

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。老朽化に伴い、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、信頼性確保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。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する。また、設備の長期的な管理に必要となる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、前述の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提案する。また、近年導入されている「運転支援装置」の状態監視機能を活用する状態監視保全の具体的な実施方策も検討する。

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の方法を提案する。
- 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、次のとおり実施するものとした。

- 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のうち、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、長期的視野でデータの傾向を管理することで、信頼性評価、寿命予測に活用することができないか検討する。

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

土木研究所が平成2年度に報告した「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」によると、信頼性の評価手法としてFTA(Fault Tree Analysis)及びFMEA(Failure Mode and Effects Analysis)を併用している。

FTAは、好ましくない重大な故障事象をトップに置き、その発生原因をシステムの下位レベルに向かって樹木(ツリー)のように展開し、各要素の故障率を基にトップ事象の発生確率を定量的に求める手法である。多様な要素機械を組み合わせたシステムの故障を解析する場合に適している。FMEAは、システムを構成する機器が故障した場合、上位のユニット或いはシステムが受ける影響を、ボトムアップで定性的に解析する手法である。

平成2年度の評価手法では、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役立てることを目的としたものではなかった。

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ツールがなく、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

平成17年度に、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、FMEA及びFTAが採用されていることが分かった。河川ポンプ設備の信頼性評価手法を初めてとりまとめた平成2年当時に比べ、FMEAは格段に普及しており、民間においてはFTAと組み合わせた技術改善手法が一般化していることから、現状においても、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とFTAの組み合わせが最善の手法であると判断した。

また、(財)電力中央研究所原子力情報センターでは、原子力発電所における「確率的安全評価(PSA)」の品質ガイドライン試行版を策定し、平成18年2月に公開した。

PSAとは、「大規模で複雑なシステムの安全性や信頼性を、発生し得るあらゆる事故を対象として、その発生頻度と発生時の影響を、確率論を使って定量的に評価し、その両方で判断されるリスクがどれ程小さいかで安全性の度合いを検討する手法」とされている。定量的評価を実施することはFTAと共通するが、構成設備と起こりうる事故(故障)を面的に評価していくことや、原子力発電所を対象とした独自の故障モード定義、故障時の影響評価を盛り込むなどの特徴がある。

本手法については、今後の試行状況を注視し、故障発生時の影響評価など河川用ポンプ設備(特に排水機場)に活用できる要因があるか引き続き検討する。

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FMEAにおいて、技術的な過渡期にあって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)を検討に追加するとともに、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、解析した。

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(二次冷却)+水冷減速機(二次冷却)
- 2) 水冷DE(二次冷却)+水冷減速機(一次冷却)
- 3) 水冷DE(一次冷却)+水冷減速機(一次冷却)
- 4) 水冷DE(管内・水槽内クーラ)+水冷減速機(同冷却)
- 5) 水冷DE(ラジエータ)+空冷減速機
- 6) 空冷DE+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)

上記、「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」と定義した。また、「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。故障モードと故障の記載は定義に基づき的確に行うものとする。

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、これまで蓄積したデータを有効に活用するため、発生頻度については、部品単位の故障率を準用する。

手順4【故障等級の算定】

本手法では、部品レベルの故障モードが当該部品を含む設備区分に与える影響とシステム全体に与える影響を評価した。システム影響度は 4 点法を採用し、故障頻度と乗じて故障等級を表すものと定義した。

全国平均の故障率を基に、当該手法によってまとめた FMEA 表の例（水冷ディーゼルエンジン（二次冷却）＋水冷減速機（二次冷却）、以下「パターン1」という。）を表-1 に示す。故障等級についても 4 分割し、0～0.25：青（等級1）、0.26～0.5：黄（同2）、0.51～0.75：橙（同3）、0.76～1.0：赤（同4）として色分けするものとした。

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。

従前の点検整備報告書では、故障内容に記載が曖昧あるいは欠落している事例があり、故障モードと故障を混同している場合も散見される。例えば、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、センサー配線の「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。

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 年度のデータから、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）を判別できるので、故障等級の低い部品は、樹状を機器レベルまでとして簡素化した。パターン1における、減速機部分の事例を図-1 に示す。各部品レベルの故障率をさらに合成して、機場全体のアンアベイラビリティを求める。これによって、機場形式によるアンアベイラビリティの傾向を把握することはできる。

しかし、このアンアベイラビリティは、固有機場の維持管理にそのまま活用することは難しい。全国平均の故障データから求めたアンアベイラビリティは、約 20 年に 1 回運転時の故障が発生するかどうかというレベルであり、管理期間の短い固有機場の故障データでは 0 である（排水運転中に停止した実績が全くない）事例が多いと予測できる。

本研究では、平成 13 年度にとりまとめた全国機場を対象とした故障調査データから得られた故障率を用いて 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 19 年 5 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）」をとりまとめ、設備の点検、評価、整備・更新等の新しい手法を提案した。

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らかにするとともに、ワイブル解析や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。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・部品が同時期に統計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。

表-1 主ポンプ設備のFMEAシート事例(ケース1)

設備区分 主ポンプ設備

| 機器区分 | 部品名 | 故障 | 故障モード | 原因 | 検出方法 | 影響 | | | 故障発生頻度 ($\times 10^{-6}$ 件数/供用時間hr) | 故障等級 (致命度) ($\times 10^{-6}$ 件数/供用時間hr) ×システムレベル) | 対策 | | 備考 |
|------|--------|---------|-------|----------|----------|----|------|--------|---|---|-----------|--------|----|
| | | | | | | 機器 | システム | 社会的影響 | | | 復旧までの所要時間 | 内容 | |
| インペラ | 羽根車 | 排水能力の低下 | 腐食 | 経年劣化 | 振動測定 | 4 | 4 | 0.1580 | 0.6320 | 5ヶ月 | 取替 | 性能試験含む | |
| | | 停止 | 摩耗 | 異物混入 | 吐出圧測定 | | | | | | | | |
| | | 回転不良 | 欠損 | 水質 | 流量測定 | | | | | | | | |
| | | | | | キャビテーション | 目視 | | | | | | | |
| | 羽根車ナット | 羽根車脱落 | 腐食 | 経年劣化 | 目視 | 4 | 4 | 0.1580 | 0.6320 | 1ヶ月 | 取替 | | |
| | | 羽根車支持不良 | 破断 | 設計・施工の誤り | | | | | | | | | |
| | | | はずれ | | | | | | | | | | |
| | キー | 羽根車回転不良 | はずれ | 経年劣化 | 目視 | 4 | 4 | 0.1580 | 0.6320 | 2週間 | 取替 | | |
| | | | 腐食 | 想定外の外力 | | | | | | | | | |
| | | | 変形 | 水質 | | | | | | | | | |

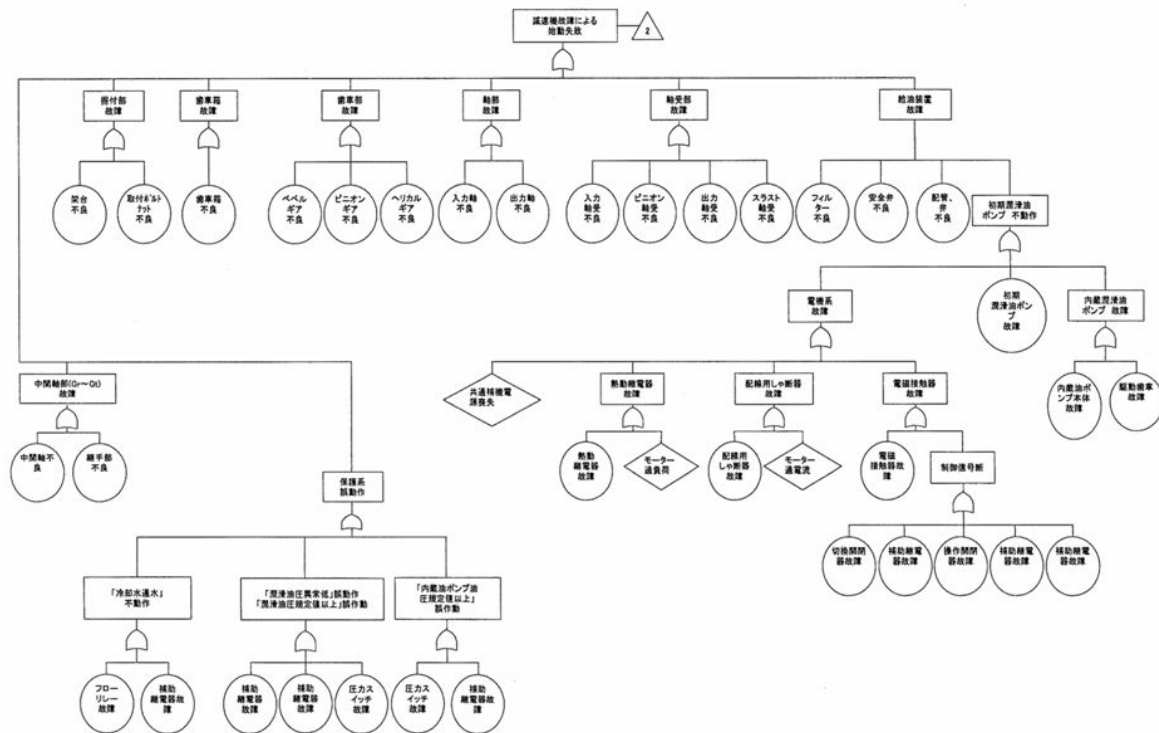


図-1 主ポンプ設備のFT図事例(ケース1)

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、平成19年度には5機場の維持管理データを基に、LCC及び信頼性の解析を実施した。当該解析では、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、この差が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) 信頼性の評価

比較的維持管理情報の保存状態が比較的良好である5機場を選定し、各年度の点検整備報告書から故障情報を拾い出した。各機場の形式及び経過年数を表-2に示す。

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

表-2 5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) | ガスタービン(横軸) |

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 |

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故障日時
- ③故障した機器の属する系統（号機）

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階層に差異が生じてい

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。

各機場名をA～Eとし、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の計算結果を表-4に示す。

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、「数年に1回は運転しなければならぬ時に排水能力が低下する可能性がある」ことを意味している。

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から、各機場とも2～6ヶ月に1回は何かしらの故障が発見される確率になるが、点検整備で故障対応していることによりアンアベイラビリティ（数年に1回）程度のリスクとなっている。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。

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ることがわかる。なお、5機場において実稼働中に排水能力が低下した事例は1件しかなくことから、メンテナンスレベル自体は妥当であると評価できる。

2) 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いることがわかった。同じように、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機場は各センサー類、冷却水系統が弱点であった。また、5機場を総合すると、冷却水系統の故障が最も多く、FMEAを行う上での致命度も高いため、技術改善の余地があることを意味している。また、改善を実施し、その結果良好な状態を得られることができれば、技術基準へのフィードバックに役立てることも可能である。

表-3 故障履歴の整理事例

| 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 | 三極双頭切替開閉器 | | | | | 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キン | | | | | 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 | PI040020000100 | 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

| 機場名 | アンアベイラビリティ ※ | 故障の仮想生起確率 ※ | 摘要 |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------|
| A機場 | 2.02×10^{-5} | 2.28×10^{-4} | |
| B機場 | 2.56×10^{-5} | 2.42×10^{-4} | |
| C機場 | 4.97×10^{-5} | 4.70×10^{-4} | 大型ポンプ |
| D機場 | 2.69×10^{-5} | 7.90×10^{-4} | 大型ポンプ |
| E機場 | 2.36×10^{-5} | 4.00×10^{-4} | |
| E機場 | 4.44×10^{-6} | 2.85×10^{-5} | ガスタービンのみ※ |

※ : 単位 1/hr、ガスタービンは機関単独の確率を示す。(系統機器がDEと供用のため)

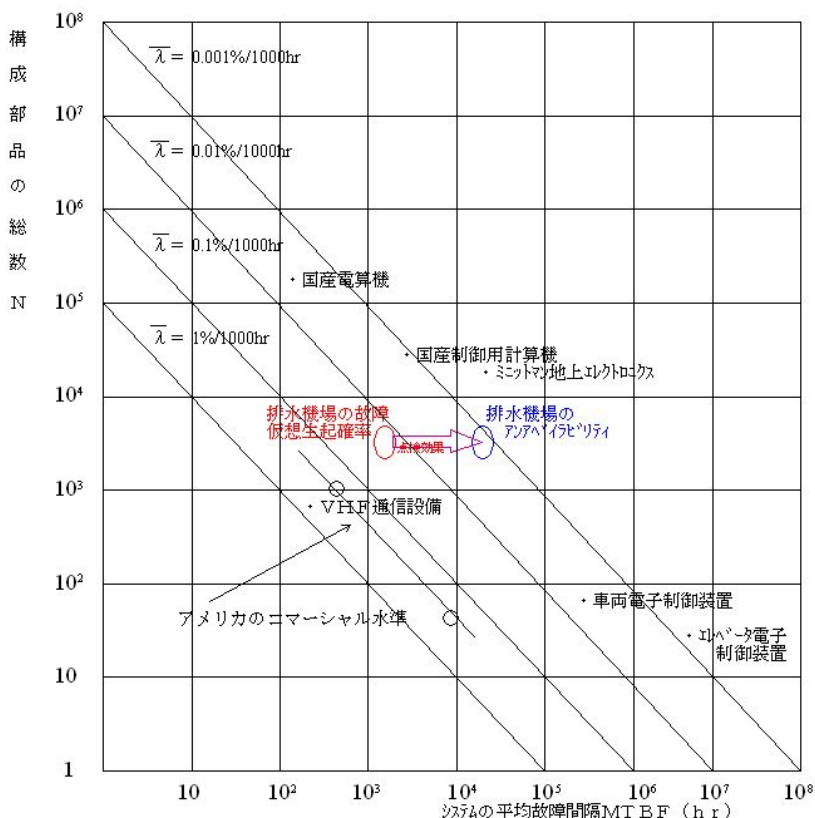


図-2 排水機場におけるメンテナンス効果

このような「くせ」は、設備構成、設置環境、運用状況に影響を受けている。特に設置環境が機器に与える影響は大きい。致命度が高い機器に操作制御設備があるが、機場の設計によっては、高湿度の場所に機側操作盤を設置している事例もある。電動機や電子デバイスは、温度・湿度が高い場合、寿命が短くなることがわかっており、管理上注意が必要である。系統機器のポンプ類も故障しやすい機器の代表例であり、温度、湿度、扱う水質や運転頻度などの要因で寿命が左右されている。

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。

3) LCC の評価

D 機場を例に、メンテナンス費用の推移を推計した。D 機場は、総排水量 100m³/s の機場で、1982 年に 2 台 (30 m³/s×1 台、20 m³/s×1 台) の主ポンプを設置後、1996 年にさらに 1 台 (50 m³/s) を増設している。さらにその後、運用上の合理化を図るために遠方監視操作制御設備を増設している。

排水ポンプ設備に係る建設費は、デフレーターを勘案して総額約 78 億円 (遠方監視操作制御設備を含む) である。一方、メンテナンス費用の推移は、記録のある数年間のデータから作業内容とデフレーターを勘案して推計した。その結果を図-3 に示す。また、これに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 (年率換算の維持修理費率) を求めた。2 台の主ポンプを管理していた当初 15 年は約 0.2%/年、3 台の管理を行っている現状では、約 0.3%/年となっている。

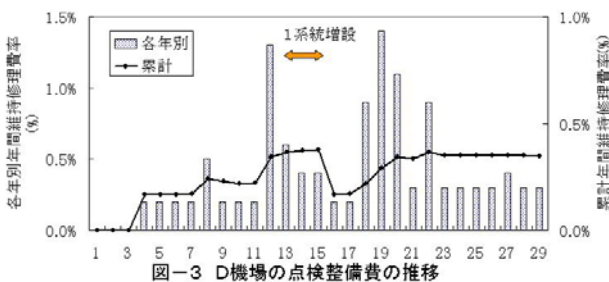


図-3 D機場の点検整備費の推移

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、正確な集計によってアンアベイラビリティの低下を招かない範囲の維持管理費レベルを把握することができる。また、維持管理費の推移を定量的に把握できるので、便益の精査や以後の設備計画時における便益計算に活用することも可能である。

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。

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 (点検で見発したものを含む) 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 5 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が、現状では特筆できる傾向を認めることはできなかった。

5.2 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 (管理運転、寸法等測定、目視など)

清掃・調整の有無、修繕の内容

運転日 (運転回数)

運転条件 (先行待機運転、排水運転、管理運転など)

運転時間 (各運転条件ごと)

使用環境 (温度・湿度・水質など)

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

平成 19 年度に行った実機場データの解析において、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が必要であるとわかった。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。

5. 今後の研究方針

5.1 設計 FMEA の実施

固有機場の維持管理データから、故障の傾向を調査した結果、機場によって故障しやすい機器の傾向を把握することができた。

故障しやすい機器について優先順位を検討し、上位の機械から設計 FMEA を行い、技術的な改善策を立案する手法を提案する。一般的には、機場の FMEA シートを整備することによって、部品の致命度の高さを優先順位の指標とすることができる。

5.2 状態監視保全の検討

FTA では、ポンプ設備の稼働中に起こりうる故障へのシグナルをリアルタイムに把握し、信頼性の変化を評価することができない。

しかし、近年の河川ポンプ設備では、運転支援装置を導入し、システムの状態監視をリアルタイムで行えるようにしている場合が多い。この運転支援装置を効果的に活用することで、FTA、耐用年数による管理の課題を補足することができる。

具体的には、長期的スパンで点検員が記録した点検時及び運転時の各計測データと、ポンプ設備に導入された運転支援装置のデータ(主ポンプの軸受け温度や振動等)を解析し、長期的な傾向を調査するとともに、運転中においても故障モード発現との関連性など調査していく。

5.3 維持管理データベースにおける演算機能の提案

4. 項で示した解析については、維持管理データベースから必要情報を引き出し、簡素な計算・整理で達成できるものばかりである。データベースの仕様に、当該機能

を盛り込めるようエクセルを中心とした既存アプリケーションによる解析フォーマットを作成する。

6. まとめ

平成 17~19 年度までの成果をまとめると次のとおりである。

- 1) 河川ポンプ設備の信頼性評価手法として、最新の設備構成を勘案した FMEA、FTA 手法を再整理(平成 2 年度の成果を活用)した。
- 2) 固有機場間のアンアベイラビリティの差異に着目することで、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。
- 3) 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。
- 4) 固有機場の故障履歴を整理することで、点検整備の効果を定量的に示すことができた。
- 5) 建設費と維持管理費の推移を整理することで、信頼性との関連を把握することができ、経済性調査(便益計算)の検証も可能とした。
- 6) 前項までの検討を基に、維持管理データベースに必要なデータ項目を提案した。

平成 20 年度は、国土交通省において維持管理データベースの構築が予定されている。これまでの成果と、技術改善手法としての設計 FMEA、及び効果的な修繕・更新を実現するための状態監視保全技術とを融合させ、必要な機能はデータベースに反映させるべく調整を図っていく。

また、最終的に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成果を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
- 3) 桐本順広他 2 名：「原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出」2001 年 2 月 電力中央研究所

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