

「摩耗による劣化診断事例と 要因分析による対策」

2011年 10月 14日

東芝原子力エンジニアリングサービス(株)

渡部幸夫



Copyright 2011, Toshiba Corporation.

目次

摩耗による劣化診断事例を紹介し、その事例を参考とした、要因分析による対策の方法を提案する。表面だけの原因対策のために、繰り返してしまう劣化対策に参考となる方法である。今回は、摩耗事象にかかわる要因を取り上げ、それらの要因が重なり合って劣化を加速する負の連鎖を見つけ出し、その連鎖を断ち切る対策を策定する方法を紹介する。

I. 摩耗による劣化診断事例

1. 回転機の据付け接触面変化による振動変化とその対策
2. コンプレッサーの振動変化とその対策
3. 配管の振動変化とその対策
4. 縦型ポンプのミスアライメントによる振動変化とその対策
5. 摩耗による劣化現象に対する診断・対策のまとめ
6. 機器別の摩耗箇所の点検方法と診断方法

II. 要因分析による対策

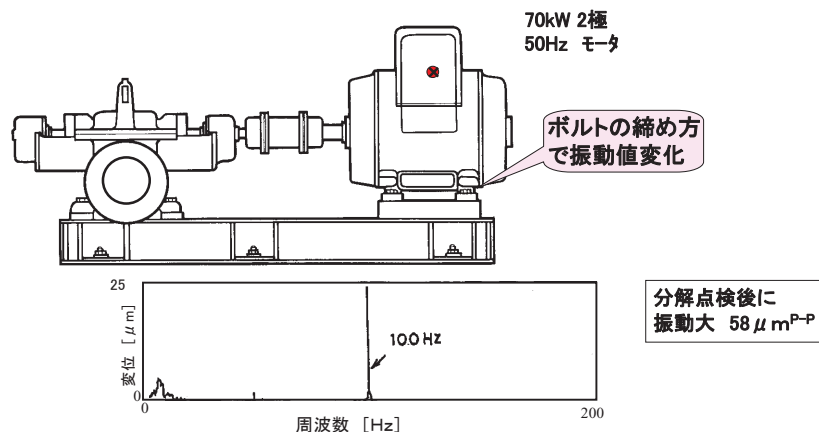
1. 劣化による不具合現象の分析
2. 事例を用いた要因分析による対策例
3. 摩耗劣化の要因分析 (負の連鎖ループ)

I. 摩耗による劣化診断事例

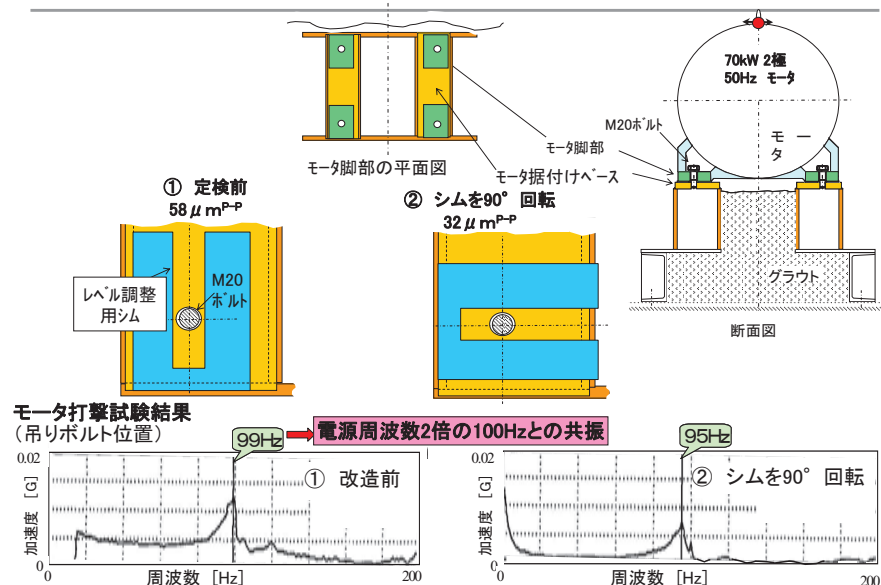
1. 回転機の据付け接触面変化による振動変化とその対策

1.1 モータの据付け接触面変化による振動変化

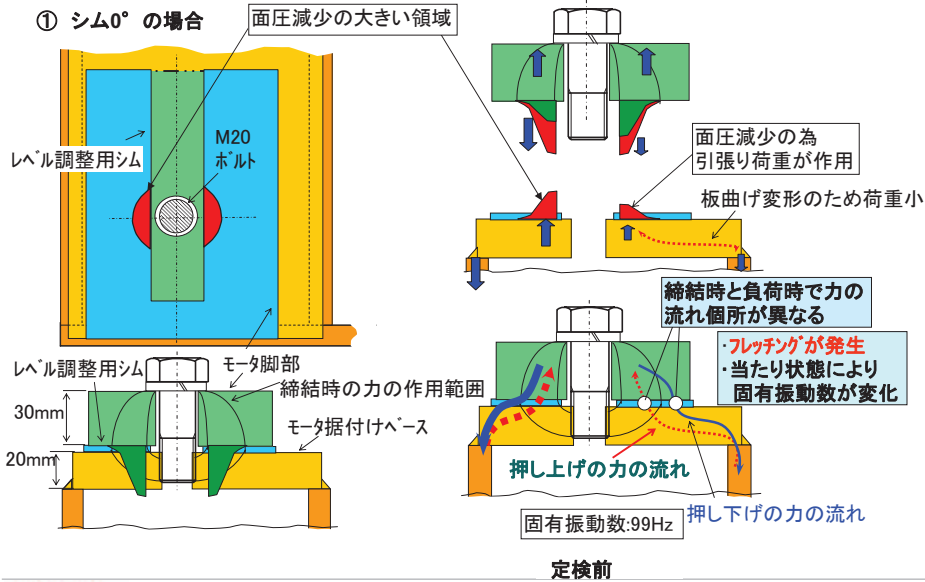
ポンプ分解点検後にモータ吊り耳位置で振動大



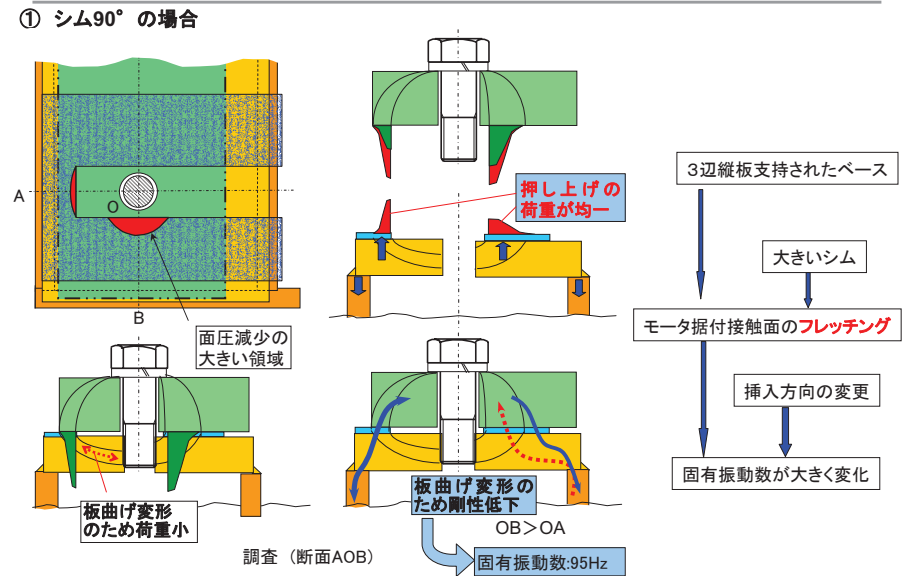
モータギャップ不平衡による電源周波数2倍振動が固有振動数と一致して共振



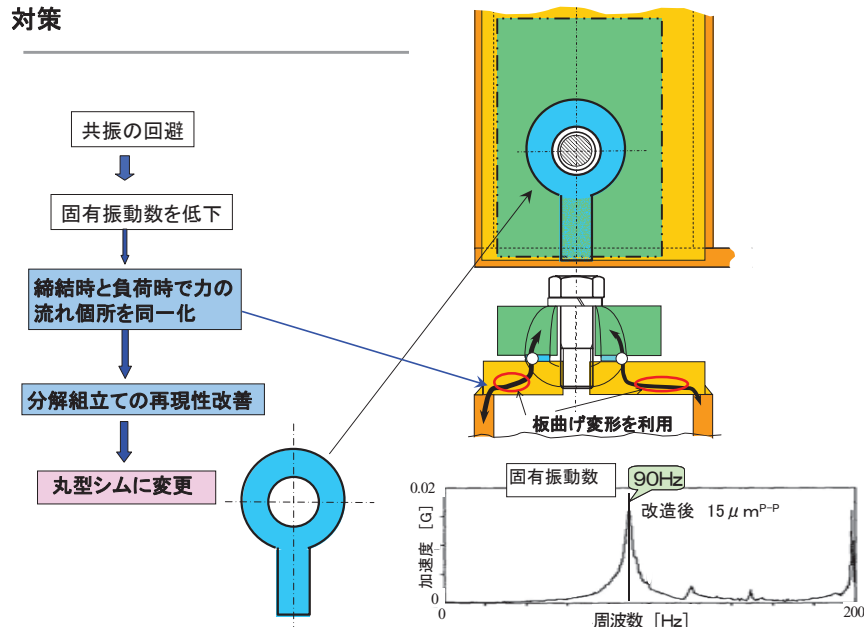
振動変化の原因



振動変化の原因



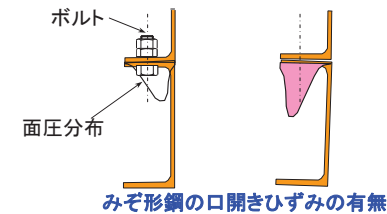
対策



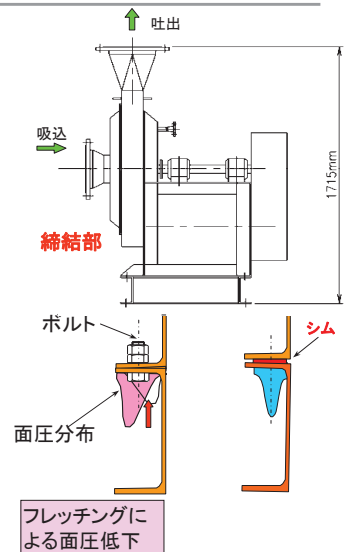
1.2 ファン架台の据付け接触面による同機種の振動差大

現象: 回転周波数が、架台の固有振動数近傍のため、据付け接触面のあたりの差による固有振動数の変化が、**応答倍率を最大約2倍に変化**。

診断: 締結部の接触面圧分布がどのようにになっているかを診断して、剛性評価。



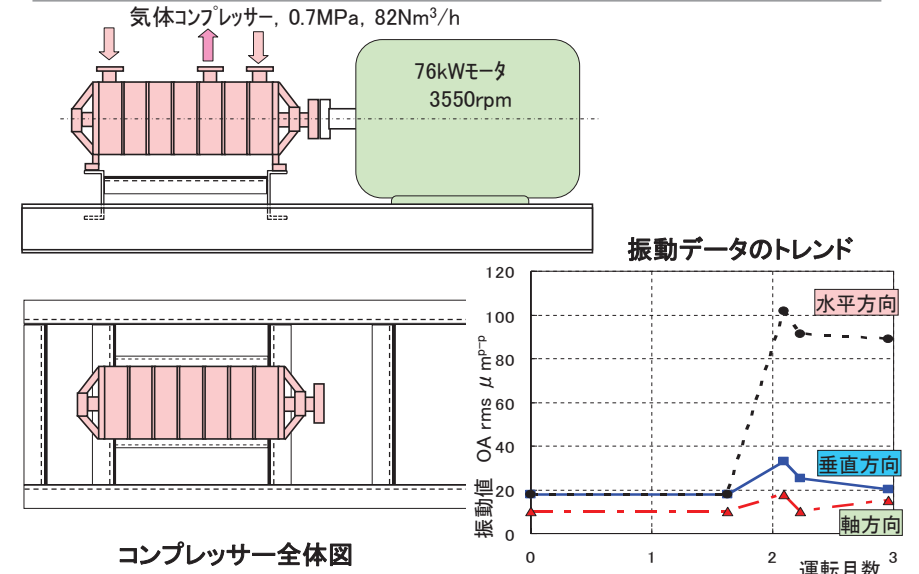
対策: 接合面は、フレッチングが発生しても**あたり**が変化しない場所を選定し、締結荷重が**変化しない適切な面積**を定めシムを挿入した。



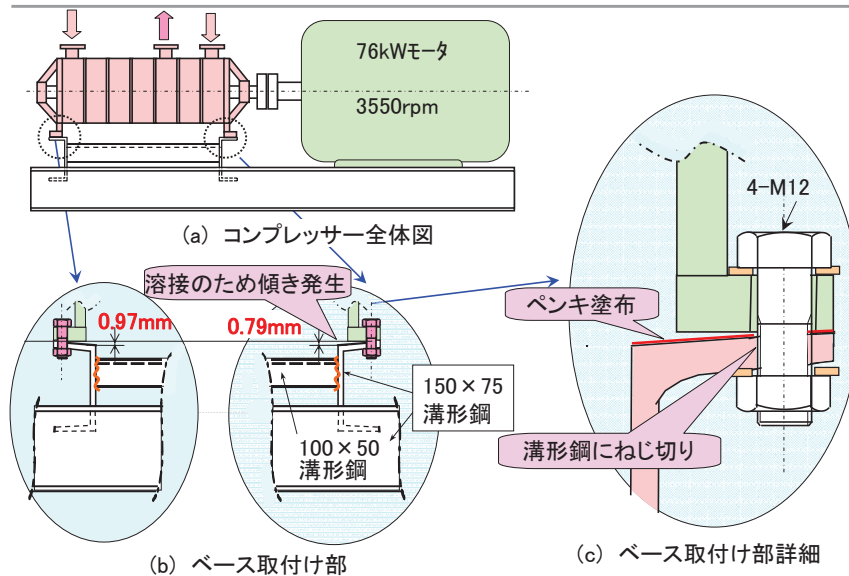
1.3 回転機の据付け接触面の診断と対策

- ① 据付けの再現性を良くするためには、接合部での**締結時の力の流れと負荷時の力の流れを同じ**にすることが重要である。接合部のフレッチングによる据わりの変化を避ける。
- ② 締結部の接合面は広すぎると面圧の差が大きいので、据わりの変化が大きい。表面が、**陥没しない適切な接合面の広さ**の選定が必要である。
- ③ 締結部の接合面が広い場合は、**シム形状を工夫すれば、据付け剛性の再現性は改善できる**。

2. コンプレッサの振動変化とその対策

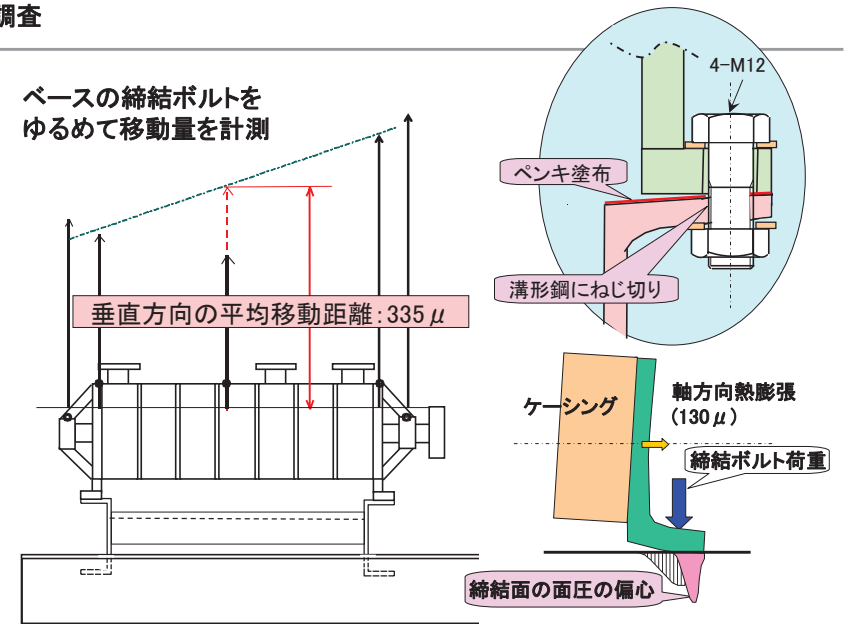


コンプレッサの構造

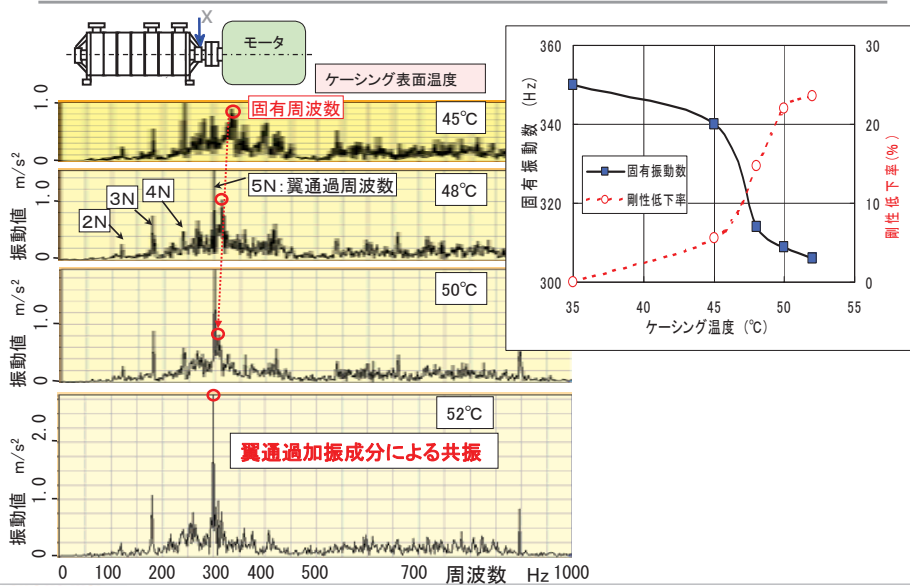


調査

ベースの締結ボルトをゆるめて移動量を計測



軸受部の上下振動の周波数変化



締結荷重の初期ゆるみ計算

ボルト・ナット系のばね定数 : K_t

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{E_b} \left(\frac{\ell_a + \ell_b}{A} + \frac{\ell_n + \ell_n}{A_s} \right)$$

ℓ_b : ボルト頭等価長さ = 0.4d

$$A : \frac{\pi}{4} d^2$$

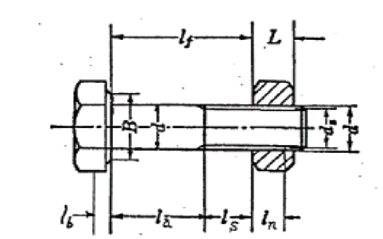
$$A_s : \text{ボルトのねじの有効断面積} = \frac{\pi}{4} d_s^2 \quad \left(d_s = \frac{d_1 + d_e}{2} \quad \begin{array}{l} d_1 : \text{ボルトの谷径} \\ d_e : \text{ボルトの有効径} \end{array} \right)$$

ℓ_n : はめあいねじ部の等価長さ

○ナットの場合 : $\ell_n = 0.7d$

○植込みねじの場合 : $\ell_n = 0.5d$

E_b : ボルト材のヤング率



ねじ部の変形量 : δ_n

$$\delta_n = l_n \times \frac{\sigma}{E_b} = 0.7d \times \frac{0.7\sigma_y}{E_b} = 10 \mu\text{m}$$

軸部の変形量 : δ_s

$$\delta_s = l_f \times \frac{\sigma}{E_b} = 1.5d \times \frac{0.7\sigma_y}{E_b} = 21 \mu\text{m}$$

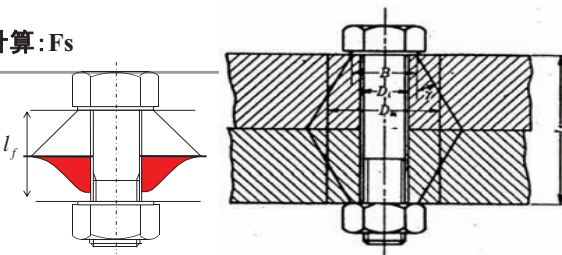
(M12,SUS304の場合)

締結荷重の初期ゆるみ荷重計算: F_s

$$F_s = \frac{K_t \cdot K_c}{K_t + K_c} \cdot \varepsilon_s = Z \cdot \varepsilon_s \cdot l_f$$

Z: へたり係数

ε_s : 初期ゆるみ量



締結部の面圧分布

$$K_c = \frac{E_c}{\ell_f} \cdot \frac{\pi}{4} \left\{ \left(B + \frac{1}{10} \ell_f \right)^2 - D^2 \right\}$$

ただし E_c : 被締付材のヤング率

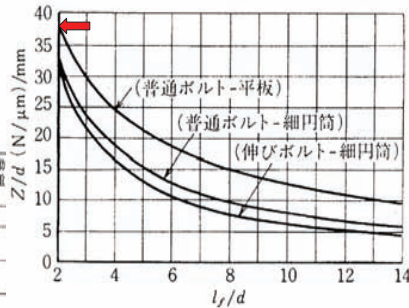
$$F_s = 38N / (\mu \cdot \text{mm}) \times 4 \text{箇所} \times 2 \mu\text{m} \times 12\text{mm} = 3800N$$

いろいろな外力状態に対する1接合面当りの初期ゆるみ量の標準値
(ねじ面は1つの接合面として数える。)

接合面の数 (ねじ部も含める)	締付け長さ比 $l_f/d =$ に対する初期ゆるみ量, μm		
	2.5	5	10
2~3	1.5	2	2.5
4~5	1	1.25	1.5
6~7	0.7	0.9	1.1

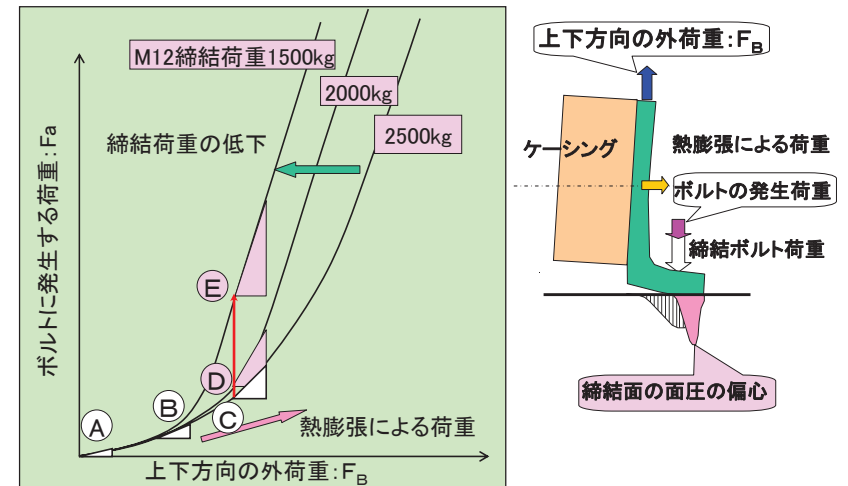
荷重状態	軸方向の振動荷重	軸直方向の振動またはそれと荷重との組合わせ
面の仕上げ程度		
ねじ面		5 μ
すべての接合面 (VVV)	2 μ	4 μ
粗い接合面 (VV)	4 μ	8 μ

※Vは100 μ は粗仕上げ、Vは粗仕上げ、VVは粗仕上げ

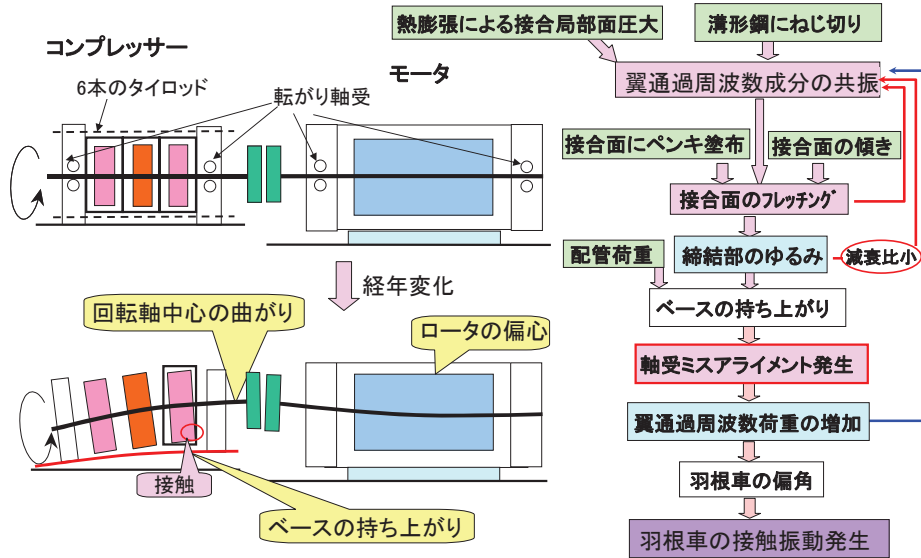


締結荷重管理

ボルトの締結荷重が減少すると、大きく上下方向の剛性低下が発生するので、締結荷重の管理が必要。



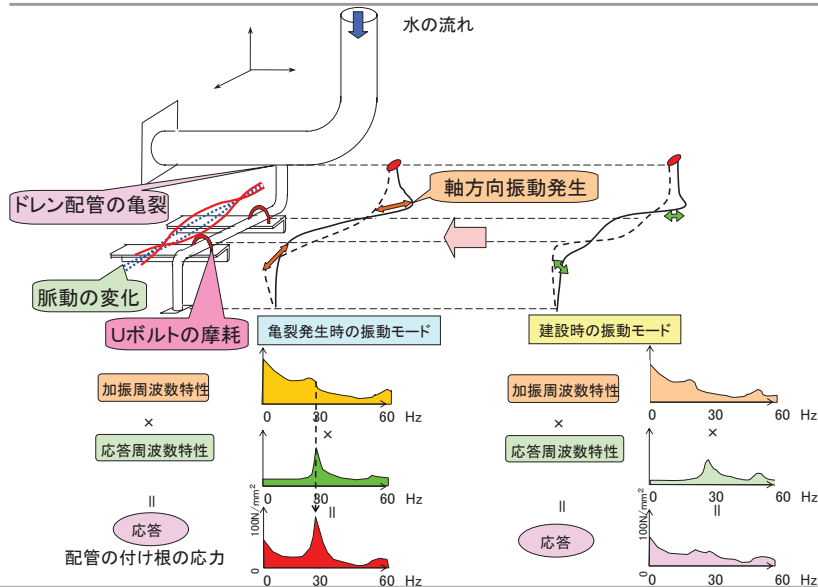
経年変化で振動大となった原因



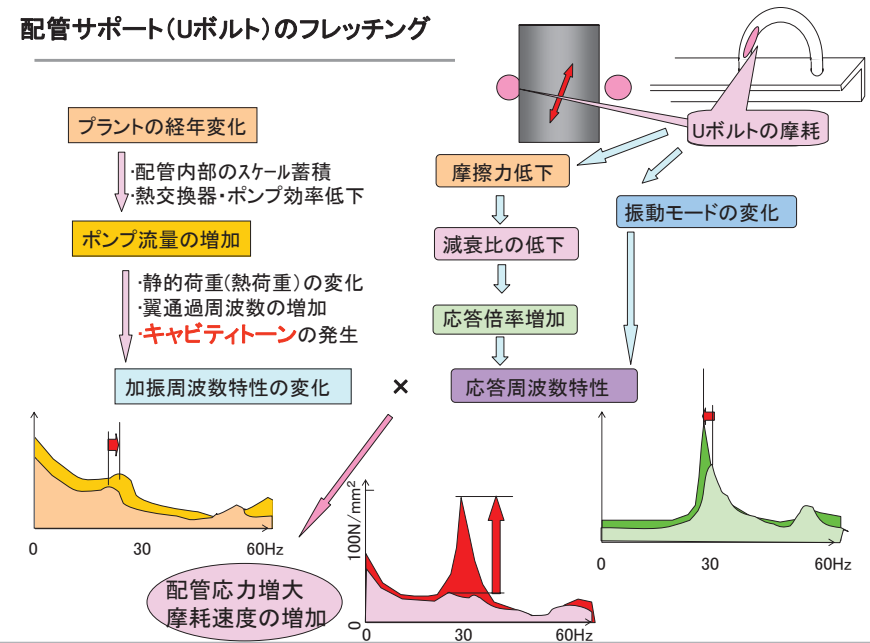
コンプレッサーの振動変化の診断と対策

- ① ベースの増し締めを行う時、ベースが上下に移動しないことを確認すべき。
- ② めねじに対して、振動に対するゆるみ止め対策としてナットを用いると締結荷重のチェックが困難であるので、採用しない方が良い。
- ③ 接合面にペンキを塗布するのは、問題外。(意外とチェックされていない。)
- ④ 締結部のゆるみは、剛性の低下だけでなく、軸受ミスアライメントを引き起こすので注意。特に、基礎台がチャンネル溶接構造の場合、注意が必要。
- ⑤ 熱膨張変位が付加する締結部は、フレッシングが発生するので、締結荷重の管理が重要である。
- ⑥ 振動による初期ゆるみ防止対策は、締結部の締付け長さをボルト呼び径の2倍以上する。締付け長さを28mm長くして、初期ゆるみを、4割減少させた。

3. 配管の振動変化とその対策



配管サポート(Uボルト)のフレッシング



キャビティの発生原理

キャビティでの渦剥離周波数 f_c

$$f_c = \frac{St \times V}{d} \quad \dots(1)$$

ここで、 V : 母管の平均流速
 St : ストローハル数

(凹みの深さ: L , 前縁部の形状, 分岐配管の d/D 値 (d : 枝管径, D : 母管径) 等により, その値が変わるので, 注意が必要)

分岐配管の液柱固有振動数: f_n

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4[L + (D/2)]} \quad \dots(2)$$

$n=1,2,3$

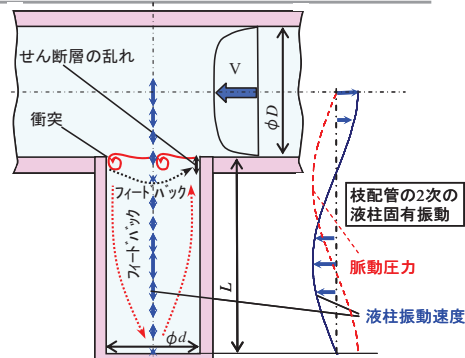
c : 音速 (気泡が0.1%混入すると水圧300kPaで、1/2の音速に減少)

キャビティ: f_{ct} ($f_c = f_n$)

凹み(キャビティ)の開口部を流れがよぎる時に発生する大きな振動騒音をキャビティという。このような凹みは、母管への枝管(ドレン、ベント、計装)の接続部や、主蒸気配管への逃し安全弁の接続部等に見られる。

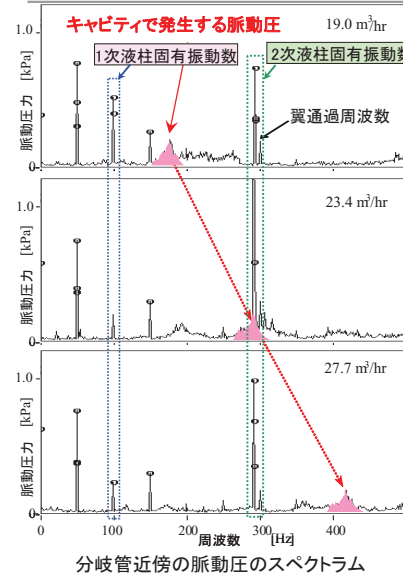
この振動は、キャビティ前縁にて発生した渦が、キャビティ後縁に衝突し圧力変動を起こし、それがキャビティ内の液柱固有振動数の振動モードを励振させ、前縁にて発生する渦を大きくする自励振動現象である。

浅いキャビティの場合は流れ方向、深いキャビティの場合は深さ方向の液柱固有振動数と一致した場合に発生。

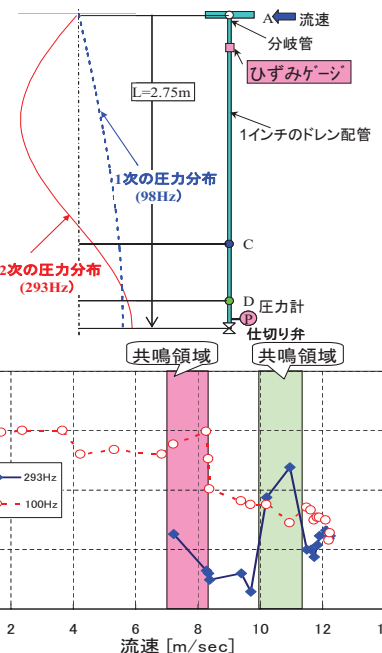


キャビティの発生原理説明図

キャビティで発生する脈動圧の引き込み現象

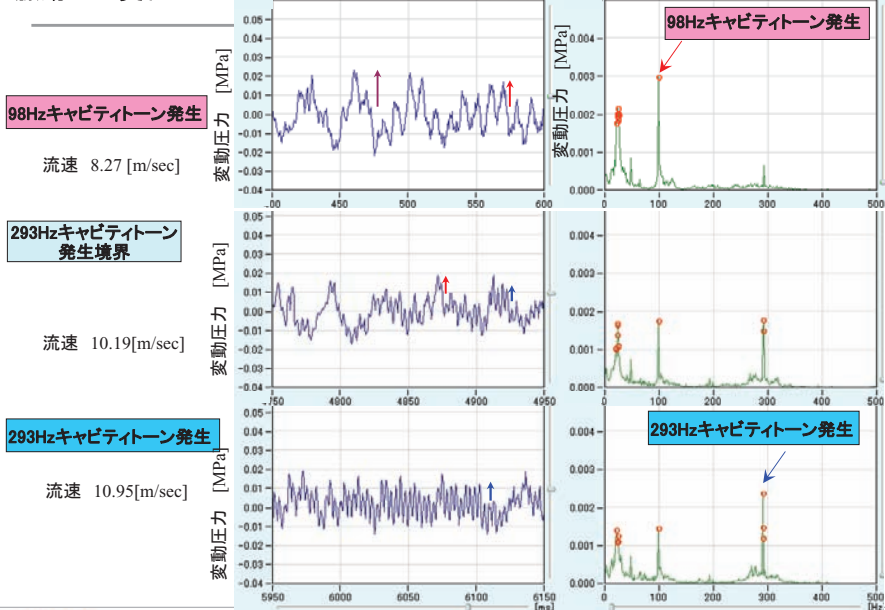


分岐管近傍の脈動圧のスペクトラム

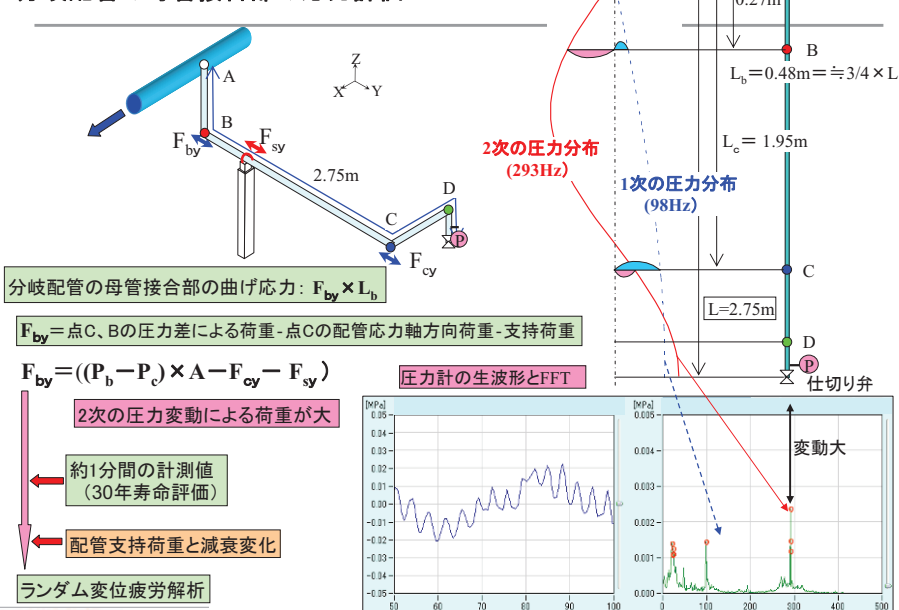


渡部(ほか第8回評価・診断に関するシンポジウム(2009)

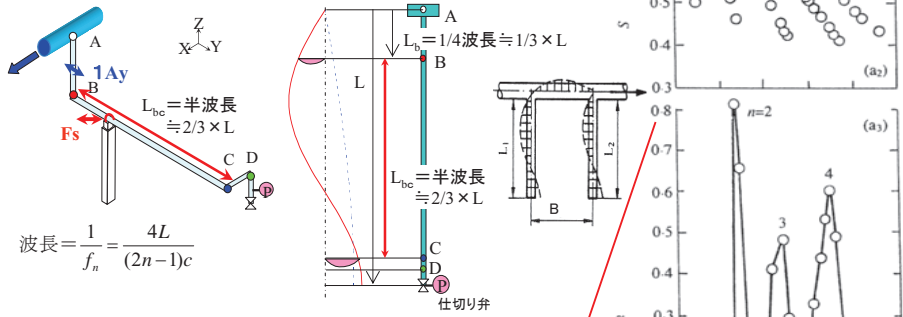
脈動圧の変化



分岐配管の母管接合部の応力評価



分岐配管に発生するキャビティーンとの監視方法



水配管の場合 2次の最大脈動圧力は、母管の動圧力の約15% ← 圧縮性がないため気体より脈動圧力小

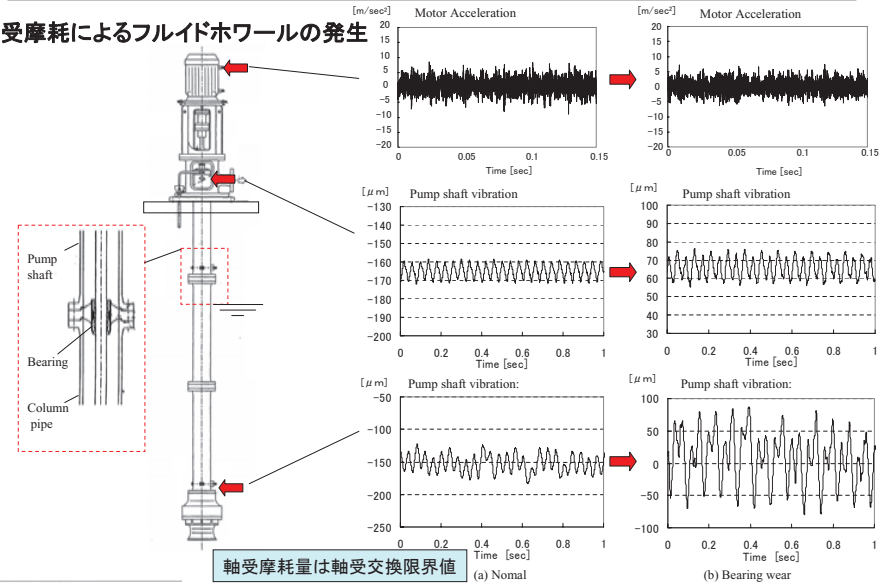
蒸気枝管の圧力低減対策

- 分岐配管内の音速確認、液柱共鳴周波数の確認
- 脈動圧力の位相が逆となる半波長の直線長さを両端もつクランク形状の配管を抽出
- フレッチング等による支持部剛性変化による機械共振有無の確認のための配管振動加速度を監視

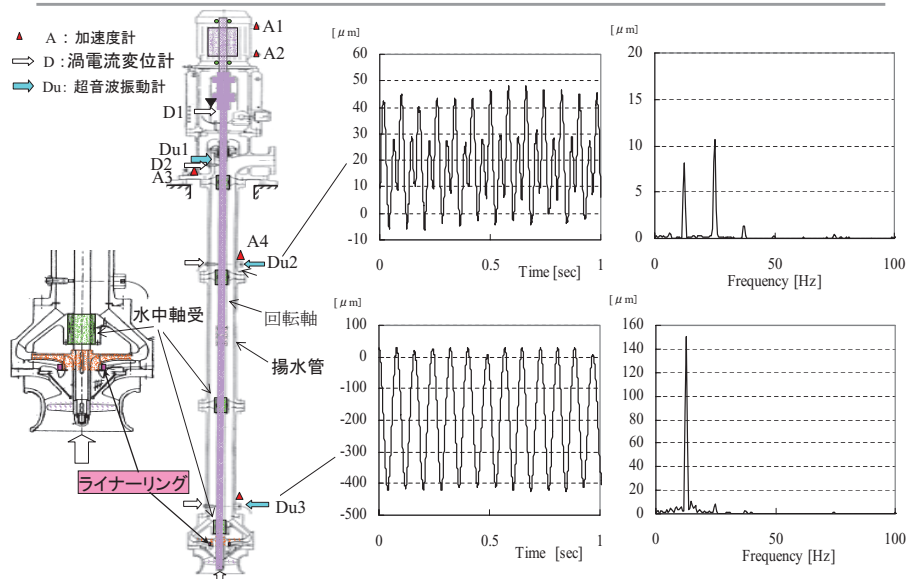
- 分岐配管間隔: Bを大きく
 - 分岐配管長さを長く
 - 口径を小さく
 - 後縁の丸みを大きく
 - 分岐配管長さの差15%以上
- ただし、Bを音波の半波長の整数倍にすると応答は大きくなるので注意。

4. 縦型ポンプのミスアライメントによる振動変化とその対策

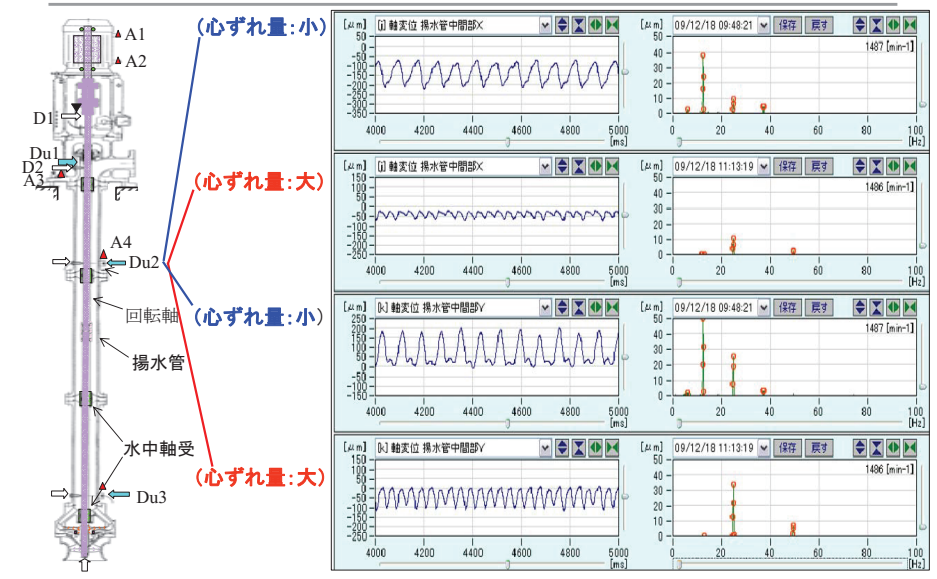
軸受摩擦によるフルイドホワールの発生



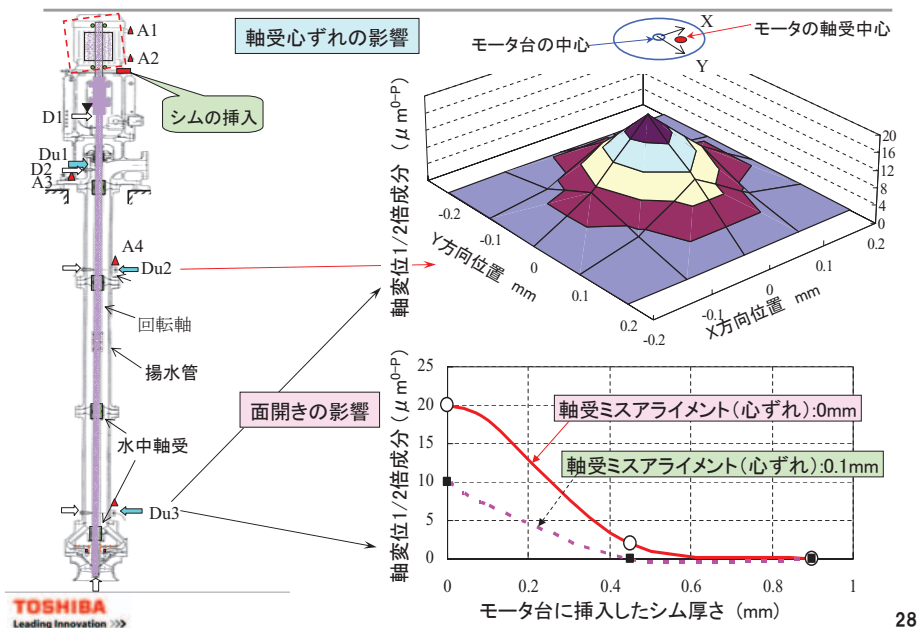
軸受とライナーリング摩擦によるフルイドホワールの発生



フルイドホワールの軸受心ずれの影響

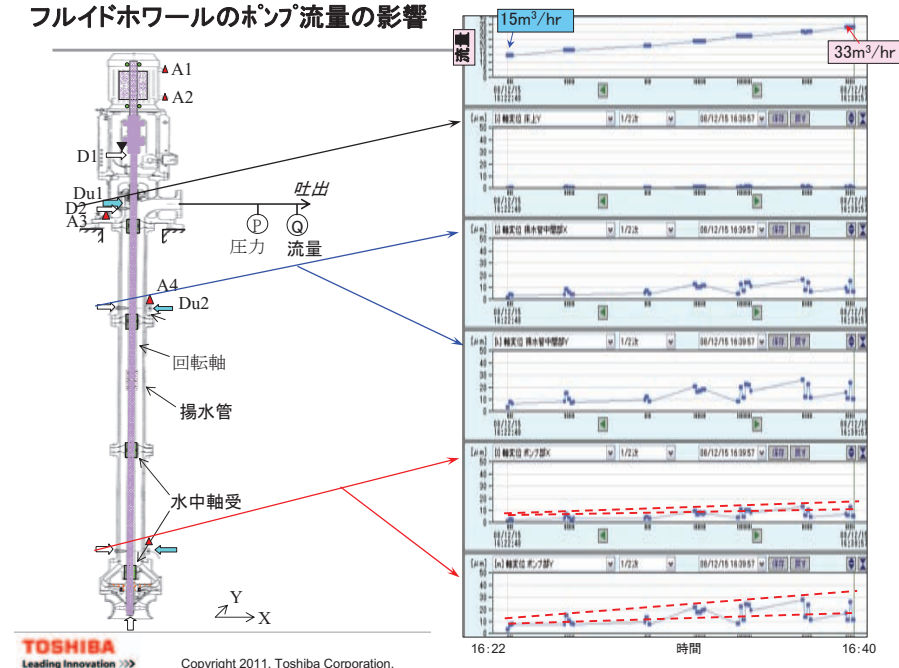


フルイドホワールの軸受心ずれと面開きの影響



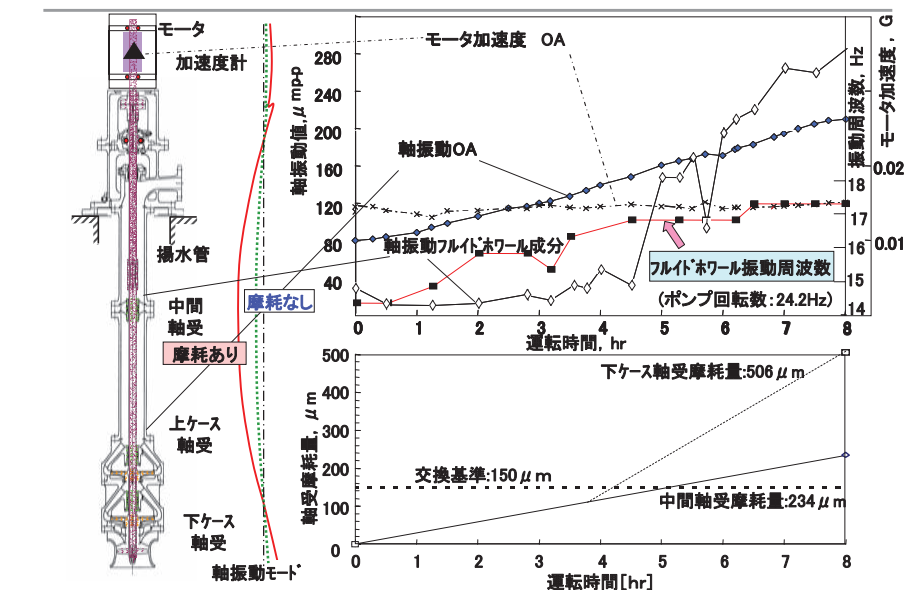
28

フルイドホワールのポンプ流量の影響



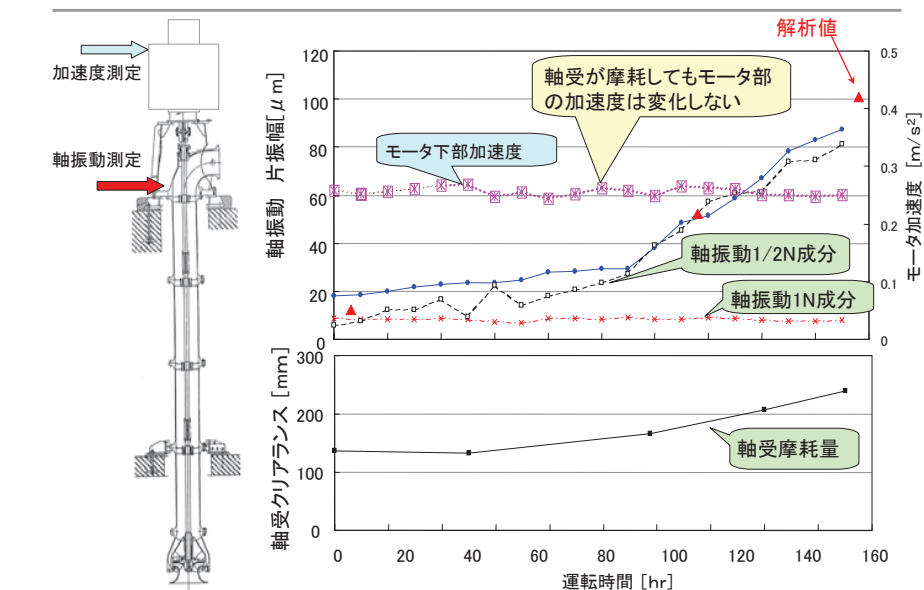
29

すべり軸受のフルイドホワール振動による摩擦速度／振動周波数の増加



30

軸受摩耗加速試験の例



31

5. 摩耗による劣化現象に対する診断・対策のまとめ

(1) 引っかけ摩耗(アブレイシブ摩耗)の診断と対策 (すべり軸受を対象)

- ① 軸受の摩耗速度は、静荷重の影響が大きいので、アライメントを適切に管理
- ② 軸受の摩耗速度は、潤滑材異物濃度/温度/回転数/表面粗さに大きく影響するので、プロセスデータを同時に採取して摩耗特性を把握
- ③ 縦型回転機の場合、アライメントによりフルイドロホワール振動が発生するので、軸振動監視が必要
- ④ 起動停止回数が多い回転機は、摩耗量がその回数の影響を受けるので、その回数の監視が必要

(2) 微動摩耗(フレッチング摩耗)による再組立てごとの状態変化防止対策

- ① 接合部での締結時の力の流れと負荷時の力の流れを同じにする
- ② 締結部の接合面圧を適切な値で均一にするようシム、締結方法を工夫
- ③ 締結部に挿入するシムは、再設置の位置を同じにする
- ④ 接合面間の相対変位振動が発生しないよう締結方法、構造を工夫
- ⑤ はめあい部には、隙間腐食が発生しないよう潤滑/シールする
- ⑥ フレッチング摩耗が発生したら、酸化物を除きシムを挿入する
(回転体の場合は、バランスの再調整を必ず実施)

劣化傾向を把握するためには、アライメントをばらつき無く調整することが重要
・レーザを用いたアライメント計測装置の使用など

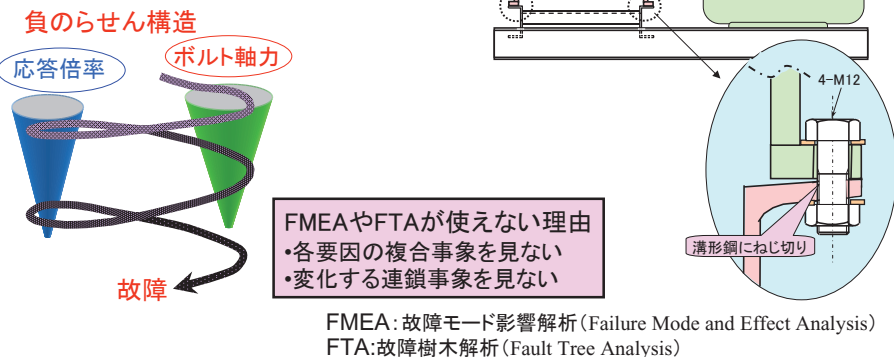
6. 機器別の摩耗箇所の点検方法と診断方法

- ① 締結部/はめあい部・・・フレッチング---凹凸酸化面・・・固有振動数の変化
・はめあい部に粉が出ている
・当たり面の周辺の境界線がはつきりしている
・くぼみがある
- ② 摺動部
 - a. 滑り軸受・・・アブレイシブ摩耗---引っかけ傷・・・油/グリースの摩耗粉分析/色による酸化分析、温度計測
 - b. 転がり軸受・・・フレッキング---うろこ状のへこみ・・・傷から発生する特徴周波数振動の検知/とがり度監視
 - c. 歯車/カム・・・ピッチング---点状のへこみ・・・かみ合い周波数振動の監視
 - d. シール部・・・アブレイシブ摩耗---引っかけ傷・・・AE カウント
- ③ 配管
 - a. 支持部・・・フレッチング---凹凸酸化面・・・固有振動数の変化
 - b. 曲がり部等の流量過大部・・・パーティクルエロージョン---砂地状の表面・・・ガイド波による検査
・X線CT
 - c. ソケット継ぎ手等の隙間部・・・隙間腐食---凹凸酸化面・・・リーク検知
- ④ 羽根車・・・パーティクルエロージョン---引っかけ状の凹凸・・・翼通過周波数成分振動の消滅
・ポンプ効率診断
- ⑤ 弁
 - a. 弁シート部・・・打撃摩耗---打痕観察・・・リーク検査/操作時間遅れ
 - b. 弁体ガイド部・・・フレッチング---凹凸酸化面/くぼみ・・・微開閉動作時間の測定

機械状態監視診断技術者(トライボロジー)資格の習得をお奨めします

II. 要因分析による対策

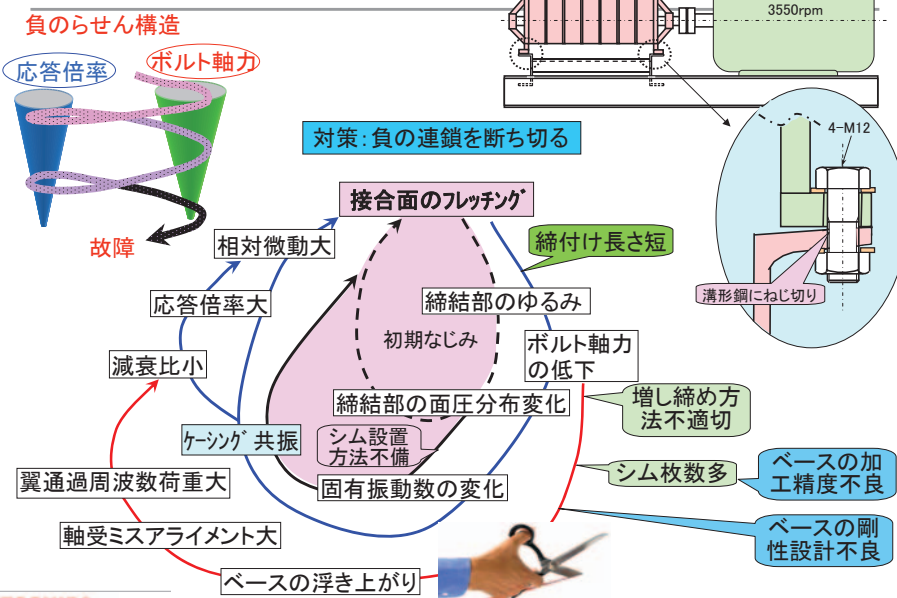
1. 劣化による不具合現象の分析



- 不具合事象の要因をすべて挙げる
- 各要因のつながりを調査
- 連鎖要因を調査

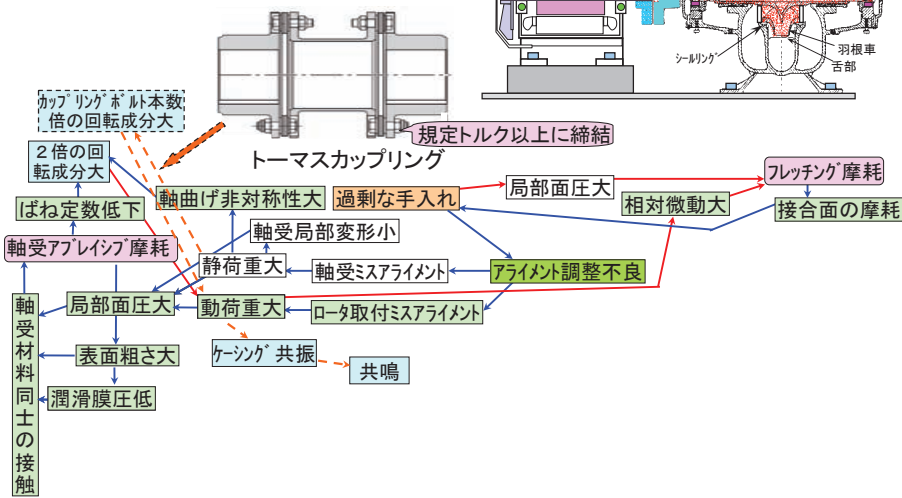
- 多方向からの分析
- ・静止系からの分析
 - ・回転系からの分析
 - ・被駆動系からの分析(水、蒸気など)
 - ・エネルギーバランス
 - ・熱バランス

2. 事例を用いた要因分析による対策例



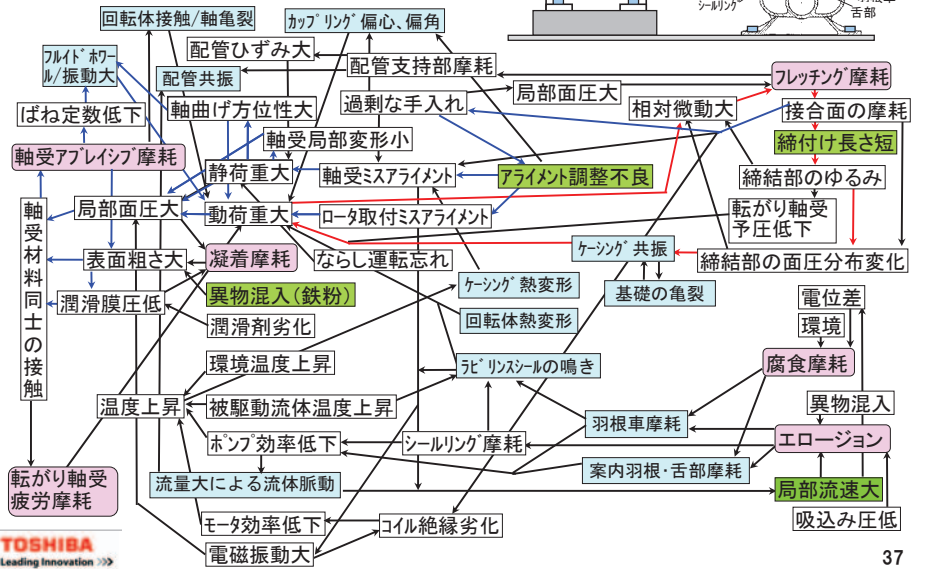
滑り軸受のポンプモータの事例

対策：負の連鎖を断ち切る



3. 摩耗劣化の要因分析 (負の連鎖ループ)

要因分析フローは、機械の駆動されるものの上になって考える



東芝の状態監視技術開発の状況

◆ 運転中監視技術開発

- ・超音波による非分解運転監視技術
縦型ポンプ: 実機適用中、さらなる拡大を図る。
電動弁(弁棒)、熱交換器(伝熱管): 実機適用評価を実施する。

◆ 低コストで導入可能な監視システム開発

- ・無線センサの実機化を推進する。

◆ 寿命・劣化予測技術開発

- ・弁/熱交換器/配管(減肉)に対応した劣化予測システム拡張を進める。
- ・点検によって得られる劣化データ蓄積による部品交換時期の予測をする。
- ・解析による寿命予測手法を確立する。

解析による機器個体差を考慮した劣化予測

- ・4つの個体差因子入力による個性評価
- ・計測したポンプ軸振動から軸受摩耗量を推定
- ・軸受摩耗速度を解析して、軸受交換時期を提示

軸受劣化予測(縦型ポンプ)

