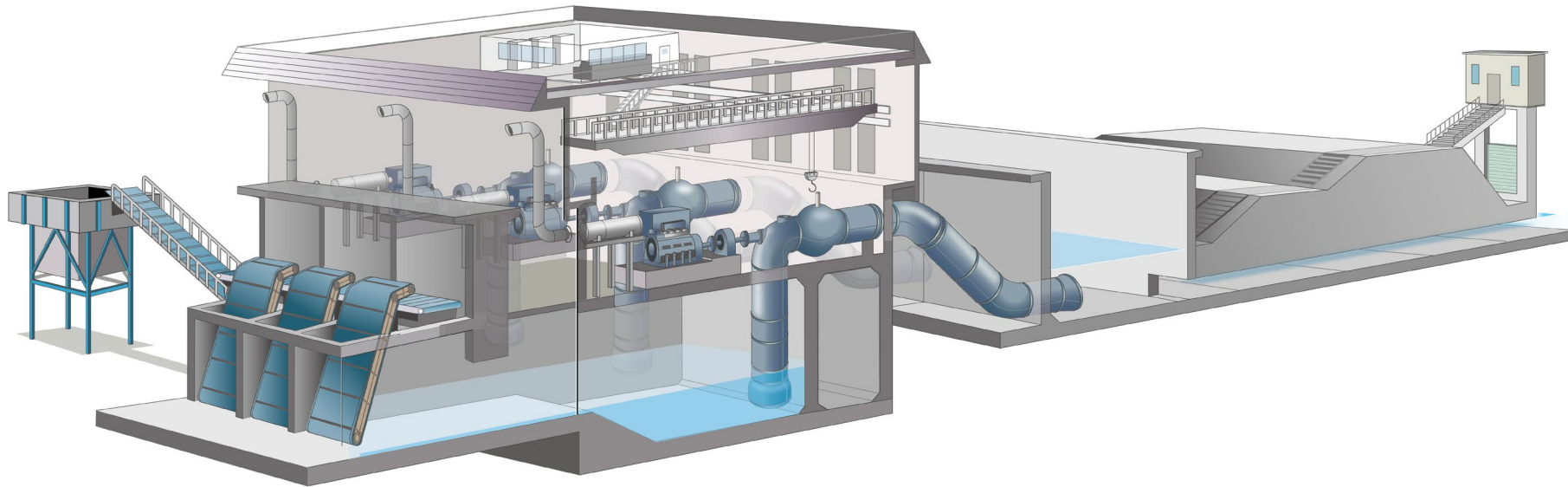


ここまで再現できる！排水機場のデジタルツイン



国立研究開発法人 土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主任研究員 平地 一典

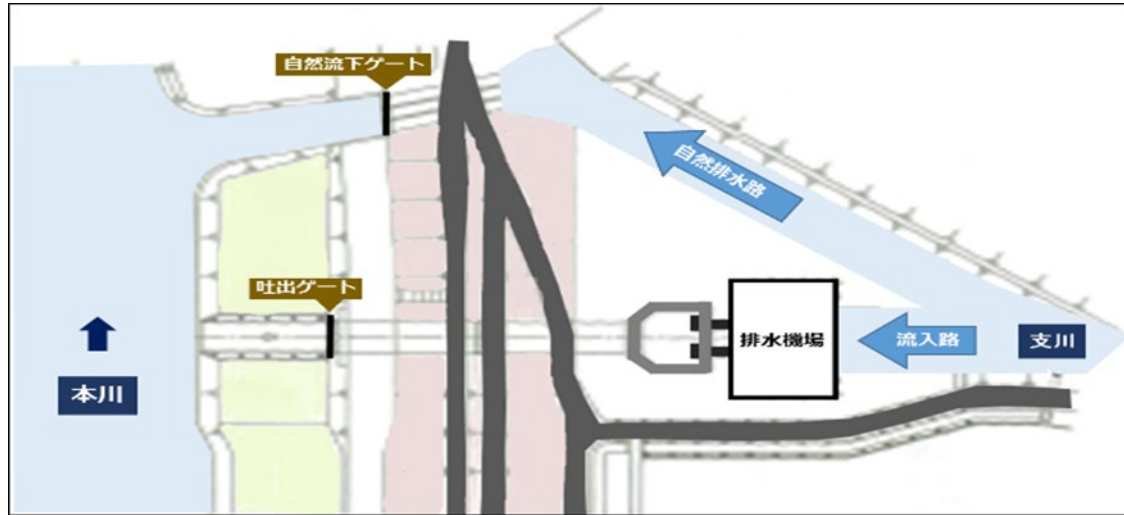
本日の発表内容

1. はじめに
2. 排水機場とは
3. 異常検知システム
4. デジタルツイン技術
5. 排水機場のデジタルツインモデルの構築
6. 小型ポンプのデジタルツインモデル
7. まとめ

排水機場の現状

- 排水機場は、洪水被害の軽減を目的にした重要な社会基盤設備であるが、
 - 設置後4,50年経過による老朽化
 - 近年の気候変動による稼働頻度の急増
 - それに伴う不具合リスクの増大
 - 高齢化や若手技術者不足による熟練技術者の減少
- 著しい進歩を遂げるAIやIoT技術を用いて、設備管理の高度化、省人化を目指す取組を実施
 - 単なる人減らしではない！ 貴重な人的資源を効率的に活用

排水機場ポンプ設備の概要



排水機場ポンプ設備施設全体図

排水機場ポンプ設備の役割

大雨による本川水位上昇



支川への逆流回避

自然流下ゲート閉



支川の内水氾濫回避

排水機場のポンプ力で
支川水を本川側に排水

ポンプ設備の機械構成

○原動機

- ・ディーゼル機関
- ・ガスタービン

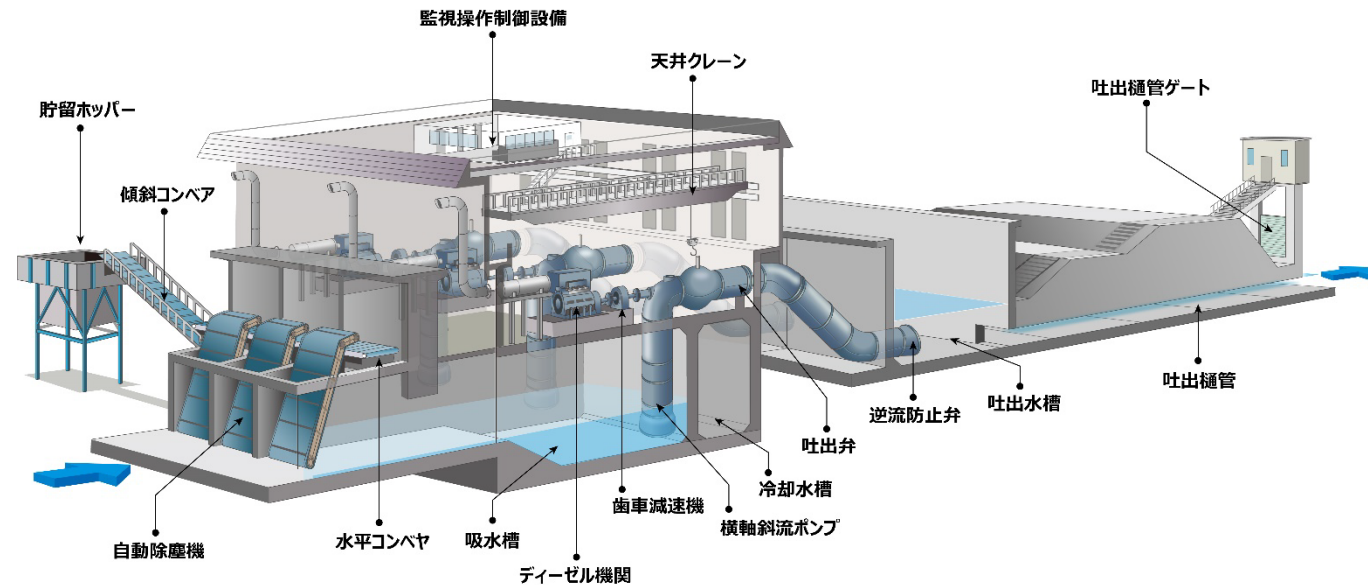
○伝達装置

- ・歯車減速機
- ・伝動軸

・軸受

○主ポンプ

- ・主軸、軸受、羽根車



排水機場ポンプ設備 ディーゼル横軸ポンプの事例

排水機場ポンプ設備の特徴

「常用」と「非・常用」設備

- 工場プラントや発電設備等、連日定期的に稼働する「常用設備」
- 一方、水門設備や排水機場等の河川用機械設備は稼働が不規則である「非・常用設備」

非常用設備の特徴

- 不稼働期間も長く、稼働時間は天候に左右され不規則である。
- 重要な社会基盤設備であり、代替設備がほとんどないため故障が許されず、異常データの入手が困難である。
- 設置場所の条件により、設備の形式が様々であり、納入メーカーによって設備の仕様も違う。
- 点検時に実施される管理運転は、運転時間や吐出量等の運転条件が設置場所により様々である。



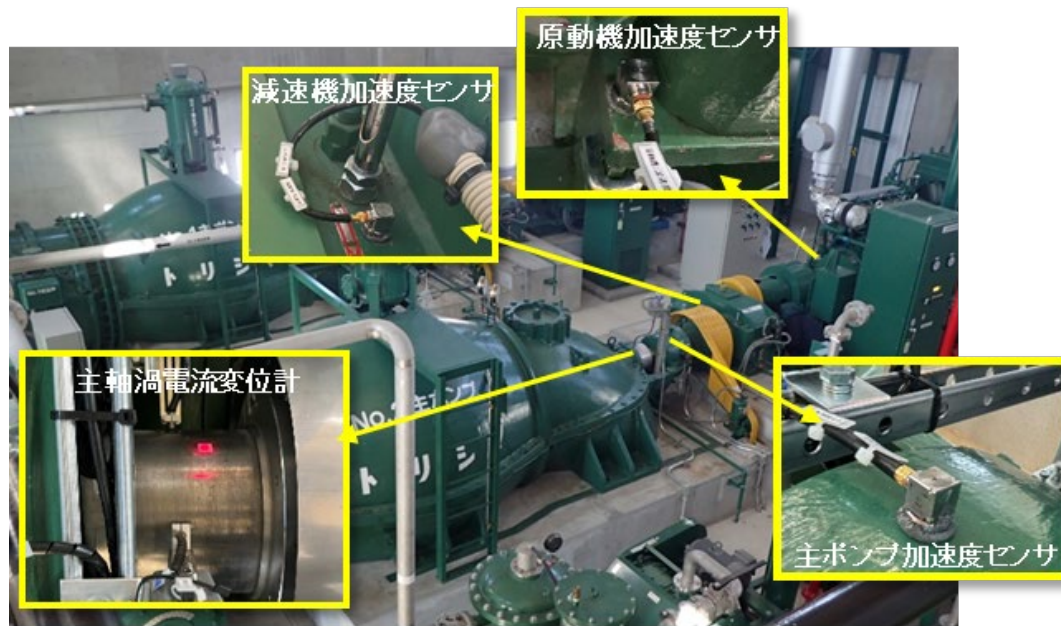
● 診断のための計測データやAIを利用するための教師データ等が不足

異常検知システムの構築

実排水運転時の運転データを連続的に自動取得し、そのデータを基にAIを用いた異常検知システムの試作を行っている。

◎ 状態監視モニタリングシステム + AIによる状態監視診断システム

= 異常検知システム



状態監視モニタリングシステム



設置場所

AIを活用した設備異常検知システムの試作

異常の種別

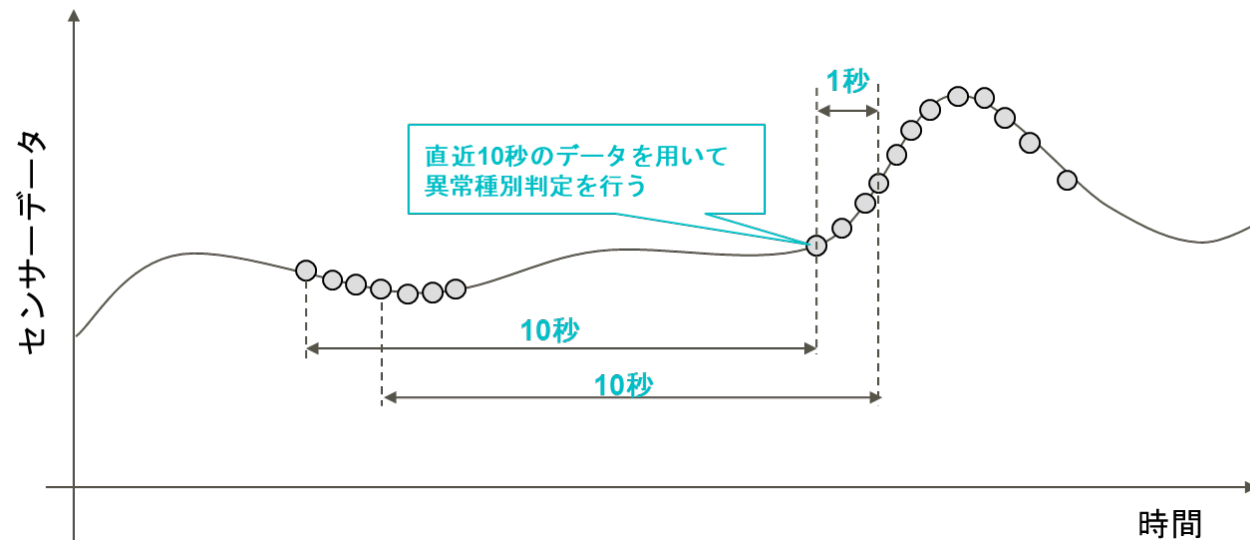
異常の種類を判別するため**教師あり学習**による「**分類**」タスクを適用

- 時系列データの分類タスクのアルゴリズムとして、RandomForest、BOSS (Bag of SFA Symbols)、RNN (Recurrent Neural Network) がある。

一方、**FFT変換による特徴量データ**が分類には有利と判断。

Random Forestを採用 (比較的精度が高く、GPUなどのアクセラレーションがなく、学習・推論速度が速い)

→**異常種別判定のタイミング**は、1秒毎に直近10秒間のデータにより分類を行うよう設定



AIを活用した設備異常検知システムの試作

● 異常種別分類モデルの学習手順

実際の異常の教師データの取得が困難であることから
→ 当該設備の正常データから疑似異常データ(異常標本データ)を生成



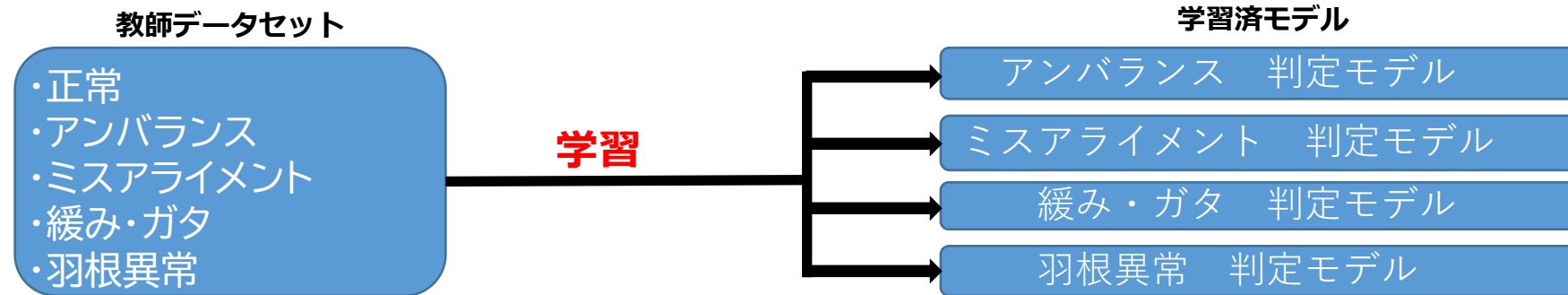
各種の異常標本データを教師用データセットとして用意



疑似異常データで学習

各種異常の学習済モデルの構築

● ポンプ主軸異常の学習事例



- 異常種別分類モデル学習には、各異常の教師データが必要
- 当該異常が別の異常と判定しないよう全ての異常教師データを用いた学習が必要

異常データの生成

AIモデルの精度向上

- AIモデルを基にした異常検知システムの精度向上には、なるべく多くの正常データや故障時データをAIモデルに学習させる必要がある。

学習用データ

- 現在の異常検知システムでは、正常データに振動理論等から考えられる異常を人為的に付与することで、疑似異常データを作成し、学習データとしている。

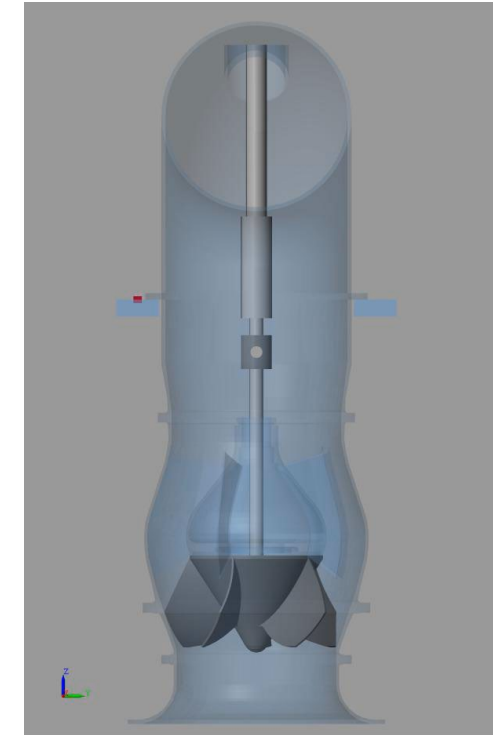
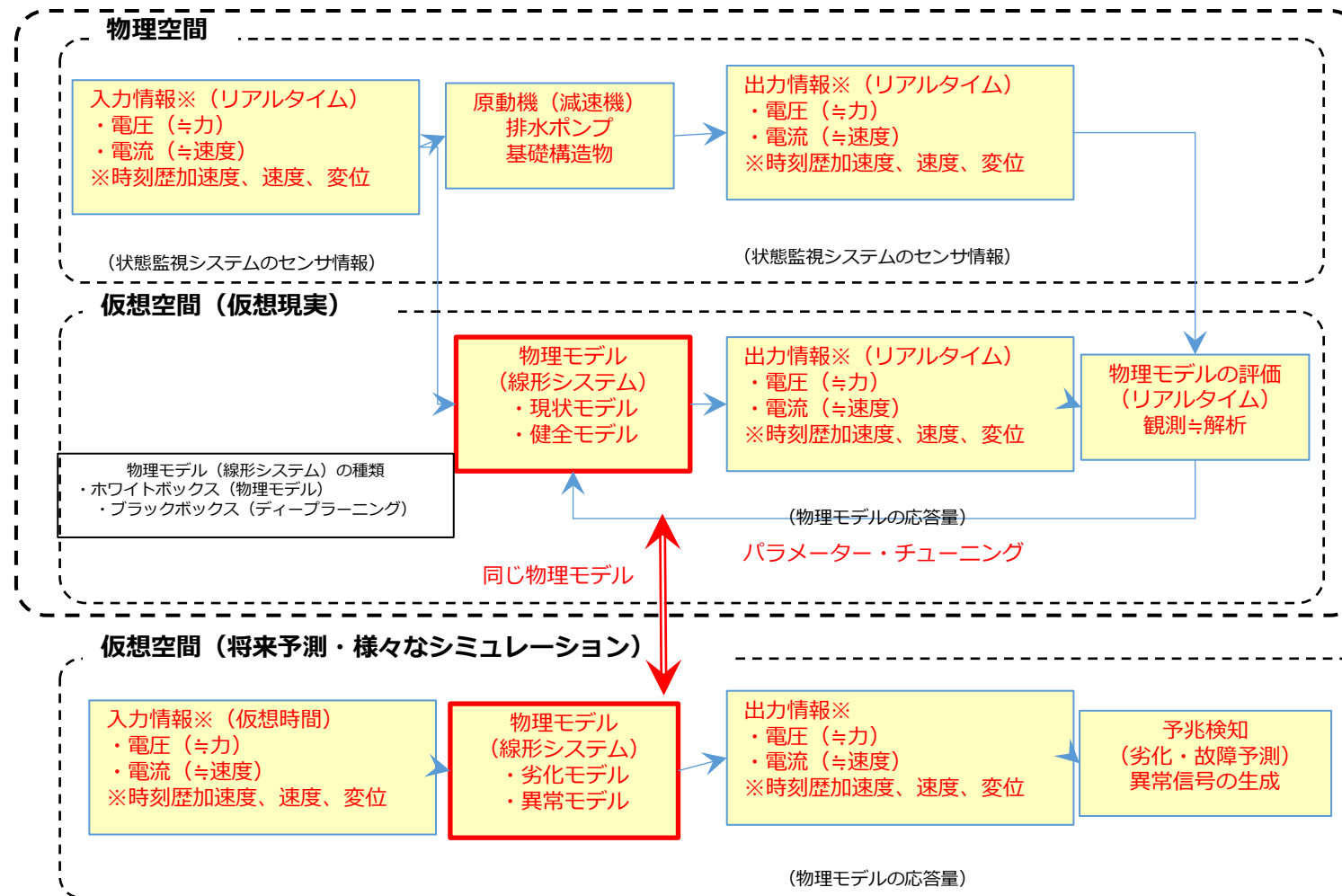
→異常後の結果のみ反映、異常に至る時系列データは未知。



●実機での故障再現は困難。デジタル空間上であれば、様々なシミュレーションが比較的容易に実施可能

デジタルツイン技術

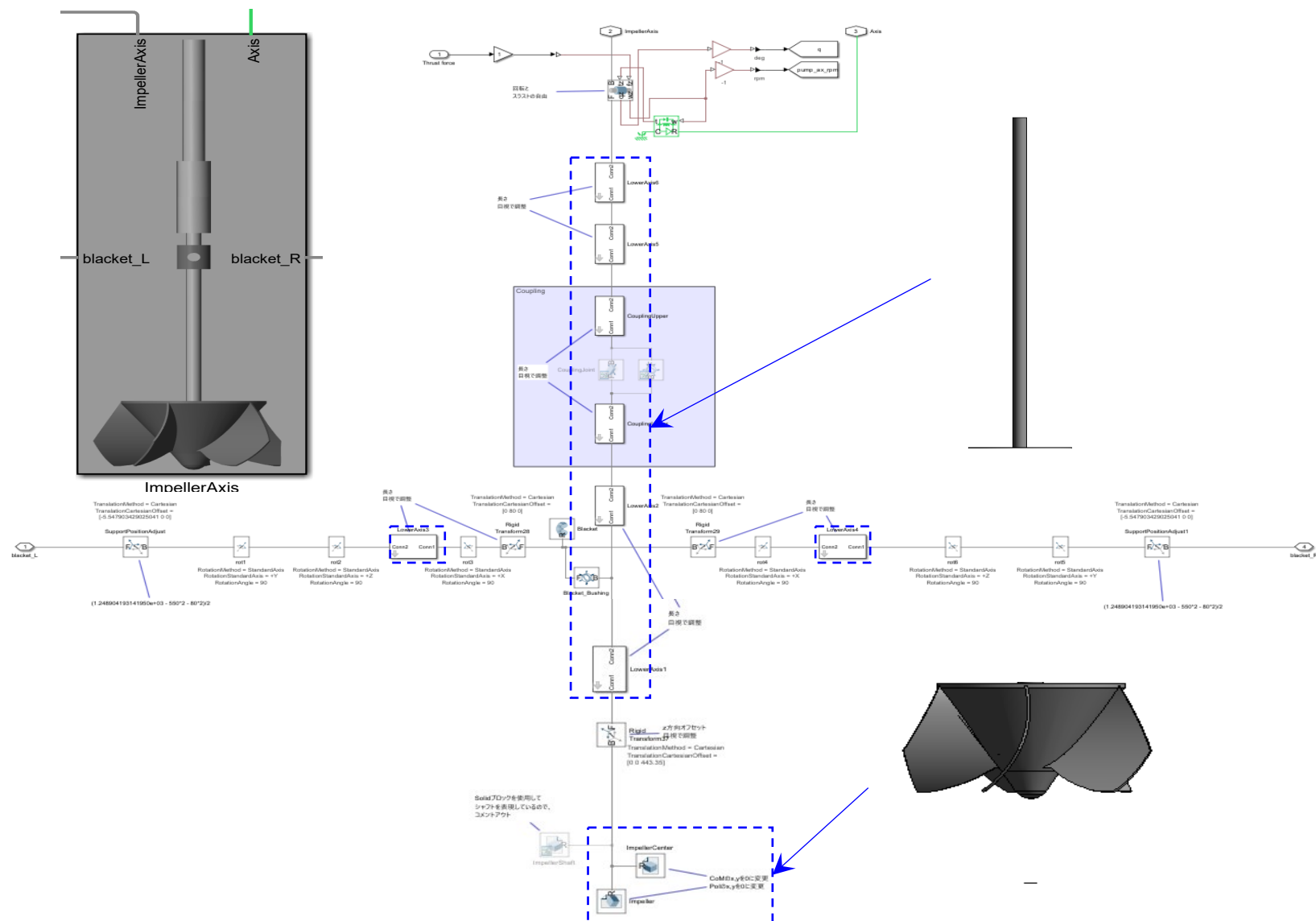
モニタリングシステムで計測したデータを入力値、および出力値とした排水機場のデジタルツインモデルの構築方法を検討した。



主ポンプモデル

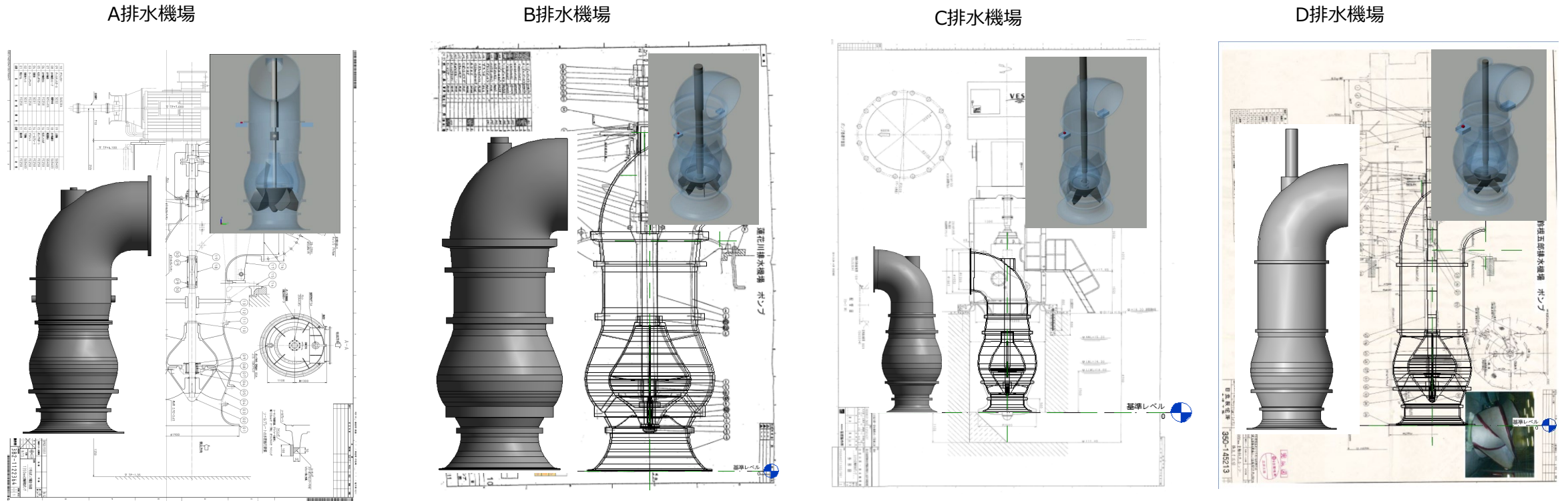
部分モデルの構築

- ## ●パーツ毎にモデルを作成し、つなぎ合わせて全体を構築



排水機場におけるデジタルツイン技術の検討

● デジタルツインモデルの構築

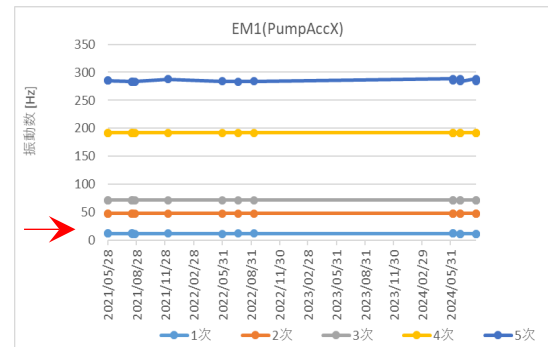
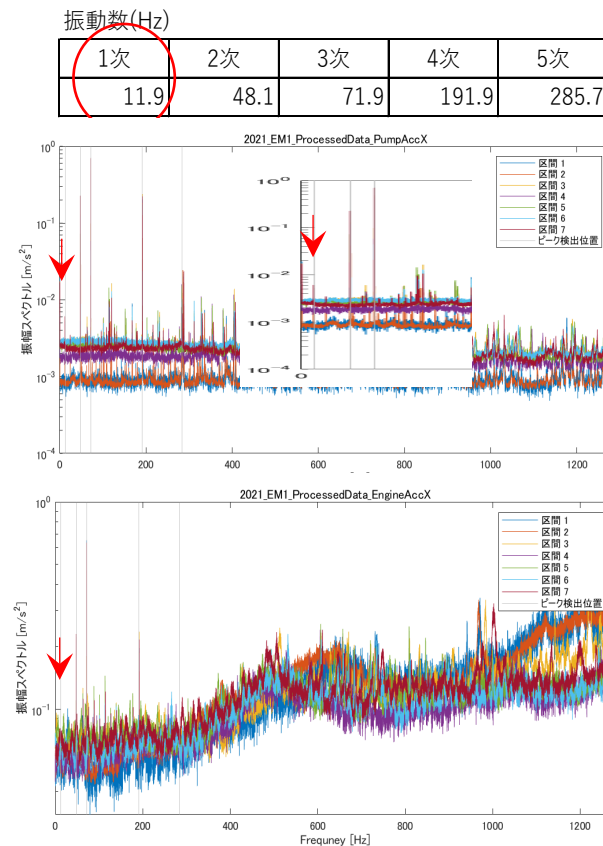


排水機場におけるデジタルツイン技術の検討

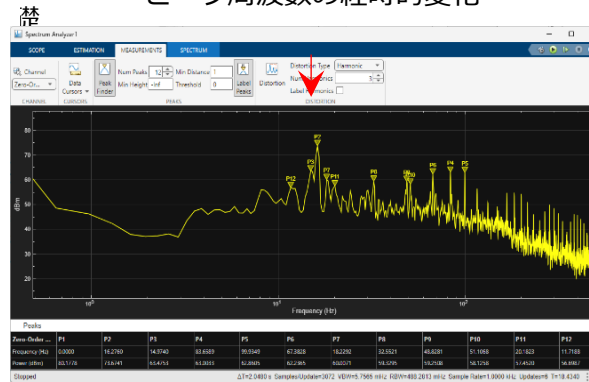
● デジタルツインを用いたシミュレーションの試行

デジタルツインモデルのパラメータチューニング

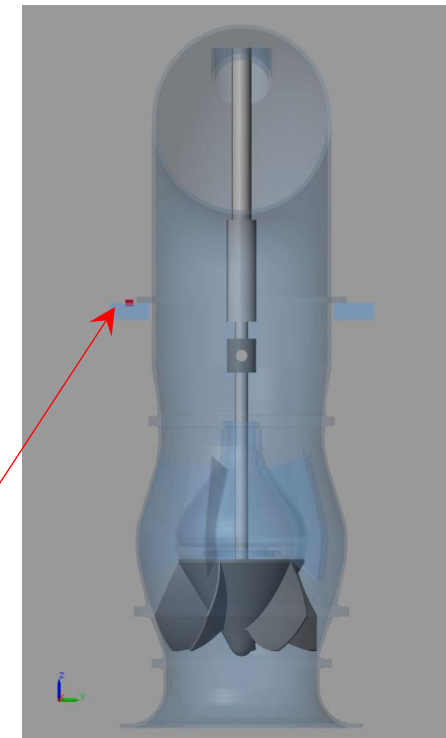
(1) A排水機場の特徴量 (2) パラメータチューニング



ピーク周波数の経時的変化



デジタルツイン上の加速度波形

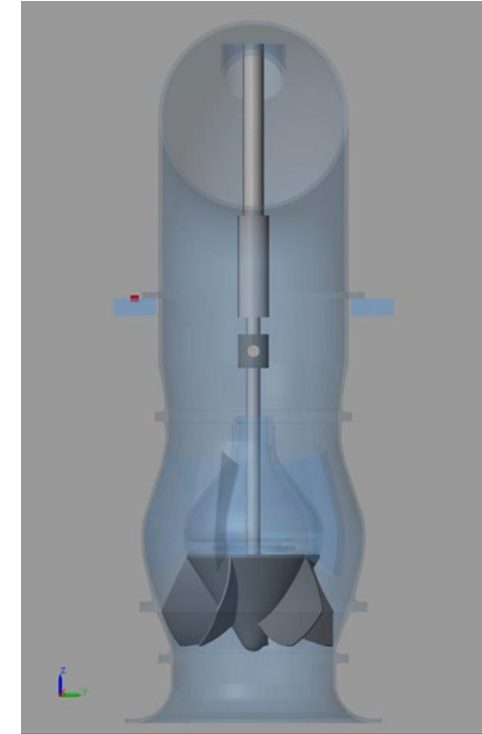


デジタルツイン・変位動画
(A排水機場)

デジタルツインの再現性



≠



- ある時点での挙動を再現したに過ぎない！

- 実機での異常再現は設備の特性上不可能。

→そこで、分解や加工が比較的易しい、小型ポンプで比較検証

小型ポンプによる異常発生試験

実験で用いた小型ポンプ、電動機的主要仕様を示す。

ポンプ仕様

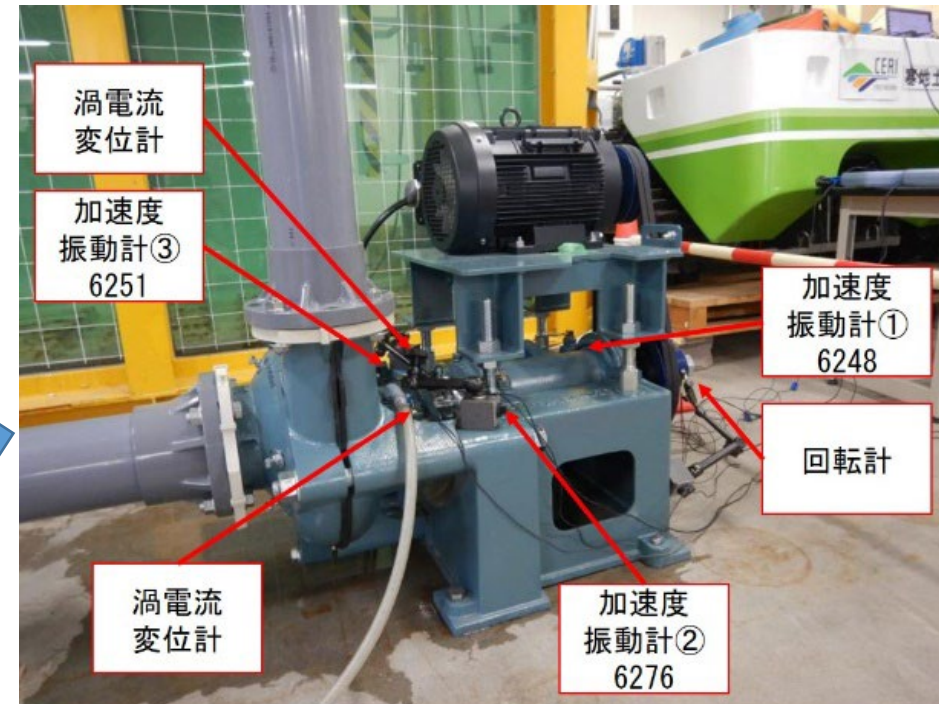
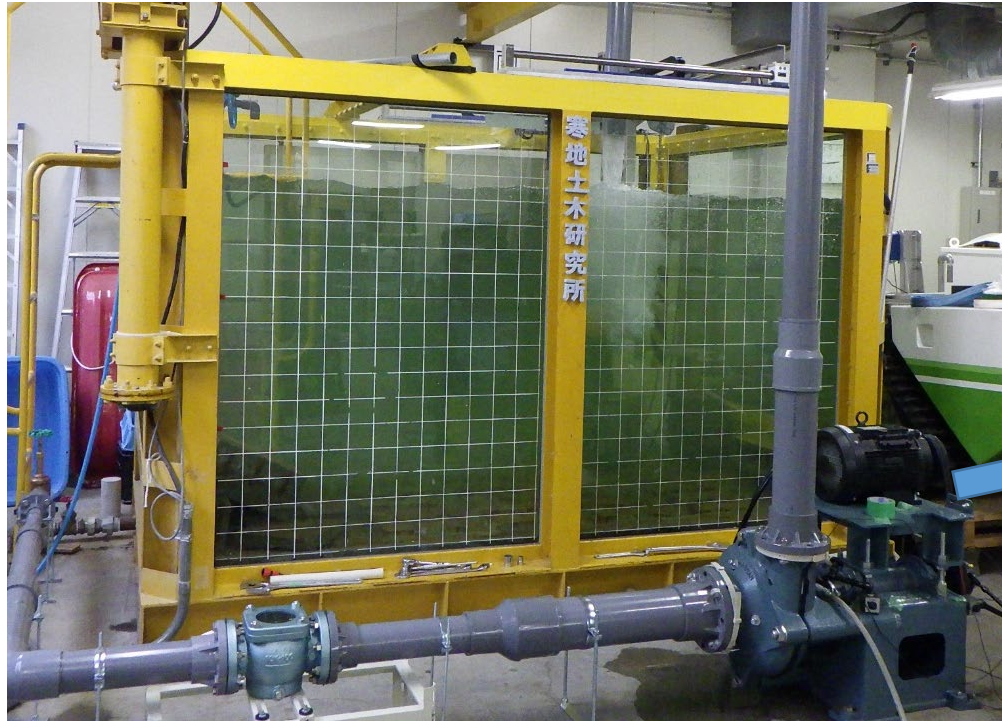
製造会社	太平洋機工株式会社
形式	片吸込渦巻ポンプ
駆動方式	Vベルト駆動
吸込口径	150 mm
吐出口径	100 mm
吐出量	0.83 m ³ /min
全揚程	10 m
定格回転数	830 min ⁻¹
使用流体	水
羽根車形状	セミオープン

電動機仕様

製造会社	株式会社東芝
型式	全閉外扇屋外形
電動機出力	7.5 kW
極数	4 P
電源周波数	50 Hz
電圧	200 V

人力での分解や改造が容易な、汚泥用のスラリーポンプを選定した。

小型ポンプによる異常発生試験



- 室内の大型水槽を利用して、小型ポンプでの異常再現試験を実施
- 振動や軸変位を計測し、小型ポンプのデジタルツインモデルを構築。モデルでの再現性を検証

小型ポンプによる異常発生試験

- 正常状態に加えて以下の異常状態における振動を計測した。
また、右に示す試験ケースについて計測を実施した。

異常種別	再現方法
ア. 羽根車異常パターン①	羽根車の1枚を半分ほど切断して破損させる。
イ. 羽根車異常パターン②	①とは別の羽根1枚を半分ほど切断
ウ. 羽根車異常パターン③	①で切断した羽根をさらに切断
エ. 主軸破損	主軸表面をドリルで2箇所切削する。
オ. ベアリング異常パターン①	ベアリングの隙間にパーツクリーナーを吹きかけ、可能な限りでグリスを除去する。
カ. ベアリング異常パターン②	ベアリングの隙間に切粉を混入させる。

ケース番号	センサ位置	ポンプの状態	備考
01	①	衝撃試験	
02	①	正常状態	
03	①	羽根車破損パターン①	
04	②	羽根車破損パターン①	
05	②	正常状態	
06	①	羽根車破損パターン②	
07	②	羽根車破損パターン②	
08	②	主軸破損	
09	①	主軸破損	振動計①、②のデータなし
10	①	羽根車破損パターン③、主軸破損	
11	②	羽根車破損パターン③、主軸破損	
12	①	主軸破損、ベアリング破損パターン①	
13	②	主軸破損、ベアリング破損パターン①	
14	①	主軸破損、ベアリング破損パターン②	
15	②	主軸破損、ベアリング破損パターン②	

●羽根車異常

羽根車4枚中1枚を半分程度切断
正常11.86kg → 異常①11.68kg (切断部位 : 0.18kg)



羽根車異常を再現するため、一部、羽根を切断。

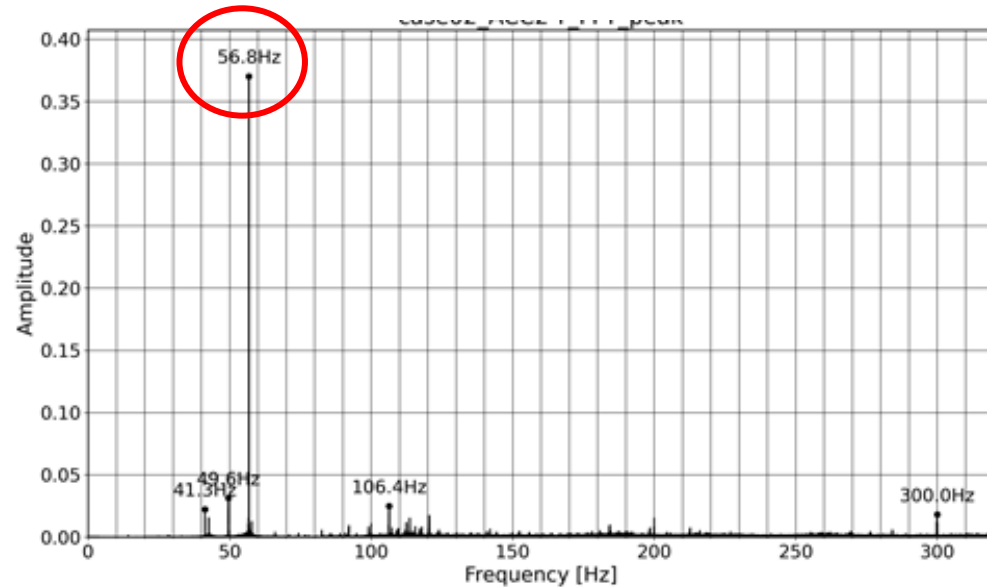
※実際の機場では、一気にこれだけ破損することはないが、異常になった状態を再現するため、人為的に切断した。

FFT解析結果

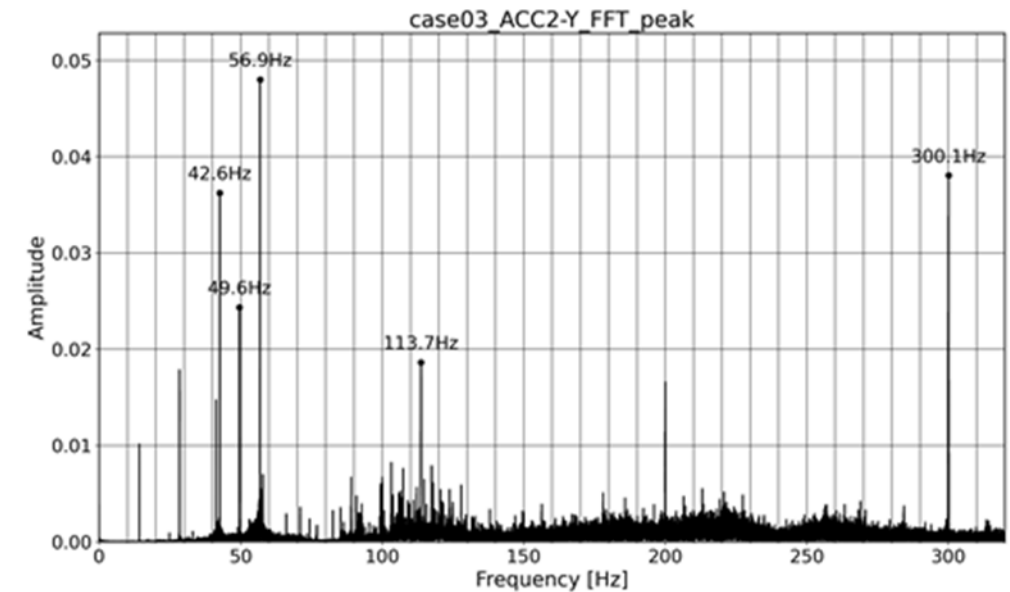
- 各ケース振動データを周波数解析し、モデルに取り込む振動特性を分析した。

たとえば、

- 回転周波数 $852\text{Hz}/60 = 14.2\text{Hz}$ の羽根枚数 $\times 4$ 枚 = 56.8Hz の卓越周波数解析から特徴量を抽出し、モデルに反映

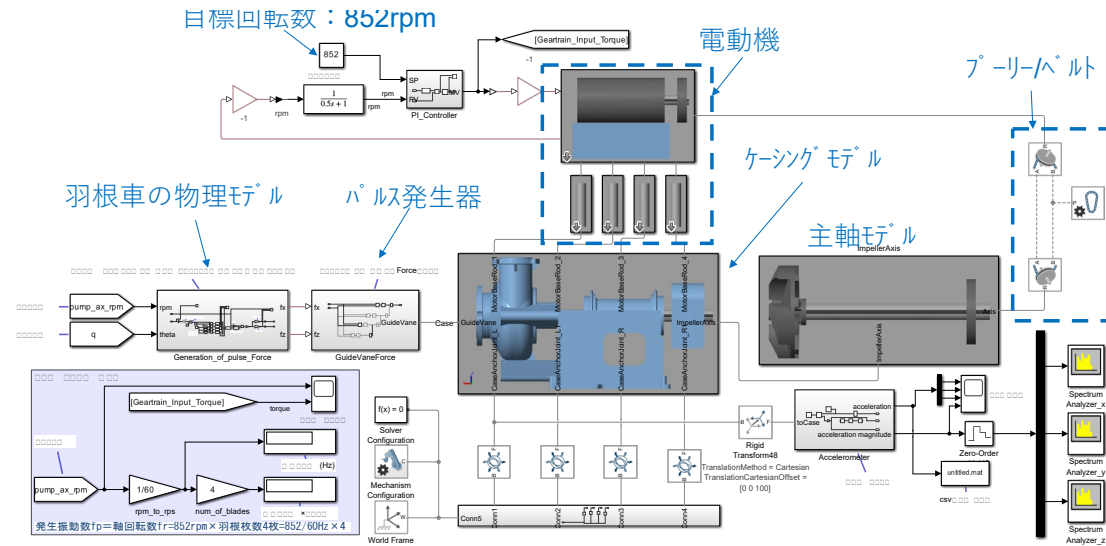


羽根車異常

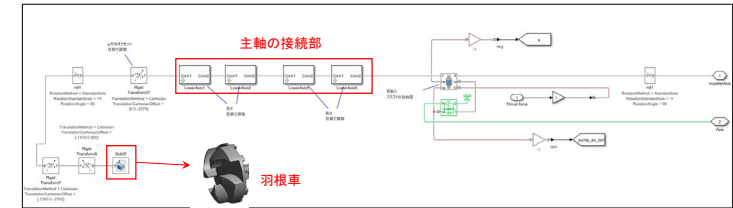


正常状態

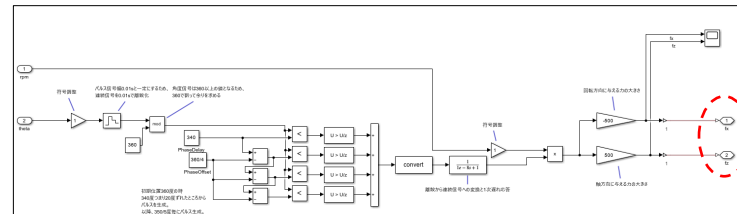
小型ポンプのデジタルツインモデル



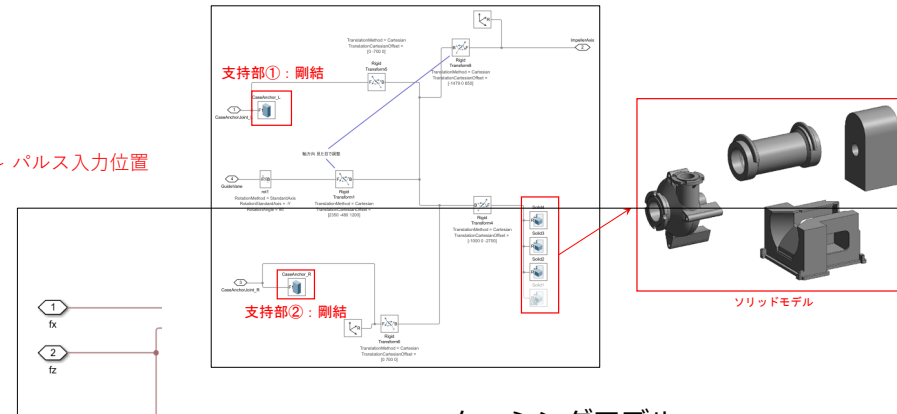
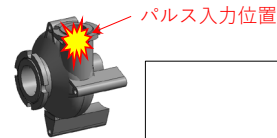
デジタルツインモデル（全体図）



主軸モデル



羽根車の物理モデル

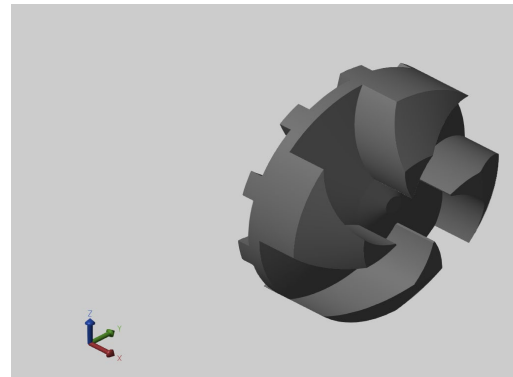


ケーシングモデル

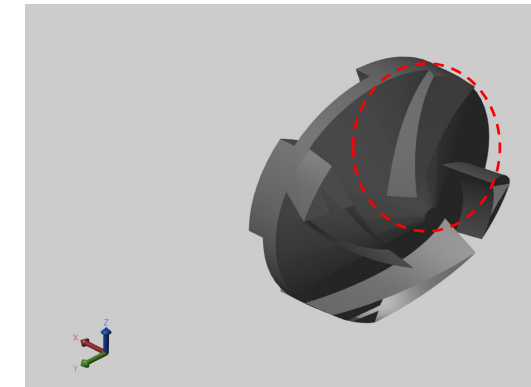
羽根車モデルの構築

羽根車4枚中1枚を半分程度切断
正常11.86kg → 異常①11.68kg (切断部位: 0.18kg)

- 実機を3D化し、モデル化
- 重心位置に対する偏心量をモデルに付与



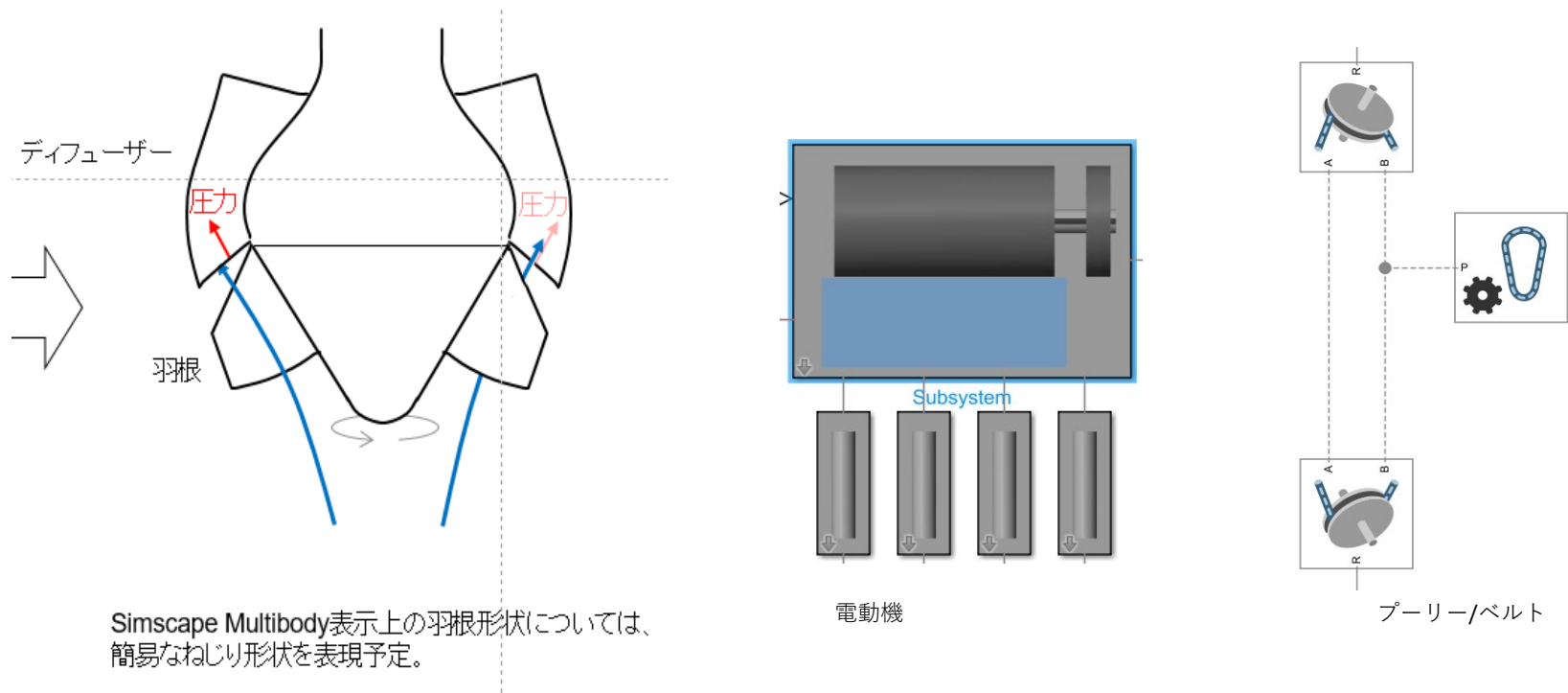
正常状態



羽根異常状態

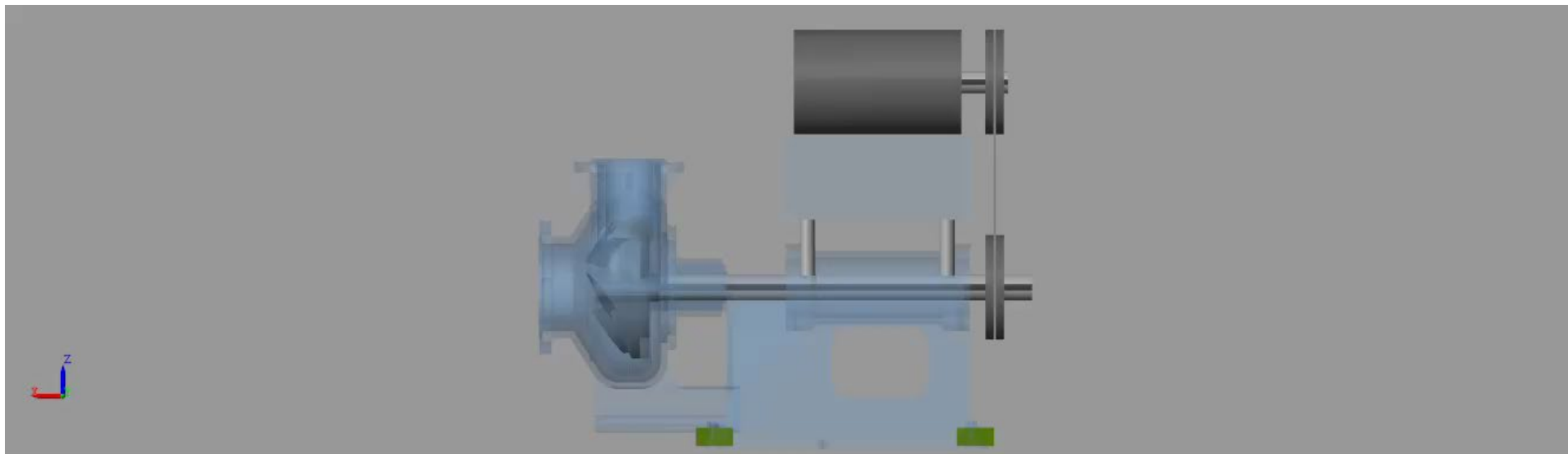
物理モデル

本件等では検討した物理モデルの項目としては、回転数、主軸及び羽根車抵抗、加速度、部材等とし、回転する羽根車の水圧抵抗については、羽根とディフューザーが接触（最接近）するタイミングで衝撃振動（全方向のパルス振動）を発生させる関数を構築することによって簡易的なモデル化を行った



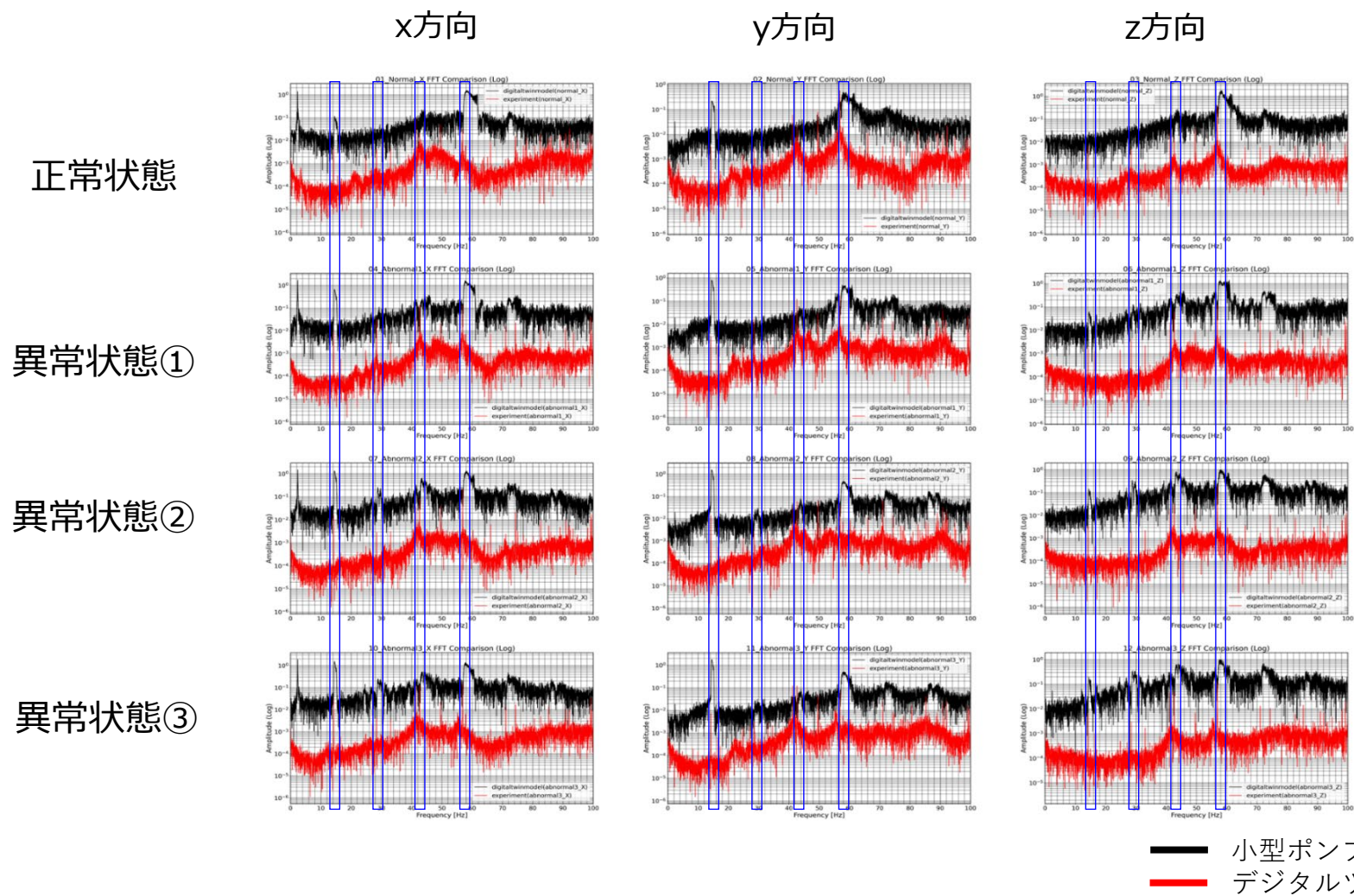
羽根車の水圧抵抗に起因した振動のイメージ図

小型ポンプのデジタルツインモデル（動画）



故障データの生成

実験データとのデータ比較結果



特徴量の整理

- 小型ポンプとデジタルツインモデルの振動特性では、どちらも同様の傾向を示した
- 主軸回転数 $f \times n$ 倍の整数倍の周波数成分等の卓越周波数が実機同様に確認できた



小型ポンプでの再現が可能であることがわかった。

- 今後さらに、再現性を高めるため、経時的な変化をモデルに付与する必要がある。

まとめ

- 状態監視モニタリングシステムで、様々な条件の稼働データを計測することでAI異常検知診断システムの教師データとして利用可能
- デジタルツインモデルを構築することで、高精度の故障劣化シミュレーションが実施可能となり、実稼働に忠実な故障データを生成
- データ計測から診断を自動化することで、技術者の知見や経験を効率的に活用することが可能になる。



発表内容に関する主な文献

- 平地一典、永長哲也：排水機場における状態監視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）
- 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48（2022）
- 平地一典、上野仁士：排水機場AI異常検知診断システムにおけるデジタルツイン技術の活用、土木研究所技術資料、第67巻、第3号2025.11