

機械設備の状態監視に関する調査業務

1. 調査目的

河川及び道路の機械設備について、故障による不作動防止と維持管理の効率化を目的として、点検の省力化・コスト縮減と精度向上及び診断の精度向上につながる状態監視技術の調査を行うものである。

2. 過去の経緯

機械設備の効果的・効率的な維持管理を目標として、各種情報の蓄積と活用、時間基準保全から状態監視保全への移行に必要な技術や方法の調査開発を平成 30 年度までに終え、これらの成果は「機械設備維持管理映さ枕瓜い、る河川ポンプ設備点検・整備標準要領（案）」及び「河川ポンプ設備状態監視ガネ柁らを一部で運用したところ、これまでより労力を要するという問題を把握したことから、状態監視に関して調査を行い、これらの問題解決を図るものである。

3. 調査概要

本年度は、短・中期的に現場実装の可能性が見込める新技術等を調査し、この中から開発・試行を行う技術等を絞り込むための基礎資料をとりまとめるとともに、これらの効果を的確に測定するための環境整備に取り組んだ。

状態監視の改善に資する新たな技術の調査では、河川及び道路の機械設備の中でも代表的な河川ポンプ設備を対象とした。これは、本技術管理業務が対象とする機械設備の中で最も多種多様な機器で構成されているのが河川ポンプ設備であり、これで開発・試行することが他の機械設備への転用も容易と考えられるためである。

状態監視による診断の精度向上については、排水ポンプや自家発電の駆動装置として多く使われているディーゼル機関と、河川と道路の両分野で導入されている水中ポンプに着目した。さらに、機械設備維持管理システムのデータによる状態監視作業の改善にも取り組む。

また、今後の検討を通じて本調査の目的を達成するには、調査・検討した新たな状態監視に関する技術や方法を的確に評価することが重要である。そこで、現在の作業と新たな状態監視の作業の実態を比較することとし、これを実施する標準的な施設を選定した。

本年度における調査検討の実施項目を表-1 に示す。

表－1 調査内容

項目	概要
河川ポンプ設備点検の省力化・コスト縮減と精度向上	(1) 技術の効果測定のための評価基準施設選定及び実態調査 ① 河川ポンプ設備への適用効果を評価するための基準施設の選定 ② 評価基準施設における実態を調査、分析 ③ 河川ポンプ設備状態監視ガイドライン(案)との整合性検証
診断の精度向上	(1) 新たな状態監視技術の調査 ① ディーゼル機関の健全性把握を目的とした状態監視手法の調査 ② 水中ポンプの診断に向けた状態監視手法の調査 ③ 可搬式振動連続計測システム的设计
	(2) データベースの利用検討 ① 蓄積データの把握 ② 状態監視・解析を考慮した抽出条件の検討 ③ 蓄積データを利用した新たな管理方法の調査

4. 調査結果

4. 1 河川ポンプ設備点検の省力化・コスト縮減と精度向上

(1) 技術の効果測定のための評価基準施設選定及び実態調査

1) 河川ポンプ設備への適用効果を評価するための評価基準施設の選定

評価基準施設の選定に当たっては、新技術導入を前提として状態監視技術の波及効果、省力化効果等の観点から以下の①～⑤の評価指標を設定した。そして、関東地整の10河川事務所81施設からすべての評価指標に適合する施設を抽出したうえで、事務所や施設特性等のバランスを考慮し、評価基準施設として次の4施設を選定した。

・評価基準施設：TJ10 排水機場、AJ7 排水機場、K5 排水機場、S1 施設

対象施設を表-2に、①～⑤の評価指標を用いた選定フローを図-1に、評価指標①の機器構成の割合を図-2に示す。

【評価指標】

① 状態監視技術の波及効果

評価基準施設に導入される新技術による省力化を揚排水ポンプ施設に適用して効果が現れるよう、揚排水ポンプ施設の用途、規模、駆動方式別に関東地整管内揚排水ポンプ施設及び全国の揚排水ポンプ施設の機器構成の割合を調査した結果、以下の主ポンプ設備を選定対象とした。

- ・陸用ポンプ：排水量3～7.5m³/s ディーゼル機関駆動の斜流もしくは軸流ポンプ、
- ・水中ポンプ：排水量1～1.5m³/s

② 省力化の効果

省力化の効果を定量的に評価するため、ある程度の業務規模（点検工数）を有する施設を選定した。機械設備積算基準により上記①の施設規模の年点検の標準工数を算出した結果、平均値である220h以上の点検工数の施設を選定対象とした。

③ 点検時に実排水運転が可能な施設

新たな状態監視に関する技術や方法の特性などの把握も重要であることから、状態監視に

必要な計測条件（実負荷運転）が満たされている施設であることが必要であり、管理運転方式が全水量運転の施設を選定対象とした。

④データ収集のしやすさ

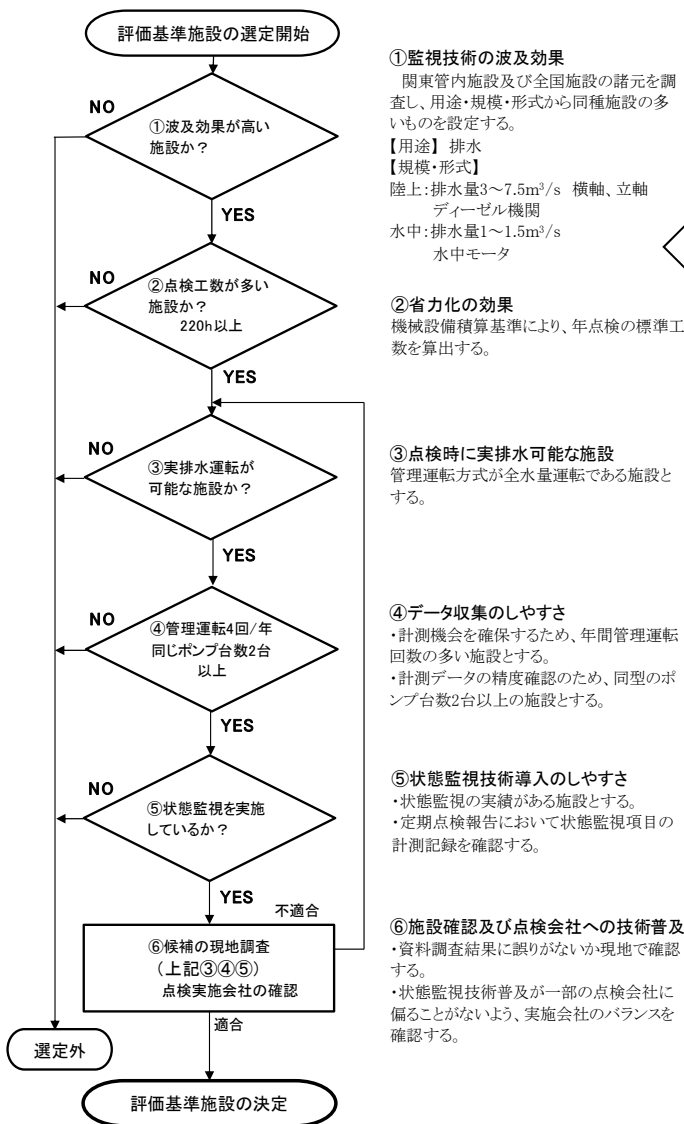
新たな状態監視に関する技術や方法を試行する機会をより多く確保したいことから、管理運転回数が年間4回以上実施できている施設を選定対象とした。

⑤状態監視の導入のしやすさ

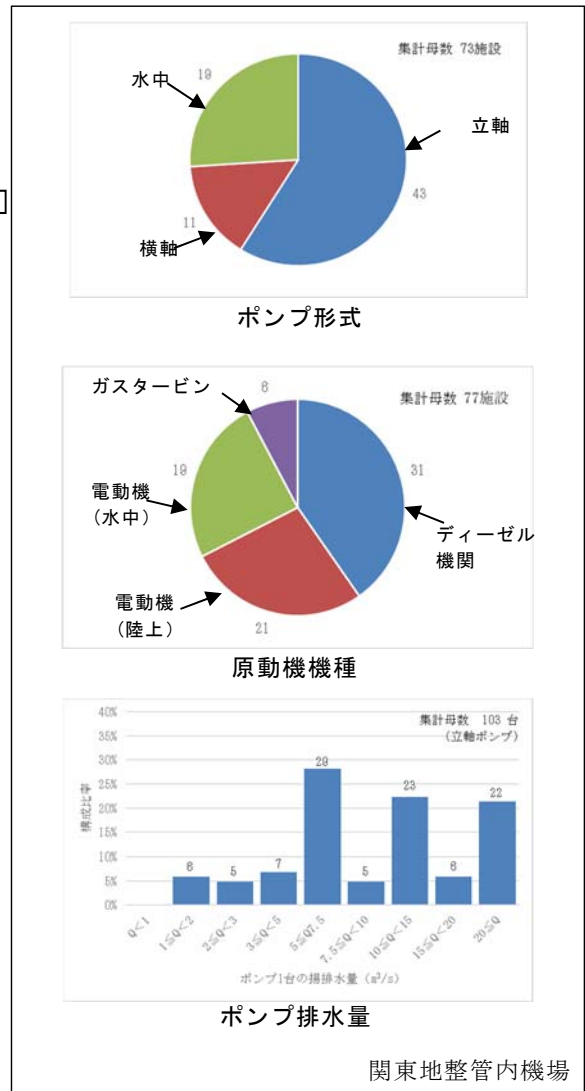
新たな状態監視に関する技術や方法の効果を測定するため、現在行われている管理運転において状態監視項目が計測されている施設を選定対象とした。

表－2 対象施設

	事務所	施設名		事務所	施設名		事務所	施設名
1	TJ 河川事務所	TJ4 排水機場	28	E 河川事務所	E3 排水機場	55	S 河川事務所	S10 施設
2		TJ5 排水機場	29		E8 施設	56		S11 施設
3		TJ8 排水機場	30		E10 施設	57		S9 排水機場
4		TJ7 排水機場	31		E9 施設	58		S6 施設
5		TJ10 排水機場	32		E6 施設	59		S4 施設
6		TJ6 排水機場	33		E7 施設	60	AJ 河川事務所	AJ7 排水機場
7		TJ9 機場	34		E24 機場	61		AJ3 施設
8		TJ2 機場	35		E19 排水機場	62		AJ5 排水機場
9		TJ1 機場	36		E21 排水機場	63		AJ8 排水機場
10		TJ3 機場	37		E16 排水機場	64		AJ6 機場
11	TK 河川事務所	TK4 排水機場	38		E18 機場	65	AK 河川事務所	AJ2 施設
12		TK8 排水機場	39		E15 施設	66		AJ1 施設
13		TK10 排水機場	40		E20 機場	67		AJ4 機場
14		TK5 排水機場	41		E5 施設	68		AK4 排水機場
15		TK7 排水機場	42		E4 施設	69	AK3 排水機場	
16		TK9 排水機場	43		E22 排水機場	70	AK2 機場	
17		TK2 排水機場	44		E23 排水機場	71	AK1 機場	
18		TK3 排水機場	45		E17 排水機場	72	H 河川国道事務所	H3 施設
19	TK11 機場	46	W 河川事務所	W1 排水機場	73	H5 施設		
20	TK12 機場	47		W2 排水機場	74	H1 施設		
21	KA 河川事務所	KA3 施設		48	W3 排水機場	75		H2 施設
22		KA4 施設	49	S 河川事務所	S1 施設	76		H4 施設
23		KA1 施設	50		S2 排水機場	77	K 河川国道事務所	K2 排水機場
24		KA2 機場	51		S3 排水機場	78	K5 排水機場	
25		KA5 施設	52		S5 排水機場	79	K1 排水機場	
26	KA6 機場	53	S7 機場		80	K4 機場		
27	E 河川事務所	E13 施設	54		S8 機場	81		K3 機場



図－1 評価基準施設選定フロー図



図－2 河川ポンプ施設の諸元別割合

2) 評価基準施設における実態調査、分析

本年度に評価基準施設4施設を点検している各点検業者へ、ヒアリングにより実態調査を行なった。これにより判明した点検作業の問題点を以下に示す。

- ・管理運転時の水位確保のため、前日からの水溜めに労力を要している。
- ・計測データの転記やシステム帳票への入力について、状態監視導入により労力を要している。
- ・現在の河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）に計測方法が明記されていないものがあり、計測者毎に計測内容が異なる例がある。
- ・年点検の実施時期が5月に集中するため、内燃機関等の委託会社の確保が難しくなっている。
- ・担い手育成は各社取り組んでいるが、内燃機関等の専門技術が必要な作業を再委託している会社では異動が多い。

3) 河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）との整合性検証

ディーゼル機関駆動の陸用ポンプ施設（31施設）及び水中ポンプ施設（28施設）の点検計測データの最新の記録状況を整理し、河川ポンプ設備点検・整備標準要領（案）や河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）との適合状況を調査した。

さらに評価基準施設については河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）との整合性を詳細に検証するため、点検業務の管理技術者へヒアリングし、表-3 に示す計測実態を把握して施設別に状態監視の計測を行う上での課題を整理し、図-3 に示す「計測作業改善手順書」を作成した。

表-3 評価基準施設による計測実態例

計測部位	計測実態	ガイドラインにおける計測内容 (年点検時 () 書き運転時計測)	該当施設名
ポンプ主軸振動	計測なし(変位センサが設置されている)	(M)設備に非接触式変位センサが常設されており、計測可能な場合には計測する	TJ10 排水機場 AJ7 排水機場
ポンプ回転速度	計測なし	(M)回転計を使用する	AJ7 排水機場 K5 排水機場
ディーゼル機関 回転速度	計測なし(定格回転速度記載)	(M)操作盤の回転速度メータで確認する	TJ10 排水機場 K5 排水機場
ディーゼル機関 燃料噴射ポンプの噴射時期	計測なし	M突き始め角度を計測する	AJ7 排水機場
潤滑油温度 冷却水温度	運転前温度記録なし	運転前、運転中に10分ごとに計測する	K5 排水機場 S1 施設
電動弁の開閉時間	計測なし	(M)ストップウォッチで計測する	AJ7 排水機場
空気圧縮機の充填時間	計測なし	M(実施方法記載なし)	TJ10 排水機場

1. 計測改善箇所 主ポンプ設備（立軸ポンプ）の軸振動計測装置の利用

現状の課題

ポンプ主軸振動は、ガイドラインの運転時計測に「非接触式変異センサが常設されており、計測可能な場合は計測する」と定められているが、センサが常設されていても計測されていない。

計測改善案

ポンプ回転速度が600min⁻¹(10Hz)以下のポンプ振動は、点検作業に用いられる一般的な加速度振動計では精度良い振動値の検出は難しい。ポンプに据え付けられている軸変位センサの値を取り出すことが出来る場合はセンサ表示値を記載するのが望ましい。



主軸の変位センサ



振動計

図-3 計測作業改善手順書（抜粋）

4. 2 診断の精度向上

(1) 新たな状態監視技術の調査

1) ディーゼル機関の健全性把握を目的とした状態監視手法

ディーゼル機関は、排水ポンプや自家発電機の駆動装置として多くの機械設備に用いられている重要な装置である。特に排水ポンプの主原動機は、これが故障や性能の低下を生じると排水機場は機能を失うこととなるが、この信頼性を確保するための分解整備や更新には多額の費用を伴う。このため、ディーゼル機関を状態監視により管理することで、最適な維持管理によるコストの抑制と信頼性の確保が期待される。

① ディーゼル機関メーカーへのヒアリング

ディーゼル機関の「動作」と「燃焼」に着目し、これに関する監視項目についてディーゼル機関メーカ 3 社へのヒアリングした結果を表-4 に示す。また、これを通じて図-4 に示すラック目盛、回転速度による機関負荷の推定の提案がされた。

表-4 ディーゼル機関の運転時計測項目と効果

区分	計測項目	計測実態 (注1)	計測記録方法 ^(注2)		検知できる異常	有効性 (注3)	
			センサ	読取り			
燃焼に関する項目	燃料系	気筒燃料流量*	×	×	×	・ 計測不可能(機関燃料なら可)	×
		燃料圧力*	×	△	△	・ ろ過器の汚れ、送油ポンプの劣化	○
		ラック目盛*	△	△	△	・ 燃料ろ過器の汚れ、主ポンプの異常、減速機の異常、機関の異常、過給器の異常 ・ 状態監視のデータ管理、データ活用を行う上で負荷を示す最も重要な要素である。	○
		燃料噴射タイミング	×	×	×	・ 異常の検出不可能(点検項目ではない)。基本は変化しない整備時の測定項目である。	×
	吸気系	気温	○	△	○	・ 異常の検知ではなく、排気温度上昇の補正值として必要である。	○
		湿度	×	△	○	・ 異常の検知ではなく、使用環境による点検留意項目として有効である。錆の発生し易さ、始動空気系統、給気系統の整備周期の補正	△
		過給圧力*	○	△	○	・ 過給機の劣化、給気系統の冷却不足	○
		吸気圧力	×	×	×	・ 異常の検知ではなく、過給圧力の補正值として必要である。	○
		給気温度	○	○	○	・ 空気冷却器の汚れ、冷却不足	○
		吸気温度	○	△	○	・ 異常の検知ではなく、排気温度上昇の補正值として必要である。	○
		吸気流向	×	×	×	・ 計測不可能	×
	排気系	燃焼室圧力*	○	△	○	・ シリンダー内部の燃焼状態、燃焼不良	○
		気筒排気圧力	×	×	×	・ 計測不可能	×
		排気流向	×	×	×	・ 計測不可能	×
その他	回転速度*	○	○	○	・ 主ポンプの異常、減速機の異常、機関の異常 状態監視のデータ管理、データ活用を行う上でラック目盛を計測できない際の負荷を示す重要な要素である。	○	
動作に関する項目	出力軸角速度	×	×	×	・ 計測不可能、ねじり振動は設計対応	×	
	出力軸方向の移動量	×	×	×	・ 計測不可能、クランク軸はスラスト軸受によって固定されているので、通常の移動量は限られている。	×	
	出力	×	△	○	・ ラック目盛又は機関回転速度により負荷状態を把握 ^(注4)	○	

注1: 計測実態 ○通常計測されている △一部計測例あり ×計測例なし

注 2: 計測記録 ○通常の方法 △一部あり ×採用例なし

注 3: 有効性 ○有効 △場合により有効 ×効果なし

注 4: 負荷状態の把握方法として提示されたラック目盛、機関回転速度による負荷把握方法を図-4 に示す。

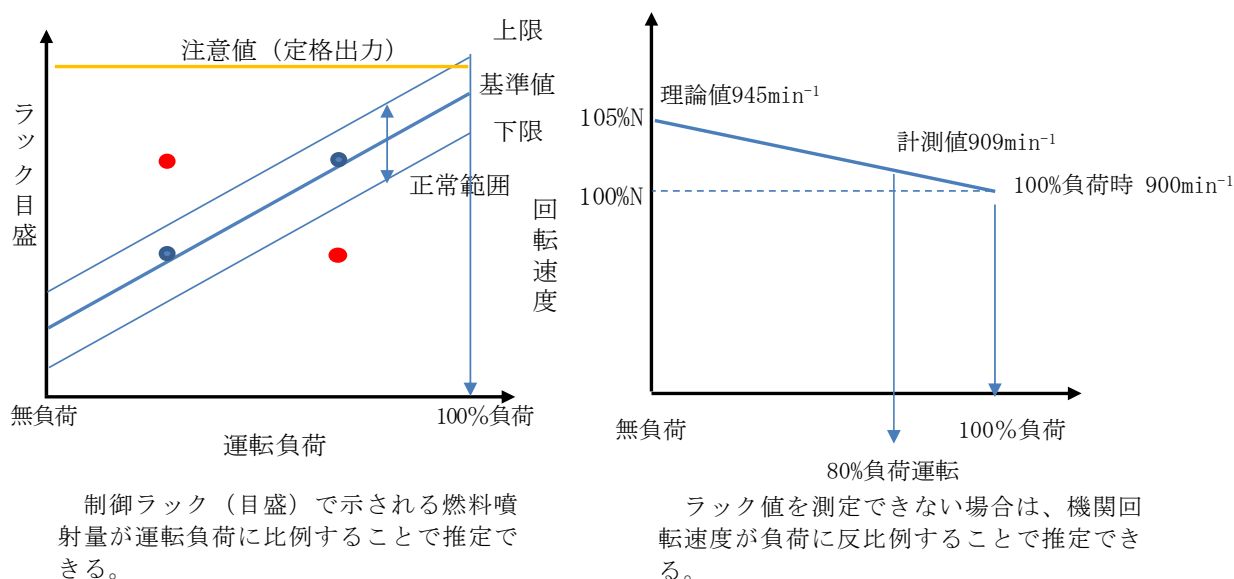


図-4 ラック目盛、回転速度による機関負荷の推定

②ディーゼル機関の状態監視に関する先端技術の調査

ディーゼル機関へ適用が見込まれる状態監視に関する先端技術の調査を目的として、国立研究開発法人土木研究所 (つくば中央研究所、寒地土木研究所) へヒアリングしたところ、「排ガス成分濃度による異常検出技術」を把握した。これは、内燃機関の排出ガス成分の濃度が機関運転状態により変化することに着目し、排気集合管からある程度離れた場所からガスを採集し、これを燃焼ガス分析計により異常を検知しようとするものである。計測装置の操作は簡単であるが、取得データの分析には専門性があり、判定指標は確立できていない。

③ディーゼル機関の他分野での状態監視技術の調査

船舶分野は、機関の故障が極めて重大な事態に直結するため、排水ポンプ設備と非常に近いと考えられ、さらに排水ポンプの主原動機は船用機関を転用していた経緯もある。本年度の調査においては、国土交通省海事局の認定基準による高度船舶安全管理システムや国内の船舶用ディーゼル機関メーカーの遠隔監視サービスを調べた。高度船舶安全管理システムでは、温度、圧力の多数のセンサを必要としており、陸用機関より計測項目が多いことがわかった。また、各社で遠隔監視支援センターを開設するなどして、船用機関の支援サービスを実施していた。

陸用分野では、ポンプ駆動用機関の状態データを自動計測し、基地に転送して状態の監視や診断を行っている例があった。これにおいては、圧力、温度、振動、回転速度等を遠隔監視していたが、対象データは年点検時の計測項目よりやや少ない。

2) 水中ポンプの診断に向けた状態監視手法

水中ポンプは、河川ポンプ設備の主ポンプや系統機器に、道路では道路排水や共同溝付帯、トンネル非常用設備に用いられる、維持管理する数量が非常に多い装置である。運転中の水中ポン

プは水没しているため、陸上機械で行う運転中の振動や音などを測定することができない。また、点検では水中ポンプを地上へ引き揚げる必要もあるため、点検作業に対して付帯作業の割合が多い。このため、水没状態で水中ポンプの状態監視が可能となることで、点検の容易かつ診断の精度向上と最適な維持管理による信頼性の確保等が期待される。

そこで、水没状態における水中ポンプの状態を測定する技術として、水中加速度センサによる振動計測と誘導電動機電流兆候解析（MCSA:Motor Current Signature Analysis）＝電流情報診断による状態監視技術に着目して調査した。

①水中加速度センサの適用性の調査

水中ポンプの運転時の振動を水中で計測するための要求仕様を整理し、これに適合する加速度センサをについて計測機器メーカーの協力を得て調査を行った。この結果を表-5に示す。

表-5 水中加速度センサの適用性

適用ポンプ	適用性	適用上の留意点
コラム形（救急排水）ポンプ 汎用水中ポンプ 道路排水ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> 水中ポンプの水中部位の振動加速度計測に適用する。 センサを取り付けて直接計測することができる。 センサからの信号はケーブルで地上に送る。 適用性：○（コラム形はセンサ取付部に強水流があり△）	<ul style="list-style-type: none"> 負荷状態を把握するため、電流、電圧、吐出し圧力の他に運転時の状態監視項目（振動計測）が必要。 水流によるゴミの接触を避けるためのケーブル保護が必要。水流によって揺さぶられないように金属パイプ等による保護が望ましい。 直流電源供給のための配電盤、現場盤への改造工事を必要とする。 センサ取付け用の平面座を作る必要がある。（または設備更新時にセンサ取付け座を配置する。）

②誘導電動機電流兆候解析の適用性の調査

当該技術は、国立研究開発法人土木研究所の寒地土木研究所寒地機械技術チームにおいて、救急排水ポンプを対象に先行研究され、令和元年度に「電流情報診断によるコラム形水中ポンプ状態監視ガイドライン（案）」を公表している。そこで、この技術のノウハウを有する寒地土木研究所と、この技術に精通した計測機器メーカーの協力を得て調査を行った。この結果を表-6に示す。

表-6 誘導電動機電流兆候解析の適用性

適用ポンプ	適用性	適用上の留意点
コラム形（救急排水）ポンプ 汎用水中ポンプ 道路排水ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> 水中モータの振動を振動センサなしで計測する場合に適用する。 電動機の電源ケーブルから電流を計測し、その変動解析で電動機の軸振動を把握する。 適用性○（自家発電源やインバータ制御のポンプは、波形の影響で異常兆候の検出が難しいため△）	<ul style="list-style-type: none"> ポンプを引き上げずに劣化状態を診断可能 運転状態が安定した時のデータが必要なため、始動開始より10分後に測定する。（管理運転時間が10～15分程度以上の施設が望ましい。振動） 水圧変化等の要因で回転速度が変動すると側帯波の位置も移動し波形が読みにくい（吐出し弁を使うと安定しない。）。 電源が自家発電設備の場合、電源が安定しないと波形が読みにくい。 電動機の出力、電流値の大小には関係なく診断できる

3) 可搬式振動連続計測システムの設計

維持管理コストが多額となる機械設備の特徴は、①大型機械であることと②多くの装置で構成された設備の2つと考えられる。特に②の場合は、製造メーカーや機構が全く異なる装置をシステムとして一体化させることで要求性能を発揮するため、それぞれの装置において最適な維持管理

が求められる。

複数の装置を一体化している設備では、それぞれの装置が影響しあうことも考えられるが、現在の点検データではその相関が不明である。これは点検における計測は各部を順番に実施することで、それぞれのデータの関連性が薄くなり、さらにデータ数が少ないことも要因として挙げられる。このため、このような設備における状態監視は、装置それぞれの状態を同時かつ高密度で計測することにより相関が明らかになると考えられるが、これら機材の常設は多額の予算を伴う。

そこで、機材コストを抑制するとともに機材の稼働率を上げて状態監視が可能となる方法が理想的であり、これには点検で使える可搬式が最適となることから、可搬式で振動を連続的かつ多チャンネルで計測可能なシステムを設計した。計測システムは以下の機能を持つこととした。

- ・主ポンプ、動力伝達装置、原動機の3つの機器を同時に計測できる機能を持たせる。また回転センサで位相基準信号をとる。(各振動波形の同期をとる)
- ・回転パルスを計測し、軸変位センサでポンプ主軸の挙動解析(オービット)を行う機能を持たせる。
- ・施設に常設するのではなく、持ち運び可能な装置とする。

測定要素は状態監視ガイドライン(案)に準ずるものとした。また、前項①の成果を踏まえつつ、要求機能に対応する製品について機器メーカー等のヒアリングと①の成果を踏まえ、構成機器の仕様をとりまとめた。計測システムの構成例を図-5に示す。

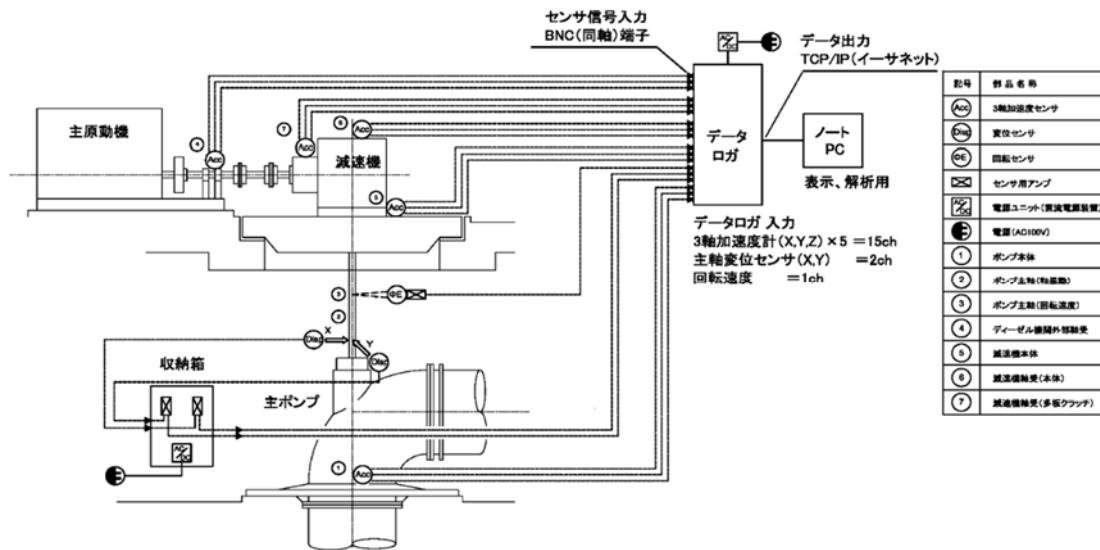


図-5 システム構成例(2床式立軸ポンプ施設の場合)

可搬式連続振動計測システムを実際の機場に導入した場合の、振動センサ、回転センサの設置位置、配線の取り回しについてAJ7排水機場をモデルに机上で検討し、システム導入の留意点を取りまとめた。

この可搬式連続振動計測システムは複数個所を同時に計測するため、センサの固定に十分留意する必要がある。特にディーゼル機関外部軸受部は一般に平面箇所が少なく、センサ固定のための工夫が必要であることが判明した。

- ・非接触式の軸変位センサ、回転センサの固定方法
- ・原動機外軸受のような曲面へのセンサの固定方法
- ・3軸加速度センサが持つX、Y、Zの各座標軸と設備の方向を揃える方法

(2) データベースの利用検討

河川及び道路の機械設備の点検情報等は、国土交通省専用のデータベース「機械設備維持管理システム」に蓄積されている。ここには、状態監視項目の計測データが存在することから、このデータの活用により、点検の診断結果の精度向上や、診断に至る作業の省力化などが期待される。

このため、データベースを活用する具体的な方法について検討した。

1) 蓄積データの把握

蓄積データの解析に用いることが可能なパラメータを把握するため、機械設備維持管理システムの平成30年度データ登録用統一様式（運転記録2）を用いて計測項目を把握した。また、集計結果から傾向管理項目の計測状況を実施施設の割合で分析した。ディーゼル機関の計測項目の分析結果例を以下に示す。

- ・回転速度の実測記録がある施設は5割に止まり、燃料噴射装置のラック目盛に関しては、これを記録している施設は無かった。
- ・過給機給気圧力はほぼ全ての施設で、過給機入口温度はおよそ6割の施設で記録されていた。
- ・各気筒排気温度（または排気温度）はほぼ全ての施設で記録されていた。

2) 状態監視・解析を考慮した抽出条件の検討

本項ではポンプ設備の状態監視の精度向上を図るために有用な計測データを抽出するための条件や留意点を検討した。ポンプ設備の状態監視において状態評価のための計測項目（主パラメータ）は、機器別に傾向管理項目として示されており、ここでは傾向管理項目の計測値に影響する運転条件を把握するための計測項目の抽出条件を検討した。検討に当たっては、機械設備維持管理システムでの蓄積データの現況を踏まえて、設備区別に現状では不足しているデータも含めて整理した。

まず、傾向管理データの計測条件を整理するため、計測条件が計測データに与える影響を検討し、計測条件を明確にした。計測データに影響を与える計測条件は、機械設備構成の違い（ポンプ形式、軸継手構造）、管理運転方法の違い、運転環境（運転時間、周囲温度、計測時期とタイミング）があり、それらを抽出した結果、計測条件は以下のとおりとなった。

- ・「管理運転」と「実排水運転」を区別
- ・運転条件の明記（管理運転方法、吐出弁開度、主原動機回転速度、水位条件、温度条件、測定方法及び位置）
- ・計測対象機器の保全履歴（調整・交換・修繕・改良等と経過年数）
- ・施設周辺の環境（自然環境や社会環境の変化による影響）

そして、設備構成別の計測項目の抽出条件を、揚水機場ポンプ設備（陸用ポンプ）、排水機場ポンプ設備（陸用ポンプ）、水中ポンプ設備（河川ポンプ設備、道路排水設備）で検討した。

- ・揚水機場ポンプ設備（陸用ポンプ）では、運転条件の把握に必要なデータとして、吐出し弁開度、可動翼角度（可動翼の場合）、運転時間、主電動機入力電力が抽出条件となった。
- ・排水機場ポンプ設備（陸用ポンプ）では、管理運転における運転条件の把握に必要なデータとして、吐出し弁開度、内水位、室温、冷却水温度、潤滑油温度があった。ま

た、ディーゼル機関の負荷を示す値としてラック目盛や回転速度もあるが、いずれも工場試験結果からの推計となり、回転速度に関してはパルス計測による正確な実測値が必要である。

- ・水中ポンプ設備（河川ポンプ設備、道路排水設備）では、この運転条件の把握に必要なデータとして、吐出し圧力と入力電力がある。なお、電動機及び電動機と接続されている機器の異常を検知する技術として電流兆候解析があるが、適用性については導入検討がなされている段階である。

既存データの利用による判定精度向上にむけ、傾向管理を行うためのデータが不足している場合は状態判定が難しいことから、当面は同種設備の計測データとの比較を行い、判定の参考とする方法も検討した。具体例として立軸ポンプが設置されている3排水機場（A、B、C機場と表記）の計測データを示した。なお、今後これらについて実際のデータを用いて、具体的な方法や効果の検討が必要である。

- ・傾向管理におけるしきい値の妥当性判断の参考とする例

同様な機器における計測値のバラツキを把握することは、計測値に基づく状態判定において有用と思われる。以下に計測値の変動例を示す。（図-6）

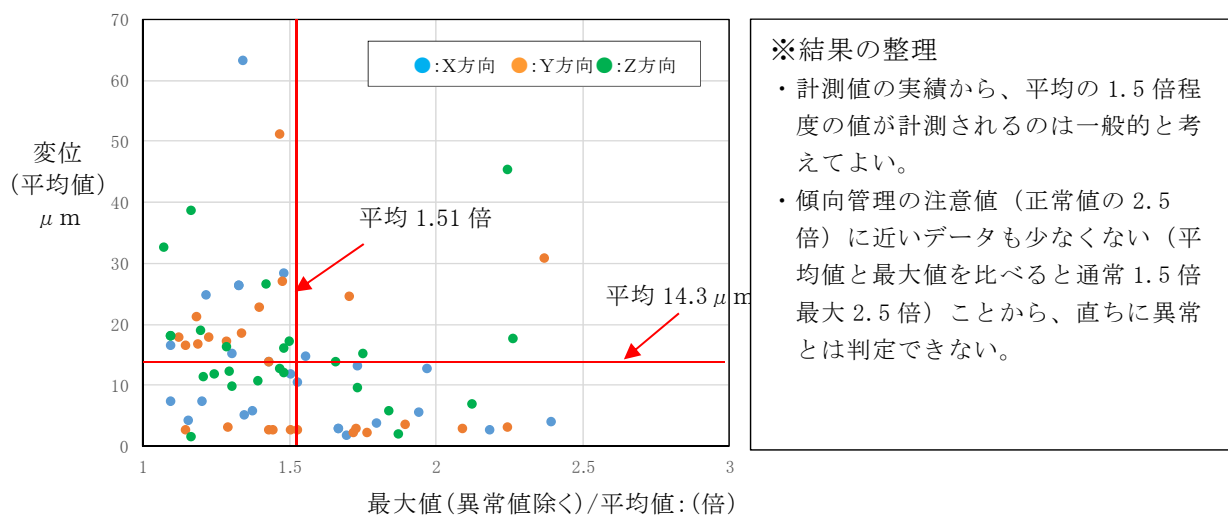
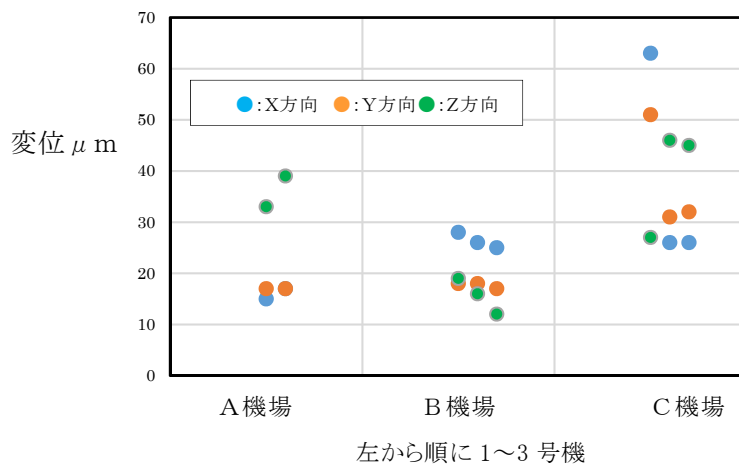


図-6 排水機場のポンプ設備振動値の変動例（A～Cの3機場）

- ・絶対判定を併用する場合に他施設も参考とする例

傾向管理においてデータ不足のためしきい値（相対値評価基準値）が設定できない場合や、絶対判定（絶対値評価基準値による判定）を行う機器の状態判定において、施設別の計測値例を示して他の機場のデータを参考にすることを検討した。（図-7）



※C 機場は、従前の絶対値管理基準値 (80 μ m) に近い値があり、縮切運転の影響が考えられる。

図-7 A～C 機場の計測値の違い (入力軸軸受)

3) 蓄積データを利用した新たな管理手法の調査

過年度までに開発してきた折れ線グラフによる傾向管理の発展として、機械設備維持管理システムの蓄積データを利用し、状態監視を行う上で有用な統計図表等、統計学によった管理方法 (多変量解析やインバリエント分析等) について検討した。

①計測条件が変化している蓄積データの利用

これまでの傾向管理では、運転条件がほぼ同一のデータで行うことで、傾向管理の信頼性を確保していた。また、機械設備維持管理システムの蓄積データの多くは管理運転時 (年点検及び管理運転点検) のものであった。

待機系設備の運転機会は限定的であるため、その中で一定の条件に合致するデータのみを抽出していたのでは、運転毎での傾向管理は機能せず、取得したデータも活用されないことから、効果の低い状態監視の方法であると考えられる。

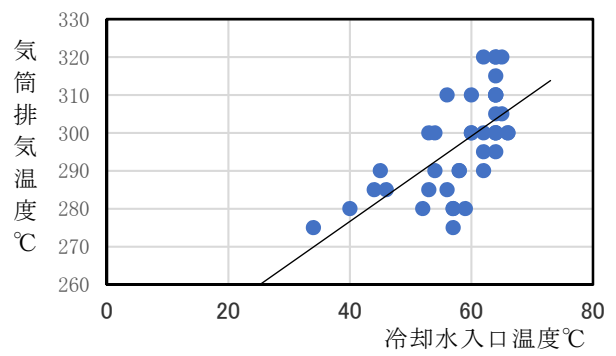
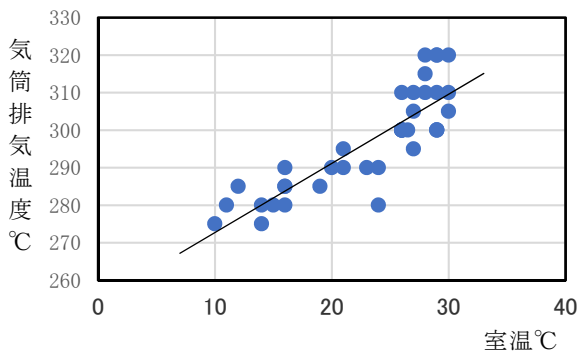
よって、傾向管理に異なる運転条件のデータを使うことが可能となれば、早期に劣化兆候を把握し予防保全を効果的に実施することが可能となり、状態監視の精度と効果は向上することから、運転条件の異なるデータも利用した傾向管理方法について、計測条件の違いによる計測値への影響を調べながら概略検討した。

②統計学によった計測データの管理手法

蓄積データにおける計測条件が計測値に与える影響の評価は、統計手法を用いて定量化することが考えられる。代表的な分析手法である多変量解析 (重回帰分析)、多変量解析 (MT法)、インバリエント分析について、分析の方法、適用効果、留意事項、適用場面の想定等を整理して適用性を検討した。この比較を表-7 に示す。

- ・多変量解析 (重回帰分析)

ディーゼル機関の気筒温度と気温、冷却水温度との重回帰分析の例を図-8 に示す。



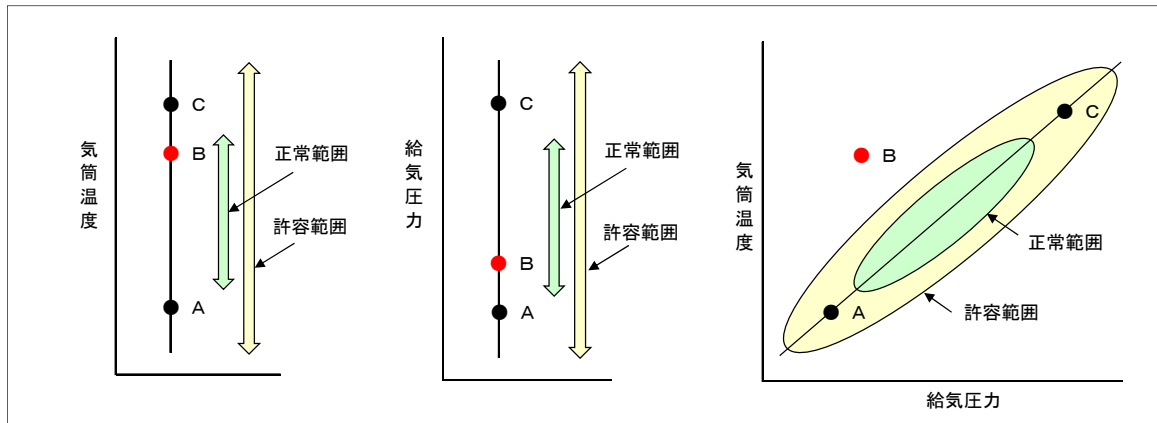
重回帰式：

$$\text{気筒排気温度} = 255.1 + 1.86 \times \text{室温} - 0.02 \times \text{冷却水入口温度} \quad \text{相関係数: 0.85}$$

図－8 気筒温度の重回帰分析

・多変量解析（MT法）

MT法（マハラノビス=タグチ法）による異常検知のイメージを図-9に示す。



※運転条件の異なる管理運転A, B, Cの比較において、個々の値ではA, Cの値よりBの値が良好だが、MT法により複数項目で評価するとBが不良となる。（この例では運転Bの計測時に当該気筒が燃焼異常を起こしていたことが疑われる。）

図－9 MT法による異常検知のイメージ

・インバリエント分析

ビッグデータの分析技術であり、多数の計測データを機械学習により分析して正常な状態における複数のデータ間の相関関係を見出し、実際の計測値が相関性が崩れた場合に異常と判定する。

表-7 各手法の比較と蓄積データへの適用性

区分	多変量解析 (重回帰分析)	多変量解析 (MT法)	インバリエント分析
分析方法	<ul style="list-style-type: none"> 重回帰分析により傾向管理データに影響する計測値(影響因子)による影響度を定量評価する。 影響度を加味して補正した傾向管理データとしきい値を比較して異常を判定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 正常な状態の計測値の分布からの乖離を評価する。 乖離量(マハラノビス距離)により異常を判定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械学習により計測値相互間の関係を定量評価する。 関係の崩れ程度により異常を判定する。
適用効果	<ul style="list-style-type: none"> 計測データを運転条件により補正することにより、従前どおりのしきい値での判定ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 単一の計測値で検知できない異常を、他の計測値と組み合わせて評価することにより検知できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 傾向管理データへの影響要素を、機械学習により自動的に検知できる。
適用上の留意事項	<ul style="list-style-type: none"> 汎用ソフトによる解析可能 傾向管理データへの影響因子の種類を選択する必要がある。 全データ数は影響因子設定数の10~15倍 	<ul style="list-style-type: none"> マハラノビス距離の計算及びそれに基づく異常判定には専門知識が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ビッグデータが必要となる。 専用の解析システムが必要である。
蓄積データへの適用性	○ <ul style="list-style-type: none"> 運転条件を示す計測データが必要数(数十組)蓄積されている場合に適用できる。 	△ <ul style="list-style-type: none"> 蓄積データが不足している。 重回帰分析と比べて計算・評価に専門技術を必要とする。 	× <ul style="list-style-type: none"> ビッグデータが蓄積されていない。 将来の常用設備での自動計測データでの適用可能性がある。

4. 3 考察

本年度の調査において明らかになった課題と、それに対する対応方針（案）を以下に示す。

（１）点検・計測実施上の課題

区分	課題	対応方針(案)
点検の実施条件	①管理運転の準備 新たな状態監視データを計測する場合、定期点検時にできない場合は、別途水溜め等の準備作業が必要になる場合がある。	・定期点検時の計測スケジュールを確認し、点検日数内にできない場合は事前調整する。
	②年点検の実施時期 内燃機関等の点検委託会社の確保が難しくなっている。	・年点検が5月に集中している現状を改善（分散化）し、関係専門技術者が配置できるようにする。
点検業務における計測・記録	①計測記録の労力 状態監視のデータ記録に労力を要している。	・維持管理システム入力帳票の更なる改善を図る。
	②既設センサの活用 現地に計測センサが取り付けられているが、利用されていない場合がある。	・利用環境を整備した上で、点検業務で実施する計測との重複をさける。
状態監視実施上の課題	①状態判定に必要なデータの計測記録 傾向管理項目等の計測データに影響する気温等のデータが記録されていない場合がある。	・傾向管理項目のデータ(主パラメータ)に影響する計測条件(運転状態)を整理し、必要な項目を同時に計測・記録するよう状態監視ガイドラインに追記する。
	②傾向管理項目の計測方法 従前からの計測方法のため傾向管理ができないものがある。	・傾向管理に用いるデータの計測方法を決め、状態監視ガイドラインに反映する。

（２）新たな状態監視技術導入の課題

区分	課題	対応方針(案)
ディーゼル機関の負荷把握方法についての現場試行等	①機関出力の把握方法 ディーゼル機関の負荷は計測値に大きく影響するが、適切な把握方法がない。	・メーカーヒアリングで得られた、ラック目盛りや回転速度による評価方法の有効性確認のため、現場を抽出して試行する。
水中加速度センサの現場試行	①水中加速度センサの実証 水中加速度センサによる水中ポンプ振動計測の有効性が未確認である。	・水中ポンプの状態監視のモデル現場を抽出して試行する。
可搬式振動連続計測システムを用いたデータ観測の試行	①システムの取扱性等の確認 システムの取扱いやすさ、解析機能が未確認である。	・状態監視のモデル現場を抽出して試行する。

(3) データベースの利用における課題

区分	課題	対応方針(案)
傾向管理の判定を補助する類似施設の既存データの整理	①データのバラツキとしきい値の関係 振動値の傾向管理において、計測データのバラツキが大きい施設では、しきい値に接近するデータが多い。	<ul style="list-style-type: none"> 実績データを収集・分析して傾向管理による状態評価の参考資料とする。 機器特性、計測条件の影響要素別に整理する。
多変量解析(重回帰分析、MT法)適用の試行	①重回帰分析の試行 現状の状態監視による機器の状態判定では、計測条件(運転状態)による計測値への影響補正方法が明確でない。	<ul style="list-style-type: none"> 蓄積データを用いて重回帰分析を試行し、補正できる方法を見出す。
	②MT法の試行 傾向管理(トレンドグラフ)による状態判定は手間がかかる上、複数の影響要素を加味した判定ができない。	<ul style="list-style-type: none"> MT法により複数の要素(測定値)から直接異常値を抽出する方法を試行する。 試行に当たっては、市販プログラムによる分析結果から有効なデータ数や既存データによる分析の有効性を把握する。

(4) その他

本年度の調査の過程において、国立研究開発法人土木研究所が低速回転機の振動計測技術に関する次の2つの技術の研究にも取り組んでいることが分かった。

・SPM：ショックパルス法

転がり軸受の軸受外輪と転動体の損傷時に発生する衝撃波を検出する技術で、測定のしやすさ、異常判定の面で優れているが、適用はISOで定められた転がり軸受けに限定される。

・AE：アコースティックエミッション

材料内部の動的な変形、変態、転移、破断等により生じた弾性波を検出する技術で、異常判定にはAE診断の知見を必要とし、判定指標は確立されていない

5. 今後の計画

本年度は、河川ポンプ設備点検の省力化・コスト縮減と精度向上を目的に、状態監視に関する新技術を導入するにあたり新技術の適用効果を適切に評価するための評価基準施設を4施設選定した。今後は選定した評価基準施設にて新たな状態監視技術の試行を行い、適用効果を検証していきたいと考える。

また、新たな状態監視技術として「ディーゼル機関の健全性把握を目的とした状態監視手法」及び「水中ポンプの診断に向けた状態監視手法」について調査を実施した。調査結果より現場試行が可能な技術を選定し、現場試行にて現場適用性を評価していきたい。

更に蓄積データを利用した新たな管理手法の調査において調査した多変量解析については、蓄積データへの適用をより詳細に試行して多変量解析の有効性を検証していきたい。

担当課 施設技術課