

河川ポンプ設備の信頼性と新たな設備維持管理手法の検討

STUDY OF RELIABILITY AND NEW MAINTENANCE METHOD FOR PUMPING EQUIPMENT

涌井 健*・石川紳二*・舟橋修徳**・山本洋介*

Takeshi WAKUI, Shinji ISHIKAWA, Osanori HUNAHASHI and Yosuke YAMAMOTO

The Kisogawa-Jyoryu river office of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport has managed 23 drainage pumping stations in upper catchment of the Kisogawa, Nagaragawa and Ibigawa rivers. Because many of these pumping stations are 30 years or more old, the need for repair works is expected to increase in the near future. Although drainage pumping stations only operate for short periods at long intervals, they must be guaranteed to operate during a flood. Therefore, renewal-oriented maintenance has been applied to the equipment to ensure their function. However, in recent years as public-works budgets have decreased, it has become difficult to continue the conventional maintenance method. This study presents a new maintenance method that has been designed to replace the renewal-oriented maintenance.

Keywords : pump equipment, reliability analysis, fault tree analysis, failure mode effects analysis, maintenance, maintenance program, management, planning, reduced maintenance cost, cost equalization

1. はじめに

木曽三川（木曽川、長良川、揖斐川）は、中部地域を代表する河川であり、明治時代以降の歴史的な河川改修により、三川分流がなされ、現在の河川形態となっている。木曽三川に囲まれた輪中地帯は土地が低く、大雨のたびに支川逆流を引き起こし、流域では甚大な洪水被害に見舞われてきた。このような度重なる水害に対し、伊勢湾台風を契機として様々な治水対策が講じられてきた。



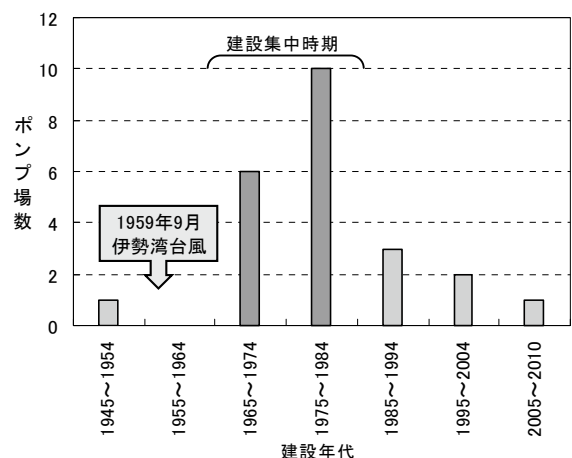
図－１ 木曽川上流河川事務所管内 河川ポンプ設備配置図

木曽三川上流域を管轄する国土交通省木曽川上流河川事

* 電力事業本部 プラント事業部 機械・情報通信技術部

** コンサルタント国内事業本部 交通運輸事業部 インフラマネジメント部

務所では、治水対策の一環として、内水排除を目的とした河川ポンプ設備の建設を進め、現在では、図－１に示す 23 箇所に配備している。これらの設備は図－２に示すとおり、最も古いもので 1951 年（昭和 26 年）に建設されたものがあり、その後、1965～1984 年に集中的に建設が進められた経緯がある。



図－２ 河川ポンプ設備建設年代統計（N＝23）

河川ポンプ設備の耐用年数は、一般に 30～40 年¹⁾と言われているが、すでに建設から 30 年以上経過した設備を多く抱え、今後の取替・更新工事が集中・増大することが予想される。一方、公共工事予算は年々縮小傾向にあり、限られた予算の中で設備を維持していくことが難しくなっている。

このような状況を踏まえ、治水施設としての信頼性を確保しつつ、限られた予算の中で河川ポンプ設備を適正に維持管理していく手法を検討したので、本論文にて紹介する。

2. 河川ポンプ設備の実態と課題

木曽川上流河川事務所が管轄する河川ポンプ設備について、今後の維持管理を考える上で、大きな課題となっている事項は、以下に示す5点である。

- (a) 維持管理費が、今後確実に増大していくとともに、今後10年間に更新工事が集中する。
- (b) 大規模な更新工事を行うと、点検・整備の予算を圧迫し、不具合を放置する悪循環を招く。
- (c) 河川ポンプ設備を取り巻く環境や設備の使われ方が変化しているにも拘わらず、画一的な周期によって整備・更新が計画されている点も、今後の維持管理費増大と集中を招く要因である。
- (d) 点検時の故障ランク判定基準が曖昧なため、不具合を正しく評価することができず、計画的な対策が施せない。
- (e) 全体の約4割を占めるガスタービンエンジンは、機器・部品故障により出水時に「排水機能喪失」した苦い経験がある。このため、経済性、保守性、信頼性の面でガスタービンエンジンに形式統一していく今後の計画に疑問が生じている。

これら5つの課題について、以下に実態を解説する。

(1) 維持管理費の増大と集中

1965～2005年までの維持管理費用（点検・整備・修繕・更新等の工事費）を、2005年までの総額との比率で表すと、図-3の棒グラフ（実績コスト）のようになる。

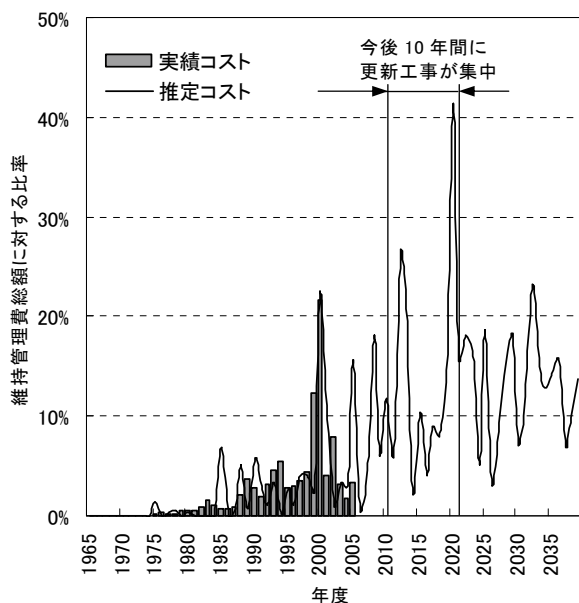


図-3 年代別維持管理費の推移

一方、実績コストを用いて今後の維持管理費用を試算すると、図-3の波線（推定コスト）のとおりに、維持管理費用が増大し、2012年、2020年に集中する。

(2) 定期整備の実施状況

河川ポンプ設備の主要な構成装置である①主ポンプ、②原動機（ディーゼルエンジンのみ）および③自家発電機について、新設もしくは前回整備からの経過年数と実施件数の実績を図-4に示す。指針¹⁾では5年整備および10年整備の実施が推奨されているが、管内ではおおむね5～20年の幅広い周期で定期整備が実施されている。この内、主ポンプは大掛かりな分解工事を伴うため、30年以上経過してから整備を実施している例もある。

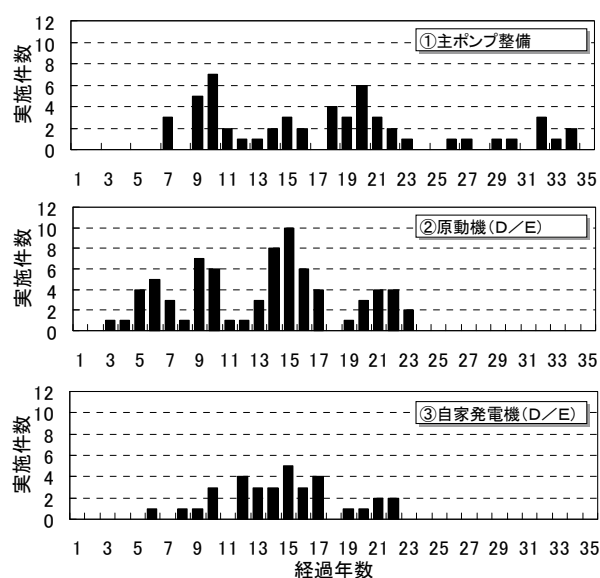


図-4 定期整備実施までの経過年数と実施件数

図-5は、至近25年（1985年～2010年）における定期整備および新設・更新工事の年代別実施状況である。

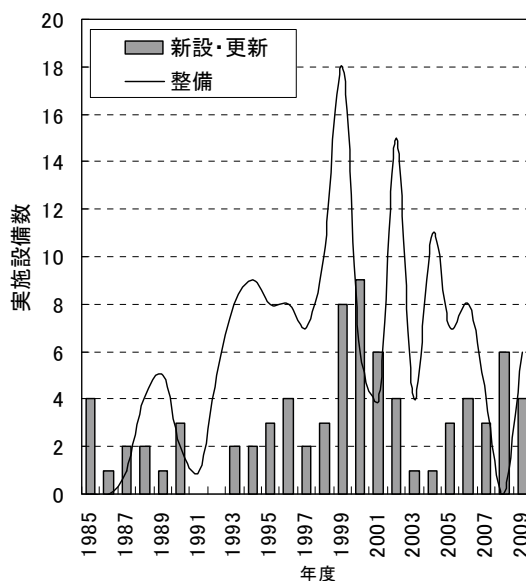


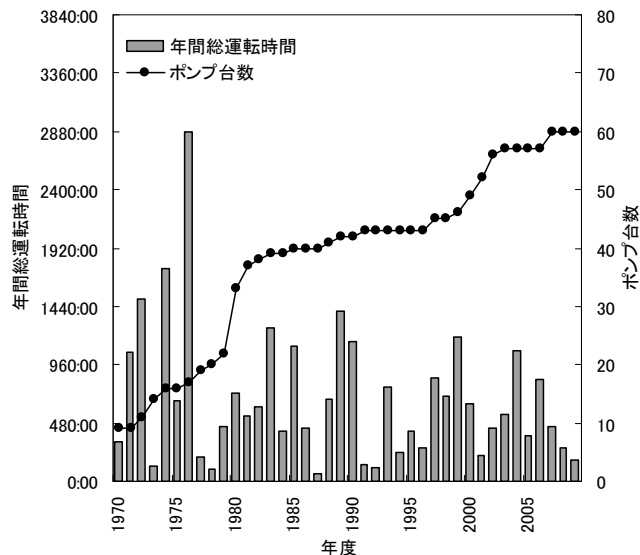
図-5 整備および新設・更新工事実施状況

定期整備件数は 1999 年以降年々減少しており、至近 5 年間（2005 ～ 2009 年）は新設・更新工事との兼ね合いもあり、とくに定期整備の実施件数が激減している。

これは、近年の緊縮財政による維持管理予算の縮小が大きく起因しているとともに、限られた予算を大規模な新設・更新工事に投じたため、定期整備に予算配分できなくなっているためと推察される。

(3) 河川ポンプ設備を取り巻く環境の変化

管理運転時間を除く年間総運転時間は、図－6 に示すとおり、年々減少している。これは、1980 年以降、ポンプ台数の増強を図り、出水を短時間のうちに排水処理できるようになったため、中にはほとんど稼働していないものもある。また、近年の異常出水、流域面積や市街化率の変化もあり、河川ポンプ設備を取り巻く環境が変化している。なお、図－6 には長時間稼働する揚水ポンプ設備および湛水防除目的のポンプ設備は含まれていない。



図－6 年間総運転時間とポンプ台数

(4) 定期点検結果の判定

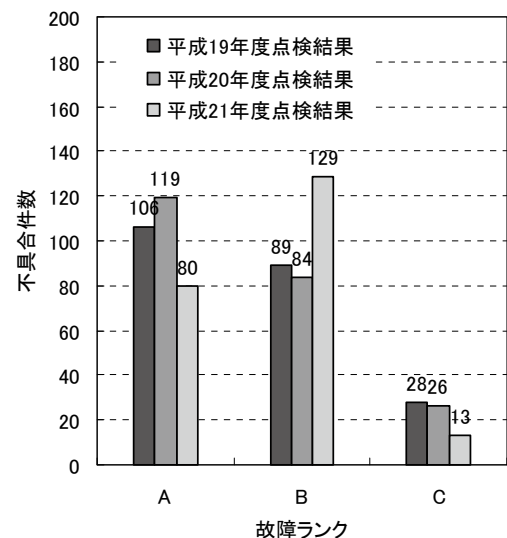
定期点検は、出水期前の年点検と月点検を実施しており、検出した不具合は、表－1 に示す 4 つの故障ランクに分類している。

表－1 故障ランクと判定基準

故障 ランク	判定基準
A1	緊急に整備必要（最優先）
A2	緊急に整備必要
B	緊急は要しないが整備必要
C	今後の推移を観察し検討する

過去 3 年間の年点検結果より、報告されている不具合件数を故障ランク別に分類すると図－7 に示すとおりとなる。なお、故障ランク「A1」と「A2」は「A」として一つにまとめた。

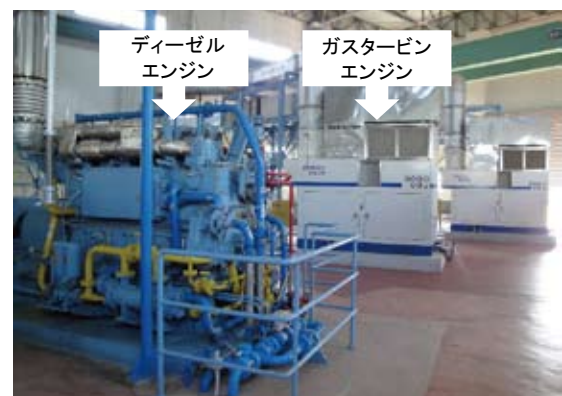
平成 21 年度点検結果は、前年度に比べ「A」が減り「B」が増えているが、緊急整備を施した記録は残っていない。不具合の対策を施さずに故障ランクが減少あるいはランクダウンすることは考えにくい。つまり、判定基準が不具合に対する整備の緊急性を定性的に評価するものであるため、施設管理者や点検技術者の判断に個人差が生じている可能性がある。



図－7 故障ランクと不具合件数

(5) 混在する原動機形式

原動機形式を大別するとディーゼルエンジンとガスタービンエンジンの 2 形式がある。近年になって、ガスタービンエンジンの導入が進められ、図－8 に示すとおり、原動機形式の変更過程にある排水機場では、異なる形式の原動機が混在している状況である。



図－8 異形式原動機が混在する排水機場

ディーゼルエンジンは、始動空気・冷却水・燃料等の系統設備が二重化され操作が確実であり、予備品調達が容易

なので保守性に優れているという現場の声がある。また、ガスタービンエンジンを導入した排水機場で、始動不能となる不具合が数件発生した経緯もある。

一方、設計指針²⁾では、系統設備が省略でき、設備の簡素化が可能となるため、信頼性が高いとされるガスタービンエンジンの採用が推奨されている。

このため、原動機形式の変更過程にある排水機場では、今後の更新計画を策定するにあたり、現場の声や経験を踏まえると、ガスタービンエンジンに形式統一していく方向性に疑問が生じている状況にある。

3. 信頼性解析の実施

ある機械が“信頼できる”という場合、『その機械が使用されているとき、規定の時間において使用者の満足し得る状態にすること』をいい、『信頼性』とは『与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす性質 (JIS Z8115)』をいう。

信頼性解析手法には、様々なものがあるが代表的なものに FTA および FMEA がある。

FMEA (Failure Mode Effect Analysis の略) システム (設備) を構成する部品・機器が故障した場合、上位のサブシステムやシステムが、どのような影響を受けるかワークシートを使って進める解析 FTA (Fault Tree Analysis の略) 発生しては困る事象の要因を抽出する手法
--

本検討では、これらの手法を用いて、故障ランク評価の最適化および原動機等の構成装置の信頼性を検討した。

(1) FMEA 実施による故障ランク評価の最適化

1) FMEA の適用

FMEA の実施により、河川ポンプ設備を構成する機器・部品が、万一機能しないことによって設備にどのような影響を及ぼすか分析でき、致命的な影響を及ぼす機器・部品の抽出が可能となる。

致命的機器・部品は、耐用年数等を目安にして予防保全を計画すればよく、非致命的機器・部品は不具合を検出してから整備・修繕・更新する事後保全とすればよいので、従来の予防保全を主体としてきた維持管理手法に比べ、点検・整備数を低減あるいは最適化することによるコスト削減効果が期待できる。

また、致命的機器・部品の特定が可能となるため、定期点検により検出した不具合に対して対策の緊急性を判断する材料として役立てることが可能となる。

2) FMEA 実施例

管内河川ポンプ設備に関する FMEA 実施例を表-2 に示す。構成する機器・部品の故障モードがシステムに与える影響を分析し、表-3 に示す 4 ランクの故障等級に分類する。

故障等級 I および II となる機器・部品は故障する前に保全活動を施す予防保全を、故障等級 III および IV となる機器・部品は故障を検出してから対策する事後保全を適用する。

表-3 故障等級と保全対策

故障等級	影響内容	対策
I	機能停止	予防保全
II	機能低下	
III	機能維持可能	事後保全
IV	支障無し	

表-2 FMEA 実施例

設備名：主ポンプ設備		装置名 主ポンプ（無注水軸受）		冗長性（予備機械）：				
機器（サブシステム）：主ポンプ								
部品名	機能	故障モード	故障原因	故障の影響		致命度 (故障等級)	対策	備考
				サブシステム	設備（システム）			
ポンプベース（基礎）		水漏れ	施工不良、亀裂、地盤沈下	部品の影響大	機能維持可能	Ⅲ	補修	
吸込水槽	貯水	土砂の堆積大 水位不足	土砂の堆積 貯水不足	機能低下	機能低下	Ⅱ	清掃	
				機能停止	機能停止	Ⅳ	水位確保	
空気抜管		錆	全面腐食、電食、隙間腐食	部品の影響大	支障無し	Ⅳ	塗装	
吐出しベント	吐出	振動	芯出し不良、組立不良、異物混入、材料劣化	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	再組立、異物除去等	外部軸受に順ずる
		錆	全面腐食、電食、隙間腐食	部品の影響大	支障無し	Ⅳ	塗装	
		水漏れ	施工不良、亀裂	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	再組立	
主軸	動力（回転）伝達	芯出し不良	組立不良、材料劣化	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	再芯出し	腐食程度により対策判断 メーカー規定値により判断 状況により部品交換
		錆	全面腐食、電食、隙間腐食	部品の影響大	支障無し	Ⅳ	部品交換又は腐食部除去し滑らかに仕上げ	
		摩耗	組立不良	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	部品交換	
		振動	軸芯のくるい	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	芯出し調整	
軸継手	動力伝達	締り具合不良	締付不良	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	再締付	
		継手ゴム摩耗	材料劣化	部品の影響大	機能維持可能	Ⅲ	部品交換	
外部軸受	回転軸支軸	基準異常（温度）	芯出し不良、組立不良、過負荷、材料劣化、冷却不良	致命的	機能停止	Ⅰ	軸受交換、再組立、異物除去等	
		振動	芯出し不良、組立不良、異物噛込、材料劣化	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	軸受交換、再組立、異物除去等	
		摩耗	芯出し不良、組立不良、材料劣化、異物噛込	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	軸受交換、再組立、清掃等	
		グリス切れ	油漏れ、油供給不良、油劣化、冷却不良	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	グリス注入・バックシン交換、フィルター清掃等	
		油洩れ	組立不良、材料劣化	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	軸受交換、再組立	
		作動不良（オイルリング）	固着、油劣化	部品の影響大	機能低下	Ⅱ	清掃、軸受・油交換	
サブシステムを構成する機器・部品を記述		機器・部品について、故障モード・故障モードの発生原因を記述		故障モードが与えるサブシステムあるいはシステムへの影響を解析し、故障等級を記述			保全対策を記述	

3) 故障ランクの再評価

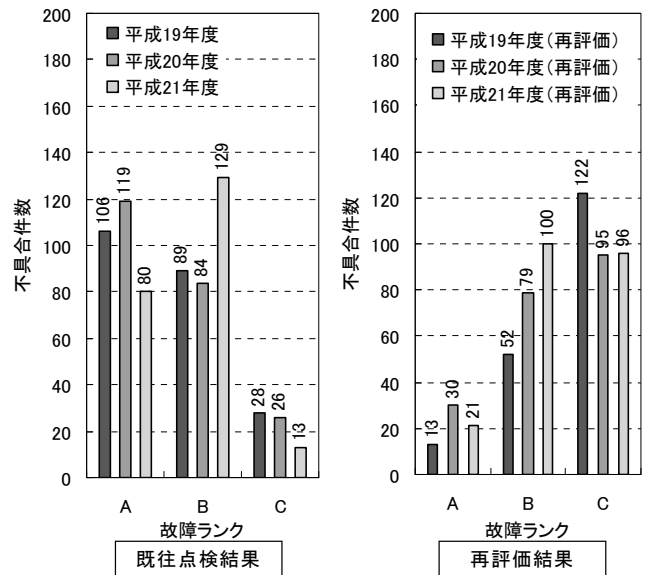
過去 3 年間の年点検結果より、故障ランク（A1・A2・B・C）と、FMEA による故障等級を図－9 に示すマトリックス評価し、故障ランクを A・B・C の 3 ランクに再評価した。

故障 ランク	故障等級				ランク	定義
	A1	B	A	A	A	排水機能を停止または低下させる不具合が生じており、1～2 年以内のうちに緊急に修繕が必要である。
	A2	C	B	A		
	B	C	B	B		
	C	C	C	C		
					B	排水機能に影響を与える不具合が生じており、早急に(3～5 年以内)修繕を講じないと施設の機能が停止または低下する恐れがある。
					C	排水機能に支障は生じていない

図－9 故障ランクのマトリックス評価

再評価結果は、図－10(右) に示すとおりとなる。故障ランクが高くなるほど件数が減少し、A ランクの件数が再評価前に比べて極端に減少したことが分かる。このことより、以下の事項が考察される。

- ① 既往点検結果は、対策の緊急性がない不具合を過大評価している。
- ② 一方で、排水機能に影響を及ぼし、緊急に対策すべき不具合を見逃している可能性もあり、本来実施すべき対策が滞っている可能性がある。
- ③ また、マトリックス評価を行うことにより、個人差なく点検結果から健全度を正しく評価できる（適正化の実現）。

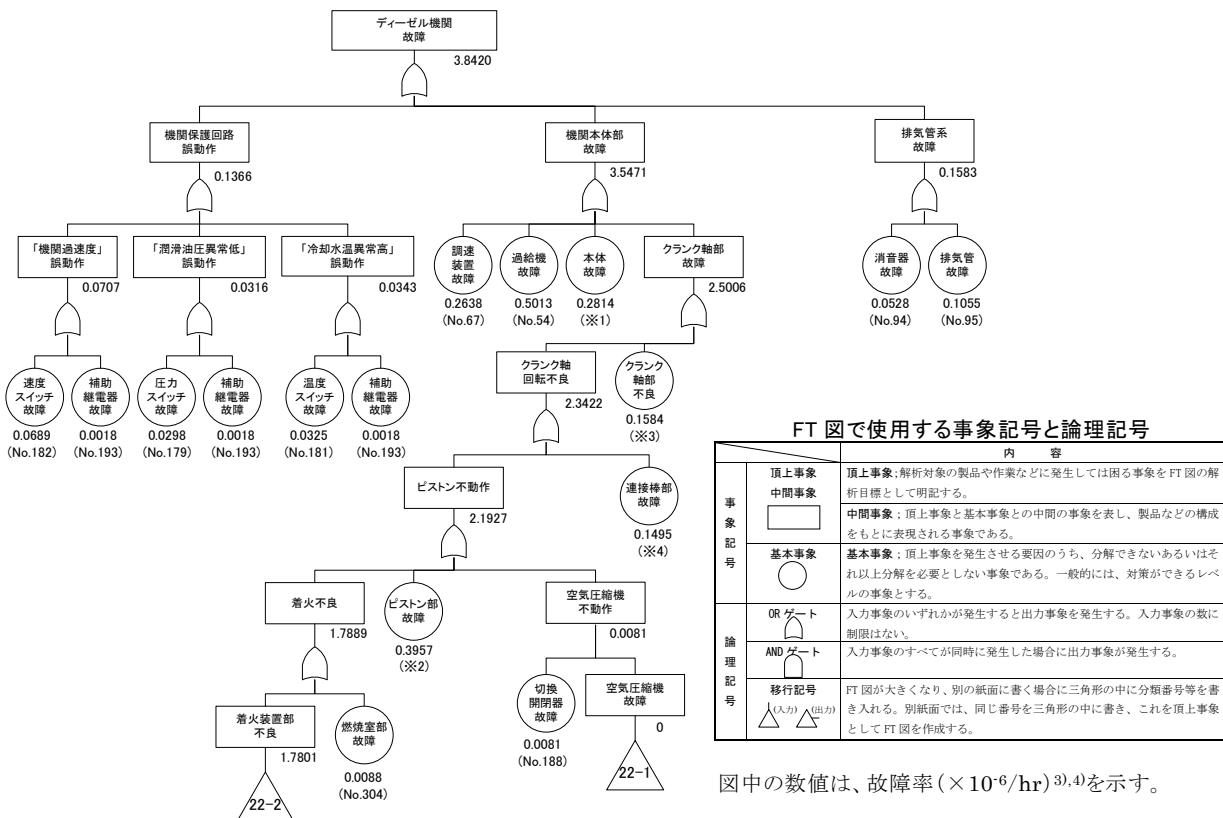


図－10 故障ランク再評価結果

(2) FTA 実施による装置の信頼性

1) FTA 実施手法

管内河川ポンプ設備について、『発生しては困る事象（排水機能の喪失）』を設定し、その要因や機器・部品（致命的な機器・部品）を樹形図上に整理し、機器・部品に故障率^{3),4)}を当てはめて、頂上事象の発生確率を算出した。FTA 実施例を、図－11 に示す。



図中の数値は、故障率(×10⁻⁶/hr)^{3),4)}を示す。

図－11 FTA 実施例（水冷ディーゼルエンジン解析例）

2) FTA 結果

管内河川ポンプ設備を構成する装置の内、主ポンプ、原動機（自家発電機含む）、動力伝達装置、系統設備は様々な形式があるため、表－4 に示すとおり、形式別に解析し、装置単体の故障率を算出した。

表－4 FTA 実施装置と故障率

FTA実施装置	故障率 ($\times 10^{-6}/\text{hr}$)
主ポンプ設備(無注水軸受)	0.8081
主ポンプ設備(ゴム軸受)	0.8207
原動機(水冷ディーゼル)	3.8420
原動機(ラジエターディーゼル)	5.1721
原動機(ガスタービン)	5.8198
動力伝達装置(空冷クラッチなし)	0.7384
動力伝達装置(空冷遠心クラッチ)	0.7462
動力伝達装置(空冷油圧クラッチ)	0.7462
動力伝達装置(水冷遠心クラッチ)	0.8460
動力伝達装置(水冷流体継手)	0.8460
動力伝達装置(水冷油圧クラッチ)	0.8460
冷却水系統(清水循環方式)	0.2409
冷却水系統(管内クーラ方式)	0.3159
冷却水系統(二次冷却方式)	0.3249
冷却水系統(クーリングタワー)	0.5788

原動機は他装置の故障率より大きく、信頼性を評価する上で大きな割合を占めている。

ここで、「排水機能喪失」という頂上事象の発生確率を、排水機場ごとに算出した結果、表－5 に示すとおり、水冷ディーゼルエンジンがガスタービンエンジンに比べて優位になる。この要因は、水冷ディーゼルエンジンは、始動空気、燃料、冷却水等の系統設備を二重化しているためと考えられる。

表－5 原動機形式と故障率

	故障率 ($\times 10^{-6}/\text{hr}$)
水冷ディーゼル採用の排水機場	7.3962 ～ 8.2325
ラジエターディーゼル採用の排水機場	8.4104
ガスタービン採用の排水機場	8.3119 ～ 9.5113

4. 新たな設備維持管理手法

(1) 保全区分と定義

河川ポンプ設備に関する維持管理の保全区分は、点検、保全整備、定期整備、更新の4つがあり、これらの定義は表－6 に示すとおりである。

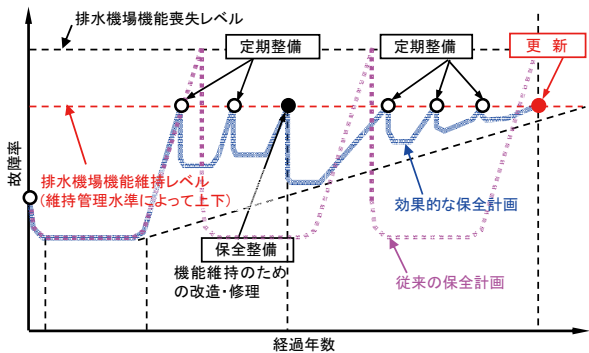
表－6 保全区分と定義

保全区分	定義	予防保全	事後保全
点検	設備の異常ないし損傷の発見、機能の良否の判定のために実施する目視、計測、作動テスト及びこれらの記録	○	
保全整備	点検・診断結果に基づき機能維持又は機能復旧が必要な機器等について実施する整備	○	○
定期整備	機能維持のために定期的に適宜実施する清掃、調整、給油脂、修理、取替、塗装等の作業ならびに記録	○	
更新	故障又は機能低下した設備、装置の機能を復旧するために新しいものに設置しなおすことをいう		○

(2) 効果的な維持管理計画の概念

従来の維持管理計画は、機能喪失レベルに達したら更新する考え方に基づいていたため、大掛かりな更新工事による保全費が必要になる課題があった。

しかしながら、河川ポンプ設備としての機能を最低限維持できるレベルを設定して、このレベルに到達する時点あるいは予想される時点で最適な保全手法（定期整備、保全整備等）を適用することによって、保全費を抑制し最大限に機能を発揮することができると考えられる。



図－12 効果的な維持管理計画の概念図

(3) 排水機場維持管理レベル

排水機場機能維持レベルは、維持管理水準（機能低下可能性・社会的貢献度）によって、排水機場ごとに設定する。

維持管理水準が高ければ、機能維持レベル（図－12 赤点線）が低く設定され、維持管理計画の周期が短く設定されることになる。一方、維持管理水準が低いと、機能維持レベル（図－12 赤点線）が高く設定され、維持管理計画の周期が長く設定されることになる。

(4) 維持管理水準

機能維持レベルを決定する維持管理水準は、「機能低下可能性」と「社会的貢献度」の2つのパラメータより決定する。その評価手法を以下に示す。

1) 機能低下可能性の評価

機能低下可能性は、表－7 に示す6つのパラメータを評価基準に照らし合わせて配点し、合計点を表－8 に示す評価基準により評価し、排水機場ごとに3ランクに分類する。

表－7 機能低下可能性の評価パラメータと配点

評価パラメータ	評価項目	評価基準と配点
設備特性	稼働条件	0.38 常用系の設備である
		0 待機系の設備である
設置周辺環境	地盤沈下	0.12 地盤沈下による劣化がみられる
		0 地盤沈下による劣化はみられない
	堆積土砂	0.14 設備に影響を与える堆積土砂が多い
		0 設備に影響を与える堆積土砂は少ない
	流木・ゴミ	0.13 流木・ゴミが多い
		0 流木・ゴミが少ない
水質	落雷	0.12 落雷被害がある
		0 落雷被害がない
	水質	0.11 水質が悪い(飽和指数(SI)<-1)
		0 水質は悪くはない(飽和指数(SI)≥-1)

なお、表中の配点は AHP 分析（Analytic Hierarchy Process の略、階層分析）を行い決定した。

表－8 機能低下可能性の評価

	評価点	評価基準
設備の機能低下の可能性	3	通常より損傷・変状が進行する可能性が高い 評価基準合計点が0.65点以上
	2	損傷・変状の進行は標準的である 評価基準合計点が0.37点～0.64点
	1	通常より損傷・変状が進行する可能性が低い 評価基準合計点が0.36点以下

2) 社会的貢献度の評価

社会的貢献度は、表－9 に示す 5 つのパラメータを評価基準に照らし合わせて配点し、被害密度と氾濫規模の各々について合計点を表－10 に示す判定基準に従い再配点する。さらに被害密度と氾濫規模を図－13 に示すマトリックス評価により、排水機場ごとに 3 ランクに分類する。

表－9 社会的貢献度の評価パラメータと配点

評価指標	評価項目	評価基準
被害密度	市街化区域面積	2 市街化区域面積が9km ² 以上
		1 市街化区域面積が3km ² 以上9km ² 未満
		0 市街化区域面積が3km ² 未満
	流域面積における市街化区域面積の割合	2 流域面積における市街化区域面積の割合が70%以上
		1 流域面積における市街化区域面積の割合が30%以上70%未満
		0 流域面積における市街化区域面積の割合が30%未満
	公共施設の有無	1 流域に公共施設が有る
		0 流域に公共施設が無い
氾濫規模	設備規模	2 機場の計画総排水量が25m ³ /s以上
		1 機場の計画総排水量が15m ³ /s以上25m ³ /s未満
		0 機場の計画総排水量が15m ³ /s未満
	重要水防箇所	1 設備近隣に重要水防箇所がある
		0 設備近隣に重要水防箇所がない

表－10 評価軸の判定基準

評価軸	判定基準と配点
被害密度	3 評価基準合計点が4点以上
	2 評価基準合計点が2点～3点
	1 評価基準合計点が1点以下
氾濫規模	3 評価基準合計点が3点
	2 評価基準合計点が1点～2点
	1 評価基準合計点が0点

被害密度	3	2	3	3
	2	1	2	3
	1	1	1	2
		1	2	3
		氾濫規模		

図－13 社会的貢献度マトリックス評価

3) 維持管理水準の設定

維持管理水準は、「機能低下可能性」と「設備の社会的貢献度」の 2 つのパラメータを、図－14 に示すマトリックスを使い、排水機場ごとに 3 ランクに分類する。維持管理水準の定義は、表－11 に示すとおりである。

表－11 維持管理水準と定義

維持管理水準	維持管理水準の定義
Ⅲ	社会的に重要な施設で、かつ施設が劣化しやすい条件下にあるため、対策を最優先で取るべき排水機場
Ⅱ	社会的に重要な施設、もしくは施設が劣化しやすい条件下にあり、対策を優先的に取るべき排水機場
Ⅰ	社会的な貢献度もしくは機能低下の可能性が低く、事後保全的な対応で計画する排水機場

機能低下可能性	3	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
	2	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
	1	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ
		1	2	3
		社会的貢献度		

図－14 維持管理水準評価マトリックス

(5) 保全整備計画

保全整備は、定期点検（年点検および月点検）により検出された不具合について、修理および日常整備としての給油脂や消耗部品の交換、燃料、冷却水の補給、各部の清掃、作動調整等を行う作業である。

維持管理計画、保全整備の内容および保全整備費を特定することができないため、過去に行われた保全整備工事の実績をもとに平均的な費用を計上するものとした。

(6) 定期整備計画

定期整備は、機能維持のために定期的に適宜実施する清掃、調整、給油脂、修理、取替、塗装等の作業である。定期整備周期は、従来、5 年から 20 年ごとに実施されてきたが、管内河川ポンプ設備の使われ方（運転回数・運転時間）に違いがあることに着目し、近年の出水に対する運転頻度を勘案した定期整備周期を設定するものとした。

1) 運転頻度を勘案した設備の差別化

定期整備周期は、「運転頻度による健全度」を評価し、健全度の高低によって周期の短長を設定する。

ここで、運転頻度による健全度は、表－12に示すとおり、過去20年間（1989～2009年）の年平均運転回数および最高連続運転時間から評価する。

表－12 運転頻度による健全度評価パラメータ

評価パラメータ	評価項目	評価基準
運転頻度による健全度評価	運転回数	1 過去20年間の年間平均運転回数が20回/台以上である
		0 過去20年間の年間平均始動回数が20回/台未満である
	運転時間	1 過去20年間の最大連続運転時間が12時間/台以上である
		0 過去20年間の最大連続運転時間が12時間/台未満である

運転回数および運転時間を排水機場ごとに配点し、表－13に示す判定基準により、健全度の高低を3分類する。

表－13 運転頻度による健全度ランクと判定基準

健全度	配点	判定基準
3	2	年間平均運転回数及び年間平均運転時間が長い排水機場
2	1	年間平均運転回数もしくは年間平均運転時間のいずれかが長い排水機場
1	0	平均運転回数及び平均運転時間は、他排水機場に比べて少ない排水機場

2) 定期整備周期

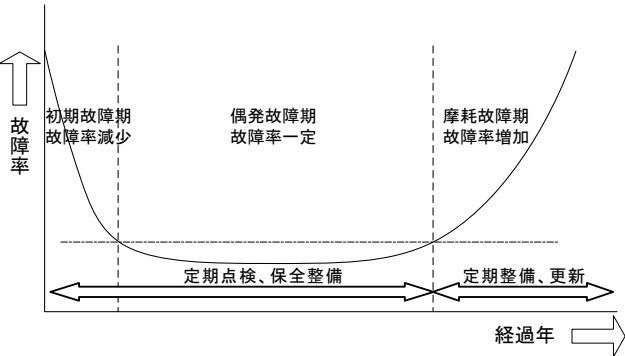
定期整備周期は、表－14に示すとおり、運転頻度による健全度ランクに応じて、周期の長短を設定した。

表－14 定期整備周期と運転頻度による健全度ランク

装置区分		運転頻度による健全度			定期整備周期の設定
		1	2	3	
監視操作制御設備		37年	29年	22年	健全度3周期:信頼性による修繕・取替年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:平均修繕・取替標準年数
主ポンプ設備		24年	18年	12年	健全度3周期:信頼性による修繕・取替年数 健全度2周期:修繕実績より、実施件数累計が50%に達した経過年数 健全度1周期:健全度3と2の間隔を健全度2から差し引いた年数
動力伝達装置					
冷却水系統設備					
主原動機設備	D/E	23年	19年	15年	健全度3周期:信頼性による修繕・取替年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:定期整備実績における実施間隔の最大年数
	G/T	18年	14年	10年	健全度3周期:ガスタービンメーカー見解の平均的年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:ガスタービンメーカー見解の最大年数
燃料系統設備		主原動機設備と同時期			
始動系統設備		主原動機設備と同時期			
除塵設備		21年	16年	11年	健全度3周期:健全度2周期に5年を減算した年数 健全度2周期:修繕実績より、実施件数累計が50%に達した経過年数 健全度1周期:健全度2周期に5年を加算した年数
高圧受電設備 低圧受電設備 直流電源設備		37年	29年	22年	健全度3周期:信頼性による修繕・取替年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:平均修繕・取替標準年数
自家発電設備	D/E	23年	19年	15年	健全度3周期:信頼性による修繕・取替年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:定期整備実績における実施間隔の最大年数
	G/T	18年	14年	10年	健全度3周期:ガスタービンメーカー見解の平均的年数 健全度2周期:健全度1と健全度3の中間年数 健全度1周期:ガスタービンメーカー見解の最大年数

定期点検および保全整備が図－15に示すバスタブ曲線の初期故障期あるいは偶発故障期の保全活動と位置づけると、定期整備および更新は、摩耗故障期における保全活動と考えることができる。

一般に、摩耗故障期にある設備の取替・更新実績は、図－16に示すような正規分布を描くことが知られている。



図－15 典型的な機器の故障率曲線（バスタブ曲線）⁵⁾

セーフライフ（安全寿命）設計の考え方を参考として、修繕・取替の実施率が 10% を越えた時点（「信頼性による修繕・取替年数」）、50% を越えた時点（「平均修繕・取替年数」とすると、修繕・取替実施率が 10% から 50% の範囲を定期整備の実施期間と考えた。

つまり、定期整備周期は、摩耗故障期でかつ平均修繕・取替年数よりも前の年数を割り振るようマニュアル⁵⁾および点検・整備指針⁶⁾を参照し設定した。

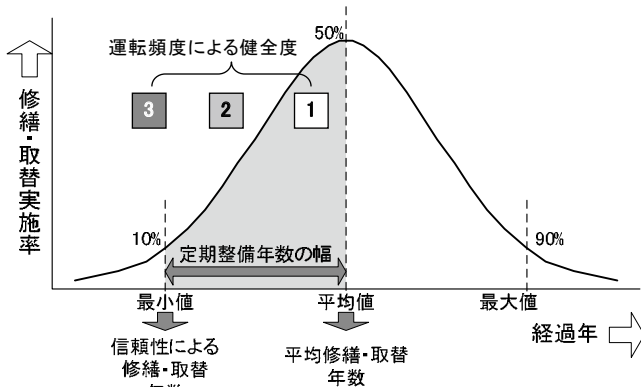


図-16 摩耗故障期における取替・更新実績の分布⁵⁾
(定期整備年数の幅)

(7) 更新計画

一方、更新は故障又は機能低下した設備、装置の機能を復旧するために新しいものに取り替える保全活動である。

更新周期は、図-17 に示すとおり、平均修繕・取替年数⁵⁾から修繕・取替実施率が 90% となる最大修繕・取替年数までの間で周期を割り振るものとした。

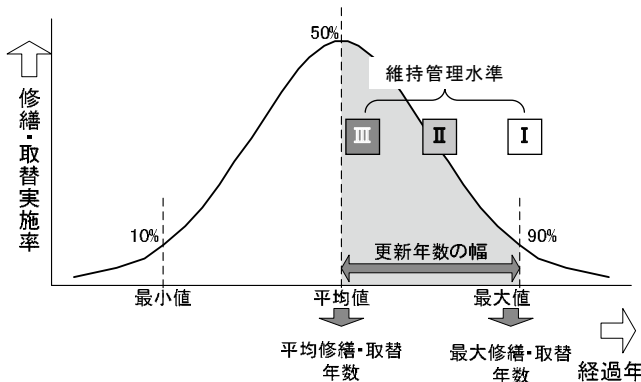


図-17 摩耗故障期における取替・更新実績の分布⁵⁾
(更新備年数の幅)

また、更新周期は河川ポンプ設備の維持管理水準に応じて決定し、表-15 に示す年数を計画に考慮した。

表-15 更新周期と維持管理水準

装置区分	維持管理水準		
	I	II	III
監視操作制御設備	52年	44年	37年
主ポンプ設備	52年	42年	32年
主原動機設備	D/E 59年	48年	37年
	G/T 59年	48年	37年
動力伝達装置	59年	51年	43年
燃料系統設備	55年	45年	35年
冷却水系統設備	48年	37年	27年
始動系統設備	37年	30年	23年
自家発電設備	D/E 59年	48年	37年
	G/T 59年	48年	37年
受変電設備	52年	44年	37年
除塵設備	40年	32年	24年

5. 設備維持管理手法の検証

(1) 検証条件

1) コストシミュレーションによる検証

4 章で述べた設備維持管理手法を「改善手法」とし、「従来法」とのコスト比較を行った。従来法は、すべての設備の「維持管理水準」を「III (短周期)」と考え更新周期を一律にするとともに、「運転頻度による健全度」を「I (長周期)」として定期整備周期も一律に行うものと仮定した手法である。

コスト比較は、長期的なコストシミュレーションを行い、年平均維持管理費の増減を検証した。

2) 比較年数の設定

従来法の更新周期はおおむね 30 ～ 40 年であり、管内排水機場の約 7 割が 20 年以上前に建設されたものであることを考えると、今後 10 ～ 20 年の間に更新周期を迎える設備が急増することが予想される。

このため、今後 10 ～ 20 年の間に集中する維持管理コストを縮減・平準化することが重要な検討課題であるため、今後 30 年間について従来法と改善手法を比較する。

(2) コストシミュレーションの実施

1) 従来法のコストシミュレーション結果

従来法のコストシミュレーション結果は、図-18 に示すとおりである。従来法の今後 30 年間の維持管理費の総額に対し、年度ごとに発生する保全整備費、定期整備費および更新費との比を図中に示した。

図-18 より、2011 年、2017 年、2038 年に大規模な更新コストが集中し、2012 年から 2016 年にかけて定期整備コストがまったく発生しないなど、全体的に維持管理コストのばらつきが大きい。また、年間平均維持管理費 (A)

は総額の 3.33% である。

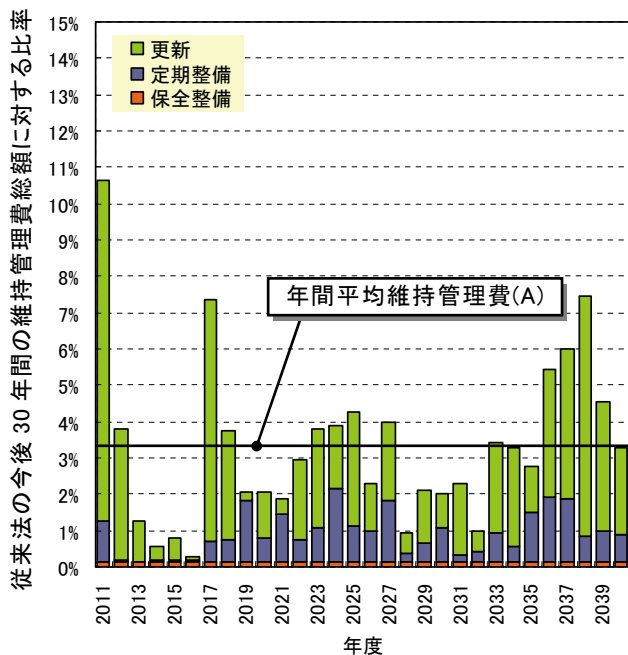


図-18 従来法のコストシミュレーション結果

2) 改善手法のコストシミュレーション結果

改善手法のコストシミュレーション結果は、図-19 に示すとおりである。改善手法は、全体的なばらつきを少なくし、同一機場内の号機の重複工事を避けるため、年度ごとに発生する費用を維持管理水準に応じ2～3年を目安に前後させた。

このため、全体的なばらつきが小さく、改善手法の年間平均維持管理費 (B) は、従来法の総額に対して 2.71% となる。

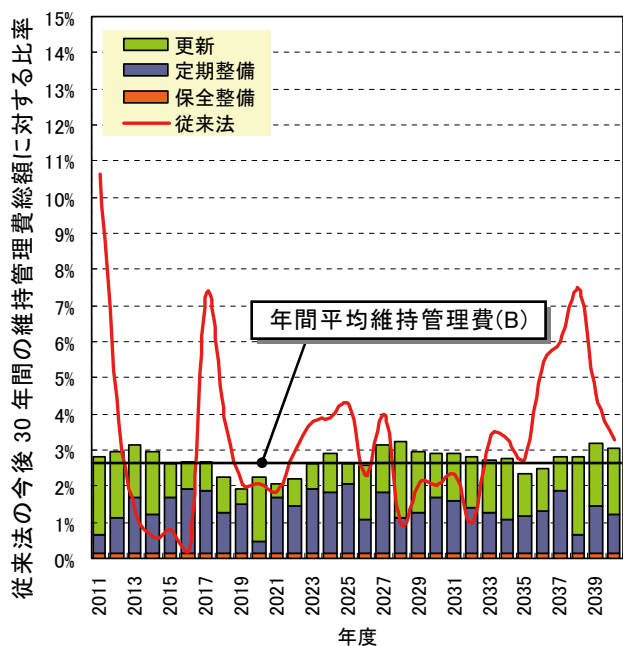


図-19 改善手法のコストシミュレーション結果

(3) 手法の検証

1) コスト削減効果

図-18 および図-19 より、従来法の年間平均維持管理費に比べ、改善手法の年間平均維持管理費は、約 18.6% (= (A - B)/A) 削減可能と予想された。これにより、改善手法は、今後 30 年間の維持管理費削減効果が期待できる有効な手法といえる。

2) コスト平準化

従来法は、大規模な更新工事が集中し、大きくばらつく課題があったが、図-19 に示すとおり、改善手法は平均値付近で平坦に推移する。これは、改善手法が、その年々に応じて、効率よく整備と更新をバランスよく配分させることができるためである。

3) 長寿命化効果

維持管理費の総額に対する保全整備、定期整備および更新の比率は、図-20 に示すとおりである。

従来法に比べると、更新費は 17.9% 抑制し、定期整備費は 17.5% 増加している。

つまり、従来法に比べ、定期整備の充実を図り、取替・更新時期を引き延ばす長寿命化効果を発揮しているものと考えられる。

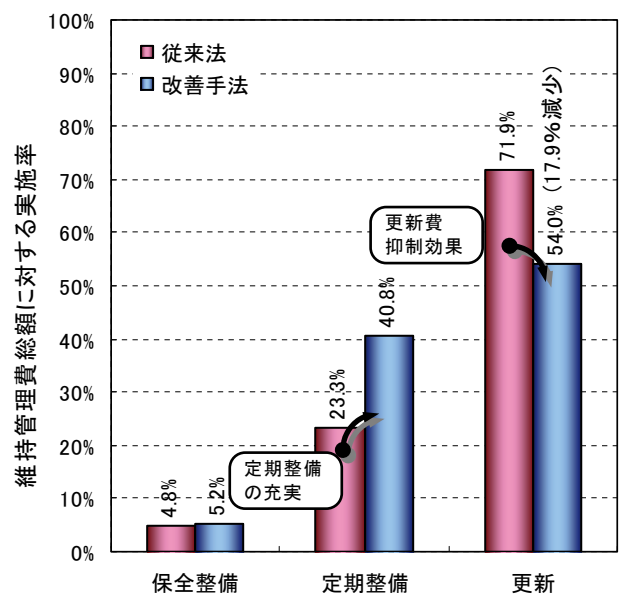


図-20 整備および更新の改善効果

6. 維持管理マネジメントサイクルの実現

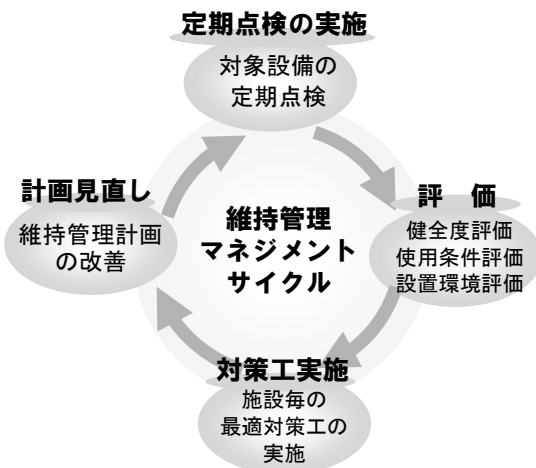
維持管理計画に基づき、管内河川ポンプ設備の維持管理を実現していくにあたり、中長期的には、現時点の維持管理計画を以下の理由により見直す必要がある。

- (a) 現時点の維持管理計画は、設定した周期で施設を更新することを前提に計画しているが、施設によっては実施周期以上の延命化が可能なもの、突発的な事

故により更新を余儀なくされるもの等が必ずあるはずであり、中長期的には計画と現実の乖離が生じることが予想される。

(b) 同様に予算上の制約により、実施できない維持管理項目が発生し、計画と現実の乖離が生じることが予想される。

したがって、計画と現実との整合を図るため、図－21 に示すとおり、維持管理計画の見直しが必須となる。計画の見直しは、3～5 年程度の間隔で、以下のマネジメントサイクルを構築することによって実現する。



図－21 維持管理マネジメントサイクル

維持管理マネジメントサイクルを適正に循環させていくには、策定した維持管理計画を、実際の現場に適用し、かつ見直していかなければ、継続的な維持管理費の縮減・平準化の実現は困難である。

このため、計画値と実績値の対比、実績による「計画の見直し」を可能とする維持管理データベースを構築し、長期にわたり活用していく必要があると考える。表－16 にその基本機能の例を示す。

表－16 維持管理データベース基本機能例

主な機能	機能の内容
入力処理	点検結果(不具合内容・故障ランク) 修繕・定期整備・更新記録
出力処理	30年間の維持管理コスト(一覧・グラフ) 緊急に対策すべき施設評価結果(一覧) 定期整備・更新計画(一覧)
検索・編集 処理	点検結果、修繕記録、設備台帳等の管理情報 施設健全度評価パラメータ 維持管理費 定期整備及び更新周期 維持管理計画(見直し)
演算処理	施設健全度評価 緊急に対策すべき施設の抽出 維持管理計画及びコスト 劣化予測

7. あとがき

本稿にて紹介した新たな設備維持管理手法は、“更新を中心とした維持管理”から“整備の充実を図る維持管理”に移行したものである。

治水対策の河川ポンプ設備は、年間の稼働時間が極端に少ないにも拘わらず、万一の出水時に確実に排水運転でなければならない。このため、従来から“更新を中心とした維持管理”によって安全側に設備を維持してきた。

河川ポンプ設備に拘わらず、公共事業の縮小と老朽化ストックの増大は公共施設全般の問題であり、従来の維持管理手法は、このような社会情勢において成り立たない。

木曽川上流河川事務所管内の河川ポンプ設備を例とすれば、設備を取り巻く環境条件、使われ方は配備されている地域によって異なるのが実状で、これらに見合った水準で維持管理し、過剰な設備投資とならないよう整備の充実を図ることが、社会情勢に見合った新たな維持管理手法といえる。

老朽化した河川ポンプ設備について、コスト縮減・平準化の観点から今後の維持管理を計画するにあたり、本稿にて紹介した計画・解析手法を参考にして頂ければ幸いである。

また、排水機場に導入されるガスタービンエンジンの信頼性向上への努力を期待するとともに、信頼性向上が実現できた時点で、このような検討を再度実施して維持管理計画の見直しを図っていくことが重要である。

謝辞：本稿の執筆にあたり、御指導頂きました国土交通省木曽川上流河川事務所の皆様ならびに御協力・御指導を頂きました株式会社荏原由倉ハイドロテックの関係各位に対し心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 揚排水機場設備点検・整備指針（案）同解説、(社)河川ポンプ施設技術協会、2001
- 2) 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、2001
- 3) 機械設備の信頼性評価に関する調査研究（第二報）、国土交通省土木研究所、2001
- 4) PSA 用故障率データに関する調査、(財)原子力安全研究協会、1997
- 5) 河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）、国土交通省総合政策局 建設施工企画課 / 河川局 治水課、2008
- 6) 揚排水機場設備点検・整備指針（案）同解説、(社)河川ポンプ施設技術協会、2010

