

「非」常時のみに稼働する 機械設備のメンテナンス

国立研究開発法人 土木研究所
技術推進本部

並河 良治



国立研究開発法人土木研究所 先端技術チーム

目次

- 「非」常時のみに稼働する機械設備とは
- 社会的影響、課題
- 状態監視保全技術の有効性
- 河川ポンプ設備への状態監視保全技術適用の課題
- 振動法の適用性
- 潤滑油法の適用性
- まとめ

「非」常時のみに稼働する機械設備とは

一般的にイメージされる機械設備として、例えば、工場の機械設備があげられる。

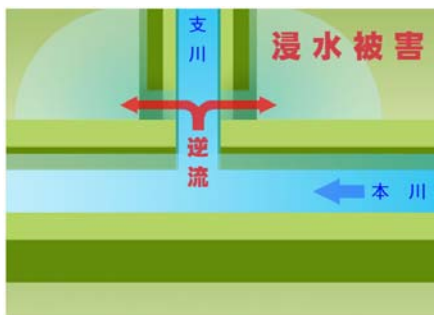
こういった機械設備は、製造のために**平時は常に稼働**しており、**常用の機械設備**である。

「非」常用の機械設備とは、平時は停止しているが、**必要時のみに稼働**する機械設備のことである。

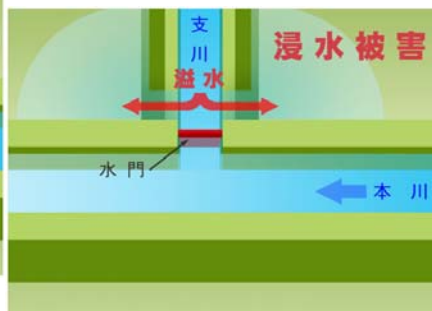
ここでは、「**排水機場ポンプ設備**」を指す。

【Point】 機械は動けば故障するが、**動かなさ過ぎても故障**する。しかも、全く動かないと**故障に気付かない**！（車をイメージして下さい）

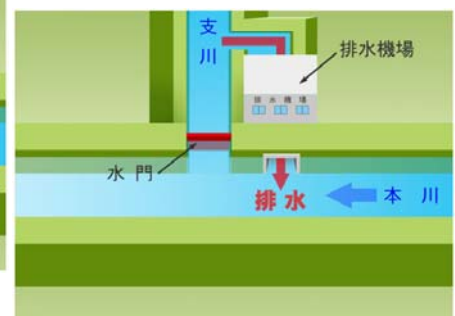
排水機場ポンプ設備



① 降雨等により本川が増水した場合、支川に逆流して浸水被害が発生する。



② 逆流防止のために水門を設置しているが、閉めたままだと支川の水の行き場が無くなるので、いずれは溢水して浸水被害が発生する。



③ そこで、支川の水をポンプで揚水し、本川に排水することで、浸水被害を防止する。

- 排水機場は治水設備であり、**国民の生命・財産を守る**きわめて重要な社会基盤施設
- 排水機場の中心設備である排水ポンプ設備は、**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⁴

社会的要請・課題

(河川用土木機械設備の老朽化)

■国土交通省管理区間に存在する河川用土木機械設備は約1万施設

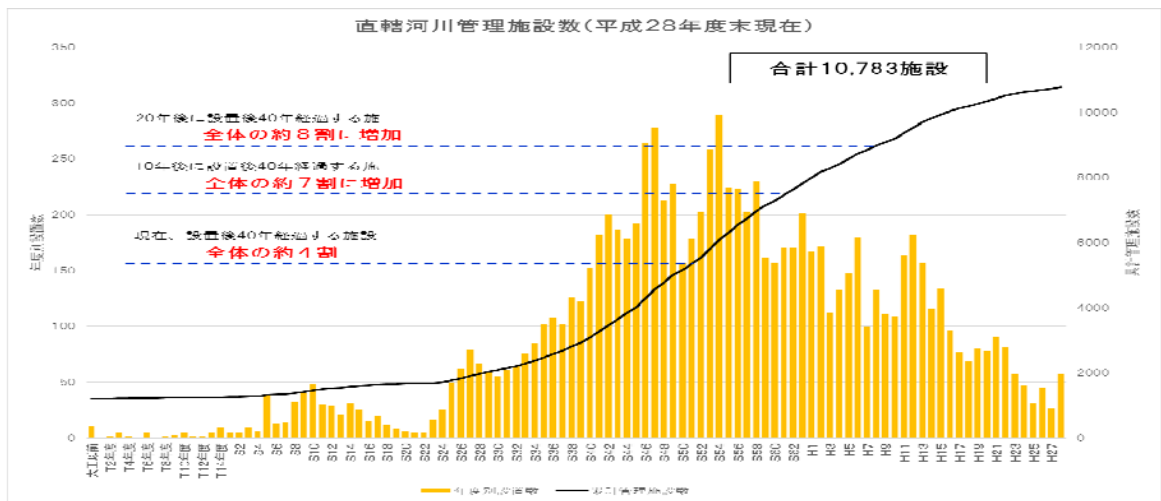
- ◇堰・水門・樋門等:約9,750 施設(約95%)
- ◇揚排水機場:約470 施設(約5%)



都道府県・政令市管理
約2万設備
国とほぼ同様の状況

■設置後40年経過した老朽化設備は現時点で全体の約4割

- ◇10年後には7割、20年後には8割が設置後40年を超過する状況



7

社会的要請・課題

河川ポンプ設備は、**きわめて重要な社会基盤施設**

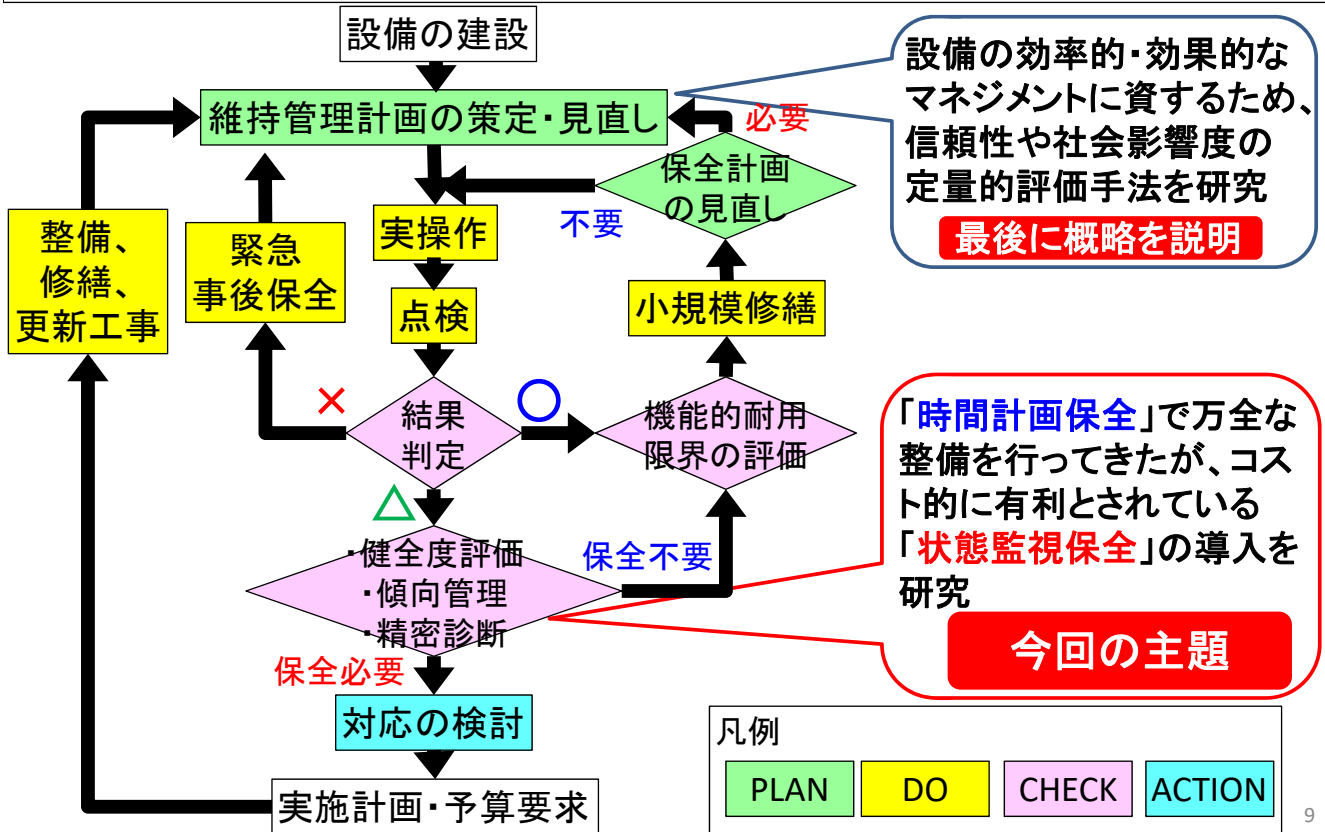
この相反する状況下で、如何に効率的で的確な設備の維持管理を行うかが課題

設備の老朽化

設備の維持管理費は増えず

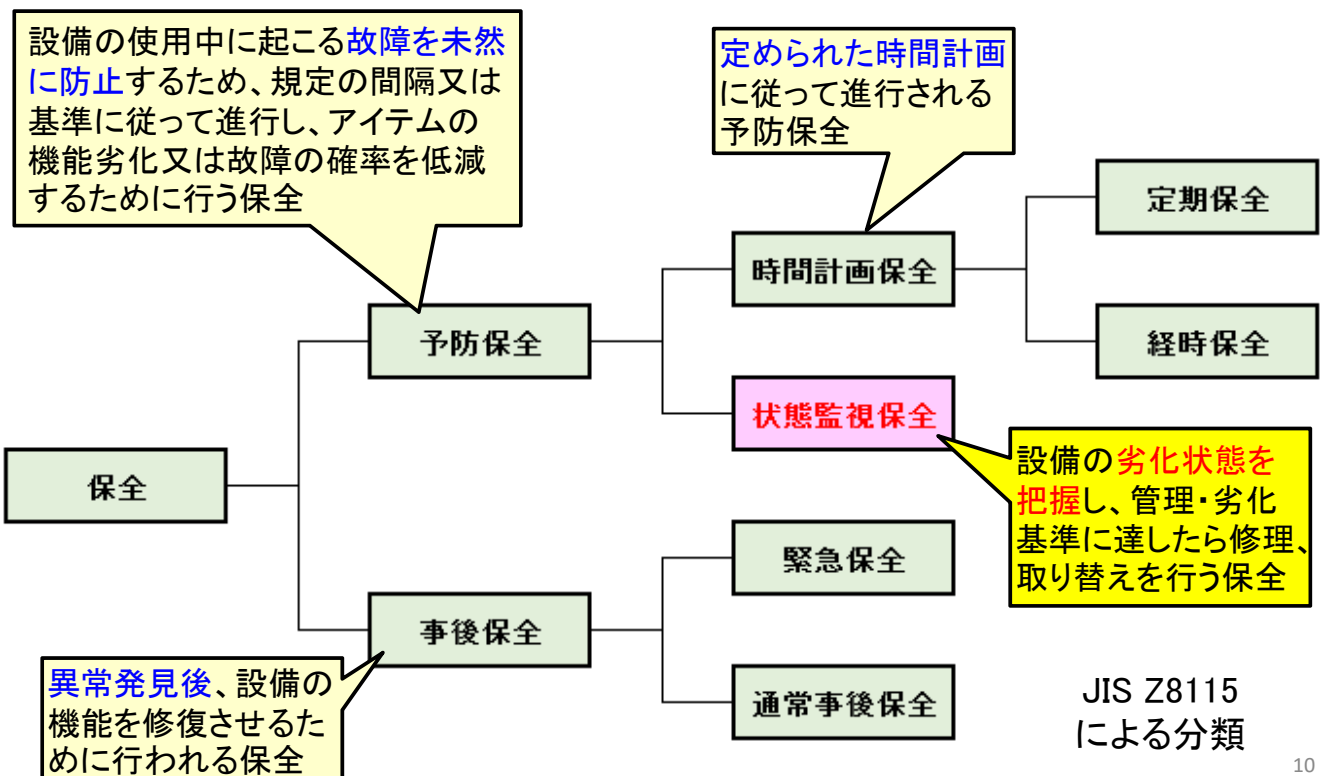
8

設備管理PDCAサイクル



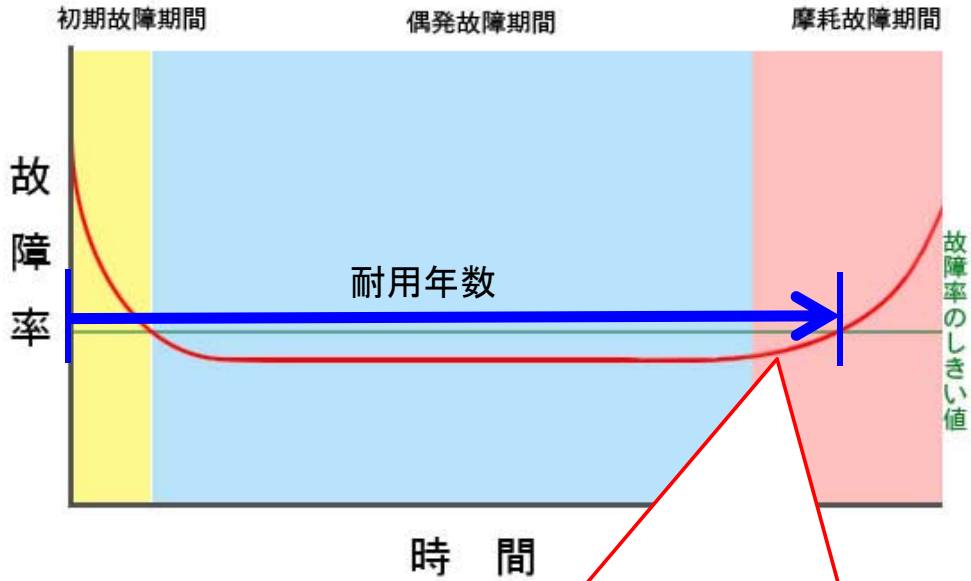
設備の維持管理の基本…「保全」とは？

JIS Z8115において、設備保全は、「予防保全」と「事後保全」に大別される。予防保全は、「時間計画保全」と「状態監視保全」に分類される。



状態監視保全の有効性

理想的な故障率の推移は、バスタブ曲線で表される

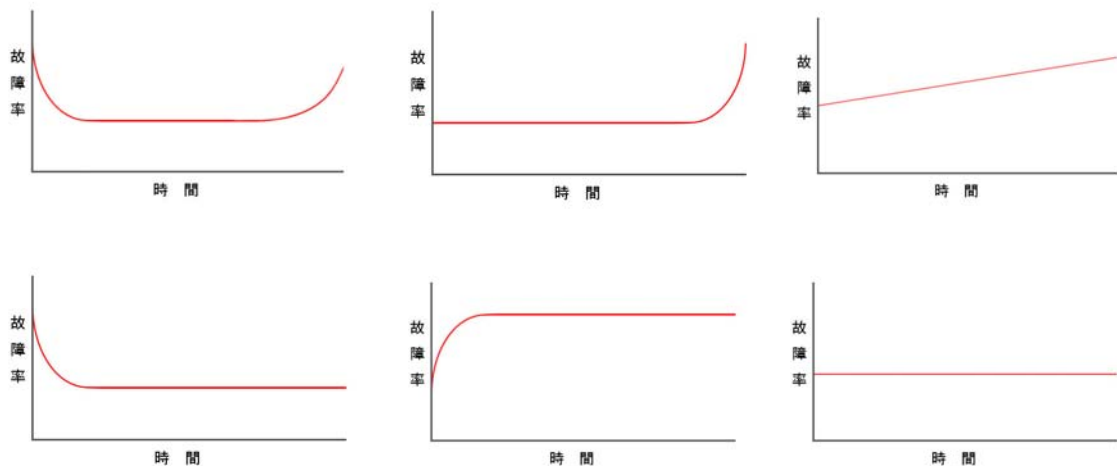


- 故障率上昇の時間が明確であれば、時間計画保全が有効
- 時間と故障率上昇の関係が不明確でも、故障率上昇の傾向が監視可能なら状態監視保全が有効

一般的にはどちらが多いのか？

11

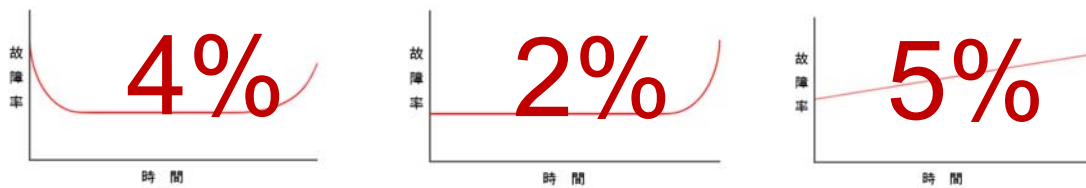
状態監視保全の有効性



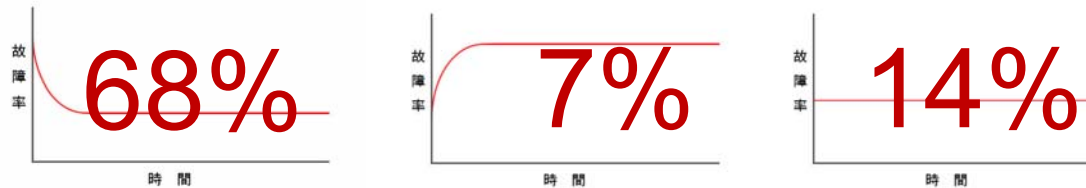
これは、米国で航空機の部品の故障率の統計を取ったもので、現実の故障率はバスタブ曲線で表せないものがあり、主な分類はこの6パターン。

12

状態監視保全の有効性



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)

民間での導入効果

工場等の常用系設備では、「状態監視保全」を導入し、これにより保全費用の5%削減を可能とした例もある

13

河川ポンプ設備への状態監視導入の有効性

河川ポンプ設備の羽根車や軸・軸受など内部を点検するためには、大掛かりな分解作業や精密な計測作業を行う必要があり、コストがかかるため頻繁に行えない。状態監視技術を導入できれば、コストをかけずに信頼性確保が可能である。



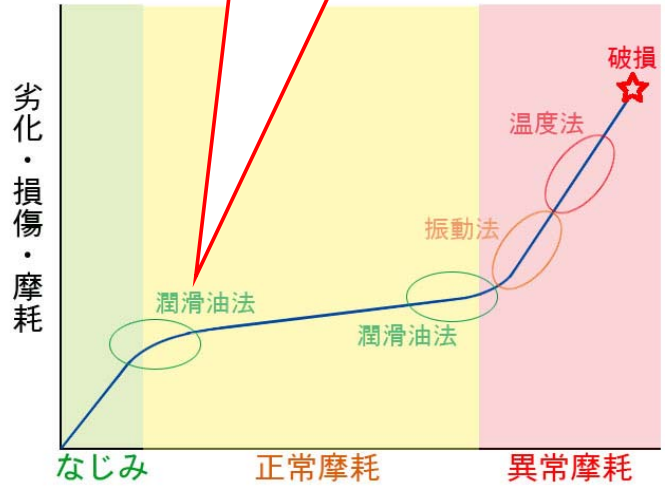
状態監視保全技術

設備の状態監視には、**振動解析**(黄色着色箇所)が多く用いられている



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」

設備の異常兆候の早期把握には**潤滑油法**が適している

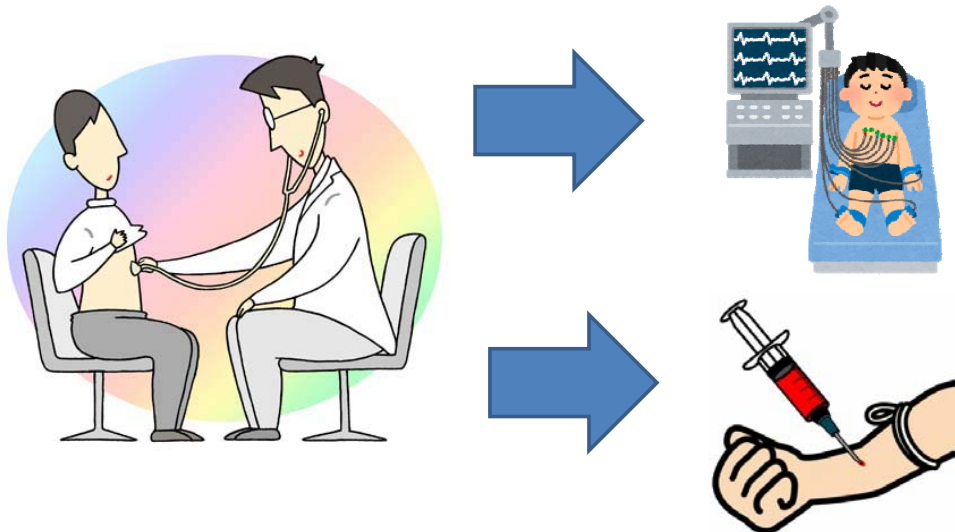


出典: 社団法人日本トライボロジー学会「ISO18436-4準拠 トライボロジーに基づくメンテナンス カテゴリーI」

河川ポンプ設備の状態監視保全技術として、「**振動法**」と「**潤滑油法**」の適用性について調査を実施

15

状態監視保全技術



人間に例えるなら、振動計測は心電図、潤滑油分析は血液検査に相当

16

河川ポンプ設備への 状態監視保全技術適用の課題

状態監視技術は、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。

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による状態監視が困難

潤滑油

停止している時間が長く、潤滑油が設備内を循環している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

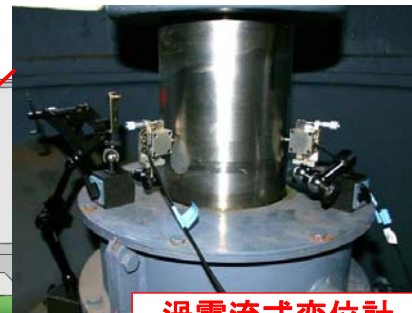
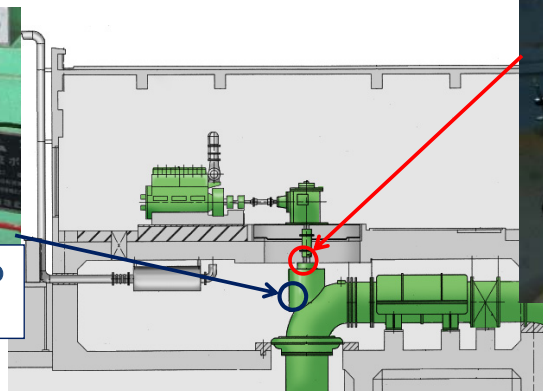
17

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、渦電流変位計による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



加速度センサによる
振動計測(従来手法)



渦電流式変位計

軸振動変位計測箇所

18

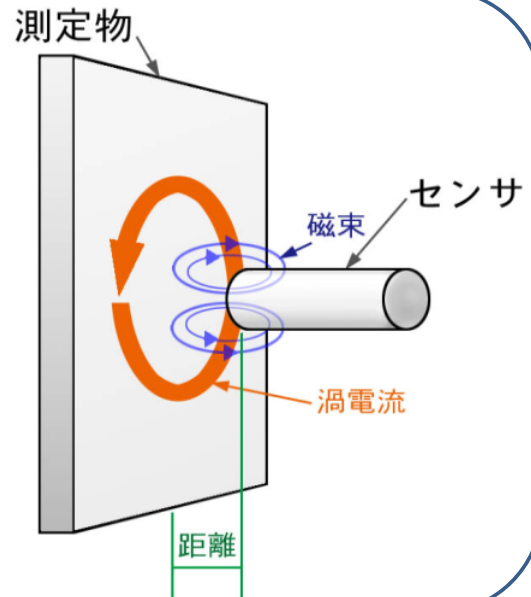
渦電流式変位計

○しくみ・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。



○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

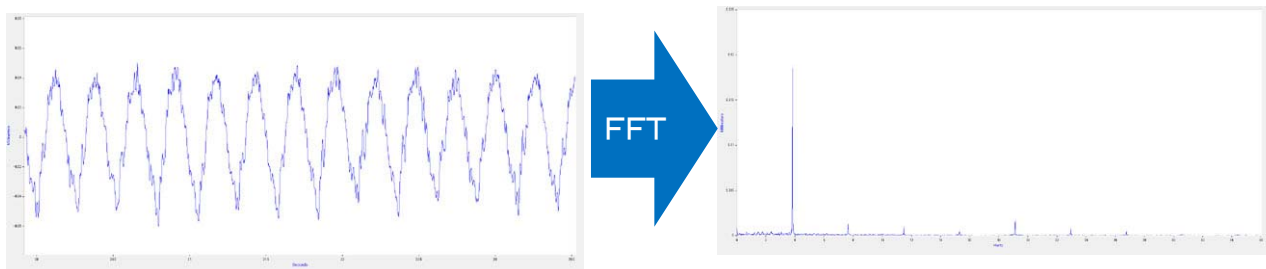
- 移設する毎に、設備運転前に校正作業を行う必要があるため、準備時間を要する(30分程度)。
- 主軸周りが狭隘だとセンサの取り付けが困難。

19

振動解析理論

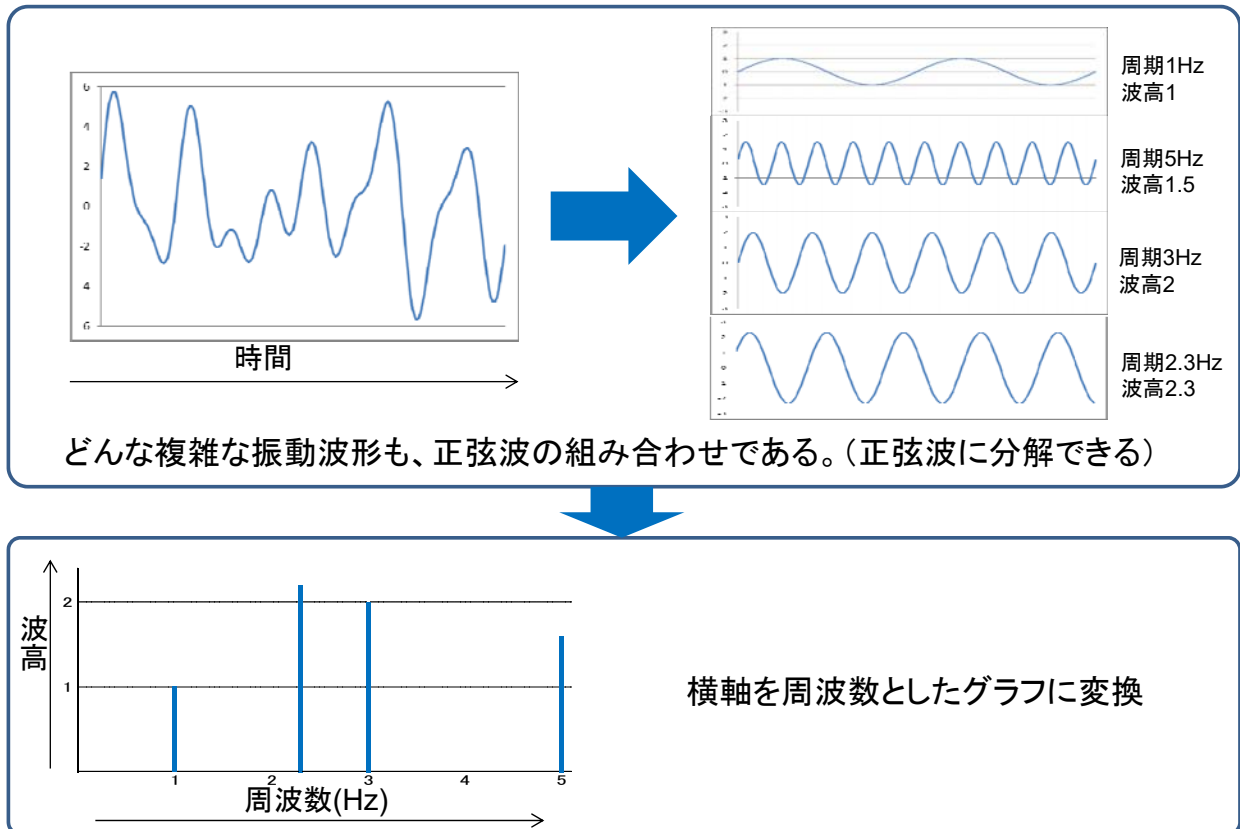
○振動を利用した精密診断では、**振動波形**、**振幅**に加え**周波数分布**を解析することで、**劣化傾向を診断**し、さらに**その部位を特定**することが可能。

○計測した振動波形から周波数分布を解析する手法としては**高速フーリエ変換(FFT)**があり、FFTアナライザやソフトウェアを用いて行われる



20

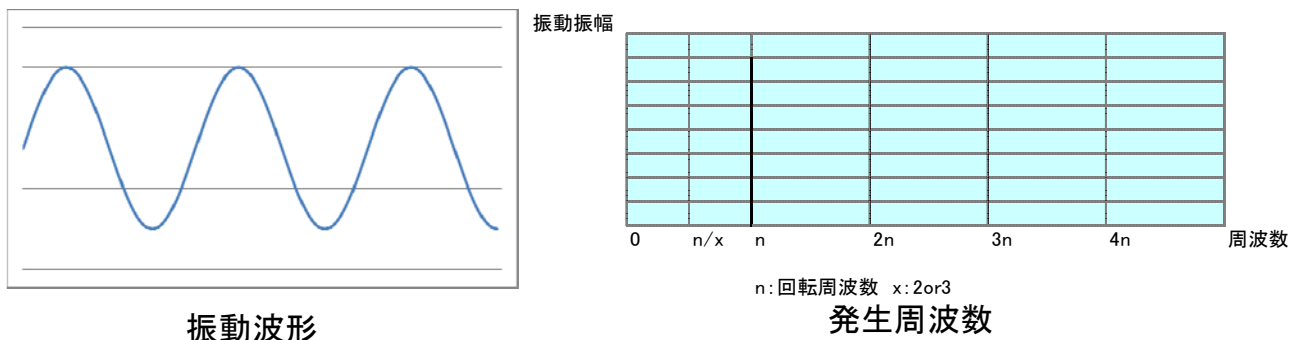
フーリエ変換



21

異常兆候と振動波形・発生周波数

- アンバランス(軸曲がり・偏心)



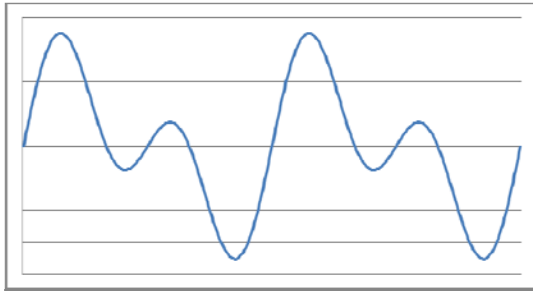
○特徴

回転周波数(n)が大きく卓越する。

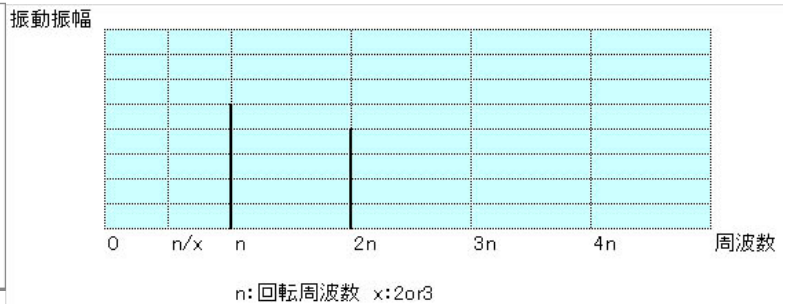
22

異常兆候と振動波形・発生周波数

・ ミスアライメント(芯ずれ)



振動波形



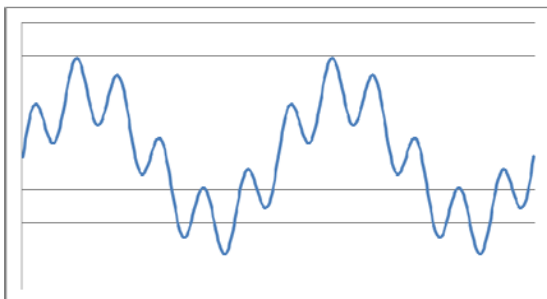
発生周波数

○特徴

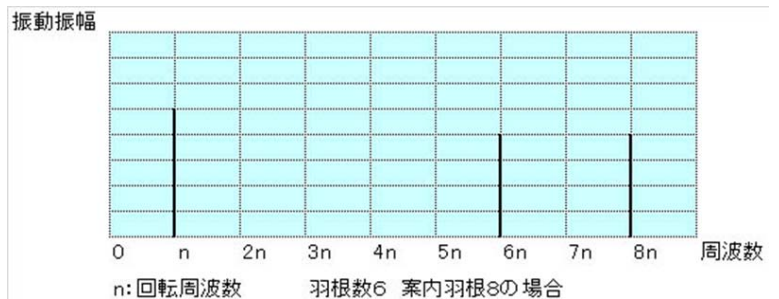
回転周波数(n)と、その倍数成分が大きく卓越する

異常兆候と振動波形・発生周波数

・ 羽根車の摩耗



振動波形



発生周波数

○特徴

回転周波数(n)と羽根数の積(6枚なら $6n$)の成分が**変動する**

軸振動計測の適用性 1

ポンプ主軸の曲がりを発見。

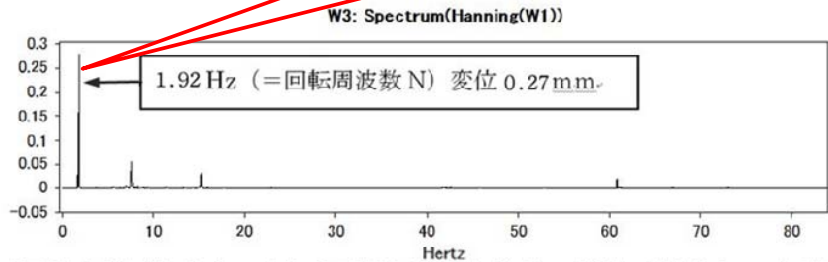
回転周波数成分が強く発生

○設備概要



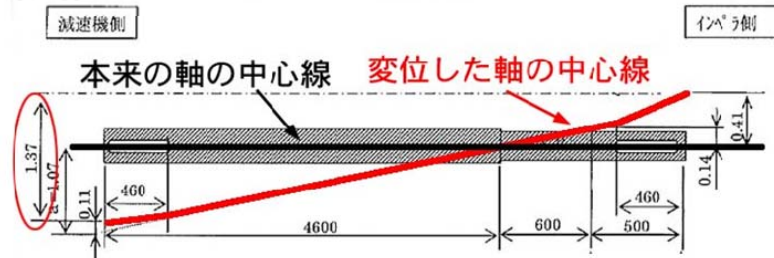
型式 立軸軸流
口径 2600mm
主軸回転数 115rpm
羽根車数 4枚

○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



分解整備時に長さ6m強の軸の軸心を計測したところ、**1.37mmの偏心が確認された**

25

ポンプ主軸曲がりについて



このポンプの設計上の軸曲がりの許容量は0.12mm

これ以上の軸曲がりがあると、軸受や軸封部への負荷増大による設備故障が発生する。

極めて危険な状況だった

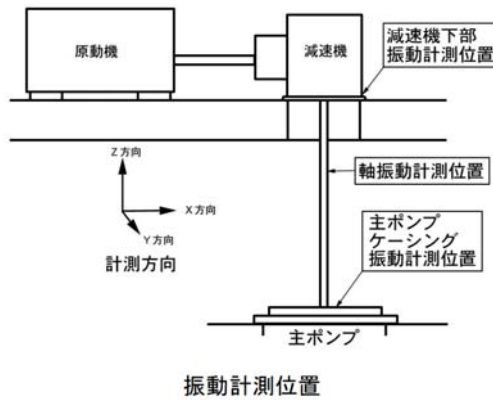
26

軸振動計測の適用性 1

ポンプ主軸の曲がりを発見。

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

27

軸振動計測の適用性 2

8/20

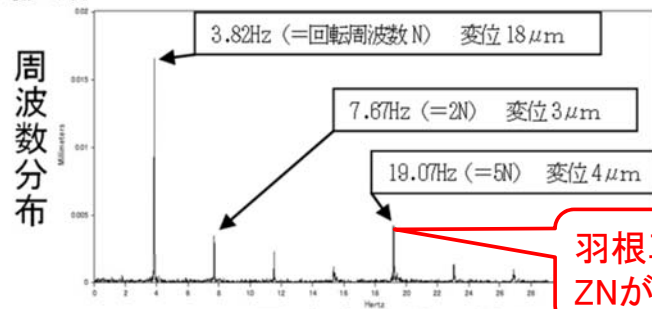
羽根車の摩耗損耗の兆候把握も可能

○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



渦電流式の計測結果

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

28

軸振動計測の適用性

現状の診断精度

診断	設備状態	羽根車摩耗	主軸曲がり
正常と診断 (整備延伸の判断)	正常(的中)	8 (83)	19 (94)
	異常(誤診)	6 (6)	2 (2)
	診断率	57.1% (93.3%)	90.5% (97.9%)
異常と診断 (異常の早期把握)	異常(的中)	4	1
	正常(誤診)	2	0
	診断率	66.7%	100.0%
診断率(全体)		60.0% (91.6%)	90.9% (97.9%)

「正常と診断」ならびに「診断率(全体)」の()内は、内部確認していないが正常に稼働している設備を含めた数値

- 振動法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残る。

29

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

潤滑油自体の状態を分析

○性状分析

- 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

潤滑油を介して設備状態を診断

○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

30

潤滑油分析（性状分析）

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

機械目	設備試験項	油圧機器	工業用ギヤ(循環給油)	モーター・ポンプ軸受	空気・ガスコンプレッサー	蒸気タービン	ガスタービン	EHCS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		
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
塩基価											定期
SI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		
粒子計測		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
摩耗粉 鉄粉濃度			定期			定期 ^D	定期 ^D			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
回転ポンベ酸化試験					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					
スラッジ (ミリポアフィルタ)		定期					定期				定期

外観¹: サンプ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: 空気圧縮機に適用 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

排水機場のように短時間の運転では、燃焼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。

33

SOAP法とは

Spectrometric Oil Analysis Programの略

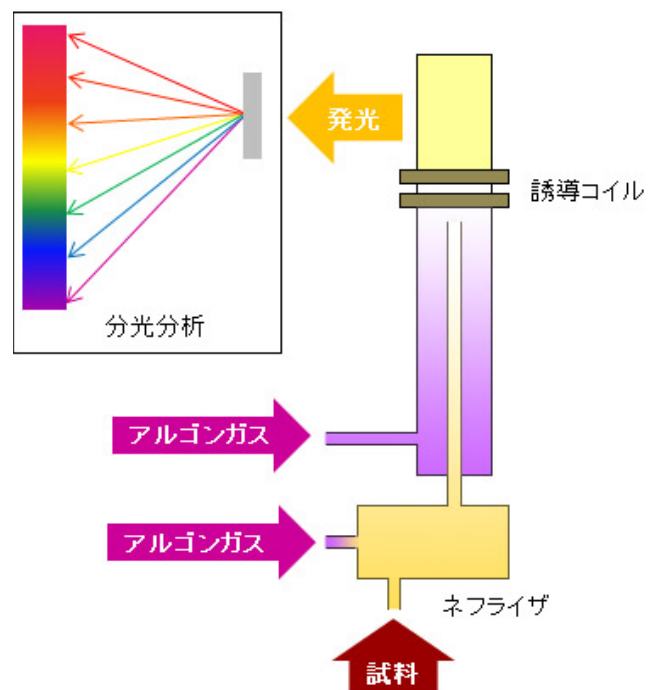
米国において、1942年に鉄道用ディーゼル機関に採用。

その後、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採用された。

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で、使用部材が既知ならば、設備内の摩耗部位の推定が可能

特徴

- 10 μm以下の小粒子の分析に有意
大粒子では発光させる程の熱エネルギーを与えるのが困難なため、不向き。
- 金属成分をppm単位で検出可能
- 設備初期段階の摩耗を検知可能



34

フェログラフィとは

1972年に、機械の摩擦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。

金属摩耗粉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。原理上、5 μm 以上の大摩耗粒子の分析に適している。

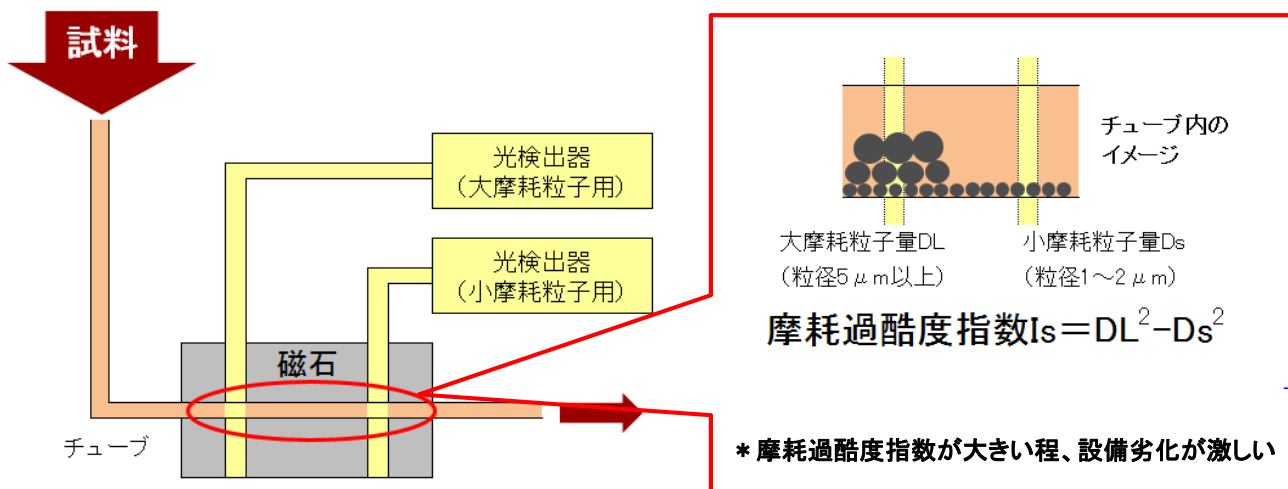
分析手法には、下記の2通りの方法がある。

- ① 定量フェログラフィ
- ② 分析フェログラフィ

35

① 定量フェログラフィ

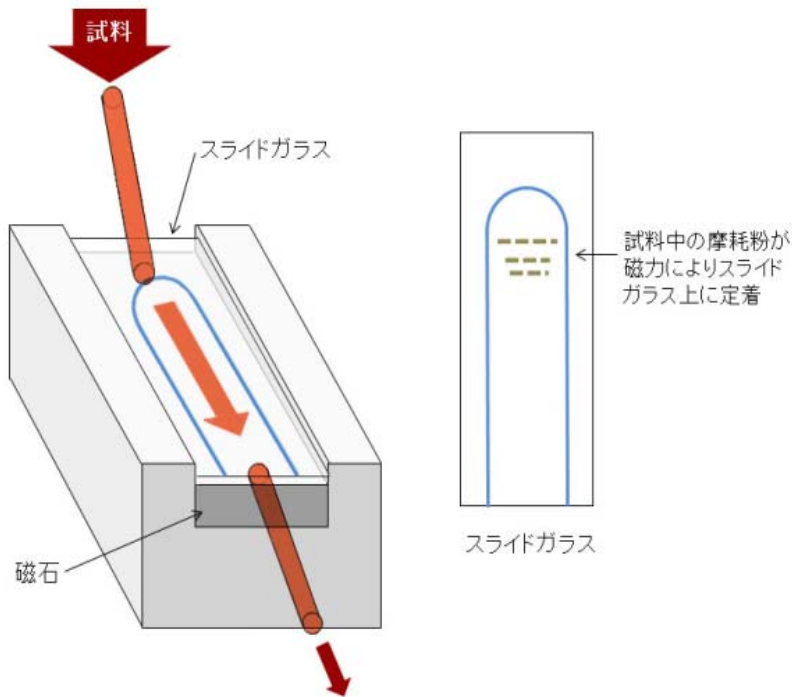
沈着チューブ内に残留した大粒子(5 μm 以上)と小粒子(2 μm 以下)の各濃度を調べ、摩耗過酷度指数を算出することによって機械の診断を行う。

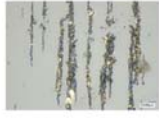

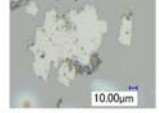




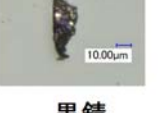
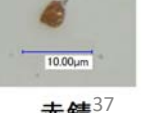


36

②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。

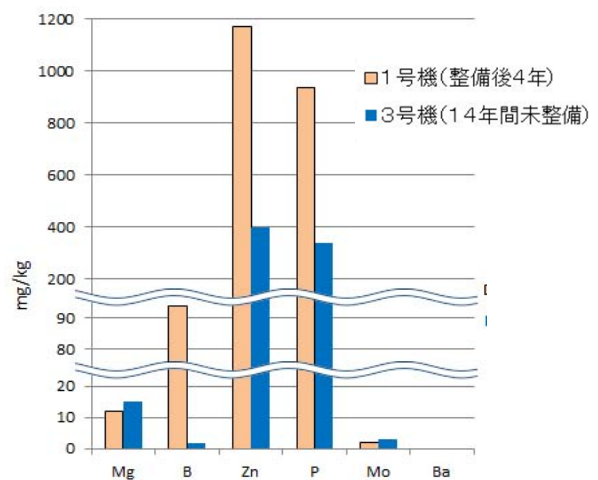
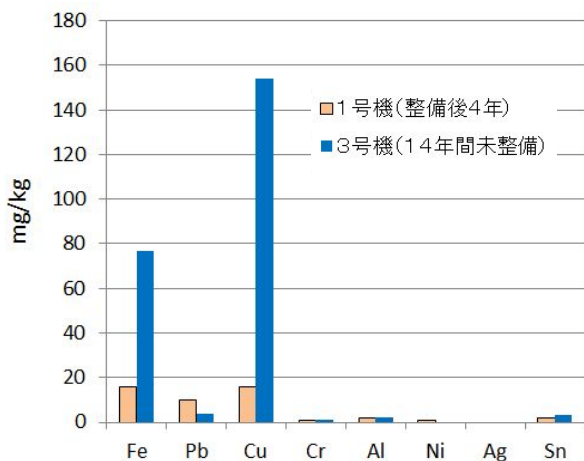


形状による分類	 正常摩耗粒子 <small>10μm以下の粒子が磁束線に沿って配列</small>	 切削摩耗粒子 <small>発生原因: 突起、異物による熱材の切削</small>
	 平板状摩耗粒子 <small>発生原因: 軽がり軸受の疲労摩耗</small>	 シビア摩耗粒子 <small>発生原因: 過剰応力による熱材の損傷</small>
	 球状摩耗粒子 <small>発生原因: 軸受の疲労</small>	 砂 <small>発生原因: 異物の混入</small>
	 非鉄粒子 (ホワイトメタル) <small>発生原因: すべり軸受の摩耗・損傷</small>	 非鉄粒子 (銅合金) <small>発生原因: 軸受の摩耗・損傷</small>
色・材質等による分類	 黒錆 <small>発生原因: 摩耗面の過熱・潤滑不良</small>	 赤錆³⁷ <small>発生原因: 水分の混入による腐食</small>

潤滑油分析 (SOAP法の適用性)

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



左より、摩耗粉元素量、添加剤元素量

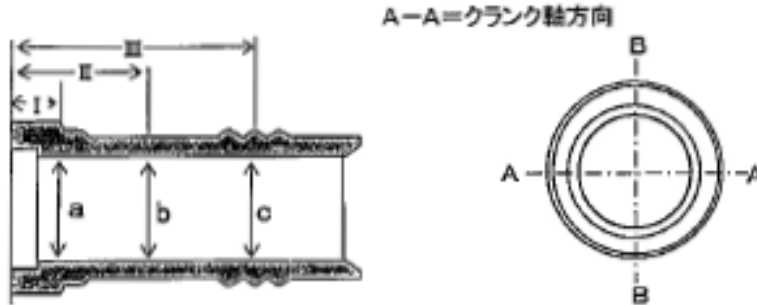
- ・鉄分や銅など、摩耗すると増大する成分は、長期間使用している3号機の方が多 (左)
- ・防錆などのための添加剤の量は、3号機の方が少ない (添加剤が消費されている) (右)

必要時しか稼働し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

原動機部品摩耗量と摩耗過酷度指数の比較結果



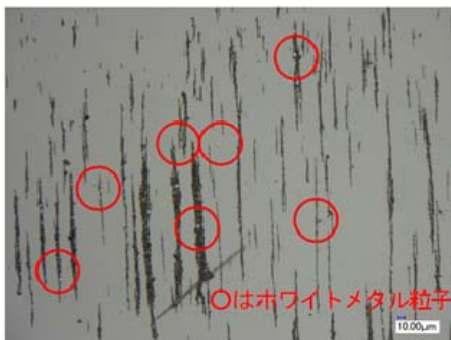
	1号機	2号機	備考
シリンダライナ摩耗量(mm)	0.038	0.082	各気筒の摩耗量平均値の合計
大摩耗粒子量DL(%/mL)	40	45	
小摩耗粒子量DS(%/mL)	30	20	
摩耗過酷度指数	700	1625	DL ² -DS ² で算出

**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**

39

潤滑油分析(分析フェログラフィ法の適用性)

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**

40

まとめ

- 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。

現段階では、100%の信頼性があるとは言えない

これまで把握できなかった異常兆候を掴むことが可能となった

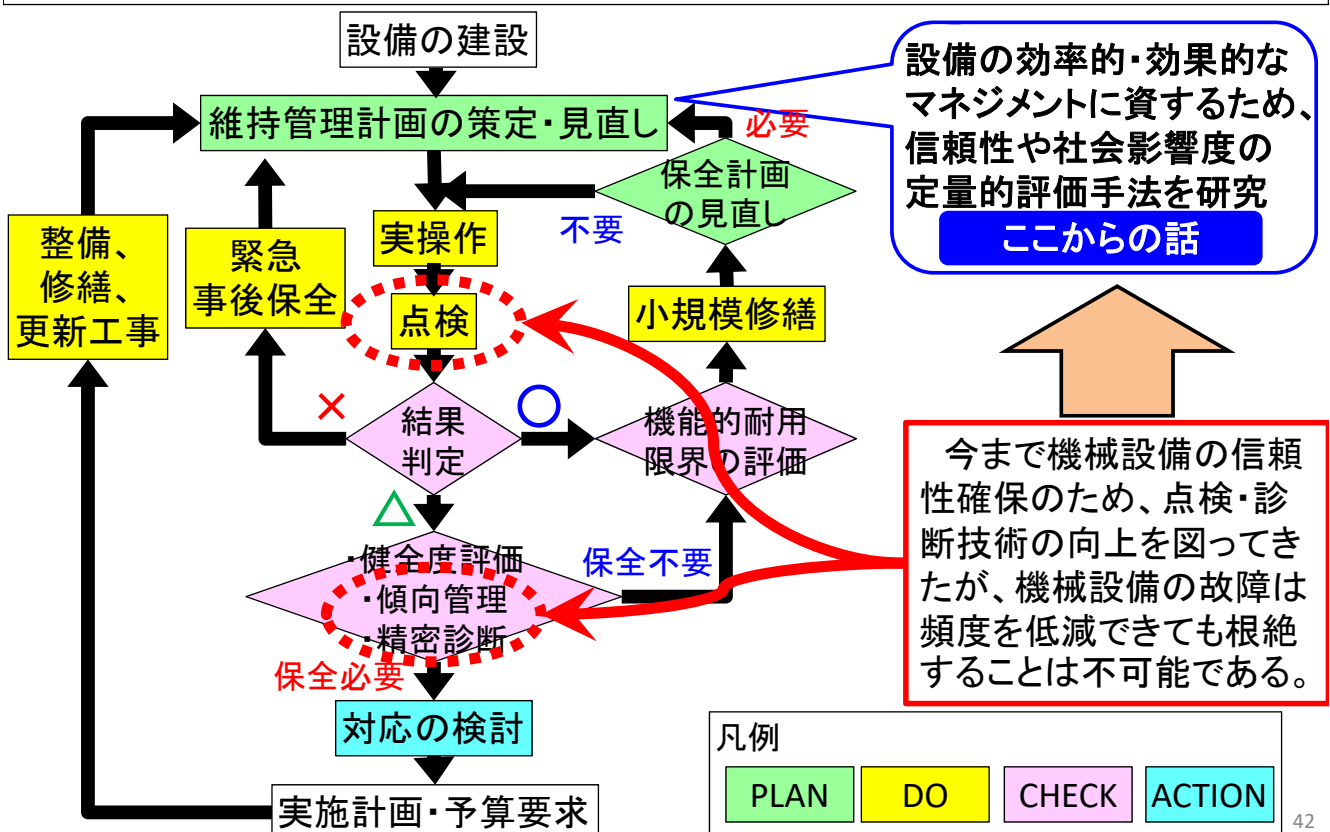
診断精度を高めてゆく必要はあるが、この技術が河川ポンプ設備の効果的、効率的な維持管理に貢献しうる技術となりうるものと確信する。

診断精度を高めるための取り組み

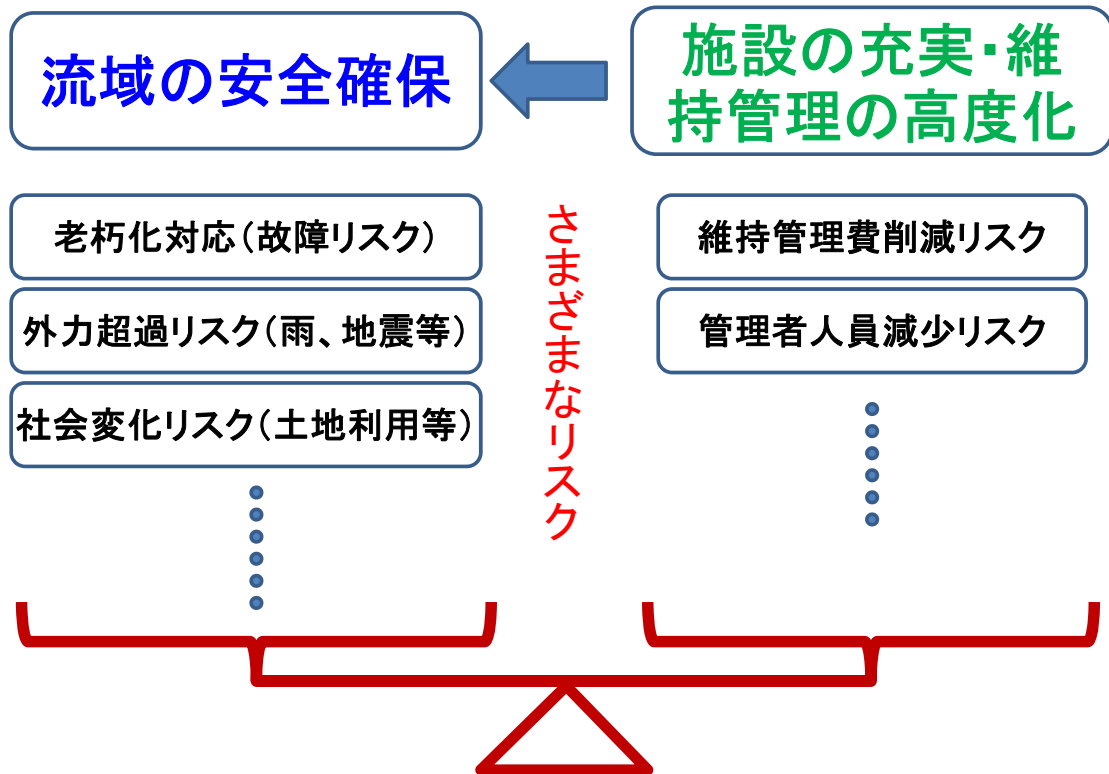
早期の現場導入により、診断事例を蓄積する
(一部の地方整備局で率先して導入)

多様な診断手法を導入する
(土木研究所で研究中)

設備管理PDCAサイクル



維持管理計画で考慮すべきポイント

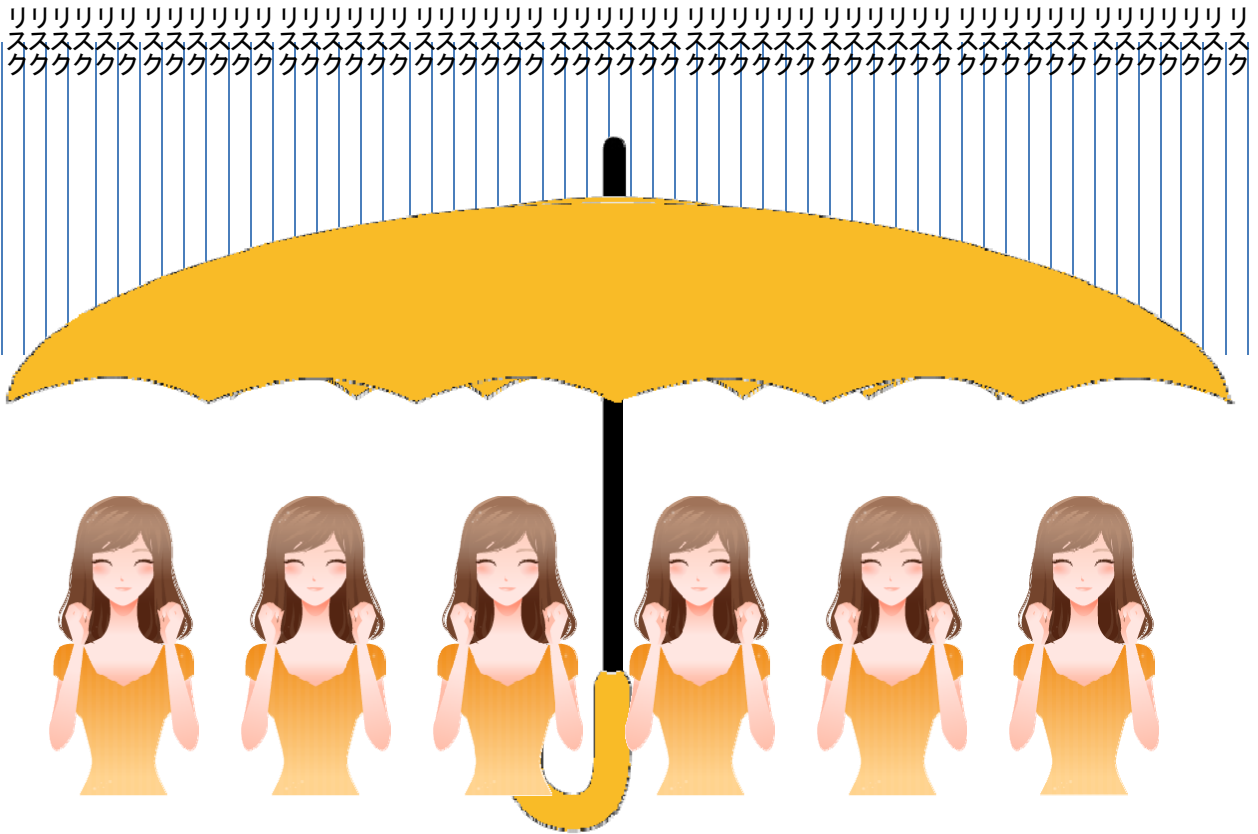


43

サービスレベルと経費のバランス

- 施設毎のマネジメントでは、不十分
- 流域全体、さらには全国的な視野でマネジメントを実施すべき
- では、マネジメントの目標は？
- 費用を十分にかけるなら

44

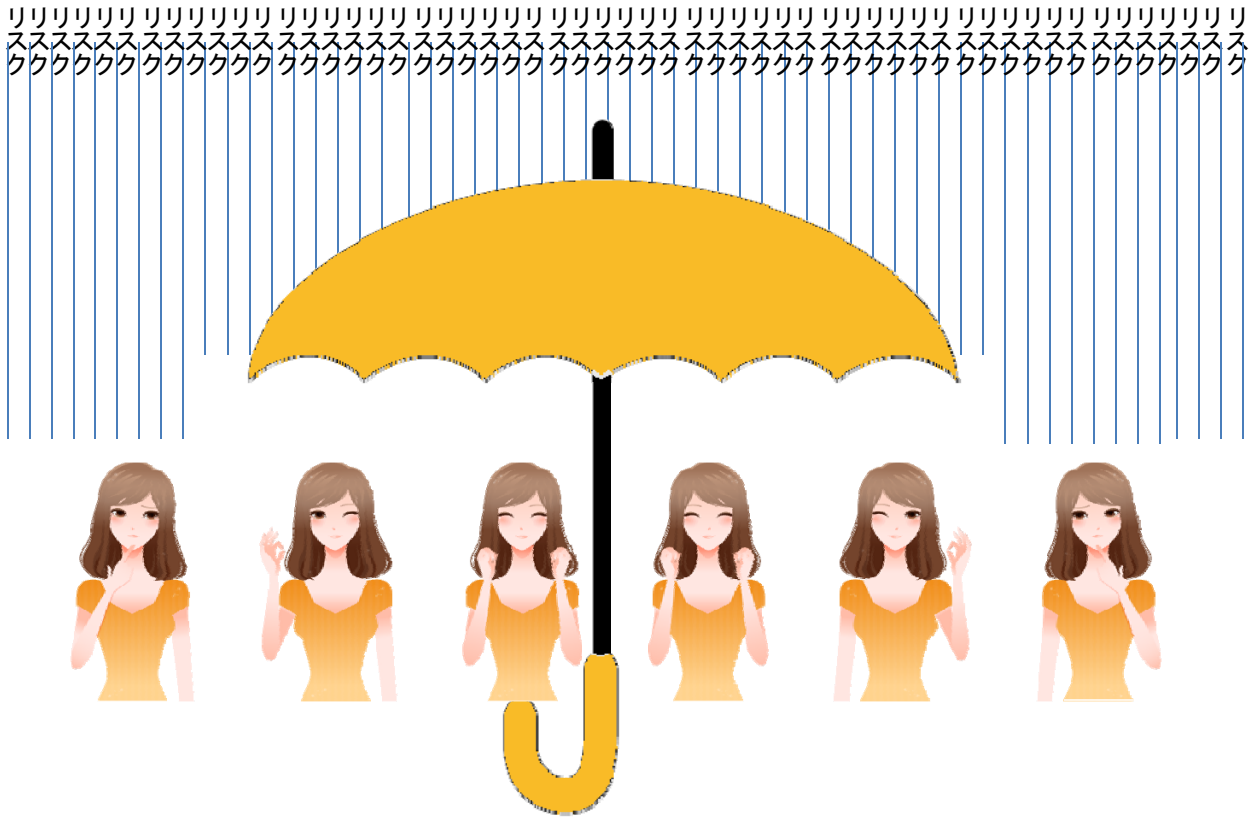


45

サービスレベルと経費のバランス

- 施設毎のマネジメントでは、不十分
- 流域全体、さらには全国的な視野でマネジメントを実施すべき
- では、マネジメントの目標は？
- 費用を十分にかけるなら、問題ないが
- そうでない場合は、サービスレベルが低くなる

46



サービスレベルと経費のバランス

- 施設毎のマネジメントでは、不十分
- 流域全体、さらには全国的な視野でマネジメントを実施すべき
- では、マネジメントの目標は？
- 費用を十分にかけるなら、問題ないが
- そうでない場合は、サービスレベルが低くなる
- 状況が変われば、守れるものも変わる

そこで、先端チームでは

想定しうるさまざまなリスクについて

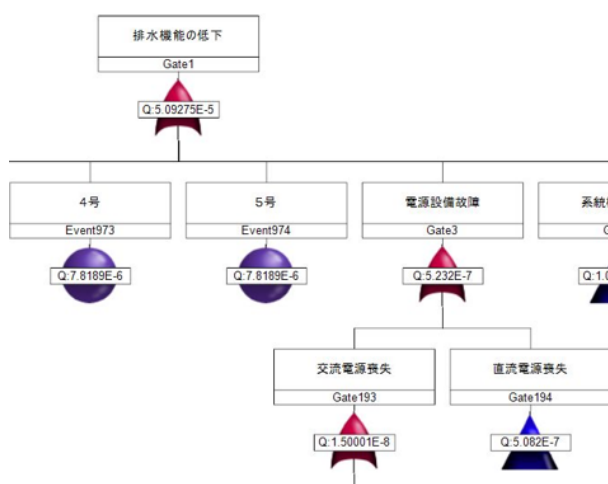
- 生起確率や
- 複数のリスクの関係性と結果(障害)
- それが発生した場合の社会影響
- その持続性

など、BCP(事業継続計画)の要素を入れた検討(設備のマネジメント)を実施し、判断の技術的根拠の構築に着手

51

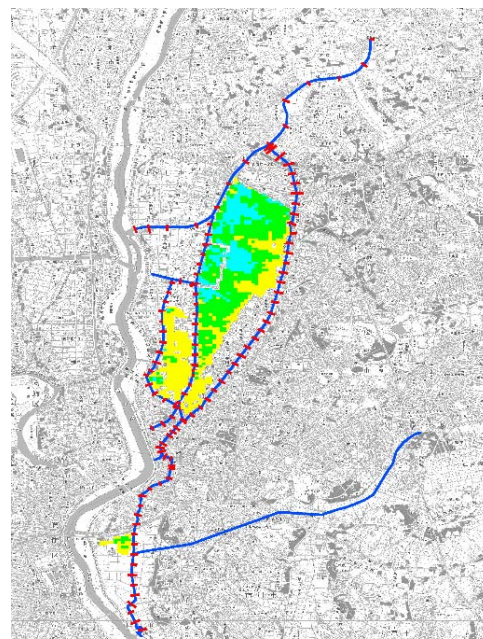
設備マネジメントの研究

FMEA(故障モード解析)や**FTA**(故障の木解析)等の**信頼性評価技術**の土木機械設備への適用性と評価方法について研究



FTAによる信頼性評価例(一部)

排水機場機能喪失時の社会的影響を定量的に評価するため、**河川GISモデル**を活用した研究を実施



河川GISモデルによる、排水機場機能喪失時の氾濫シミュレーション結果例

52

設備マネジメントの研究

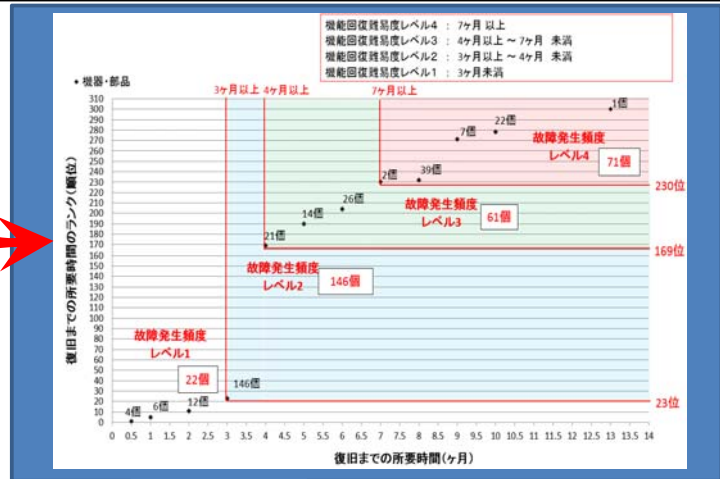
【コンセプト】不具合発生時の機能回復のし易さに着眼

①機能回復難易度

故障事例より構成機器別に、復旧までの所要時間を分析し、4段階にレベル分けした。

②機能補完方性

構成機器・部品別に、故障実績より考えられる補完性及び実際に行った補完を基に、4段階に設定・整理した。



機器区分	部品名	信頼性評価(在来のFMEA項目)				機能回復指標(本研究で検討)					
		システムへの影響度	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級(致命度)	復旧までの所要時間	修繕内容	機能回復難易度	補完方法	機能補完性	機能回復指標
本体	バンド(ケーシング)	4	1	1	1.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
インペラ	羽根車	4	3	4	3.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
	羽根車ナット	4	3	1	2.3	約5ヶ月	取替	3	なし	4	3.5
主軸及び軸受	軸継手	4	3	4	3.6	約7ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
	グランドパッキン	4	2	4	3.2	約5ヶ月	取替	3	予備品	2	2.4

故障等級 = $3\sqrt{}$ (システムへの影響度 × 故障モード発見の容易性 × 故障発生頻度)
 機能回復指標 = $\sqrt{}$ (機能回復難易度 × 機能補完性)

53

20/20

「非」常時のみに稼働する機械設備のメンテナンス

ご静聴ありがとうございました

54