

戦-5. 河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮したマネジメント手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 17～平 20

担当チーム：先端技術チーム

研究担当者：山元弘、田中義光

【要旨】

高度経済成長期以降、社会資本として設置されてきた様々な機械設備は、老朽化が進行しつつある。これに伴い、信頼性の確保と増大する維持管理費の縮減が大きな課題になっている。本研究は、河川ポンプ設備を対象として、これまでの点検や修理に関するデータを基に、ライフサイクルコスト（LCC）と設備の信頼性を解析し、維持管理の方法と設備の信頼性の関係を明かにし、信頼性と経済性を考慮した効果的な維持管理手法を提案するものである。また、設備の長期的な管理に必要なデータベースシステムのデータ項目と機能を提案する。

キーワード：ポンプ設備、FMEA、FTA、信頼性、維持管理、データベース

1. はじめに

昭和30年代以降の高度成長期において、急速に建設されてきた多くの機械設備は、近年老朽化の時期を迎え、今後更新費や維持管理費の増大が予想される。一方、社会情勢から予算規模の縮小が課題となっており、社会資本の維持管理コストも縮減を求められているのが現状である。

排水ポンプ設備などの非常用設備は、頻繁には運転しなくても、必要とされる時には必ず動作することが求められており、設備の信頼性評価に基づいた経済的かつ合理的な維持管理方針の検討が急務となっている。

また、継続的に設備の信頼性を確保しつつ適切な維持管理を行うため、データベースシステムの構築および効率的な保全手法の確立が必要となっている。

本研究では、河川ポンプ設備の特徴を勘案した上で、LCC と信頼性の関係を明確にし、効果的な維持管理手法と構築すべき維持管理データベースのデータ項目及び必要機能を取りまとめる。また、河川ポンプ設備に導入すべき状態監視保全技術の具体案についても提案する。

2. 研究目標

本研究の達成目標を以下に示す。

- 1) 河川ポンプ設備の信頼性の適切な評価手法を策定する。
- 2) 各設備要素の故障率と、システム（河川ポンプ設備全体）の信頼性の関係を解析する。
- 3) 点検・修理等の実施内容とシステム信頼性の関係を解析する手法を提案する。

- 4) 維持管理データベースのデータ項目と活用方法を提案する。
- 5) 状態監視機能の効果的な活用方法を提案する。

3. 研究計画

本研究は、次のとおり実施した。

- 1) 品質管理・安全管理手法の調査
当所において平成2年度及び平成13年度にとりまとめた排水機場の信頼性評価手法の課題を示すとともに、原子力発電所、鉄道運行システム、航空機など、信頼性が非常に重要なシステムの品質管理・安全管理手法を調査し、適用性を検討する。
- 2) 信頼性評価手法の見直し
前項の評価手法を適用することを前提にして、実際の維持管理データから、必要な項目を抽出し、これまでの信頼性評価手法を見直す。
- 3) LCC 評価手法及び信頼性評価手法の関連性検討
固有の河川ポンプ設備の維持管理データから得られた故障、稼働時間、維持管理費の各データを基に、機器毎の故障率の算定、設備の信頼性評価、維持管理費の推移、設計 FMEA を用いた技術改善の提案などを実施し、現場で活用できる経済性と信頼性を勘案したマネジメント手法を提案する。
- 4) 維持管理データベース機能仕様書作成
前項までの検討結果を基に、データ収集機能、品質管理、安全管理のマネジメント機能を具体化し、仕様としてまとめる。
- 5) 状態監視保全の検討

近年導入されている運転支援装置は、運転中に主ポンプ設備及び主ポンプ駆動設備の故障モードを検出し、警報の発報や対応策を提示する機能を有している。本研究では、これらのデータを設備の傾向管理に活用できるか検討を行うとともに、最適な状態監視保全手法を検討・提案する。

4. 研究内容

4.1 品質管理・安全管理手法の調査

4.1.1 既存手法の概要と課題

土木研究所では、機械設備の信頼性評価手法として FTA(Fault Tree Analysis)及び FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)を併用している。

平成2年には、全国の機場の故障データを基にこれらの解析手法を駆使し、点検整備の有用性を一般論として示したが、固有機場の維持管理に活用する解析手法としては普及しなかった。

現状における課題としては、1)技術革新に伴い設備構成に変化が生じていること、2)様々な固有のポンプ設備へ適用する具体的な解析手法がなく、実務レベルで活用されていないこと、等を挙げることができる。

4.1.2 他分野における事例調査

他分野における品質管理・安全管理手法を調査した結果、原子力、鉄道、航空分野においても、構成機器とシステム全体の信頼性を総合的に評価できる FMEA 及び FTA が採用されていることが分かった。

4.2 信頼性評価手法の見直し

4.2.1 FMEA の実施

平成18年度に、過去の調査において技術的な過渡期にあったため盛り込まれていない機器（一次冷却方式、管内クーラ、ゲート設備におけるラック式開閉装置など）を検討に追加した。また、実際の河川ポンプ設備への適用性を向上させるため、主ポンプ原動機形式の違いに基づいてパターン分類を行い、FMEAを行った。

パターン分類は、全設備分類の80%を網羅できる次の9パターンとした。

- 1) 水冷DE^注（二次冷却）＋水冷減速機（二次冷却）
- 2) 水冷DE^注（二次冷却）＋水冷減速機（一次冷却）
- 3) 水冷DE^注（一次冷却）＋水冷減速機（一次冷却）
- 4) 水冷DE^注（管内・水槽内クーラ）＋水冷減速機（同冷却）
- 5) 水冷DE^注（ラジエータ）＋空冷減速機
- 6) 空冷DE^注＋空冷減速機
- 7) 水中モータ
- 8) ガスタービン（横軸）

9) ガスタービン（立軸）

注：「DE」はディーゼルエンジンを示す。

さらに、平成19年度に固有機場の故障データを基に故障内容、故障モードの定義、凡例を実用的に見直した。FMEAの手順を以下に示す。

手順1【構成機器の分類】

河川ポンプ設備を構成する「設備」「機器」「部品」を、「揚排水ポンプ設備設計指針（案）同解説（社）河川ポンプ施設技術協会編）を基に分類し、機器コードについては、（財）日本建設情報総合センター「工事完成図書」の電子納品要領（案）機械設備工事編」を準用する。

手順2【故障モードの抽出】

部品レベルで想定される故障モードを抽出する。これまでの点検データでは、故障モードの定義が曖昧であったため、「故障を引き起こす最小単位の物理学的な変化」と定義し、主な構成機器毎に擬態的事例を抽出した。

「故障」は、JIS Z 8115に基づき、機能の喪失であることを明確化した。

手順3【故障発生頻度の入力】

一般的な FMEA では、構成機器単位の安全性評価や改善要否の検討を行うため、故障発生頻度を10点法や4点法など実用的な尺度で行うことが多い。本手法では、技術的な判断がしやすい4点法を採用する。故障発生頻度は、当所の「機械設備の信頼性評価に関する調査研究（第二報）」（平成13年2月）において集計した1989～1997年の全国故障率データを基にし、4段階に区分した。

なお、部品故障率は、排水機能に影響のあった故障を対象として算出しており、初期故障、偶発故障、摩耗故障の全てが含まれた確率である。

手順4【故障等級の算定】

本手法では、部品レベルの故障がシステム全体に与える影響度、故障検出の難易度、発生頻度を評価するとともに、それらの積の三乗根を故障等級とした。

構成部品に発生しうる故障モードを列挙し、全国平均の故障発生率を基に実施した FMEA の結果、故障等級が高い一部の部品を表-1に示す。（水冷ディーゼルエンジン（二次冷却）＋水冷減速機（二次冷却）を対象、以下「パターン1」という。）

4.2.2 「故障」と「故障モード」

点検結果を基に、機器の故障率計算、故障原因の特定、さらには技術改善検討を行う場合、故障内容と故障モード及びその原因を明確にすることが非常に重要である。

一般論として故障モードの定義は曖昧な傾向があり、これまでポンプ設備の点検整備報告書でも、故障モード

と故障を混同している場合も散見される。主原動機では、「過速度」「潤滑油圧異常低下」等が機能の喪失を示す「故障」であり、センサ配線の「断線」、潤滑油ポンプの軸受「破損」「発錆」等が「故障モード」となる。従って、「発錆」等の故障モードだけ記載がある場合、発錆だけ発見したのか、それに伴って機能が影響を受けているのか後に判定できない。

故障内容を明確にすることで、システム全体への影響度を定性的に把握することができ、故障モードを明確にすることで、どのような物理・化学的变化に対して対策をとるべきかという技術改善検討に役立てる事ができる。

また、現場における点検員は、「故障」を未然に防ぐために、要因となりうる「故障モード」を発見し、管理者へ対策を要求する場合がある。この行為は、故障率を低下させる点検作業の効果であり、故障を発見した場合は明確に差別化する必要がある。

本研究では、過去の故障事例から部品毎に代表的な故障と故障モードを抽出し、FMEAシートに明記することで課題解決を図った。

4.2.3 FT図の作成

FMEAの結果を基に、4.2.1項に示す9パターン¹⁾のFT図を作成した。機器・部品の構成は現状の実態に合わせて見直した。平成13年にとりまとめた全国集計データから、故障等級の大きい部品（主ポンプの羽根車、水中軸受け、主原動機の始動空気配管、系統機器のポンプ類など）を抽出し、FT図に必須事項として盛り込むものとした。FT図の作成には、ツリー構成に応じたブール代数計算を行う必要がある。本研究では、ツリーの簡素化を検討したが、主要部品の故障がシステムへ与える影響を把握できる分解能は必要となる。FT図作成業務の簡素化を図るため、平成20年度に専用ソフトウェアRelix社「Reliability Studio」を導入した。

パターン1における、F機場の集計例を図-1に示す。本研究では、平成13年の故障調査データから得られた部品故障率を用いてFTAを実施し、固有機場のアンアベイラビリティを評価できるようにした。複数の機場のアンアベイラビリティを比較することで、機場の形式の違いによる信頼性レベルを相対的に比較できる。

4.2.4 LCCと信頼性の関連性評価手法検討

平成20年3月、国土交通省は「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」の運用を開始し、設備の点検、評価、整備・更新等の新しい手法を導入した。

そのなかで、河川ポンプ設備及びゲート設備を対象にした構成機器単位での耐用寿命の平均値を明かにすると

ともに、累積ハザード法等を用いて、信頼性確保の面から望ましい更新時期を指標として示している。(時間計画保全)このように定量的なデータに基づく維持管理手法においては、FTAは重要なツールとなる。

老朽化した河川ポンプ設備が増大すると、多くの機器・部品が同時期に時間計画保全上の耐用年数を迎えるケースが想定される。現場における修理・更新の判断は、予算とシステムの信頼性を総合的に評価して行わなければならない。FT図が整備されていれば、更新時期を迎える構成機器の優先順位の判断指標となりうる。逆に、構成機器・部品のLCCデータが整備されると、各機場単位でポンプ設備の信頼性が時間経過とともにどのように変化するかを把握・評価することも可能となる。

本研究では、固有機場の維持管理に活用する手法を提案するため、維持管理情報の保存状態が良好である6機場のデータを基に、LCC及び信頼性の解析を実施した。信頼性評価を行った各機場の形式及び経過年数を表-2に示す。

F機場は、排水機場と導水機場(常用設備)の機能を有する。6台のうち5台は常用ポンプ設備として原動機を電動機に切り替えて使用するシステムである。本解析では、固有機場の部品毎の故障実績を、点検中に発見したものと、実運転の起動時及び運転中に発生したものに仕分けした。点検中に発見したものと及び運転中に発生した故障の発生率は、本来当該機械が有する故障率である。

さらに、実運転時に起動しない、或いは運転が停止する故障(重故障と定義されるものを含む)が機場全体のアンアベイラビリティに寄与する故障率であり、この差を点検効果として説明できる。また、固有機場では、繰り返し故障している部品があればそれが「弱点」と考えられ、設計FMEAによって技術改善を図る対象となる。

1)故障情報の整理

表-2に示す各機場について、年度毎に点検整備報告書から故障情報を拾い出した。各機場の故障データ整理に当たっては、前述のとおり故障内容、故障モード及び故障の原因を明確にするとともに、次の項目に留意した。

- ①故障を発見した時の状態(点検時、運転時)
- ②故障年月
- ③故障した機器の属する系統(号機)

戦-5 河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮した
マネジメント手法に関する研究

表-1 主ポンプ設備のFMEAシート事例(ケース1)

機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	A ※	B ※	C ※	故障等級 (致命度)	対策	
										復旧までの 所要時間	内容
主ポンプインベラ	羽根車	排水能力の低下	腐食	経年劣化	振動測定	4	3	4	3.6	5ヶ月	取替
		停止	摩耗	異物混入	吐出圧測定					5ヶ月	取替
		回転不良	欠損	水質	流量測定					5ヶ月	取替
主ポンプ主軸及び軸受	軸継手	トルク伝達不良	ボルトはずれ	想定外の外力	目視	4	3	4	3.6	3ヶ月	取替
			カップリングゴム摩耗	水質						3ヶ月	取替
			変形 腐食	異物混入						3ヶ月	取替
			振動	ボルトの締め忘れ・トルク不足						3ヶ月	取替
	水中軸受 (カットレス)	回転不良	焼き付き	経年劣化	目視	4	3	3	3.3	3ヶ月	取替
		回転停止	ゴム損傷	給水停止	フローサイト確認					3ヶ月	取替
			摩耗	異物混入	聴覚					3ヶ月	取替
	グランドパッキン	水漏れ	損傷	経年劣化	目視	4	2	4	3.2	1ヶ月	取替
			焼き付き	不適切な締め付けトルク (漏れ量の確認)						1ヶ月	取替
			変形							1ヶ月	取替
			効果							1ヶ月	取替
	主原動機	吸・排気弁	作動不良	破壊	経年劣化	目視	4	3	4	3.6	2日
作動しない			変形	バルブスプリング調整不良	聴覚	2日					交換
			カーボン付着	長期低負荷運転後の定格負荷運転		2日					交換
ピストン		原動機停止	カーボン付着	長期低負荷運転後の定格	目視	4	3	4	3.6	2日	交換
			損傷	連接棒破損	ターニング					2日	交換
				冷却水混入						2日	交換
				潤滑油不足						2日	交換
燃料噴射ポンプ		燃料噴射せず	コントロール部破損	想定外の外力	目視	4	2	4	3.2	2日	交換
		噴射量調整不能	プランジャスプリング破損・摩	経年劣化	回転数測定					1日	修繕
		出力安定せず	タペット破損・摩耗	異物混入	単体作動確認					2日	交換
			デリバリー弁破損							2日	交換

※ 凡例: A:システムへの影響度
B:故障モード発見の容易性
C:故障発生頻度
故障等級 = $\sqrt[3]{A \cdot B \cdot C}$

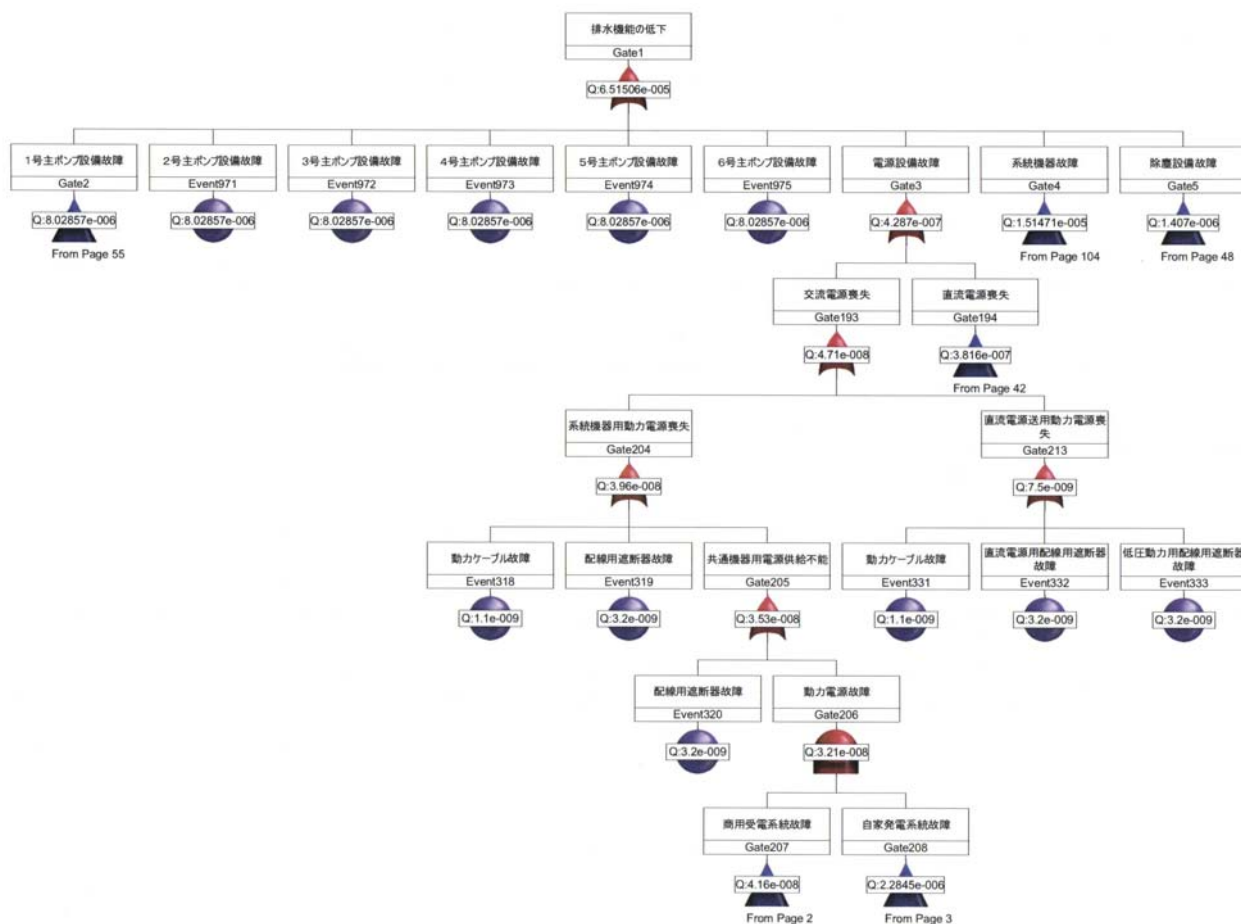


図-1 FT図の事例 (同じ型式の主ポンプが6台ある機場の集計図)

戦-5 河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮した
マネジメント手法に関する研究

表-2 6機場の主要機器構成及び経過年数

名称	機器構成形式
A排水機場	水冷DE(管内クーラ)+水冷減速機(管内クーラ)
B排水機場	水冷DE(二次冷却)+水冷減速機(二次冷却)
C排水機場	水冷DE(二次冷却)+水冷減速機(二次冷却)
D排水機場	水冷DE(水槽内クーラ)+水冷減速機(水槽内クーラ)
E排水機場	水冷DE(二次冷却)+水冷減速機(二次冷却)
E排水機場	ガスタービン(横軸)
F機場(排水)	水冷DE(二次冷却)+水冷減速機(二次冷却)
F機場(導水)	電動機+水冷減速機(二次冷却)

主要機器の設置後経過年数(～2007.3)

機場名	号機	設置年	経過年数	備考
A	1	1972	34	最長
	2	1982	24	
B	1	1985	21	
	2	1985	21	
C	1	1978	28	
	2	1993	13	
	3	1995	11	
	4	1977	29	
	5	1978	28	
D	1	1980	26	
	2	1980	26	
	3	1995	11	
E	1	1989	17	
	2	1994	12	
	3	1998	8	ガスタービン
F※	1	1984	25(11)	
	2	1984	25(11)	
	3	1984	25(11)	
	4	1984	25(11)	
	5	1984	25(11)	
	6	1984	25(11)	

※:F機場は、管理データのある直近11年間で評価する。

特に①は、その故障が機場のアンアベイラビリティの定義である「機場の機能低下を引き起こした故障」であるか、点検で発見しそのリスクを回避したものであるかを明確にするため、非常に重要な要素である。故障履歴を整理した記録簿の一部を表-3に示す。

機器名称は、点検整備記録によって差異が生じているが、FMEAにおけるどの部品群に含まれるかは、「機器コード」を用いることで明確化する。故障内容、故障モード、故障原因に「不明」とある場合、既存の情報から読み取れないことを表す。前述のとおり、維持管理データを後に活用するためには、故障、故障モードの定義を理解し、点検員や設備管理者が適切な情報の保存に努める必要がある。

2)信頼性の評価

1つの機場の故障情報を使って当該固有機場のアンアベイラビリティを算出することは難しい。排水運転中に停止した実績が全くない固有機場では0になり、短い管理時間内に複数の停止故障が発生すると飛躍的にアンアベイラビリティが大きくなる。

本解析では、各機場名の機器構成から求めたアンアベイラビリティと、点検を行わなかったと仮想した時の故障生起確率を求めた。計算結果を表-4に示す。

表-4におけるアンアベイラビリティは、各機場の設備構成と全国の維持管理データによる構成機器の故障率から求めた信頼性の指標である。数値は、現状の維持管理において、各機場とも、「運転しなければならない時に排水能力が低下するリスクは数年に1回程度」であることを意味している。計画上予備機がないため、設置台数が多いほどアンアベイラビリティは悪化する。(F機場の導水機場としての計算値は、排水機場のデータに基づいているため参考値である。)

一方、仮想の故障生起確率は、点検整備を行わないと仮定し、本来点検整備で発見され復旧する故障も運転時に発見されると考えて求めた排水能力の低下リスクである。このFTAには、各機場の故障データを使用する。

表-4における仮想の故障生起確率は、AからE機場については2～6ヶ月に1回は何かしらの故障が発見されるリスクを示すが、点検整備で対処していることにより、数年に1回程度のリスク範囲に収めていることとなる。つまりアンアベイラビリティと故障の仮想生起確率の差がメンテナンス効果であり、図-2のように示すことができる。

F機場は、通常導水機場として稼働しているため、1台当たりの運転時間が年間1000時間を超え、排水運転も1台当たり年間60～110時間稼働しており、主に排水運転を行っている他機場に比べ著しく長い。

表-3 故障履歴の集計事例

③機場名	④設置年	⑤年度	⑥日付	⑦号機No.	⑧故障機器コード	⑨機器名称	⑩運転回数	⑪点検回数	⑫発生時の状態	⑬故障内容	⑭整備形態	⑮故障モード	⑯故障原因
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PA040010000100	空気圧縮機					更新		
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PE040030000100	ノーヒューズブレーカ					更新		
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PE040030000100	三相双頭切替開閉器					更新		
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PE040040000100	発電機用ブラシ					更新		
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PG040020000100	液体継手防触亜鉛棒					更新		
0210311219303P001		1981	1981/7/1		PP040010009900	主ポンプグランドバックン					更新		
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PK040080003300	主原動機冷却水温度計	1	1	管理運転+月点検	油漏れ		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PK040080003300	主原動機冷却水温度計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	2	PK040080003300	ラスト軸受温度計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PL040099009900	減速機潤滑油	1	1	管理運転+月点検	性能低下		変質	経年劣化
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	不明	PL040099009900	オイルクーラーボンネット減速機	1	1	管理運転+月点検	破損		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PL040099009900	液体継潤滑油	1	1	管理運転+月点検	性能低下		変質	経年劣化
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PK040080023300	自家発電機温度計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	2	PK040080023300	自家発電機温度計	1	1	管理運転+月点検	指示値不良		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	不明	PJ040020000100	除塵機	1	1	管理運転+月点検	さびによる汚損		腐食	経年劣化
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PA040010020100	空気圧縮機	1	1	管理運転+月点検	油漏れ		誤操作	誤操作
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	1	PC040010020100	冷却水ポンプモータベアリング	1	1	管理運転+月点検	不明		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	2	PC040010020100	冷却水ポンプグランドシール	1	1	管理運転+月点検	漏水		不明	不明
0210311219303P001	1972	1983	1984/1/31	2	PC040020020100	潤滑水ポンプモータベアリング	1	1	管理運転+月点検	絶縁不良		不明	不明

表-4 各機場のアンアベイラビリティ及び故障の仮想生起確率の比較 単位: 1/hr

機場名	種別	ポンプ台数	アンアベイラビリティ	故障の仮想生起確率	摘要
A機場	排水ポンプ	2	2.02×10^{-5}	2.28×10^{-4}	
B機場	排水ポンプ	3	2.56×10^{-5}	2.42×10^{-4}	
C機場	排水ポンプ	5	4.97×10^{-5}	4.70×10^{-4}	大型ポンプ
D機場	排水ポンプ	3	2.69×10^{-5}	7.90×10^{-4}	大型ポンプ
E機場	排水ポンプ	2	2.36×10^{-5}	4.00×10^{-4}	
E機場	排水ポンプ	1	4.44×10^{-6}	2.85×10^{-5}	ガスタービン※1
F機場	排水ポンプ	6	6.52×10^{-6}	3.13×10^{-3}	
F機場※2	導水ポンプ	5	2.81×10^{-6}	1.97×10^{-3}	

※1: ガスタービンは機関単独の確率を示す。(系統機器がD Eと共用のため)

※2: F機場は、排水系と導水系各々にFTAを行い個別に表示した。

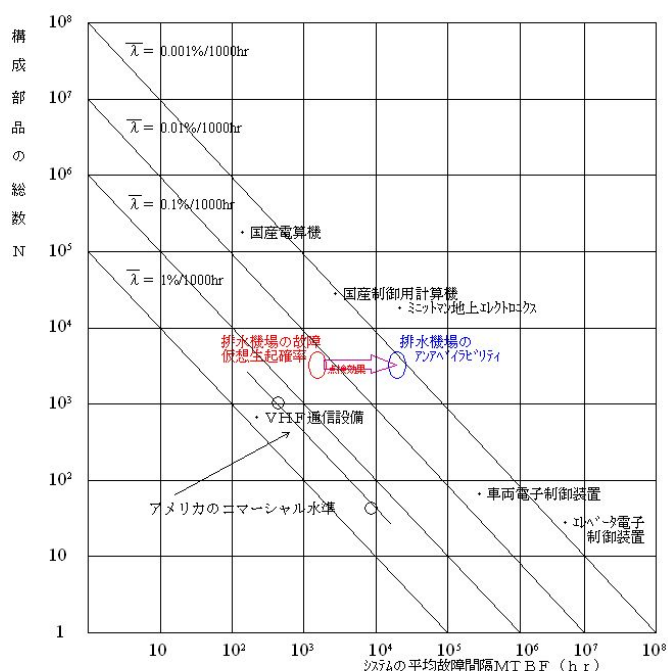


図-2 排水機場におけるメンテナンス効果

また、系統機器、電源設備、操作制御設備は排水時と導水時双方で兼用しているため、部品レベルの損耗が早く故障件数が多くなり、他機場より仮想の故障生起確率が高くなっている。

しかし、AからFの各機場は、実排水運転時に影響があった故障発生はC機場で1件のみであったことから、年点検と月点検によって機器の故障が発見され、充分信頼性が確保されていると判断できる。

以上より、信頼性確保上年点検と合わせて月点検の実施が重要であり、メンテナンスレベル自体は妥当であると評価できる。

3) 機場の「くせ」

固有機場には独特の「くせ」があり、故障や運用上の課題は様々である。故障履歴から、どのような部品に故障が発生しているかを機場毎に集計することで、各機場

の「弱点」を認識することができる。

各機場の故障分布を調査したところ、A機場では、主原動機に多く故障が発生しており、河川の水質が悪いB機場は冷却水系統、C機場及びD機場は主原動機、冷却水系統及び除塵設備、E機場は各センサ類と冷却水系統、F機場は原動機（ディーゼル）と減速機に故障が多いことがわかった。

また、排水機場である5機場を総合すると、冷却水系統の故障が最も多くなっているが、殆どが二重化されているため、FTAにおけるアンアベイラビリティへの寄与度は低くなっている。F機場は、減速機の稼働時間が長いこと、他機場より潤滑油系統の故障発生件数が多くなっている。このような各機場の特性は、技術改善の余地があることを意味している。機場によって、故障しやすい機器が顕著に表れている場合、設計FMEAを用いて早急な技術改善を図る必要がある。

4) LCCの評価

AからF機場のメンテナンス費用の推移を集計した。建設費及び維持管理費は、建設デフレターを勘案して集計している。増設費は建設費（インシャルコスト）として扱う。また、点検費、定期整備費、スポットで施工した修繕工事を加算して維持修繕費とし、建設費に対する割合（累計年間維持修理費率）を求めた結果を表-5に示す。

表-5 累計年間維持修理費率

機場名	総排水量 (m ³ /s)	累計年間維持修理費率(%)	経過年数
A	15	2.1	34
B	15	1.3	21
C	200	0.4	29
D	100	0.3	26
E	100	0.3	17
F	80	0.4	25

ただし、表-5の累計年間維持修理費率には、集計が困難であった燃料費と電力費が含まれていない。

排水ポンプ設備は、高価な機器を装備した非常用設備であり、維持修理費率の妥当性評価は難しいが、表-4に示すメンテナンス効果を表-5に示すコストで調達していることになる。現状において、各機場とも排水時の機能低下を引き起こした実績が少ないことから求められる一定の信頼性は確保されており、今後の設備老朽化を勘案すると、この累計年間維持修理費率レベルで抑えることが管理上の目標となる。

一方、機場の規模と維持修理費率の関係には相関がある。各機場の総排水量は、表-5に示すとおりA及びB機場が15m³/s、C機場が200m³/s、D及びE機場は100m³/s、F機場は80m³/sであり、表-2に示す主ポンプ台数と合わせて設備規模を表す指標となる。

小規模なA、B機場では、比較的建設費に対する維持修理費の割合が高く、規模が大きい機場はその逆の傾向がある。(図-3参照)これは、小規模の機場でも系統機器や電源操作制御設備等は機器点数が中・大規模機場と大差なく、定常的な点検費用が設備規模に比例して小さくならないことに起因する。

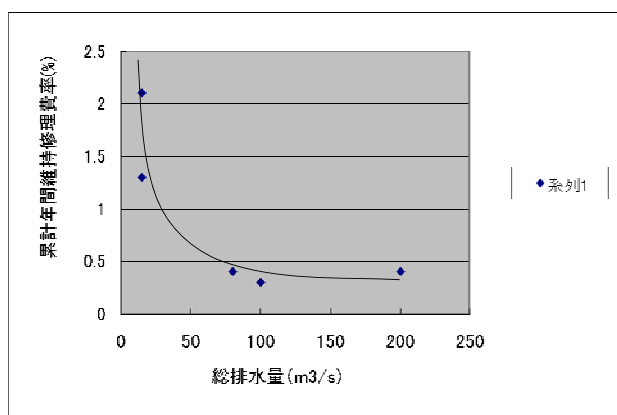


図-3 総排水量と維持修理費の関係

また、維持修理費率に与える大きな要因として、定期整備がある。A機場、D機場、F機場の維持費用の推移を図-4～6に示す。

各機場とも、年間維持修理費が建設費の1～2%を超える箇所が存在しているが、これは主ポンプ、減速機、主原動機のオーバーホール等の定期整備を実施している箇所である。これらの主要部品は、定期点検において目視確認することができないため、主に過去の故障や整備情報に基づく時間計画保全を基本としている。よって、LCCの低減を図るためのアプローチは、①主要部品の長寿命化、②定期整備対象機器の適切な状態監視技術の確立である。①については、維持管理上得られる摩耗デー

タをメーカー側と共有することで技術開発を促すという手法が考えられるが、②については、管理者の技術力向上が求められる分野である。

なお、今回既存のデータで解析した5機場は、いずれの機場も維持修繕費や機場の故障率が上昇している箇所はなく、機場全体としては「偶発故障期間」にあると判断することができる。

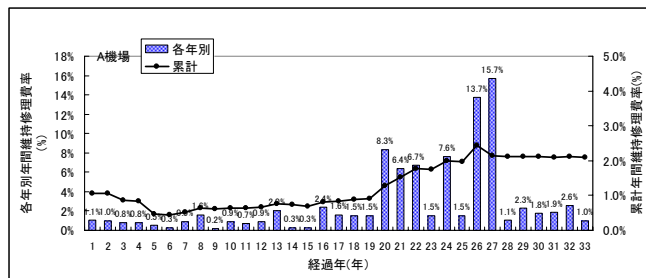


図-4 A機場の維持修繕費推移

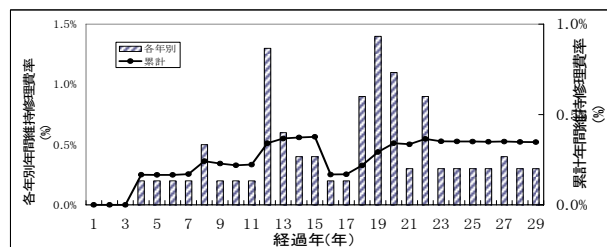


図-5 D機場の維持修繕費推移

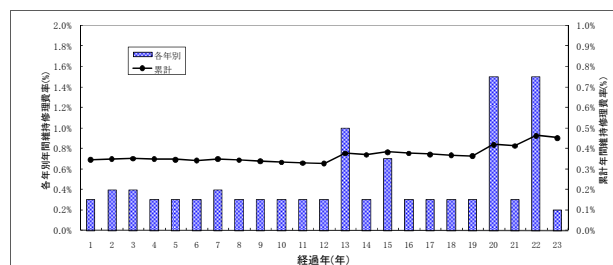


図-6 F機場の維持修繕費推移

4) 運転時間による故障率

これまで、非常用施設は稼働時間が少ないため、時間軸として機場の「供用時間」を対象としてきた。前項までに解析における故障率も供用時間をベースにしている。

本研究では、固有機場の運転状況に違いがあることに着目し、その差異によって、実際に発生している故障内容(点検で発見したものを含む)或いは故障率にどのような違いがあるかを評価した。

運転時間の統計をとった6機場のデータを基に、各機場の運転時間の相違によって故障率や故障内容に差異があるか確認した。主に排水運転を行っている5機場については、運転時間の長さや故障発生との因果関係を見出すことはできなかった。しかし、表-4に示すとおり稼働時間の長いF機場では、点検時に発見された故障件数

が排水機場に比べ多くなっていることから、今後このような常用設備の維持管理データが増えれば、非常用設備は供用時間、常用設備は運転時間で信頼性を評価することが可能になり、機動デマンド重視の非常用設備機器と経済性重視の常用設備機器の設計に関する有用な情報を得られる可能性がある。

4.3 データベース項目の具体化

FT 図の作成に当たって、故障率の精度を向上させるためには、必要な情報収集とデータベース化が必要である。そこで、情報については、1)設置年月・仕様などの設備情報、2)点検日及び内容・運転状況などの日常管理情報、3)故障記録・整備内容などの整備情報、4)機器の更新等情報 に区分し、各々必要な項目をまとめた。

①設備情報

これまでの管理台帳に掲載されている情報全てを対象とする。

設備仕様（構成機器）、メーカー名、改修経緯、図面等

②点検・稼働情報

点検日時

故障発生時の状態（点検中、運転中）

故障内容

故障モード

故障の原因

点検方式

清掃・調整の有無、修繕の内容

運転日（運転回数）

運転条件（排水運転、管理運転など）

運転時間（各運転条件、号機ごと）

使用環境（特記すべき事項）

③整備情報

対象機器・部品名

整備開始日

整備完了日（各機器・部品ごとのデータ）

整備形態（点検時、修繕工事など）

整備理由（予防保全、故障(事後保全)）

取替・修理・清掃・調整の別

整備・修理費用（可能な限り部品レベル）

④更新情報

更新開始日・完了日

更新機器

更新理由

更新費用

LCC 評価や機器の技術改善を検討する場合に、機器レベルの修理費用情報が必要である。機器レベルの修理費

用は、現在の管理台帳にはほとんど記録がない。その要因として、機器毎に修理費用を振り分けることが難しいという現場の意見がある。機器レベルの寿命算定や設計 FMEA の活用データとして、当該データの必要性は高いことから、容易な記録手法を提案する必要がある。

これらのデータベース項目は、平成 21 年度に国土交通省が運用を開始する予定のデータベース「機械設備維持管理システム」に概ね反映された。

4.4 設計 FMEA の実施

表-3 に示すように故障データを整理することによって、各機場の技術改善点を見出すことが可能となる。優先順位としては、次のとおりである。

- ① 排水運転中に排水機能低下の原因となった故障
- ② FMEA シートにおいて致命度が高い機器の改善
- ③ 短期間で繰り返し発生する機器の故障

①は、故障に対し機器の劣化要因、偶発的要因双方が考えられるため、緊急に総合的な検討対策が求められるケースが多い。また、②、③は維持管理データから潜在的な危険要因を抽出し、取り除く作業として必要となる。③は②の要素として含まれているが、致命度が高くなくても、修理の単価・回数によっては維持修理費増大の要因となる場合が考えられる。

本報告では、①に該当する C 機場の故障事例を抽出し、FMEA による改善案評価事例を示す。

【故障状況】

発生 : 2000 年 7 月

故障内容 : 5 台全運転時に 5 号機減速機が冷却水断により停止、その後 2 号機も減速機の冷却水断により停止。その他 3 台は異常なく稼働。

故障モード : 分配弁設定不良、配管内汚れ、腐食

原因 : 冷却水は、冷却水ポンプから原動機と減速機に供給される。冷却水は河川水でありストレーナを介して供給されるが、塵芥の進入は完全には防げない。一方、各号機とも原動機と減速機への分流は、手動分配弁によって建設時に調整されていた。経年により配管内面に付着物や発錆が生じ、損失増大により分流のバランスが崩れ、減速機系統への供給量が減少したものと判明。

対応として、手動分配弁を再調整し、各機器への必要流量が確保された。

本件を FMEA で評価した。設計 FMEA では、インハウスで設計担当者が改善案を立案できることが前提となり、

最善策を選定するプロセスとして活用する手法である。

評価項目は、システムへの影響度、発生確率、検知難度とし、4段階評価とした。危険指数はそれらの積の3乗根とし、2を超える場合は対策が不十分と判断した。冷却水ポンプの能力が充分であり、予備機も備わっていることから対策案は配管系統に絞った。FMEAの結果を表-6に示す。

表-6 設計 FMEA 事例

ケース	対策	故障	故障モード	影響度	発生確率	検知難度	危険指数	判定
現況	冷却水配管	流量減少	塵芥付着 発錆	4	2	4	3.17	×
案1	配管内清掃	流量減少	塵芥付着 発錆	4	2	4	3.17	×
案2	配管内径アップ	流量減少	塵芥付着 発錆	4	1	4	2.52	×
案3	流量計増設	計測不能	計測管破損	2	3	1	1.82	○

当該現場では、管理運転を行う月点検を実施しているため、管理運転時の巡回で各冷却水系統の異常を発見できる。ただし、現状では、原動機機付のサイトフローで行っているため、定量的な判断は難しい。本検討ではオンラインの制御を複雑にしないよう差圧式流量計を増設する案を最善として提案した。

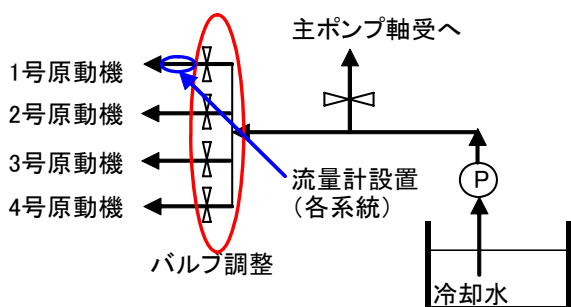


図-7 対策案（流量計増設）

4.5 状態監視保全の検討

表-1に示す FMEA において、ポンプ設備全体から故障等級が大きい機器・部品を抽出したものを表-7に示す。このうち、定期点検で目視確認できない機器は、インペラ、水中軸受、主原動機の内部機器であり、故障させない維持管理法の確立は喫緊の課題である。

しかし FTA では、これらの機器が故障へ向かう状態の変化をリアルタイムに把握・評価することができない。近年の河川ポンプ設備では、運転支援装を目的として、振動、温度等のセンサを主軸、減速機、主原動機等に装着して監視する場合が多い。しかしこの監視は、運転中に発生した軽故障・重故障を感知して運転管理者へ知らせ、それ以上のダメージを回避する最後の砦を担っており、予防保全における状態監視保全とは性格が異なる管理である。状態監視保全技術は、効率的な維持管理を目指す民間企業のプラントで進歩してきたが、これまで、

河川ポンプ設備にこれらの技術を適用することは難しいとされてきた。その理由は次のとおりである。

- ①非常用設備であるため、稼働時間が少なく劣化傾向を把握するデータを取得しにくい。
- ②主たる状態監視保全技術である振動解析の分野では、河川ポンプ設備のような低速回転機械を対象とした技術は開発途上にある。

表-7 故障等級の大きい機器

本研究では、河川ポンプ設備の維持管理に導入されて

機器名	部品名
インペラ	羽根車
主軸及び軸受	軸継ぎ手 水中軸受 グランドパッキン
機関本体関係	吸・排気弁 過給器 ピストン ピストンリング ピストンピン ピストンピンメタル 調速機
機関潤滑油系統	潤滑油冷却器
機関燃料系統	燃料噴射ポンプ 燃料噴射弁 高圧管
機関冷却装置	熱交換器 インタークーラー
吐出弁	本体
直流電源設備	築電池
無停電電源装置	蓄電池

いない技術で有望なものをピックアップし、適応性を評価することとした。

主ポンプについては、近年開発された超音波振動計の適用性を評価した。低速回転から高速回転に至るまで、軸心の振動を非接触で直接計測できるのが特徴である。

主原動機については、常用系の内燃機関や減速機等の診断に導入されているフェログラフィー及び SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program) の適用性を把握する。フェログラフィーはオイル中の金属切粉形状を、SOAP は含まれる元素を分析することで、劣化箇所やその程度を診断する技術である。

4.5.1 超音波振動計

超音波振動計は、主に発電所の取水ポンプの状態監視保全技術として開発された計測器で、図-8に示すとおりケーシングの外部から軸心へ向け超音波を発信し、反射波を計測するものである。装置は、超音波発信装置と解析装置（ノート型 PC）が一体となっており、どこでも持ち運びが可能である。運転中のデータを取り込むと

その場でFFT（高速フーリエ変換）を行い、周波数分布を知ることができる。ただし、揚水管が鋳鉄・鋼製で、かつ充水された状態でないと計測できないため、大型のコンクリートケーシングには適用できない。

一般的に用いられている加速度センサを用いて振動計測する場合は、グラント部あるいはスラスト軸受ケーシングの振動を計測しており、軸振動を把握することはできない。本研究では、A及びB機場の主ポンプを対象として、超音波振動計の適応性を検証した。

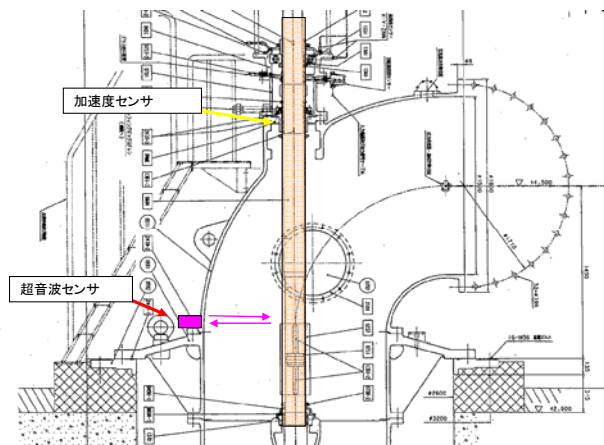
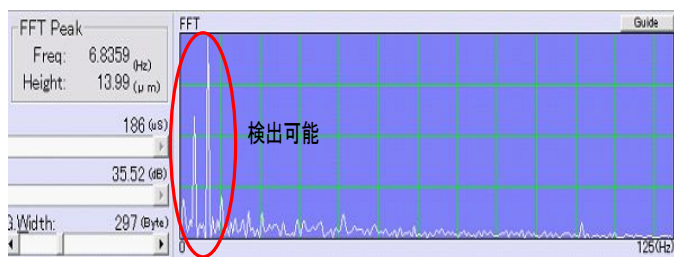


図-8 超音波センサ

B機場における超音波振動計の計測結果を、図-9に示す。軸受はセラミック製であるが、高速フーリエ解析によって軸振動の周波数スペクトルを計測することができた。当該ポンプ設備の回転数は、約3.4Hzであるが、1/2N、N、2N成分がピーク値として現れている。軸心の振動周波数を検出できることは、軸受の摩耗による変化を検出できる可能性を示しており、河川ポンプ設備固有の軸受材質に対するデータを蓄積すれば劣化診断が可能となる。

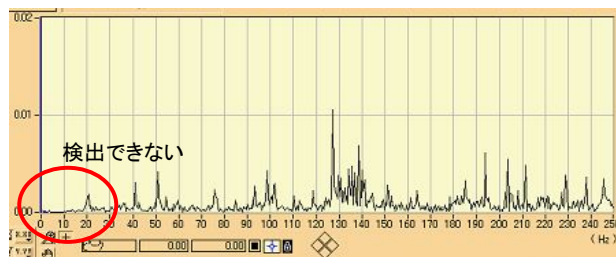
図-9 超音波振動計による振動解析（B機場）



また、同時にグラント部に当てた加速度センサによって、揚水管自体の振動を計測した結果を図-10に示す。

定期的にデータを蓄積できる常用系の設備においても、低速回転機械の状態監視保全は難しいといわれている。一般的な加速度センサをケーシングに当てても、回転数成分である数Hzの振動を検出することができない。軸

図-10 加速度センサによる振動解析（B機場）

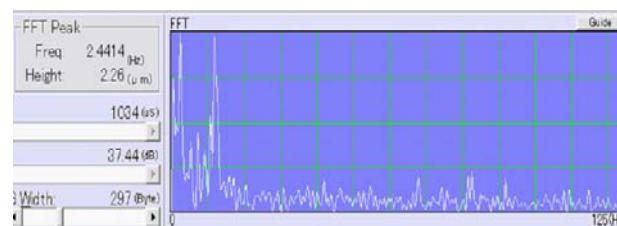


心における数 μm の振幅をケーシングで検出することは不可能であり、また、減速機や原動機が発生源のさまざまな周波数が重合して検出をさらに難しくする。

河川ポンプ設備の水中軸受は、ゴム軸受が多い。A機場はゴム軸受を採用しているため、潤滑水を供給するため、主軸が二重管になっている。図-11にA機場の解析結果を示す。B機場に比べスペクトルが少し崩れているが、2.3Hz近傍の回転数成分を検出している。

よって、本振動計により、ゴム軸受、セラミック軸受、樹脂軸受等の材質・形状（冷却溝の数など）を基に、管理運転時の計測値を継続して解析すれば、軸受の摩耗によって大きくなるホワール成分、安定して検出していたスペクトルの特徴が変化するなどの特徴により、劣化傾向を把握することが可能であると判断する。

図-11 二重管主軸の計測事例（A機場：超音波振動計）



4.5.2 フェログラフィー・SOAP

1)概要

4.2.4項で述べたとおり、表-7に示す機関本体の殆どの機器は、通常の年点検や月点検時に分解点検を行うことはなく、定期整備時に分解して初めてその状態を知ることができる。定期整備の実施間隔がLCCに大きな影響を与えることから、分解などの大きなコストをかけずに状態を適切に把握する方法が求められている。

このようなニーズに基づいて、フェログラフィー・SOAPは産業用機械（減速機・軸受・原動機等）の状態監視保全に活用されるようになった。

フェログラフィーは、潤滑油やグリースなどの試料を希釈剤と混合し、勾配を持った強力な磁場で摩耗粒子を大きさの順に分離・配列し観測することで、装置の劣化状態を把握する手法である。分析するオイルを希釈しガラススライド上に定着させた「フェログラム」を作り、

定性的な各種粒子の分布を解析する分析フェログラフィーと、照射した光の遮断率から定量的に大・小の粒子量を求める定量フェログラフィーがある。

粒子形状は、ラビング、シビア、平板状、ラミナー、球形、赤錆、黒錆などの区分で表される。診断は、継続して定期的に分る解析結果を基に行う。摩耗時期に発生する大きな粒子を観測するほか、小粒子量、大粒子量の組割合変化等を総合的に解析する。

SOAPとは、潤滑油中の微量元素の量を発光分光分析、原子吸光分析、蛍光X線分析等で検出し、劣化箇所・程度の推定を行うものである。主に設備の安定期において、フェログラフィーでは小粒子、大粒子の割合が比較的一定になるが、元素レベルでは固有の含有量が徐々に増加していると考えられる。SOAPでは、固有の元素の含有量を計測することで、機械要素の劣化を診断する。しかし、異常摩耗時に発生する5~10 μ m以上の粒子に対する元素の分析感度は劣るため、フェログラフィーと併用してお互いの得失を補完することが得策である。

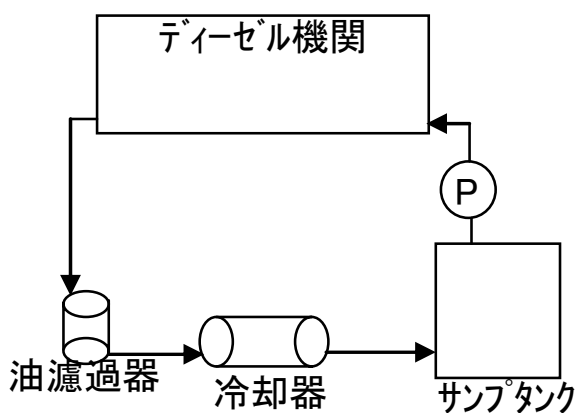
2)解析事例

C機場の1号機及び3号機の管理運転時にそれぞれ原動機の潤滑油を採油して状態を推測した。

1号機は1979年に設置し、2004年に分解整備され主要部品及びオイルを交換した。つまり、整備後の稼働年数は4年である。3号機は1994年設置され14年間稼働を続けており、時間計画保全上は定期整備の時期が近づいている。

図-12に、オイル循環の模式図を示す。オイルは原動機に貯留されず、サンプタンクから絶えずポンプで供給され、濾過器、冷却器を通じてサンプタンクに戻る。約30分の管理運転後、サンプタンクのドレンから端切りして採油した。

図-12 原動機のオイル循環



①フェログラフィー

定量フェログラフィーを実施し、補完的に鉄、亜鉛、銅などの成分を蛍光X線分析で調べた。表-8に結果を

示す。AS(小粒子量)及びAL(大粒子量)は、光学密度法で計測したものである。結論として、双方とも現状では大きな問題はないという診断結果を得た。その上で特徴を見ると、オイルの使用年数の長い3号機の方が大粒子の割合が高く、ピストン等鉄部品の摩耗傾向を示す鉄成分も検出されている。一方、Isは劣化傾向を示す異常摩耗係数であるが、逆に1号機が高い数値を示している。

表-8 フェログラフィー・X線蛍光分析結果

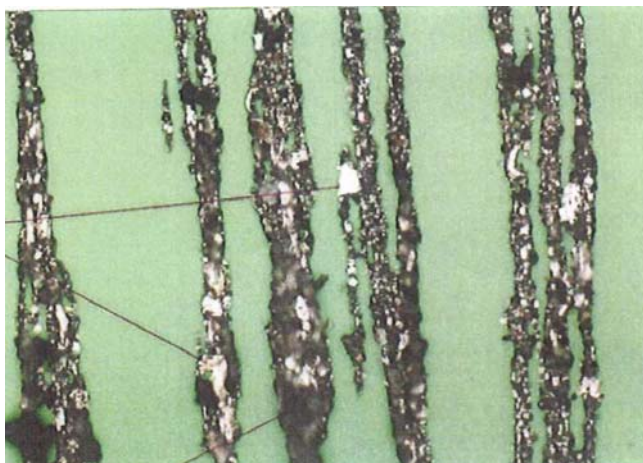
写真-1, 2に1号機及び3号機オイルの顕微鏡写真を示す。

成分 ポンNo	鉄 Fe	亜鉛 Zn	銅 Cu	AL%	AS%	Is
1号機	3.2	2.0	0.5	37.5	33.7	1082
3号機	12.0	0.9	0.5	67.2	66.9	161

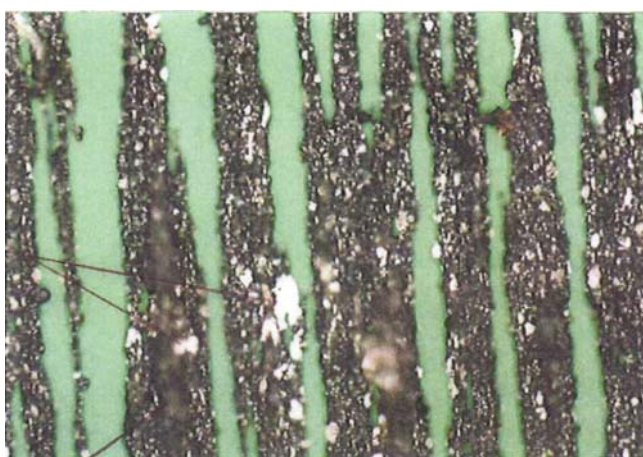
Fe, Zn, Cu: ppm

写真-1 1号機オイル

写真-2 3号機オイル



いずれも2倍に希釈したオイルを倍率100倍で撮影



している。黒く縞状に集まっているものが主に正常摩耗粉であり、ところどころにある白い粒子が軸受の表面疲労を示す平板状粒子である。1号機に比べ、3号機の方が粒子の量が多く、錆粒子が多いことがわかった。

②SOAP

発光分光分析（高周波誘導プラズマ発光 ICP）による解析結果を表-9に示す。

1号機、3号機とも多く検出されているリン、亜鉛、カルシウムは、耐摩耗防止剤、酸化防止剤などの添加物であると推定され、長く使用している3号機の方が少ない傾向を示している。特徴的な事項は、3号機における銅の含有量が高いことである。適正な閾値については検討の余地があるが、100ppmを超えていることから軸受（クランクピンメタル等）の状態悪化が懸念されるが、同時に増えるとされる鉛や錫の含有量は増加していない。

表-9 SOAPの結果（単位：ppm）

3)考察

成分 ポンプNo	鉄 Fe	鉛 Pb	銅 Cu	クロム Cr	アルミニウム Al	ニッケル Ni	銀 Ag	すず Sn	ケイ素 Si
1号機	16	10	16	1	2	1	0	2	30
3号機	77	4	154	1	2	0	0	3	17

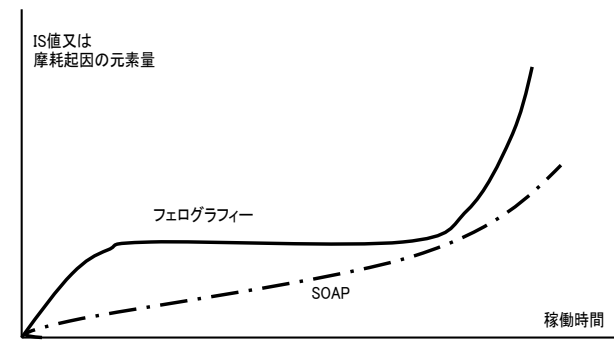
成分 ポンプNo	ホウ素 B	ナトリウム Na	リン P	亜鉛 Zn	カルシウム Ca	バリウム Ba	マグネシウム Mg	モリブデン Mo
1号機	94	0	938	1173	5130	0	12	2
3号機	12	2	339	395	4587	0	15	3

①分析例の結果について

フェログラフィーの結果、14年間整備していない3号機の方が大粒子量が多く、SOAPの結果、オイル添加剤の組成が減少し、軸受や銅配管（例えば油冷却器）の劣化を表す銅含有量が増加していることが解った。表-8における銅の含有量は、1号機と3号機が同値となっているが、蛍光X線分析では銅の検出感度が低い傾向があり、その影響と考えられる。

フェログラフィーにおいて特に大きな劣化を示す指標が得られていないこと、SOAPにおいても軸受の劣化を示す鉛や錫の含有量は増加していないことから、正常な摩耗状態の末期にあると考えられる。また、銅が単独で検出される状態が続くのであれば、摩耗によるものでなく、銅製品の表面において他の元素とイオン交換が起きている可能性も否定できない。

フェログラフィーにおけるIs、粒子濃度やSOAPにおける摩耗による元素濃度は、図-13に示すようなイメージで増加する。表-8においては、Is値が整備後4年の1号機が高い結果となったが、評価は継続的に解析して図に示すような増加傾向を示すかどうかポイントになる。特に、非常用設備においては、稼働時間がステップ状に増加する特性があるが、これらの指標がどのように変化するか検証できれば、整備タイミングを見極める有効な



手段になると判断する。

図-13 評価指標と稼働時間の関係

②フェログラフィーの判定基準

フェログラフィーは、開発されて30年以上経過しているが、現在も新しい分析方法が編み出されている。定量フェログラフィーにおいても、光の遮断率ではなく、大・小粒子を補足した面積でISを算定するなど測定会社により独自の方法がある。同じオイルを分析しても、異なる方法では同じ解析結果を得られない可能性がある。また、判定基準（閾値）も測定者により異なる場合があり、管理者側で分析上の条件を明確化する等の方策が必要である。

河川ポンプ設備等の非常用設備においては、測定者を固定することが難しいため、解析時に作成したフェログラフそのものを管理者が収集・保管し、同一の視点で定期的に解析結果を見直すなどの方策も有効である。

③非常用設備の採油方法

実施を管理する国土交通省事務所の協力を得て、フェログラフィーの実施データを24件（ディーゼル機関15件、ガスタービン5件、減速機2件、ゲート開閉装置2件）収集した。

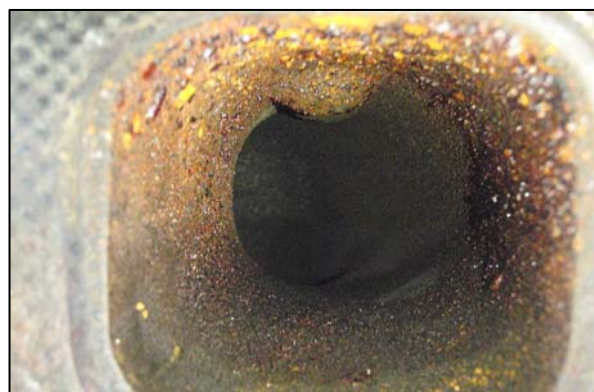
ディーゼル機関潤滑油の解析で、大きな異常が認められず継続使用可能と評価されたものが、間もなく故障（起動不能）に至った事例が1件あった。故障モードはシリンダヘッド、シリンダの腐食である。（写真-3）

写真-3 シリンダヘッドの腐食事例

腐食粒子は検出されていたが、危険レベルではないと評価された。想定原因は次のとおりである。

- ・管理運転せずに採油した（できない状況であった）
- ・摩耗粒子が均等にオイル内に分布していなかった可能性が高い。

採油方法は、原動機のタイプによって異なるが、非常



用設備であるので、管理運転後に行うことが共通条件と考えられる。また、図-12に示すサンプタンク方式の場合

合は、可能であればサンプタンクではなく、原動機から油濾過器に至る配管にドレンを設けて採油できることが理想である。採油方法を工夫することで、非常用設備の解析精度を上げることができると思料する。

5. まとめ

本研究課題の成果をまとめると次のとおりである。

- 1) 河川ポンプ設備を対象として FMEA、FTA を行うために、維持管理データベースに必要となる項目(故障、故障モード及び構成機器の修繕内容・費用等)を抽出し、構築時に追加させた。
- 2) 最新の設備構成を勘案した FMEA、FTA を提案し、部品の故障率を用いて全体システムの機能低下リスクを評価した。
- 3) その結果、設備構成とシステム信頼性の関係を把握することができた。
- 4) 固有機場の故障履歴からシステムの「くせ」を掴み、設計 FMEA を用いた技術改善へつなげる手法を提案した。
- 5) 固有機場の故障履歴を整理し、FTA を活用することで、点検整備の効果を定量的に示す手法を提案した。
- 6) 維持管理データベースの情報から、信頼性と経済性の関連を把握する手法を提案した。
- 7) 新たに導入すべき状態監視保全技術を評価・抽出し、活用方法の提案を行った。

平成 21 年度は、国土交通省において維持管理データベースの運用が開始される予定である。また、土木機械設備全般に亘って、当該データベースの情報を活用して設備の健全度を評価するシステムの付加が予定されている。本研究成果は、当該システムの機能そのものであり、今後も関係機関と連携して成果の普及に努めていく。

また、本成果は河川ポンプの維持管理に活用できるマニュアルとしてわかりやすくとりまとめる予定である。

参考文献

- 1) 長健次他 5 名：「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」
1990 年 3 月 土木研究所
- 2) 江本平他 6 名：「機械設備の信頼性評価に関する調査研究
(第二報)」2001 年 2 月 土木研究所

RESERCH OF MANAGEMENT METHODS OF RIVER PUMPING SYSTEMS THAT CONSIDER THE RELIABILITY AND ECONOMIC PROPERTIES

Abstract : Various machine plants that have been set up as an infrastructure since high economic growth period are aging, causing higher risk of system failure and cost of operation and maintenance a social issue. This research proposes an effective maintenance technique for improving the reliability of the river pumping systems within limited budget. Based on data on the current inspection and repair, life cycle cost (LCC) and reliability of facilities is analyzed and the relation between the method of maintenance and the reliability of facilities is clarified. It also proposes items in the database necessary for long term management of pumping systems as well as application of it.

Key words : pumping systems, FMEA, FTA, reliability, maintenance-management, database