

研究成果報告書

研究開発課題名	農業用機械設備の状態監視に活用するDXとアグリライボロジーの研究開発
研究総括者	井原 聡
研究開発組合	トライボテックス株式会社 株式会社アップ・アンドネクスト
試験研究機関	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 国立大学法人 福井大学

1 事業の実施内容

1.1 事業の背景及び目的

(1) 事業の背景

農業用の水利施設であるポンプ設備（以下は、「ポンプ場」と言う。）は、農業基盤を支える重要設備であると同時に、地域の用水や排水を担うインフラでもあり、常に確実な起動と安定稼働が求められている。国内の基幹的なポンプ場は、平成 31 年 3 月時点で全国に 2,968 箇所^{*1}整備されており、これらの施設では、全体の 75%が標準耐用年数を迎える^{*1}とされている。

この状況を鑑み、これまで農業用機械設備監視診断技術の開発（官民連携 H24～H26）農業用ディーゼル原動機の診断技術（官民連携 H30～R2）等を実施し、潤滑剤中の摩耗粒子数やその発生状況をオンサイトやリアルタイムで計測する技術の開発を進めてきた。

これまで開発したシステムは機械や設備の情報をデジタル化し「機器から人への通信」、いわゆる「M2H(Machine to Human)」を前提とする、いわゆる「デジタイゼーション(Digitization)」に留まっており、このシステムでは長期的な視野でプロセス全体を対象にデジタル化するデジタイゼーション(Digitalization)によるプロセス全体の統合管理は進んでいない。

DX 化により設備のプロセスを統合化するには設備を常時監視し、状態を定量的に把握し稼働状態の良否を評価・診断する CBM(Condition Based Maintenance:状態監視保全)のデジタル化が喫緊の課題であり、DX 化に利活用する自動診断システムの開発が必要となる。

^{*1} 農林水産省 農村振興局, “農業生産基盤の整備状況について(平成 31 年 3 月)”, p9.

(2) 事業の目的

本事業では、多数の既設機場に振動、温度、潤滑油診断の計測センサーを取り付け、データを収集し、収集したデータを AI 技術の活用により多数のデータを迅速に自動診断する同時多元遠方監視(DX 化)システムを新たに開発する。

また、事業の有用性確認と評価を行うため、健全な機場の各種データを収集しつつ、更新予定の既設機場で故意に異常状態を出現させる試験も実施し、健全な状態と異常を故意に出現させた状態のデータを収集・比較し、新たに開発する自動診断システムの有用性を検証する。

1.2 事業の内容及び実施方法

(1) 農業用ポンプ設備を包括管理する同時多元遠方監視システムの開発

1) 内容

施設管理者が機場に足を運びポンプ等の状態を監視しなくても診断装置により設備状態を常時監視し、取得したデータから診断を行い、その結果を施設管理者に知らせるシステム開発を行った。開発したシステムは、ポンプ設備の機側に接続された種々のセンサーからのデータを、専用アプリケーションをインストールしたパソコンやスマートフォン等で収集する。収集されたデータはインターネット回線を介しクラウドにアップロードされるため、遠方地からでも設備状態を確認することが可能である。

2) 実施方法

システム開発実施にあたっては以下の手順で進めた。

- ・ ポンプ設備潤滑部の状態監視に活用する計測手法を選定
- ・ データ取得頻度の検討
- ・ システム概略を決定
- ・ 具体的なシステム構築

(2) 潤滑状態の健全度評価技術の検証

1) 内容

上述した同時多元遠方監視システムを機場に設置し、ポンプ設備の正常稼働時データ取得並びに意図的に過酷な潤滑状態を発現させた条件下でのデータ取得を行うことでシステムおよび健全度評価技術の有用性を検証した。

2) 実施方法

検証試験は以下 2 段階に分けて実施した。

① 既設農業用ポンプ設備の潤滑状態健全性評価

機場に開発したシステムを設置し、ポンプ設備の構成要素であるポンプ軸受、減速機、ディーゼル原動機(あるいは電動機)にセンサーを取り付け、遠方地からポンプ設備の状態を 1 か月程度監視することで、システムが正常に稼働できることを確認した。

また、当該システムによるポンプ設備の健全性評価結果と、現場で採取した潤滑油を分析室で診断した結果とを照合した結果、13 検体中 10 検体の診断結果が合致し、開発システムでポンプ設備の状態評価が可能であることを確認した。

② 過酷な潤滑条件下における診断指標の検証

各種センサー(振動、温度、潤滑油診断等の計測センサー)を設置し、ディーゼル原動機を試験対象として意図的に潤滑状態を異常にする過酷特性試験を 3 箇所で行った。これまで、ディーゼル原動機はオンサイトで潤滑異常を評価・診断する事ができなかったが、従前の研究開発で得られた知見と改良によりディーゼル原動機のオンサイト診断評価が可能となったことから、本試験では可能となった診断評価を検証するため、ディーゼル原動機で試験を実施した。対象機器の異常摩耗は、潤滑油の供給圧力を低下させ、潤滑摺動面への油供給量を減らすことで意図的に異常な潤滑状態を発生させる方法とした。

各試験では設備摺動部の潤滑状態を段階的に軽度、中度、重度と 3 段階に分け、過酷な潤滑状態を発現させて状態変化を非分解で常時確認した。

また、3 段階に分けた各試験において、計測した油中粒子のサイズと数およびその増加割合から算出した摩耗量は、試験後の摺動表面の状態と比較し、開発システムの有用性を検証した。

1.3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

表 1-1 に本事業の技術的な問題点とその対応を示す。

表 1-1 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
高濃度油の測定	・ 自動前処理システムの改良
デジタルデータの DX 化による設備診断	・ 非分解での設備診断に有用な計測手法の選定 ・ 新規システムの開発 ・ 現場設備の機側に開発システムの設置・遠隔監視による検証
システムの実機検証	・ 開発システムで得られた診断結果と潤滑油診断結果との照合 ・ 潤滑異常発生時の計測値から求めた診断結果と試験後の摺動表面の照合

1.4 事業の実施体制

- (1) 研究開発組合内の役割分担
- (2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

表 1-2 に研究開発組合と試験研究機関の役割分担を示す。

表 1-2 試験研究機関と事業実施主体との役割分担

研究開発の項目		研究開発組合		試験研究機関	
		トライボ テックス(株)	(株)アップ・ア ンド・ネクスト	農研機構	福井大学
DX を用いたアグリライボロジーの研究		◎	—	○	—
同時多元遠方監視システムの開発		◎	○	○	—
実証試験	健全性確認試験	◎	—	○	—
	過酷特性試験	◎	—	○	○

注) ◎:主担当 ○:担当

1.5 事業の年度計画と実績

表 1-3 に事業の年度計画と実績を示す。

表 1-3 事業の年度計画と実績

項 目		令和 3 年度		令和 4 年度		令和 5 年度	
		上期	下期	上期	下期	上期	下期
DXを用いたアグリバイオロジーの研究							
同時多元遠方監視システムの開発							
実証試験	健全性 確認試験						
	過酷特性 試験						
機能監視		本研究開発では該当なし					

注) 黒線は計画、赤線は実績。

1.6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 農業用ポンプ設備を包括管理する同時多元遠方監視システムの開発

1) 概要

同時多元遠方監視システムの全体イメージを図 1-1 に示す。同システムは、油中粒子、振動、アコースティックエミッション(以降、AE と記す)、温度といった各種センサー、パソコン、サーバの大きく 3 つに大別される。各種センサーから取得したデータは機側に設置したデータ収集用パソコン内のプログラム A・B で演算、圧縮処理されクラウド上にアップロードされる。それらクラウド上に蓄積したデータは独自の診断アルゴリズムによって診断され、その結果が WEB アプリケーションによって表示される。

なお、設備毎の時系列データに対して健全度判定の基準値を色分け表示する仕様となっており、直感的に設備状態の推移が解る様にした。また、登録設備一覧画面においてもポンプの健全度を色分け表示することで、どの設備が故障兆候を示しているかを一覧で確認できる仕様にもなっており、設備の異常対応の優先順位をつけることで、効率的な設備の維持管理が可能となる。

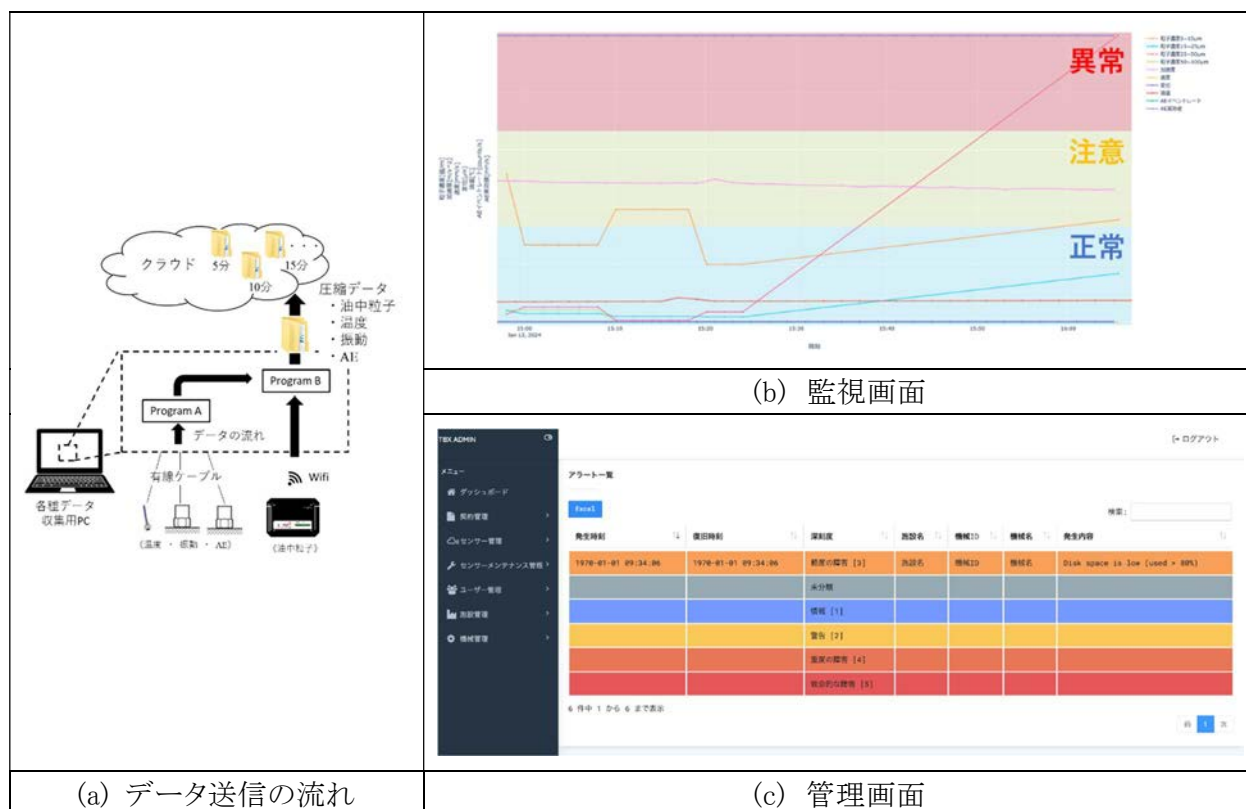


図 1-1 同時多元遠方監視システムの概略

(2) 結果

1) 状態監視手法の選定

同時多元遠方監視システムを開発するにあたり、ポンプ設備の状態監視に活用する手法を検討した。検討結果を表 1-4 に示す。

振動法は、異常振動の検出能力が高く、取り扱いが容易であることから、近年、現場におけるポンプ設備の健全性評価に活用されている。

AE 法は、材料のき裂進展時に発生する弾性波をとらえる手法として知られており、軽微な摩耗状態を検知可能である。また、振動法と取扱いが類似している利点がある。一方で、高感度が故に周辺環境のノイズの影響を受けることで現場への適用が困難とされてきた。

潤滑油診断法は、潤滑油の性状、汚染、摩耗の 3 種類の要素を総合的に評価し、設備の潤滑状態を診断する手法である。この手法は、潤滑油を分析室で精密に診断する作業が必要であり現場適用には不向きとされているが、油中粒子の数と大きさを評価する油中粒子計数法は分析室で精密診断する項目であるが、同時多元遠方監視システムを活用することでオンサイト設備診断にも活用が可能になった項目である。

本試験では、振動法、AE 法、油中粒子計数法(潤滑油診断法の 1 項目)の計 3 手法をポンプ設備の状態監視に活用する新規手法とした。

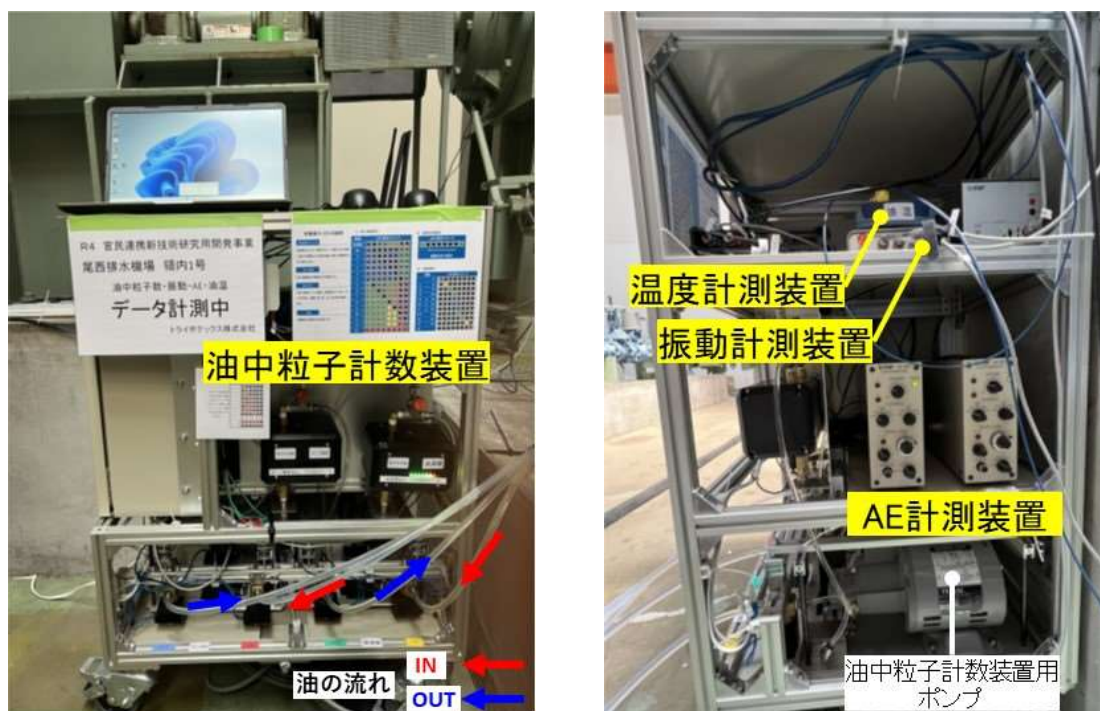
表 1-4 新規適用の状態監視手法

新規適用の監視手法		特 徴	価 格	DXへの対応性
振動法		● 異常振動の検出能力が高い ● 取り扱いが比較的簡単 ● 異常発生箇所の特定が可能	□ 解析に高度な技術が必要 □ 低速回転や滑りに不向き 安価	高
AE法 (アコースティック エミッション法)		● 軽微な摩耗の検出が可能 ● 振動法と取扱いが類似	□ ノイズの影響を受けやすい □ 解析に高度な技術が必要 高	低
潤滑油 診断法	オフサイト	● 異常摩耗の検出能力が高い ● 異常発生原因の調査が可能	□ 比較的高価 □ 高度な技術と経験が必要 高	低
	オンサイト	● 異常摩耗の検出感度が高い	□ 異常箇所の特定が困難 比較的安価	高

2) センサー構成

上述で示した3手法に加え、既存設備に一般的に付帯されている温度法を加え、4つの手法をセンサー構成とした。同時多元遠方監視システムを用いるために開発した潤滑状態監視用計測装置を図1-2に示す。この計測装置は人力での階段の昇降、並びに現場クレーンでの運搬可能な大きさとなっている。

従来、計測者が現場に赴きポンプ設備の健全性を評価していたが、本事業では計測装置をポンプ設備の機側に設置し、各種センサーから取得したデータをインターネット回線を介してサーバーにデータを蓄積しポンプ設備の健全性を「非分解」・「遠方」から評価した。詳細は次項に示す。



(a) 正面

(b) 側面

項目	寸法 [mm]
幅(W)	670
奥行(D)	500
高さ(H)	955

(c) 寸法

図 1-2 潤滑状態監視用計測装置

3) 操作画面

① 監視画面

同時多元遠方監視システムは、監視画面と管理画面の2つに大別される。監視画面には各計測機器から取得したデータを計測時刻ごとに表示する(図 1-1(a)を参照)。監視画面に表示される時系列グラフでは「正常」・「注意」・「異常」の3段階で設備状態を常時監視できるようにになっている。画面右側には監視項目の切り替え項目が配置されており、ユーザーが自由に表示させたい項目を選択できるような機能を有している。

② 管理画面

次に管理画面の一例を図 1-3 に示す。管理画面はシステム管理者が「契約」、「センサー情報管理」、「ユーザーの情報並びに施設情報」を管理する機能である。上記で示した状態監視を行う上での基本情報を登録・管理する画面となっている。機能の詳細は表 1-5 に示す。

(a) 施設管理画面

メンテナンスID	対象センサーID	発生時顧客ID	発生時機械ID	事象発生日	事象状況	原因調査結果	対応内容	故障センサー受領日	交換センサー発送日	対応完了日	申し送り内容	交換時刻
SM-VKFL9M				2023-03-31	対応中	原因調査結果	センサー登録	2023-03-31	2023-03-31	2023-03-31	メモ (仮) メモ (仮)	S-G191C

(b) センサーメンテナンス管理画面

図 1-3 同時多元遠方監視システムの管理画面の一例

表 1-5 機能の詳細

No	項目	各項目の説明
1	契約管理	契約内容・取引先・契約期間など契約台帳に必要な情報を登録・管理する画面である。
2	センサーメンテナンス管理	センサーメンテナンス管理とは、システム管理者がセンサーの新設、不具合発生時の事象状況の確認、原因調査結果などを登録・管理する画面である。
3	ユーザー管理	本システムを活用するユーザー情報(会社名、ユーザー名、メールアドレス等)を登録・管理する画面である。
4	施設管理	ユーザーが所有する施設情報を登録・管理する画面である。 農業用ポンプ設備の場合、以下のような情報を登録・管理する。 ・機場名 ・所在地
5	機械管理	機械管理とは、ユーザーが状態監視を行っている対象施設の状態を確認する画面である。アラート情報や監視画面へのリンクで構成される。

4) サーバの保存容量の想定

同時多元遠方監視システムは上述で示した 4 つの計測手法で構成されている。そのうち振動法、AE 法では解析手法として一般的な周波数解析 (FFT: Fast Fourier Transform) 機能を有している。周波数解析で特徴的な周波数を検知し異常箇所の特定を可能とする。但し、この解析手法では設定する分解能、記録する周波数範囲によって、保存容量が膨大となる。

実際に取得した場合のデータ保存容量とその実計測値から想定されるデータ保存容量を表 1-6 に示す。例えば 1 設備で 5 分に 1 レコード記録する条件下で、4,000 設備で 5 年間データを保有した場合を下表に示した。圧縮データは約 162 TB (= 40.5 GB × 4,000) となる。仮に取得データを周波数解析機能は有しておらず異常箇所の特定には至らないが、故障の兆候をとらえることが可能な油中粒子計数に絞った場合、上述の条件で圧縮データは約 12.8 TB (= 0.32 GB × 4,000) となり、全項目取得に対し 7.9% となり、90% 以上の削減となる。今後、ポンプ設備の重要度や稼働率監視対象設備の故障率に合わせた導入案を検討する必要がある。

表 1-6 取得データ数から想定されるポンプ1台に対する圧縮データ保存容量

単位: byte

計測条件		計測項目	①振動	②AE	③温度	④粒子	合計	
		Ch 数		3ch		1ch		
		計測周期			5 分		①～④	④
		ポンプ台数			1 台			
保存期間	実測	5 分	52 k	24 k	0.5 k	0.6 k	77.1 k	0.6 k
		60 分	624 k	288 k	6 k	7.2 k	925.2 k	7.2k
		1 日	14.98 M	6.91 M	0.14 M	0.17 M	22.2 M	0.17 M
	想定	30 日	0.449 G	0.207 G	0.0043 G	0.0052 G	0.67 G	0.0052 G
		1 年	5.47 G	2.52 G	0.053 G	0.063 G	8.1 G	0.063 G
		3 年	16.40 G	7.57 G	0.158 G	0.19 G	24.3 G	0.19 G
		5 年	27.33 G	12.61 G	0.26 G	0.32 G	40.5 G	0.32 G

5) 異常を検知した際のアラーム方法

本システムではアラート一覧表示画面を有しており、アラート情報を一覧確認することができるが、それに加え、ユーザー情報としてメールアドレスを予め登録することが可能となっており、異常の兆候を検知した際に、施設管理者（土地改良区）等のユーザーが所有するパソコンやスマートフォンに自動診断結果をメール通知できる仕様となっている。

6) DX 化の実現

これまでポンプ設備の点検項目や頻度は施設管理者に委ねられており、点検を行ったとしても、各種データを用いた設備状態の診断方法が解らず、場合によっては設備の異常を見落とす危険性があった。本システムでは施設管理者が機場に足を運び、ポンプを監視しなくとも設備自体が設備状態を常時監視し、取得したデータから診断を行い、その結果を施設管理者に知らせることが可能となる。本システムは、ポンプ状態を一元管理し、異常を早期に自動判定することで整備・更新の優先順位の策定に寄与することができ、本システムが社会実装することによって、①保守費用の最適化、②予防保全の効率的な運用、③保守管理の高度化等のメリットが得られる。

1.7 実証試験(現場適用)の概要、結果、課題等

(1) 既設農業用ポンプ設備の潤滑状態健全性評価

1) 概要

潤滑状態の健全性は、前項の同時多元遠方監視システムの動作検証とポンプ設備の健全性評価を実施した。当該システムで得られた常時監視データと分析室での潤滑油診断結果を照合することで、ポンプ設備の状態を非分解かつ遠方から診断可能であることを検証した。

2) 結果

表 1-7 に選定機場一覧を示す。選定した機場は、東海農政局と北陸農政局管内の合計 8 箇所を選定し、R4 年度に健全性確認試験を実施した。ポンプ口径 d は以下の 3 つに分類し状態監視を実施した。

小($d < \phi 1,000\text{mm}$) : No.6,7,8 の 3 箇所

中($1,000\text{mm} \leq d < \phi 1,500\text{mm}$) : No.3,4 の 2 箇所

大($\phi 1,500\text{mm} \leq d$) : No.1,2,5 の 3 箇所

ポンプの駆動源は、ディーゼル原動機、電動機をそれぞれ含むように選定した。監視に用いた指標は油中粒子数濃度、振動、AE、温度の 4 種類とした。

表 1-7 試験実施の機場名と監視項目

No	管内	都道府県	排水機場名	号機	設備名	仕様	箇所名	監視項目				
								油中粒子数濃度	振動	AE	温度	
1	東海	愛知	a排水機場 (①)	1	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ1,800 mm	ポンプ軸受	○	○	○	○	
					ディーゼル原動機	出力：2,000 PS 回転数：750 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○	
2			a排水機場 (②)	1	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ2,000 mm	ポンプ軸受	○	○	○	○	
					ディーゼル原動機	出力：3,000 PS 回転数：750 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○	
3	富山	b排水機場	4	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ1,350 mm	ポンプ軸受（グリース）	－	○	○	○		
				ディーゼル原動機	出力：360 PS 回転数：1185 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○		
4		c排水機場	2	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ1,350 mm	ポンプ軸受	○	○	○	○		
				ディーゼル原動機	出力：400 PS 回転数：1,200 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○		
5		d排水機場	4	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ1,500 mm	ポンプ軸受（ポンプ外周部）	－	○	○	－		
				ディーゼル原動機	出力：350 PS 回転数：1,000 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○		
6		石川	e排水機場	2	排水ポンプ	軸方向：横 形式：斜流 口径：φ800 mm	ポンプ軸受	○	○	○	○	
					モーター	出力：55 kW 回転数：1750 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○	
7	f排水機場		2	排水ポンプ	軸方向：横 形式：斜流 口径：φ800 mm	ポンプ軸受	○	○	○	○		
				モーター	出力：100 kW 回転数：1,760 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○		
8	g排水機場		1	排水ポンプ	軸方向：縦 形式：斜流 口径：φ800 mm	ポンプ軸受（ポンプ外周部）	－	○	○	－		
				モーター	出力：160 kW 回転数：1,190 rpm	減速機（カップリング側）	○	○	○	○		
累積計測箇所								13	24	24	22	

① 現地調査結果の一例

No.1 の a 排水機場(①)の 1 号に関する現地調査結果を一例として下記に示す。

a. センサー設置前(現地調査)

現地調査では、センサー設置位置とケーブル長、電源位置、機器の搬入経路、油配管寸法と長さを確認した。センサー設置位置とケーブル長を決める場合、ノイズや粒子の沈降など計測パラメータへの外的要因に対する影響度を少なくするため、ケーブル長や油配管長を極力短くし、外的要因に対する影響度を少なくするとともに、可能な限り対象とする機械部品の近傍からデータを取得することを考慮する必要がある。

本事例に示すように、ポンプ設備の主軸方式が縦型である場合、センサー取付け位置が上下 2 層に分かれることも想定し計測機器類設置時のクレーン使用可否やセンサー用油配管などを含め、施設管理者との事前確認が重要となる。

完成図書に設備側の油配管寸法が記載されている場合もあるが、多くの場合は明記されていないこともあり、現物のバルブ等に印字された配管寸法の確認や、あるいは閉止栓のネジサイズから配管サイズを推定するなどしてセンサー用油配管を決定する必要がある。

【全体像】



図 1-4 監視対象としたポンプ設備の全体写真と図面

【フロア】



図 1-5 センサーの設置、搬入経路並びに電源位置の確認

【ポンプ軸受】

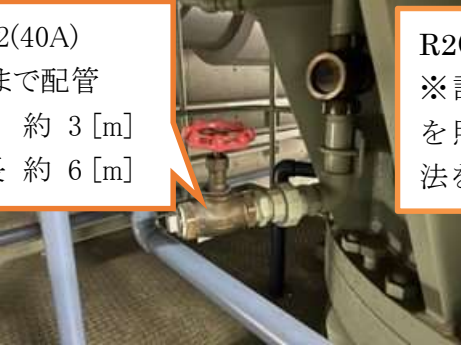
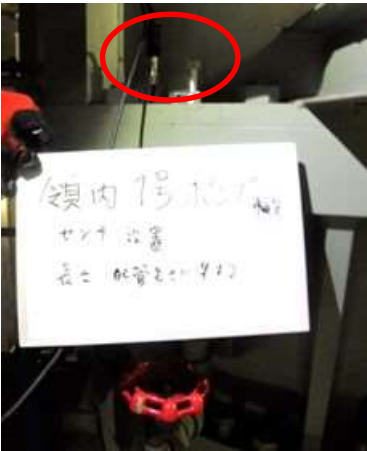
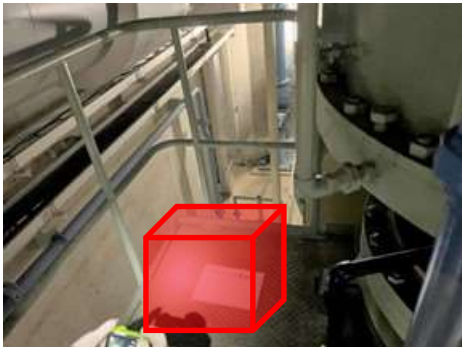
⑦ 油中粒子計数装置_試料採取口 R1-1/2(40A) ※2F まで配管 揚程 約 3 [m] 配管長 約 6 [m] 	⑧ 油中粒子計数装置_試料戻し口 R2(50A) ※計測値と規格を照合し部品寸法を推定 
⑨ 振動・AE センサー設置位置 	⑩ 予備送液ポンプ設置場所 (必要に応じて) 

図 1-6 センサーの設置、ケーブル長、油配管寸法と長さの確認 (ポンプ)

【減速機軸受】



図 1-7 センサーの設置、ケーブル長、油配管寸法と長さの確認(減速機)

【ディーゼル原動機】

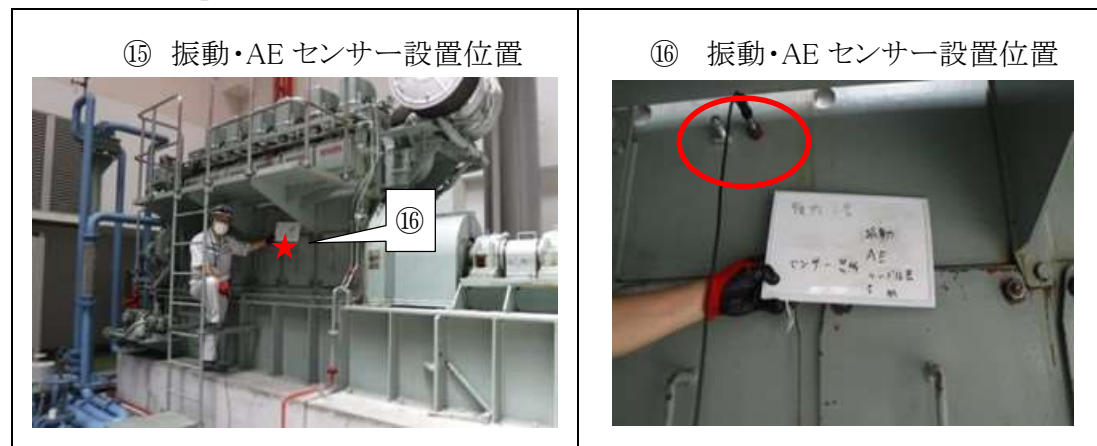


図 1-8 センサーの設置、ケーブル長、油配管寸法と長さの確認(原動機)

b. センサー設置例

ポンプ、減速機、原動機(あるいは電動機)で構成されるポンプ設備に対し、同時多元遠方監視システムの構成要素である油中粒子計数(潤滑油診断法)、振動法、AE 法、温度法の各センサーを設置した(センサー構成は図 1-2 参照)。

油中粒子計数装置への送油は、油中に含まれる粒子を計数するため、排油口の既設配管を分岐し行った。振動センサー、AE センサーは磁石付きの治具によって監視対象の外装に設置した。温度センサーは外装あるいは配管内に設置した。



図 1-9 各監視対象に対するセンサーの設置

② 遠方地からの状態監視の一例

図 1-10 に No.1 a 排水機場(①)1 号で取得した油中粒子数濃度、振動、AE、温度の時系列グラフの一例を示す。センサーから取得したデータは、一旦パソコンに蓄積され、インターネット回線を介し、今回開発したシステム内の構成プログラムによって圧縮処理が行われサーバー上に保存される。その圧縮したデータに現地からアクセスするシステムによって、遠方地から確認した。また、監視データの増減によって設備稼働の有無を確認した。

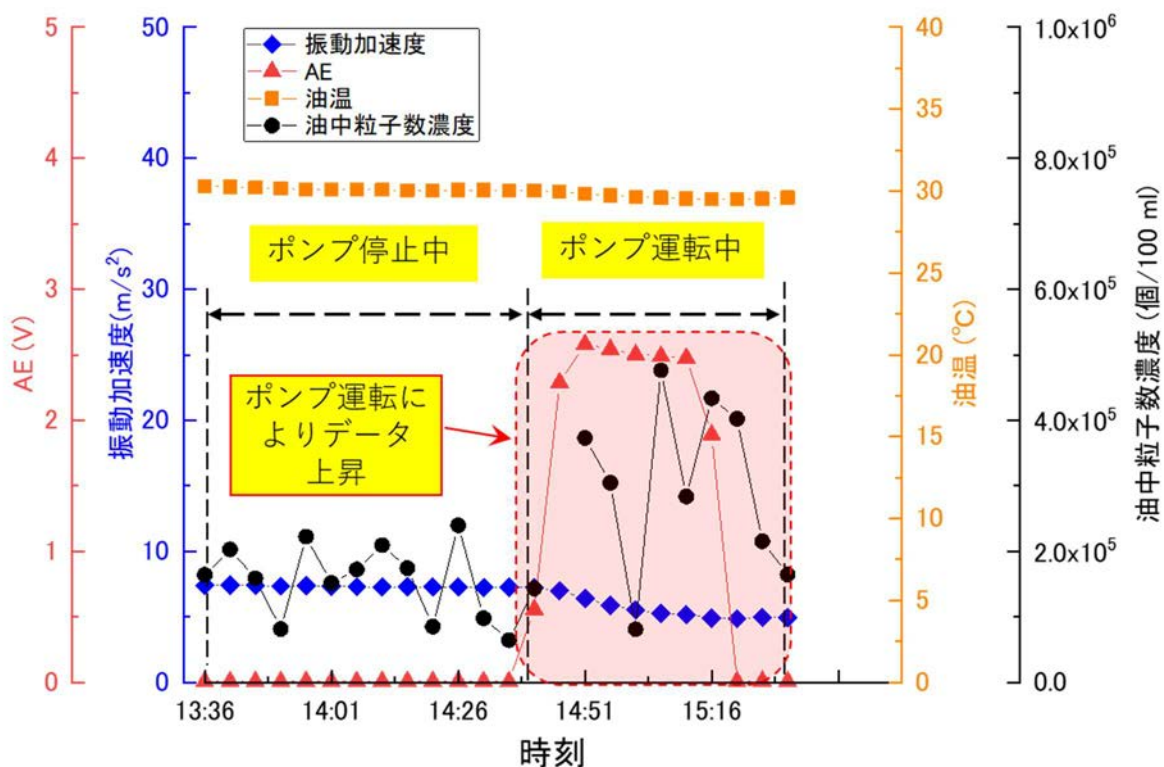


図 1-10 ポンプ設備稼働時の状態監視データの変化の一例

③ ポンプ潤滑システムの診断結果

状態監視に活用した管理基準を表 1-8 に示す。この仮の管理基準値は、各規格に沿った基準並びにポンプ設備の完成図書で定められた数値に準拠した。

表 1-9 に現場での計測結果(オンライン)と管理基準との比較、並びに分析室での潤滑診断結果(オフライン)を示す。

ラボ分析による潤滑診断では、現場で採取した試料油を 9 つの項目わけて分析することで、機械要素の潤滑状態を現場での簡易計測よりも詳細に評価することが可能である。ラボ分析は、状態監視の従来手法である振動法や温度法よりも軽微な異常摩耗の検知が可能であり、監視対象が故障する前に故障要因に対応することが可能となる。

現場と分析室の結果を比較すると、表 1-9 中の No.4、5、6 ではラボ分析とオンライン測定では一致しない箇所が見受けられた。このように、オンライン計測で実施する「しきい値」を用いた基準のみでは、データが正常(○)／注意(△)あるいは注意(△)／異常(×)の境目にある場合、データの評価が困難な場合もある。一例として、No.4 機場の減速機をみると、油中粒子数濃度の計測値は、正常(○)／注意(△)の基準の境目であった。

潤滑油診断法は油中に含まれる摩耗粒子の形状によって潤滑系統内の異常摩耗を早期に検出することが可能であるが、本開発システムは摩耗粒子の形状評価を有していない。これが 13 検体中 3 検体の不一致が見られた原因であると考えられる。しかし、摩耗粒子の形状による評価は摩耗発生の原因調査を主目的とした予防保全の方法であり、異常摩耗の兆候を定量的に捉えることを目的とした本開発システムとは趣意が異なり、3 検体のデータの差異はこの定性、定量評価の違いによるものとなるため、本システムによる設備の健全性評価は可能であると言える。

オンライン計測に比較し、分析室での診断では現場計測よりも多くの指標を用いるため、設備の健全性を精度よく評価することが可能であるが、現場において多くのセンサーを活用すれば、より精度よく診断は可能となるものの、センサー類に要する費用が高額となる。したがって、現場計測ではその場で設備の健全性を評価が可能であるとの利点を活かしつつもしきい値の超過有無の管理基準を用いるだけではなく、データ推移を基準とする新たな指標を追加することが必要であることがわかった。次項より実機を使用した過酷特性試験により追加する診断指標を検証した結果を記す。

表 1-8 状態監視指標を活用したポンプ設備の健全性評価の仮の管理基準

判定	汚染度※2	速度 v (mm/s)		油温	
		ディーゼル※3, 4	その他※3, 4	ディーゼル※5	その他※5
正常(○)	10	$a < 28.2$	$a < 2.8$	$70 < T$	$70 < T$
注意(△)	11	$28.2 \leq a < 44.6$	$2.8 \leq a < 4.5$	$70 \leq T < 80$	$70 \leq T < 80$
異常(×)	12	$44.6 \leq a$	$4.5 \leq a$	$80 \leq T$	$80 \leq T$

上記の各基準値は、※1～4 に基づく

※2 SAE4059(NAS1638)を参照

※3 ISO10816-3を参照

※4 樋口, 中嶋:ディーゼル機関の振動測定と評価, 日本舶用機関学会誌 33(1), 1998, p34-39.

※5 完成図書から参照

表 1-9 ポンプ設備の状態監視結果

No	排水機場名	号 機	測定 期間	設備名	潤滑診断 (オフライン)	油中粒子 (オンライン)		振動 (速度)		油温	
					判定	測定	判定	測定	判定	測定	判定
1	a 排水機場 (①)	1	2022 年	ポンプ軸受	△	11	△	0.42	○	<40	○
			08 月～	減速機	△	11	△	1.51	○	<40	○
			09 月	ディーゼル	△	—	—	26.4	○	—	—
2	a 排水機場 (②)	1	2022 年	ポンプ軸受	△	11	△	0.67	○	<40	○
			08 月～	減速機	△	12	×	1.17	○	<40	○
			09 月	ディーゼル	×	—	—	21.7	○	—	—
3	b 排水機場	4	2022 年	ポンプ軸受	—	—	—	0.89	○	—	—
			10 月～	減速機	×	12	×	2.37	○	<20	○
			11 月	ディーゼル	×	—	—	32.5	△	—	—
4	c 排水機場	2	2022 年	ポンプ軸受	×	>12	×	1.43	○	<30	○
			10 月～	減速機	×	10	○	2.72	○	<30	○
			11 月	ディーゼル	×	—	—	34.6	△	—	—
5	d 排水機場	4	2022 年	ポンプ軸受	—	—	—	1.76	○	—	—
			10 月～	減速機	×	11	△	2.18	○	<20	○
			11 月	ディーゼル	×	—	—	13.1	○	—	—
6	e 排水機場	2	2022 年	ポンプ軸受	×	>12	×	0.82	○	<30	○
			11 月～	減速機	△	12	×	2.04	○	<30	○
			12 月	モーター	—	—	—	1.09	○	—	—
7	f 排水機場	2	2022 年	ポンプ軸受	△	11	△	0.09	○	<30	○
			11 月～	減速機	△	11	△	0.19	○	<30	○
			12 月	モーター	—	—	—	4.16	△	—	—
8	g 排水機場	1	2022 年	ポンプ軸受	—	—	—	0.34	○	—	—
			11 月～	減速機	△	11	△	3.41	△	<30	○
			12 月	モーター	—	—	—	1.71	○	—	—

(2) 過酷な潤滑条件下における診断指標の検証

1) 概要

本項では、3 箇所の機場で意図的に潤滑状態を異常にする過酷特性試験を実施した。各試験では意図的に潤滑異常を発現させてデータを取得し、これらを比較することで、診断評価パラメータの利活用の是非と自動診断機能の検討を進めた。

検討する診断評価パラメータは、摩耗により発生した油中粒子の数、及びその増加比率と粒径から算出した摩耗量とし、これらが潤滑状態監視に有用であるかを実証試験により検証し、その結果から非分解での利活用について検討した。

2) 結果

① 選定機場と試験条件

R5 年度に、ディーゼル原動機を試験対象として合計 3 箇所の機場で過酷特性試験を実施した。実証試験では、潤滑異常発現時における油中粒子の数と粒径の変化を常時監視し、非分解で潤滑状態を評価した。実施した 3 回の各試験において、表 1-10 に示すように潤滑油の供給圧力を正常稼働時以下に意図的に低下させ、クランク軸受やコンロッド軸受そしてピストン・シリンダー間の潤滑摺動部への油供給量を意図的に減少させ、異常な潤滑状態を発現させた。

各試験での潤滑油の供給圧力は、油圧の設定値を 0.08MPa、0.05MPa、0.05MPa 以下の 3 段階とし、各段階での想定摩耗程度を軽度、中度、重度と呼称した。

表 1-10 選定機場の試験条件

No	機場名	想定 摩耗程度	潤滑油圧力調整 (正常稼働)	圧力警報基準	試験条件
1	A 排水機場	軽度	0.3～0.4 MPa	0.1 MPa	0.08 MPa
2	B 排水機場	中度	0.15～0.3 MPa	— (完成図書内記述なし)	0.05 MPa
3	C 排水機場	重度	0.15～0.2 MPa	— (完成図書内記述なし)	≤0.05 MPa

② 潤滑異常の発生方法

図 1-11 にディーゼル原動機の潤滑油系統^{*6}を示す。エンジン内部の各摺動部へは、エンジン動力を駆動源とする潤滑油ポンプにより潤滑油を供給する。潤滑油は、油こし器、冷却筒の順に流れ、各摺動部品へ到達する。本過酷特性試験では、この潤滑油の供給量を意図的に減らすことによって潤滑異常を発生させた。

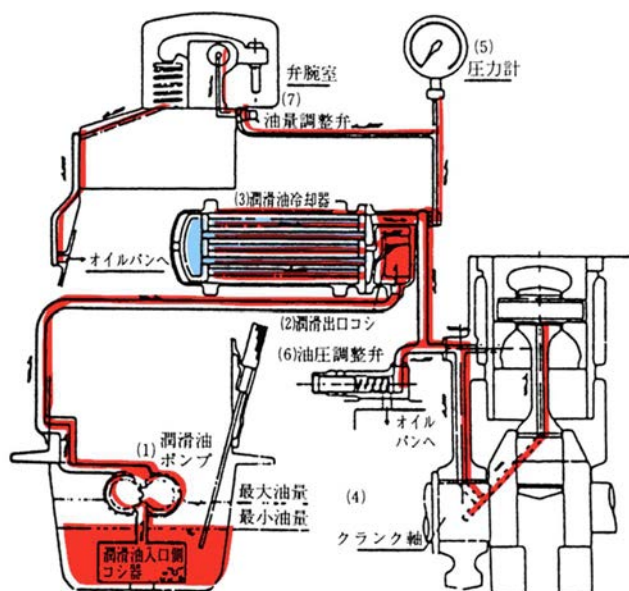


図 1-11 ディーゼル原動機の潤滑系統の模式図

*6 日本財団 図書館, “2 級船舶機関整備士指導書”, 2.4 潤滑装置.

図 1-12 に改造した潤滑系統の模式図を示す。試験では、冷却筒から潤滑油の流れを分岐し、各摺動部品への油供給量を減らす。冷却筒から分岐した配管直後にバルブを設置し、そのバルブの開閉度によって潤滑油の供給量を調整した。

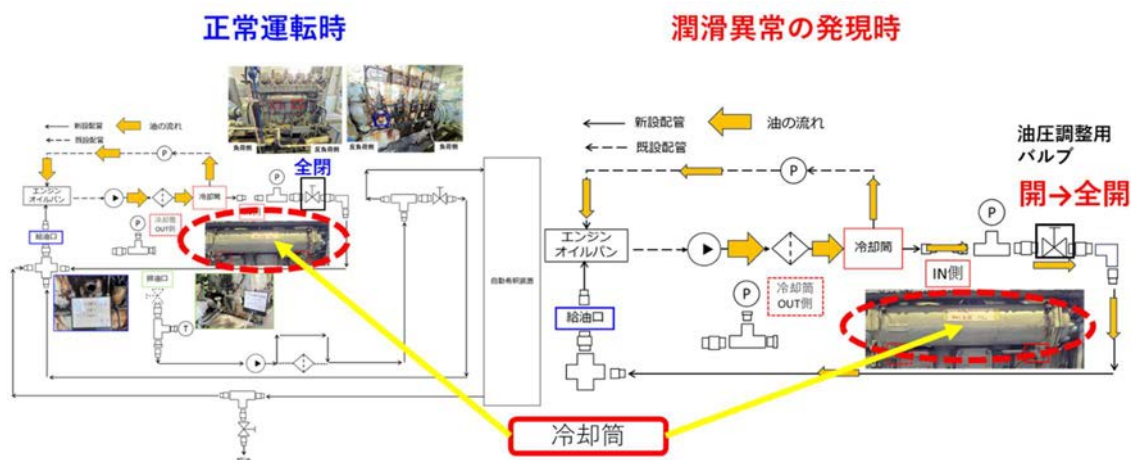


図 1-12 改造した潤滑系統の模式図

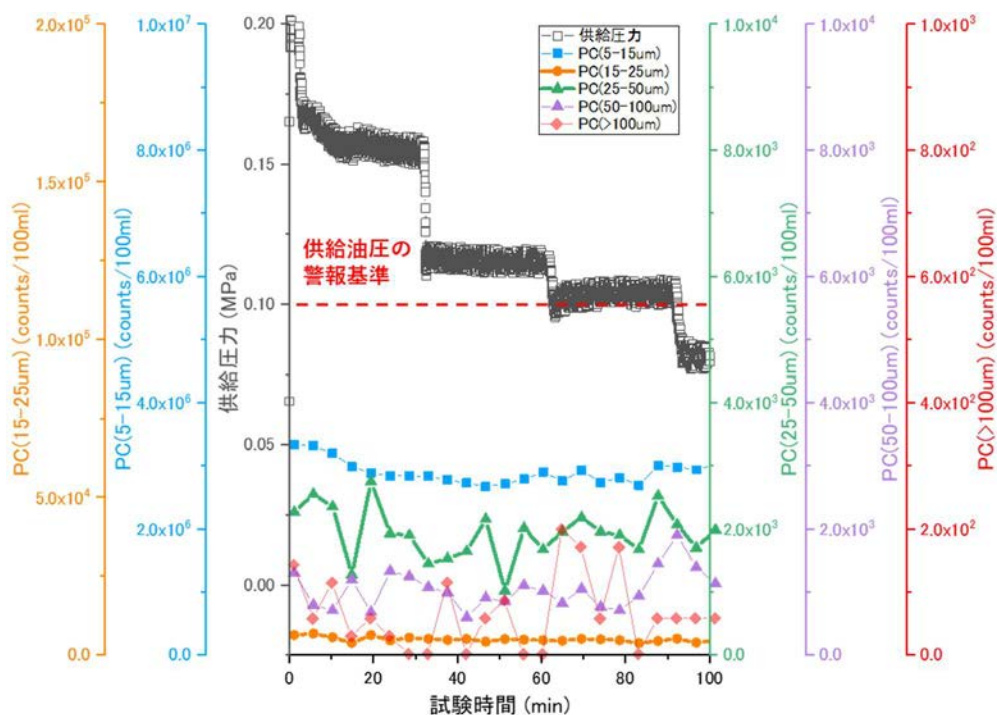


図 1-14 油中粒子濃度の計測結果(摩耗程度:軽度)

【摩耗程度:中度】

2 回目の試験では、1 回目を実施した軽度な摩耗より厳しい潤滑状態になるよう供給油圧を 0.05MPa に設定し、潤滑状態を確認した。その結果、油中粒子のカウント数は、1 回目に比較して粒子数濃度の上昇傾向が確認され、特に 15μm から 25μm の第Ⅱレンジと 25μm から 50μm の第Ⅲレンジの 2 つの粒径区分で顕著な増加が確認された。

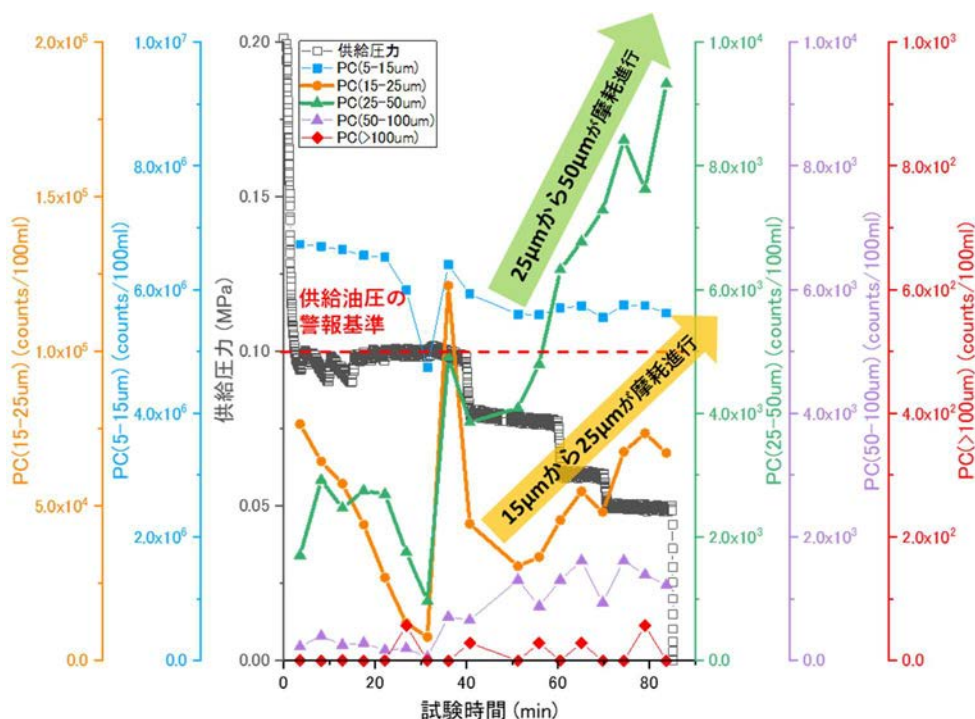


図 1-15 油中粒子濃度の計測結果(摩耗程度:中度)

【摩耗程度: 重度】

3 回目の試験では、想定する摩耗程度を「重度」になることを目指し、2 回目以上に過酷な潤滑状態となるよう潤滑油の供給油圧を 0.05MPa 以下に設定して油中粒子数濃度濃度の変化を監視した。その結果、試験の経過時間 60 分以降に、100 μ m 超の油中粒子の数濃度に上昇傾向が確認された。

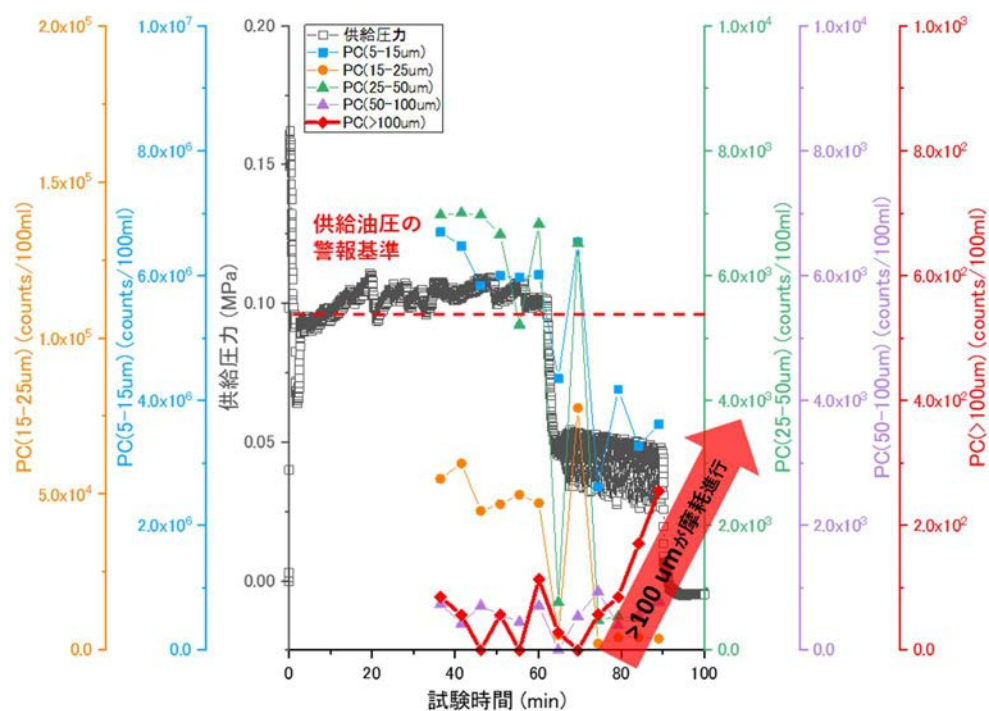


図 1-16 油中粒子濃度の計測結果(摩耗程度: 重度)

b. 試験終了判定

3 回の過酷特性試験では、上記で示した粒径区分ごとの油中粒子数濃度濃度から算出した増加比率(以降、粒度分布比と記す)によって試験終了判定をした。粒度分布比 ΔPC は、式(1)によって求める。 PC_0 は油中粒子が平衡濃度に到達したときの粒子濃度を示し、 PC_1 は平衡濃度到達以降の粒子濃度の各計測値である。 PC_1 を PC_0 で除することで、平衡濃度到達後の粒子濃度の増加比率がわかる。

$$\Delta PC = \frac{PC_1}{PC_0} \cdots (1)$$

PC_0 : 平衡濃度到達時の油中粒子数濃度

PC_1 : 各測定点の油中粒子数濃度

図 1-17 に各試験の粒度分布比 ΔPC と試験後の摺動表面の観察結果を示す。

摩耗程度を「軽度」に想定した No.1 試験では、 ΔPC が 1.5 を突発的に超過する瞬間はあったものの、各粒径区分では顕著な変化は確認されなかった。また、試験後にディーゼル原動機を分解し、クランクメタル、コンロッドメタル等の摺動表面状態を観察したが、局部的に摩耗は観察されたが激しい摩耗状態ではなかった。

摩耗程度を「中度」に想定した No.2 試験では、潤滑油の供給圧力を 0.05MPa へ設定後(試験時間 70min 以降)に、15 μm から 25 μm 区分の第Ⅱレンジ、及び 25 μm から 50 μm 区分の第Ⅲレンジの ΔPC が 1.5 を超過した。試験後の摺動表面では、摩耗程度を「軽度」に設定した試験よりも深い摩耗が観察された。

摩耗程度を「重度」に想定した No.3 試験では、潤滑油の供給圧力を 0.05MPa 以下に設定後、15 μm から 25 μm 区分の第Ⅱレンジ、及び 100 μm 超区分の第Ⅴレンジで ΔPC が 1.5 を超過した。特に 100 μm 超区分の第Ⅴレンジは 4 倍以上となった。試験後の摺動表面では最表面の錫が消失し、錫の下層であるケルメット層が観察された。

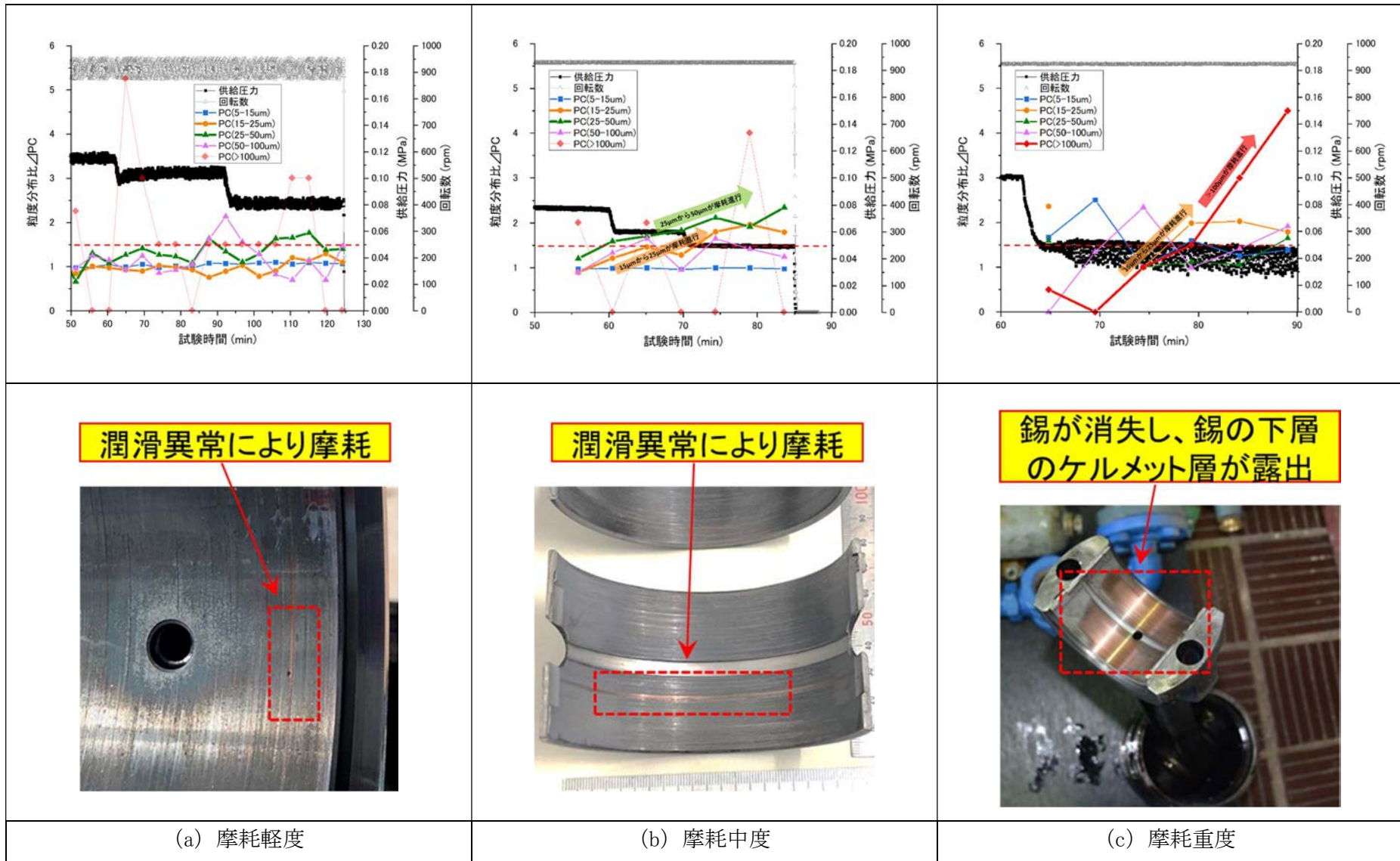


図 1-17 粒度分布比と試験後摺動表面の観察結果の比較

④ 油中粒子の数とサイズによる潤滑状態評価

本試験では、摩耗程度を「軽度」、「中度」、「重度」の 3 段階を想定し、潤滑摺動面に供給する潤滑油量を低減させ、意図的に潤滑状態を厳しくする過酷特性試験を実施した。

その結果、オンラインで油中粒子数濃度を計測しながら潤滑油中の粒子サイズの変化を捉える「粒度分布比」は診断指標として有用であることが確認できた。

しかし、この指標は異常な潤滑状態の検知に適しているものの、潤滑状態の定量的な評価には適していないことから、H30 から R2 年度の研究開発事業で示した計測した油中粒子の数とサイズから摩耗量を推定し、摩擦係数と比摩耗量との関係から各試験の潤滑状態を推定する。

a. 摩擦係数と潤滑状態の評価

お互いに接触する 2 固体が相対運動するとき発生する抵抗力を摩擦力という。この摩擦力を摩擦面に作用する垂直荷重で除した値を摩擦係数という。

摩擦係数のふるまいを示す曲線として、ストライベック曲線^{※4}がある。ストライベック曲線^{※8}では、I. 流体潤滑領域、II. 混合潤滑領域および III. 境界潤滑領域に区分され、それぞれの潤滑領域での摩擦係数の傾向が示される。I. 流体潤滑は摺動二面間が流体膜で完全に隔てられ低摩擦状態の理想的な潤滑形態である。一方で III. 境界潤滑は表面の微細な突起同士が接触し摩擦係数が高くなる潤滑形態である。II. 混合潤滑は流体潤滑と境界潤滑が混在した潤滑形態である。摩擦係数は流体潤滑で通常 0.01 以下、境界潤滑では 0.1 以上とされている。

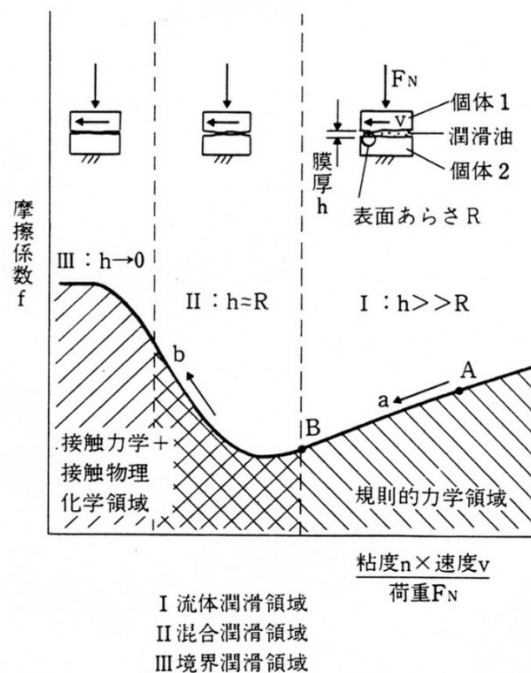


図 1-18 ストライベックカーブ^{※8}

※8 ジュンツウネット 21, ストライベック曲線, <https://www.juntsu.co.jp/qa/qa1613.php>.

b. 比摩耗量

上述のように混合潤滑、境界潤滑領域では突起同士の接触により摩耗が生じ、潤滑油中に摩耗粒子が排出される。この摩耗現象を定量的に示す評価指標として、比摩耗量 Ws がある。

$$Ws = \frac{V}{P \times L} \quad \dots (2)$$

V : 摩耗体積

P : 荷重

L : 摩擦距離

比摩耗量 Ws は摩耗体積を荷重と摩擦距離で除した値であり、構成する摺動二面間の材質、硬さ、潤滑条件によって変化するが、過去の研究事例^{※9}において定常摩耗および低摩耗域では $10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 以下であることが示されている。したがって、比摩耗量が $10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 以上の場合、過酷な潤滑状態が発生していることが想定される。

c. 計算比摩耗量の例

摩耗体積は、計測した油中粒子の数と大きさから想定した。摩耗粒子が球体状に発生することは極稀であることから、粒子体積は、「長さ:幅:厚み」の比を用いて計算する必要がある。ここで、過去に観察した摩耗粒子の寸法から過酷な潤滑状態で発生した摩耗粒子の「縦:横:厚さ」の比が3:10:1とすると、粒子体積は以下の式で計算される。

$$V_{Aspec} = \left(\frac{D}{3}\right) \times \left(\frac{D}{10}\right) \times \left(\frac{D}{1}\right) \times Pc \quad \dots (3)$$

D : 各粒径範囲の油中粒子の平均粒径

Pc : 各粒径範囲の油中粒子の数

荷重は船用ディーゼルエンジン設計に関する文献^{※10}を参考に面圧、軸受直径、幅から算出し、摩擦距離は試験時間とディーゼル原動機の回転数の計測値から算出した。算出したこれら3つの値を式(2)に適用し、計算比摩耗量を求めた。

※9 奥田 聡: 材料の破壊, 摩耗, 劣化の基礎的考え方, 粉体工学研究会誌 Vol.12(1), 1975, p38-50.

※10 大道寺 重磨: 軸受技術の歩み(6)-船用ディーゼルエンジン用すべり軸受製造技術者の体験から-
日本マリンエンジニアリング学会誌 39(4), 2004, p1-11.

d. 計算比摩耗量による潤滑状態の推定

図 1-19 に想定摩擦係数(μ)と計算比摩耗量(Ws)との関係を示す。図中に、過去に試験室で実施した要素試験結果を破線で、本事業の実証試験結果を記号で表し比較をした。

要素試験では摩擦係数を 0.01 から 0.1 以上に変化させ、つまり潤滑状態を流体潤滑から境界潤滑へ遷移させ、上述の方法によって計算比摩耗量を求めた。摺動面で摩耗が発生し始めると($\mu > 0.01$)、計算比摩耗量は $10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$ を超える値を示す。

この摩擦係数と計算比摩耗量の関係図に 3 回の過酷特性試験で得られた計算比摩耗量をあてはめ、潤滑状態を推定した。計算比摩耗量から求めた想定摩擦係数は、No.1 試験では $\mu = 0.023 \sim 0.01$ 以下であり混合潤滑の初期状態、No.2 では $\mu = 0.024 \sim 0.080$ であり混合潤滑状態、No.3 では $\mu = 0.035 \sim 0.117$ で混合潤滑から境界潤滑の領域に分類され、試験後の摺動面の摩耗状態とも合致した。

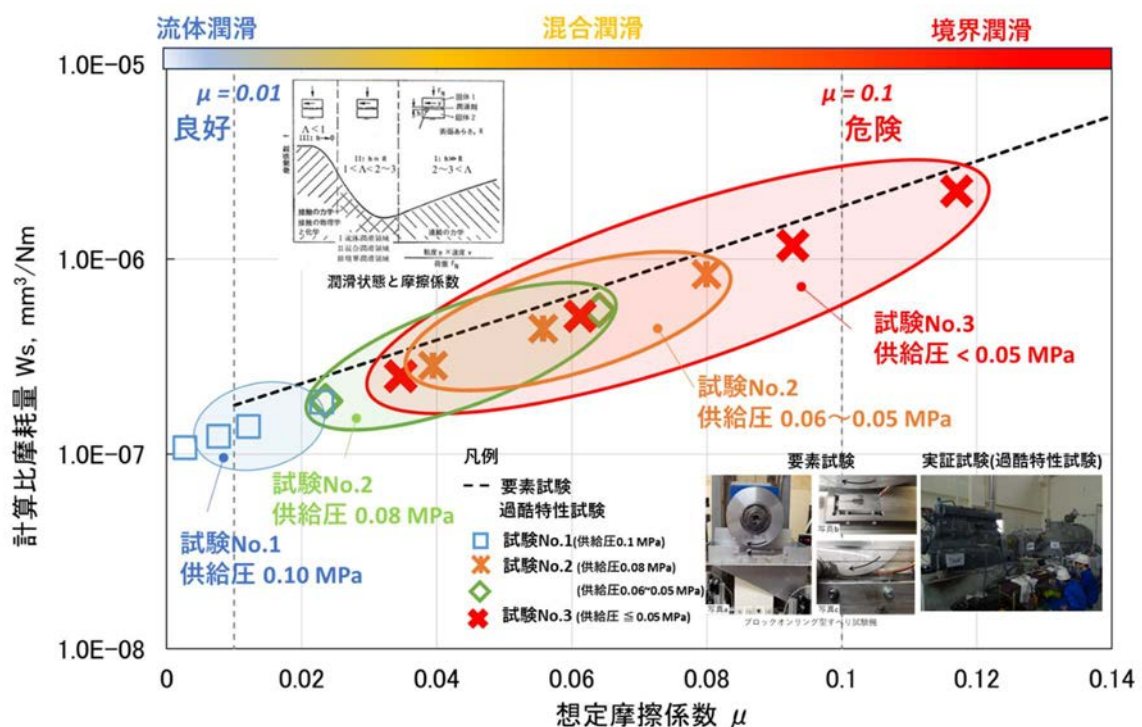


図 1-19 想定摩擦係数と計算比摩耗量との関係

2 事業の成果

2.1 成果の内容

農業用ポンプ設備の実機を用い、各種センサーを設置しオンラインでデータを取得することで以下のことが得られた。オンラインデータを活用することで図 2-1 に示すように農業用ポンプ設備の包括的な維持管理が可能となる。

(1) 農業用ポンプ設備を包括管理する同時多元遠方監視システムの開発

潤滑系の保守データのデジタル化は長年不可能とされてきたが、本取組によりデジタル化が可能となり、農業用ポンプ施設の同時多元遠方監視の社会実装が期待される。

(2) 潤滑状態の健全度評価技術の検証

油中粒子数濃度とその粒径変化を油中粒子計数装置により常時監視し、粒度分布比、計算比摩耗量を活用することで初期の潤滑異常発生を捉えることで、予防保全にとって有用となる。

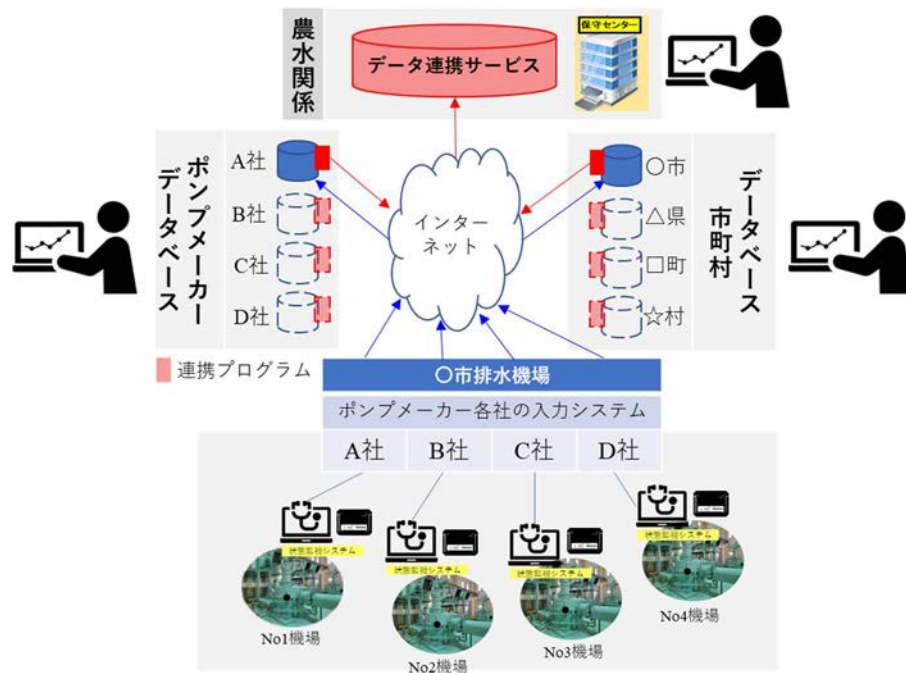


図 2-1 同時多元遠方監視システムを活用した農業用ポンプ設備の状態監視

2.2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

同時多元遠方監視システムを活用し農業用ポンプ設備の状態監視を実施することで以下の事業効果が得られる。

- ・ 保守データの可視化と DX 化
農業用ポンプ設備の潤滑状態をオンライン診断することで、損傷の兆候をとらえ故障を未然に防ぐことが可能となる。
- ・ 可視化した保守データによる CBM と保守費用の合理的削減
突発的な故障による修理費の増加を抑制し、各ポンプ設備の健全度に合わせた計画的な保全により、点検費用の削減が見込める。
- ・ デジタル化した摩耗データによる二次予防
各種センサーから得られるデータを活用することで、ポンプ設備稼働時の状態変化を評価でき、これら蓄積データから故障発生時期の推定も可能とする。
- ・ 保守データのデジタル化による全国保守データの共有化
当該システムの活用により、ポンプ設備の潤滑状態を全国一元管理が可能となり、ポンプ設備の健全度が見える化され、維持管理に対する意識改善と効率的なポンプ設備の更新が可能とする。

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

従来の農業用ポンプ設備の点検は、目視点検や分解点検時の摩耗量計測等を実施する時間計画保全であった。この方法では、ポンプ設備の摩耗評価のため分解を実施せざるを得ない。分解点検費用は高額であるため、現状では 10～15 年に 1 度の分解点検を実施する、あるいは 1 度も実施せずに故障発生後に対応する事後保全 (BM: Breakdown Maintenance) となり、供用年数を目安とした保守・保全に頼らざるを得なかった。

2) 従来技術に対する優位性

本事業では、潤滑状態評価方法の DX 化、各種センサーによるポンプ設備の連続監視による状態評価精度の向上、設備評価基準の高度化を実施した。

施設管理者を含む農業用ポンプ設備の維持管理の関係者は、ポンプ設備の状態変化を非分解かつ遠方地から確認することが可能である。本技術を実装することで保守費用の最適化、予防保全の効率的な運用、保守管理の高度化が期待される。

① 経済性

本研究開発の成果を活用することで、ポンプ設備の不要な分解点検、健全な部品の交換費用、突発的な故障による高額な分解点検費用を低減することが可能である。また遠方地からポンプ設備の健全性を確認することが可能になることで、現地作業費用も削減可能となる。さらにポンプ設備を一括管理することで設備補修の優先順位が明確となり、ランニングコストの低減と設備寿命の延伸化を両立できる。

② 工程

従来の保全手法では、時間を基準にする時間計画保全(TBM:Time Based Maintenance)であるため、点検の意思決定は一定の経過年数や標準耐用年数目安とする点検整備や分解点検であった。しかし、本事業の成果により故障兆候を早い段階で検知することが可能であり、補修・更新予算策定までの期間を確保でき、より計画的に実施することが可能となる。

③ 品質

従来技術では、設備を分解することで摩耗評価を定量的に実施する手法であるが、この手法は手間と時間を要し、また分解による「いじり故障」を誘発する可能性が残る。

新技術では油中に含まれる粒子の数と大きさを活用した診断指標を用い、非分解で設備状態の評価を可能にすることでこれら課題を解決し、ポンプ設備の健全性維持に寄与することができる。

④ 安全性

10～15 年に 1 度の分解点検による従来手法では間欠評価となるため、突発的な故障により設備を稼働できない状況になり得る。新技術ではポンプ設備の機側に設置されたシステムから最短 5 分間隔でデータを取得し、ポンプ設備の不具合の兆候を迅速にとらえることが可能であり、突発的な故障を防止する。これによりポンプ設備の安全性が向上し、結果として現場対応労力の低減と保守の品質向上に繋がり合理的にコスト低減を図ることができる。

⑤ 施工性

新技術では油配管の一部改造を要するが、設備の機側にシステムを容易に設置可能であり、分解点検のような大規模作業を必要としない。

⑥ 周辺環境への影響

新技術は不要な分解点検による消耗品並びに産業廃棄物の発生を抑制し、結果として温室効果ガス(GHG:Greenhouse Gas)低減に寄与する。

2.3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

(1) 適用範囲

ポンプ設備のうち、特にポンプ潤滑部、減速機潤滑部、ディーゼル原動機潤滑部等の潤滑油を用いている箇所に適している。また、回転・摺動する機械要素(軸受や歯車)で潤滑油が用いられている機械には汎用的に使用可能であることから、ゲート設備や小水力発電設備等の状態監視にも適用可能である。

(2) 留意点

診断装置は、油槽に近い場所を選定するなど取付箇所の標準化が必要となる。排油口等の配管を分岐し診断装置への潤滑油の流れを作り出すことは可能であるが、配管箇所の選定次第では、潤滑油が滞留する箇所からのサンプリングとなる可能性もあり、油槽内の発生摩耗粒子の代表性が損なわれる恐れがある。そのため、メーカーや施設管理者から監視対象の図面等を事前に提供してもらい、診断装置の適切な取付箇所を決定する必要がある。

3 普及活動計画

3.1 想定される利用者

国(農林水産省)、都道府県、市町村、土地改良区等の全国の農業水利施設の管理主体

3.2 利用者への普及啓発等の方法

東京ビックサイトや幕張メッセに代表される展示会での宣伝や、農業農村工学会等の関連学会での発表や学会展示会への積極紹介、また技術情報をまとめたカタログの配布、装置の使用手法や判断方法に関するマニュアルの配布、農業農村整備民間技術情報データベース(NNTD)等への登録に加え、農業関連の専門誌への寄稿や農業関連の新聞等への掲載を通じて普及啓発を行う。

3.3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

装置や潤滑状態に関する根拠資料を作成し説明会を実施する。

3.4 特許・実用新案等の申請予定

(1) 申請者予定者

予定無し。

(2) 申請予定時期

予定無し。

4 研究総括者による自己評価

審査の ポイント	着眼点	申請時計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価 の理由 ^{注3}
目標の 達成度	・ 効果 (従来技術に対する 優位性)	・ 遠方地からポンプ設 備を監視するシステム の開発する。	Ⓐ:優れている B:概ね妥当 C:不十分	・ 遠方からポンプ 設備の健全性を 評価可能である ため。
	・ 信頼性 (品質、精度、安全 性、耐久性等)	・ 潤滑状態を非分解で 診断する評価指標の 検証する。	Ⓐ:優れている B:概ね妥当 C:不十分	・ 粒径範囲ごとの 油中粒子を監視 する有用性を実 ポンプ設備で検 証できたため。
	・ 適用範囲・適用条 件等	・ 実ポンプ設備に開発 システムを導入し検証 する。	Ⓐ:広範囲に適用 B:概ね妥当 C:限定的	・ ポンプ設備の潤 滑摺動部を持つ ポンプ軸受・減 速機・ディーゼ ル原動機で確 認できた。
普及の 可能性	・ 想定される利用者 への普及啓発の方 法	・ 展示会、カタログの配 布、マニュアルの配 布、NNTD 農業農村 整備民間技術情報デ ータベースへの登録	Ⓐ:十分な利用が見込まれる B:概ね妥当 C:限定的	・ 技術的には十 分な診断が可能 であるが、現場 でのトライボロジ ーの普及が必要 と考えられる。
	・ 利用者に対するサ ポート体制 (設計・積算・施工等 の参考資料、相談窓 口等)	・ 装置や潤滑状態に関 するサポート窓口を設 置する。	A:十分に整備されている Ⓑ:概ね妥当 C:改善が必要	
総 合 コ メ ント ^{注4}	当初計画目標は全て達成し、技術は確立した。今後は多様な設備と機種に対応可能にするため、早期 の社会実装と診断装置の取り付け箇所の標準化など設備管理者やメーカーとの協業により、ポンプ設 備の健全性評価の改良を継続し実施していきたい。			

注1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注2) 評価結果欄は、A・B・Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入(○付け)する。

注3) 自己評価の理由を記載する。

注4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

(1) 社会実装への取組み

本システムは既存のポンプ設備に直ちに導入が可能であることから、実機と診断システムの接続部の標準化により早期の社会実装が可能となる。

(2) 診断装置の取付け箇所の標準化

完成図書では油槽内部構造が明示されていないため、メーカーあるいは施設管理者の情報提供により診断装置の取り付け箇所の標準化が必要となる。

(3) 診断装置の使用法の研修

本診断装置は、保守データのデジタル化が可能な、いわゆる保守の「見える化」に活用する状態監視システムであることから、各地の現場管理者への説明機会等が必要となる。

(4) 測定装置の小型化

ディーゼル原動機は、燃焼により発生した「すす」が測定の阻害要因になるため、本事業では、オンラインで測定可能とするための自動希釈装置(幅 700×奥行 400×高さ 900 mm)を用いたが、この装置の小型軽量化が課題となる。