

土木機械設備の多様な診断技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：技術推進本部 先端技術チーム

寒地技術推進室 寒地機械技術チーム

研究担当者：藤野健一、梶田洋規、上野仁士、

伊藤 圭、中島淳一

大槻敏行、巖 博、牧野正敏

澤口重夫、平地一典

【要旨】

土木機械設備を代表する排水機場ポンプ設備は、国や自治体を主体に洪水被害防止を目的として管理運用され、水害から国民の生命と財産を守る極めて重要な施設であり、豪雨等による異常出水時に確実な稼働が求められる。

本研究では、排水機場ポンプ設備の維持管理を取り巻く諸情勢や将来展望を踏まえ、維持管理の主流となっている状態監視保全を支える様々な故障診断技術について、実際の管理現場における適用性の検証や異常発生試験による適用性の検証を通じて、幾つかの有用な技術的知見を得ている。本知見は、排水機場ポンプ設備の故障診断技術のレベルアップに寄与するもので、国民の生命と財産を守る行政及び社会的ニーズに貢献するものである。キーワード：土木機械設備、排水機場ポンプ設備、維持管理、状態監視保全、診断技術

1. はじめに

土木機械設備を代表する排水機場ポンプ設備は、水害から国民の生命と財産を守る極めて重要な役割を担っている。また、土木機械設備は「非」常用設備であり、平時は停止しているが非常時には確実な稼働が求められる一方、設置後 20 年を経過する設備が 5 割を超え、老朽化による故障発生や維持管理予算が厳しいことによる修理、定期整備の遅延が懸念され、かつ気象の激化による運転頻度の増加、並びに管理担当者の確保や熟練者による技術の継承が困難など様々な課題を抱えており、より一層の効率的、効果的な維持管理が求められている。

以上の情勢の下、機械の調子を踏まえた修理、整備等を行う状態監視保全は、従来の時間計画保全に比較し、効率的かつ効果的な保全手法であることから、この状態監視保全を中心とする維持管理が主流となっており、それを根本で支えるのが故障等診断技術である。

機械の診断技術は、日々進化しており、様々な分野で、様々な手法が導入されているが、大規模な常用設備であるプラントやジェットエンジンを扱う航空業界がこの分野の主流となっている。但し、稼働の少ない土木機械設備は、「非」常用設備としての劣化特異性や公共事業としての多様性（現場条件毎、各種メーカー毎の個別仕様）から特異現象を対象とする汎用かつ柔軟な診断技術が求められる。

以上の背景が土木機械設備の状態監視を複雑化し

ており、更に監視体制、経費面が常用設備とは大きく事情が異なっていることから、独自の状態監視技術が求められ、ここに本研究の意義がある。

過年度より実施してきた「非常用施設の状態監視保全に関する研究」では、「非」常用系の排水機場ポンプ設備について、振動や潤滑油分析を主体とする状態監視保全技術を展開した中で、現場適用性やその評価手法などは、国土交通省地方整備局で既に試行されている。

しかし、これまでの知見では必ずしも十分ではない面もあることから、本研究では様々な分野の多様な診断技術の現場適用性を検証する中で、より適切かつ効果的な現場適用診断技術を見出し、診断精度や確度の向上を図る研究を通じ、上記の課題解決に貢献するものである。

2. 土木機械設備における維持管理の現状と将来展望

2. 1 排水機場ポンプ設備の老朽化の進行

全国的に設備の老朽化が進行しており、国土交通省所管の排水機場ポンプ設備を例にとると、平成 27 年度末時点での施設数 512 機場（設備数 1446 台）の約 50% が設置後、20 年を経過し、このままでは 12 年後にはその 90% が 20 年経過を迎えることとなる。（図-2.1）

老朽化の進行が故障発生の要因となって、確実な運転確保が危ぶまれる事態に発展する恐れがあることから、これに向けた対策が急務である。

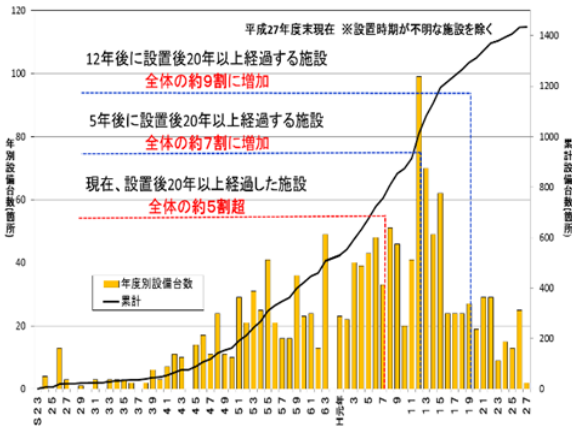


図-2.1 排水機場ポンプ設備台数の推移
(国土交通省提供)

2. 2 維持管理関係費の将来推計

図-2.2 は、国土交通省所管の社会資本を対象に2060年度までの維持管理・更新費を推計したものである¹⁾。2010年度(推計作成時)以降の投資額の伸びが対前年比1.0で推移すると仮定すると2037年時点で維持管理・更新費が賄えなくなる事態が発生する恐れがあり、将来に向けての維持管理費抑制対策が急務となっている。

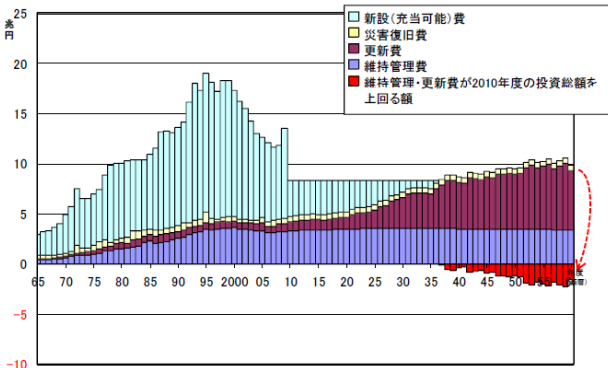


図-2.2 維持管理関係費の推移と将来推計
(第1回社会資本メンテナンス戦略小委員会資料：国土交通省提供)

2. 3 建設業就労者の現状と将来見通し

図-2.3 に示すように日本建設業連合会の推計によると、将来の技能労働者数は建設投資が今後、同規模で推移すると想定した場合、2025年度において、293～315万人が必要との見通しであるが、技能労働者は団塊世代の大量離職等により約130万人が減少すると見込まれるため、77～99万人を新たに確保する必要がある²⁾。

しかし、図-2.4 に示すとおり、若年入職者の確保、育成は喫緊の課題³⁾となっており、解消に向けた取組

みが求められるが、現状では非常に困難な状況であることから、この人手不足を技術力向上による効率化でカバーすることが有効かつ効果的である。

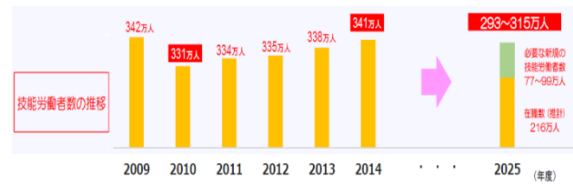


図-2.3 技能労働者数の推移と将来推計
(日本建設業連合会『再生と進化に向けて～建設業の長期ビジョン』)

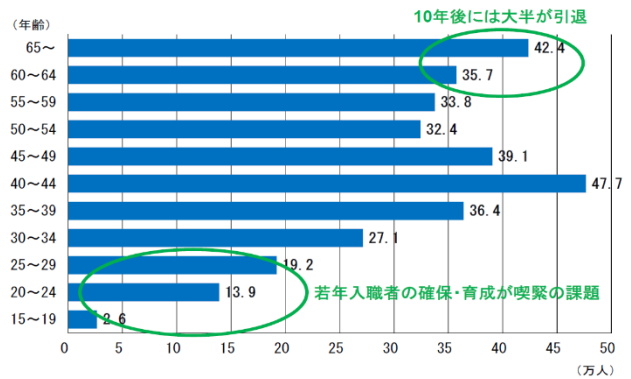


図-2.3 建設就労者数の年齢別分布
(総務省「労働力調査」を元に国土交通省で算出)

2-4 降水量の推移と将来予測

平成27年3月に中央環境審議会により「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について」(以下「気候変動影響評価報告書」という。)が取りまとめられ、環境大臣に意見具申がなされた。気候変動影響評価報告書によると、1901～2013の日降水量100mm以上、200mm以上の日数に明瞭な増加傾向がみられる。降水量の将来予測では、大雨や短時間強雨の発生頻度の増加や大雨による降水量の増加の他、強い台風の発生数、台風の最大強度、最大強度時の降水強度の増加などの予測も示されている⁴⁾。

一方、平成27年11月の国土交通省気候変動適応計画の中でも、時間雨量50mmを超える短時間強雨や総雨量が数百ミリから千ミリを超えるような大雨が発生し、全国各地で毎年のように甚大な水害(洪水、内水、高潮)が発生しているとし、気候変動により、今後さらにこれらの影響が増大することが予測されている⁵⁾。

また、気象庁気象変動監視レポート2016によると、全国約1,300地点の地域気象観測所(アメダス)において観測された1時間降水量(毎正時における前1時間降水量)50mm及び80mm以上の短時間強雨の発生回数(図-2.4, 2.5)、並びに日降水量400mm以上の大

雨の発生回数(図-2.6)を年ごとに集計し、最近41年間の変化傾向をみたところ、1時間降水量50mm以上の年間発生回数は統計期間1976~2016年で増加しており(信頼度水準99%で統計的に有意)、1時間降水量80mm以上の年間発生回数についても、同期間で増加している(信頼度水準99%で統計的に有意)。また、日降水量400mm以上の年間日数についても増加傾向が現れている(信頼度水準90%で統計的に有意)⁶⁾。

以上から、今後も時間当たり降水量やその頻度は増加傾向であることが明らかであり、排水機場ポンプ設備等の稼働時間や頻度の増加は避けられず、稼働の確実な担保はもとより、維持管理のより一層の充実を図っていく必要がある。

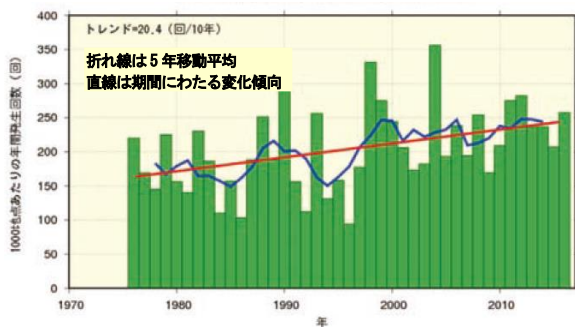


図-2.4 1時間降水50mm以上の年間発生回数

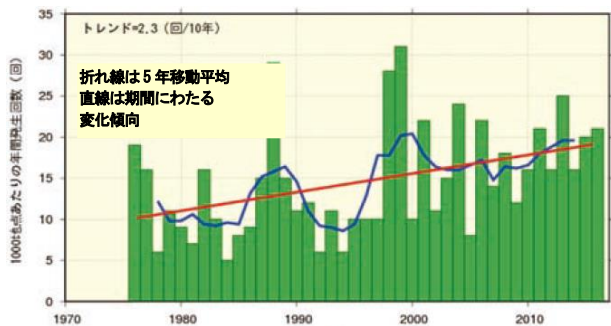


図-2.5 1時間降水80mm以上の年間発生回数

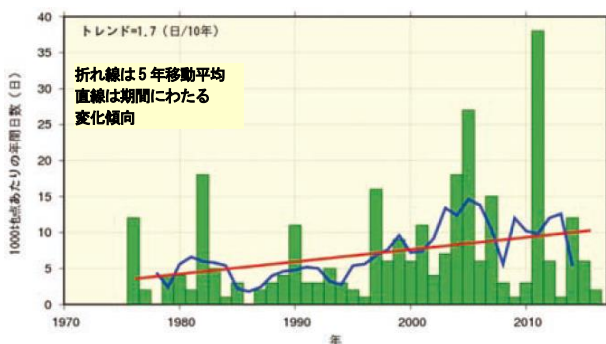


図-2.6 日降水量400mm以上の年間発生日数

3. 排水機場ポンプ設備と故障状況

3.1 排水機場ポンプ設備の概要

排水機場ポンプ設備は、堤内地の浸水被害防止を担う重要な施設である。大雨により本川の水位が上昇すると支川の自然流下排水が困難となる。逆流防止のため水門を閉鎖するが、内水氾濫の恐れが生じることから、樋門を開けポンプを運転して内水を本川側に強制排水する。また、排水機場施設は排水ポンプ設備、機場本体、機場上屋、流入水路、吐出水槽、吐出樋門、自然流下水門の施設で構成されている(図-3.1)。

排水機場ポンプ設備本体の排水規模は、数 m^3/s ~数百 m^3/s と大規模で、複数台の並列配置が基本となっている。設備構成は、主ポンプ設備・主ポンプ駆動設備・系統機器設備・監視操作制御設備・電源設備・除塵設備・付属設備・ゲート設備などである。なお、台風等で施設への電源供給が停止しても支障のないよう自家発電設備を備え、ポンプは原動機により駆動される(図-3.2)。



図-3.1 排水ポンプ施設全体図

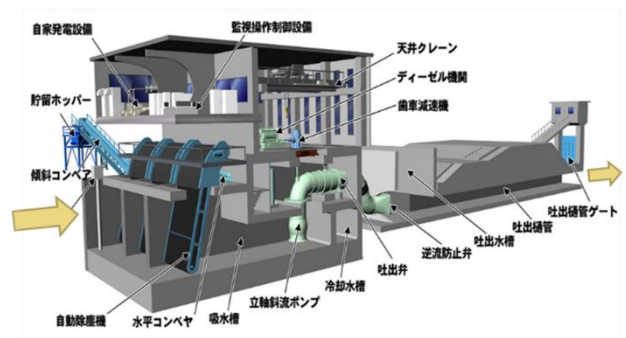


図-3.2 排水ポンプ設備機器構成図

ポンプ形式には立軸型と横軸型があり、ポンプ羽根種別には、軸流、斜流、渦巻きなどがあるが、代表例として立軸斜流ポンプ外観を写真-3.1に、横軸斜流ポンプ外観を写真-3.2に示す。



写真-3.1 立軸斜流ポンプ外観

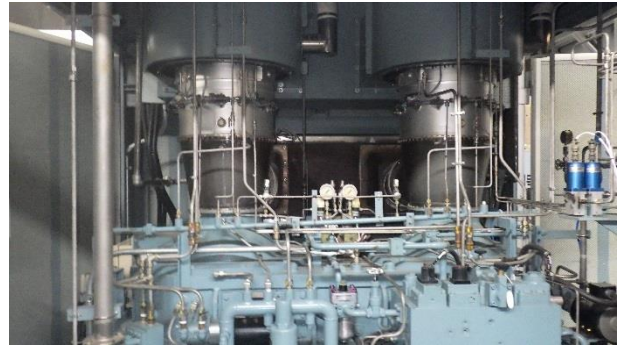


写真-3.4 ガスタービン（立2軸）外観



写真-3.2 横軸斜流ポンプ外観

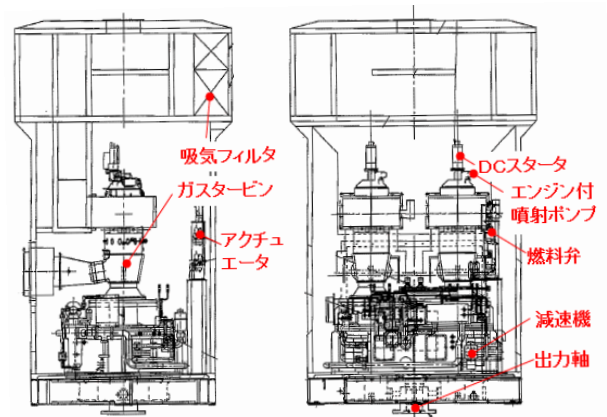


図-3.4 ガスタービン（立2軸）内部構造図

ポンプを駆動するための動力には、主力であるディーゼル機関やガスタービン、電動機が使用されるが、代表例としてディーゼル機関外観を写真-3.3 に、内部構造図を図-3.3 に、ガスタービン外観を写真-3.4 に、内部構造図を図-3.4 に示す。



写真-3.3 ディーゼル機関（V型12気筒）外観

3. 2 排水ポンプ設備の故障状況

国土交通省で直轄管理している排水機場ポンプ設備 1,407 設備（H25 年度時点）を対象に昭和 57 年から平成 25 年度までの 32 年間の報告のあった重大な故障発生件数 285 件について分析を実施したところ、図-3.5 に示すとおり主原動機の故障が全体の 41.3%と最も多く、次いで主ポンプ設備が 16.6%となっており、双方で故障の6割近くを占めている。

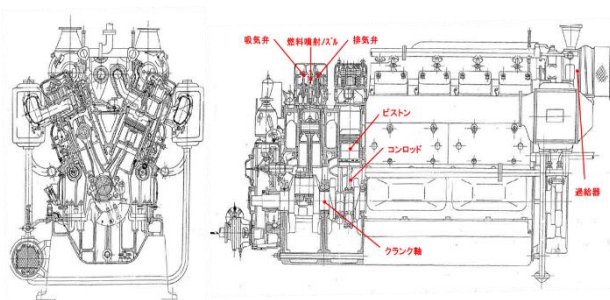


図-3.3 ディーゼル機関(V型12気筒)構造図

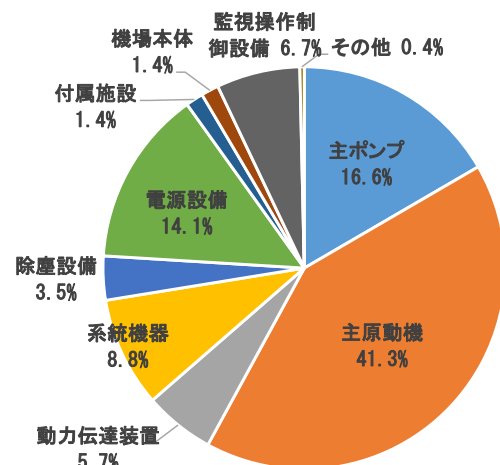


図-3.5 主要装置別故障発生件数の割合

原動機の主力であるディーゼル機関における各系統機器の故障発生件数は79件となっている。機器系統別の内訳は図-3.6に示すとおりであり、特定の系統への偏りはみられない。また、故障パーツレベルでみた場合、燃料配管における高圧管が8件、エンジン内部におけるピストンが7件、ライナーと燃料噴射系の噴射ポンプがそれぞれ5件となっている。その他の大半の故障が様々なパーツに数件毎に分散して発生している。

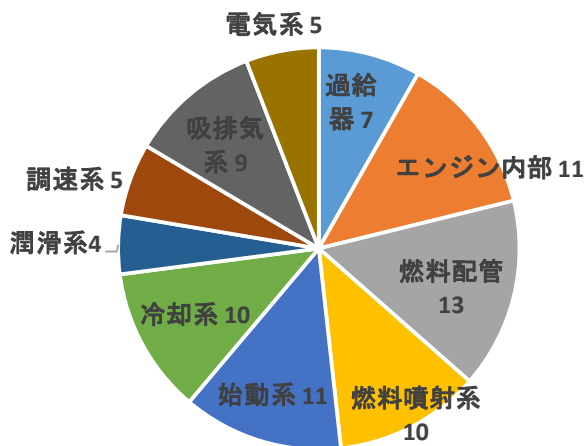


図-3.6 ディーゼル機関の機器系統別故障発生件数

原動機として近年導入が進んだガスタービンの故障発生件数は62件となっている。機器系統別の内訳は図-3.7に示すとおりであり、本体が全体の3割を超え、燃料系と合わせると全体の半数を占めている。一方、故障パーツでみると、タービンブレードが9件と最も多いが、それ以外の大抵の故障が様々なパーツに1~2件ごとに分散して発生しており、故障のターゲットとなるパーツの絞り込みを一層困難にしている。なお、ディーゼル機関とガスタービンの配備比率は7:3であり、配備台数はディーゼル機関が倍以上となっている。

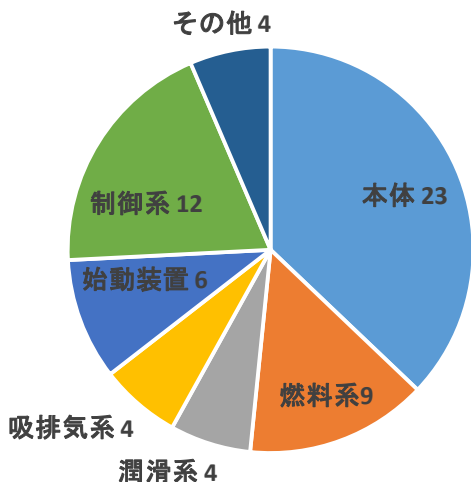


図-3.7 ガスタービンの機器系統別故障発生件数

主ポンプの故障発生件数は47件となっている。機器系統別の内訳は図-3.8に示すとおりであり、水中軸受けが最も多く14件、次いで羽根車7件、吐出弁6件の順となっている。一方、故障パーツでみると、水中軸受けのうちセラミック軸受けが7件と多く、次いで羽根車本体及びその他の水中軸受け（種別判別が困難）が5件、軸封部のメカニカルシールが4件となっている。

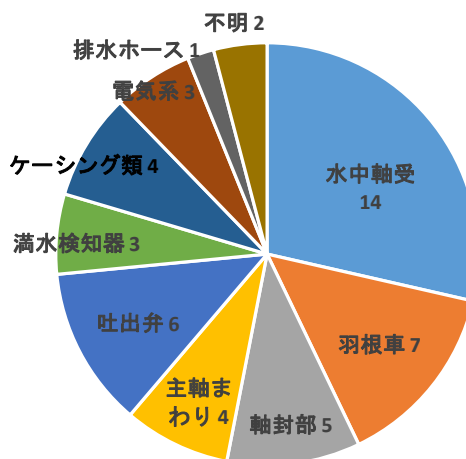


図-3.8 主ポンプの機器系統別故障発生件数

4. 設備診断技術の現状と動向

4.1 診断技術としての保全手法の変遷

多数規模の機械設備を抱える設備管理者にとって、維持費削減及び耐用年数延長は悲願であるが、企業レベルでは、これらに資する保全手法には関心が高く、大きな進歩を遂げている。図-4.1に示すように1940年代頃は壊れたら直す「事後保全」が全盛（第一世代）であったが、稼働停止は大きなコストダウンを招き、損出となることからこれを回避するための「予防保全」（第二世代）が主流となって行った。しかし、不必要なところにも点検、保全対象が及ぶ時間計画保全は、無駄が多く維持経費のコストアップを招く結果となった。

これらの課題を解決できる手法として登場したのが、機械の傾向管理をベースとした第三世代の「状態監視保全」であり、現代のIoT、ビッグデータの環境とも相まって、様々な専門技術が広く展開している。これらの技術は、元々安全やコスト意識の高い欧米の航空・電力業界で先行して導入され、プラントやインフラ業界にも波及している⁷⁾。

	第一世代		第二世代		第三世代		
	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000~
目的	壊れたものの修理		FA・G・M・R・I・向上より低コストで設備寿命延長		FA・G・M・R・I・信頼性・安全性・機器性能向上より低コスト(LCC)効率の追求 設備寿命延長		
保全方式	Reactive Maintenance 事後保全 故障後に保全		Preventative Maintenance 予防保全 故障の発生前に保全		Predictive Maintenance 予知保全 予兆を掴んで故障発生を予知し、高価な次期に保全		Proactive Maintenance 積極保全・改良保全 故障の根本原因を監視、発見し事前に除去 Reliability-centered Maintenance (RCM) 信頼性中心保全 要求信頼性毎に保全手法を適合せしLCCを最適化
方法手段	手作業・入力		Time-based Maintenance 時間基準保全(TBM) 故障有無に関係ない定期整備・修繕(経路、勘に基づく診断によるCBMも含む)		Condition-based Maintenance 状態基準保全(CBM) センサネットワーク・状態監視システムとデータ分析に基づく故障予知診断 故障モードと影響の解析・リスク管理分析 アセットマネジメント 高度ITシステムによるビッグデータ処理 AIによる分析		

出展：ロ・ランド・A・助*

図-4.1 保全手法の変遷

4. 2 状態監視保全と設備診断技術

状態監視保全により設備を効率よく維持、管理するためには対象となる設備の状態を定量的に把握する設備診断技術が必要となる。設備診断技術とは、設備に発生する応力や負荷、故障原因ストレス、設備の劣化や故障の状態、設備の性能や機能を表す運転状態を総合的に評価して異常又は故障に関する原因及び将来への影響を予知、予測し必要な対策を見出す技術である。ISO 13372 では設備診断を設備（機械）の「状態監視」と「診断」に分けて定義している。状態監視(condition monitoring)とは設備の状態を示す情報やデータを検出・収集することを指し、診断(diagnostics)とは異常状態の特性を示す兆候を評価することである。一般的には、両者を総称して「設備診断」と呼んでいる。

図-4.2 に設備診断の基本構成を示す。状態監視の方法としては、設備状態を人間が計測器等を使用して間欠的にチェックする方法（点検）と監視装置により連続的に監視する方法（常時監視）がある。簡易診断はいわば健康診断に相当し、状態監視により設備状態を迅速かつ効率的に把握する手段である。

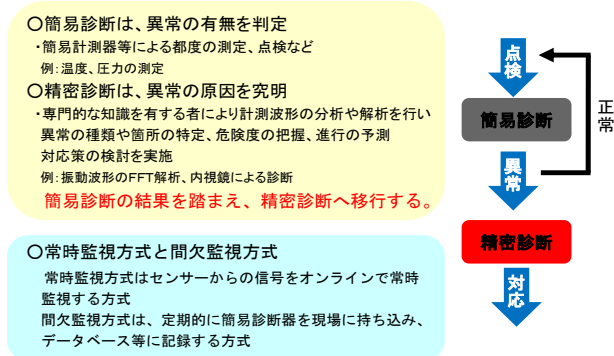


図-4.2 設備診断の基本構成

設備診断には、大別して設備の性能や機能を示す主効果パラメータを利用する方法と設備の運転により発生する二次効果パラメータを利用する方法がある。主効果パラメータは、設備が本来の目的を発揮する際に観測されるパラメータで、ポンプでは吐出圧力や吐出流量などが相当する。主効果パラメータを使用して設備の状態監視をすることを性能監視又は挙動監視という。この方法は、設備に観測センサ自体が組み込まれていて、簡便に把握できるメリットがある。一方、二次効果パラメータは、設備が運転することにより発生する振動や温度など付随的なパラメータをいう。診断のための専用のセンサや複雑な信号処理装置が必要とするなどの手間もかかるが、異常の早期発見、異常の原因特定や部位の把握に適している。

4. 3 排水機場ポンプ設備診断の現状と課題

設備の維持管理には、予防保全と事後保全があることは既に述べたとおりであるが、排水機場のような重要な設備では予防保全により故障を未然に防ぐ必要がある。予防保全には、定期又は稼働時間に応じて行う時間計画保全と設備の状態に応じて行う状態監視保全がある。時間計画保全は、定期的に決められたメニューで行うのが一般的であり、オーバーメンテナンスになる恐れがある。この欠点の解消に向け、国土交通省では、河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル(案)(H27.3)や、特に河川ポンプ状態監視ガイドライン(案)(H30.3)を策定し、維持・修繕経費の抑制が期待できる状態監視保全への移行を推奨している。この施策の技術的基礎となるのが、計測・診断技術である。

排水機場は一般の産業用設備のように常時稼働している訳ではなく、非常時に稼働する「非」常用設備であり、日常的な稼働が少ないため、設備の調子が見極めが困難となっている。月1回の管理運転が唯一の機会となるが、十分な貯水量が確保できないことも多く、軽負荷かつ短時間運転でのデータで診断を行わなければならない、本運転で問題ないかどうかの適正な診断が必ずしも十分でない状況にある。また、ポンプ設備は、公共事業で調達されるケースが多く、設備製造メーカーや機種、年代、容量、現場環境も様々な一品物のため、異常のレベルや症状は千差万別となっている。このような特異な背景から、必ずしも常用設備の技術をそのまま適用できないこともあり、適正な計測、診断をより一層難しくしている。

本研究では、以上の特異性に適用できる現場診断技術が求められている。

5. 設備診断技術の現場適用性の検証

5.1 立軸斜流ポンプ主軸・羽根の異常診断

立軸ポンプ主軸の下端部に装着している羽根は、通常、水没しており直接的な確認は困難であるが、運転時の主軸振動の特徴を捉えることで、損傷が検知できるケースがある。写真-5.1 に渦電流式変位計による立軸斜流ポンプ主軸の変位振動計測状況を示す。渦電流式変位計は、高周波電流により発生した磁界内に金属を介在させると渦電流が発生することから、この電流値が距離に比例する性質を利用して変位を直接計測できる。特に低回転であるポンプ主軸では、汎用で一般的な加速度計データの積分処理による変位への変換では十分な精度は得られないことから、本方式を推奨するものである。

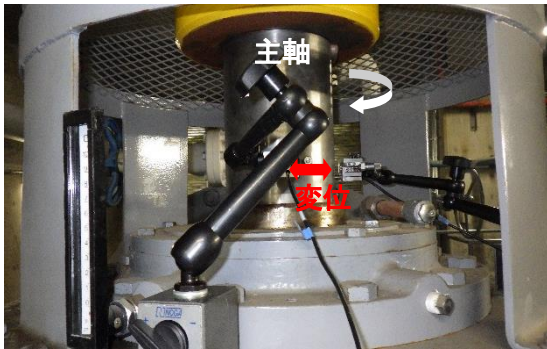


写真-5.1 渦電流式変位計設置状況

以下に同型の立軸斜流ポンプ1号機、2号機について2号機羽根の異常検知事例を紹介する。上記により計測した各号機における主軸の振れの状況を現す変位振幅波形とその周波数分析（FFT）結果を図-5.1～5.4に示す。周波数分析結果から双方の号機共に2つの卓越周波数がみられ、3.5Hz 付近のピークは軸の回転周波数、20.5Hz 付近のピークは、ZN と呼ばれる翼通過周波数（羽根車ブレード枚数と回転周波数の積 6 枚 \times 3.5Hz \approx 20.5Hz）に相当している。ここで、注目すべきは2号機のZNの卓越が顕著であることであり、この場合、羽根の異常を疑う必要がある。現時点では、本知見は十分な検知精度が得られていないことから、疑わしい場合は、これを補完する手段として内視鏡による精密診断を併用するのが効果的である。

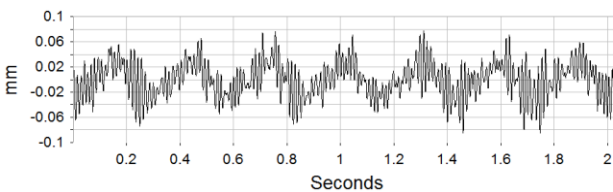


図-5.1 主軸の変位振幅波形（1号機）

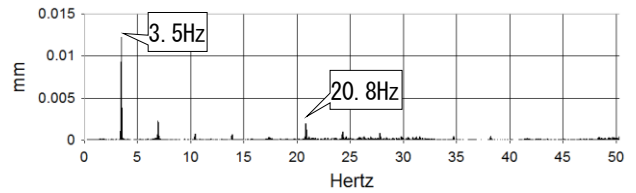


図-5.2 変位振幅波形周波数分析結果（1号機）

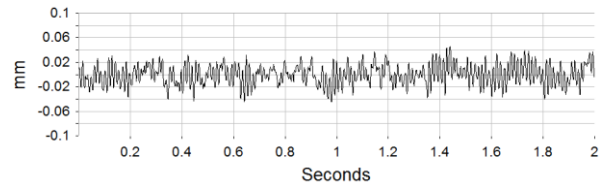


図-5.3 主軸の変位振幅波形（2号機）

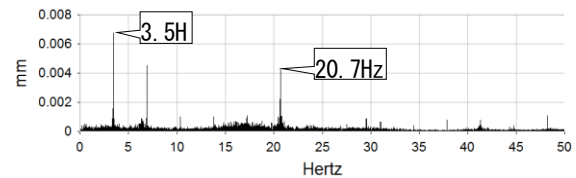


図-5.4 変位振幅波形周波数分析結果（2号機）

以上の結果により、2号機の羽根の異常が疑われたことから、内視鏡による画像診断を実施したところ、写真-5.2に示すとおり、羽根先端部周辺に複数の損傷が確認されている。

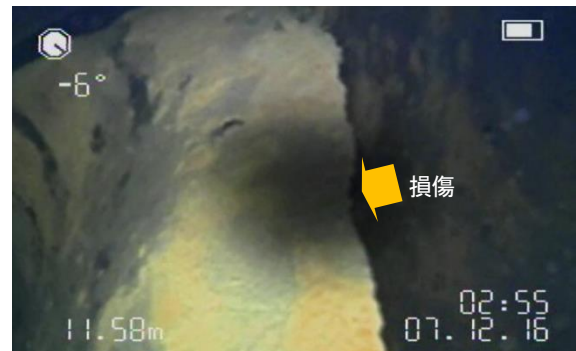


写真-5.2 羽根先端部周辺の損傷状況

以上の手法は、一定程度の費用を要する内視鏡診断の対象絞り込みを可能とし、診断費用の抑制に大いに貢献できる。また、内視鏡診断自体が多大な手間と費用のかかる分解取出し作業をしなくても、内部の診断ができる大きなメリットがある。

内視鏡によるポンプ設備の精密診断は、ビジネスとしては発展途上であるが、一部の企業では事業展開を試行している例もある。水中部の視認について、濁水環境下や長期使用による付着物の沈着のケースでは難はあるものの、上記のように映像により視認できれば本手法は診断上、有効な手段となり得る。

内視鏡診断をする際に、当研究所において気づいた点

を以下の通りとりまとめたが、実用に向けては、いくつかの課題がある。

(1) 内視鏡診断における問題点と提案事項

- ①内視鏡の先端カメラ部を投入する点検口をポンプケーシング側部に装備していく必要がある。(装備していない設備も多い)
- ②点検口は、フランジとパッキンによるボルト締結タイプが多くみられるが、多数のボルトの脱着やパッキン交換が必要となるため、水密確保を担保した上、簡易扉方式等の設置が望ましい。
- ③点検口蓋を元に戻す際は、新品のパッキンに交換するものとし、最終的にポンプを運転して水漏れがないことを確認する必要がある。
- ④点検口はカメラ先端部誘導のため作業者がポンプ吸込口を見通せる視界が確保できる程度の十分な開口広さが必要である。
- ⑤ポンプケーシング内は暗く作業環境が悪いので、カメラ先端部の誘導や映像撮影のため内部全体を照らす別の独立照明（内視鏡カメラ部装備の一体照明では視野が狭く全体を照らせない）が必要である。
- ⑥ポンプ羽根内部へのカメラ先端部投入に当たり、撮影対象箇所へのスムーズな誘導のため、一定程度リジッドな長さ調節可能な案内棒が必要である。
- ⑦カメラケーブルは、羽根端部の確認が可能な十分な延長（立軸の場合は10m以上）が必要であると同時に、カメラ到達位置把握のためケーブルの到達長さがモニタ画面上に表示できる機能が必要である。
- ⑧特に濁水中でのカメラ映像は、視認性が悪いいため、カメラカバーのキズや汚れが著しい視認低下を招くことから、クリアーな状態を絶えずキープ（予備の用意等）しておく必要がある。
- ⑨ポンプ内での測定器具の引っ掛かり等による回収不能や部品離脱、道具落下はポンプの故障原因となり、設備管理者に多大な迷惑を掛けることになるので、作業の際は、慎重かつ細心の注意を払う必要がある。

5. 2 動力伝達軸受及びガスタービンの診断

ポンプ設備は、原動機の動力が減速機を通じポンプ側に伝わることで機能しているが、動力伝達軸はその動力を中継する役割であり、その軸を支えるのが軸受である。運転中、軸受けは軸の回転運動による摩擦や振動に絶えず曝されており、異常時には発熱するケースもある。この異常を検知する場合、携帯型赤外線サーモグラフィは有効である。赤外線サーモグラフィは、

物体から放射される赤外線を検知し、リアルタイムかつ非接触で面的に対象物の温度分布を簡易に計測・記録できる。同時に同じ画角の可視画像も記録されるので、比較する際には便利である。診断に使用した赤外線サーモグラフィの仕様を表-5.2に示す。

今回、診断対象とした動力伝達軸受は同型の1号機と2号機であり、その外観を写真-5.2に示す。

表-5.2 赤外線サーモグラフィ仕様

項目	仕様
熱画像画素数	160×240ピクセル
温度分解能	0.05℃以下
赤外線測定波長	8～14μm
測定精度	±2℃
測定範囲	-30℃～100℃

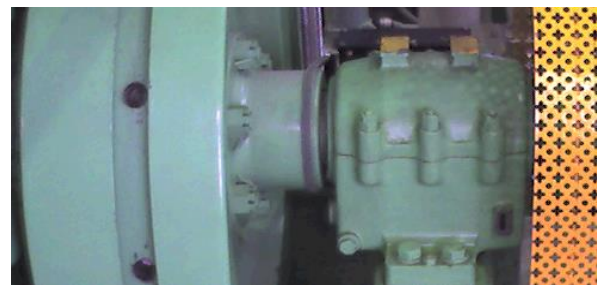
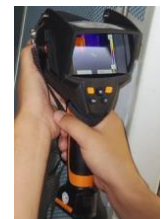


写真-5.2 動力伝達ジャーナル軸受

写真-5.3に1号機と2号機の運転時間経過に伴う軸受ケーシング温度分布の推移を示す。

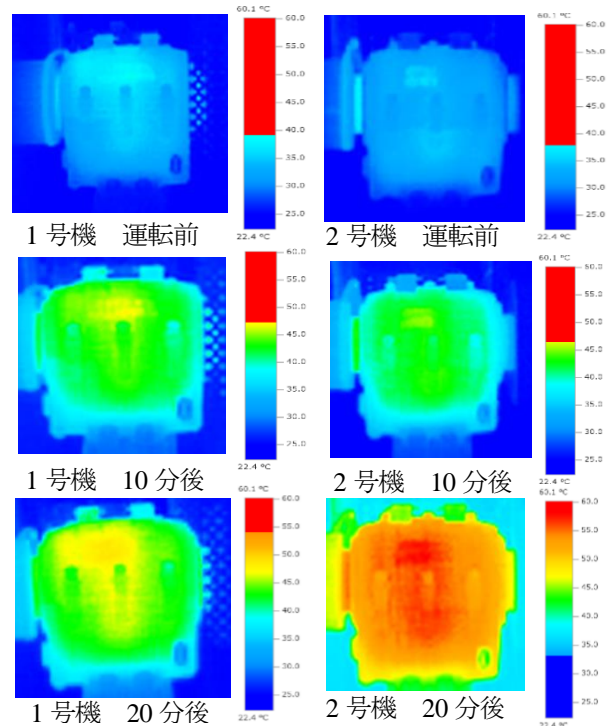


写真-5.3 1号機と2号機の運転時間経過に伴う軸受ケーシング温度分布の推移

1号機と2号機は同様の負荷運転を行っているが、運転10分後から20分経過後の温度上昇に着目すると、1号機は39℃から49℃と10℃の上昇であったが、2号機は36℃から58℃となり、22℃の上昇となっている。従って、10分間で2号機は1号機の倍以上の温度上昇となっており、潤滑油不足や軸回りの異変等（軸のアンバランスや軸受基礎のずれ等）、何らかの異常が疑われる。

次に、ガスタービン燃焼器の診断に赤外線サーモグラフィを適用した事例であるが、同型の立軸ガスタービン410kW、1号機、2号機の燃焼器外観を写真-5.4に、各号機の運転20分後の熱画像を写真-5.5、写真-5.6に示す。1号燃焼器右上部配線直下付近（囲み部分）にホットスポットが認められる。温度は281℃で、ホットスポット周辺温度は150～160℃とその差異は顕著である。一方、同型の2号機にはホットスポットは認められず、周辺温度も1号機と同様であり、遮熱コーティングの剥離など1号機に何らかの異常が疑われる。



写真-5.4 ガスタービン燃焼器側部外観

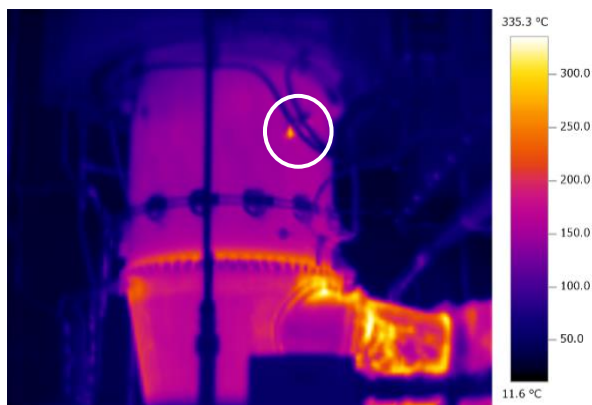


写真-5.5 1号ガスタービン熱画像

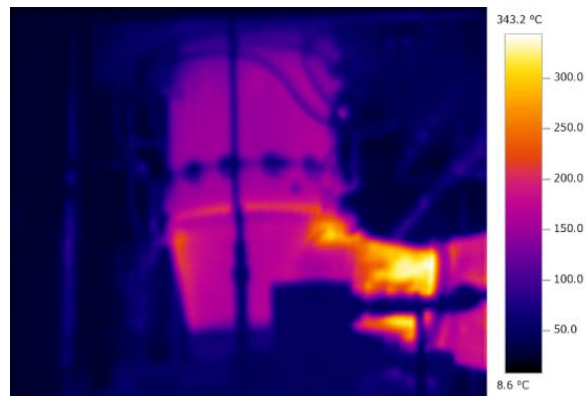


写真-5.6 2号ガスタービン熱画像

5.3 横軸ポンプ減速機の異常診断

減速機は、これまでの確な診断が出来ないケースも一部に見られることが、過年度の研究の報告により顕在化していることから、有効な診断技術の選定・適用の検討が急務となっている。

そこで、低回転である横軸ポンプ設備減速機の状態監視診断の検討を行ったので報告する。

(1) 減速機診断手法に関する検討

排水機場ポンプ設備の減速機（写真-5.7）は、故障が発生すると排水機場の運転ができなくなるため、「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）」では致命的な設備に分類されている。これまでは、目視による点検や時間計画保全による取り替え等の維持管理が行われてきた。排水機場で稼働している減速機は入力1000回転程度、出力120回転程度と非常に低回転であり、加速度計による振動計測が困難な設備であった。そこで、本研究では加速度計、SPM（ショックパルスメソッド）、AE（アコースティックエミッション）の3つの計測器による計測結果の比較を行い、減速機の軸受の状態監視に最適な診断手法の検討を行った。



写真-5.7 排水機場ポンプ設備（左）と減速機（右）

(2) 減速機の診断

減速機は軸受や歯車で構成される機械であり、特に軸受は精度の高い精密部品である。軸受到損傷を受けると、一定の回転数で回転している場合、周期的な振動が発生することが分かっている。損傷箇所別による

周波数は次式で与えられる。

- ・外輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_o = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \times fr \quad (1a)$$

- ・転動体の傷が内輪又は外輪に接触する周波数

$$f_b = \frac{ZD}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \times fr \quad (1b)$$

- ・内輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_i = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \times fr \quad (1c)$$

ここで、 Z ：玉数、 d ：ボール径、 D ：ピッチ径、 α ：接触角、 fr ：軸回転数とする。

上記で得られた周波数を基本周波数として、整数倍の高調波成分等を見ることにより軸受の診断が可能である⁹⁾。

(3) ローター試験機での計測器比較

計測器の比較を行うため、写真-5.8のローター試験機を製作して加速度、SPM、AEの3つの計測器で計測した。ローター試験機はインバーター制御機能によるモータ駆動で、A、B、2つの軸受の間におもりを着脱できるフライホイールを有する構造であり、軸受Aに金属接触による異常状態を再現した。

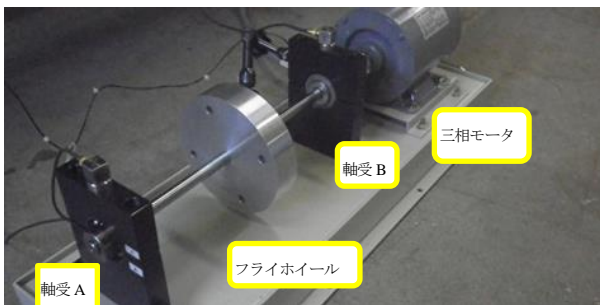


写真-5.8 ローター試験機

① 加速度計による計測結果

はじめに、写真-5.9に示す電子応用社製の圧電式3次元加速度計で計測した。計測結果を図-5.5に示す。



写真-5.9 圧電式3次元加速度計

回転数 1200rpm の周波数解析では、式(1c)より求めた内輪傷に起因する周波数 65.1Hz に近似した 63Hz とその2倍の卓越周波数が現れている。しかし回転数が減るに従い卓越周波数があまり見られなくなり、回転数 200rpm では正常な軸受Bとの違いが判断できない結果となった。

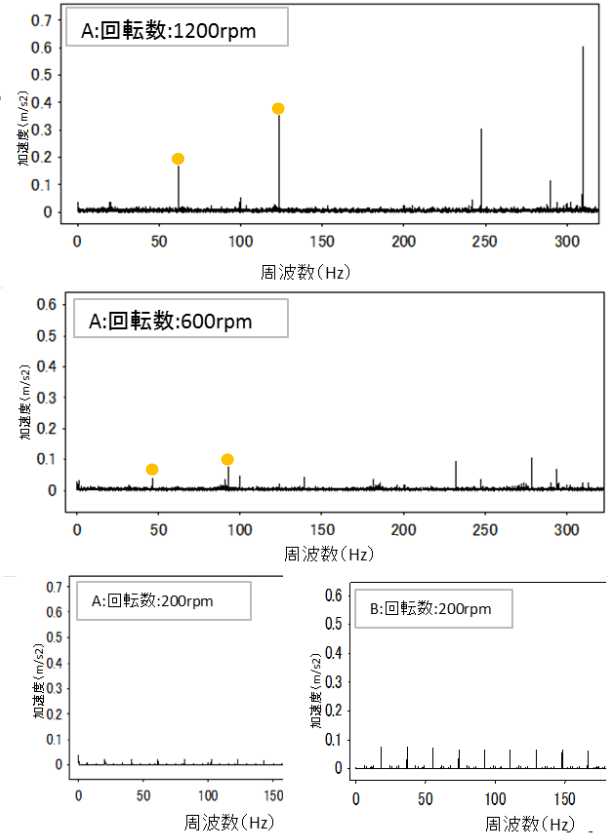


図-5.5 加速度計による周波数解析結果

② SPMによる計測結果

次に同様の条件で写真-5.10に示す SPM instrument japan 社製の SPM計測器で計測を行った。



写真-5.10 SPM計測装置

SPMは、軸受の内外輪と転動体の接触面から生じる衝撃波（ショックパルス）を検知し、状態を診断する技術である。計測には、発生するショックパルスの周波数と共振するように設定した加速度センサを用いる。図-5.6に示すようにショックパルスは金属の接触部から発生し、振動周波数に比べて高い周波数のため、低い回転数であっても接触面が存在するとショックパルスが生じることがわかっている¹⁰⁾。

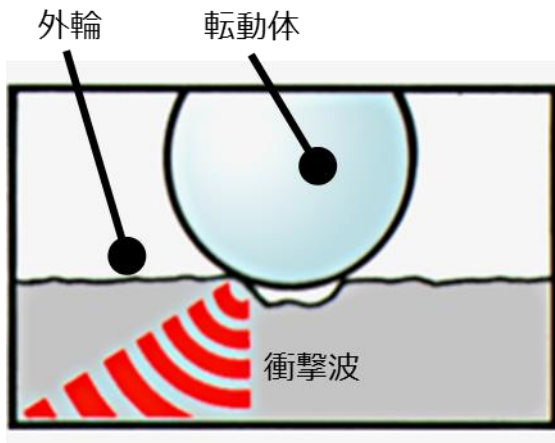


図-5.6 ショックパルスの発生

SPM計測器により回転数1200rpmから200rpmまで計測し、周波数解析した結果を図-5.7に示す。周波数解析の結果から、回転数を減少させても内輪傷に起因すると思われる卓越周波数を確認できた。

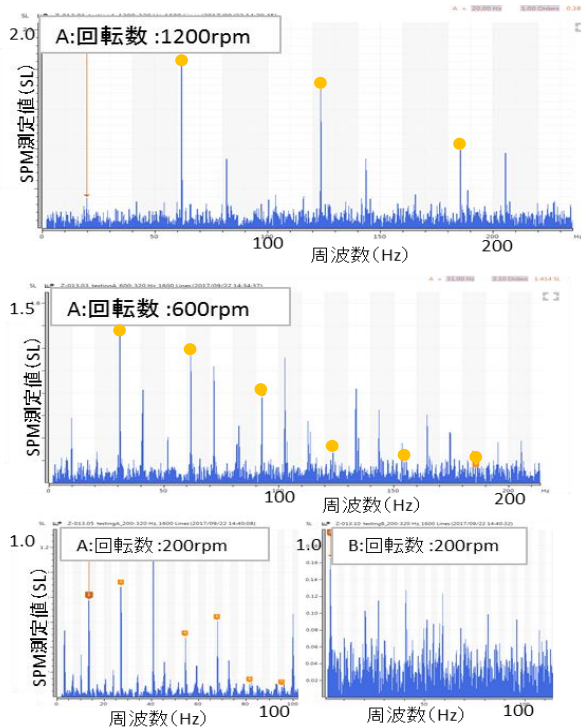


図-5.7 SPMによる周波数解析結果

③AEによる計測結果

AE（アコースティックエミッション）法は、材料が変形又は損傷する際に、蓄えられたひずみエネルギーが弾性波として放出される現象を利用した診断手法である。

AE法は、材料自体の割れや変形から放出される弾性波をAEセンサで捕らえることで、非破壊により異常等が検知可能である。また、AE波の周波数帯域について、可聴域の周波数帯域は、通常20～20KHzであるが、AE波は数KHz～数MHzまでの超音波領域（非可聴域）であり、接触・衝撃、摩擦・摩耗、流体雑音等からも発生するので、これらの発生が想定される設備は診断対象となり得る。AEセンサは、圧電素子の電圧効果（圧電体に圧力が加わるとそれに応じた歪に比例した電圧が発生する）を利用している。

AEセンサでの計測では、写真-5.10に示す簡易型のFirst AE社製AEセンサを用いて、ノイズが主な原因となる2mV以下のAE波をカットして計測を行った。

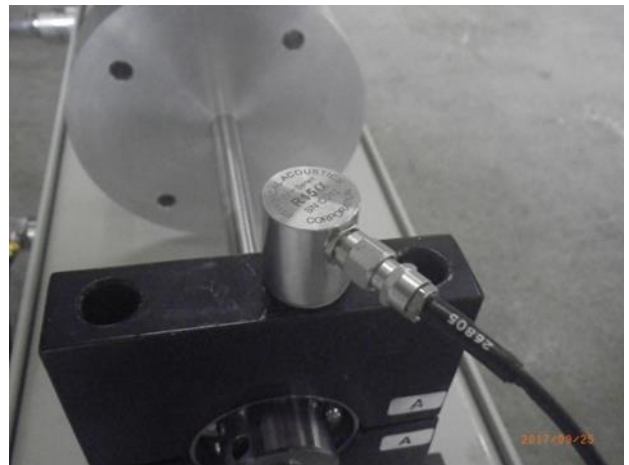


写真-5.10 AEセンサ

今回の計測では、AE波の発生の有無を確認するため、計測のみ可能なAE計測システムを用いた。その結果を図-5.8に示す。横軸は時間、縦軸はAEの実効値（RMS値）を表している。回転数1200rpm及び600rpmでは多くのAE波を計測している。更に回転数200rpmであっても正常な軸受Bと違いが分かる結果となった。ただし、台座の振動やセンサのズレなどでも大きなノイズが発生するため、大きな騒音や振動がある排水機場では、解析する際のノイズ除去方法の検討が必要である。

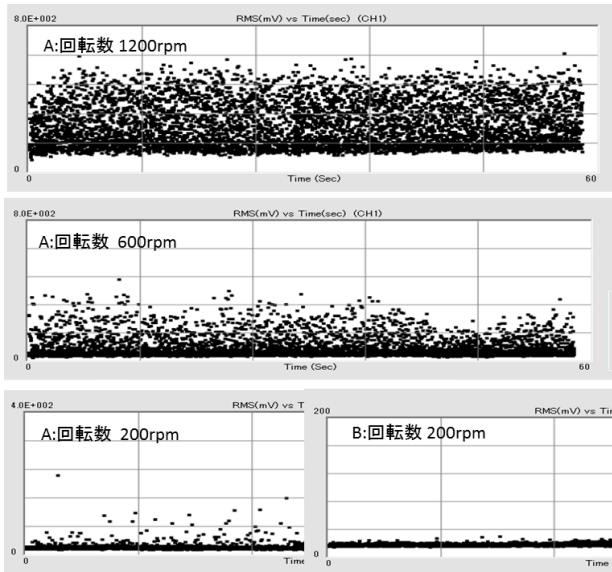


図-5.8 AE計測結果

④軸受の精密評価

計測を行ったローター試験機の軸受Aを分解し、光学顕微鏡(500倍)及び電子顕微鏡(10000倍)で撮影し、内輪、外輪、転動体の表面状態の観察を行った。目立つ損傷が見られた内輪の様子を写真-5.11に示す。

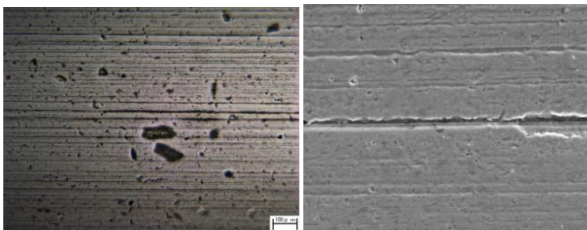


写真-5.11 内輪の光学顕微鏡(左)及び電子顕微鏡(右)写真

光学顕微鏡では圧痕が確認でき、電子顕微鏡では切削摩耗と考えられる $100\mu\text{m}$ 程度傷跡が確認できた。計測結果の周波数解析からも内輪傷に起因する卓越周波数が確認できたことから解析結果と軸受の表面状態が一致する結果となった。

(4) 現場での診断事例

①SPMによる計測結果

ローター試験機の結果を基に、北海道内の設置後40年近くが経過した排水機場において、遊星歯車減速機の診断を実施した。遊星歯車減速機の仕様を表-5.3に示す。

対象の減速機は出力側が159rpmと低い回転数となっており、これまでの加速度計における診断では加速度の値が小さく、周波数解析に苦慮していた設備である。

表-5.3 遊星歯車減速機の仕様

主原動機形式	ディーゼル機関
主原動機出力	228Kw
減速機型式	遊星歯車
減速比	1/6.27
出力側回転速度	159rpm
入力側回転速度	1000rpm

計測の様子を写真-5.12に、計測結果を図-5.9に示す。



写真-5.12 SPMによる計測

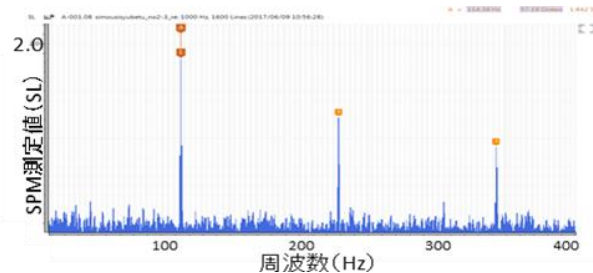


図-5.9 減速機の出力側周波数解析結果

この減速機で発生したショックパルスの周波数解析からは、低回転であっても特徴的な周波数成分が得られた。この軸受の仕様を基に得られた内輪傷に起因する損傷周波数の基本成分と、その2倍3倍の周波数成分があることから軸受の内輪に傷がある可能性が見受けられ、今後の変化を注視する必要がある。ただし、計測ポイントの違いにより解析結果が変わることがあり、特に排水機場は設置場所により設備の形状が違うため、計測ポイントの選定方法の確立が必要である。

6. 設備診断技術の異常発生現場適用性試験

多様な設備診断技術について、適正な設備管理がなされている通常の現場において現場適用性を検証してきたが、限られた期間と設備数という条件下では、ことさら異常に遭遇する機会は得られないことから、機器更新となる設備管理者の協力を得て、故意に軽微な

異常を発生させることで、異常検知の現場適用性試験を行ったものである。

6. 1 対象設備

対象設備は国土交通省地方整備局の直轄管理排水機場ポンプ設備のポンプ駆動用原動機で、出力736Kw(1,000PS)、12気筒、A重油を燃料とする46年経過のディーゼル機関である(写真-6.1)。

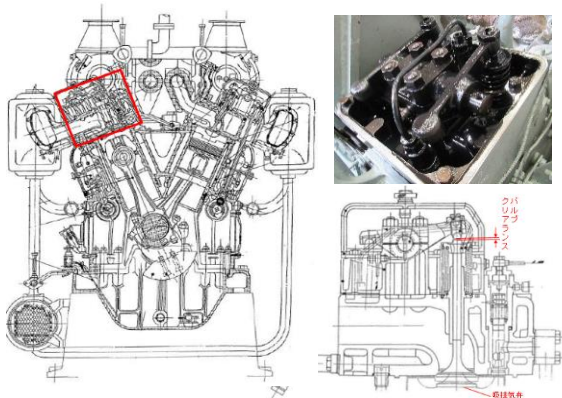


6. 2 ディーゼル機関異常発生試験方法

12気筒中の1気筒(右列先頭)に下記の燃焼系統の異常及び2機の過給機中の1機(右列側)に異常を発生させ、各30分間の無負荷運転状態監視データを取得している。なお、異常の設定については前述3.2の故障発生件数を踏まえ、選定している。

(1) バルブクリアランス異常

シクネスゲージを用いたタペット調整により通常クリアランス0.3mmから0.6mmに拡大し、過多状態を再現(図-6.1)。この措置により燃焼不良による出力低下が想定される。



(2) 燃料噴射ポンプの異常

燃料噴射ポンプのプランジヤの突上げを保持することで、固着を再現(図-6.2)。

この措置により燃焼の噴射が妨げられ、出力低下が想定される。

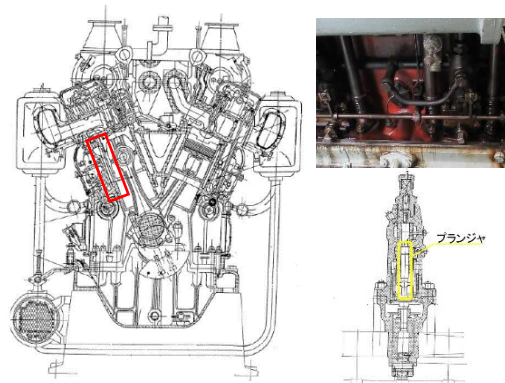


図-6.2 燃料噴射ポンプとプランジヤ構造図

(3) 燃料噴射ノズル異常

噴射ノズル噴射圧をノズルテスターにより通常25.5MPaから13.0MPaへ調整し、ノズルの詰まりを再現(図-6.3)。

この措置により、噴射圧が低下し、噴霧不適正による出力低下が想定される。

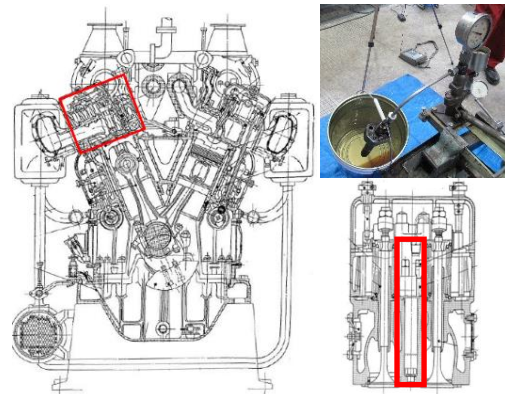


図-6.3 燃料噴射ノズル構造図

(4) 始動弁異常

分配弁を取外し、始動弁を「開」状態に保持し、始動弁が戻らない状態を再現(図-6.4)。

この措置により、再始動不可による出力低下が想定される。

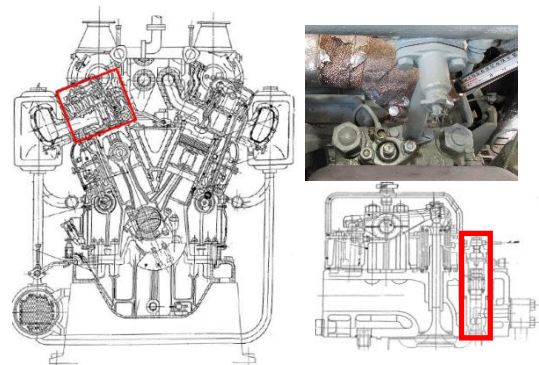


図-6.4 始動弁構造図

(5) 過給機異常

過給機は、左右各6気筒毎に2機装備されており、右列系統一機の潤滑油、4L全量を抜き取ることで、オーバーヒート状態を再現(図-6.5)。

この措置により、過給機の焼付きや機能ダウンによる出力低下が想定される。

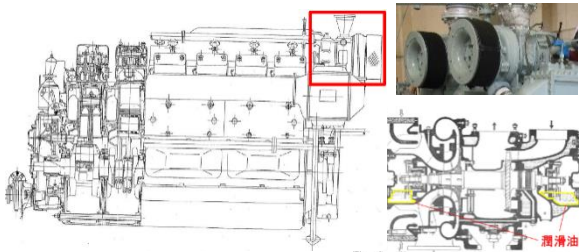


図-6.5 過給機構造図

6.3 AE (アコースティックエミッション) 法による異常診断

(1) AE法による状態監視適用性試験

周波数測定範囲 100kHz~500kHz、受信感度 10dB 以上のAE計測装置により、運転中のディーゼルエンジン基部にマグネット式センサを装着して(写真-6.2)、正常時、異常時の状態監視データを計測(写真-6.3)し、AE波の電圧出力変位波形と周波数分析(FFT解析)による比較を行っている。



写真-6.2 AE センサ設置箇所



写真-6.3 AE 波計測装置

バルブクリアランス異常を図-6.6, 6-7、燃料噴射ポンプの異常を図-6.8, 6-9、燃料噴射ノズルの異常を図-6.10, 6-11、始動弁異常を図-6.12, 6-13、過給機異常を図-6.14, 6-15 に示す。

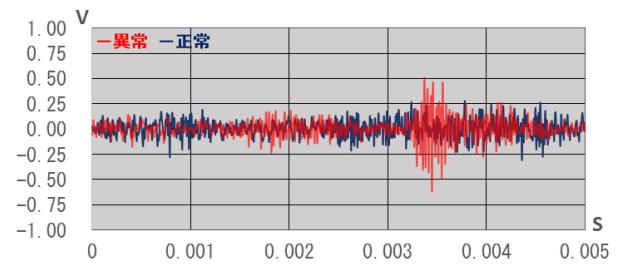


図-6.6 バルブクリアランス異常時の AE 波形

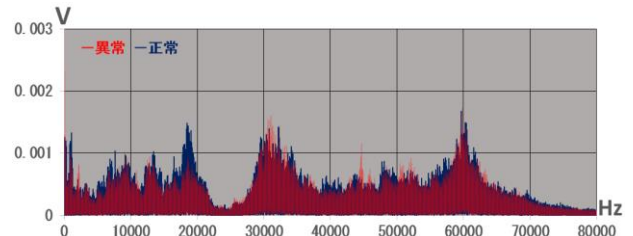


図-6.7 バルブクリアランス異常時の周波数分析

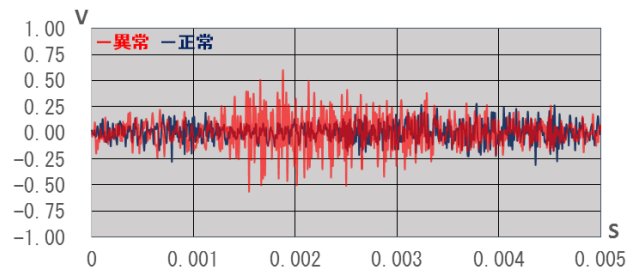


図-6.8 燃料噴射ポンプ異常時の AE 波形

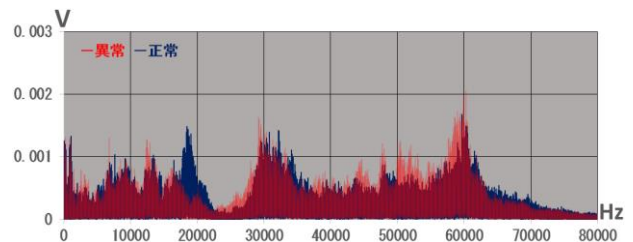


図-6.9 燃料噴射ポンプ異常時の周波数分析

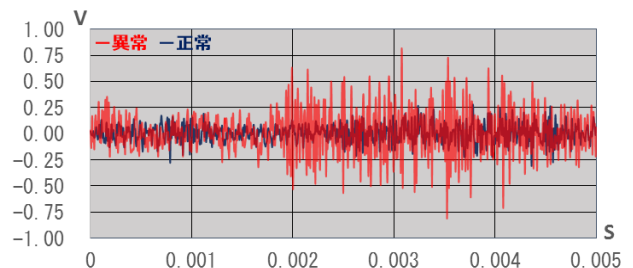


図-6.10 燃料噴射ノズル異常時の AE 波形

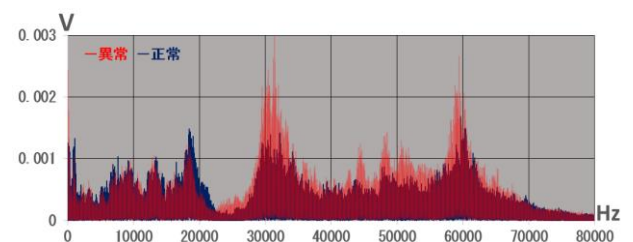


図-6.11 燃料噴射ノズル異常時の周波数分析

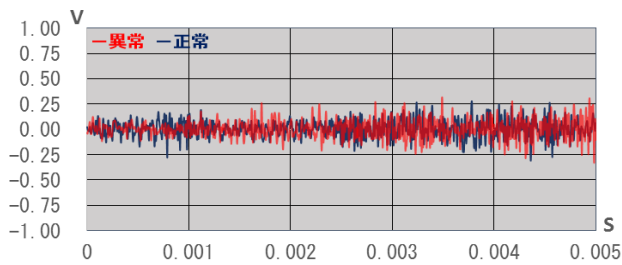


図-6.12 始動弁異常時の AE 波形

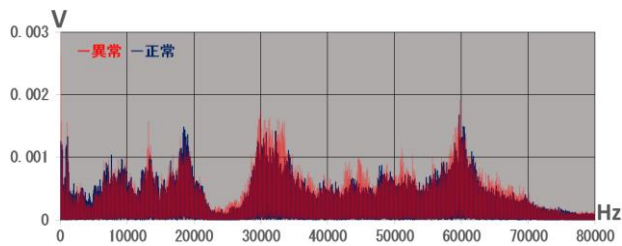


図-6.13 始動弁異常時の周波数分析

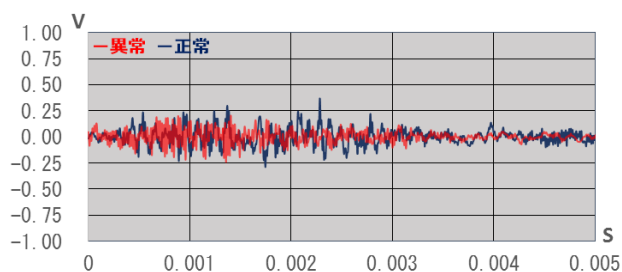


図-6.14 過給機異常時の AE 波形

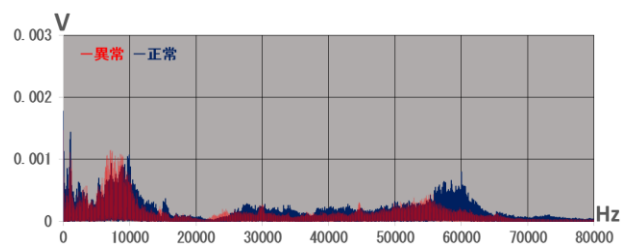


図-6.15 過給機異常時の周波数分析

バルブクリアランス異常については、AE変位波形が正常時に比較し、振幅が突発的に大きくなる現象がみられる。周波数分析では、異常はレベル値が全般に全帯域で正常を下回っているものの、局所的な卓越領域がみられる。特に、45000Hz 付近の卓越は特徴的である。

燃料噴射ポンプ異常については、AE変位波形が正常時に比較し、全体に振幅が大きい傾向が見られる。周波数分析では、異常は正常に比較し、20000Hz 周辺で大きく下回る領域がみられるが、40000～60000Hz では正常を上回る領域となっている。

燃料噴射ノズル異常については、AE変位波形が正常時に比較し、全域で振幅を大きく上回っている。周波数分析では、異常は正常に比較し、20000Hz 付

近までは下回っているが、以降 70000Hz までの高領域では全般に上回っている。特に、30000Hz 付近は顕著である。

始動弁異常については、AE変位波形が正常時に比較し、ほぼ同等の振幅形態となっている。周波数分析では、13000Hz 付近と 30000～70000Hz における帯域内全般で正常を上まわっている。

過給機異常については、AE変位波形が正常時に比較し、振幅が全般に低い傾向となっている。周波数分析では、全般に異常が正常を下回っているが、7000～9000Hz 付近については上回っている。

以上、AE法によりディーゼルエンジンの正常時と異常時における変位振幅と周波数分析についての比較結果を示したが、バルブクリアランス異常、燃料噴射ポンプ異常、燃料噴射ノズル異常については正常と異常の特徴の違いが一定程度認められ、異常の判別が可能と思われる。特に大きな差異が認められる燃料噴射ノズル異常のケースが最も有力であり、今後、異常の程度（レベル）についても診断できる可能性が期待されるので、更なる検証が必要である。

6. 4 排気ガス成分濃度による異常診断

(1) 排気ガス分析計による状態監視適用性試験

排気ガスの温度、排気ガスの成分濃度（CO₂、CO、NO、NO₂、NO_x）が測定できる排気ガス分析計により、独自に新設した排気ガス測定口に測定プローブを挿入（写真-6.4）し、運転中における正常時、異常時の状態監視データを 10 s 間隔で測定、記録している（写真-6.5）。なお、記録データは排気ガス温度と排気ガス成分濃度（CO₂：% CO₂以外：ppm）の相関により、比較を行っている。



写真-6.4 排気ガス測定口と挿入された測定プローブ



写真-6.5 排気ガス分析計と測定・記録用PC

排気ガス温度と CO₂、CO、NO、NO₂、NO_x 各成分濃度の相関を図-6.16~20 に示す。排気ガス温度と各成分濃度とは、一定の相関が認められる。また、全般に排気温度の低い運転初期の段階において、正常や各種異常相互間でデータ格差が大きい傾向にあり、異常判別がし易いといえる。なお、この中で最も異常の判別がつけ易い（異常診断に向いている）成分は、相関が直線的かつ運転終盤の高温域でも相互データ間で差異のある NO₂ といえる。

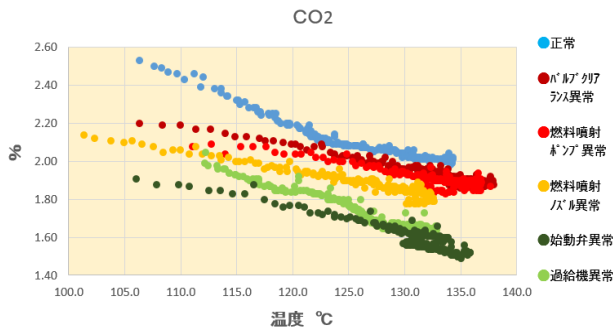


図-6.16 排気ガス温度と CO₂ 濃度の相関

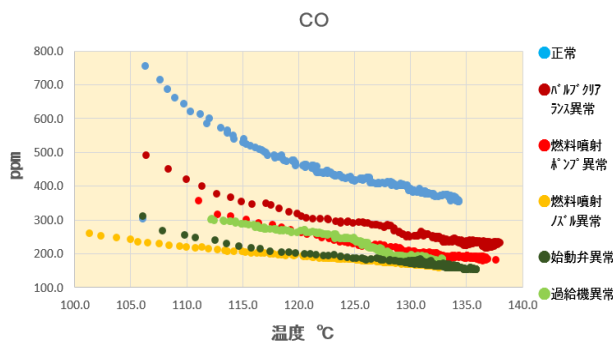


図-6.17 排気ガス温度と CO 濃度の相関

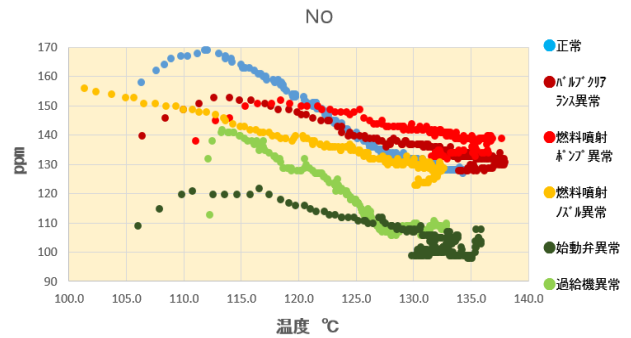


図-6.18 排気ガス温度と NO 濃度の相関

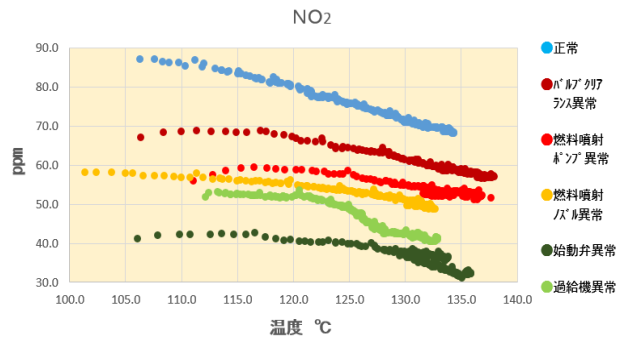


図-6.19 排気ガス温度と NO₂ 濃度の相関

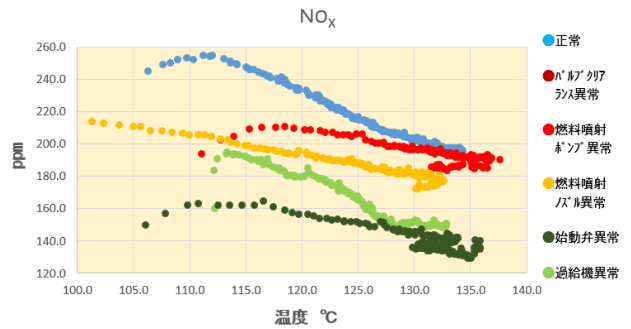


図-6.20 排気ガス温度と NO_x 濃度の相関

今回の無負荷による異常発生状態監視現場適用性試験は、あくまでも以降使用することのない更新対象機器であって、管理現場における本運転の可能性が極めて少ない非出水期（水の確保が困難で、排水負荷運転が難しい時期）という条件の下、実現できた大変貴重なデータといえる。ディーゼルエンジンの無負荷運転は好ましくなく、負荷運転時に弊害が発生する恐れもあり、本来実施すべきでない。ディーゼルエンジンは空気だけを燃焼室に取り込み、自身の圧縮により高温、高圧状態とし、ここに燃料噴射ポンプとノズルの作用により、燃料を微粒子化し、噴霧することで着火させる形態であることから、低負荷時、特に、無負荷時には燃料の噴射率が極端に低くなり、噴霧が粗くなって、未燃焼ガスが発生し易い状況になる。従って、図-6.17 に示すように正常運転でも無負荷運転の場合は、CO 濃

度が高い状況であり、真の正常とはいえないことに留意する必要がある。従って、本来は通常の負荷運転時の状態監視データが有効であるが、実現場における故意の異常発生による検証について管理者の了解を得るのは危機管理上、難しい状況である。

7. まとめ

本研究では、土木機械設備、中でも特に重要な排水機場ポンプ設備を取巻く維持管理の現状と将来展望を踏まえ、設備の状態監視と異常診断技術に関する様々な技術的手法についての現場適用性を検証し、その有効性について以下のような新たな知見を得ている。

- 1) 立軸斜流ポンプ主軸・羽根の異常診断には、渦電流式変位計取得データによる波形解析が有効であるが、中でも羽根の異常特定は難しい分野であることから、疑いを有する場合は、内視鏡による精密診断が効果的である。但し、内視鏡診断には現時点で課題もあることから、その整理と提案を行っている。
- 2) 動力伝達軸受及びガスタービンの燃焼機の異常診断には、赤外線サーモグラフィによる温度分布の比較対照が有効で、特に同型機双方の運転時間経過による相互比較が効果的である。
- 3) 横軸ポンプ減速機の異常診断について、ローター試験機に軸受異常を発生させ、加速度、SPM(ショックパルス)、AE波による診断手法を検証した結果、SPMが有効であった。また、実現場での適用性については今後、計測ポイントの選定方法が定まれば有効な手段となり得る。
- 4) ディーゼルエンジンの燃焼システムの異常診断について、実物によるテストケースではAE法が有効である。但し、本ケースはあくまでも無負荷のケースであるので、管理現場における信頼性確保のためには通常負荷運転による数多くのデータ収集による検証の積重ねが必要である。また、噴射ノズル異常については、正常との差異が顕著であることから、異常の程度(レベル)に踏み込んだ診断ができる可能性があり、この点での検証を進める必要がある。
- 5) ディーゼルエンジンの燃焼システムの異常診断について、実物によるテストケースでは排気ガス温度と成分濃度の相関による比較診断が有効である。但し、あくまでも無負荷のケースであることから、管理現場における信頼性確保のためには通常負荷運転による数多くのデータ収集による検証の積重ねが必要である。

参考文献

- 1) 第1回社会資本メンテナンス戦略小委員会(国土交通省):維持管理・更新費用の将来推計の考え方(試行版)、資料3、1頁、2012/08/29
- 2) 第13回基本問題小委員会(国土交通省):建設業を取り巻く情勢・変化(参考資料)、資料4、18頁、平成28年3月2日
- 3) 第13回基本問題小委員会(国土交通省):建設業を取り巻く情勢・変化(参考資料)、資料4、15頁、平成28年3月2日
- 4) 中央環境審議会(環境省):日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申)、9,12頁、平成27年3月
- 5) 国土交通省:国土交通省気候変動適応計画、7頁、平成27年11月
- 6) 気象庁:気候変動監視レポート2016、43頁、平成29年7月
- 7) ローランド・ベルガー:THINK ACT(次世代メンテナンスの在り方)視点106、3頁、JUNE 2015
- 8) 中島淳一、梶田洋規、藤野健一:河川ポンプの多様な診断、土木技術資料第59巻・第8号、2018
- 9) 豊田利夫:回転機械診断の進め方、日本プラントメンテナンス協会、213-215頁、1991
- 10) 亀井稔:転がり軸受の稼働状態における的確評価の実現、(社)日本プラントメンテナンス協会、第46回設備管理全国大会講演、2006

RESEARCH ABOUT VARIOUS DIAGNOSTIC TECHNOLOGY FOR EQUIPMENT OF SOCIAL INFRASTRUCTURE

Research Period : FY2015-2017

Research Team : Advanced Technology Research Team
Machinery Technology Research Team

Author : FUJINO Kenichi

KAJITA Hiroki

UENO Hitoshi

ITOH Kei

NAKAJIMA Junichi

OUTUKI Toshiyuki

IWAO Hiroshi

MAKINO Masatoshi

SAWAGUCHI Sigeo

HIRACHI Kazunori

Abstract: Pumping equipment for drainage facilities which represents equipment of social infrastructure is managed and operated mainly by the national government and municipalities for the purpose of preventing flood damage, and is extremely important facilities to protect the lives and property of citizens from flood damage, and is requested to operate reliably in case of abnormal water volume due to heavy rain etc. In this research, it is based on various situations and the future prospect which surround the control of maintenance of pumping equipment for drainage facilities, In a condition-based maintenance which is the mainstream of maintenance and management using the trouble diagnosis technology, I got several useful technical knowledge through inspection of application properties in an actual management place and inspection of application properties by an abnormal outbreak test. This technical knowledge contributes to improvement in the trouble diagnostic technology of pumping equipment for drainage facilities, and contributes to the administration and social needs of keeping a national life and property.

Key words : equipment of social infrastructure, pumping equipment for drainage facilities maintenance and management, condition-based maintenance, diagnostic technology