

河川構造物管理研究セミナー

機械設備の維持管理に関する 研究動向

平成29年3月3日

国立研究開発法人 土木研究所
先端技術チーム 主任研究員 伊藤圭



機械設備の概要

◆ 河川用機械設備の例



排水ポンプ設備



引上式可動堰



河川用水門

◆ 河川堤防等の土木構造物と一体となって設置され、自らが稼働することにより機能を発揮する設備

◆ 安全、快適な社会生活のために必要不可欠な社会基盤施設であり、**必要時にその性能を必ず発揮**することが求められる



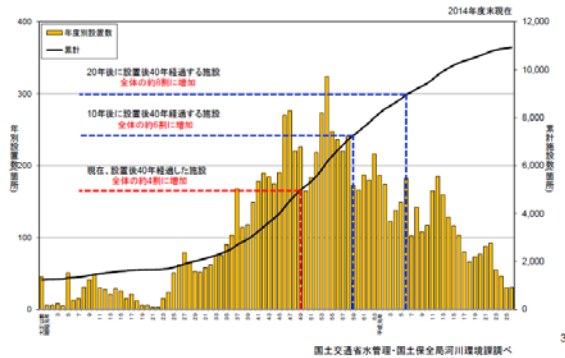
社会的要請・課題

河川ポンプ設備といった機械設備は、**きわめて重要な社会基盤施設**

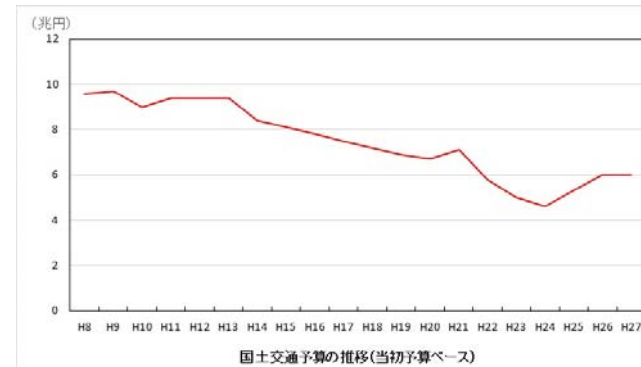
特に排水ポンプ設備は、**平時は停止しているが、豪雨や異常出水の際には確実な稼働が要求される**



設備の老朽化と設備数の増 今後10年で約60%が設置後40年超



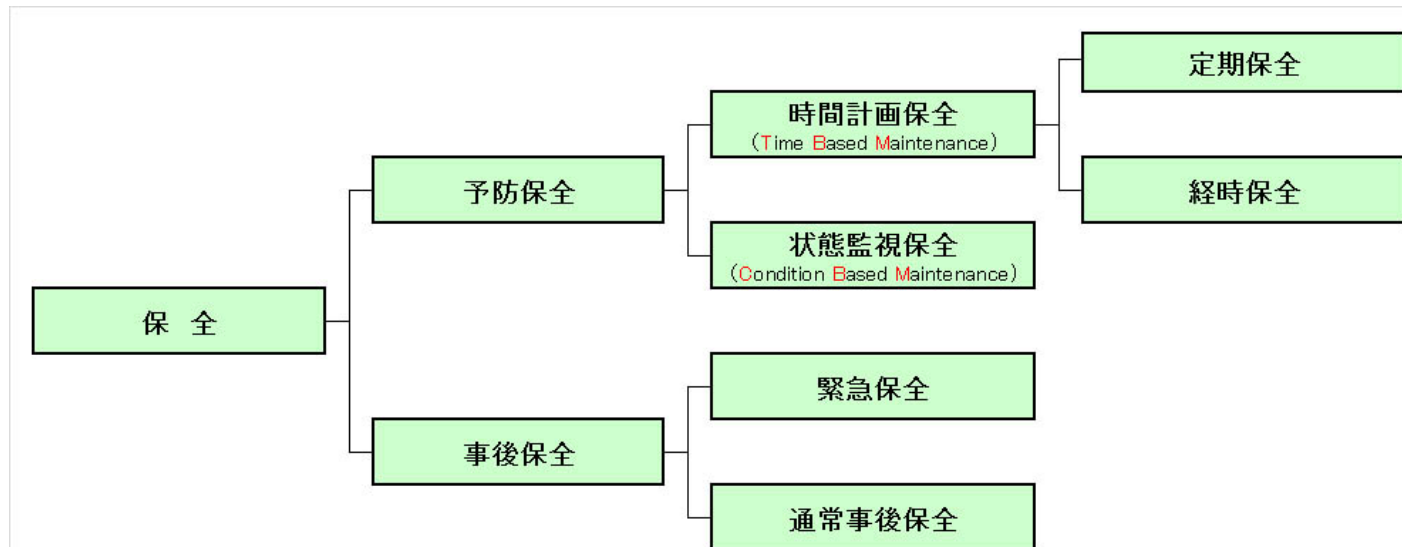
限られた公共事業予算



この相反する状況下で如何に効率的で的確な設備維持管理を行うかが課題

時間計画保全で万全な維持管理を行ってきたが、整備時に異常が無い(整備時期を延伸できた)事例が散見され、状態監視保全の導入に着目

設備保全方法の分類



JIS Z8115による分類

設備保全方法は、予防保全と事後保全に大別

予防保全: アイテムの使用中の故障の発生を未然に防止するために、規定の間隔又は基準に従って遂行し、アイテムの機能劣化又は故障の確率を低減するために行う保全。

時間計画保全: 定められた時間計画に従って遂行される予防保全

状態監視保全: 状態監視に基づく予防保全

事後保全: フォールト発見後、アイテムを要求機能遂行状態に修復させるために行われる保全。



保全方法の適正な選択

時間計画保全

- 的確な整備サイクルの設定により、故障を未然に防ぐことができる
- ×設備状態によらず定期的に整備を行うため、非効率的。また整備コスト的に不利
- ×整備機会が多いため、いじりこわしや、初期状態に戻ることによる故障頻度の上昇が懸念される

状態監視保全

- 設備の劣化兆候を監視して整備を行うため、効率的。また整備コスト的に有利。
- ×的確な診断を行うための技術の習得が必要不可欠
- ×診断に相応の労力が必要。また、診断のための費用を要する。

事後保全

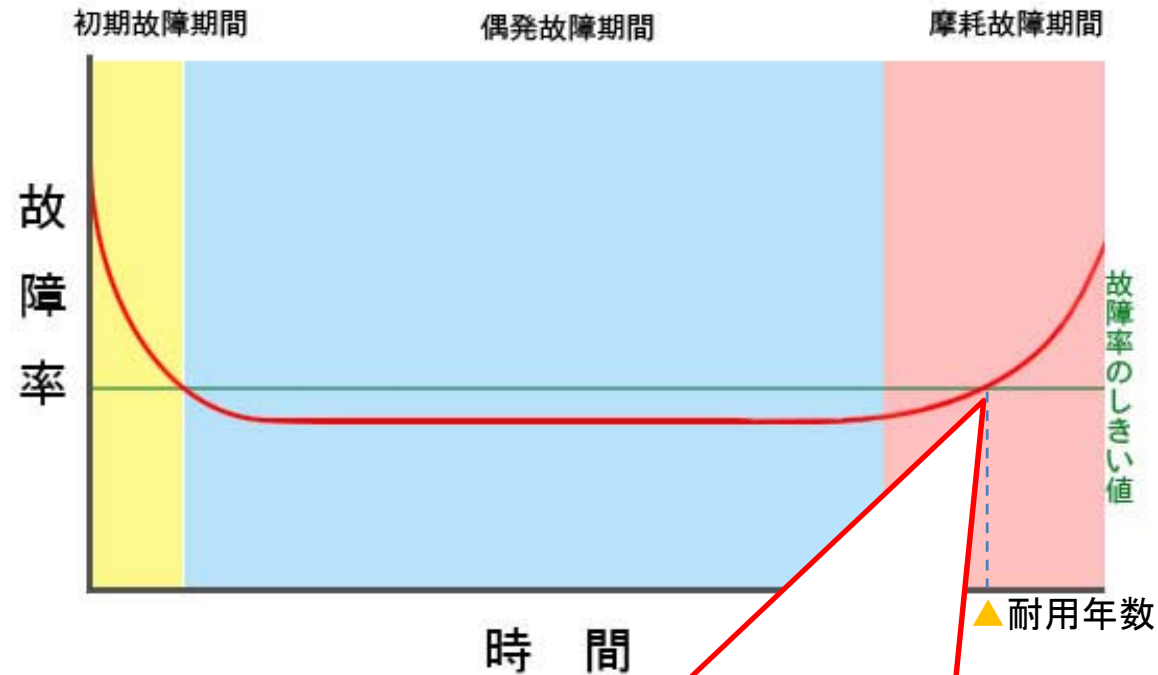
- 維持管理コスト的には、最も有利（故障しなければ整備費はかからない）

- ×稼働時の故障リスクが高くなる（故障しなければ整備しないので、稼働時の故障リスクが高くなる）

必ずしも状態監視保全が優れているわけではなく、保全方法を的確に使い分けることが効果的。

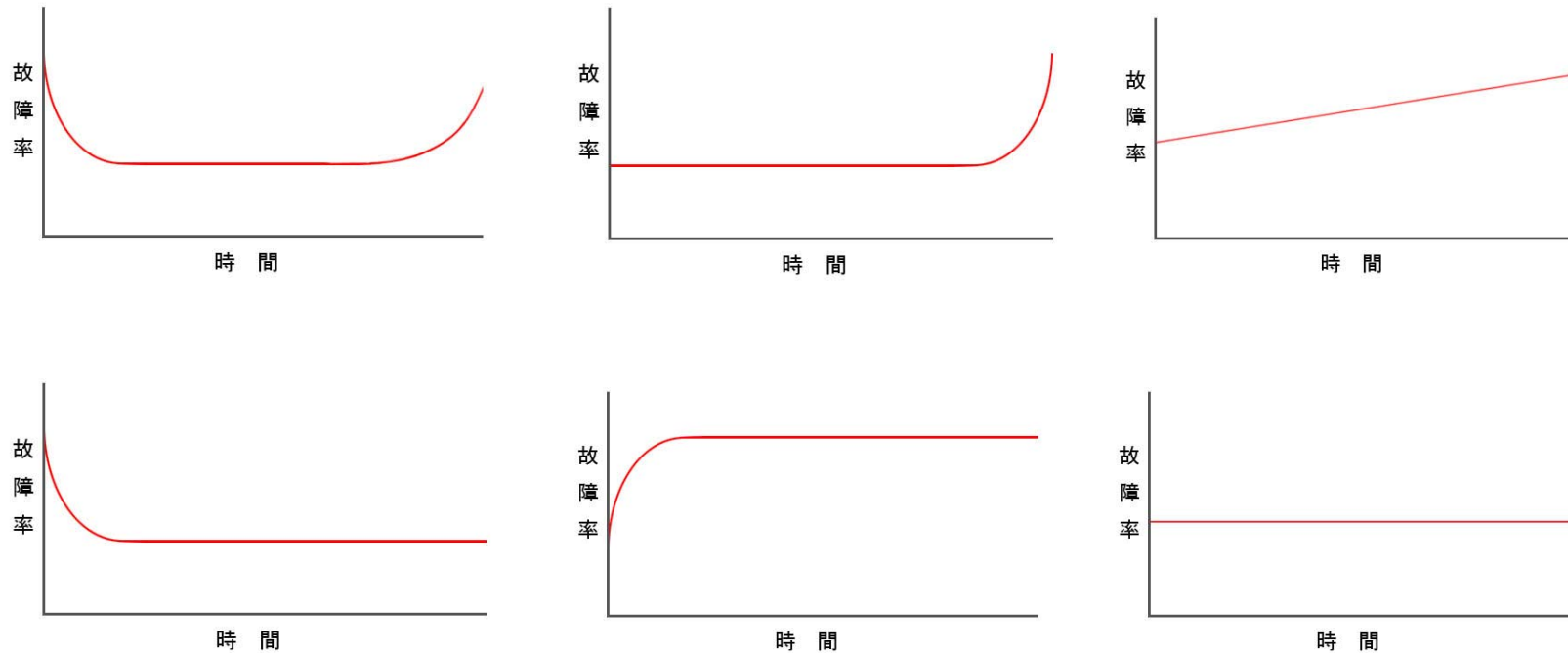
故障率の推移

理想的な故障率の推移は、バスタブ曲線で表される



- 故障率上昇の時間が明確であれば、時間計画保全が有効
- 時間と故障率上昇の関係が不明確でも、故障率上昇の傾向が監視可能なら状態監視保全が有効

故障率(米:航空機部品の例)



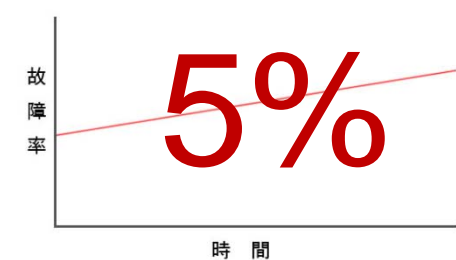
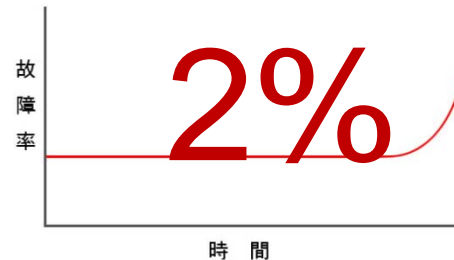
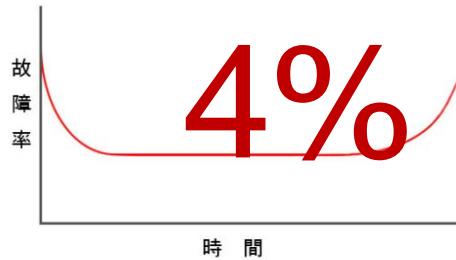
現実の故障率は、バスタブ曲線で表されないものがある

時間と故障の関係が明白→時間計画保全が有効

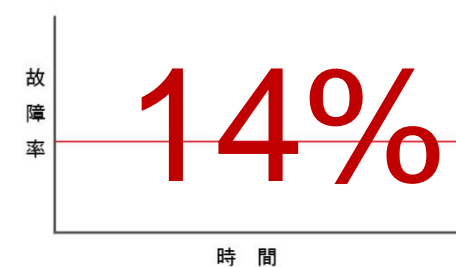
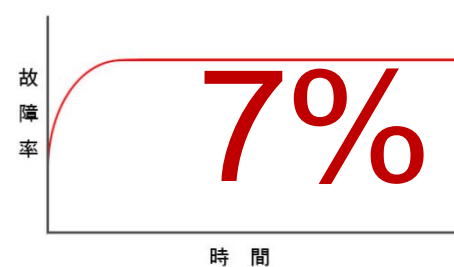
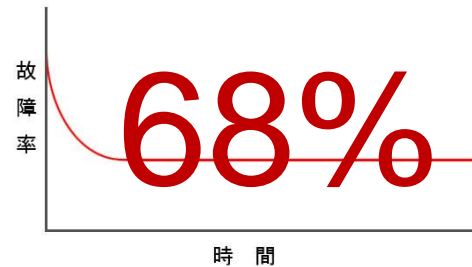
時間と故障の関係が不明確→状態監視保全が有効



故障率（米：航空機部品の例）



時間と故障の関係が**明確**→**時間計画保全**が有効(11%が該当)

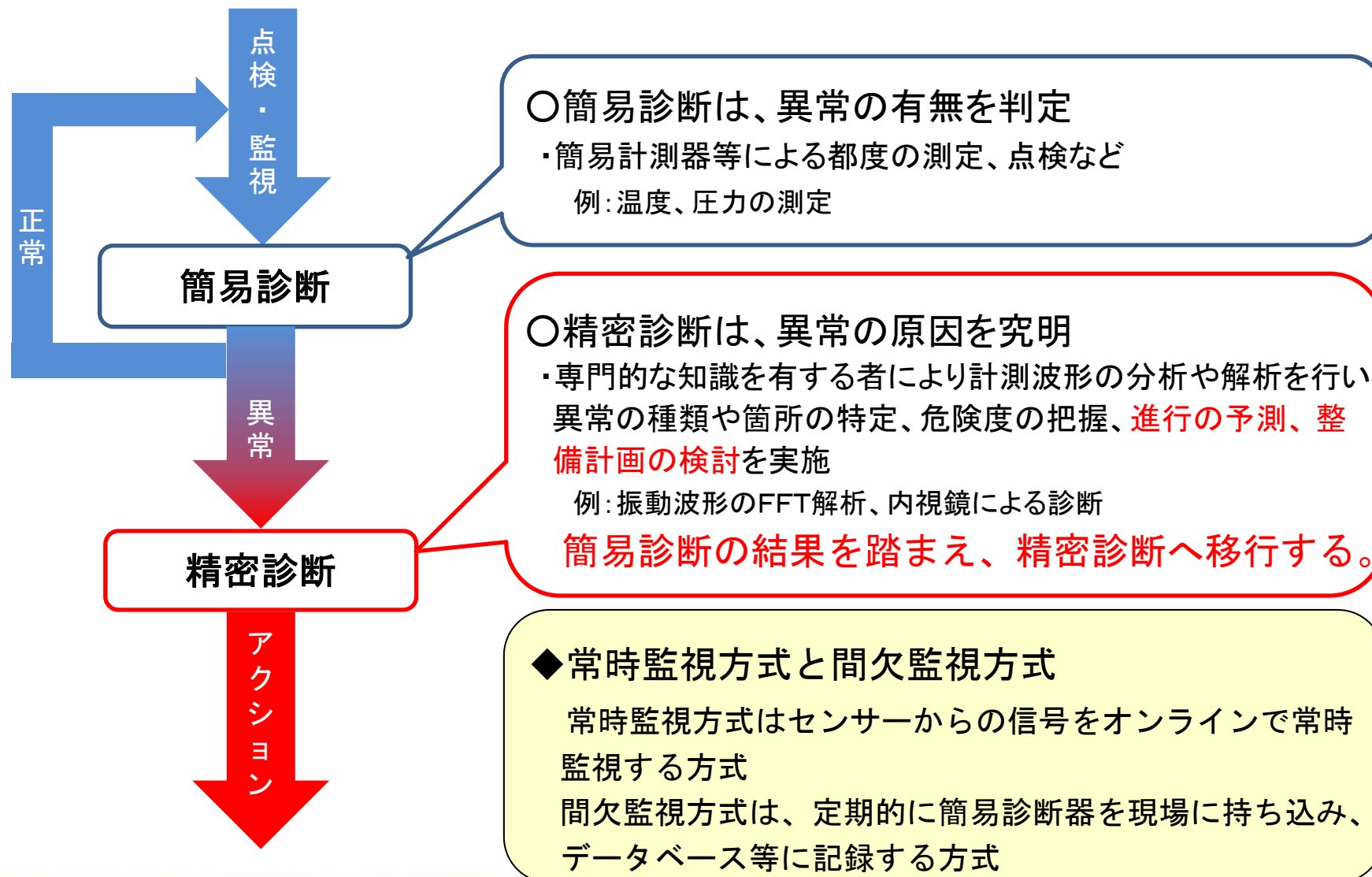


時間と故障の関係が**不明確**→**状態監視保全**が有効(89%が該当)

的確な保全手法を用いて、機械設備における長寿命化と維持管理コスト削減を図る



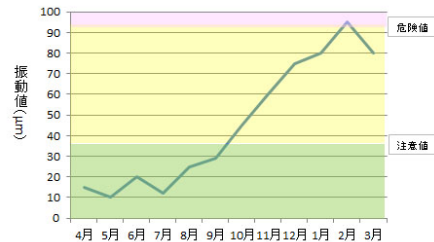
状態監視保全の一般的手法



状態監視技術における国土交通省と土研の取組

国土交通省

傾向管理を状態監視保全として位置づけ



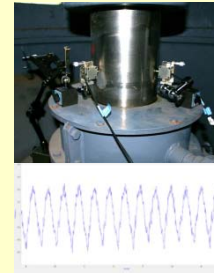
- 点検データ(ケーシングの振動加速度等)をグラフ化し、傾向を把握
- 判定基準値との照合(振動値、温度、回転数etc)

設備の異常の有無を把握

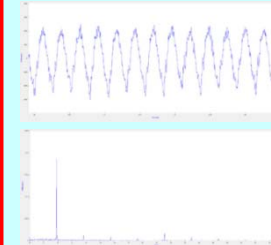
設備診断における「簡易診断」に相当

H27より、「状態監視ガイドライン」(案)による実施を開始

土木研究所



振動値(軸変位)とその変化から傾向把握・判定基準値との確認



振動波形、FFTによる設備診断



潤滑油分析による設備診断

以上の他、ポンプ吐出圧力やAE等多様な診断方法に取組中

設備の異常の有無を把握した上で、設備の異常箇所と程度を調査

設備診断における「精密診断」が主体



河川ポンプ設備への 状態監視保全技術適用の課題

常時稼働している機械設備に対して定期的にパラメータ計測をすることが本来の姿。

平時は停止しており、必要時のみ稼働する「非」常用設備では、的確な診断ができるか未知数のため、**状態監視保全による維持管理には課題**がある。
＜油膜切れ、シール類の固着、停止期間中の腐食劣化など、停止時間が長い故の不安要素がある＞

振動

河川ポンプ設備は主軸回転周波数が60～500rpm(1～8Hz)の低速回転機械であり、このような低回転機械では振動加速度による状態監視が困難

潤滑油

供用時間に対して運転時間が非常に短いため、設備の状態を示す代表的なサンプルが得られるか、そのサンプルによつて的確な診断ができるかが未知数。

常用設備で導入されてきている状態監視保全技術の、「非」常用設備である河川ポンプ設備での適用性について検証する必要がある

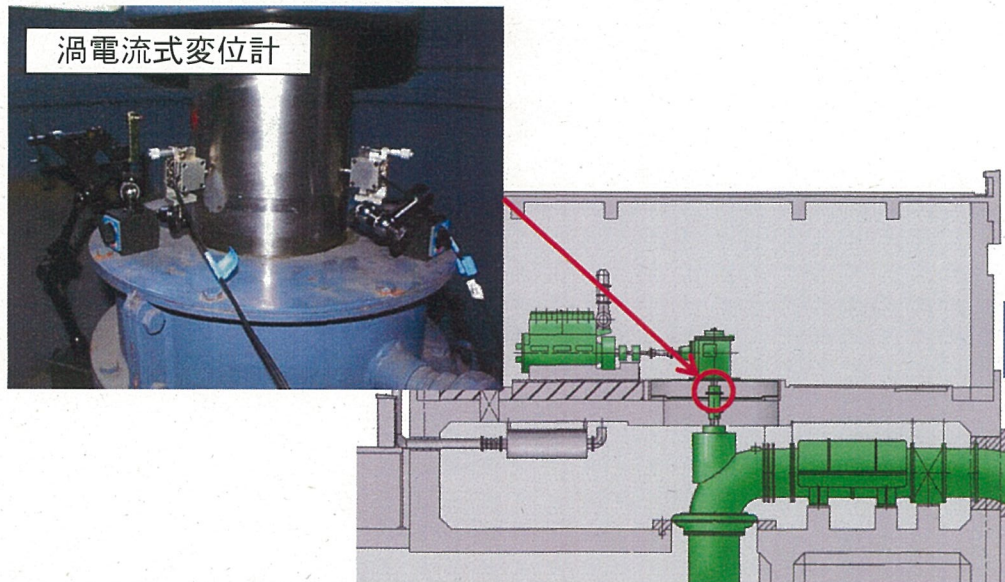


これまで、のべ132機場320台のポンプで調査



振動計測・解析

- これまでの、加速度センサによるケーシング振動計測に代え、ポンプ主軸の軸振動を直接計測
- 振動波形と周波数分布により、設備異常箇所とその程度を診断



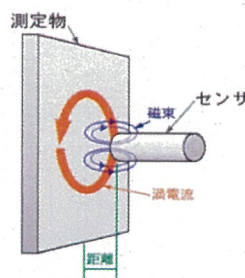
渦電流式変位計

発生周波数と発生原因

原因	発生周波数
水中軸受のゆるみ・がた	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $x: 2$ or 3</p> <p>回転周波数と、その$1/2$、$1/3$等の分数調波成分</p>
主軸のアンバランス	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $x: 2$ or 3</p> <p>回転周波数成分が大きく卓越</p>
主軸のミスアライメント	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $x: 2$ or 3</p> <p>回転周波数と、その2倍等の高調波成分</p>
羽根車の摩耗	<p>振動振幅</p> <p>0 n $2n$ $3n$ $4n$ $5n$ $6n$ $7n$ $8n$ 周波数</p> <p>n: 回転周波数 羽根数6 案内羽根8の場合</p> <p>回転周波数×羽根数</p>

○渦電流変位計の原理

- ①センサ内のコイルに高周波電流を流すことにより、高周波磁束が発生。
- ②この磁界内に測定対象物(金属)を置くと、対象物表面に渦電流が発生。
- ③この渦電流が、コイルと測定対象物との距離が近いほど大きくなる性質を利用して変位を計測する。



軸振動計測の適用性

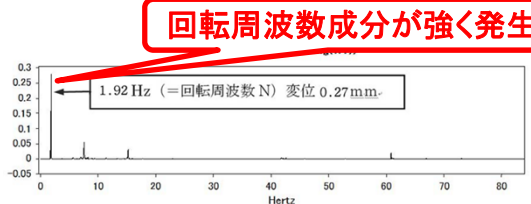
ポンプ主轴の曲がりを見出。

○設備概要



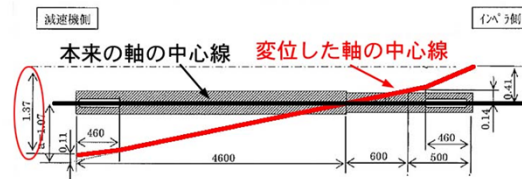
型式 立軸軸流
口径 2600mm
主軸回転数 115rpm
羽根車数 4枚

○診断



振動周波数分布では、回転周波数成分Nが強く発生しており「軸に異常有り」と診断

○設備状態

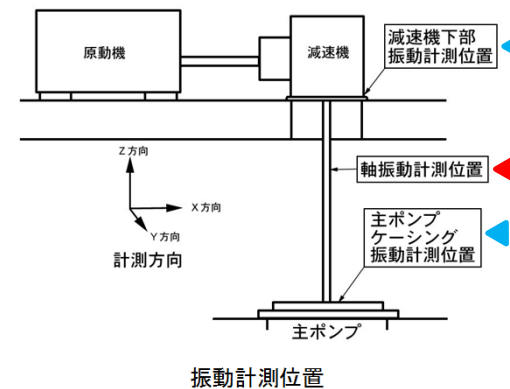


分解整備時に軸心を計測したところ、1.37mmの偏心が確認された

計測部位	計測方法	計測条件	X方向	Y方向	Z方向
減速機下部	ポータブル振動計	整備前	6	11	20
		整備後	5	10	15
主ポンプケーシング	ポータブル振動計	整備前	5	6	18
		整備後	4	2	15

軸振動	渦電流変位計	整備前	600		
		整備後	100		

単位: $\mu\text{m(p-p)}$



整備前(曲がり有り)と後(曲がり修正後)で、振動値があまり変わらない



従来の振動計測では異常をとらえているとは言い難い

整備前と後で大きく軸振動値が異なる



軸振動の直接計測では明確にその異常をとらえている

軸振動計測の適用性

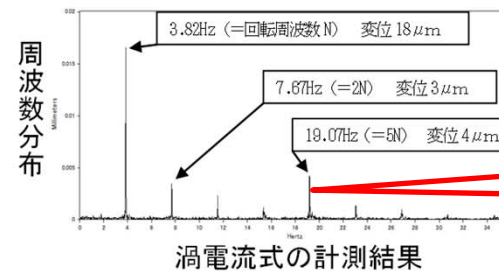
オーバホール等でしか確認できない羽根車の摩耗損耗の兆候把握も可能

○設備概要



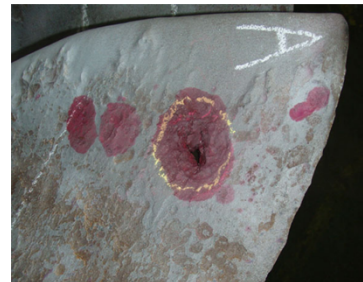
型式 立軸斜流
口径 1350mm
主軸回転数 225rpm
羽根車数 5枚

○診断



振動周波数分布では羽根車成分5Nが発生しており「羽根車に劣化傾向有り」と診断

○設備状態



羽根車の肉厚が設計値を下回る部分があり、1箇所には穴が貫通していた



軸振動計測の診断精度

現状の診断精度

(H26末時点)

軸振動による診断結果	実際の設備状態	羽根車摩耗	主軸曲がり
正 常	正 常(的中)	8 (83)	19 (94)
	異 常(誤信)	6 (6)	2 (2)
異 常	異 常(的中)	4 (4)	1 (1)
	正 常(誤信)	2 (2)	0 (0)
診 断 精 度		60.0% (91.6%)	90.9% (97.9%)

※表中(): 内部確認できていないが正常に稼働している設備を含めた数値

- 軸振動による診断が主ポンプの状態監視保全に適用可能であることが示された
- 軸曲がりには高い精度での確な診断が可能な反面、羽根車の摩耗診断は精度が低いなど課題がある

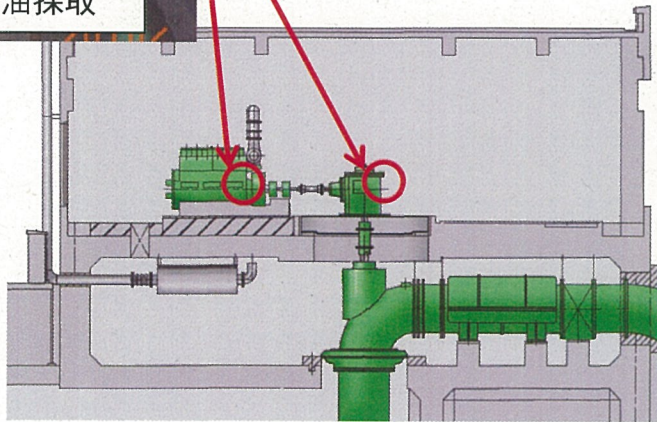
潤滑油分析

原動機、減速機の潤滑油について、下記の適用性を調査

- 性状分析による潤滑油自体の診断
- 摩耗粉分析による設備診断



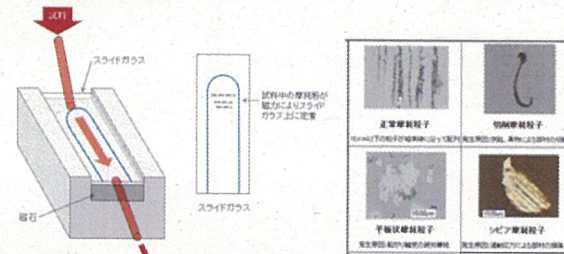
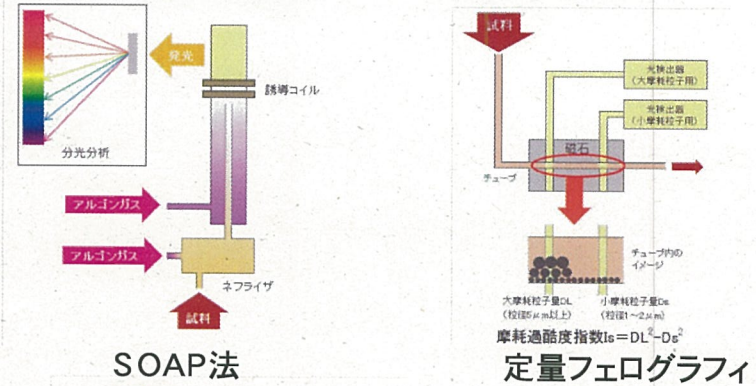
潤滑油採取



性状分析項目

- 動粘度 (JISK2283 40°C 及び 100°C)
- 酸価及び塩基価 (JISK2501)
- 水分 (カールフィッシャー法 (JISK2275))
- 不溶解分

摩耗粉分析項目



分析フェログラフィ

潤滑油分析(性状分析)

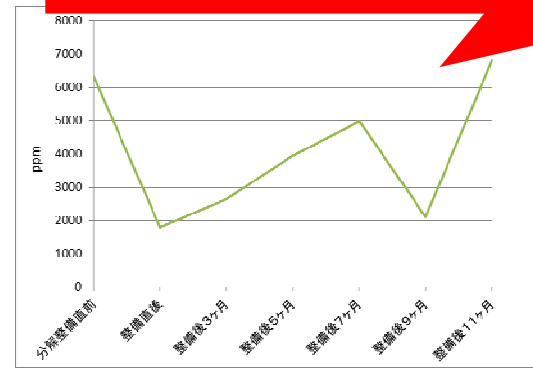
潤滑油の性状分析項目として、中央左の表について調査したところ、特に水分量について特徴的な傾向が見られた

調査した原動機の半数以上が1000ppmを超過している



主原動機の潤滑油中の水分量(33台分)

分解整備・更油後わずかの期間で水分量が急増している



H排水機場1号主原動機の潤滑油中の水分量の推移

水分量に対する対処

一般にディーゼル機関では水分量は監視項目としてあげられていないが、排水機場のように短時間の運転では、燃烧時に発生した水分が完全に蒸発しきらず機関内に残り、水分量が高くなる傾向にあるので、特に水分量の監視が必要である。

機械目	設備試験項目	油圧機器	工業用ギヤ(循環給油)	モーター・ポンプ給受	空気・ガスコンプレッ	蒸気タービン	ガスタービン	EHCシステム(リン酸エステル)	製紙機械	ディーゼルエンジン	トランスミッション
外観 ¹⁾		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期		定期
粘度 40℃		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期		定期
酸価		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期		定期
塩基価											定期
引火点					定期 ^{A)}						定期
水分 クラックル			定期		定期 ^{B)}						定期
水分 カールフィツシャー		定期 ^{D)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期 ^{C)}	定期
水分計測		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期
摩耗粉 元素分析		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期
摩耗粉 鉄粉濃度		定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期	定期
摩耗粉 フェログラフィー		選択	選択	選択	選択	選択	選択	選択	選択	選択	選択
◎転ボンベ酸化試験					定期	定期	選択 ^{E)}				
赤外 酸化劣化		定期	定期	定期	定期	定期			定期	定期	定期
赤外 酸化防止剤(フェノール)				定期	定期						
赤外 酸化防止剤(ZDTP)		定期				選択 ^{E)}					
スラッジ(ミリポアフィルタ)		定期					定期			定期	

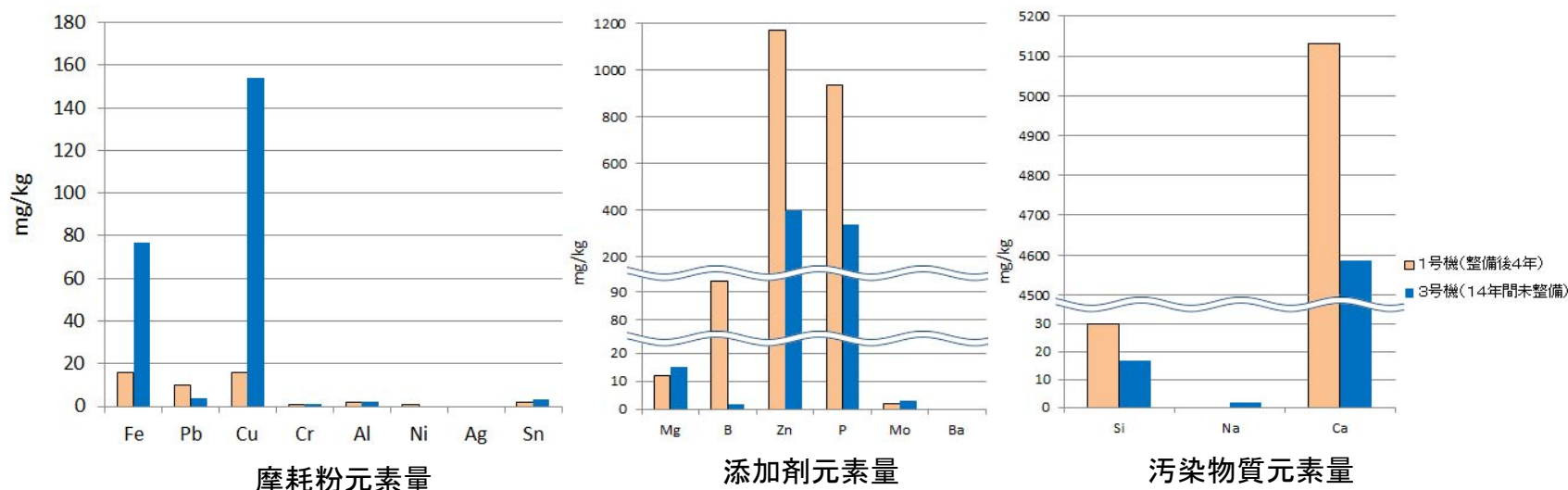
外観¹⁾: サンプルリング時ボトル視覚検査(沈殿物、濁り)
 定期^{A)}: 可燃性ガス等の場合に適用 定期^{B)}: 空気圧機械に適用 定期^{C)}: 水分量500ppm以下の管理に適用
 定期^{D)}: 定期試験の2~3倍の測定間隔 選択: オプション(粒子計測、元素分析等で高濃度の時に適用)
 選択^{E)}: 運用者による選択 選択^{F)}: LSV法(Linear Sweep Voltammetry)は推奨しない

潤滑油分析 (SOAP法の適用性)

SOAP法: プラズマ等により油脂に熱エネルギーを与えて発光させ、その光の波長を分光分析することにより、混入している金属元素とその濃度を測定する手法

主原動機の潤滑油解析結果例

1号機(整備後4年の状態)と3号機(14年未整備状態)の比較



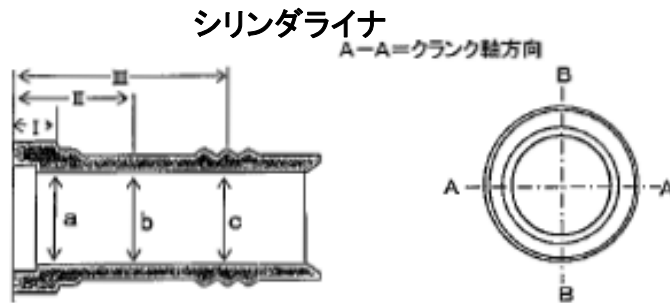
- ◆ 摩耗粉元素量 : 鉄分や銅など、摩耗すると増大する成分は、長期間使用している3号機の方が多い
- ◆ 添加剤元素量 : 添加剤の量は、3号機の方が少ない
- ◆ 添加剤物質元素量 : 珪素やカルシウムは汚染物質として分類されるが、添加剤として利用される場合がある(長期間使用している3号機の方がこれらの元素が少ないのは、そのためと思われる)

必要時しか稼働せず運転時間の少ない河川ポンプ設備においても、SOAP法により設備のコンディションを予測することが可能であることが示された。

潤滑油分析（定量フェログラフィ法の適用性）

定量フェログラフィ法：沈着チューブ内に残留した大粒子（ $5\mu\text{m}$ 以上）と小粒子（ $2\mu\text{m}$ 以下）の各濃度を調べ、摩耗過酷度指数を算出し評価する手法

原動機部品摩耗量と摩耗過酷度指数の比較結果



	1号機	2号機	備考
シリンダライナ摩耗量(mm)	0.038	0.082	各気筒の摩耗量平均値の合計
大摩耗粒子量 DL(%/mL)	40	45	$5\mu\text{m}$ 以上
小摩耗粒子量 DS(%/mL)	30	20	$2\mu\text{m}$ 以下
摩耗過酷度指数 I_s	700	1625	$I_s = DL^2 - DS^2$

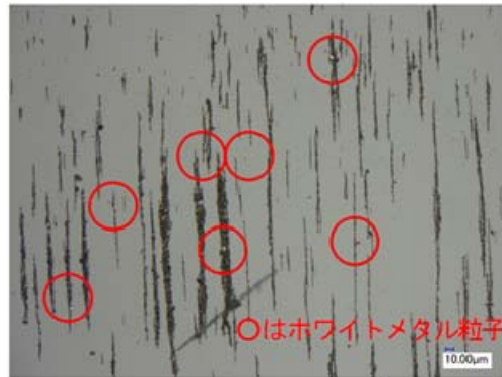
部品の摩耗量が大きいと推測できる原動機では、摩耗過酷度指数も高くなった。

設備の摩耗兆候を捉えることが可能と確認された

潤滑油分析(分析フェログラフィ法の適用性)

分析フェログラフィ法: スライドガラスに定着した潤滑油中の粒子を顕微鏡で観察し、その大きさや形状、色により、機械設備の内部摩耗状態を診断する手法

分析結果



H排水機場 原動機フェログラフィ結果



N排水機場 原動機フェログラフィ結果

H排水機場の方が正常摩耗粒子量が多く、粒径も大きい
H排水機場の方が、ホワイトメタル類がめだつ

実際の設備状態



H排水機場 クランクピンメタル



N排水機場 クランクピンメタル

設備状態を反映した結果となっていると判断できる

診断技術向上に向けた取組

- 振動法や潤滑油分析により、河川ポンプ設備の劣化傾向の把握が可能であることが確認され、**有効性が認められた**
- しかしながら、現段階では、100%の信頼性があるとは言えない

診断精度を高めるための取り組み

診断事例の蓄積

現場導入を図り、診断事例を蓄積する
(国土交通省関東地方整備局で率先して導入)

多様な診断技術の導入に関する研究(土木研究所)



ポンプ吐出圧力脈動



アコースティック・エミッション(AE)



サーモグラフィ



音響解析



原動機排気ガス組成

土木機械設備の評価

国土交通省「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル(案)」より

1. 設備区分による評価

設備の機能・目的による区分

2. 健全度評価

点検による設備の状態評価

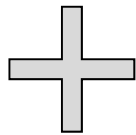
装置・機器特性(致命度)の評価(信頼性評価)

3. 設置条件の評価

使用条件・環境条件の評価

4. 機能的耐用限界評価

経年劣化・運用条件の変化による機能改善の必要性評価



老朽化施設が増大する状況下において、個々の評価だけでなく、**重要度を差別化する相対評価**が必要

5. 「社会への影響度評価」

設備が機能を失った場合に、国民の生命・財産、社会経済活動に及ぼす影響の大小を評価

整備・更新の優先順位の決定



CommonMPを活用した河川GISモデル

土木機械設備の老朽化が増大する状況下において、限られた予算のなかで効率的・効果的な維持管理を図るためには、整備・更新の優先度を決定する設備評価を的確に行う必要がある。

このため、個々の健全度等の設備評価だけでなく、複数設備のなかでの設備の重要度を示す**社会的影響度を定量評価**する必要となる。

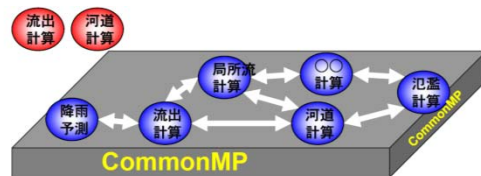
※社会的影響度評価: 設備が機能を失った場合における国民の生命・財産、社会経済活動に及ぼす影響の大小の評価

- ・対象設備: 排水機場を中心とした複数の河川機械設備
- ・方法: 河川流域及び複数の機械設備の稼働に関するシミュレーション(水文・水理プログラム)
- ・評価内容: 1) **各々の設備機能の補完性**
2) **機能が喪失した場合に毀損される損害(社会的影響度)**



CommonMP(Common Modeling Platform for water-material circulation analysis)を活用した「**河川GISモデル**」の構築

CommonMPとは

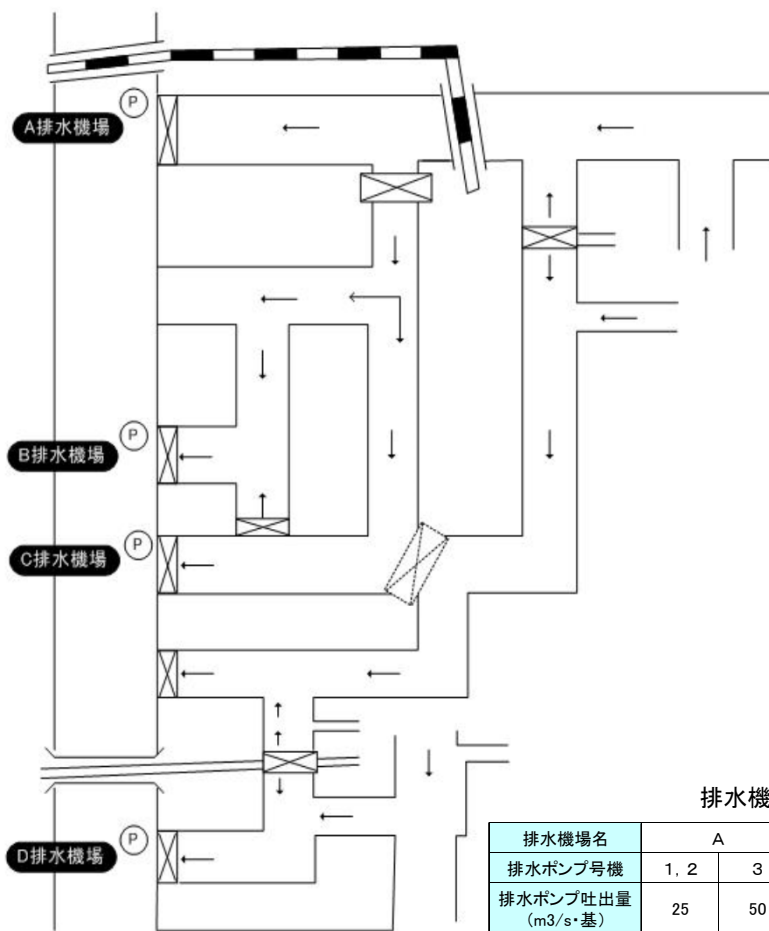


- ・解析モデルを構築するための共通プラットフォーム
- ・種々の要素モデルを相互接続することにより、複合的な物理現象をシミュレートできる
- ・改良自由度が高く、他の施設群への応用が可能

(出典: 国土交通省国土技術政策総合研究所)



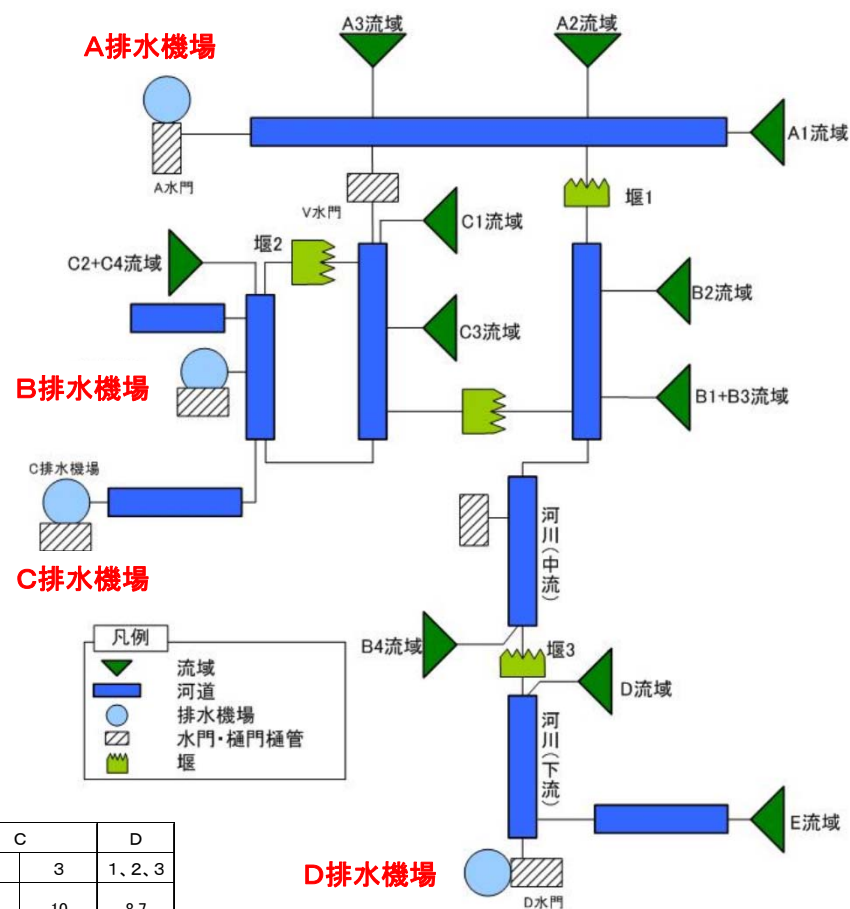
河川GISモデルを用いたシミュレーション例



モデルとした流域概要図

排水機場主要諸元

排水機場名	A		B		C		D
排水ポンプ号機	1, 2	3	1, 2	1, 2	3	1, 2, 3	
排水ポンプ吐出量 (m ³ /s・基)	25	50	7.5	2.5	10	8.7	
主原動機出力 (PS/基)	2,700	5,600	720	200	1,250	800	

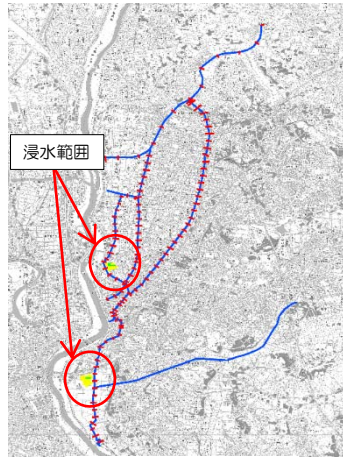


河川GISモデル図

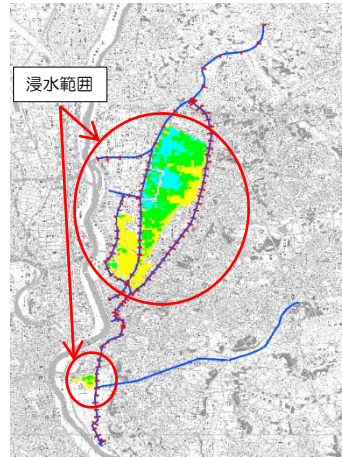


河川GISモデル：排水機能損失時のシミュレーション結果例

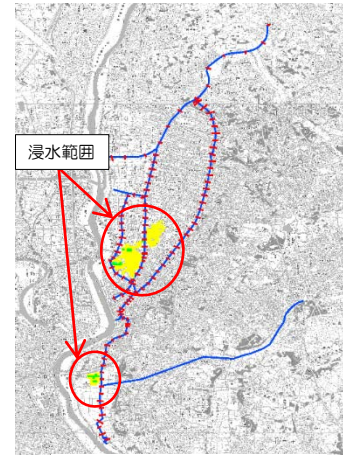
氾濫ブロック図



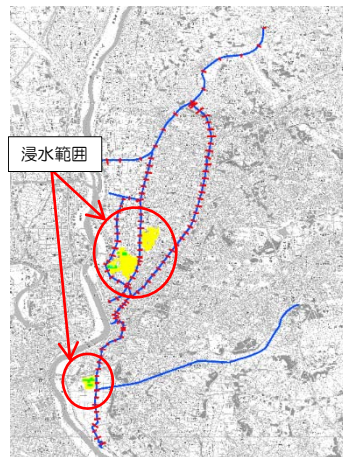
①全排水機場稼働



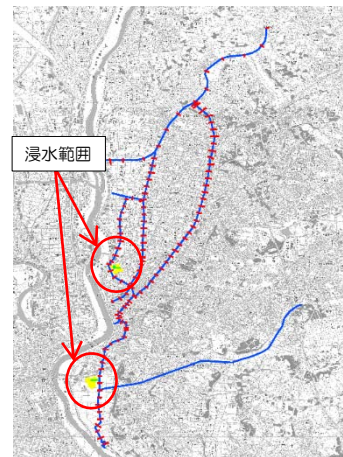
②A排水機場機能損失



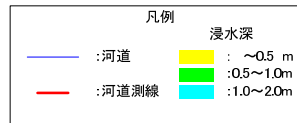
③B排水機場機能損失



④C排水機場機能損失



⑤D排水機場機能損失



※1:算出条件
ある実際の出水時の
雨量データを基に流域
全域が一律の雨量と
なった条件で算出
※2:50mメッシュ表示

浸水面積比較

検討ケース	浸水面積(m ²)				浸水計	①との比較
	床下浸水 45cm以下	50cm以下	床上浸水 50-100cm	100cm以上		
①全排水機場稼働	85,000	5,000	15,000	0	105,000	1.0
②A排水機場運転停止	1,290,000	160,000	1,600,000	697,500	3,747,500	35.7
③B排水機場運転停止	575,000	5,000	52,500	2,500	635,000	6.0
④C排水機場運転停止	492,500	2,500	50,000	2,500	547,500	5.2
⑤D排水機場運転停止	87,500	5,000	17,500	0	110,000	1.0

被害算定結果(参考)

項目	被害総定額(百万円)				
	①	②	③	④	⑤
算出条件:運転停止機場	なし	A排水機場	B排水機場	C排水機場	D排水機場
直接被害					
一般被害額計	61	51,628	1,929	1,588	64
農作物被害額(水稲)	2	3	3	2	1
農作物被害額(畑作)	0	9	1	1	0
公共土木被害額	103	87,458	3,267	2,691	108
間接被害					
営業停止損失額	3	2,097	113	97	3
清掃労働対価	2	1,885	86	71	2
代替活動等の出費	4	3,155	164	136	4
事務所代替活動	2	1,224	66	55	2
合計	177	147,460	5,626	4,642	184
①との比	1	833	32	26	1

※1:治水経済調査マニュアル(案)(2005)に準じ試算
※2:調査対象試算を50mで整理

被害想定の大小により社会的影響度の相対評価が可能
→整備・更新の優先度判断の指標になり得る



まとめ

1. 状態監視技術

- 振動法、潤滑油分析による状態監視技術は、劣化傾向やこれまで把握できなかった異常兆候の把握に有効
- ただし、現時点では100%信頼性を有するとはいえない
- 診断精度を高める多様な診断技術の研究が必要

2. 社会的影響度評価

- 社会的影響度は設備の重要性を評価する有効な指標となる
- 河川GISモデルは、出水現象に近い水位・流量を模擬的に検証でき、各設備が有する社会的影響度を定量的に評価できるツールになり得る
- 運転条件変更等のシミュレーションにより、設備の有効な活用検討も可能



ライフサイクルコストの低減や長寿命化など、効率的で的確な設備維持管理に寄与できるものと思料



(国研)土木研究所では、今後も機械設備の維持管理に関する研究を行い、安全、快適な社会生活に寄与します。



ご静聴ありがとうございました。

