

六ヶ所再処理工場における回転機器の設備診断 —振動解析による設備診断—

Condition monitoring and diagnostics for rotation equipments in the Rokkasho reprocessing plant.
Equipment diagnosis by using the oscillating diagnosis.

(株) ジェイテック	佐々木 一人	Ichito SASAKI	(Non Member)
(株) ジェイテック	瀬川 佑太	Yuta SEGAWA	(Non Member)
(株) ジェイテック	吉村 定志	Sadayuki YOSHIMURA	(Non Member)
日本原燃(株)	沢田 悠	Haruka SAWADA	(Non Member)
日本原燃(株)	須藤 重輝	Shigeki SUTOH	(Non Member)

The equipment diagnosis of Rokkasho reprocessing plant, was started from 2004 completion of the chemical test. Target apparatus is rotation machine, such as a pump and a blower. The number is about 1700 sets.

The pursuer has the qualification of ISO18436-2 and ISO18436-4. Moreover, it is working based on JEAG4221-2007. On the business of our company, the rotation machine is diagnosed using oscillating diagnosis and lubricating oil diagnosis.

This report, the diagnosis method of a rotation machine and the Vibration analysis example.

Keywords ;Ballbearing, Rotating machine, Vibration

1. 緒言

六ヶ所再処理工場における設備診断業務については、建設工事の化学試験完了段階である 2004 年から施設内設置の回転機器(ポンプ、ブロワ等)を対象に実施している。

設備診断の対象としている機器は、2014 年時点で約 1700 台であり、これらの機器の傾向管理および振動診断を、ISO18436-2「振動による状態監視訓練と認証」および ISO18436-4「トライボロジーに基づく機械の診断」に基づく有資格者によって実施している。

業務の遂行にあたっては、前述の ISO18436 および JEAG4221-2007「原子力発電所の設備診断に関する技術指針—回転機械振動診断技術—」に基づく「振動診断」に則って回転機器の傾向管理・振動診断を実施している。

本稿は、設備診断業務の概要およびこれまでの業務において実施した振動解析事例について報告するものである。

連絡先：佐々木 一人
〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駸字沖付 4-91
株式会社ジェイテック 設備保修部 保全技術グループ 設備診断チーム
e-mail: ichito-sasaki@j-tech66.co.jp

2. 設備診断の概要

2.1 設備診断業務の進め方

設備診断業務の概要を図 1 に示す。

計画段階では、測定対象機器の選定および対象機器毎の判定基準値の設定を行う。

実行段階では、簡易測定による振動値(振動速度値・振動加速度値)の計測を実施し、異常判定の超過や著しいトレンド変化の有無を確認する。異常判定超過および著しいトレンド変化が確認された際は、精密測定(周波数データ採取)を実施し、振動解析による異常原因の診断を行う。診断の結果に応じ、グリスアップや分解点検等の処置推奨、測定周期の短縮による監視強化を行う。

評価段階では、軸受分解検証や点検記録の確認による診断結果の妥当性評価を必要に応じて行う。改善段階では、新たな知見について診断事例資料を作成し、診断ノウハウを蓄積する。

改善段階で作成された判定基準値の改訂案を判定基準値に設定し運用する。また、診断事例資料については、機器の管理箇所へ展開するとともに、現場調査および振動解析時のノウハウとして活用する。

2.2 診断結果の検証

診断結果の検証作業として、分解点検記録の確認や軸受分解検証等を実施し、振動診断結果の妥当性を評

価する。検証作業の対象は、下記に該当する機器としている。

①振動診断で著しい異常と診断し、分解点検を推奨した機器(TBM, CBM, BM 問わず)

②定期点検機器(TBM)の内、振動診断で振動値の上昇傾向等の異常兆候を確認した機器

軸受分解検証では、「軸受の分解」、「外観観察調査」、「封入グリース回収と鉄粉濃度測定」、「各 부품の寸法計測による規格値、公差との比較」等を実施する。

診断結果の検証は 2010 年度から開始している。

2014 年時点で、20 件(内、①13 件、②7 件)の作業を実施し、振動解析結果との整合性を確認した。

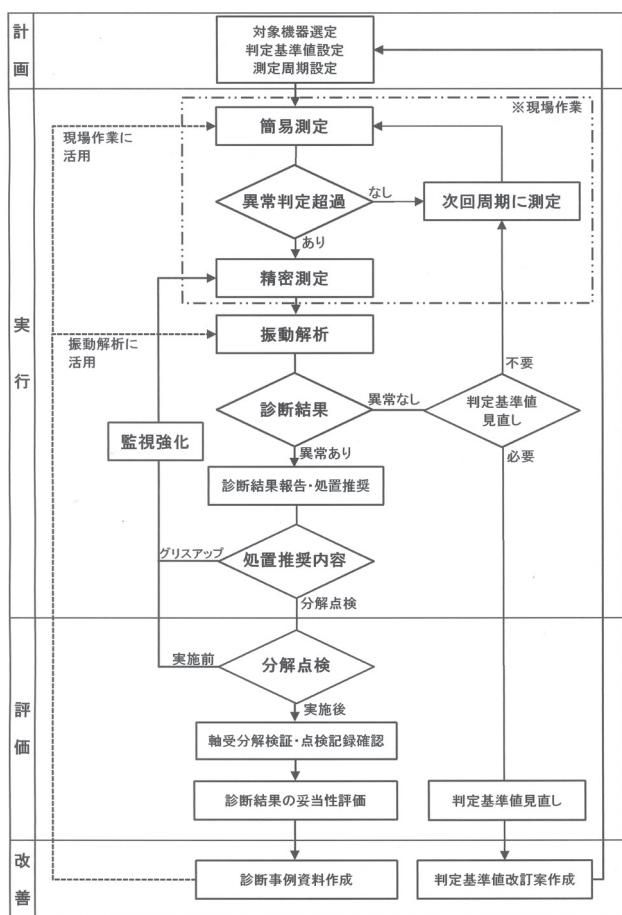


図1 設備診断業務フロー

3. 異常事象と振動解析事例

回転機器の振動診断において検知できる異常事象として、「潤滑不良」、「軸受キズ」、「基礎剛性に関する振動増加」等が挙げられる。本稿では、上記の異常事象と振動解析のポイント、異常事象の振動解析事例について紹介する。

3.1 潤滑不良

「潤滑不良」はグリースや潤滑油の給脂不足および消耗に伴う油膜形成の悪化により、軸受内部の摺動面でシビアな接触が発生する事象である。

潤滑不良発生時の周波数成分は図2の通り現れる。

- ・ 振動加速度スペクトル

高周波数帯域(約 1kHz 以上)が隆起する。

- ・ 振動加速度波形

実効値が増加してピーク値との差が少なくなる。周期性を伴う衝撃波や振幅が確認されない。

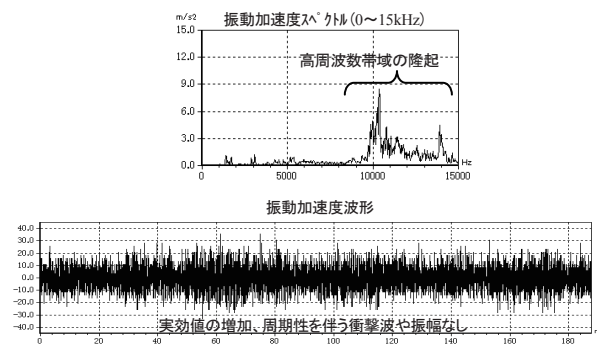


図2 潤滑不良発生時の振動データの特徴

事例. 1 グリース不足による断続的な異音

横型遠心ポンプのモータ部において、断続的な異音と振動加速度の急激な上昇(図3)を確認した。異音発生時には、不規則な触振動を確認した。

異音発生時の振動データを採取して周波数解析を実施した結果、図4の通り、異音発生時に振動加速度スペクトルから「高周波数帯域(1kHz~)の隆起」、振動速度スペクトルから「内輪キズ成分($f_i \pm f_r$: 286.2Hz)の卓越」、振動加速度波形から「周期性を伴わない振幅の増加」を確認した。また、当該モータは、過去の分解点検の実績が約5年前であり、以降、グリース封入式軸受を交換していなかった。

以上の確認結果から、「グリース封入軸受の経年使用に伴う潤滑不良」と診断した。潤滑不良の度合については、異音発生時の触振動や、軸受の使用が5年以上に及んでいることを考慮し、重度の潤滑不良に進展しているものと評価した。

内輪キズ成分の卓越については、潤滑不良の進展に伴い、転動体と内輪転走面の接触圧が増加して発生したものと推測した。

軸受分解検証の結果、外観観察調査において「封入グリースの枯渇と残渣の残留(図5)」、「内外輪転走面の接触痕の周回(図6,7)」、「転動体キズおよびテン

パーカラー(図8)を確認した。グリースの残渣が転動体と転走面の間に噛み込み、手回しによる回転ができない状態となっていた。

寸法計測の結果、全ての部品において著しい摩耗量は確認されなかった。ただし、外観観察調査において、各部品の接触圧増加を示す痕跡(接触痕、キズ、テンパーカラー)が確認されていることから、本事象を検知したタイミングは、摩耗の初期段階であったと考えられる。

封入グリースの枯渇が確認されたことで、周波数解析による「潤滑不良」の診断結果の妥当性を確認することができた。また、軸受の各部品に生じた痕跡から、潤滑不良の度合に関する評価の妥当性を得ることができた。

異音が断続的に発生した要因については、軸受分解検証の結果から、「部分的な油膜切れ」、「グリース残渣の噛み込みによる回転の阻害」が考えられる。

「部分的な油膜切れ」については、ペースト状のグリースが枯渇していたことから、図9のように部分的に油膜が切れて転動体と内外輪の転走面が直接接触した可能性が考えられる。

「グリース残渣の噛み込みによる回転の阻害」については、グリース残渣が噛み込み、軸受の手回しができない状態になっていたことから、図10のように転動体の回転が断続的に止められ、静止した状態で油膜の無い転走面上を摺動することで異音が発生した可能性が考えられる。

上記の推定原因については、同時に発生していることも考えられる。いずれにせよ、転動体のテンパーカラーと内外輪転走面の接触痕が確認されていることから、転動体と転走面が無潤滑状態で転走または摺動していたことは明確である。

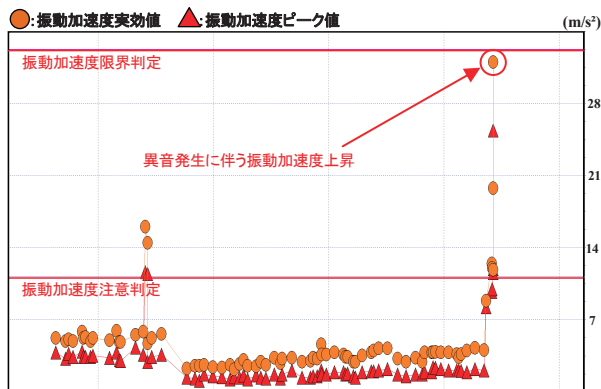


図3 事象発生機器の振動加速度トレンド

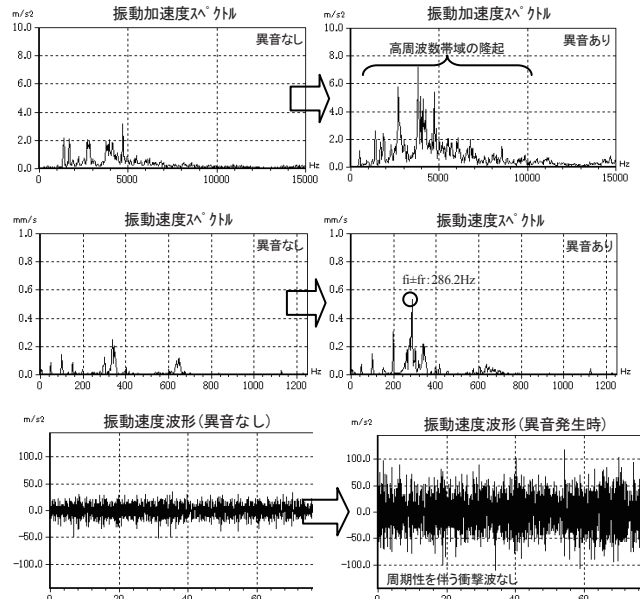


図4 異音発生時の振動データ



図5 封入グリース残留状態

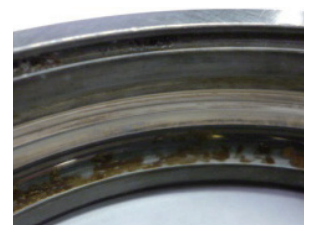


図6 外輪転走面の接触痕

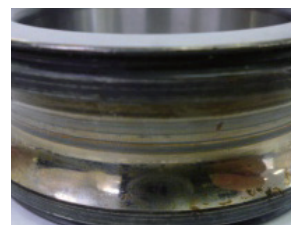


図7 内輪転走面の接触痕



図8 転動体テンパーカラー

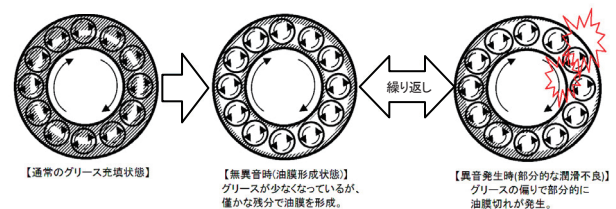


図9 部分的な油膜切れ

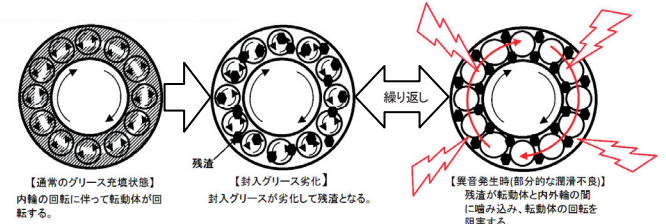


図10 グリース残渣の噛み込みによる回転の阻害

事例.2 転動体と保持器の接触による異音

横型遠心ポンプのモータ部において、異音を伴う振動加速度の増加を確認した。(図 11)

異音発生時の振動測定データについて周波数解析を実施した結果、図 12 の通り、振動加速度スペクトルから「3k~12kHz の高周波数帯域の隆起」、「保持器キズ成分(fc : 18.3Hz)および転動体キズ成分(fb : 97.8Hz, 6fb : 587.1Hz)の卓越」を確認した。

保持器と転動体の損傷を示す欠陥周波数が確認されたが、振動加速度波形からは周期性を伴う衝撃波や振幅は確認されなかった。よって、振動加速度増加の原因を「潤滑不良」と診断した。転動体および保持器のキズ成分の卓越および異音の発生については、潤滑不良に伴う転動体と保持器の接触によるものであり、損傷程度は軽微であると評価した。

軸受分解検証の結果、外観観察調査において「内輪および外輪の転走面における転動体接触痕の中心外れ(図 13)」、「転動体における不均等な保持器接触痕(図 14)」、「軸受内部の摺動部における封入グリースの著しい減少(図 15)」を確認した。

軸受部品の寸法計測においては、転動体において約 6~7 μm の摩耗を確認した。周波数解析で確認された転動体キズ成分の卓越は、転動体の摩耗を示す成分であったと判断できる。その他の部位の寸法は規格値および公差の範囲内であり、異常は確認されなかった。軸受の損傷程度はごく軽微であることが分かった。

封入グリースの残留状態から、グリース不足によって潤滑不良が発生した証拠を得られた。また、外観観察調査で確認された痕跡は、潤滑不良の影響による軸受部品同士の接触圧の増加やラジアル隙間の狭小状態を示すものと判断できる。

以上のことから、本事象の発生原因は「潤滑不良」と確定することができ、周波数解析による診断結果が妥当であると評価した。

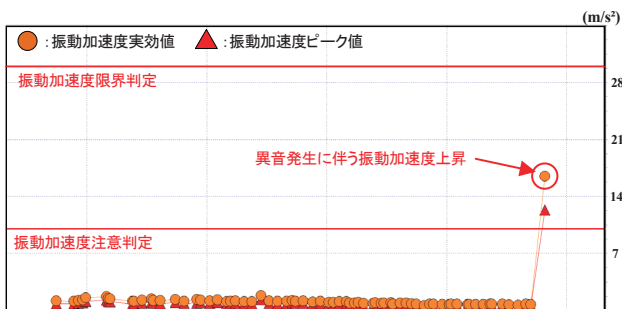


図 11 事象発生機器の振動加速度トレンド

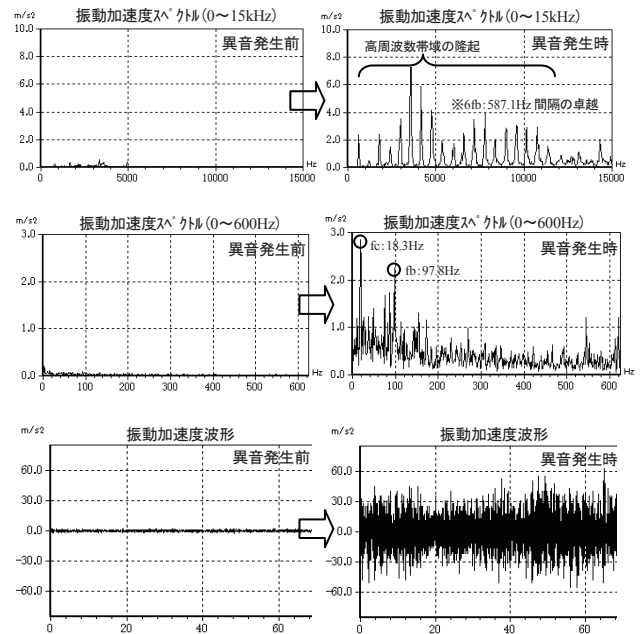


図 12 異音発生時の振動加速度データ

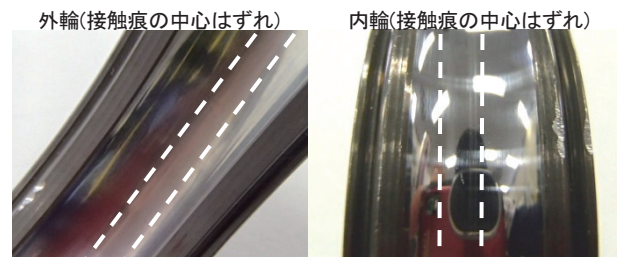


図 13 内輪および外輪の転走面

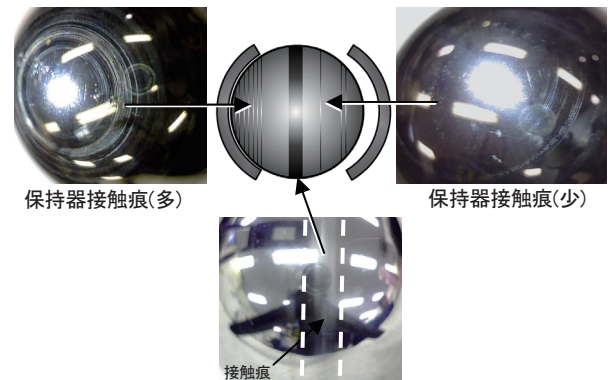


図 14 転動体の不均等な保持器接触痕

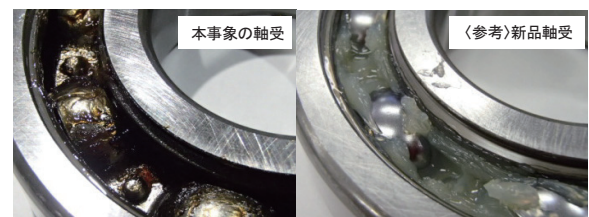


図 15 封入グリースの残留状態

3.2 軸受キズ

軸受の各部品(内輪、外輪、転動体、保持器)にキズ等の損傷が生じた場合、周波数成分は図 16 の通り現れる。

- ・ 振動加速度スペクトル
 - 高周波数帯域(約 1kHz 以上)が隆起する。
 - 損傷部位の固有振動数(欠陥周波数)が卓越する。
- ・ 振動加速度波形
 - 周期性を伴う衝撃波が発生する。

軸受が重度な損傷に至ると、振動速度の増加が確認され、振動速度スペクトルにおいても損傷部位の欠陥周波数の卓越が確認される。振動加速度波形においては、実効値とピーク値が全体的に増加して、潤滑不良に酷似した波形となる。

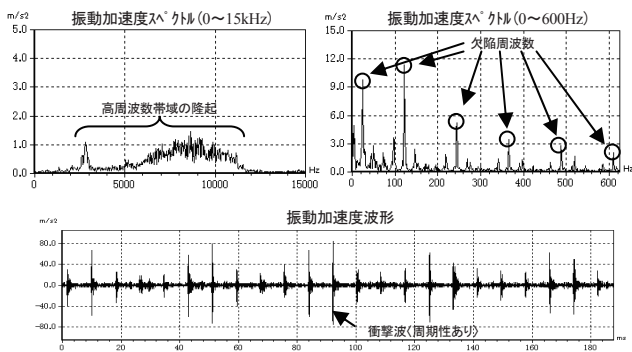


図 16 損傷発生時の振動データ

事例.3 外輪転走面のフレーキング

ルーツ式送排風機のモータ部において、振動加速度および振動速度の上昇(図 17)と、モータブラケット接合部からのグリース基油漏洩が確認された。

周波数解析の結果、図 18 の通り、振動加速度スペクトルおよび振動速度スペクトルから「外輪キズの周波数成分(f_0 : 75.8Hz)の卓越」、振動加速度波形から「外輪キズの周期性を伴う振幅」を確認した。

振動速度値の急激な上昇および振動速度スペクトルにおける外輪キズ周波数成分の卓越に着目し、以上の確認結果から、「重度な外輪の損傷」と診断し、分解点検を推奨した。

軸受分解検証の結果、外観観察調査において「外輪転走面から 10 mm 大のフレーキングと不均等な摩耗痕の周回(図 19)」、「内輪転走面の中心から外れた摩耗痕の周回(図 20)」、「転動体のテンパーカラー(図 21)」を確認した。

軸受内に残留したグリースの鉄粉濃度を測定した結果、1.435%wt を計測した。この値は鉄粉濃度計(出

光興産株式会社 OM-810)の参考基準値における異常判定値(0.1%wt 以上)を大きく上回る値である。

寸法計測の結果、ラジアル隙間の公差範囲超過が確認された。この結果は、内外輪の転走面が摩耗してラジアル隙間が広がったことを示しており、外観観察調査で確認した内外輪の摩耗痕と符合する。転動体においては、摩耗を示す値は確認されなかった。

以上の結果から、周波数解析の診断結果および損傷程度の評価の妥当性を確認することができた。

分解点検記録から点検前のモータの状態を確認した結果、モータブラケットのハウジング内径が公差を超過していた。軸受嵌め合い部に摩耗が生じて隙間が広がっていたことが考えられる。

軸受分解検証の結果と分解点検記録の確認結果から、本事象の発生メカニズムについて以下の通り評価した。(図 22)

- ①ハウジングの軸受嵌め合い部に隙間が生じた状態でプーリと主軸が駆動ベルトに引っ張られることで軸受が偏角し、ラジアル荷重が不均等となる。
- ②転動体が走面の中心を外れた位置で転走し、転走面に中心を外した接触痕が生じる。
- ③不均等なラジアル荷重によって、外輪転走面に不均等な摩耗痕が生じる。無負荷状態となる箇所では接触痕や摩耗痕が発生しない。
- ④接触圧の著しい増加と摩耗痕とのシビアな接触によってグリースがせん断される。せん断されたグリースは基油と分離し、基油がモータ外に漏洩する。
- ⑤グリースの性能低下で無潤滑に近い状態となり、外輪のフレーキングおよび転動体のテンパーカラーを引き起こす。

本事象は、前述の事例.1 に類似するものであり、事例.1 の事象が進展して過酷な状態に至った場合、本事象のような損傷に至ることが推測される。

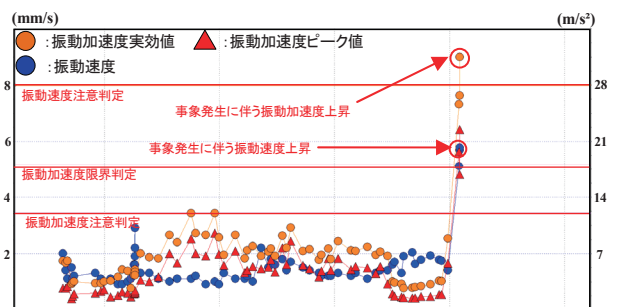


図 17 事象発生機器の振動トレンド

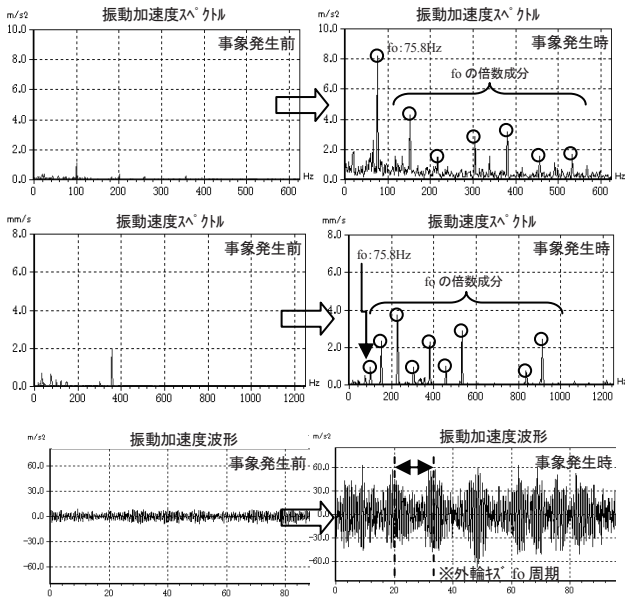


図 18 フレーキング発生時の振動加速度データ

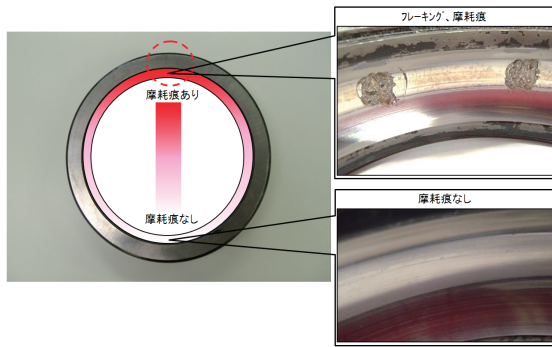


図 19 外輪転走面のフレーキングと摩耗分布



図 20 内輪転走面摩耗痕



図 21 転動体温度カラー

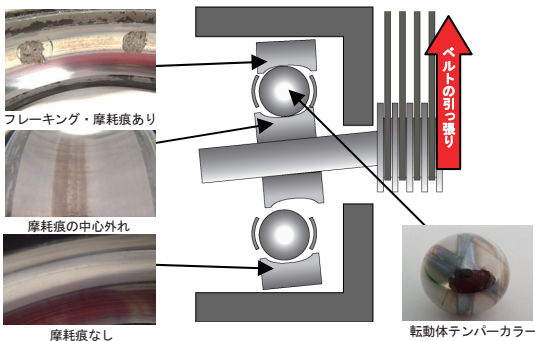


図 22 軸受の偏角によるジアル隙間狭小事象

3.3 基礎剛性に関する振動増加

回転機器において発生する異常は、軸受の異常を起因とする事象の他、機器を据え付ける基礎部の構造的影響によっても引き起こされる事象が確認されている。

基礎やフレームは回転機器が発生する回転モーメントを受け止める働きを有する。その一方で、基礎の剛性低下や歪みは共振や揺動、回転不釣り合い等を発生させ、既存の振動を増大させる原因ともなる。

事例4 コンクリート基礎の剛性変化に伴う共振現象

横型遠心ポンプの本体部において、振動速度の急激な上昇が確認された。(図 23)

周波数解析の結果、図 24 の通り、振動速度スペクトルにおいて 199.6Hz の成長が確認された。

199.6Hz の周波数成分は、運転中の当該機器において定常的に確認されており、図 25 の通り、同系列同型機器でも確認されている。また、軸受の各製品の欠陥周波数との近似は確認されない。

同系列同型機 3 台の固有振動数調査を実施した結果、図 26 の通り、当該機器(機器 A)の本体部において、運転中に確認される周波数成分 199.6Hz と近似する固有振動数 190.8Hz が確認された。

以上の確認結果から、運転中に発生する周波数成分と本体部の固有振動数が共振点となって振動速度が上昇したものと診断した。

当該機器の本体部はベースフレームのサポートで固定されている。ベースフレームの内側にはコンクリートが充填されているが、現場調査において、ベースフレームとコンクリートに隙間が生じていることを確認している。

ベースフレームの補強を施すことで固有振動数を変化させられるものと推定し、図 27 の要領でベースフレームに鋼材を固定させて固有振動数を移動させる実験を行った。実験の結果、図 28 の通り、鋼材の枚数を増やす毎に固有振動数が変化することを確認した。また、図 29 の通り、固有振動数の変化に伴って、運転時の振動速度が低下することを確認した。

このことから、運転時の振動伝播によってベースフレームと充填コンクリートの付着力が低下して経時的に隙間が広がり、基礎の剛性低下および固有振動数の変化(運転時の周波数成分 199.6Hz との近似)に繋がったものと考えられる。

本事象においては、鋼材を用いた補強を施すことで、固有振動数の移動および振動速度の低減が可能であることを確認することができた。

本事例は、類似事象が発生した際の振動低減処置を検討する上で有効な事例となる。

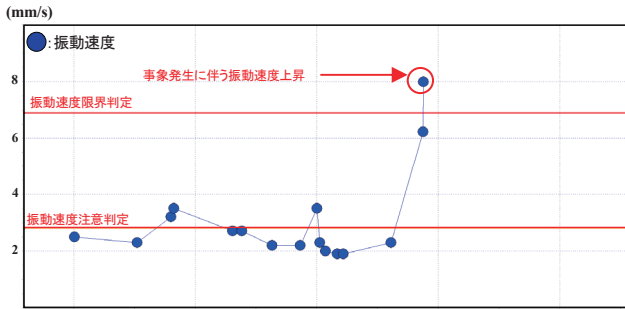


図 23 事象発生時の振動速度トレンド

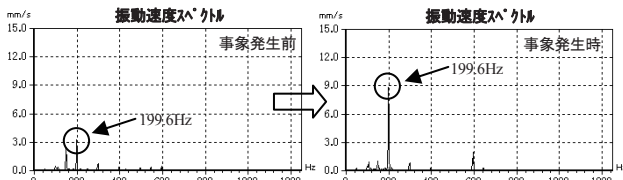


図 24 事象発生時の振動速度スペクトル

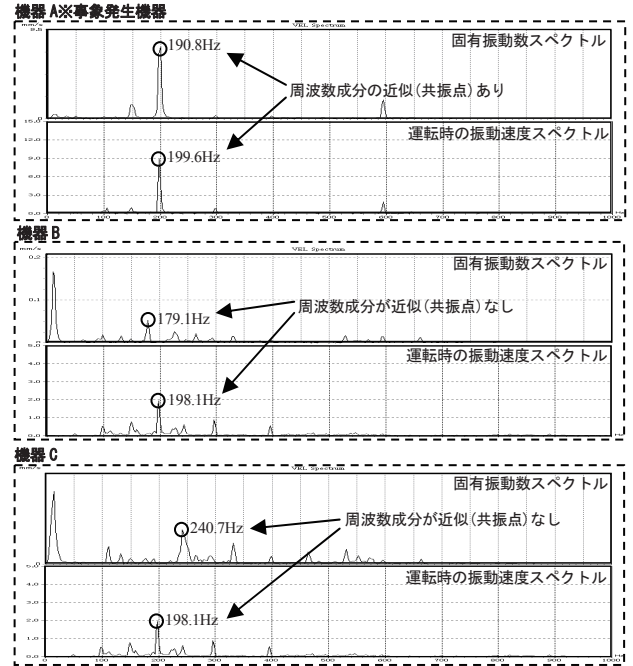


図 26 同系列同型機の固有振動数スペクトル比較

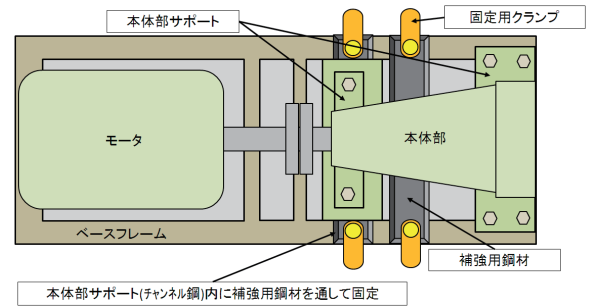


図 27 鋼材固定による固有振動数移動実験

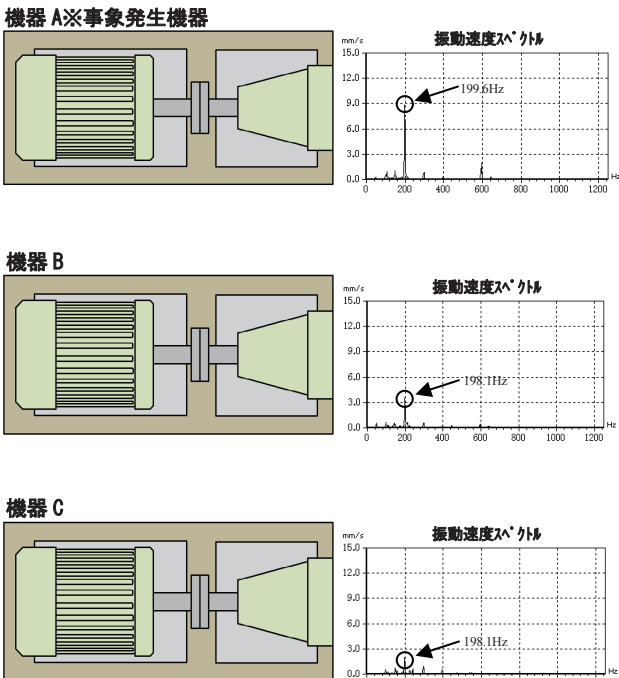


図 25 同系列同型機の振動速度スペクトル比較

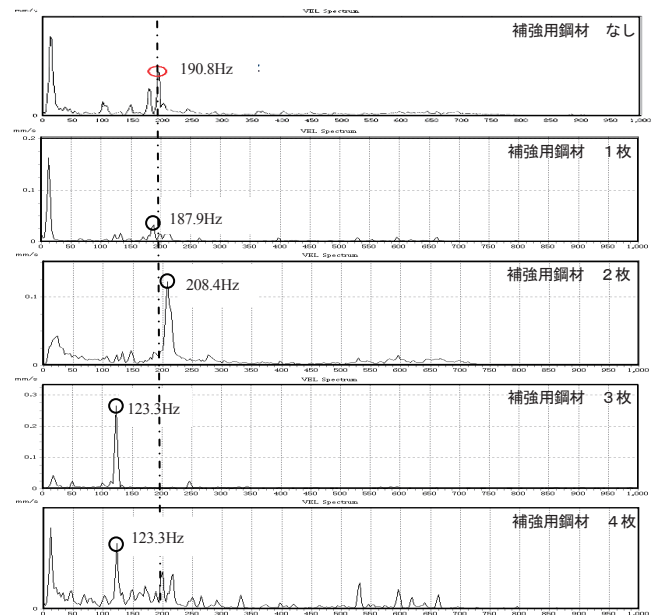


図 28 鋼材補強による固有振動数の変化

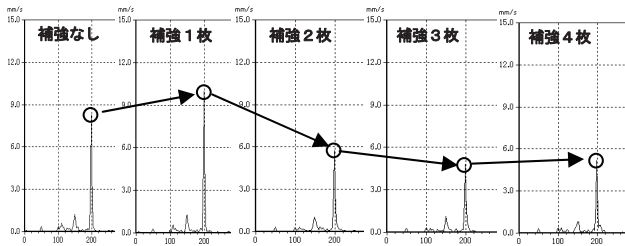


図 29 鋼材固定による振動速度の変化

4. まとめ

本稿で取り上げた振動解析事例については、いずれも異常事象の診断結果をアウトプットするだけに留まらず、解析結果の妥当性確認や発生原因の究明など、より踏み込んだ診断を実施した事例となっている。また、これらの事例は、同様または類似する事象が発生した際に活用できる有用な経験となる他、設備管理および保守部門の関係者との情報共有および理解を進める際の有効な資料となっている。

今後も振動解析で得られた診断結果や有用な知見を展開させることで、六ヶ所再処理工場の適正な保全活動に寄与していく所存である。

参考文献

- [1] ISO 基準に基づく機械設備の状態監視と診断(振動) 振動技術研究会
- [2] ISO18436-4 準拠トライボロジーに基づくメンテナンス 日本トライボロジー学会編
- [3] 図説・設備診断技術シリーズ①回転機械診断の進め方 豊田利夫著 株式会社 JIPM ソリューション