

# 機械設備の維持管理に関する研究動向

平成25年3月7日

(独)土木研究所先端技術チーム  
主任研究員 上野仁士



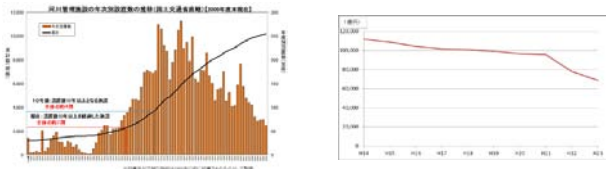
## 機械設備の置かれている現状



河川・ダム水門や排水ポンプ等の機械設備は、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発揮**することが求められている。



## 機械設備の置かれている現状



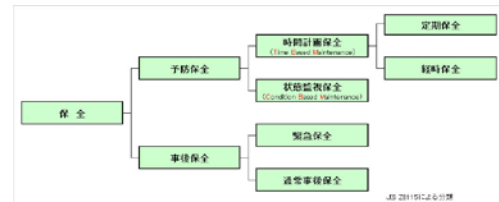
これらの機械設備は、**老朽化の進行による故障頻度上昇**の懸念がある反面、**整備予算は年々削減**されている現状にある

この相反する状況下でいかに**効率的で的確な設備維持管理**を行うかが課題

**そのための技術の研究を実施する必要がある**



## 設備保全方法の分類



設備保全方法は、**予防保全**と**事後保全**に大別

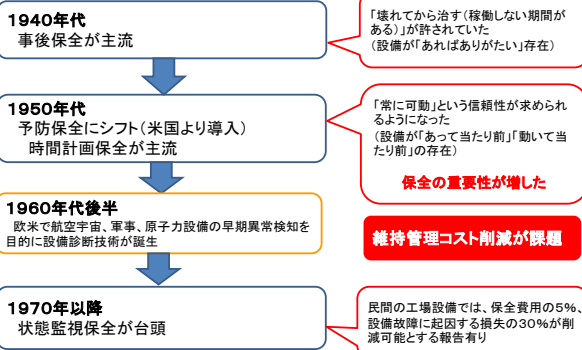
**予防保全**: アイテムの使用中の故障の発生を未然に防止するために、規定の間隔又は基準に従って遂行し、アイテムの機能劣化又は故障の確率を低減するために行う保全。

**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。



## 一般的な設備保全の歴史



## 時間計画保全と状態監視保全

### 時間計画保全

- 的確な整備サイクルを設定することにより、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

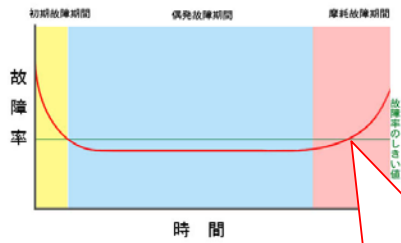
- 設備の劣化兆候を監視して整備を行うため、効率的。また整備コスト的に有利。
- ✗ 的確な診断を行うための技術の習得が必要不可欠
- ✗ 診断に相応の労力が必要。また、診断のための費用を要する。

**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が必要。**



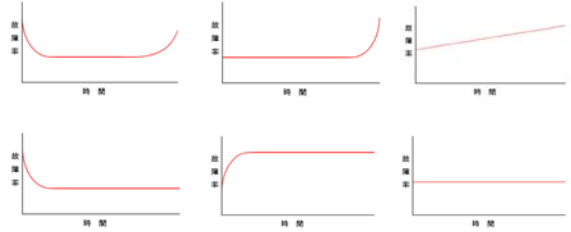
## 故障率

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状態監視保全が有効

## 故障率

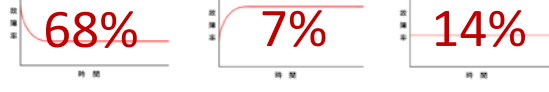


現実の故障率は、バスタブ曲線で表されないものがある  
時間と故障の関係が明白→時間計画保全が有効  
時間と故障の関係が不明確→状態監視保全が有効

## 故障率



時間と故障の関係が明確→時間計画保全が有効(11%が該当)



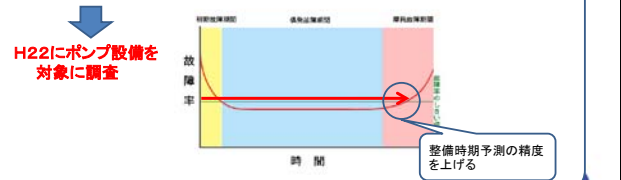
時間と故障の関係が不明確→状態監視保全が有効(89%が該当)

的確な保全手法を用いて、河川ポンプ設備における長寿命化と維持管理コスト削減を図る

## 時間計画保全の精度向上

時間計画保全の手法として、過去の分解整備時における構成機器の摩耗データを解析し、大きな費用を要する分解整備の時期を予測することができれば合理的

機械設備の定期整備時に計測した構成機器・部品の摩耗量等を情報として蓄積・解析すれば、供用年数や運転時間に伴う劣化状況を統計的に予測できる可能性がある



## 時間計画保全の精度向上

機器	部品名	運転時間当たり劣化係数		備考
		項目	劣化係数 (mm/h)	
主ポンプ	インペラ	約り合い	-	初期値データがないので算出不能
		摩耗	0.013007	
	主軸	約り合い	-	初期値データがないので算出不能
#(立軸)	水中軸受(セラミック)	摩耗量	0.00029101	初期値を設計値の最大値とした場合
			0.000354	初期値を設計値の最大値とした場合
			0.000443	初期値を設計値の最小値とした場合
#(横軸)	水中軸受(ホワイトメタル)	摩耗	0.001537	初期値を設計値の最大値とした場合
			0.000692	初期値を設計値の最大値とした場合
			0.74691	初期値を設計値の最小値とした場合
送達機	歯車	歯当たり	0.74691	
ディーゼルエンジン	クランクピン	外径	0.000116	

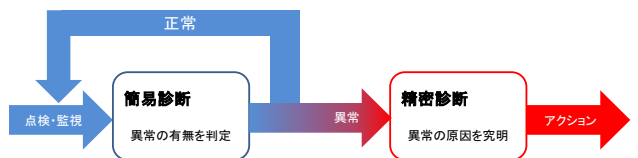
### 所見

劣化係数の算定は、時間計画保全における定期整備の実施タイミングの最適化に活用できる。

しかし、この取組は初期値が正確に分かるのであれば有効だが、そうでない現状では有効な数値を出せない。

精度の高い時間計画保全の実施には「寸法の初期値の把握」が重要

## 状態監視保全の一般的手法



出典: 振興技術研究会「ISOに基づく機械設備の状態監視と診断(振動 カラー)ーI」第2, 3版」

### 計測パラメータ

#### 主効果パラメータ

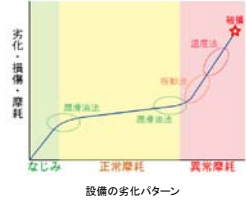
設備が本来の目的を遂行する際に見られるパラメータ  
(ポンプなら吐出圧力、流量など)

#### 二次効果パラメータ

設備が稼働することにより変化する付随的なパラメータ  
(振動、温度、音など)

状態監視保全では主に二次効果パラメータが用いられる

# 状態監視保全の監視パラメータ



状態監視手法と部位  
 出典：振動技術研究会ISOに基づく機械設備の状態監視と診断（振動 カテゴリーII）第2、3版  
 出典：社団法人日本トライボロジー学会「ISO18436-4準拠 トライボロジーに基づくメンテナンス カテゴリー1」

設備の状態監視(異常の早期発見)には、**振動解析・潤滑油分析**が有意



# 河川ポンプ設備への状態監視保全技術の課題

常時稼働している機械設備に対して定期的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。  
 <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>

河川ポンプ設備は主軸回転周波数が1~6Hzの低速回転機械であり、このような低速回転機械では振動による状態監視が困難

供用時間に対して運転時間が非常に短い非常用設備においては、潤滑油による設備診断の評価基準が確立しているとは言えない状況

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



# 状態監視技術における国土交通省と土研の取組

国土交通省で実施している事項  
 (マニュアルで規定・ガイドライン策定中)

土研で研究中の技術

トレンド管理の実施  
 (トレンド管理も状態監視保全の一つとして位置づけ)



設備の異常の有無を把握する

一般の保全技術の「簡易診断」に相当

非常用設備の状態監視技術の研究

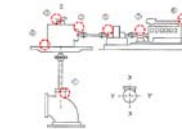


設備の異常の有無を把握する(黄)とともに設備の異常箇所と劣化程度を特定する(赤)

一般の保全技術の「精密診断」が主体(赤)、「簡易診断」に相当する部分も実施(黄)



# 状態監視技術ガイドライン (国土交通省)



施設の長寿命化を図るため、状態監視が可能な機器については、時間保全から状態監視にシフトし、効果的・効率的な機器更新が求められている

- 【現行の状態監視】
- 点検・設備指針等により計測しているが、測定箇所、方法等は、設備毎(点検業者毎)にバラツキが見受けられる。
- 【課題】
- 測定者・測定点・測定機材等が異なると、傾向管理が困難

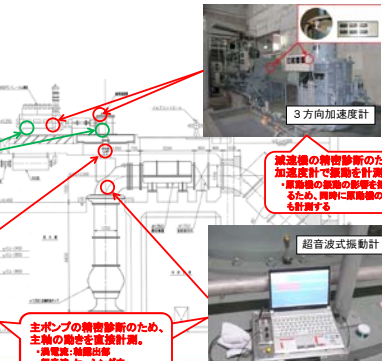
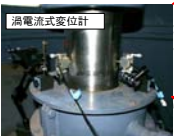
河川ポンプ設備状態監視ガイドライン(案)を策定

- 測定者、施設、事務所、地盤によらないデータ管理手法を統一
- 各設備毎の管理しきい値、機器更新期間のリバースに書写



# 非常用施設の状態監視保全に関する研究 (土木研究所)

平成22年度より、のべ71機場170台のポンプ設備について調査



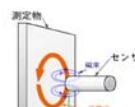
主ポンプの精密診断のため、主軸の動きを直接計測。  
 ・高電圧・高電流等  
 ・電磁波・ケーシング内



# 渦電流式変位計

OLくみ・原理

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。  
 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。  
 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。



設置位置 計測状況

○長所  
 ・構造が簡単で堅牢、特性が安定しているため信頼性が高い

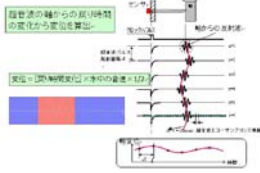
×短所  
 ・移送する毎に、設備運転前に校正作業を行う必要があるため、準備時間を要する(30分程度)。  
 ・主軸周りが狭いだとセンサの取り付けが困難。  
 (研究ではマグネットスタンドで仮設しているためこのような短所が発生するが、本来は常設するものである)



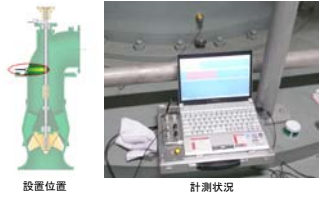
# 超音波式振動計

## 〇くみ・原理

超音波を、ケーシング内で回転する主軸に向けて発信し、戻り時間を計測することで、センサと主軸との距離を計測する。連続的に計測することで、軸のふれ回りやその周波数を把握できる。



出典：株式会社東芝、機械設備の振動による状態監視の動向、2009年



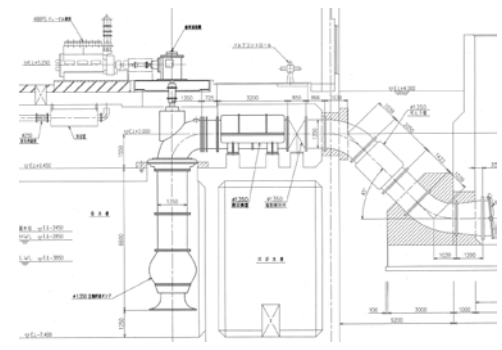
## 〇長所

・ケーシング内の軸の動きを、設備を分解せずに計測可能。  
・設備運転前の校正作業が不要なので、準備時間が渦電流式に比べて短い。

## ×短所

・主軸に保護管等があると、超音波の減衰が大きくなり計測できない事例が多い。  
・管内が完全に充水されていなければ計測できないため、横軸ポンプでは計測できない事例が多い。

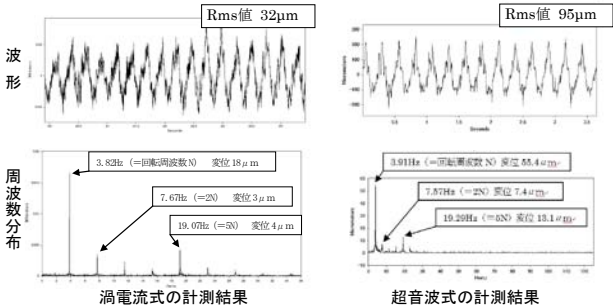
# A 排水機場



A排水機場 φ1350mm立軸斜流ポンプ 1号機・2号機

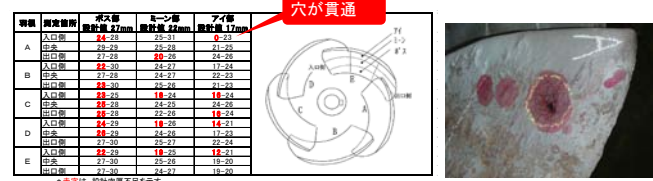


# A 排水機場 計測結果



- 〇回転数成分が突出→羽根車や主軸にアンバランスの可能性有り
- 〇羽根車成分(6N)もやや大きく、羽根車の摩耗が懸念
- 〇回転数成分以下は検出されず→水中軸受は摩耗していない

# A 排水機場 羽根車摩耗量計測結果

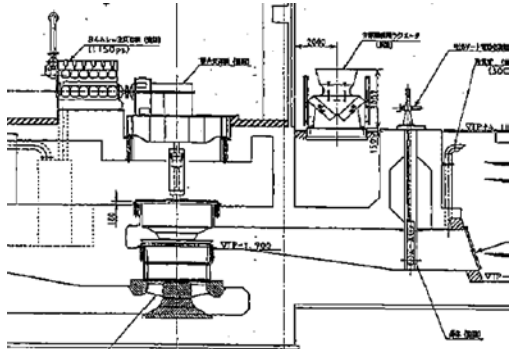


- 〇回転数成分が突出→羽根車や主軸にアンバランスの可能性有り
- 〇羽根車成分(6N)もやや大きく、羽根車の摩耗が懸念
- ↑上記計測結果より、因果関係が明確と示された

羽根車の腐食が進行しておりその兆候をとらえることができた。



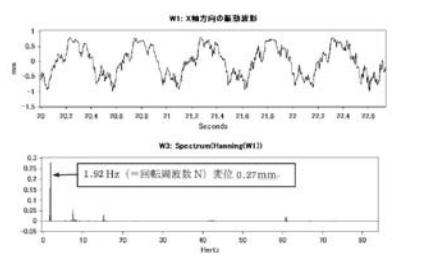
# B 排水機場



B排水機場: φ2600mm立軸軸流ポンプ 3台  
コンクリートケーシング → 超音波式は使用できない



# B 排水機場 計測結果

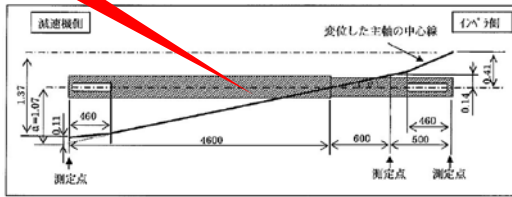


- 〇計測波形のp-p値が1.82mmと著しく高く、周波数成分Nが突出しているため、主軸のふれ回りが大きく発生している可能性がある。



## B 排水機場 軸心計測結果

1.37mmの偏心



○計測波形のp-p値が1.82mmと著しく高く、周波数成分Nが突出しているため、主軸のふれ回りが大きく発生している可能性がある。

↓  
上記計測結果より、因果関係が明確と示された

主軸の曲がりの兆候をとらえることができた。



独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

## 原動機・減速機の潤滑油分析

潤滑油を介して設備状態を診断

摺動部の摩耗成分を検出することで劣化状態を把握

○SOAP

各元素含有量

○定量フェログラフィ

大摩耗粒子量、小摩耗粒子量、異常摩耗指数、

○分析フェログラフィ

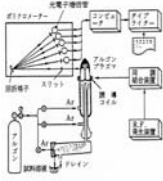
摩耗粉の形状・大きさ・材質



独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

## SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program)

米国において、軍用機のエンジン内部の摩耗状態を分解せずに監視する目的で開発された。油脂の発する光の波長を分析して、油脂に混入している金属元素とその濃度を測定する手法。



成分	鉄	鉛	銅	クロム	アルミニウム	ニッケル	銀	すず	ケイ素
1号機	16	10	16	1	2	1	0	2	30
3号機	77	4	154	1	2	0	0	3	17

図の出典: ISO18436-4準拠 トライボロジーに基づくメンテナンス (2011日本トライボロジー学会編)



独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

## SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program)

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

成分	鉄	鉛	銅	クロム	アルミニウム	ニッケル	銀	すず	ケイ素
1号機	16	10	16	1	2	1	0	2	30
3号機	77	4	154	1	2	0	0	3	17

・鉄分や銅といった摩耗すると増大する成分は3号機の方が多い。  
(ケイ素、ナトリウム等は汚染物質、銅、シリコン、ホウ素、マグネシウム、モリブデン等は潤滑油の性能を向上させる添加剤成分である。)

・溶解している成分を検出するため、潤滑油自体の劣化も識別できるとともに、組成の変化を見て機械のコンディションを予測する事が可能。

○その他

・各業者で分析方法が異なる。方法が規格化されていない。

・業者間の分析結果は、数値が異なるが、似たような傾向を示している。



独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

## フェログラフィ

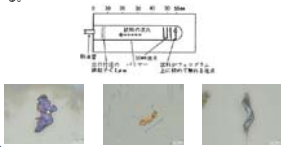
フェログラフィ

1972年に、機械の摩耗部分の損傷防止のために開発され、その後米海軍、MIT等によりアプリケーションが開発された。金属摩耗成分が含まれた潤滑油を、磁石を下に敷いたスライドガラス上または沈着チューブ内に流し、油中の摩耗粉を捕捉分離することで摩耗粉を分析する。



分析フェログラフィ

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、その色や形状により、機械設備の内部摩耗状態を診断する。



定量フェログラフィ

沈着チューブ内に残留した大粒子(5μm以上)と小粒子(2μm以下)の各濃度を調べることで機械の診断を行う。



大粒子量 DL  
小粒子量 Ds  
摩耗過酷度指数 Is=DL<sup>2</sup>-Ds<sup>2</sup>



図の出典: 社団法人潤滑油協会ホームページ (<http://www.jlao.or.jp/>)

独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

## フェログラフィ

定量フェログラフィ

・業者間の分析結果は似たような傾向を示しているが、数値は大きく異なる。

・同一社で継続的に分析しなければ傾向判断はできないが、国の発注形態では事実上不可能。

なので複数業者間の結果を比較できるようキャリブレーションする手法(校正液の利用など)を検討中。

分析フェログラフィ

・磨耗粉を定着させたガラスがあれば、管理者が直接確認判断が可能(相応の知識が必要)

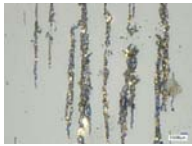
・ガラスの作成は分析業者でなければ難しく、また、作成方法(油の希釈方法)が業者によって異なる。しかし分析結果は、複数社で似たような判断傾向を示している。

・摩耗粉の色も重要な判断要素だが、発色は使用する顕微鏡の光源により差違が生じることに留意する。

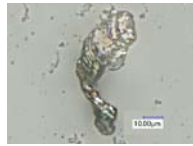


独立行政法人土木研究所 先端技術チーム

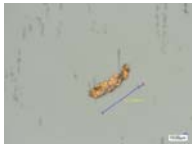
## 潤滑油に含まれる粒子例



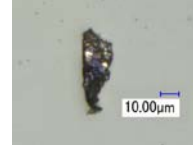
正常摩耗粉



切削粒子



銅



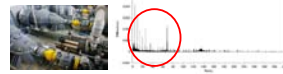
黒錆粒子



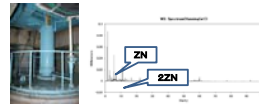
## 今後の研究課題

### ポンプ形式の違いにより異なる振動特性

これまでの調査で、設置数の多い立軸斜流ポンプに対し、他の形式のポンプの振動特性が異なることが確認された



横軸ポンプは高周波の発生が著しい



コンクリートケーシングのポンプ(軸流、渦巻斜流)は羽根車成分(ZN)とその整数倍の周波数の発生が著しい

### 運転形式により異なる振動特性

バイパス管理方式など、本運転と異なる条件で管理運転を行う場合、本運転とは異なる振動特性となる

### 今後の課題

河川ポンプ設備への状態監視保全技術の適用範囲を拡大するためには、これら形式や運転方式により異なる振動特性に対しても的確な診断を行う手法を検討する必要がある。



(独)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。

