚泥ポンプではオイルバスから潤滑油を抜き取った 11 月 17 日以降、加速度値が上昇している。

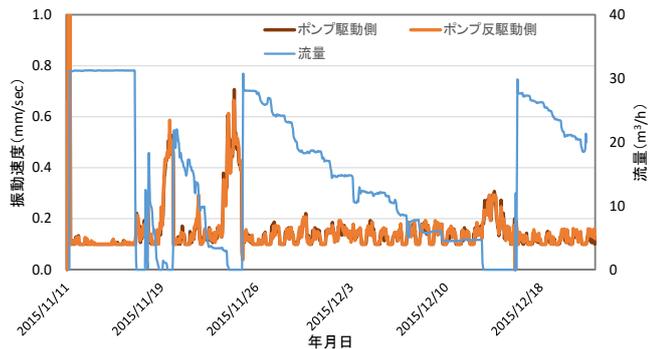
このように、振動計測により機器の劣化を的確に捉えられることが確認できた。

(5) 測定場所による評価

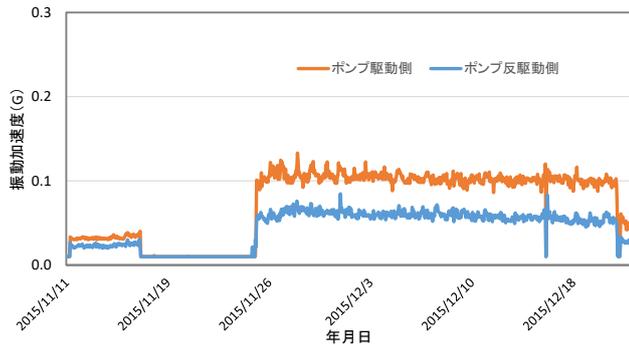
図資 1-15 に測定場所による加速度の比較結果を示す。図には No.3 汚泥ポンプの 2 箇所測定点における加速度を示している。センサ①はセンサ②よりも軸受に近い測定点である。

No.3 汚泥ポンプでは 11 月 25 日から 12 月 21 日まで外輪きずを模擬して、12 月 21 日からは内輪きずを模擬して運転を行った。

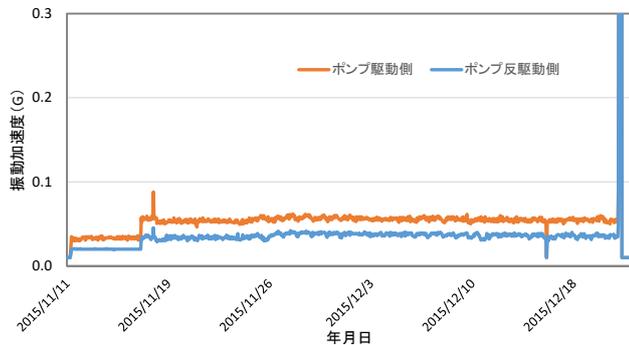
図に示すように、軸受近傍にあるセンサ①の方がセンサ②よりも加速度レベルが高く、感度良く振動値を捉えられることが確認できた。



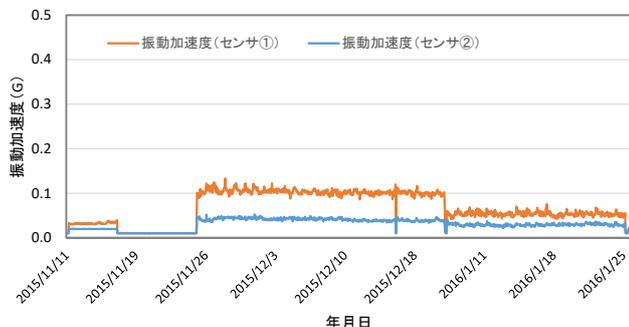
図資 1-12 No.2 汚泥ポンプの流量と速度



図資 1-13 No.3 汚泥ポンプ加速度



図資 1-14 No.4 汚泥ポンプ加速度



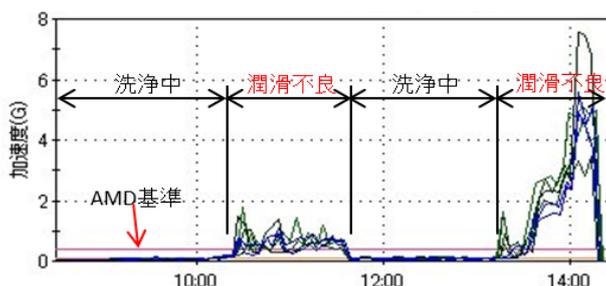
図資 1-15 測定場所による加速度の比較

(6) 実験装置による人為的劣化状態の測定

本体軸受部のフラッシングはオイルバスに有機溶剤を投入、排液することによって実施した。図資 1-16 に 12 月 21 日 8:00~14:30 までの強制的な軸受潤滑不良時の加速度の変化を示す。

図に示すように、潤滑不良の状態では加速度が上下動を繰り返しながら、徐々に上昇している。

このことから、劣化進行の状態変動をオンライン振動計測によつて的確に捉えられることが確認できた。



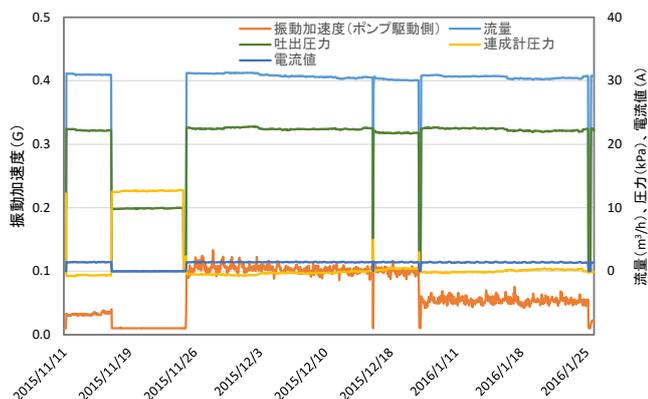
図資 1-16 軸受潤滑不良時の No.4 汚泥ポンプ加速度

(7) 実験装置「人為的劣化状態」の機器における、振動測定値と他測定値による比較

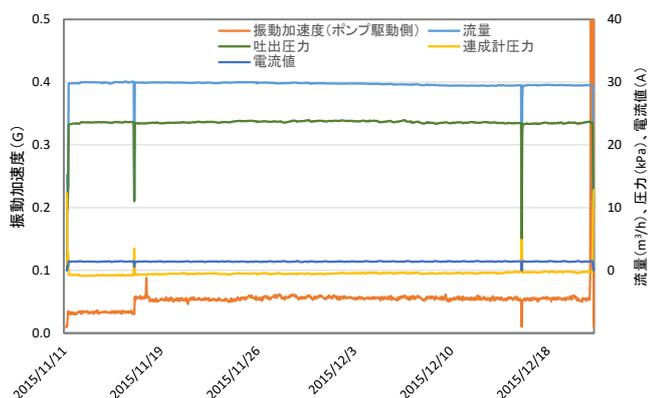
図資 1-17 に No.3 汚泥ポンプの測定値を比較して示す。No.3 汚泥ポンプでは 11 月 25 日から 12 月 21 日まで外輪きずを模擬して、12 月 21 日からは内輪きずを模擬して運転を行っている。

図資 1-18 に No.4 汚泥ポンプの測定値を比較して示す。No.4 汚泥ポンプでは 11 月 17 日から軸受潤滑不良を模擬して運転を行っている。

図からは、人為的劣化状態における加速度の上昇は顕著であったが、流量、電流値、圧力には大きな変化は見られないことがわかる。このことから、軸受異常時は流量、電流値、圧力では捉えにくく、加速度による検知が有効であることが確認できた。



図資 1-17 No.3 汚泥ポンプ測定値比較

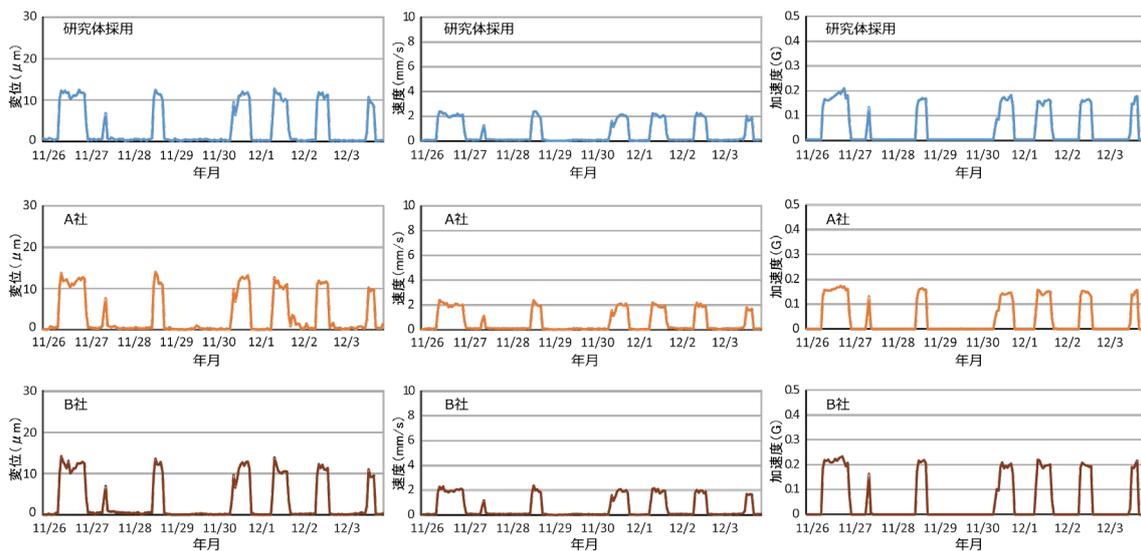


図資 1-18 No.4 汚泥ポンプ測定値比較

(8) 他メーカーセンサとの比較

図資 1-19 に No.2 汚水主ポンプの例を示す。いずれのセンサについても同様の動きを示していることがわかる。

このように、3 種類のセンサ間で検出精度として顕著な有意差はないことが確認できた。



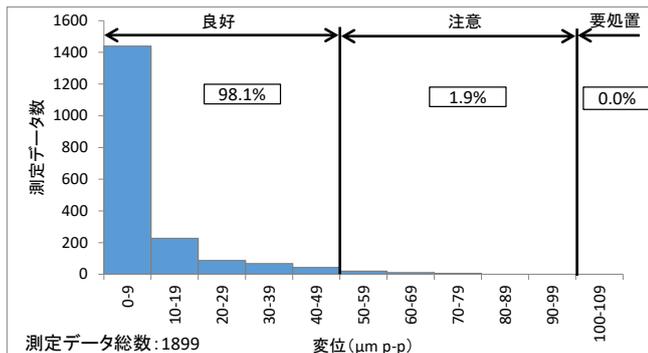
図資 1-19 センサの違いによる振動レベルの比較

(9) 正常値分布、異常値分布の把握

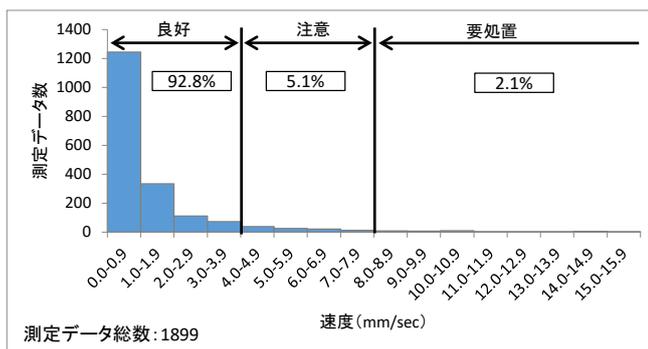
本検証により、オフライン測定結果から正常と判定された機器の概ね9割以上が一般的に用いられる基準値における良好域として判定されることがわかった（図資 1-20～図資 1-22 参照）。

一部、注意域や要処置域と判定された機器があったが、全ての機器が設置から数年から数十年経過しているため、劣化による軸受異常が発生しているものと考えられる。

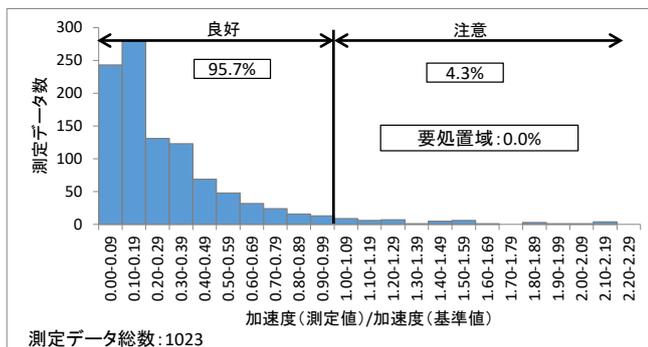
このことから、下水道施設に設置されている回転機器の振動診断基準として、一般的な基準値（変位は、注意域  $50\mu\text{mp-p}$  以上かつ  $100\mu\text{mp-p}$  未満、要処置域  $100\mu\text{mp-p}$  以上、速度は、注意域  $4.0\text{mm/sec}$  以上かつ  $8.0\text{mm/sec}$  未満、要処置域  $8.0\text{mm/sec}$  以上、加速度はAMD基準）を適用することができるといえる（表資 1-8 参照）。



図資 1-20 正常値分布(変位)



図資 1-21 正常値分布(速度)



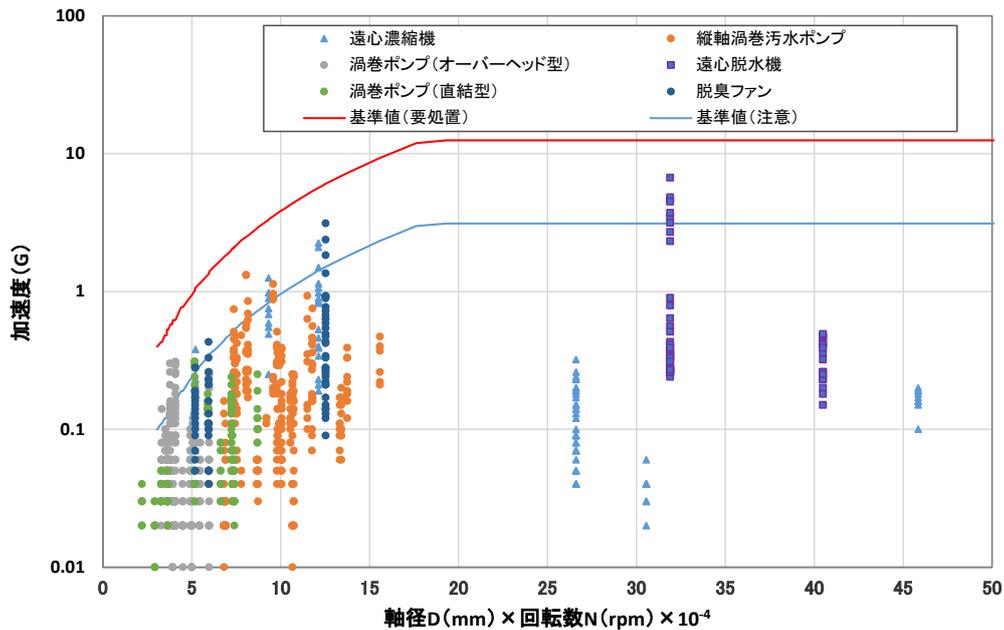
図資 1-22 正常値分布(加速度)

表資 1-8 下水道施設に設置されている回転機器の振動診断基準

機 種	変位( $\mu\text{m}$ ) <sup>参考値</sup>		速度(mm/sec)		加速度(G)	
	注意	要処置	注意	要処置	注意	要処置
ポンプ(汚水、汚泥など)	50	100	4	8	AMD基準 <sup>※</sup>	
送風機	50	100	4	8	—	
遠心濃縮機	50 <sup>※</sup>	100 <sup>※</sup>	4 <sup>※</sup>	8 <sup>※</sup>	AMD基準 <sup>※</sup>	
遠心脱水機	50 <sup>※</sup>	100 <sup>※</sup>	4 <sup>※</sup>	8 <sup>※</sup>	AMD基準 <sup>※</sup>	
脱臭ファン	50	100	4	8	AMD基準	

※回転数600rpm未満の一軸ねじ式および横軸渦巻きポンプ、インバータ機器、防振構造機器は専用基準を設ける

図資 1-23 に加速度のオフライン測定結果を示す。インバータ駆動機器や防振構造機器など一部の機器については、機器自体に異常は見られないものの、振動レベルが基準値を超過しているものもあり、これらの機器においては専用基準の検討を行う必要があると考え、平成 28 年度に AMD 基準適用対象外機器の専用基準の設定方法を検証している。

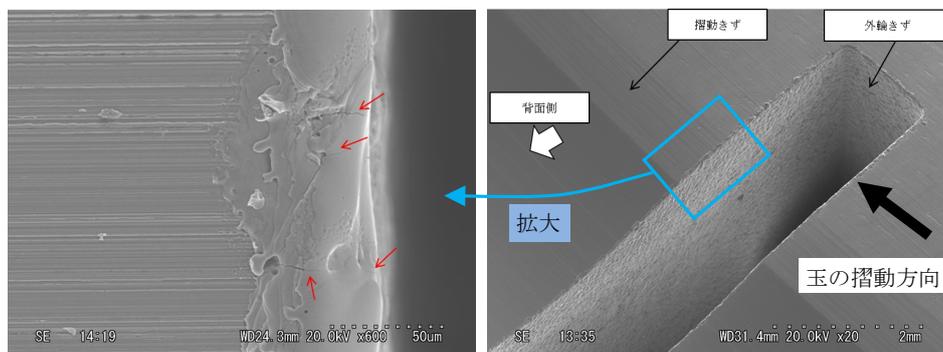


図資 1-23 オフライン測定結果(加速度)

#### (10) 人為的劣化状態機器における運転後のベアリング検証

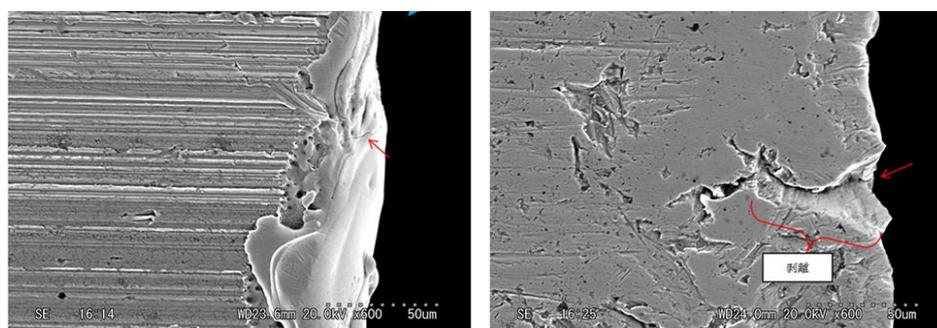
上記の検証項目(4)、(6)の結果に基づきベアリング検証を行った。

No.3 汚泥ポンプ外輪きずベアリングは目視検査では劣化の進展は見られなかったが、**図資 1-24** に示すように、マイクロ検査で一部に剥離に至る初期のマイクロ割れが見られ、劣化の兆候が確認できた。



図資 1-24 No.3 汚泥ポンプ外輪きずマイクロ検査結果

No.3 汚泥ポンプ内輪きずベアリングについては、目視検査では劣化の進展は見られなかったが、**図資 1-25** に示すように、マイクロ検査で一部に初期の剥離やマイクロ割れが見られ、劣化の兆候が確認できた。



図資 1-25 No.3 汚泥ポンプ内輪きずマイクロ検査結果

また、軸受潤滑不良を模擬した No.4 汚泥ポンプのベアリング検証では、保持器の摩耗により玉が巻き込まれ、保持器が変形や破断したため、機器が停止したことが確認できた(**図資 1-26** 参照)。



図資 1-26 No.4 汚泥ポンプベアリング検証結果

センシング技術において、平成 28 年度～令和元年度に実施した検証結果の概要を表資 1-9 に示す。

表資 1-9 検証結果の概要(H28～R1 センシング技術)

	実証内容	実証目的	実証結果
(11)	600rpm未満の低速回転機器の振動診断基準値の設定	下水道施設では振動センサの検出限界である600rpm未満の機器が多く設置されていることから、ポンプ本体部の異常を加速度で診断が可能か確認する	ポンプ本体部に加速度の専用基準を設定することができた
(12)	インバータ駆動機器の振動診断基準値の設定	インバータノイズがモータ部の加速度値に影響を与えるため、正確な診断が難しいことから、対応策を検討する	インバータ機器のモータ部に、条件付で加速度の専用基準を設定することができた
(13)	オーバーヘッド駆動型ポンプの振動診断基準値の設定	オーバーヘッド駆動型ポンプに対し、AMD基準が適用できるか確認する	オーバーヘッド駆動型機器は、AMD基準での運用が可能であることを確認した
(14)	防振構造機器の振動診断基準値の設定	防振構造の機器に対し、AMD基準（速度、加速度）が適用できるか確認する	防振構造機器に専用基準を設定することができた
(15)	季節変動による振動測定値への影響確認	年間を通して性状や濃度変化する汚水や汚泥などの流体が、本体の振動値に影響を与えるか確認する	季節変動による振動値の上昇や低下は見られず、年間を通してAMD基準が適用可能であることを確認した
(16)	ミスアライメントによる振動測定値への影響確認	オーバーヘッド駆動型ポンプのメンテナンスを行う上で発生したミスアライメントが、変位や速度に影響を与えるか確認する	ベルト駆動機器のミスアライメントでは、振動測定結果に影響を与えないことが確認できた
(17)	実機分解点検前後の振動測定値比較（振動基準値の妥当性確認）	AMD基準にて「良好」と診断した軸受や、「要処置」と診断した軸受を分解し、診断結果と軸受状態が合致するか確認する	AMD基準や専用基準に妥当性があることを確認した
(18)	実証設備の設置環境下における劣化および耐久性に関する調査（分解調査）	本研究で使用した実験装置や実機振動センサ等を取り外し、設置環境下における劣化の進行状況を調査する	汚泥ポンプは劣化加速試験において相応の劣化状態であり、実機振動センサは全センサが劣化することなく許容範囲内であった

表資 1-10 に、平成 28 年度の成果として、種別ごとの振動診断基準値を示す。

表資 1-10 種別ごとの振動診断基準値

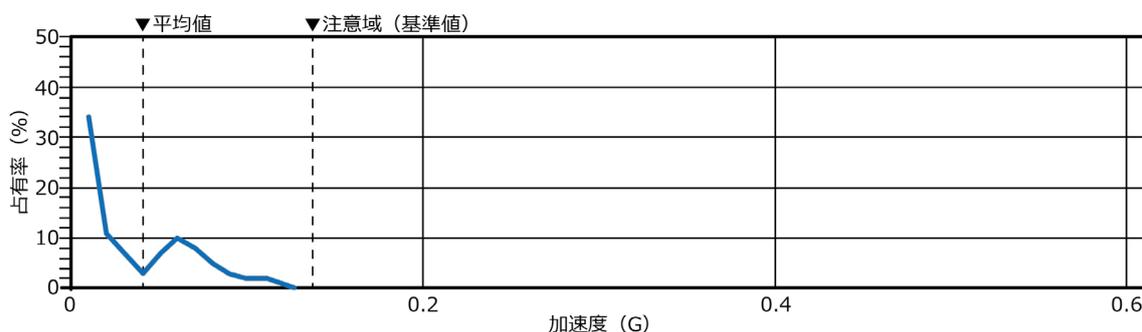
種別	部位	基準値	
		速度	加速度
600rpm以上の回転機器 (下記を除く)	モータ部	AMD基準	AMD基準
	本体部		
600rpm未満の回転機器 (一軸ねじ式ポンプ) (横軸渦巻きポンプ)	モータ部	AMD基準	AMD基準
	本体部	適用外	統計法により測定点ごとに定めた専用基準
インバータ駆動機器	モータ部	AMD基準	統計法により測定点ごとに定めた専用基準※
	本体部		AMD基準
オーバーヘッド型ポンプ	モータ部	AMD基準	AMD基準
	本体部		
防振構造機器	モータ部	統計法により測定点ごとに定めた専用基準	AMD基準
	本体部		

※正常状態にもかかわらず、AMD基準の要処置域と診断された機器については適用範囲外とする

(11) 600rpm 未満の回転機器の基準値の設定

600rpm 未満の回転機器の基準値の設定にあたっては、はじめに、検証対象である一軸ねじ式ポンプと横軸渦巻ポンプのオンラインデータの分布をもとに基準値の設定を試みた。その結果、一軸ねじ式ポンプと横軸渦巻ポンプとは、振動値のレベルの差が大きく、一律の基準の設定は困難であることがわかった。そのため、一軸ねじ式ポンプの基準値と横軸渦巻ポンプの基準値をそれぞれ設定することとした。

図資 1-27 に、守谷浄化センターでの一軸ねじ式ポンプ 13 台の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータにおける加速度の分布を示す。



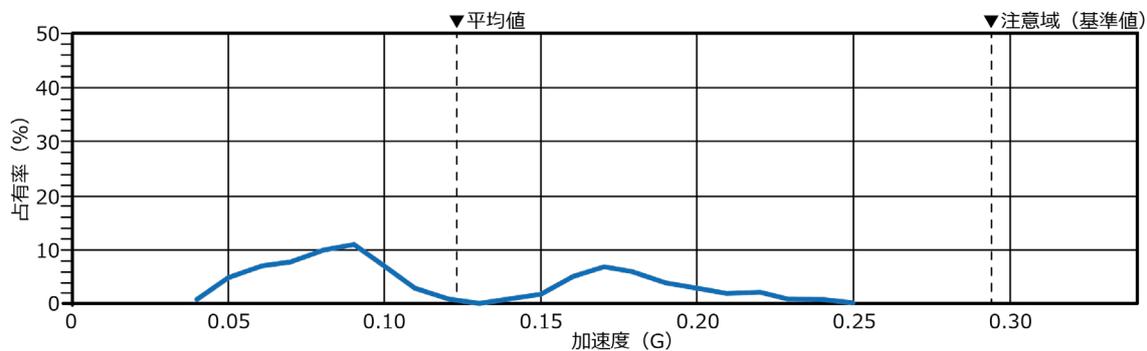
図資 1-27 一軸ねじ式ポンプの加速度の分布

この分布をもとに統計法により定めた一軸ねじ式ポンプの加速度の AMD 基準適用対象外機器の専用基準を表資 1-11 に示す。

表資 1-11 一軸ねじ式ポンプの加速度の専用基準

機種	良好	注意	要処置
一軸ねじ式ポンプ	0.13G以下	0.14~0.55G	0.56G以上

図資 1-28 に、守谷浄化センターでの横軸渦巻ポンプ 4 台の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータにおける加速度の分布を示す。



図資 1-28 横軸渦巻ポンプの加速度の分布

この分布をもとに統計法により定めた横軸渦巻ポンプの加速度の AMD 基準適用対象外機器の専用基準を表資 1-12 に示す。

表資 1-12 横軸渦巻ポンプの加速度の専用基準(加速度)

機種	良好	注意	要処置
横軸渦巻ポンプ	0.28G以下	0.29~1.16G	1.17G以上

一軸ねじ式ポンプと横軸渦巻ポンプについて AMD 基準適用対象外機器の専用基準を設けることで適用範囲が拡大され、状態監視による維持管理が可能となった。

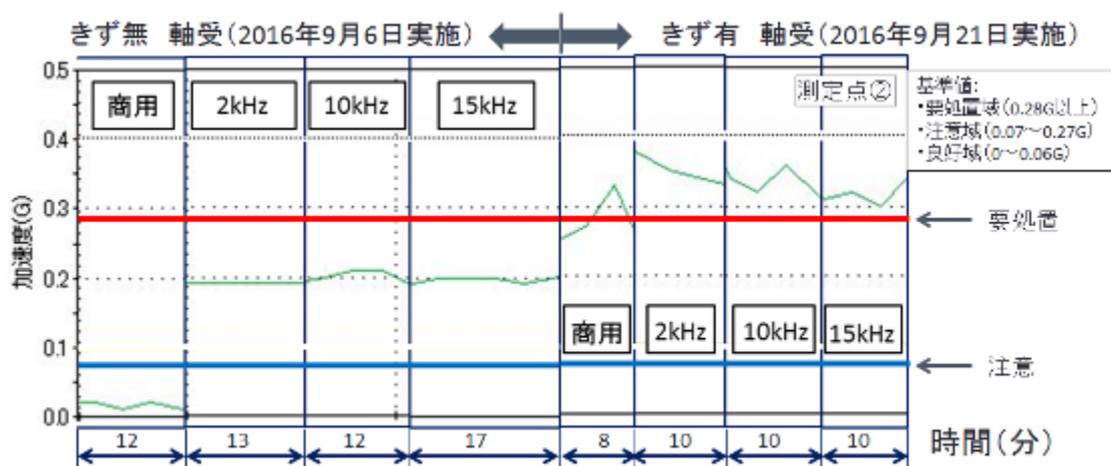
(12) インバータ駆動機器の基準値の設定

図資 1-29 に実験装置 No.3 汚泥ポンプの測定点②（モータ駆動側）の加速度の推移を示す。

きず加工前は、商用運転時は良好域にあった加速度が、インバータ駆動時には注意域となった。キャリア周波数の設定による違いは特にみられなかった。

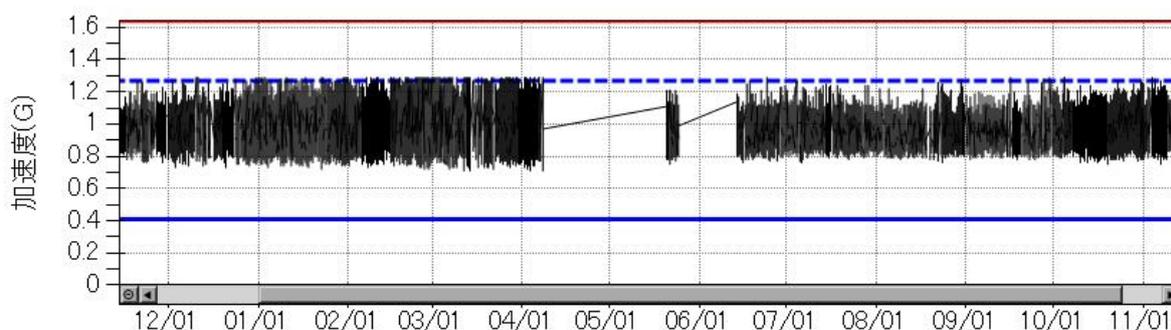
きず加工後は、商用電源駆動、インバータ駆動のいずれにおいても加速度は要処置域となった。きず加工前に比べ、商用駆動、インバータ駆動の差異は小さくなっている。

きず加工前後で比較すると、インバータ駆動時においても明確な差が生じていることから、軸受きずによる加速度の変化により機器の劣化状況を把握することができるものと考えられた。



図資 1-29 実験装置 No.3 汚泥ポンプの加速度の推移(測定点②:モータ駆動側)

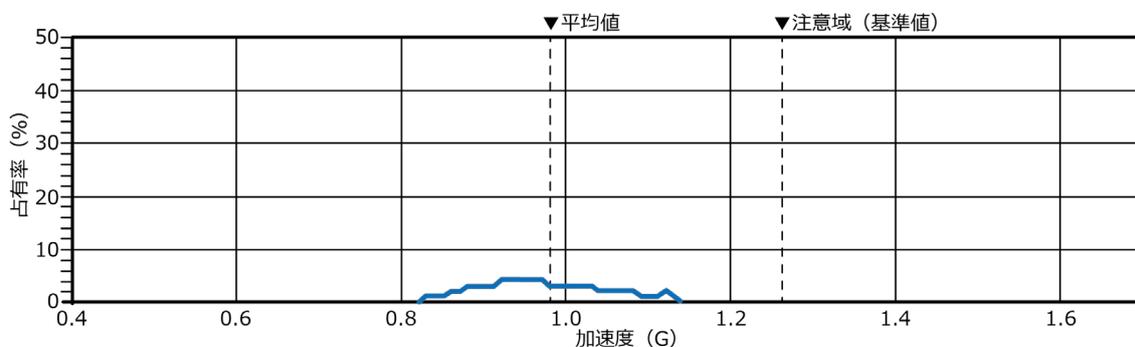
インバータ駆動機器である、実機 No.4 汚水主ポンプのモータの測定点①（モータ反駆動側）の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータにおける加速度の推移を図資 1-30 に示す。初期診断の結果から機器の状態は正常であると考えられたが、測定点①の加速度は注意域となっており、インバータノイズの影響を受けているものと考えられる。他の実機においても同様の傾向がみられた。



図資 1-30 No.4 汚水主ポンプの加速度の推移(測定点①:モータ反駆動側)

そのため、平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータからインバータ駆動機器のモータについて、測定点ごとに、統計法により、加速度の振動診断しきい値の設定を行った。

図資 1-31 に、実機 No.4 汚水主ポンプのモータの測定点①（モータ反駆動側）の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータにおける加速度の分布を示す。



図資 1-31 No.4 汚水主ポンプの加速度の分布(測定点①:モータ反駆動側)

この分布をもとに実機 No.4 汚水主ポンプのモータ測定点①（モータ反駆動側）の AMD 基準適用対象外機器の専用基準を統計法により、注意：1.27G、要処置：1.64G と定めた。

インバータ駆動機器のモータの加速度の専用基準を表資 1-13 に示す。専用基準を設けることで適用範囲が拡大され、状態監視による維持管理が可能となった。

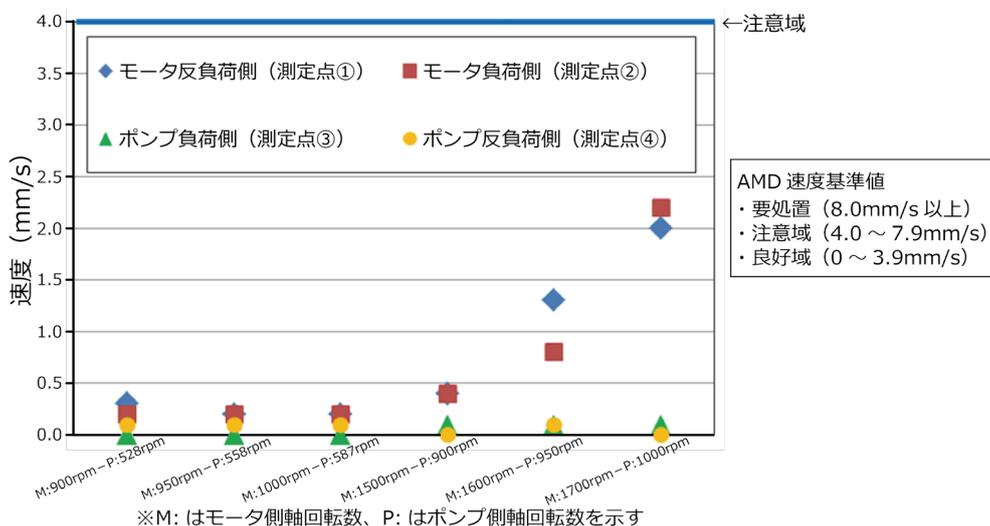
表資 1-13 インバータ駆動機器モータ部の専用基準(加速度)

機器名称	測定点	特別な基準値(G)		機器名称	測定点	特別な基準値(G)	
		注意	要処置			注意	要処置
No.4汚水ポンプ	1	1.27	1.64	No.2遠心脱水機	1	2.60	10.40
	2	1.25	2.40		2	2.60	10.40
No.1遠心濃縮機	1	0.84	1.56	No.3遠心脱水機	1	1.01	3.04
	2	1.12	1.56		2	1.19	4.76
No.1遠心脱水機	1	2.49	9.96	No.4汚泥投入ポンプ	1	0.18	0.32
	2	2.60	10.40		2	0.10	0.40

### (13) オーバーヘッド型ポンプの基準値の設定

実験装置 No.3 汚泥ポンプをインバータ駆動とし、回転数を変化させて、それぞれの回転数における変位と速度を確認した。速度の結果を図資 1-32 に示す。

回転数の増加に従って、モータの速度に上昇傾向はみられるものの、最高回転時においても良好域にあり、変位、速度ともに AMD 基準の適用が可能であると考えられた。



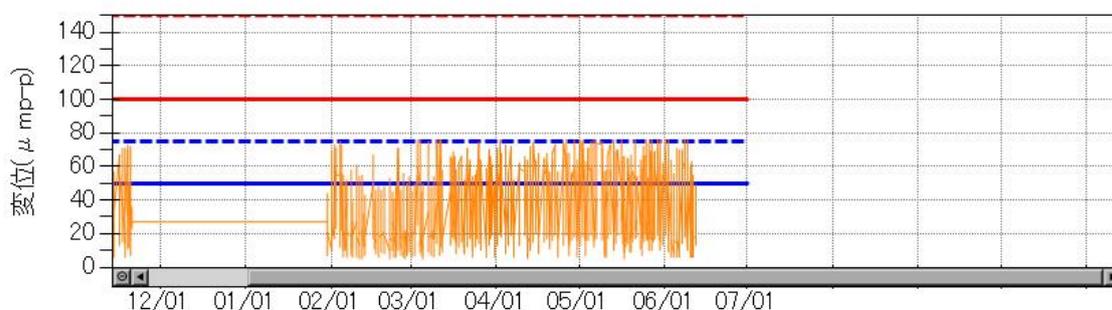
図資 1-32 オーバーヘッド型ポンプの回転数を変化させたときの振動測定結果(速度)

#### (14) 防振構造機器の基準値の設定

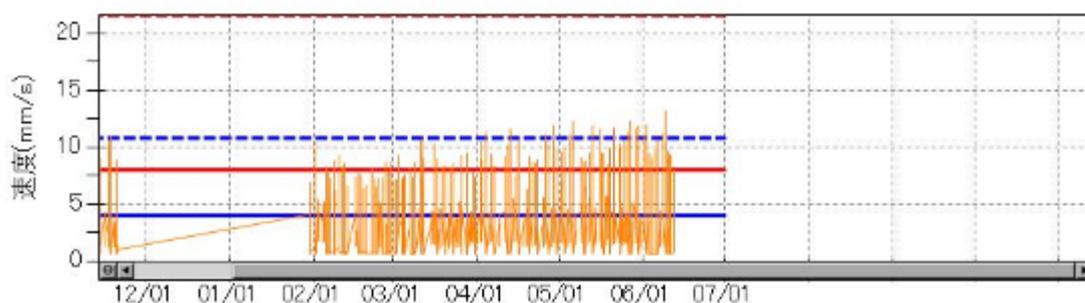
防振構造機器である実機 No.1 遠心脱水機の測定点④（本体反駆動側）の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 7 月 1 日までのオンラインデータにおける変位の推移を図資 1-33 に、速度の推移を図資 1-34 に示す。運転時の値は変位では AMD 基準の注意域にあり、速度では要処置域となっている。そのため、変位と速度について、統計法により AMD 基準適用対象外機器の専用基準を定めた。

基準値の設定にあたっては、はじめに、検証対象である、防振構造機器全体でのオンラインデータの分布をもとに基準値の設定を試みた。その結果、機器、測定点による振動値のレベルの差が大きく、一律の基準の設定は困難であることがわかった。そのため、防振構造機器については、測定点ごとに基準値を設定することとした。

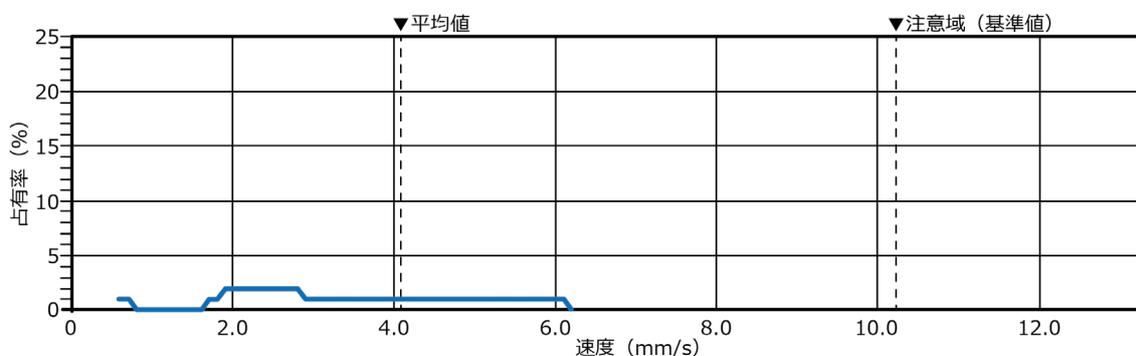
図資 1-35 に、実機 No.1 遠心脱水機の測定点④（本体反駆動側）の速度の分布を示す。



図資 1-33 No.1 遠心脱水機の変位の推移(測定点④ :本体反駆動側)



図資 1-34 No.1 遠心脱水機の速度の推移(測定点④ :本体反駆動側)



図資 1-35 No.1 遠心脱水機の速度の分布(測定点④ :本体反駆動側)

この分布をもとに実機 No.1 遠心脱水機の測定点④（本体反駆動側）の AMD 基準適用対象外機器の専用基準を統計法により、注意：10.2mm/sec、要処置：20.4mm/sec と定めた。

表資 1-14 に専用基準を機器ごと、測定点ごとに示す。防振構造機器について専用基準を設けることで適用範囲が拡大され、状態監視による維持管理が可能となった。

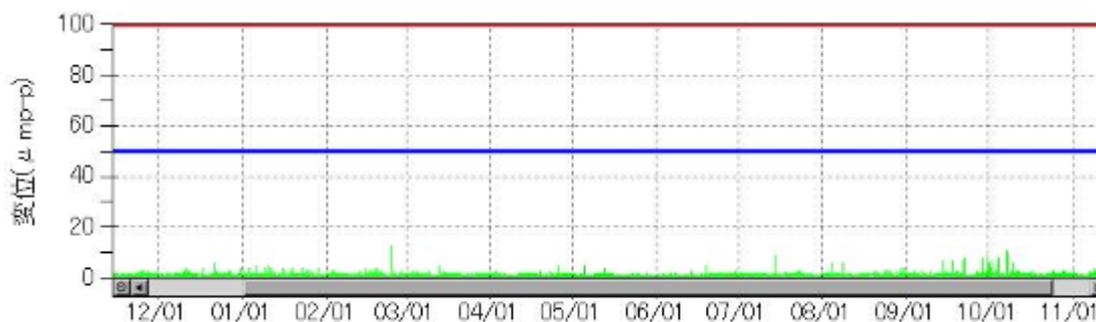
表資 1-14 防振構造機器の専用基準(変位・速度)

機器名称	測定点		AMD基準適用対象外機器の専用基準値		備考		
			変位( $\mu$ mp-p)	速度(mm/sec)			
No.1遠心脱水機	モータ部	反負荷側	測定点①	注意	50	10.2	
				要処置	100	20.4	
	負荷側	測定点②	注意	78	16.9		
			要処置	156	33.8		
	本体部	駆動側	測定点③	注意	50	7.9	
				要処置	100	15.8	
		反駆動側	測定点④	注意	75	10.2	
				要処置	150	20.4	
No.2遠心脱水機	モータ部	反負荷側	測定点①	注意	63	13.4	※本体軸受部に ガタの疑いあり
				要処置	126	26.8	
		負荷側	測定点②	注意	73	12.8	
				要処置	146	25.6	
	本体部	駆動側	測定点③	注意	対象外		
				要処置	対象外		
		反駆動側	測定点④	注意	対象外		
				要処置	対象外		
No.3遠心脱水機	モータ部	反負荷側	測定点①	注意	71	15.9	
				要処置	142	31.8	
		負荷側	測定点②	注意	83	21.5	
				要処置	166	43.0	
	本体部	駆動側	測定点③	注意	50	12.4	
				要処置	100	24.8	
		反駆動側	測定点④	注意	64	9.5	
				要処置	128	19.0	
遠心濃縮機No.1	モータ部	反負荷側	測定点①	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	
		負荷側	測定点②	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	
	本体部	駆動側	測定点③	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	
		反駆動側	測定点④	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	
遠心濃縮機No.2	モータ部	反負荷側	測定点①	注意	71	5.2	
				要処置	142	10.4	
		負荷側	測定点②	注意	73	5.3	
				要処置	146	10.6	
	本体部	駆動側	測定点③	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	
		反駆動側	測定点④	注意	50	4.0	
				要処置	100	8.0	

※変位は参考値

(15) 季節変動による振動測定値への影響確認

図資 1-36 に実機生汚泥ポンプ B の測定点③（本体駆動側）の平成 26 年 11 月 14 日から平成 27 年 11 月 14 日までのオンラインデータにおける変位の年間変動を示す。本体部では、年間を通じて変位は良好域内で推移していた。



図資 1-36 生汚泥ポンプ B の変位の年間変動(測定点③:本体駆動側)

他の検証対象機器においても、年間を通して、変位、速度、加速度の振動値レベルは同レベルでの推移となっており、季節による上昇傾向や低下傾向等は見られなかった。

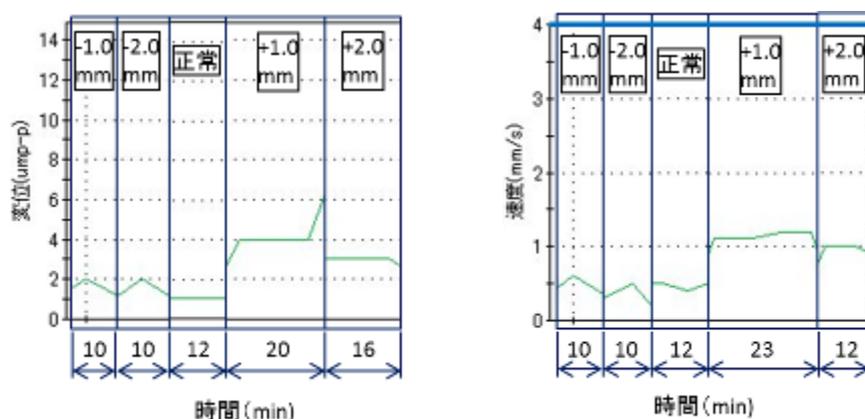
このことから、季節変動による振動測定値への影響はみられず、下水処理施設においても、年間を通じて AMD 基準の適用が可能であることがわかった。

(16) ミスアライメントによる振動測定値への影響確認

実験装置 No.2 汚泥ポンプの測定点②（モータ駆動側）における、芯ずれ状態での変位、速度の変化を図資 1-37 に示す。芯ずれ、面ずれのいずれのミスアライメント状態においても、振動レベルは良好域（変位の良好域は  $50 \mu\text{mp-p}$  未満、速度の良好域は  $4\text{mm/s}$  以下）にあり、振動測定値ではミスアライメント状態を捉えることができなかった。その原因として、ミスアライメント状態による変化を V ベルトが吸収していることが考えられる。

これらのことから、V ベルトにより駆動される機器については、ミスアライメントを変位や速度により捉えることは困難であることがわかった。

そのため、ベルト駆動型機器のミスアライメントによって発生する振動の検出は、センシング技術の適用対象外とした。



図資 1-37 芯ずれ状態での変位および速度(測定点②:モータ駆動側)

(17) 実機分解点検前後の振動測定値比較

平成 28 年度から令和元年度にかけ、定期修繕計画に従いオーバーホールを実施した守谷浄化センター実機の軸受や、本研究にて設置した実験機の軸受を入手し、軸受の劣化状況と AMD 基準の妥当性について検証を行った。

軸受は、二つ割りに切断して構成する部品を取り出し、内輪や外輪、転動体（玉）、保持器について劣化の痕跡（きず等）がないか目視調査した。

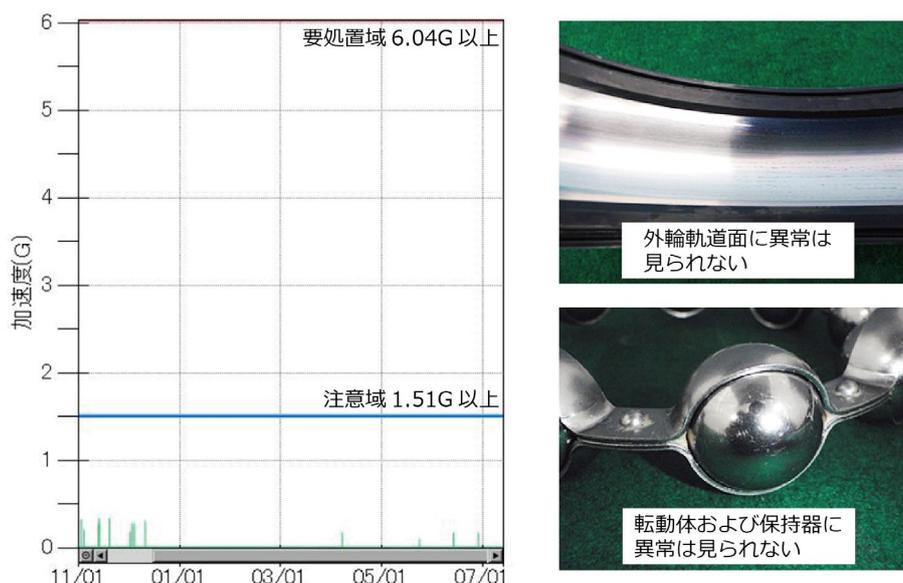
この調査結果をもとに、軸受の劣化度合いと AMD 基準の診断結果（良好域、注意域、要処置域）を比較検証し、下水処理場における AMD 基準の妥当性を確認した。

年度毎に分解調査を実施した機器の一覧を表資 1-15 に示す。

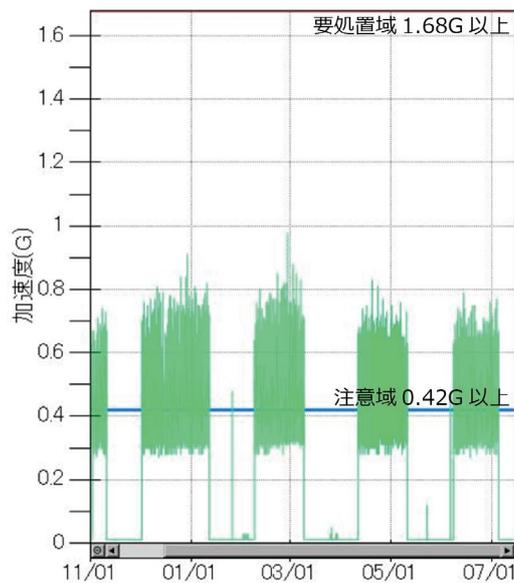
表資 1-15 軸受分解調査実施機器一覧

平成28年度	No.1遠心脱水機	平成30年度	No.3遠心脱水機
	No.3汚水主ポンプ		No.2遠心濃縮機
	No.2-Aターボブロフ		No.1薬液注入ポンプ
	No.1ろ過水送水ポンプ		No.2冷却水ポンプ
	No.2ろ過水送水ポンプ		No.4汚泥ポンプ（実験装置）
平成29年度	No.1汚泥投入ポンプ	令和元年度	No.1汚泥ポンプ（実験装置）
			No.2汚泥ポンプ（実験装置）
			No.3汚泥ポンプ（実験装置）

なお、比較検証の代表例として、平成 28 年度にオーバーホールを実施した AMD 基準が良好域の No.3 汚水主ポンプと、平成 30 年度にオーバーホールを実施した AMD 基準が注意域の No.2 冷却水ポンプと、同年度に劣化加速試験で分解調査した AMD 基準が要処置域の No.4 汚泥ポンプの振動測定グラフと軸受内部の状況写真を図資 1-38～図資 1-40 に示す。



図資 1-38 振動測定値が良好域の軸受状況例(No.3 汚水主ポンプ)

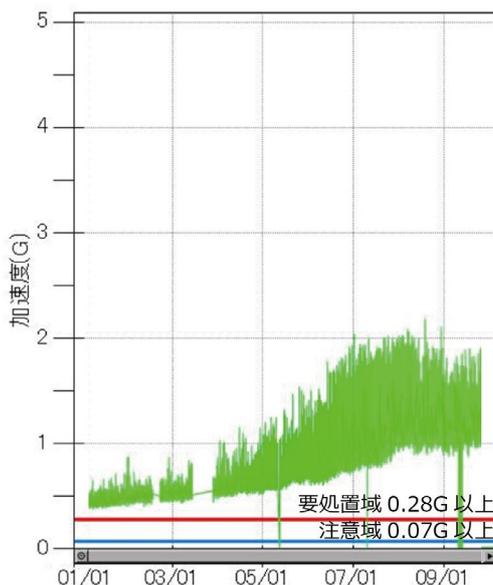


外輪はめ合い部に軽微な  
フレッチング(摩擦損傷)



転動体および保持器に  
異常は見られない

図資 1-39 振動測定値が注意域の軸受状況例(No.2 冷却水ポンプ)



内輪部に摺動きず及び  
スミアリング(微小焼付)



転動体にスミアリング  
(微小焼付)が見られる

図資 1-40 振動測定値が要処置域の軸受状況例(No.4 汚泥ポンプ(実験機))

振動値が良好域であった No.3 汚水主ポンプは、内外輪、転動体共に良好な状態であった。また、振動値が注意値であった No.2 冷却水ポンプは、外輪のはめ合い部に軽微なフレッチングが見られ、更に振動値が要処置域であった No.4 汚泥ポンプでは、劣化損傷の最終段階であるスミアリングが起きていることを確認した。

AMD 基準と軸受劣化状況が一致していることを確認したことから、AMD 基準の妥当性を実証することができた。

## (18) 実証設備の設置環境下における劣化および耐久性に関する調査（分解調査）

守谷浄化センターに設置した実験装置および実機振動センサに関する機器を分解し、設置環境下における劣化および耐久性に関する調査を行った。調査結果は以下のとおりとなる。

### 1) 実験装置 No.1 汚泥ポンプ

対象とした実験項目が「連続運転実験」であったことから、4 台中運転時間が最も長い機器となった。外輪嵌め合い部に振動値に現れないほどの小さなフレッチング跡が認められたが、汚泥ポンプの耐久性として7年間程度（換算値）の使用では運転の継続利用が可能であることを確認した。

### 2) 実験装置 No.2 汚泥ポンプ

過年度、流体異常による実験やミスアライメント実験を行い、最終年度は異常再現実験を行っている。運転時間は No.1 汚泥ポンプに次いで2番目の長さとなっている。ポンプ本体部やモータ部に若干の振動上昇が見られたが要処置域を超えるほどの劣化は見られなかった。

### 3) 実験装置 No.3 汚泥ポンプ

過年度、軸受きず実験やインバータ実験を行っている。後年はプーリにウエイトを付けてアンバランス実験を行っている。分解結果は軽微なフレッチングが見られたものの、要処置域を超えるほどの劣化は見られなかった。

### 4) 実験装置 No.4 汚泥ポンプ

過年度の実験では、一番過酷な条件を与え、軸受が焼き付く状況を再現している。実験後、軸受を新しいものに変えているが、元の振動値に戻らず、比較的高い状態で振動を発生続けたことからメカニカルシールが破損することになった。分解調査結果でも外輪嵌め合い部のフレッチングを始め、内輪軌道面および軸受玉のスミアリングやフレーキングといった結果が見られ、加速度値も要処置域に達していたことから、基準値の妥当性を確認した。また、一度大きな損傷を与えてしまうと、耐久性が低下することを確認した。

### 5) 実機に設置した振動センサおよび振動変換器

平成27年度に設置してから約4年間、振動センサの点検校正等は一切せずに使用してきたが、今年度、再度加振器を使って劣化調査を行った結果、全ての振動センサにおいて規定振動値の許容範囲内にあることを確認した。

### 6) ポータブル測定器のメーカー検査および分解点検結果

ポータブル振動計については、3台の内、2台についてメーカー基準値外の数値となっていた。本測定器については、4年間全く校正しておらず、メーカー推奨校正期間である2年間を大きく超えていたことから、耐久性を考慮したメーカー推奨校正期間の必要性を確認した。なお、振動計の内部状況としては、基板等内部部品に損傷や発錆といった異常は見られなかった。ポータブル電流解析機については、3台とも異常値は検出されず、プローブの内部状況も、基板等内部部品に損傷や発錆といった異常は見られなかった。

## 1.4.2 ビッグデータ分析技術（インバリエント分析）

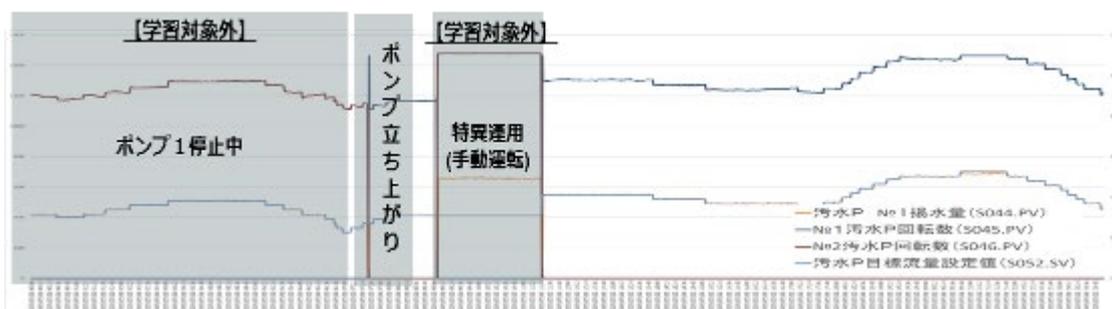
インバリエント分析技術を用いた異常予兆検知の実証では、対象設備ごとにインバリエント分析モデル（正常モデル）を生成し、異常検知しきい値を設定し、中央監視装置からのオンラインデータ分析結果と運転記録を比較し、検知精度の評価を行った。

### (1) インバリエント分析モデル（正常モデル）の生成

インバリエント分析はいつもと違う動きを検知するため、準備として、正常時のデータを学習し、センサの相関性を評価する正常モデルを生成する。設備や計装機器の故障、特殊運転等のデータの除去、データクレンジング等のモデル化技法につき検証し、表資 1-16、図資 1-41 に示す様に、正常モデルの作成条件を整理した。

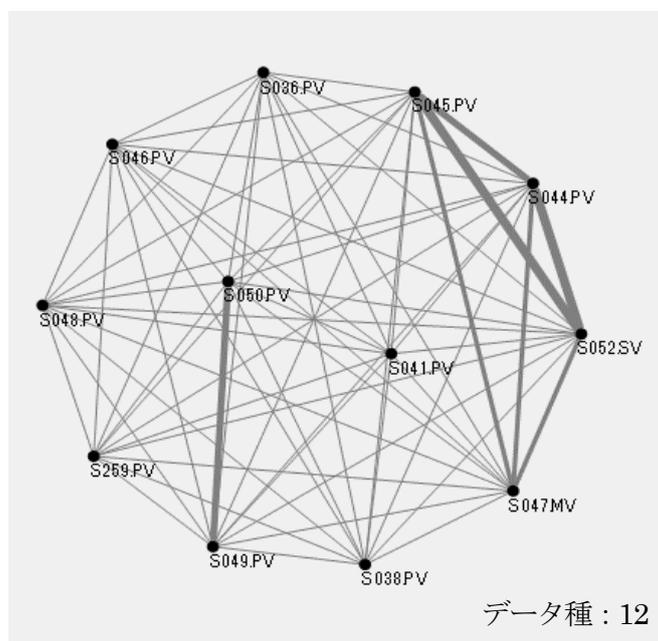
表資 1-16 正常モデル作成条件

項番	正常モデル作成条件	
1	正常モデルの学習データ期間	・季節によるセンサデータの変動を考慮するため、学習データ期間を「1年間」とし、抜き取りにて合計の学習データ量は約1週間分（150H程度）を用いる
2	特殊運用期間・故障期間の除去	・手動運転等、通常と異なる運用期間を除去。 ・設備が故障している期間、センサ値が異常値の期間を除去
3	同時稼働データの除去	・汚水主ポンプ等、設備が交互運転する運用の場合は、同時稼働しているデータを除去
4	設備の立ち上がり／立ち下がり／停止期間の除去	・ポンプや原動機を含む設備の場合、起動時の立ち上がり、運転停止までの立ち下がり、停止期間のデータを除去



図資 1-41 汚水主ポンプにおける正常データ抽出処理の例(イメージ)

正常モデル作成条件にて抽出した2017年10月～2018年9月の学習データにより、インバリエント分析サーバで生成した正常モデルの論理構成図について、汚水主ポンプの例を図資1-42に示す。



インバリエントモデルの論理構成図

※ 2 センサ間の相関の強さを示す値を Fitness 値として表し、高い程、より関係性が強く影響する。Fitness 値の上位 10 組を以下に示す。

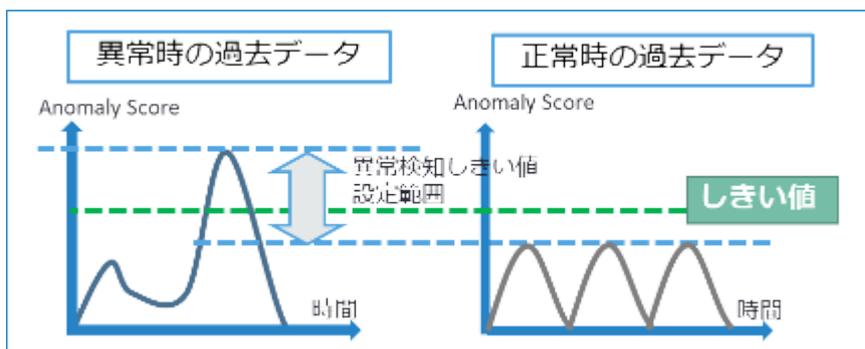
計装項目 (入力)	センサTag名	計装項目 (出力)	センサTag名	Fitness値
汚水P目標流量設定値	S052.SV	汚水P No.1 揚水量	S044.PV	0.88919973
汚水P目標流量設定値	S052.SV	No.1汚水P回転数	S045.PV	0.8739332
No.1汚水P回転数	S045.PV	汚水P No.1 揚水量	S044.PV	0.78269583
受電電流	S049.PV	受電電力	S050.PV	0.70808977
汚水P目標流量設定値	S052.SV	汚水P回転数設定値	S047.PV	0.55876225
汚水P回転数設定値	S047.MV	No.1汚水P回転数	S045.PV	0.5230706
汚水P回転数設定値	S047.MV	汚水P No.1揚水量	S044.PV	0.50968677
汚水P目標流量設定値	S052.SV	受電電流	S049.PV	0.31227666
汚水P目標流量設定値	S052.SV	受電電力	S050.PV	0.30780277
受電電流	S049.PV	汚水P No.1揚水量	S044.PV	0.3026699

図資 1-42 汚水主ポンプにおける正常モデル作成例

他の設備についても各々、同様に取得データを観察し、正常データを抽出し、インバリエント分析サーバにて、正常モデルを生成する。

(2) インバリエント分析 モデルの検証と異常検知しきい値の設定

正常モデルにオンライン実測データを用いて分析を実施し、得られた Anomaly Score の変動と故障報告記録と比較照合し、異常検知しきい値の設定を行った。異常検知しきい値の設定概念を図資 1-43 に、異常検知しきい値の設定技法を表資 1-17 に示す。

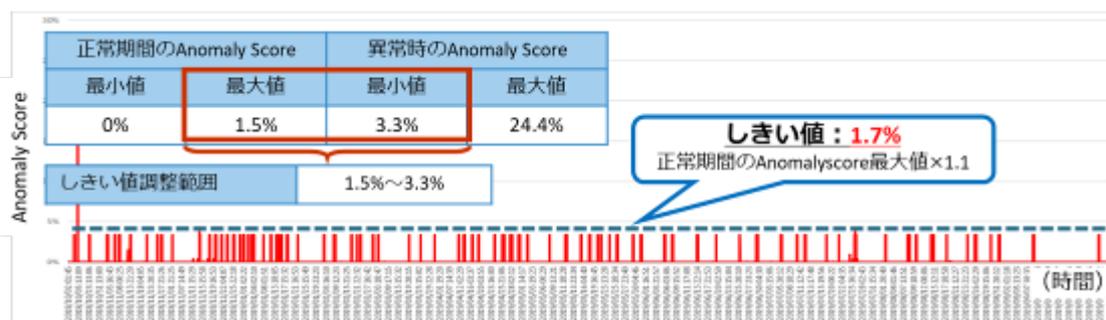


図資 1-43 異常検知しきい値の設定概念図

表資 1-17 異常検知しきい値の設定技法

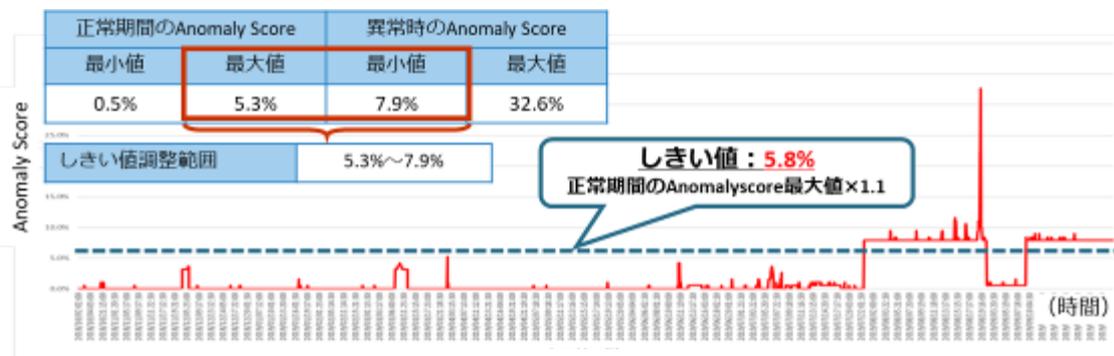
項番	異常検知しきい値の決定技法	
1	過去データ分析	作成した正常モデルにて、過去の蓄積データを分析し、Anomaly Score と故障記録報告を比較照合する。
2	しきい値設定	照合結果により正常状態の Anomaly Score の最大値と異常記録の Anomaly Score の最小値から、異常検知しきい値を設定する。 (正常状態 Anomaly Score 最大値×1.1 を推奨)

実証での各設備の分析としきい値の設定を図資 1-44～図資 1-45 に示す。



汚水ポンプ設備

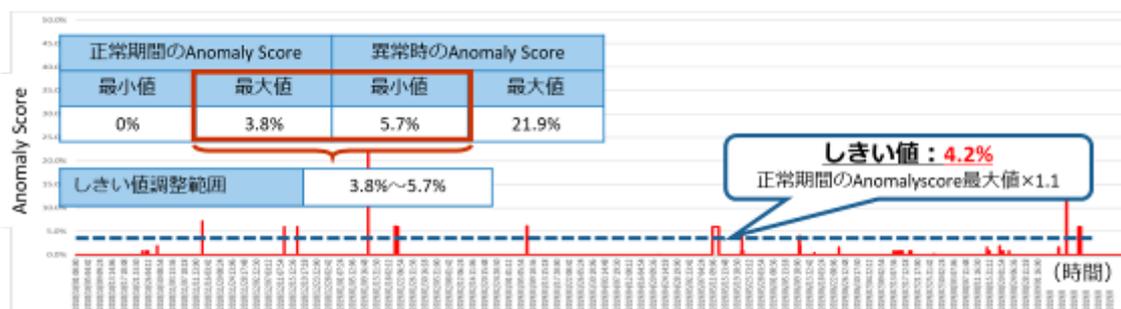
図資 1-44 各設備のモデル検証としきい値の設定例(1)



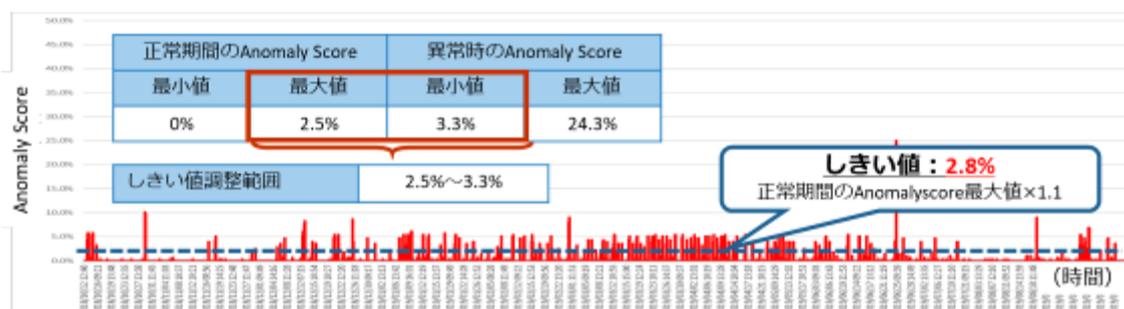
水処理設備



送風機設備



消毒用水設備



濃縮・脱水設備

図資 1-45 各設備のモデル検証としきい値の設定例(2)

(3) 各設備の異常予兆検知の検証（誤検知の削減実証）

実証では、インバリエント分析における Anomaly Score のしきい値超過の相関性の崩れと、中央監視記録を比較照合し、表資 1-18 に示す事象分類を行った。

表資 1-18 相関性の崩れの正常検知と誤検知の分類

検知種別	インバリエント分析結果	中央監視記録
① 正常検知 (運用における特異事象)	しきい値超	運用における特異事象
② 正常検知 (設備異常)	しきい値超	設備異常
③ 誤検知 (過剰検知)	しきい値超	設備正常かつ運用の特異事象無し
④ 誤検知 (検知漏れ)	しきい値超えず	設備異常

日高市浄化センターの対象施設ごとに、前項迄で設定した各設備の正常モデルと異常検知しきい値を基にオンラインデータ分析を行った。誤検知件数を評価した結果を表資 1-19 に示す。評価分析データ期間は、2018年10月～2019年10月の約1年間である。

表資 1-19 誤検知件数の評価

実証設備	分析データ期間	異常検出しきい値	誤検知件数	全検知数(しきい値超過)		誤検知数	
				設備の異常	運用における特異事象 (設備点検や一時的な手動運転等)	過剰検知	検知漏れ
汚水ポンプ設備	2018年10月 ～ 2019年9月	1.7%	0件/日 (0件/年)	390		0	
				1	389	0	0
水処理設備		5.8%	0件/日 (0件/年)	2		0	
				1	1	0	0
送風機設備		0.8%	0件/日 (0件/年)	0		0	
			0	0	0	0	
消毒設備	4.2%	0件/日 (0件/年)	16		0		
			0	16	0	0	
濃縮脱水設備	2.8%	0件/日 (0件/年)	247		0		
			0	247	0	0	

何れの設備においても、目標とした誤検知件数1回/日以下を満足しており、誤検知も発生していない。

1年前の2018年度の研究では、水処理設備と消毒設備にて検知漏れの事象の発生があった。原因は、一部の計装設備データで“0”値を含む期間データを正常モデル学習に使用していたことから、検知漏れとなった。計装設備の異常設定の精査と運転記録との突合せによる正常モデル作成の見直しを行い、検知漏れの改善につながった。各年で正常モデルの見直しと異常検知しきい値の精査を行うことで、精度の高い異常予兆検知が可能となる評価結果であった。

本検証において、汚水ポンプ設備と水処理設備で異常を検知した。検知事象を図資 1-46 と、図資 1-47 に示す。汚水ポンプ設備及び水処理設備において、設備の異常発生時に Anomaly Score が上昇し、異常検知しきい値を超過していることが確認できる。



図資 1-46 汚水ポンプ設備の異常発生時の分析結果

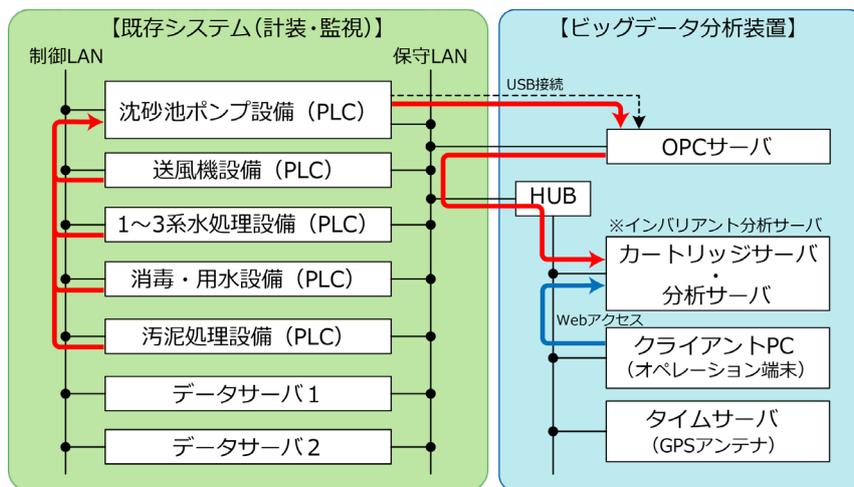


図資 1-47 水処理設備の異常発生時の分析結果

#### (4) ビッグデータ分析装置の構築

オンラインデータ収集とリアルタイム分析を行うために、日高市浄化センターに「ビッグデータ分析装置」を設置する。既存の中央監視システムの保守用ネットワークに追加接続することで、既存の下水処理施設の中央監視システムの取得データを収集・分析し、異常予兆を素早く捉えられる環境を構築できることを確認することができた。

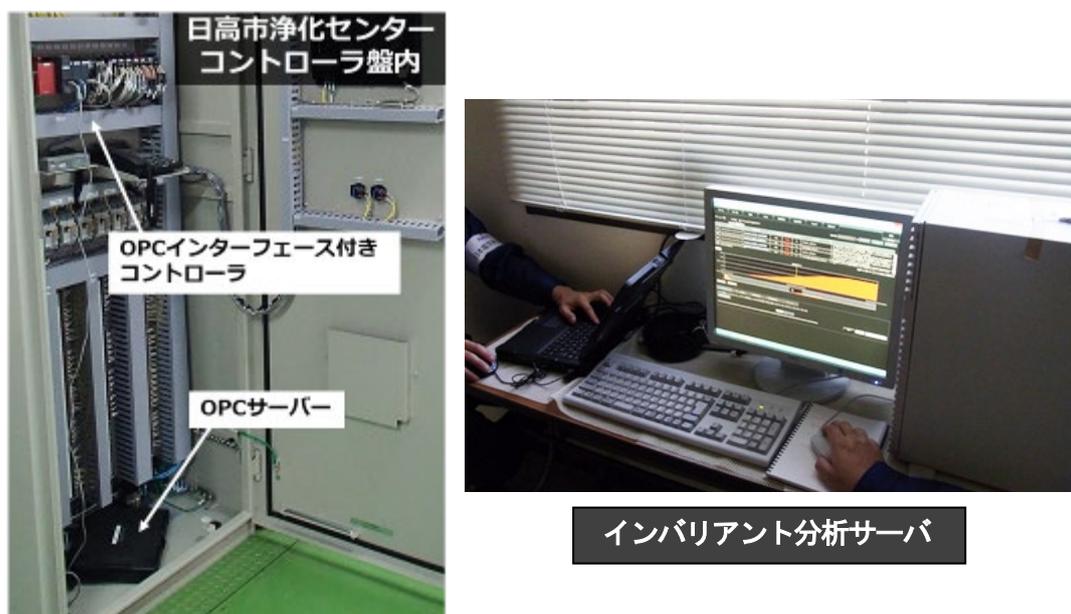
ビッグデータ分析装置のシステム構成図を図資 1-48 に示す。既存システムの PLC (Programmable Logic Controller) から OPC サーバ (OLE for Process Control 規格に準拠した PLC と通信を行うサーバ) を用いてセンサデータを取得する。このセンサデータをカートリッジサーバにより分析可能なデータに加工したうえで、分析サーバによりインバリエント分析を実行する (本実証においては、カートリッジサーバと分析サーバの機能をひとつのハードウェアで担っており、これを「インバリエント分析サーバ」と呼称している)。分析結果はクライアント PC の画面に表示される。



凡例：データフロー → アクセスフロー →

図資 1-48 ビッグデータ分析装置のシステム構成図

日高市浄化センターに設置した実証システムの状況を図資 1-49 に示す。



図資 1-49 実証システム概要

また、実際の各施設での実証により、ポンプ設備等の間欠運転を行う施設設備の場合、以下のようなアプリケーション機能を追加することが運用において有効ことが判った。

- 1) ポンプ停止時の Anomaly Score の上昇アラームを除外する様、電流値や回転数等によりポンプの稼働状態を判断する機能を追加する。
- 2) 現有のセンサデータでポンプの稼働状態を判断できない場合は、電流値や回転数等を取得するセンサ及び収集機能を中央監視装置に追加する。

(5) 計装設備点検の効率化

インバリエント分析により得られる効果のひとつとして想定される、計装設備点検の効率化について検証した。

下水処理施設では、計装点検として、通信状況の点検、表示機能（現場表示機能）の点検、電源電圧の点検、計装機器本体の機能点検などが、年1回実施されることが普通であり、処理施設の規模によるが、毎年400万円～1300万円程度の委託費が発生しているのが現状である。

表資 1-20 に調査結果（国総研調べ）を示す。

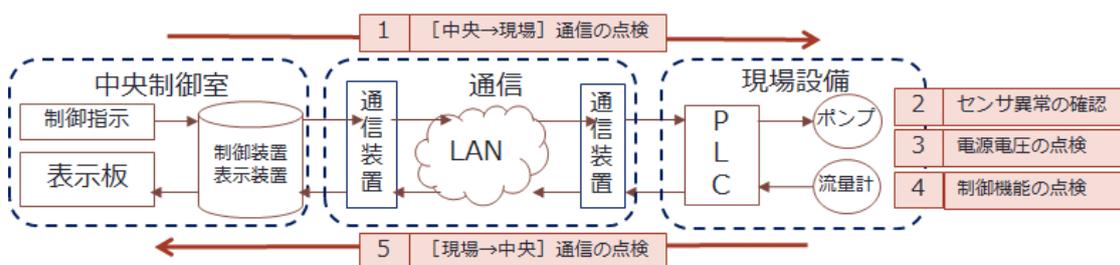
表資 1-20 計装設備の点検費用

施設規模	対象機器数	計装点検費用
m <sup>3</sup> /日	台	円/年
大規模 100,000	179	13,000,000
中規模 50,000	94	6,000,000
小規模 10,000	54	4,000,000

インバリエント分析は、異常の予兆を早期に検知することを目的として開発されたものであるが、複数のセンサ間の関係性を常時監視することにより、計装設備の状態を常時点検しているとも考えられる。

表示機能（現場表示機能）の点検については、人による目視点検が必要となるが、これは通常の維持管理で対応可能である。

図資 1-50 に、インバリエント分析により代替できる計装点検項目を示す。



図資 1-50 インバリエント分析で代替できる計装点検項目

本実証研究において制御状態監視モデルの作成、検知漏れ・誤検知の低減、ビッグデータ分析装置の設置・運用が行えたことから、異常箇所の絞り込みや事前対処が可能となり、計装設備点検の効率化が期待できる。

### 1.4.3 ビッグデータ分析技術（異種混合学習）

平成 27 年度、平成 28 年度に日高市浄化センターの各設備と守谷浄化センターの場外ポンプを対象とし、性能状況推定と劣化進行予測が実施可能であるかの適用性評価を行った。

表資 1-21 に平成 27 年度の性能状況推定の検証結果を示す。

表資 1-21 性能状況推定 適用性検証結果

処理場名	対象機器	劣化指標	結果	結論	説明
日高市 浄化センター	汚水ポンプ	揚水能力	○	劣化状況を確認することができた。	揚水量、回転数、ポンプ井水位、気温、降水量の関係を自動的に検出し、揚水能力を予測できることを確認した。性能状況推定を行うことで、揚水能力の低下を把握できることを確認した。(例:No.1汚水ポンプ 2014/6/11付近など)
	送風機	送風能力	○	劣化状況を確認することができた。	吸入風量、インレットベーン開度、雨量、気圧、湿度の関係を自動的に検出し、送風能力を予測できることを確認した。性能状況推定を行うことで、送風能力の低下を把握できることを確認した。(例:No.2送風機2014/1/10付近など)
	エアレーション タンク	送風能力	○	劣化状況を確認することができた。	送風量、風調弁の開度、吐出圧力の関係を自動的に検出し、送風能力を予測できることを確認した。性能状況推定を行うことにより、送風能力の変化を確認することができた。(例:1系エアレーションタンク 2014/3/20付近など)
	脱水機	脱水能力	△	劣化状況を予測することができたが、予測精度があまり良くない。	供給濃度、供給固形物量、凝集剤量、流入水温、遠心濃縮比率の関係を自動的に検出し、脱水能力を予測できることを確認した。予測精度が低く、性能状況推定で脱水能力の低下を確認することはできなかった。
守谷 浄化センター	場外ポンプ場	送水能力	○	劣化状況を確認することができた。	運転時間と送水量の関係を自動的に検出し、送水能力を予測できることを確認した。性能状況推定を行うことにより、送水能力の低下(運転時間の増加)を確認することができた。(例:みずき野ポンプ場 2011/10/1~2012/9/30)

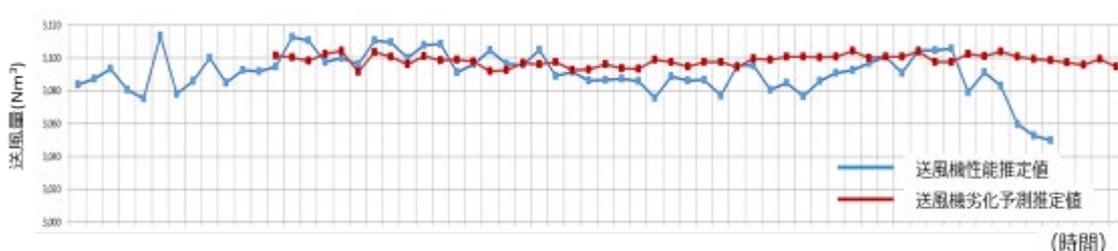
性能状況推定のモデル式の作成及び推算は可能であったが、脱水機については予測精度が低い結果であった。表資 1-22 に平成 27 年度の劣化進行予測の検証結果を示す。

表資 1-22 劣化進行予測検証結果

処理場名	対象機器	劣化指標	結果	結論	説明
日高市 浄化センター	汚水ポンプ	揚水能力	○	劣化状況を確認することができた。	揚水量、回転数、ポンプ井水位、気温、降水量から自動的に劣化進行予測ができることを確認し、長期的な劣化傾向を確認した。
	送風機	送風能力	△	3年では劣化傾向が見えず、さらに長い期間のデータが必要であることがわかった。	吸入風量、インレットベーン開度、雨量、気圧、湿度から、データによっては長期的な劣化進行予測が期待できる。
	エアレーション タンク	送風能力	△	有効なデータが3年以上のデータ点数が必要であることがわかった。	送風量、風調弁の開度、吐出圧力から、データによっては長期的な劣化進行予測が期待できる。
	脱水機	脱水能力	△	データの精度を上げるなど入力データを見直す必要があることがわかった。	供給濃度、供給固形物量、凝集剤量、流入水温、遠心濃縮比率から、データによっては長期的な劣化進行予測が期待できる。
守谷 浄化センター	場外ポンプ場	送水能力	○	劣化状況を確認することができた。	運転時間と送水量から自動的に劣化進行予測できることを確認し、長期的な劣化傾向を確認した。

日高市浄化センターの汚水主ポンプと守谷市浄化センターの場外ポンプについて、劣化進行予測が可能であったが、他の施設設備については、明確な劣化予測を得られない結果となった。

平成 30 年度に再度、送風機設備についてモデルの見直しを図り劣化進行予測を行ったが（図資 1-51 参照）、明確な性能の経年低下は見られなかった。



図資 1-51 送風機設備の劣化進行予測評価（2018 年度）

送風機については、劣化要因となる事象（羽の摩耗、モータ抵抗変化）が少なく、関連する設備構成も度々変更されていることもあり、異種混合学習技術を用いた統計的な技法での劣化予測は、不適であったと推察する。このことから同様に、経年的な劣化要因が少なく、頻繁に手動操作による運用を行う設備や構成品が度々変更される設備については、従来の定期更新等が推奨される。

一方、ポンプ設備には有効の評価結果を得たため、令和元年度の実証では、汚水ポンプ設備を対象に、異種混合学習技術による劣化進行予測の技法（学習データ、手順、留意事項）の確立の検証を行った。特に、必要な蓄積データ量に関係することから、劣化進行予測に必要な適正学習期間および予測先を変化させての予測精度の評価を行った。

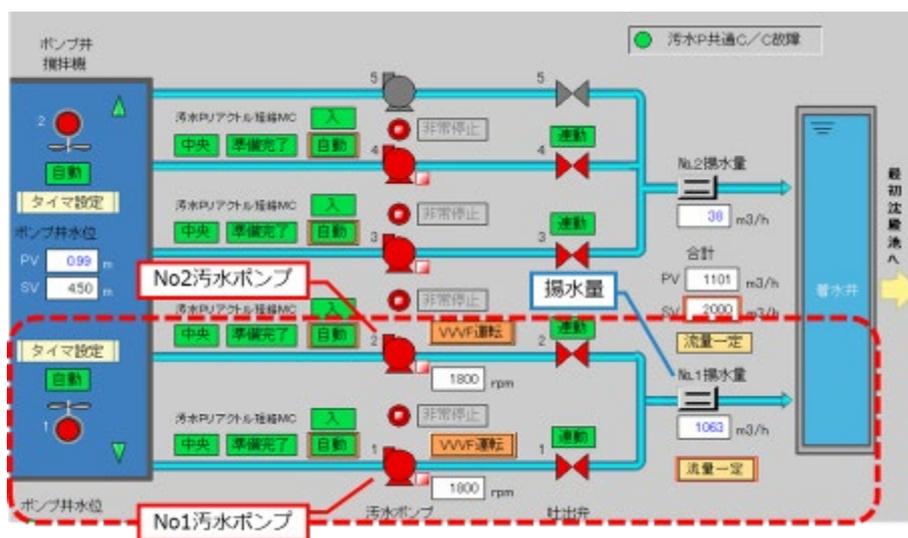
評価指標は以下とする。

- 1) 1 年後劣化進行予測 精度誤差率：0.5%以下（目標値）
- 2) 2 年後劣化進行予測 精度誤差率：1.0%以下（目標値）

## (1) 関連データの収集・整理 データ観察（污水主ポンプ）

データクレンジング方法の検討に向けたデータ観察結果を示す。

先ず、実証対象の日高市浄化センターの污水ポンプ設備のモデルを図資 1-52 に示す。稼働中の 1 系ポンプ設備は、No.1 污水主ポンプと No.2 污水主ポンプを交互運転で運用しており、揚水量は合流の 1 カ所で計測されているポンプ設備の例である。



図資 1-52 污水ポンプ設備の運用画面

### 1) 対象設備の分析所要データ

污水ポンプ設備の分析所要データの条件につき、検証を通して整理した結果を以下に示す。

- ・ 定期的（1 時間単位）なデータがあること。
- ・ 更新の判定基準となる性能劣化を示すデータ（揚水量等）があること。
- ・ 設備機器単体の性能を特定できるデータがあること。（交互運転等に留意）
- ・ 性能劣化を示すデータと因果関係のあるデータ（運転時間、ポンプ回転数等）が複数種あること。
- ・ 複数の設備で同一の計装データを運用している場合、運転切替え等で個別の設備データとして分離可能であること。
- ・ 充分な期間のデータ（最低 3 年以上）の保有期間データがあること。その際に故障や特殊運用期間が存在する場合は、更に長い期間のデータを利用することを推奨。

### 2) データクレンジング・特殊運用データの除去

予測推算において、特異な事象のデータを学習してしまうと、性能傾向の把握が困難となり、将来の予測に影響が発生するため、特異な事象のデータ期間を除く必要がある。

- ・特殊運用期間、故障期間の除去  
手動運転等の通常と異なる運用期間を除去。設備が故障している期間、センサ値が異常の期間の除去。
- ・同時稼働データの除去  
通常にて設備が交互運転する運用の場合、同時稼働している期間を除去。
- ・設備の立ち上がり／立ち下がり／停止期間の除去（1,000rpm 以下のデータを除去）  
ポンプの起動時の立ち上がり、運転停止までの立ち下がり、停止期間のデータを除去。

## (2) 性能状況推定値の推算（異種混合学習による推算）

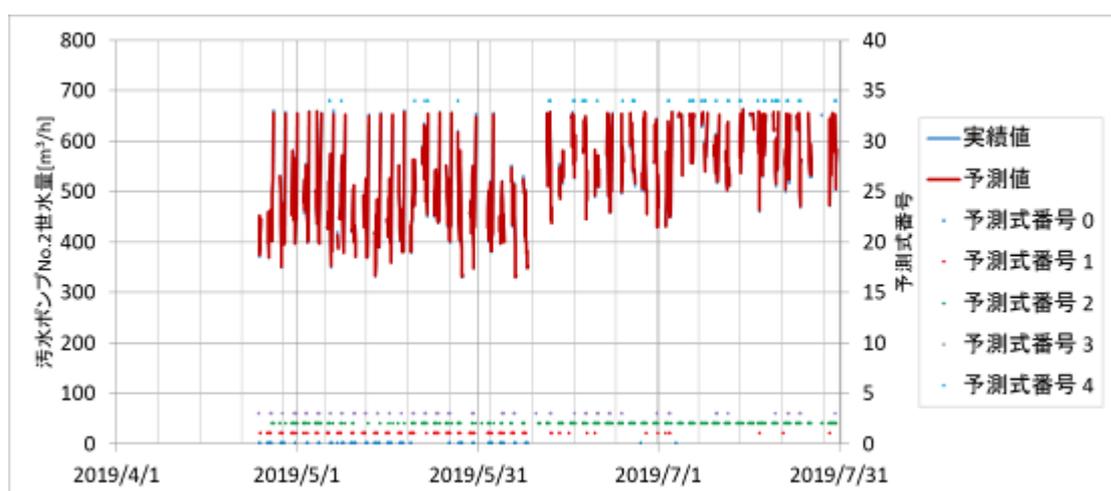
### 1) 性能状況推定モデルの作成

汚水主ポンプの揚水量実測値は常に数値が変動しており、実測値の観察では性能低下を把握することは困難である。

標準化された性能状況推定値を求めるために、先ず、性能状況推定値を求める推算モデルを作成する。汚水主ポンプの性能を表す揚水量を目的変数とし、因果関係のある気温・降水量・ポンプ井水位・ポンプ回転数を説明変数として、過去の運転データについて機械学習（異種混合学習技術）を行い、性能状況推定モデルを作成する。

異種混合学習技術を用いて学習すると、場合分けされた（条件づけられた）、複数の予測式が導かれる。（性能状況推定モデルは複数の予測式から成る。）予測の推算を行う際には、各時刻データにおいて、この予測条件に該当する式が選択されて性能状況推定値が計算される。

図資 1-53 に、No.2 汚水主ポンプにおいて複数の予測式が生成され推算している状況と、表資 1-23 に No.2 汚水主ポンプの性能状況推定モデルの予測式条件例を示す。

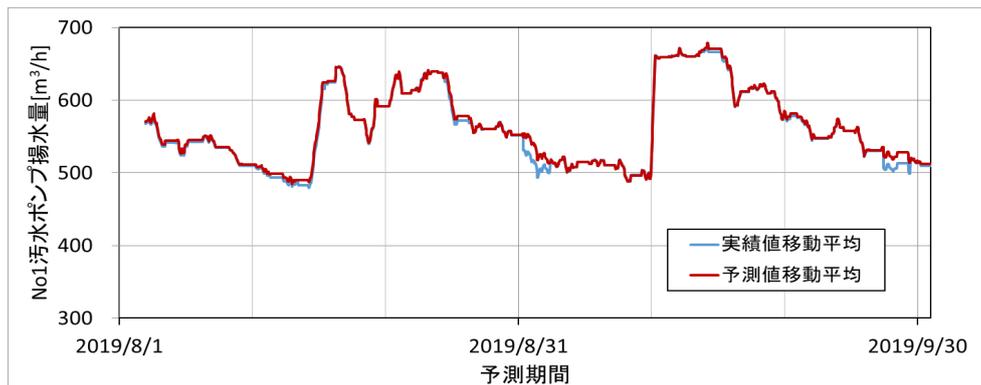


図資 1-53 No2 汚水主ポンプにおける予測値と実績値 例

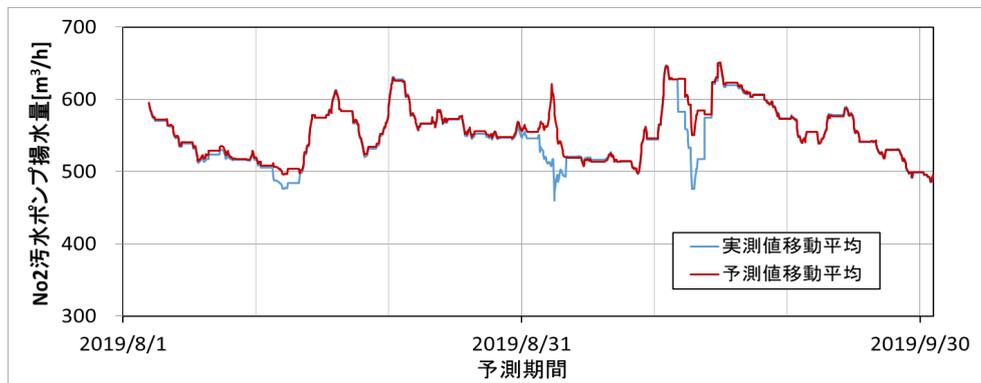
表資 1-23 No2 ポンプ性能状況推定モデルの予測式条件例

		流入渠水位	
		2.45 未満	2.45 以上
No. 2 汚水主ポンプ 回転数	1,199.5 未満	予測式 0	
	1,199.5 以上 1,279.5 未満	予測式 1	予測式 3
	1,279.5 以上 1,324.5 未満	予測式 2	
	1,324.5 以上		予測式 4
No. 2 汚水主ポンプ 回転数	1,223.5 未満	ポンプ井水位=2.405 未満	予測式 2
		ポンプ井水位=2.405 以上	予測式 1
	1,223.5 以上	予測式 0	

図資 1-54 に、No.1 汚水主ポンプの性能状況推定モデルによる予測値と実測値（48 時間移動平均）の比較結果を示す。図資 1-55 に同様に No.2 汚水主ポンプの性能状況推定モデルによる予測値と実測値（48 時間移動平均）の評価結果を示す。



図資 1-54 No.1 汚水主ポンプの性能状況推定モデルの評価 予測値と実測値の比較



図資 1-55 No.2 汚水主ポンプの性能状況推定モデルの評価 予測値と実測値の比較

No.1 汚水主ポンプ、No.2 汚水主ポンプ共に予測値は実測値を追従しており、性能状況推定モデルの妥当性が確認できる。

## 2) 標準化された性能状況推定値の推算

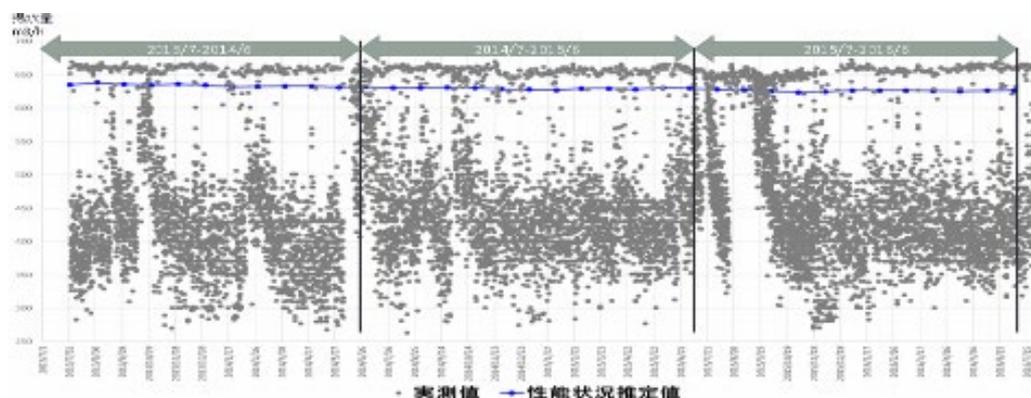
作成した性能推定値の計算モデルを用いて、変動要因である気温・降水量・ポンプ井水位・ポンプ回転数に固定値を代入し、異種混合学習技術で再計算することで、標準化された性能推定値を示すことができ、時系列変化の性能状況を評価可能となる。

表資 1-24 に、汚水ポンプ設備の分析における説明変数の固定値の入力例を示す。

表資 1-24 No.2 汚水主ポンプの分析における説明変数の固定値 例)

説明変数	単位	値	備考
気温	℃	14.5	学習期間における No.2 ポンプ稼働時の平均値
降水量	mm/h	0	固定
ポンプ井水位	m	2.62	学習期間における No.2 ポンプ稼働時の平均値
ポンプ回転数	rpm	1450	固定
流入渠水位	m	1.535	学習期間における No.2 ポンプ稼働時の平均値

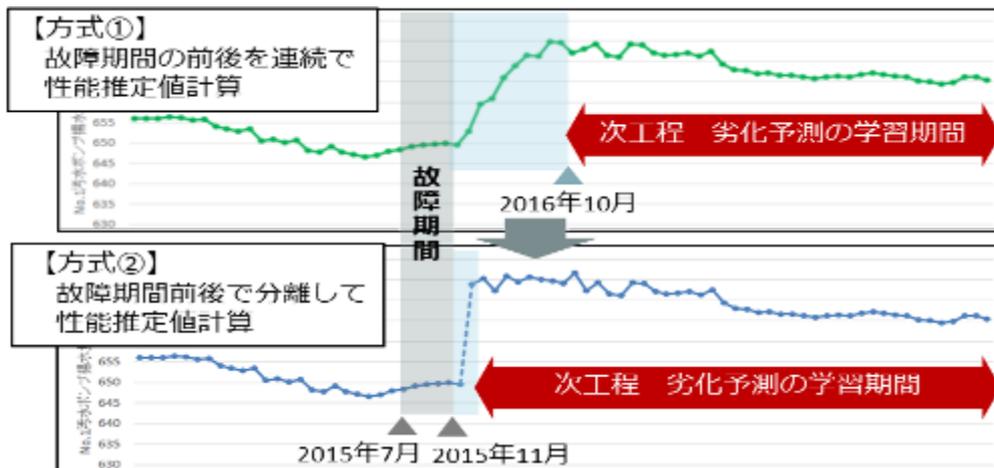
図資 1-56 に No.2 汚水主ポンプ揚水量の実測値と性能状況推定結果の例を示す。実測値は変動があるため、傾向把握が困難であるが、標準化された性能状況推定値（青線）では、傾向が見て取れる。



図資 1-56 No.2 汚水主ポンプ揚水量の実測値と性能状況推定結果の例

なお、実証の対象とした汚水ポンプ設備については、No.1 汚水主ポンプにおいて、故障期間があった。この故障のケースでは、故障の前後で、運転条件若しくはデータ取得に起因するのか、揚水量の分布に変動が生じていた。

故障期間とその前後データの取扱いに留意する必要があり、平成 30 年度と令和元年度に見直し検証した 2 つの方式について、図資 1-57 に示す。



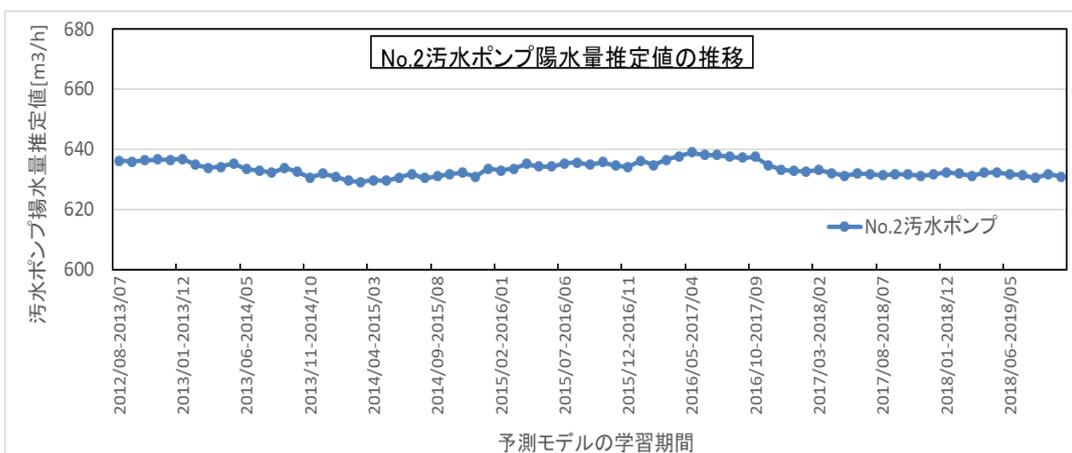
図資 1-57 No1 ポンプ故障期間の前後データの取扱いによる性能状況推定結果の例

方式①では、故障の前後のデータを連続して性能状況推定計算を行っているが、故障後の性能状況推定値が安定するまでに変動幅が発生しており、次工程の劣化進行予測で対象とする学習期間が短くなる課題があった。

方式②では、故障の前後を分離して性能状況計算に改良したものである。変動影響が抑制され、次工程の劣化進行予測で対象とする学習期間を方式①より長く取ることができる。

検証の結果から、方式②の故障期間を除き、且つ前後を分離して性能状況推定値計算を行うこととした。

No.2 汚水主ポンプは、故障していないが同じ系列であり、当該期間は特殊運用を行っているため、同様に当該期間のデータは除外し、性能状況推定を行った。No.2 汚水主ポンプの作成した予測モデルに基づき算出した性能状況推定値の推移を図資 1-58 に示す。



図資 1-58 No.2 汚水主ポンプの予測モデルによる性能状況推定値の推移

(3)劣化進行予測式の作成・予測値の推算（異種混合学習による推算）

1) 劣化進行予測式の作成

劣化進行予測式は、標準化された性能推定値を用いて作成する。ある月の性能状況推定値と X 年前の性能状況推定値を、その間の運転時間の関係性を異種混合学習技術で学習する。この関係性を X 年分学習することで、劣化進行予測式が作成される。

実証実験では、劣化進行予測に必要な適正学習期間および予測先を求めるため、学習期間と予測先の組合せを変化させての複数パターンにつき予測精度の比較検証を行った。

令和元年度には、故障期間を加味した汚水主ポンプの劣化進行予測の検証を行った。評価パターンを表資 1-25 に示す。

表資 1-25 汚水主ポンプの劣化進行予測 評価パターン（2019 年度実証）

対象	項番	学習方法	学習モデル化期間
No1 汚水ポンプ	①-1	1年後予測 1年間学習 故障前を含まない	2017年10月～2018年09月(12ヶ月)
	①-2	1年後予測 2年間学習 故障前を含まない	2016年12月～2018年09月(22ヶ月)
	①-3	1年後予測 長期間学習 故障前後を含む	2014年07月～2015年06月 2016年12月～2018年09月(34ヶ月)
No2 汚水ポンプ	②-1	1年後予測 1年間学習 特殊運用前を含まない	2017年10月～2018年09月(12ヶ月)
	②-2	1年後予測 2年間学習 特殊運用前を含まない	2016年12月～2018年09月(22ヶ月)
	②-3	1年後予測 長期間学習 特殊運用前後を含む	2014年07月～2015年06月 2016年12月～2018年09月(34ヶ月)
	②-4	2年後予測 1年間学習 特殊運用前を含まない	2017年12月～2018年11月(12ヵ月)

1年後予測\_1年間学習は、ある月と1年前の性能状況推定値及びその間の運転時間の関係性を1年間学習し、予測モデル式を作成する。1年後予測\_2年間学習は、同様に2年間学習し、予測モデル式を作成する。1年後予測\_長期間学習は、学習期間を更に長く実施したものである。何れも No.1 汚水主ポンプの故障期間と相当する No.2 汚水主ポンプの特殊運用期間は含まない。

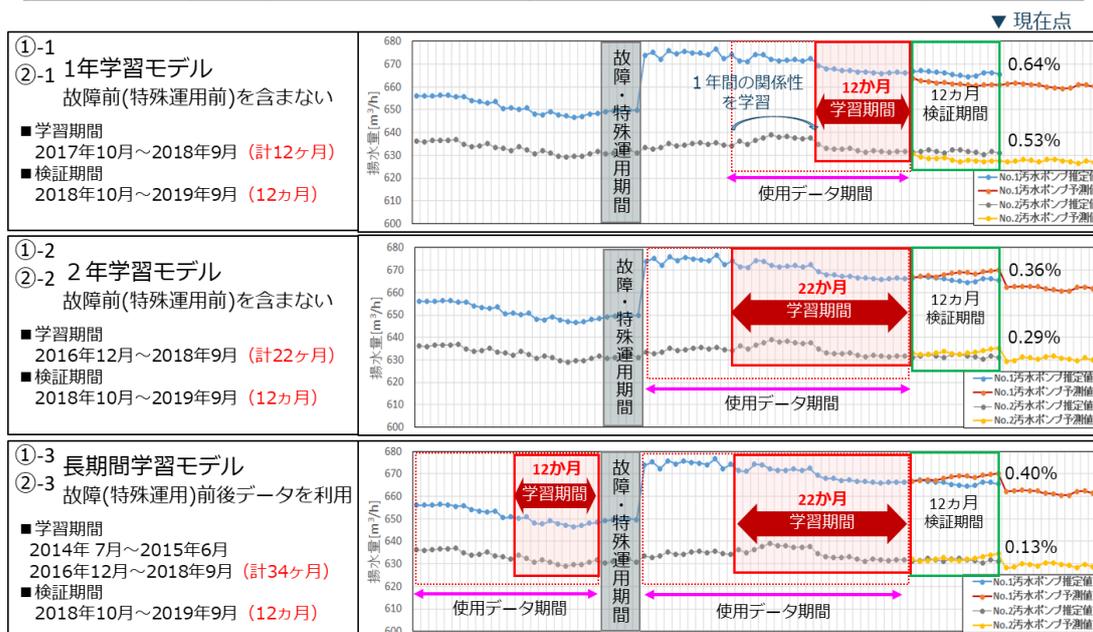
2年後予測\_1年間学習は、ある月と2年前の性能状況推定値及びその間の運転時間の関係性を学習し予測モデルを作成する。故障期間・特殊運用期間で2年間の関係性が分断されるため、故障期間・特殊運用期間後を学習対象とするため、検証では範囲としてデータ取得が可能な、1年間学習で評価を行った。

## 2) 劣化進行予測の推算

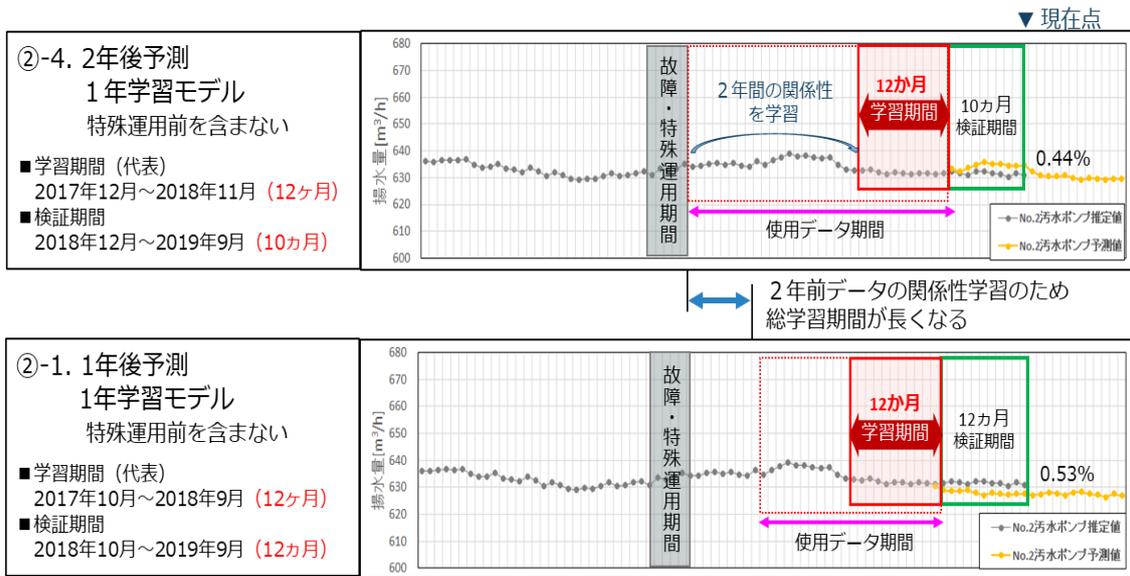
No.1 汚水主ポンプ、No.2 汚水主ポンプの各評価パターンで作成した予測式を用いて劣化進行予測を行う。1年後予測には、求めたい先の1年前の性能推定値と将来の1年間の推定運転時間を入力して推算を各月分繰り返して、劣化進行予測を行う。2年後予測には、求めたい先の2年前の性能推定値と将来の2年間の推定運転時間を入力して推算を各月分繰り返して、劣化進行予測を行う。劣化進行予測では、将来予測だけでなく実績期間についても過去データからの予測を実施することにより、劣化進行予測値と性能推定値（実績）の比較検証を行う。実証では、全ての評価パターンについて、この検証期間の精度評価を行い、予測先と学習期間の適性の検討を行った。評価結果の一覧を表資 1-26 に示す。1年後予測の推移を図資 1-59 に、2年後予測の推移を図資 1-60 に示す。

表資 1-26 汚水主ポンプの劣化進行予測 検証結果 (2019 年度実証)

対象	項番	学習方法	学習期間	誤差率(%)
No1 汚水ポンプ 故障: 2015/7月 ~2015/11月	①-1	1年後予測 1年間学習 故障前を含まない	2017年10月~2018年09月(12ヶ月)	0.64
	①-2	1年後予測 2年間学習 故障前を含まない	2016年12月~2018年09月(22ヶ月)	0.36
	①-3	1年後予測 長期間学習 故障前後を含む	2014年07月~2015年06月 2016年12月~2018年09月(34ヶ月)	0.40
No 2 汚水ポンプ	②-1	1年後予測 1年間学習 特殊運用前を含まない	2017年10月~2018年09月(12ヶ月)	0.53
	②-2	1年後学習 2年間学習 特殊運用前を含まない	2016年12月~2018年09月(22ヶ月)	0.29
	②-3	1年後予測 長期間学習 特殊運用前後を含む	2014年07月~2015年06月 2016年12月~2018年09月(34ヶ月)	0.13
	②-4	2年後予測 1年間学習 特殊運用前を含まない	2017年12月~2018年11月(12ヶ月)	0.44



図資 1-59 汚水主ポンプの劣化進行予測 1年後予測の検証結果 (2019 年度実証)



図資 1-60 No2 汚水主ポンプの劣化進行予測 2年後予測の検証結果\_1年後予測との比較

評価結果を以下に整理する。

- ・ 目標誤差率に対して、本検証では1年間の学習期間では満足しない結果もあり、学習期間を長くことが有効である結果を得た。
- ・ No.1 汚水主ポンプの様に故障が発生し性能推定値にバラツキが大きくなった場合は、故障前のデータは使用せず、故障後の性能推定値のみを使用して劣化予測を行うことが良い結果であることを確認した。
- ・ 同じ系で No.1 汚水主ポンプの故障期間に特殊運転を行った No.2 汚水主ポンプは、故障前後の性能推定値のバラツキが少ないことから、特殊運転期間を除く故障前後の性能推定値を使用し、なるべく長い学習期間を確保することが良い結果を示した。
- ・ 2年後予測の結果は、誤差率の比較では1年後予測と遜色ない結果であり、学習期間の長さの方が影響すると判断され、更に学習期間を長く確保することが有効と考える。

(4) 長期劣化進行予測 設備更新時期の推定

劣化進行予測は近い将来の数年先までの性能劣化推定を行う。設備の更新時期までの、より長期の劣化進行予測を行うには、求めた劣化進行予測の推移から近似式で外挿することにより更新時期の検討を行う。

1) 設備の更新基準値

設備の更新基準値は、各施設設備の所要能力設計値に基づき、設定する。污水主ポンプの場合は、揚水量を性能指標と設定しており、必要とされる所要揚水能力 (m<sup>3</sup>/h) を更新基準値とした。

2) 長期劣化進行予測

設備の更新基準値を下回る更新時期の長期予測を行う。対象設備に故障や特殊運転を有した場合の劣化進行予測は複数の学習期間のパターンで評価したが、最も誤差率の小さい結果を用いて外挿近似にて予測を行う。外挿近似は、単純な線形近似の推定を行った上で、劣化進行予測の誤差率に基づく累積誤差を考慮した推定検討を行う。

- ・推定基準 線形近似式

$$y = a \cdot x + b$$

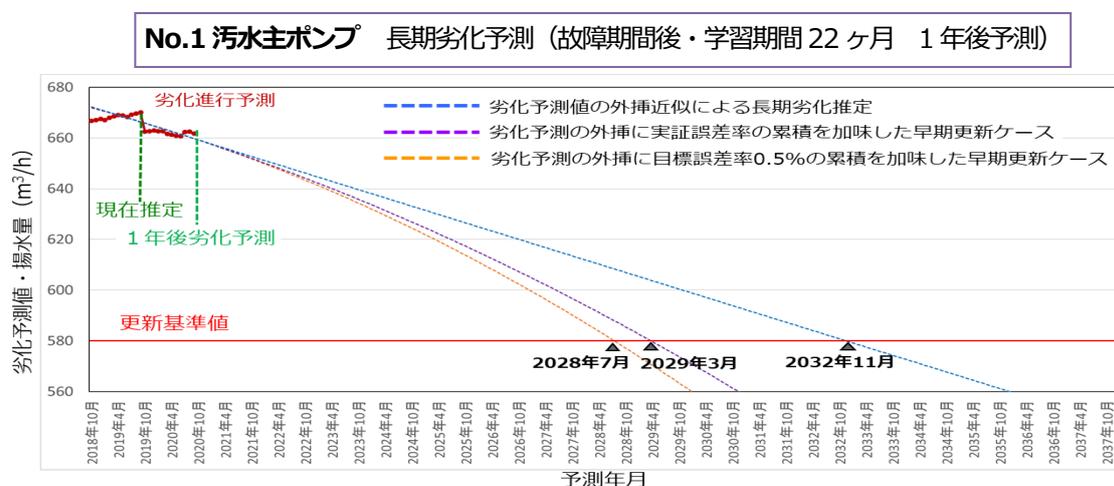
$$[\text{長期劣化予測値}] = a \cdot [\text{経過月数}] + b$$

- ・累積誤差を考慮した 近似式

$$y = a \cdot x \cdot (1 + s \cdot t) + b$$

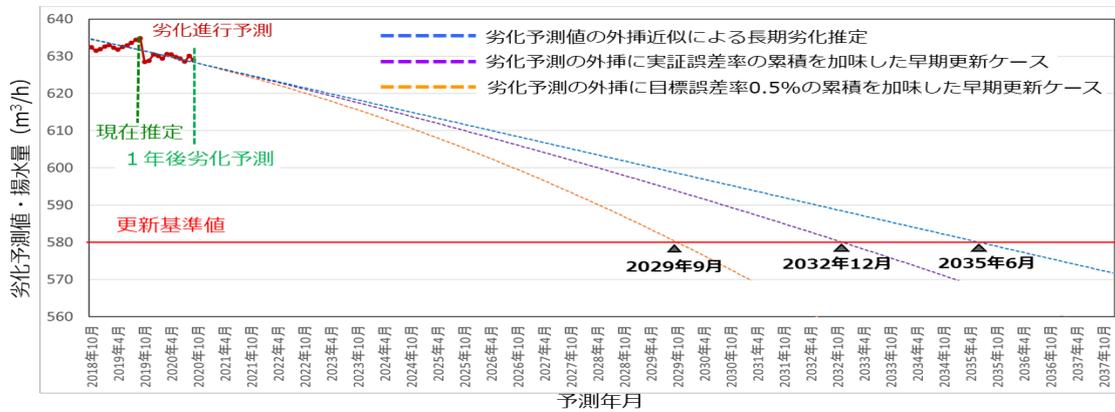
$$[\text{長期劣化予測値}] = a \cdot [\text{経過月数}] \cdot (1 + [\text{誤差率}] \cdot [\text{将来予測月数}]) + b$$

劣化進行予測に近似線を外挿した No.1 污水主ポンプ、No.2 污水主ポンプの長期予測の結果を図資 1-61～図資 1-62 に示す。また、長期劣化進行予測による污水主ポンプの更新時期の予測結果を表資 1-27 に示す。



図資 1-61 No.1 污水主ポンプの長期劣化進行予測 更新時期の推定

No.2 汚水主ポンプ 長期劣化予測 (故障期間前後・学習期間 34 ヶ月 1 年後予測)



図資 1-62 No.2 汚水主ポンプの長期劣化進行予測 更新時期の推定

表資 1-27 長期劣化進行予測 No1.No2 汚水主ポンプの更新予測

対象設備	ケース 1 実証誤差考慮	ケース 2 外挿予測 (推算基準)	ケース 3 目標誤差 (0.5%) 考慮
No. 1 汚水主ポンプ	2029 年 3 月	2032 年 11 月	2028 年 7 月
No. 2 汚水主ポンプ	2032 年 12 月	2035 年 6 月	2029 年 9 月

更新時期の推算は未来予測につき、複数のケースを出力する。最も更新時期の早いケースを検討することで、余裕を持った安全策の検討と故障への備えができる。

運転実績の変動を想定し、定期的な再分析にて更新計画の見直しを推奨する。ストックマネジメント等の技法により、更新計画を検討されている場合は、本推算を併せて考慮することで、維持管理の参考として活用されたい。

#### 1.4.4 センシング技術と組み合わせたインバリアント分析技術

守谷浄化センターに仮設した汚泥ポンプ実験装置にて、異常再現実験を行い、センサ技術とインバリアント分析の組合せ技術の検証を行った。センサ技術の組合せ有無によるインバリアント分析による異常検知の比較検証と、技法についての検証を実施した。

表資 1-28 に実験実施内容の時系列表と図資 1-63 に実験状況写真を示す。

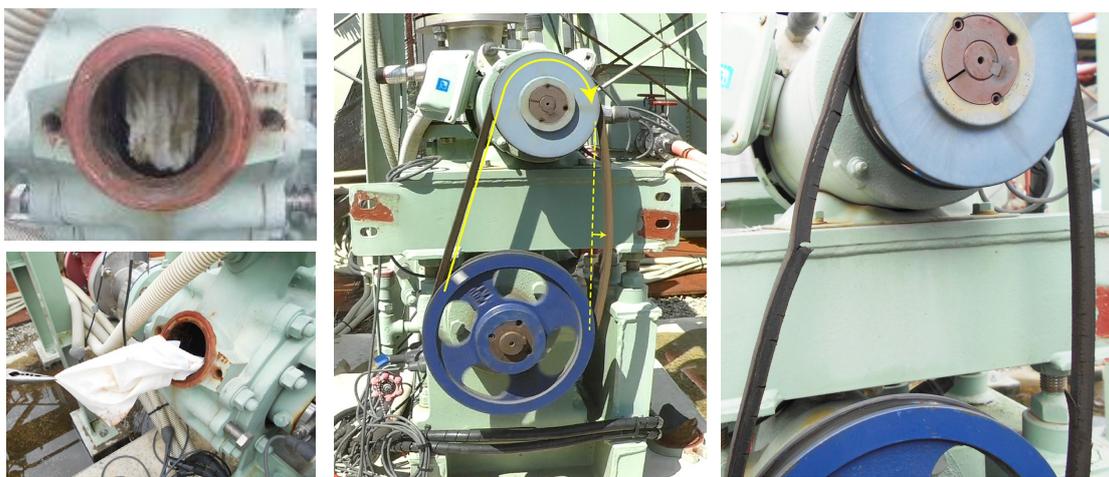
##### (1) 異常再現実験

守谷浄化センターに仮設した汚泥ポンプ実験装置に、① 異物の詰まり、② V ベルトの劣化事象（緩み）を再現する実験を行い、取得データをオフラインにてインバリアント分析を行う。

- ① 異物の詰まり：タオル、軍手、軍手+小石 3種類の異物を個別投入して評価
- ② V ベルトの劣化事象（緩み）：劣化V ベルト（約3万時間使用）による運転実験

表資 1-28 異常再現実験の実施内容と時間（2019 年度実証）

実験条件	日時	時刻	状況
異常再現データ Vベルト緩み	2019年7月4日	0:00	記録計 記録開始
		∴	(15min/15min,間欠運転)
		9:00	記録計 記録停止
異常再現データ 異物詰まり	2019年8月21日	10:19	記録計 記録開始
		10:50	異物投入1回目（タオル）
		14:00	異物投入2回目（軍手）
		14:25	異物投入3回目（軍手+小石）
		14:26	異物投入4回目（Vベルト緩み+異物）
		15:35	記録計 記録停止



図資 1-63 異物の投入例とV ベルトの劣化状況（緩み・亀裂）

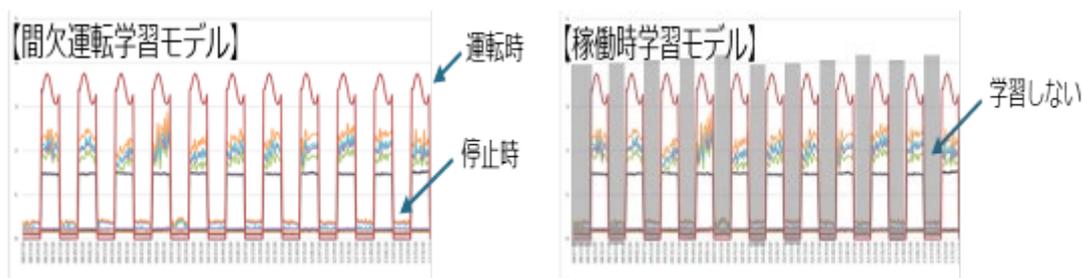
## (2) 異常再現実験に基づく異常予兆検知の検証

### 1) インバリエント分析における正常モデルの作成

汚泥ポンプは、通常、間欠運転であるため、正常モデルの作成では、以下の2種類の学習方法を行い、比較検証を行った。

①間欠運転学習モデル : ポンプ停止状態も正常状態として学習し、モデルを作成

②稼働時学習モデル : ポンプの稼働時のみを学習し(停止状態を除く)モデルを作成



図資 1-64 間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの学習パターン

### 2) 異常検知しきい値の設定

インバリエント分析の異常予兆検知の技法に基づき、以下とした。

① 作成した正常モデルで分析を行い、Anomaly Score の出力と実験記録を照合評価

② 照合結果により、異常検知しきい値を設定する。

異物投入前・V ベルト正常時の Anomaly Score 最大値×1.1

### 3) 評価結果（異物詰まり）

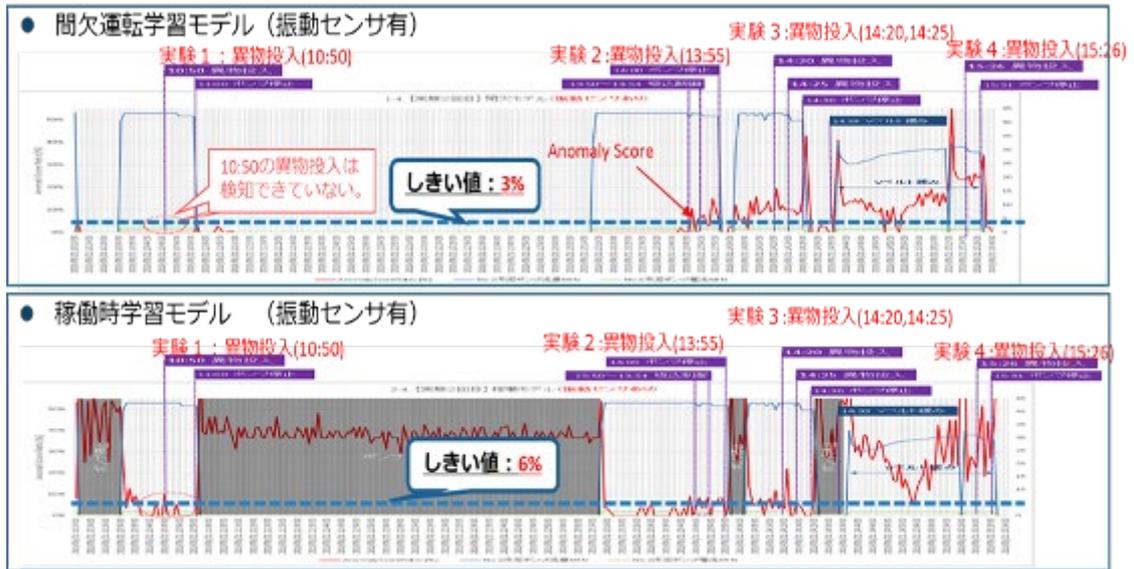
#### 3-1) 間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの比較評価

異常再現実験の取得データにより、間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルにて分析を実施し、結果を比較した。(図資 1-64 参照)

間欠運転学習モデルで、タオルがインペラにバランスよく絡みついたため、振動データの変動が小さく Anomaly Score の上昇が見られない事象が一部に在ったが、その他の事象の検知は確認された。なお、ポンプ停止時には Anomaly Score が低く抑えられる事を確認した。

稼働時学習モデルでは、全ての異物投入・詰まりの事象を検知できた。より細かい異常を捉えたい場合は、稼働時運転モデルが有効と考える。ただし、ポンプ稼働時のみのデータ学習のためポンプ停止時の Anomaly Score は上昇するため、ポンプの稼働/停止をセンサデータで判断可能な仕組みを要する。

間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの分析結果を図資 1-65 に示す。

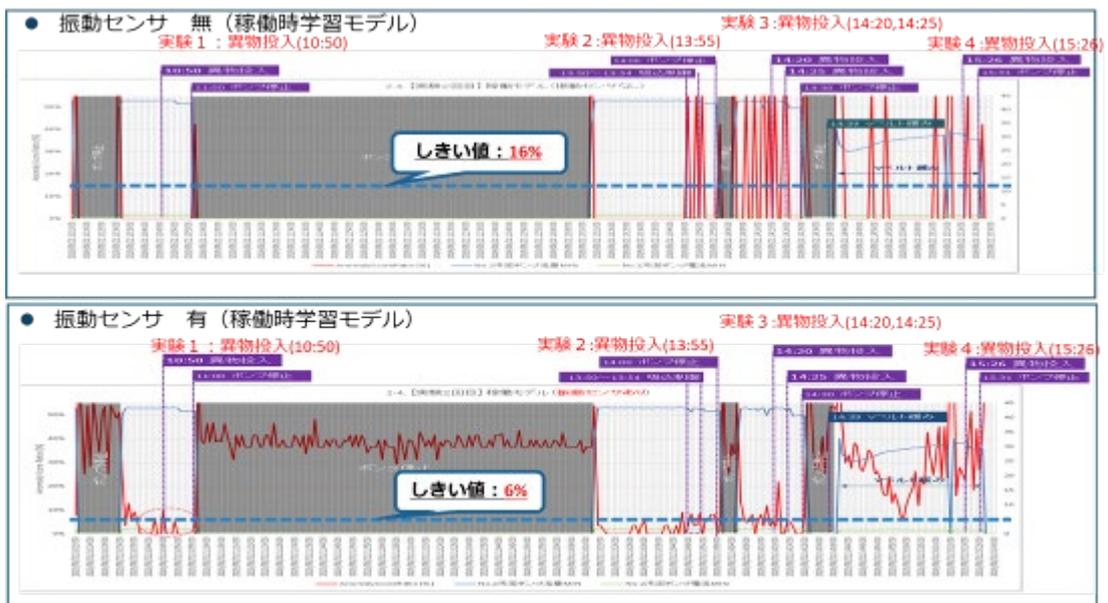


図資 1-65 間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの異物詰まり評価結果

### 3-2) 振動センサの有無の比較評価結果

稼働時学習モデルの分析にて、振動センサの有無の評価結果を示す。振動センサを含めない場合、Anomaly Score の変動は一時的であり、異物詰まりの事象を捉えていると言いがたい。振動センサデータを含めた場合は、全ての異物投入に対して Anomaly Score の上昇が確認された。振動データを含めることで、異物詰まりの様な異常の検知が可能となった。

振動センサの有無の比較評価結果を図資 1-66 に示す。



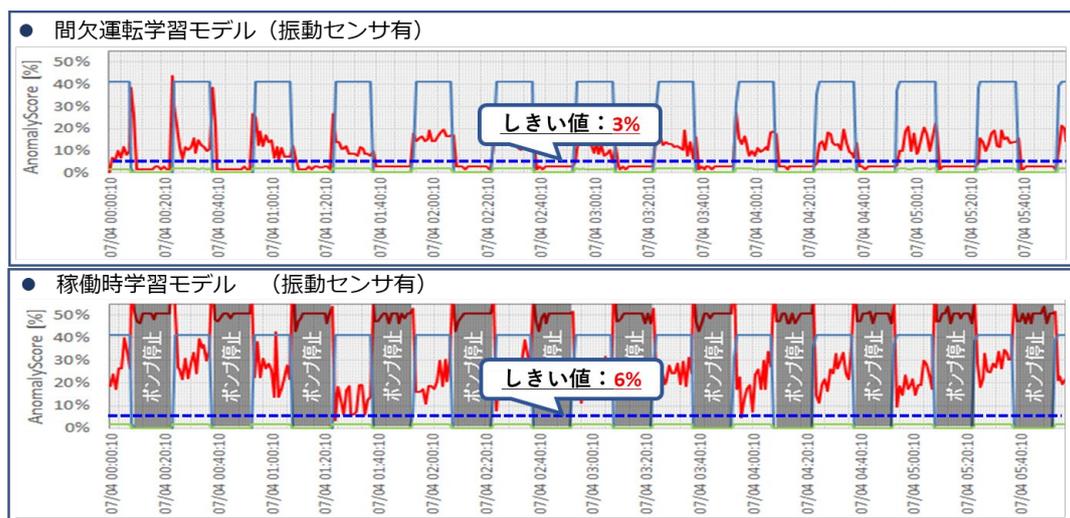
図資 1-66 振動センサ有無の異物詰まり評価結果 [稼働時学習モデル]

#### 4) 評価結果 (Vベルト緩み)

##### 4-1) 間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの比較評価

間欠運転学習モデルも稼働時学習モデルも、全てのポンプ稼働時において、Anomaly Score の高い上昇が確認され、Vベルトの緩み異常を検知できた。稼働時学習モデルはポンプ停止時の Anomaly Score が上昇する。稼働/停止をセンサデータで判断可能な仕組みを要する。

間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルの分析結果を図資 1-67 に示す。

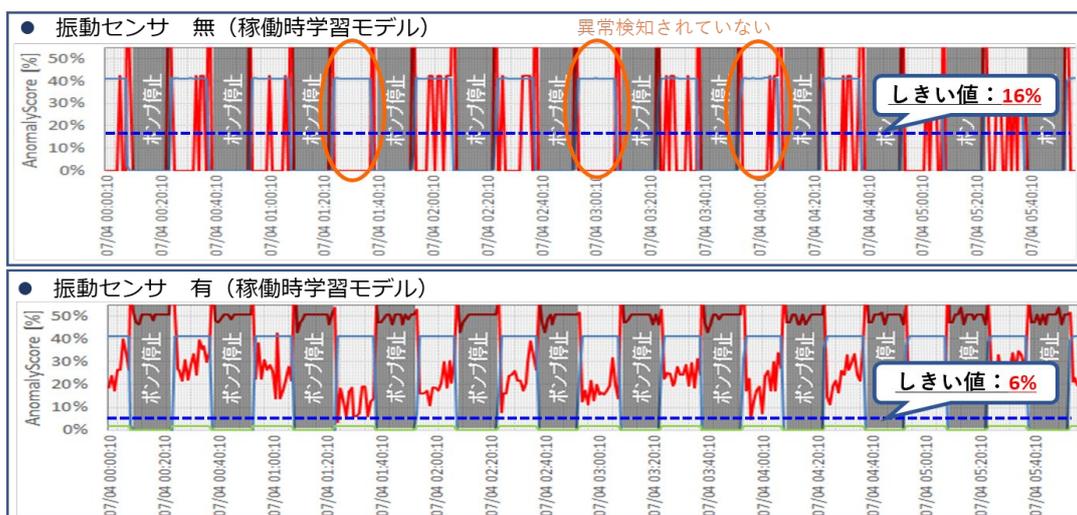


図資 1-67 間欠運転学習モデルと稼働時学習モデルのVベルト緩み検知評価結果

##### 4-2) 振動センサの有無の比較評価結果

稼働時運転モデルの分析にて、振動センサの有無の評価結果を示す。振動センサを含めない場合、Anomaly Score の上昇は一時的であり、検知されない事象が確認された。振動センサデータを含めた場合は、全てのポンプ稼働時において Anomaly Score の上昇が確認された。振動データを含めることで、異常検知の精度が高まると考える。

振動センサの有無の比較評価結果を図資 1-68 に示す。



図資 1-68 振動センサ有無のVベルト緩み検知評価結果 [稼働時学習モデル]

5) 評価結果の整理

振動センサ計測とインバリエント分析の組合せ技術は、し渣詰まりやVベルトの劣化等により細かい異常予兆を捉えることに有効な評価結果を得た。

表資 1-29 に異常再現実験の異常検知結果のまとめを示す。

表資 1-29 異常再現実験の検証結果のまとめ (2019 年度実証)

実証条件		稼働時学習モデル			間欠運転学習モデル		
実験内容	補足	振動センサのみ	インバリエントのみ	組合せ技術 (インバリエント+ 振動センサ)	振動センサのみ	インバリエントのみ	組合せ技術 (インバリエント+ 振動センサ)
Vベルトの劣化	4年間使用Vベルト	×	×	○	×	×	○
異物投入 詰まり異常 1回目	タオル投入	×	×	○	×	×	×
異物投入 詰まり異常 2回目	軍手投入	×	×	○	×	×	○
異物投入 詰まり異常 3回目	軍手 +小石投入	×	×	○	×	×	○
異物投入 詰まり異常 4回目	Vベルト緩み +異物投入	×	×	○	×	×	○
ポンプ停止	Anomalyscore上昇を 抑制できる場合は[○]	-	×	×	-	○	○

振動センサのみやインバリエント分析のみより、組合せ技術による高度化の効果が検知結果に見られる。

特に細かい異常まで捉えたい場合は、稼働時学習モデルが有効である。ただし、ポンプの停止時も Anomaly Score が上昇するため、ポンプの電流値や回転数等で、運転/停止を判断する機能の追加が必要である。ポンプの運転が判断できない場合は、電流値や回転数等を取得するセンサ及び収集機能を中央監視装置に追加することを推奨する。

ポンプの稼働/停止を現有のセンサデータで判断できない、及び収集機能の追加も困難な場合は、間欠運転学習モデルの適用を検討する。

## 1.5 簡易算定式算出根拠

### (1) 試算条件について

本ガイドラインにおける、簡易算定式の算出条件は以下とした。

1. 評価規模は現有処理能力 1 万 m<sup>3</sup>/日、5 万 m<sup>3</sup>/日、10 万 m<sup>3</sup>/日の下水処理施設とした。
2. 評価規模別の FS 試算対象となる設置機器台数は、調査結果（国総研調べ）を用いた。
3. 定期修繕周期および修繕・更新費用については、調査結果（国総研調べ）を用いた。
4. 標準更新周期については、事務連絡別表（国都下事第 77 号）の耐用年数表を用いた。
5. 突発故障頻度の低減率は守谷浄化センターの実績値をもとに算出した。
6. 監視・制御装置盤内のコントローラはすでに OPC 規格に準拠しているものとした。
7. 計装設備点検の対象機器台数は日高市浄化センターのセンサ数をもとにした。
8. 現有処理能力別に求めた数値を使って一次関数を求め、簡易算定式とした。

### (2) 建設費の算出について

建設費を算出するにあたり、全国下水処理場への調査結果をもとに 1 万 m<sup>3</sup>/日、5 万 m<sup>3</sup>/日、10 万 m<sup>3</sup>/日の現有処理能力別の下水処理場における平均的なポンプ・送風機等の機器台数を割り出し、必要となる装置や資材数量を見積り、一覧表とした。

現有処理能力別の建設費を表資 1-30 に示す。

表資 1-30 現有処理能力別の建設費

規模（現有処理能力）	1万m <sup>3</sup> /日			5万m <sup>3</sup> /日			10万m <sup>3</sup> /日		
	項目	数量	単位	金額（¥）	数量	単位	金額（¥）	数量	単位
オンライン振動収集装置（親局）	1	台	2,007,000	1	台	2,007,000	1	台	2,007,000
オンライン振動収集装置（子局 1）	6	台	5,670,000	6	台	5,670,000	1	台	945,000
オンライン振動収集装置（子局 2）	2	台	3,024,000	2	台	3,024,000	4	台	6,048,000
オンライン振動収集装置（子局 3）	0	台	0	1	台	2,106,000	3	台	6,318,000
オンライン振動収集装置（子局 4）	0	台	0	0	台	0	1	台	1,097,000
振動データ監視用 PC	1	式	3,131,000	1	式	3,131,000	1	式	3,131,000
振動センサ	80	ヶ	3,600,000	112	ヶ	5,040,000	164	ヶ	7,380,000
振動センサ延長ケーブル	80	本	760,000	112	本	1,064,000	164	本	1,558,000
振動センサ取付座	80	ヶ	80,000	112	ヶ	112,000	164	ヶ	164,000
振動測定装置試験調整費	1	式	1,680,000	1	式	2,352,000	1	式	3,444,000
振動センサ取付工事	1	式	1,680,000	1	式	2,352,000	1	式	3,444,000
オンライン測定装置設置工事	1	式	1,447,000	1	式	2,862,000	1	式	4,680,000
ビッグデータ分析装置	1	式	20,000,000	1	式	20,000,000	1	式	20,000,000
建設費合計（百万円）	1	式	<b>43.08</b>	1	式	<b>49.72</b>	1	式	<b>60.22</b>

(3) 維持管理費の算出について

表資 1-31 に示す維持管理費を算出するにあたり、振動センサの校正費（3年に1回）や、ビッグデータ分析装置の年間維持管理費（ライセンス費込み）、電気代等を計上している。

表資 1-31 現有処理能力別の維持管理費(年間)

項目	数量	単位	単価(¥)	金額(¥)	備考	
現有処理能力17m <sup>3</sup> /日	振動センサ校正(3年に1回実施)	1	式	200,000	200,000	1回60万円としたときの年価
	ビッグデータ分析装置	1	式	6,000,000	6,000,000	ビッグデータ分析エンジンライセンス料
	年間維持管理費					インバリエント分析保守費(ハード)
						異種混合学習分析費(年1回)
	クライアントPC関連更新費	1	式	625,000	625,000	年価費用
	オンライン測定装置電気代	8,760	kWh	15	131,400	測定装置他9台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
	ビッグデータ分析装置電気代	6,132	kWh	15	91,980	OPCサーバ7台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
維持管理費合計(百万円/年)	1	式		7.05		
現有処理能力15m <sup>3</sup> /日	振動センサ校正(3年に1回実施)	1	式	253,333	253,333	1回76万円としたときの年価
	ビッグデータ分析装置	1	式	6,000,000	6,000,000	ビッグデータ分析エンジンライセンス料
	年間維持管理費					インバリエント分析保守費(ハード)
						異種混合学習分析費(年1回)
	クライアントPC関連更新費	1	式	625,000	625,000	年価費用
	オンライン測定装置電気代	9,636	kWh	15	144,540	測定装置他10台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
	ビッグデータ分析装置電気代	6,132	kWh	15	91,980	OPCサーバ7台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
維持管理費合計(百万円/年)	1	式		7.11		
現有処理能力10m <sup>3</sup> /日	振動センサ校正(3年に1回実施)	1	式	340,000	340,000	1回102万円としたときの年価
	ビッグデータ分析装置	1	式	6,000,000	6,000,000	ビッグデータ分析エンジンライセンス料
	年間維持管理費					インバリエント分析保守費(ハード)
						異種混合学習分析費(年1回)
	クライアントPC関連更新費	1	式	625,000	625,000	年価費用
	オンライン測定装置電気代	9,636	kWh	15	144,540	測定装置他10台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
	ビッグデータ分析装置電気代	6,132	kWh	15	91,980	OPCサーバ7台の各消費電力を100Wとして、15円/1kWで試算
維持管理費合計(百万円/年)	1	式		7.20		

(4) 導入効果の算出について

導入効果は、表資 1-32 に示す4つの「導入効果シナリオ」から構成されている。

導入効果シナリオ①は、定期的に行われていた修繕工事や機器更新工事の実施周期を、機器の状態を監視しながら延伸することで得られる費用効果を計上した。導入効果シナリオ②は、異常振動を検知したことで突発故障を防止したことによる費用削減費を計上している。導入効果シナリオ③は、計装設備点検の実施項目を約70%削減したときの費用削減費を計上している。導入効果シナリオ④は、

人の手で行っていた振動測定をオンラインで自動測定したときの人件費の削減費を計上している。

この4つの「導入効果シナリオ」を使って経費回収年を算出している。

表資 1-32 導入効果シナリオ

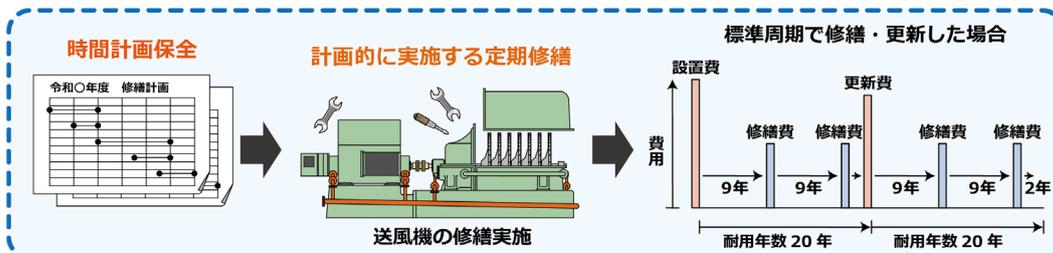
評価項目	評価指標	達成状況
【導入効果シナリオ①】 修繕・更新の周期延伸	守谷実績値 (毎年データ更新) 〔FS上、この技術の効果を測定するため設定した率〕	全国調査結果の修繕周期の1.2倍 延伸確認 標準耐用年数の更新周期の1.1倍 延伸確認
【導入効果シナリオ②】 突発故障の削減効果	守谷実績値 (H27~R1の実績を集計) 〔FS上、この技術の効果を測定するため設定した率〕	突発故障防止5.8% 検知確認 (振動値が要処置域に達した機器の割合)
【導入効果シナリオ③】 計装点検の周期延伸	日高実績値 (H30年度実績)	日高市浄化センターにおいて 計装設備点検の約70%分を延伸
【導入効果シナリオ④】 振動測定作業の代替効果	研究体検証 (H27年度実績)	1台あたり約15分の振動測定作業 時間を削減(移動時間含む)

(4) 導入効果シナリオ別の算出

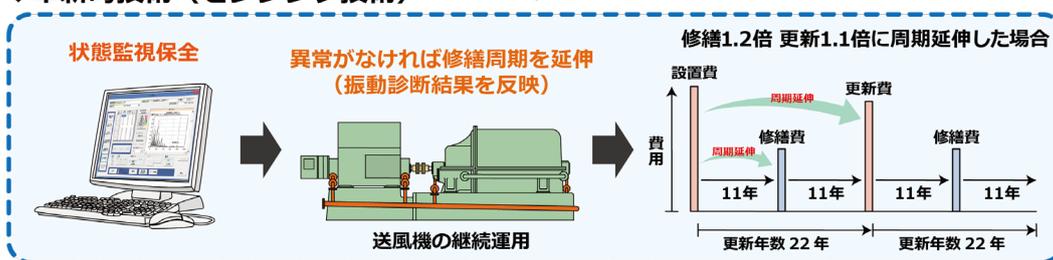
1) 導入効果シナリオ① 修繕・更新の周期延伸

定期修繕周期および更新周期の延伸効果イメージを図資 1-69 に、導入効果算出結果を表資 1-33 に示す。

◆従来技術



◆革新的技術（センシング技術）



図資 1-69 定期修繕周期および更新周期の延伸効果イメージ

表資 1-33 定期修繕周期延伸および更新周期延伸の導入効果算出結果

現処理能力1万m <sup>3</sup> /日	機種名	対象台数 (台)	標準更新周期 (年)	延伸更新周期 (年) 1.1倍	標準修繕周期 (年)	延伸修繕周期 (年) 1.2倍	標準修繕回数 (回)	延伸修繕回数 (回)	導入効果①合計 (百万円/年)
	汚水主ポンプ	4	15	17	8	10	1	1	
汚泥ポンプ	7	15	17	7	9	1	1		
脱臭ファン	2	10	11	3	4	2	2		
送風機	4	20	22	9	11	2	1		
遠心脱水機	2	15	17	7	9	1	1		
遠心濃縮機	1	15	17	6	8	2	1		
現処理能力5万m <sup>3</sup> /日	機種名	対象台数 (台)	標準更新周期 (年)	延伸更新周期 (年) 1.1倍	標準修繕周期 (年)	延伸修繕周期 (年) 1.2倍	標準修繕回数 (回)	延伸修繕回数 (回)	導入効果①合計 (百万円/年)
	汚水主ポンプ	4	15	17	8	10	1	1	
汚泥ポンプ	12	15	17	7	9	1	1		
脱臭ファン	4	10	11	3	4	2	2		
送風機	4	20	22	9	11	2	1		
遠心脱水機	2	15	17	7	9	1	1		
遠心濃縮機	2	15	17	6	8	2	1		
現処理能力10万m <sup>3</sup> /日	機種名	対象台数 (台)	標準更新周期 (年)	延伸更新周期 (年) 1.1倍	標準修繕周期 (年)	延伸修繕周期 (年) 1.2倍	標準修繕回数 (回)	延伸修繕回数 (回)	導入効果①合計 (百万円/年)
	汚水主ポンプ	6	15	17	8	10	1	1	
汚泥ポンプ	17	15	17	7	9	1	1		
脱臭ファン	7	10	11	3	4	2	2		
送風機	5	20	22	9	11	2	1		
遠心脱水機	3	15	17	7	9	1	1		
遠心濃縮機	3	15	17	6	8	2	1		

※対象機器台数及び標準修繕周期はH27年度国総研自治体アンケートから、標準更新周期は事務連絡別表の耐用年数表から算出しています

2) 導入効果シナリオ② 突発故障の削減効果

突発故障の削減効果イメージを図資 1-70 に、算出根拠とした数値の一覧を表資 1-34 に示す。

◆従来技術



◆革新的技術（センシング技術）



図資 1-70 突発故障の削減効果イメージ

表資 1-34 突発故障の削減による導入効果算出結果

機種名	(a)故障件数 (件/年)	(b)故障対応費 (M¥/件)	(c)故障対応人権費 (M¥/年)	(d)合計対応費 (M¥/年) a*b+c	(e)低減対応費 (M¥/年) d*率	導入効果②合計 (百万円/年)
現処理能力11万m3/日						0.14
汚水主ポンプ	0.160	2.9	0.004	0.468	0.027	
汚泥ポンプ	0.126	0.9	0.001	0.114	0.007	
脱臭ファン	0.052	0.2	0	0.010	0.001	
送風機	0.160	2.4	0.003	0.387	0.022	
遠心脱水機	0.214	6	0.002	1.286	0.075	
遠心濃縮機	0.094	2	0.001	0.189	0.011	
現処理能力15万m3/日						0.16
汚水主ポンプ	0.160	2.9	0.009	0.473	0.027	
汚泥ポンプ	0.216	0.9	0.005	0.199	0.012	
脱臭ファン	0.104	0.2	0.006	0.027	0.002	
送風機	0.160	2.4	0.007	0.391	0.023	
遠心脱水機	0.214	6	0.007	1.291	0.075	
遠心濃縮機	0.188	2	0.012	0.388	0.023	
現処理能力10万m3/日						0.24
汚水主ポンプ	0.240	2.9	0.017	0.713	0.041	
汚泥ポンプ	0.306	0.9	0.008	0.283	0.016	
脱臭ファン	0.182	0.2	0.005	0.041	0.002	
送風機	0.200	2.4	0.009	0.489	0.028	
遠心脱水機	0.321	6	0.009	1.935	0.112	
遠心濃縮機	0.282	2	0.033	0.597	0.035	

※故障件数、故障対応費、故障対応人件費はH27年度国総研自治体アンケートの結果を採用しています

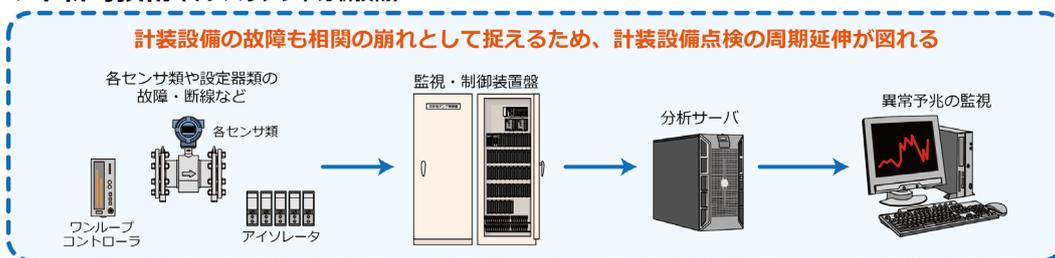
3) 導入効果シナリオ③ 計装点検の周期延伸

計装設備点検周期の延伸効果イメージを図資 1-71 に、算出根拠とした数値の一覧を表資 1-35 に示す。

◆従来技術



◆革新的技術 (インバリエント分析技術)



図資 1-71 計装設備点検周期の延伸効果イメージ

表資 1-35 計装設備点検周期の延伸による導入効果算出結果

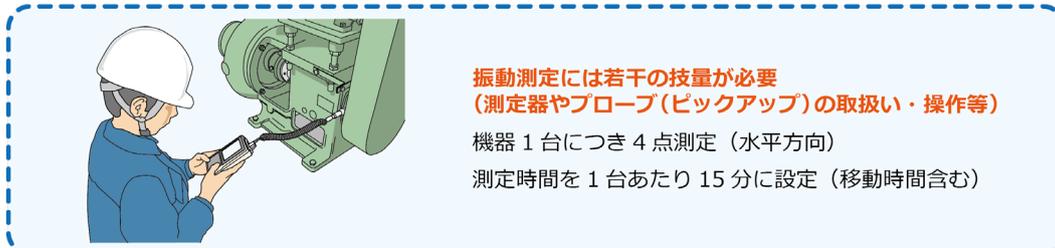
規模 (現有処理能力)	1万m <sup>3</sup> /日	5万m <sup>3</sup> /日	10万m <sup>3</sup> /日
計装設備点検費	4,000,000	6,000,000	13,000,000
計装設備点検削減率	72%	72%	72%
計装設備点検削減額	2,880,000	4,320,000	9,360,000
2年に1回実施時の点検費	1,440,000	2,160,000	4,680,000
導入効果④合計 (百万円/年)	<b>1.44</b>	<b>2.16</b>	<b>4.68</b>

※計装設備点検費はH28年度国総研自治体アンケートの結果を、計装設備点検削減率は日高市浄化センターでの研究成果を採用しています

4) 導入効果シナリオ④ 振動測定作業の代替効果

振動測定作業の代替効果イメージを図資 1-72 に、算出根拠とした数値の一覧を表資 1-36 に示す。

◆従来技術



◆革新的技術



図資 1-72 振動測定作業の代替効果イメージ

表資 1-36 振動測定作業の代替効果による導入効果算出結果

規模 (現有処理能力)	1万m <sup>3</sup> /日	5万m <sup>3</sup> /日	10万m <sup>3</sup> /日
オンライン対象台数	20	28	41
測定時間/台 (h)	0.25	0.25	0.25
測定回数/年	12	12	12
人工単価 (¥/日)	18,000	18,000	18,000
標準勤務時間 (h/日)	8	8	8
直接業務費 (¥/年)	135,000	189,000	276,750
技術経費 (10%)	13,500	18,900	27,675
間接経費 (23.5%)	31,725	44,415	65,036
測定業務小計 (¥/年)	180,225	252,315	369,461
諸経費 (17.83%)	32,134	44,988	65,875
測定業務合計 (¥/年)	212,359	297,303	435,336
導入効果⑤合計 (百万円/年)	<b>0.21</b>	<b>0.30</b>	<b>0.44</b>

※測定時間 (移動時間も含む) は守谷浄化センターでの実測値です。また、人件費は電工単価平均、諸経費等は下水道施設維持管理積算要領-終末処理場・ポンプ場施設編-より算出しています