

事前メール受付による振動相談

振動コミュニティ主査
日本精工(株)
渡部幸夫

振動コミュニティ幹事
電源開発(株)
沼尻光一郎

A.1,2

回転機器において、ロータではなく、構造側の共振が問題ということだと、基礎、架台、ブラケット等支持構造の剛性、組み込んだ状態での各接合部位の剛性、および各部質量により固有振動数が決まることから、組み込んだ状態で、各部位の振幅・位相を確認して対策を取るのが一般的と考えます。



[背景]

以下の話は、ねじりではなく、構造側の曲げ振動の話です。立軸の回転機械の振動問題を取り扱っています。上から順に、モータ、減速機(立軸遊星)、弊社の機械という組み合わせで据え付くことが多いのですが、共振問題が起こることもあります。共振回避のために補強をすることで、モータ、減速機、弊社の機械のどこを補強すれば効果的なのか、なかなか判断しづらいことが多いです。

Q1.

どこを補強すればよいのかという判断は、各部の振動値を測定して判断するしかないのでしょうか？

例: 振幅値をグラフにして、どこから大きく変形しているのか判断し、そこを補強する。

Q2.

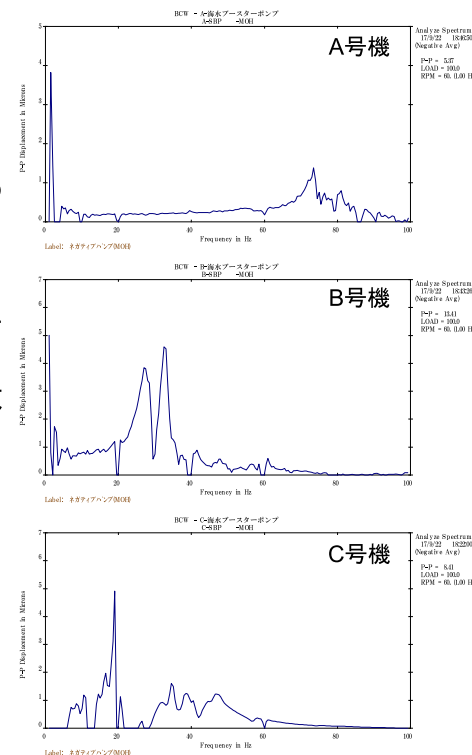
モータも減速機も他社からの調達品であるため、それ自体の固有振動数が事前に予測しづらいです。

そのため、組んだ状態での固有振動数の予測も難しく、結果として実機で共振問題が起こってしまうこともあります。

他社からの調達品であるモータや減速機について、それ自体の固有振動数をうまく予測する手法はありますか？実測データを積み重ねて、実績ベースで予測するしかないのでしょうか？

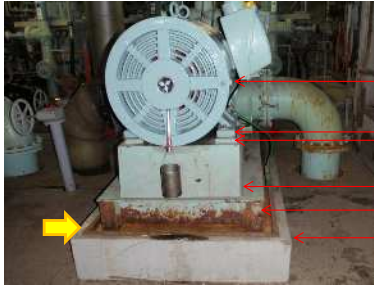
事例紹介

- 横置きポンプ(設置から約50年)で、同型の機器が3台あるうち、C号機のみ水平方向において、回転周波数の振動が高いことが確認された。最大でモータ負荷側軸受118[$\mu\text{m p-p}$]
- 打撃試験により固有振動数を確認すると、A>B>Cの順で低下しており、
- C号機の固有振動数が、回転周波数(約19.8[Hz])付近にあることが確認された。

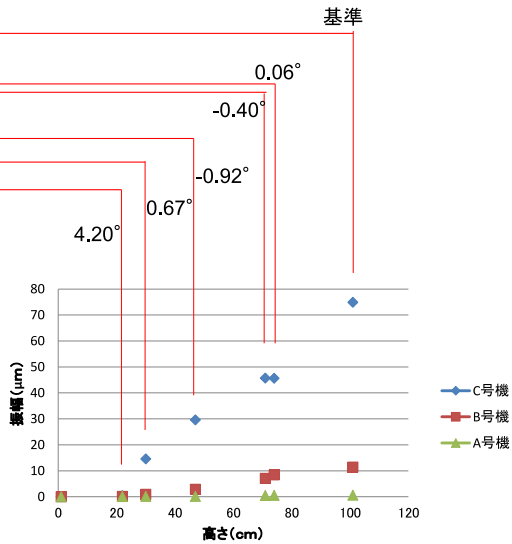


事例紹介

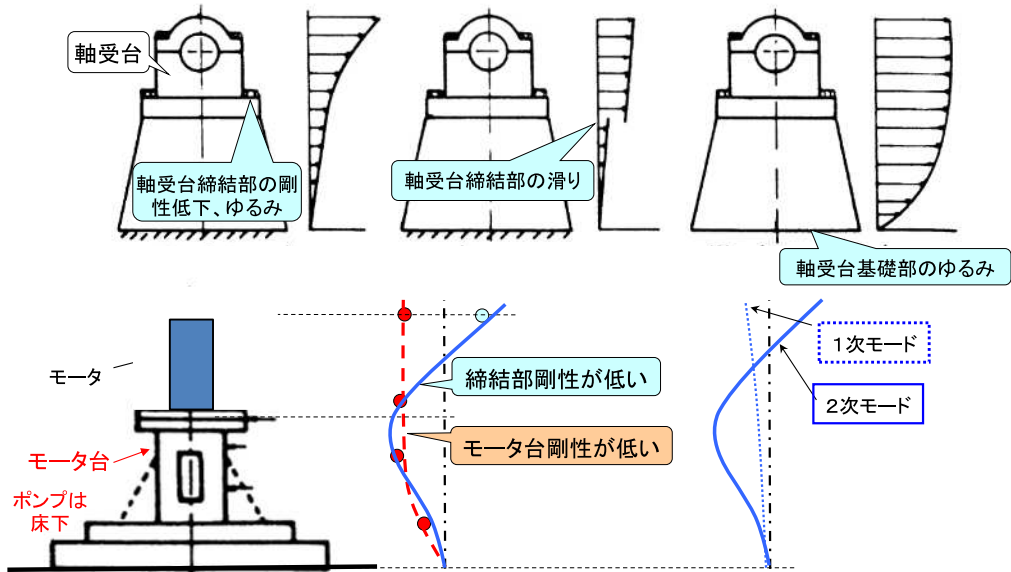
□ 運転中の各部の振幅と位相を確認



基礎との接合部の剛性が低い。
↓
基礎の劣化を確認。



振動モードの計測により不具合箇所の見つけることができる。

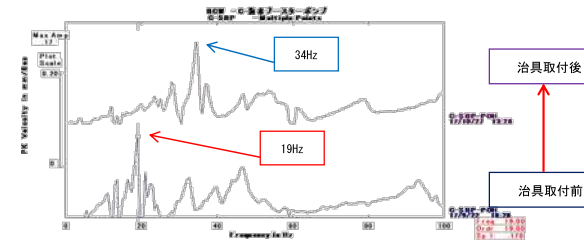


最近発生した事例:

モータを高圧電源仕様に変更したが、モータ台を変更しなかった。
小型になったため、モータを搭載する円盤の曲げ変形が大きく固有振動数が低下した。

事例紹介

□ 応急対応



□ 振動は26[μm p-p]に低減した。

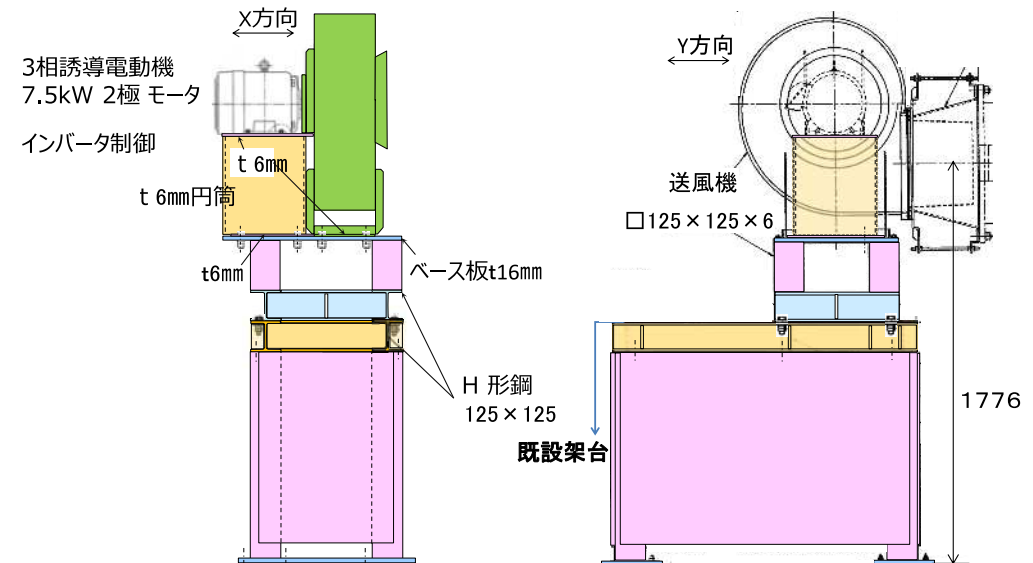
□ 半年後の定期点検時に基礎の補修を実施。

打撃振動試験による2ch周波数分析器の分析方法とその事例

送風機の容量UP

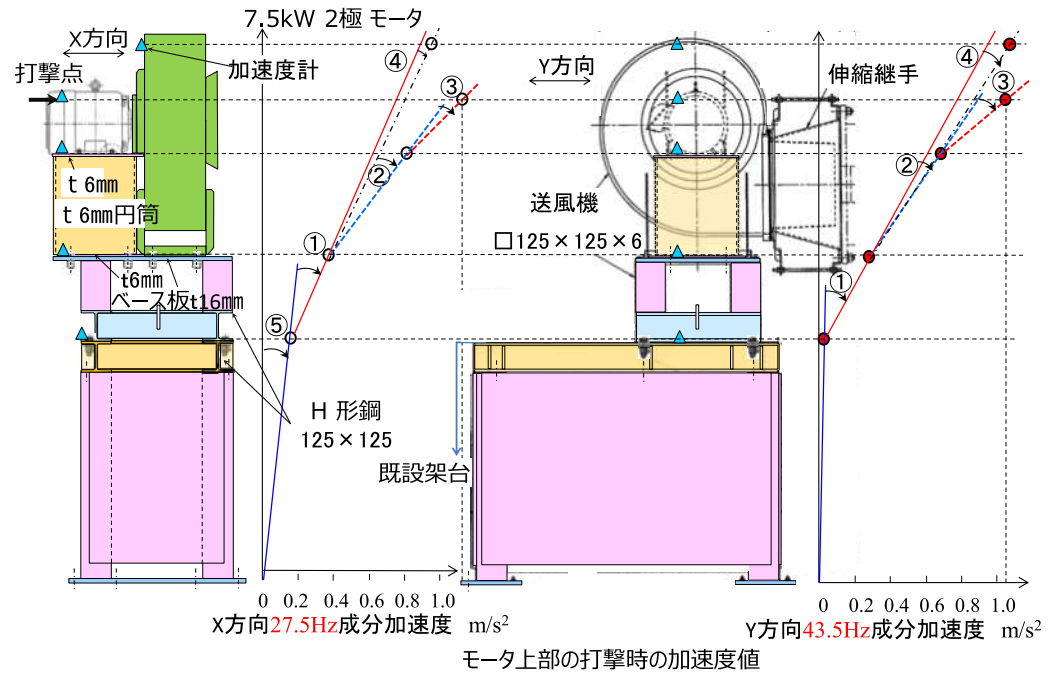
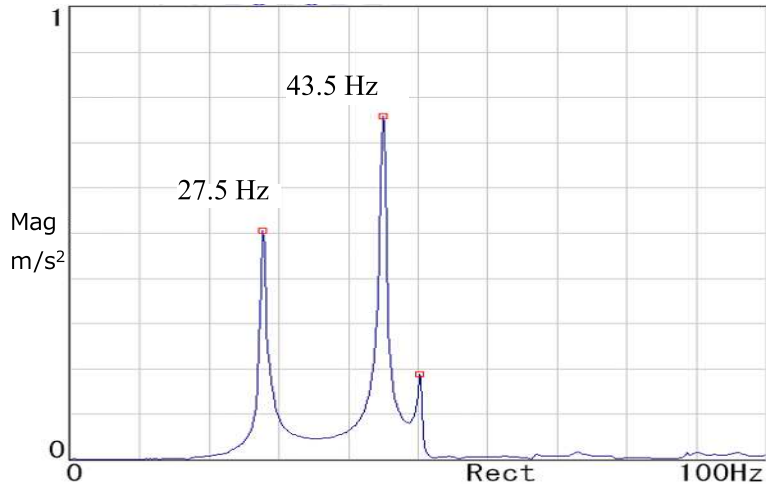
・既設架台を利用した最小限の改造

・50Hzの運転範囲内で許容値をオーバ



モータ上部X方向打撃によるX方向振動の周波数分析

剛性の弱い個所の特定が可能 ⇒ X方向①と②の対策が重要、Y方向③が重要



Q3. 仮に単体の固有振動数を実測するとして、特に遊星減速機について、測定の際に留意しておくべき事項はありますか？
例：実験モード分析で、きちんとモード形状を把握した方が良い、など。

A3(補足) 質問の意図からは少し外れますが、減速機についての注意事項ということだと、共振の加振力として、ギアの噛み合い周波数にも注意が必要です。

遊星歯車の噛み合い周波数は、
(入力軸周波数 - 出力軸周波数) × サンギア歯数

遊星歯車減速機が発する振動 (内歯車固定)

かみ合い周波数 $f_z = \frac{T_s \cdot T_r}{T_s + T_r} f_s = (f_s - f_r) T_s$

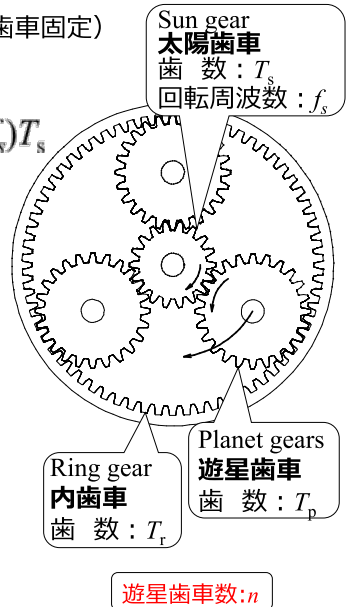
遊星歯車の自転周波数 $f_p = \frac{T_s \cdot (T_r - T_p)}{T_p \cdot (T_s + T_r)} f_s$

遊星歯車の公転周波数 $f_c = \frac{T_s}{T_s + T_r} f_s$

太陽歯車異常 $f_{ds} = \frac{T_r}{T_s + T_r} f_s \times n$

遊星歯車異常 $f_{dp} = \frac{T_s \cdot T_r}{T_p \cdot (T_s + T_r)} f_s \times 2$

内歯車異常 $f_{dr} = \frac{T_s}{T_s + T_r} f_s \times n$



赤字：公式集の修正部分

A3(補足)

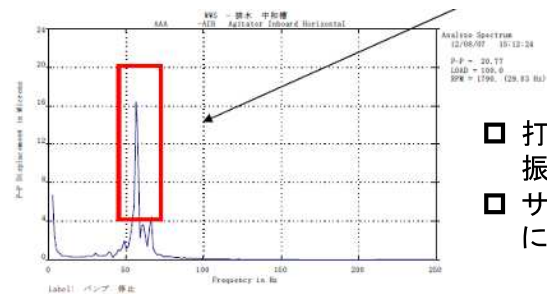
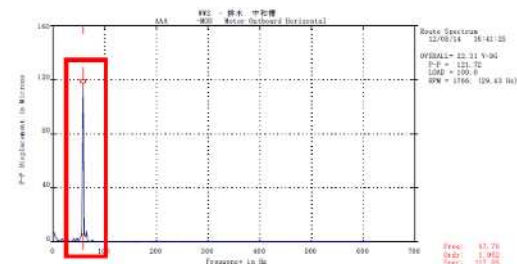
縦軸回転機器だとサイクロ減速機を使用するケースも多いかと思います。

サイクロ減速機の場合、入力軸回転数の2倍にギアの噛み合い周波数(外ピンと曲面板の噛み合い周波数)が存在しますのでこの周波数との共振についても注意が必要です。



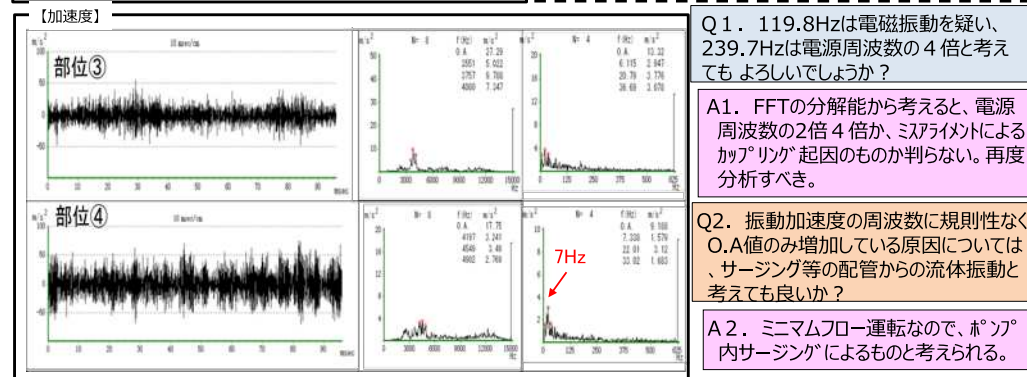
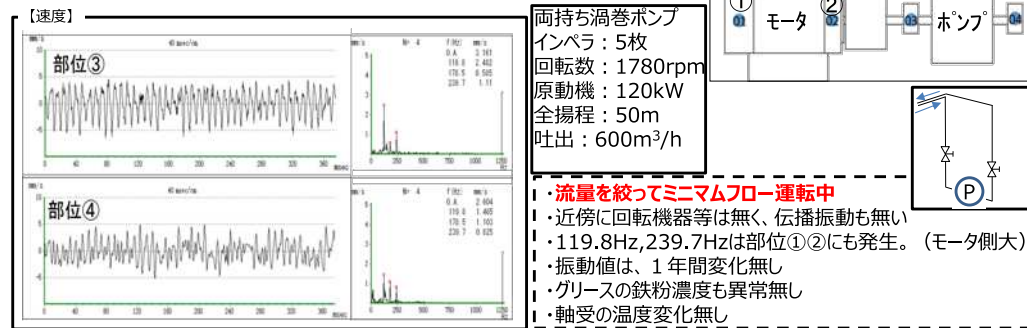
事例紹介

- 排水貯槽の攪拌機で架台補修後に高い振動が確認された。回転数(29.4[Hz])の2倍の周波数で120[$\mu\text{m p-p}$]



- 打撃試験の結果、約57[Hz]の固有振動数を確認。
- サイクロ減速機の噛み合い周波数による共振と判断。

振動相談 ② ポンプで発生する振動について



Q3. 軸受の傾向監視を実施するには必ず定格運転中の測定が必要でしょうか？
エンジン振動が比較的少ない暖気運転時の測定では問題がありますか？

A3. エンジン振動が比較的少ない暖気運転時の測定で問題ない。
ただし、運転時の負荷により静荷重が大きく、その場合のみ転動体が傷に衝突する条件では、だめ。

Q4. JIS B 0906 : 1998を参考にして判定値を検討する場合「特別な基礎を持たないエンジン駆動の小型ポンプ」は、どのクラスで考えればよいでしょうか？

JIS B 0906 : 1998 より抜粋

クラス I : 通常の運転条件の下で、全体の完成機の一部の構成要素として組み込まれたエンジン及び機械
[代表例 出力 15kW 以下のはん(汎)用電動機]

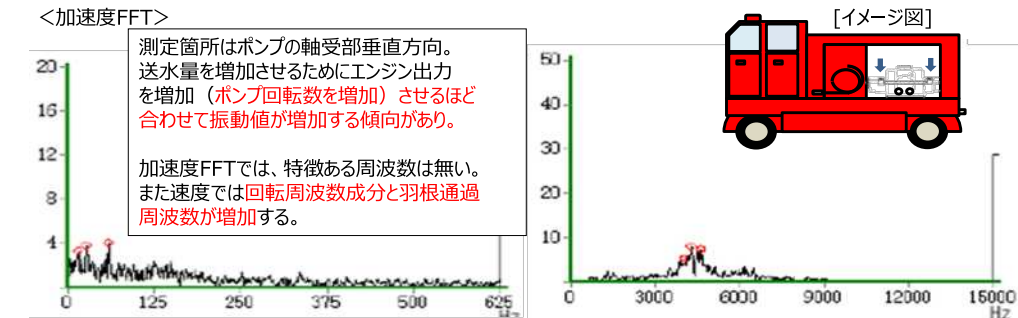
クラス II : 特別な基礎をもたない中形機械(代表例 出力 15kW~75kW の電動機)及び特別な基礎上に堅固に据え付けられたエンジン又は機械(300kW 以下)

クラス III : 大形原動機及び大形回転機で、剛基礎又は振動の測定方向に比較的高い剛性をもつ重い基礎上に据え付けられたもの。

クラス IV : 大形原動機及び大形回転機で、振動の測定方向に比較的柔らかい剛性をもつ基礎上に据え付けられたもの(代表例 出力 10MW 以上のターボ発電機セット及びガスタービン)

A4. クラスIVに相当するが、ISOではこのクラス分けが無くなった。

振動相談 ③ 車上のポンプで発生する振動について



Q1. エンジンの出力を上げた際の加速度増加は、エンジンの特性上一般的に発生することでしょうか？

A1. 送水量を増加させるためには、1枚あたりは、2乗で増加させる必要があるため、送水量の小さい場合の振動が低い場合は、振動も2乗で増加する

Q2. 当該ポンプは、エンジンからの伝播振動がある状況ですが、振動診断で軸受をCBM管理したいと考えております。加速度FFTに着目して、軸受傷の特徴周波数の有無を確認する管理方法で問題は無いでしょうか？

A2. 問題ない

ISO-10816-1 2009年改定 第9回ミーティング資料に記載

振動速度のrms値 mm/s	クラスI	クラスII	クラスIII	クラスIV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71	B	B	B	B
1.12				
1.80	C	C	C	C
2.8				
4.5	D	D	D	D
7.1				
11.2	D	D	D	D
18				
28	D	D	D	D
45				

Table B.1 — Range of typical values for the zone A/B, B/C and C/D boundaries

Range of typical zone boundary values r.m.s. vibration velocity mm/s	
0.28	0.28
0.45	0.45
0.71	0.71
1.12	1.12
1.8	1.8
2.8	2.8
4.5	4.5
7.1	7.1
9.3	9.3
11.2	11.2
14.7	14.7
18	18
28	28
45	45

Zone boundary A/B: 0.71 to 4.5

Zone boundary B/C: 1.8 to 9.3

Zone boundary C/D: 4.5 to 14.7

NOTE 1 This table only applies to machines for which specific parts of ISO 10816 have not been developed and for which there is no past satisfactory experience available.

NOTE 2 Acceptance criteria should be subject to agreement between the supplier and the purchaser of the machine.

NOTE 3 The values selected should take into account the measurement position and the support flexibility/resilience.

NOTE 4 Small machines (e.g. electric motors with power up to 15 kW) tend to lie at the lower end of the range and larger machines (e.g. prime movers with flexible supports in the direction of measurement) tend to lie at the upper end of the range.

注1: この表はISO-10816のパート(part)がまだ設定されていない機械や過去に正常に運転された経験が入手できない機械に適用する。

注2: 評価基準は機械の供給者と使用者の合意によって決める。

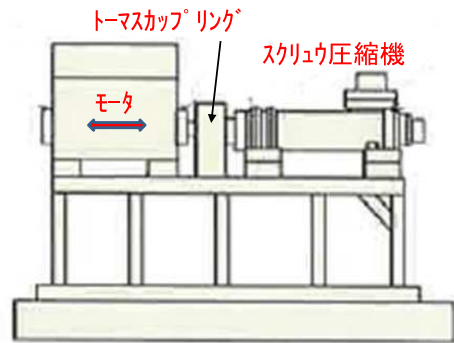
注3: 境界値は測定位置や機械の支持剛性などを考慮して決める。

注4: 小さな機械(例えば15kW以下の汎用電動機)はレンジの下方に、大きな機械(例えば大型原動機や大型回転機で、振動の測定方向に柔支持された機械)はレンジの上方に設定される。

振動相談 ④ スクリュー圧縮機用モータで発生する振動

＜対象モータ仕様＞

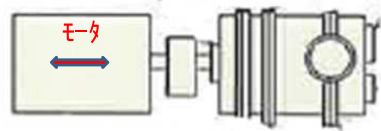
- ・電圧／電流：3300V／248A
- ・極数：2P
- ・出力：1250kW
- ・回転数：3584rpm～3586rpm（実測値）
- ・回転周波数（fo）：59.73Hz～59.76Hz
（上記回転数より算出）
- ・電源周波数（F）：60Hz
- ・軸受種類：メタル軸受（強制潤滑）



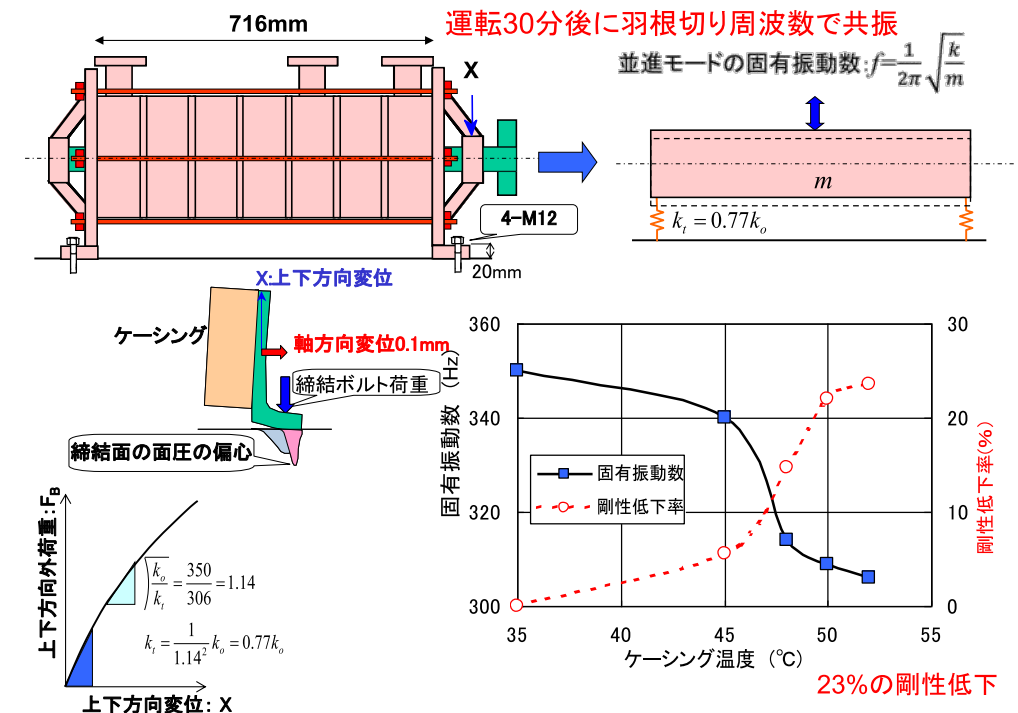
夜間の負荷下げ時に、モータの軸方向の変位値・速度値が上昇（周期的な変動あり）するといったもので、直近では、11mm/s以上まで上昇するケースもある。

～異常振動のポイント～

- ①基本的に負荷下げ時に発生しているが、日中（通常負荷時）に発生するケースも確認されている。
- ②瞬間的（10分ほどかけて）に上昇し、元の振動値に戻る場合や、約3分周期で変動するケースもある。
- ③振動の発生周期は不規則（振動が発生しない日もある）で、雨天時や外気温の低い時期に頻発する傾向にある。
- ④振動は軸方向のみ顕著であり、水平方向・垂直方向は低い。（1.7～3mm/s）
- ⑤圧縮機側の振動値はモータの振動に伴い変動はするものの、顕著ではない。（2～3mm/s）



コンプレッサケーシング温度変化による固有振動数変化の例



＜異常振動に対する対応履歴＞

- ①モータ点検
 - 軸受やコイル等に異常なし。工場での試運転では、振動の発生無し。
- ②振動解析（モータ廻りに近接するオイルポンプなども併せて調査した）
 - ・振動の発生周波数については、電源周波数（60Hz）とその2倍成分（120Hz）となっており、分解能を上げると、120Hzに近接、回転周波数成分の2倍成分と思われる119.4Hzが確認されている。
 - ・日中と夜間の周波数を比較すると、夜間帯は、119.4Hzが上昇し、119.8Hzになっている。120Hzとさらに近接する事で、振動値が上昇していると推定。（但し、回転数に逆算すると、ほぼ同期速度（3600rpm）となる。あり得るのか？）
 - ・モータ廻りに近接しているオイルポンプなどの調査結果、当該モータで発生している周波数に影響を及ぼすようなものは確認されなかった。
- ③プロセス条件の確認（日中と夜間帯）
 - ・当該機器におけるプロセス条件は、吐出圧が変化することのみ。（日中：約2MPa、夜間：約0.7MPa）
- ④モータ軸受排油温度調査
 - ・振動との相関無し

A1. 負荷が減少するとモータのすべり率が減少するので回転数が上昇し、回転数の2倍成分の周波数が高くなる。モータの軸方向固有振動数が120Hzだと共振して応答値が大きくなり、共振応答のため変動も大きい。

- ⑤モータ脚部の歪測定
 - ・歪あり

上記の調査結果より、モータ脚部の歪に伴う電磁振動であると推定した。日中と夜間で周波数変化する原因については不明であったが、歪を解消すれば、大きく改善すると考え、モータ脚部の水平加工を実施した。しかしながら、モータ脚部の歪加工実施後も、大きな改善は見られず。
- 追加調査
- ①モータフレームの温度・歪測定
 - 日中と夜間のフレーム温度と歪の変化を調査した結果、振動発生時に、フレーム温度が低下し、歪が大きくなっている事が確認された。（特にモータ側面の鉛直方向の歪が変化している）本来、温度が上昇すると歪が大きくなるが、当該モータではなぜか逆の現象となっている。

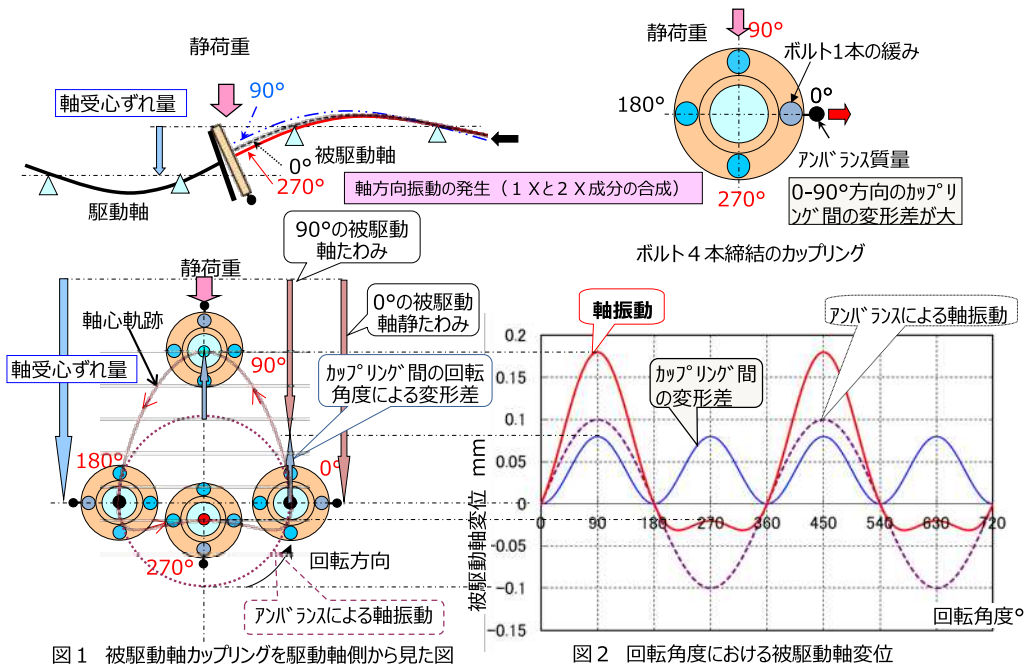
（日中：約2MPa、夜間：約0.7MPa）

A2. 負荷が減少するとモータの冷却によりモータ軸心が圧縮機の軸心より先に下降する。この心ずれによりロータのバランスや軸曲がりを伴って回転周波数の2倍成分が上昇、軸方向振動も発生。

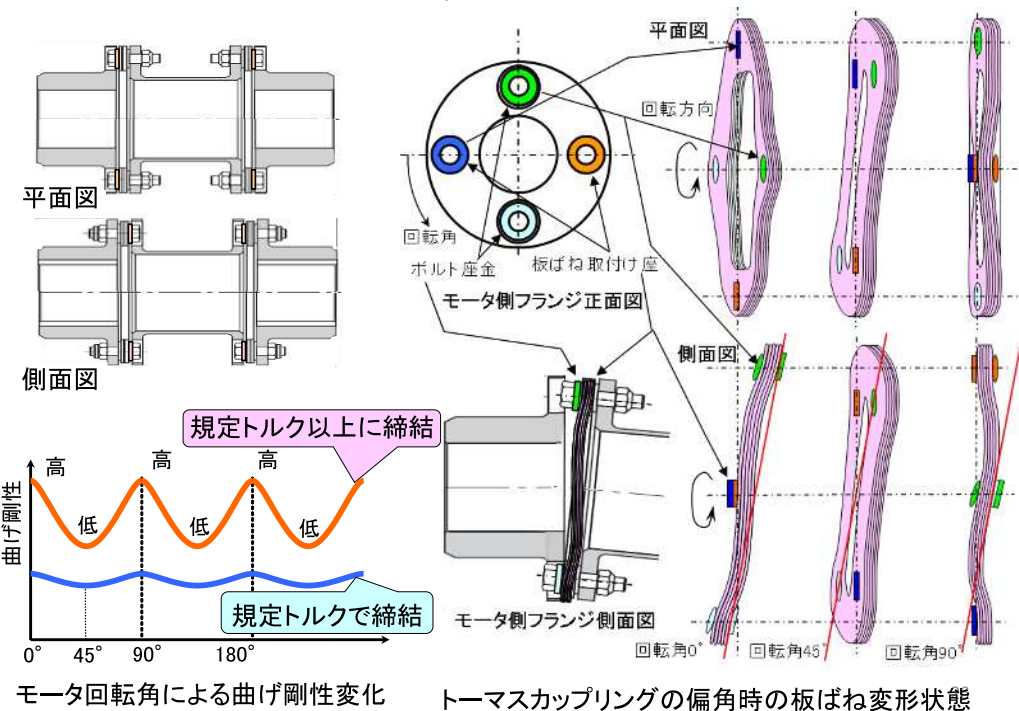
トーマスカップリングが正常に機能していれば、心ずれは吸収できるが、プレートの締結トルク管理をせず過大トルクで締結する、あるいはトルクが一箇所ムラがあると回転周波数の2倍成分が大きくなる。（通常、このカップリングの寿命は、板バネが滑らかに滑る必要性から5年程度である）

圧縮側のすべり軸受が偏摩耗すると、2極モータなので、アーキギャップの2乗で静的吸引力と電磁振動が増加する。

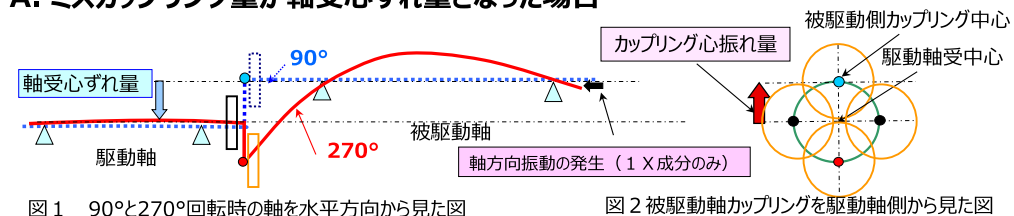
剛性に異方向があるカップリングに軸受心ずれが発生した場合



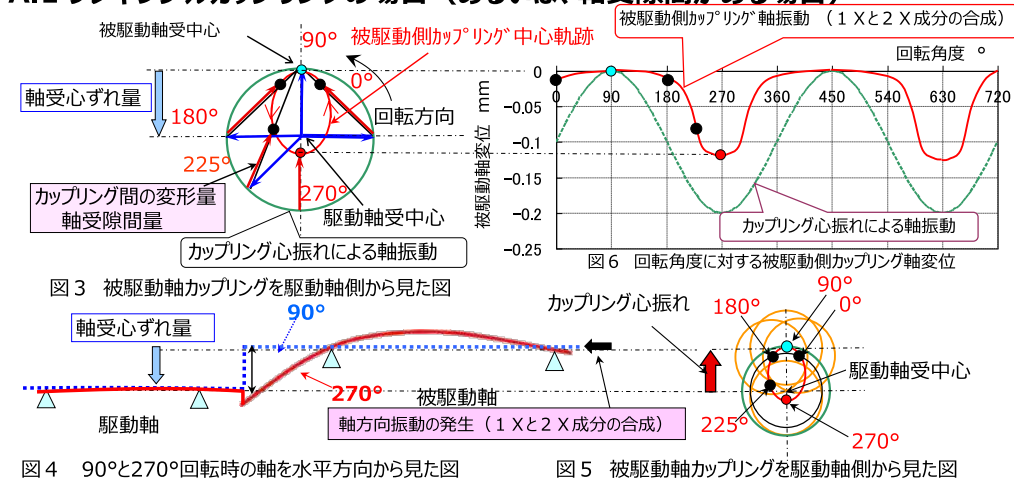
トーマスカップリングの曲げ剛性変化



A. ミスカップリング量が軸受心ずれ量となった場合

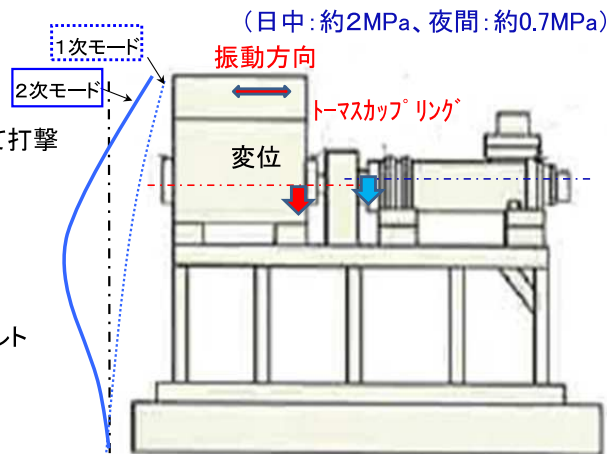


A.1 フレキシブルカップリングの場合（あるいは、軸受隙間がある場合）



原因究明方法

- ① 振動発生時に振動モード計測
 - ・10kgのハンマーでゴム板10mmを介して打撃
- ② 回転軸中心位置の熱膨張変位差
 - 水平、鉛直方向計測
- ③ 振動低時に振動モード計測
- ④ 10kgのおもり3個程度を吊り耳ボルトで固定して、振動低減を確認



対策

- ① 加振力低減
 - ・トーマスカップリング板バネ交換
 - ・規定トルクで締結（トルク指示書の記載ミスか？ ポンドをkgとすると4倍大きい）
- ② 電磁加振力低減
 - ・軸受摩擦耗量を計測し軸受中心位置変更、あるいは軸受交換
- ③ 動吸振器を設置
 - ・吊り耳ボルト穴を利用して、ボルトの先端におもりをつけて固有振動数調整

第12回 メンテナンス分野合同研究会 開催案内

日時: 令和元年(2019年)10月24日(木)、25日(金) 締切り 10月10日

会場: 石川県地場産業振興センター 新館2階 第10研修室
石川県金沢市鞍月2丁目【アクセス】北鉄バス: JR金沢駅金沢港口(西口)から約20分

見学先: 下記の2機関のどちらかをご見学いただけます。

- (1)高松機械工業株式会社様(石川県白山市旭丘1-8)
※同業他社の方はお断りする可能性がございます ※会場からチャーターバスで移動
- (2)石川県工業試験場様(石川県金沢市鞍月2-1)
 - ・「レーザー肉盛技術」(同所が中心に開発したマルチビーム式のレーザー肉盛装置の紹介)
 - 施設見学:
 - ・「3Dモノづくりラボ」(3Dプリンタを核としたデジタルものづくり装置)
 - ・「AI・IoT技術支援工房」(中小企業向けに位置検知や装置の異常検知などをデモ)
 - ・その他装置(X線CT装置、振動試験機など)

第18回 評価・診断に関するシンポジウム 開催案内

日時: 令和元年(2019年)11月28日(木)、29日(金)

会場: 大阪市立大学 講演発表募集中

合同研究会講演内容は、コミュニティHPに記載致します

【スケジュール】

10月24日(木) 13:00-13:10 受付

13:20-14:20

「化学・石油精製プラントの保安事故防止の考え方」九州大学名誉教授 松山久義氏

14:20-14:50

「自励駆動型超音波と非線形波動変調に基づく接触型損傷検出技術」滋賀県立大 田中昂氏

15:00-15:30

「エロージョン摩耗によるMSE法と微粒子エロージョン法による硬質薄膜材料表面の強さ評価」
富山県立大学 宮島敏郎氏

15:30-16:00

「Auto Encoderを用いた旋盤主軸の振動異常検知」石川県工業試験場 笠原竹博氏

16:00-17:00

「工作機械の自動化に対応するメンテナンス管理への取り組み」

高松機械工業株式会社 金子義幸氏

17:30-19:30 技術懇談会

10月25日(金)

9:10-10:10

「ものづくりにおけるIoTの活用 ~「e-F@ctory」の進化と深化~」三菱電機㈱ 加納健司氏

10:10-10:40

「様々な振動現象と実験モード解析」株式会社システムプラス 吉井邦章氏

10:50-11:20

「AE信号処理を用いた構造物の亀裂進展の評価診断」佐賀大学 カン タウドゥル イスラム氏

11:20-11:50

「動機器メンテナンスにおけるRBM適用」三井化学株式会社 三笥哲郎氏

13:00-15:00

見学会