

回転機異常振動模擬訓練装置の開発と活用計画

Development and Utilization plan of the training equipment for abnormal vibration

株式会社ジェイテック 佐々木 一人 Ichito SASAKI
瀬川 佑太 Yuta SEGAWA
小野 貴浩 Takahiro ONO
畑中 明 Akira HATANAKA Member

Vibration diagnosis of rotating equipment is important in nuclear power and other industrial plants. J-tech has diagnosed the vibration of rotating equipment in Rokkasho Reprocessing Plant since 2004. We have experienced various diagnosis cases in accordance with various kind of specification of the rotating equipment. Training for engineers of vibration diagnosis is to be valuable by diagnosing actual in-service equipment. However, as abnormal vibration occurs unexpectedly, it is difficult to experience it. Therefore, development of successors becomes the issue.

J-tech have analyzed the past abnormal vibrations and developed the equipment by using analysis results which can simulate abnormal vibration. This equipment can be adopted the rotating equipment of not only Rokkasho Reprocessing Plant but also other industrial plants.

We report the overview of training equipment development and utilization plan of it.

Keywords: Vibration diagnosis, Diagnosis training unit, Abnormal situation

1. 諸言

原子力等の大型プラントにおいては、経済性および予防保全の観点から回転機器(ポンプ、ブロワ等)の振動診断を用いた状態監視技術への期待と重要度が増している。

当社は、六ヶ所再処理工場において2004年から回転機器の振動診断を実施しており、様々な仕様に応じた振動診断のノウハウを蓄積している。[1]

回転機器の異常振動を診断する技術の育成については、稼働中の実機を通じた経験の蓄積が主となる。ただし異常振動の発生は不確定であることから、様々な異常事象を効率的かつ体系的に経験することは困難である。このことから、振動診断技術を有する後継者の育成が大きな課題として挙げられていた。

当社は上記問題の解決のため、過去に発生した異常振動の傾向を分析し、六ヶ所再処理工場およびその他プラントの各種回転機器に通用可能な異常振動の発生パターンを再現する回転機異常振動模擬訓練装置を開発した。

本稿では、本訓練装置の開発と概要および活用計画について紹介するものである。

2. 開発検討について

本装置の開発にあたり、状態監視対象機器約1700台の内、過去3年(2014~2017年)に異常振動が発生した機種と発生パターンを洗い出し、同様の事象が模擬できるユニット構成を検討した。(Fig.1)

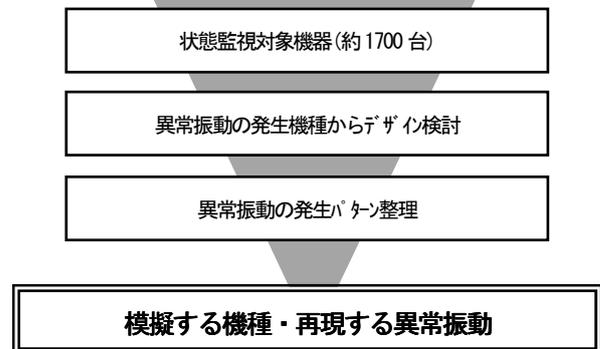


Fig.1 模擬する機種と異常振動の選定

2.1 模擬する機種の検討

六ヶ所再処理工場内設置の回転機器の内、当社が振動診断を実施している状態監視対象機器の機種とその割合、機種別の異常振動発生台数をFig.2に示す。

これらの機種の内、「ブロワ」、「横型渦巻ポンプ」、「モータ」、「ノンシールポンプ」の4機種については、軸受支持部や据付向きが同様であることから、単一にユニットとして包括的に模擬することとした。

ベルト駆動機器、攪拌機、縦型ポンプについては結合方式や据付向きが異なることから、それぞれ単体のユニットで模擬することとした。

上記の通りユニットを構成することで、状態監視対象

連絡先：佐々木 一人

〒039-3212

青森県上北郡六ヶ所村尾駸字弥栄平 1-108

株式会社 ジェイテック

機械保守部 保守・診断グループ

E-mail : ichito-sasaki@j-tech66.co.jp

機器の9割以上の機種を模擬することとした。

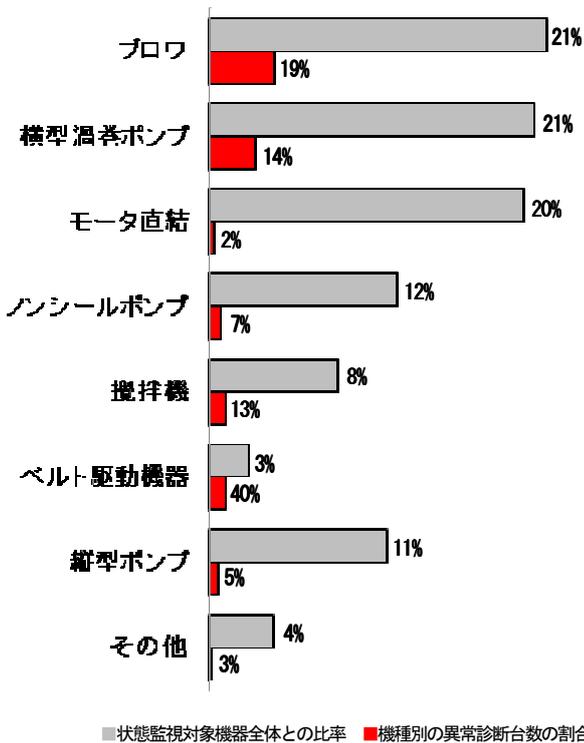


Fig. 2 状態監視対象機器の機種比率と異常発生台数の割合

2.2 モータの仕様について

異常振動を再現する上で、回転数は重要な要素となる。

Fig.3 に示す通り、状態監視対象機器の多くは回転数1500rpm以下に多く分布している。

本装置に搭載するモータについては、訓練装置としての安全性を含めて勘案し、1450rpm までの範囲で回転数を調整できる仕様とした

なお、モータ容量は本装置の目的である異常振動の再現に影響を与えないことから、本装置の検討項目としては評価の対象外としている。

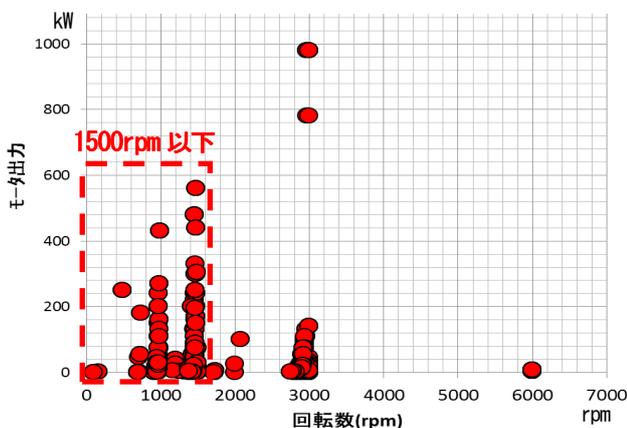


Fig. 3 状態監視対象機器の回転数とモータ出力分布

2.3 再現する異常事象の検討

異常振動の原因の種類および割合について Fig.4 に示す。発生事象の割合は「ベアリング潤滑不良」および「軸受キズ・摩耗」が約6割を占める。その他の事象については割合が低い、いずれも診断が難しく診断経験を要する事象である。

これらはいずれも六ヶ所再処理工場に特化したものではなく、汎用的な回転機器においても発生する事象である。よって、これらの事象を模擬することで、六ヶ所再処理工場の他、各種プラントの回転機器においても通用する訓練装置になるものと考えた。

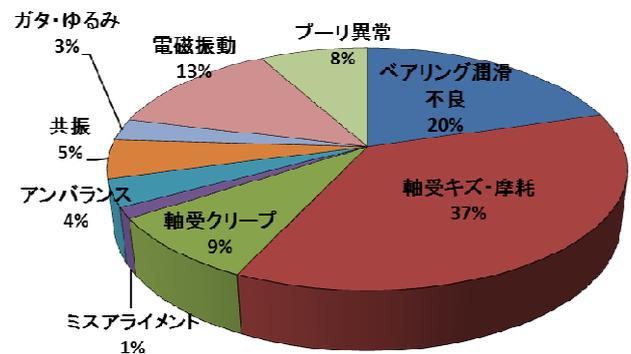


Fig. 4 異常振動の原因内訳

2.4 模擬機種と再現事象のまとめ

各ユニットで模擬する機種と再現する異常振動を Table1 に示す。

本装置を活用することで、過去に発生した異常振動事象の全てを再現することとした。

Table1 模擬機種と再現する異常事象の対応表

ユニット	模擬する機種	再現する異常振動
横型回転ユニット	プロワ 横型渦巻ポンプ モータ ハンシールポンプ	ベアリング潤滑不良 軸受キズ・摩耗 軸受クリープ ミスアライメント アンバランス 共振 ガタ・ゆるみ 電磁振動
ベルト駆動ユニット	ベルト駆動機器	ブリー・ベルト異常 ミスアライメント ガタ・ゆるみ 圧力変動に伴う振動
縦型攪拌ユニット	攪拌機	ミスアライメント 攪拌抵抗

3. 回転機異常振動模擬訓練装置の概要

当社設備診断部門は過去の診断や検証作業の経験から異常振動が発生するメカニズムについて知見を蓄積している。これらの知見をフィードバックし2項に示した条件を満足させる訓練装置「回転機異常振動模擬訓練装置」を開発した。(Fig.5)

なお、本装置は横型回転機器を模擬した「1号機」と縦型回転機器を模擬した「2号機」の2台で構成される。

3.1 ベアリング潤滑不良

(1) 事象概要

軸受内部の潤滑剤(グリース、潤滑油)の不足や劣化により油膜が切れて摺動部の接触圧が増加する事象である。軸受キズや摩耗の原因となる。

回転機器において発生頻度が最も多く、事象発生時の異音や周波数成分の特徴の習得が重要となる。

(2) 再現メカニズムについて

軸受箱(Fig.5_②,④)の内部からグリースを除去することでベアリング潤滑不良を再現する。また、過度のグリスアップに伴う異音や振動増加を体験できる。

(3) 事象再現時の振動データ

ベアリング潤滑不良が発生した際、振動加速度パラ

メータにおいて実効値の増加と高周波数帯域の盛り上がりが見られる。

本装置でベアリング潤滑不良を再現した結果、上記の特徴を有す周波数成分の発生を確認した。(Fig.6)

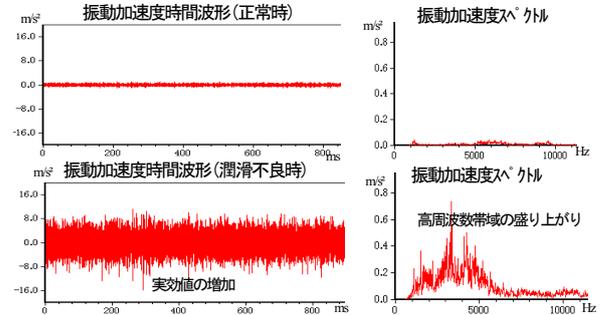


Fig.6 潤滑不良再現時の周波数成分

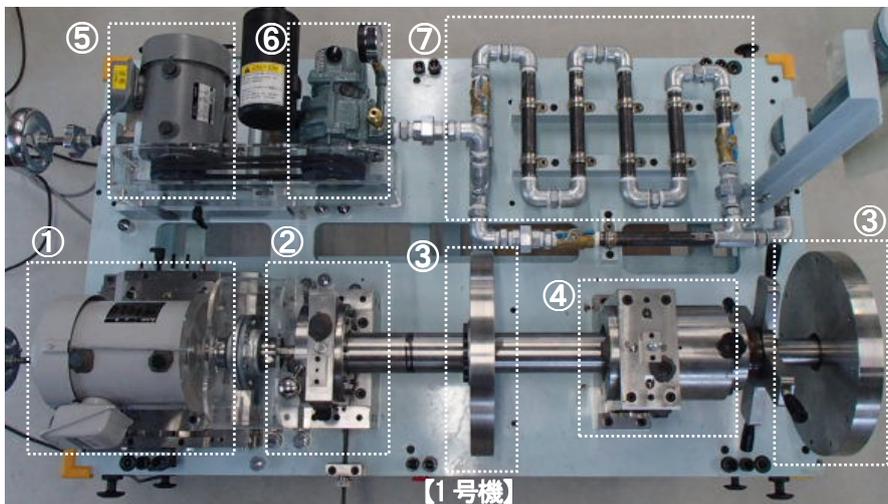
3.2 軸受キズ・摩耗

(1) 事象概要

軸受キズ・摩耗は軸受の物理的損傷であり、深刻な場合には設備の停止に及ぶ。また、摩耗粉の混入に伴う潤滑機能の悪化といった二次的影響に繋がるため、早い段階で事象の兆候を検知することが重要となる。

(2) 再現メカニズム

フライホイール側軸受箱(Fig.5_④)に予めキズを入れた軸受を組み込むことでキズや摩耗が発生した際の異

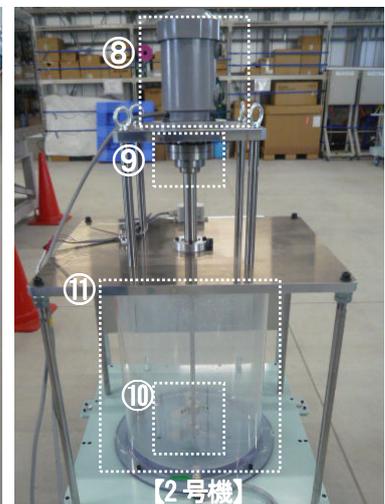


【1号機 仕様】

モータ出力：1.5kW, Max1450rpm (横型回転ユニット)
0.4kW, Max1410rpm (ベルト駆動ユニット)
寸法(mm)：W1350×D800×H1004
重量：約500kg
軸受：6205ZZ (横型回転ユニットモータ)
6310 (横型回転ユニット軸受箱)
6203ZZ (ベルト駆動ユニットモータ)

構成部位

①横型回転ユニットモータ
②モータ側軸受箱
③フライホイール
④フライホイール側軸受箱
⑤ベルト駆動ユニットモータ
⑥ルーツプロ
⑦模擬配管



【2号機 仕様】

モータ出力：0.2kW, Max1400rpm
寸法(mm)：W680×D545×H1350
重量：約100kg
軸受：6201ZZ (モータ)

構成部位

⑧モータ ⑨ギアカップリング
⑩可変式イナーテラ ⑪アクリル製貯槽

Fig.5 回転機異常振動模擬訓練装置の外観および仕様

音と振動データを再現している。

また、スラスト加圧ハンドルでスラスト方向に予圧を与える機構を有しており、意図的に軸受内部の接触圧を高めてキズの周波数成分を励起させることができる。(Fig.7) [3]

(3) 事象再現時の振動データ

軸受キズ・摩耗が発生した際、外輪の固有振動数(キズ周波数成分)が現れる。[1][3]

本装置で軸受キズ・摩耗を再現した結果、外輪キズの発生を示す周波数成分を確認した。(Fig.8)

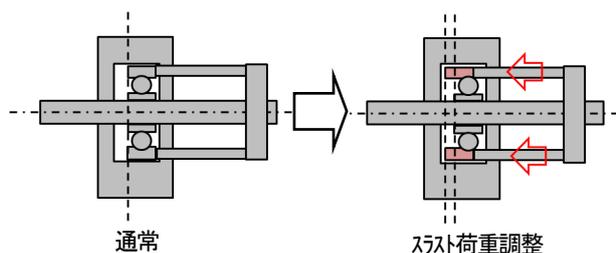


Fig. 7 スラスト荷重加圧調整メカニズム

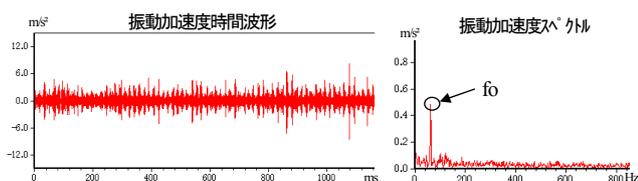


Fig. 8 軸受キズ再現時の周波数データ

3.3 アンバランス

(1) 事象概要

アンバランスは軸受支持部のラジアル負荷を増大させて性能の損失や軸受の損傷に繋がる事象である。

ベアリング潤滑不良や軸受キズ・摩耗と比較すると診断が難しい事象であるため、実際の振動状態と周波数データの相関性を体験することが重要となる。

(2) 再現メカニズム

回転軸にフライホイール(Fig.5_③)を2枚取り付けており、ウェイトを調整することでアンバランスを再現している。

2枚のフライホイールの同軸上にハードポイントを設けており、動アンバランスと静アンバランス両方の事象を再現することができる。(Fig.9)

(3) 事象再現時の振動データ

アンバランスが発生した際、回転成分(fr)の増加が現れる。

本装置でアンバランスを再現した結果、上記の周波数成分が発生したことを確認した。(Fig.10)

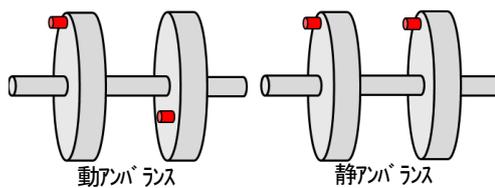


Fig. 9 動アンバランスと静アンバランス

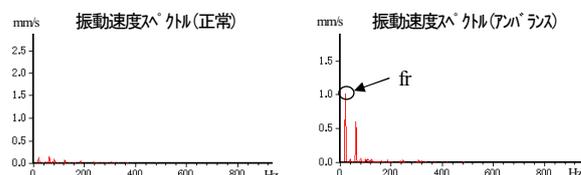


Fig. 10 アンバランス再現時の周波数データ

3.4 ミスアライメント

(1) 事象概要

ミスアライメントはアンバランスと同様に大きな変位量を伴う振動を発生させる事象である。

アンバランスと混同されやすく、事象の違いを理解することが診断を行う上で重要である。

(2) 再現メカニズム

モータの台座(Fig.5_①,⑤)およびモータ側軸受箱(Fig.5_②)にスライド機構を設けることでミスアライメントを再現する。(Fig.11)

各部位のスライド方向はTable2の通りとなる。

(3) 事象再現時の振動データ

ミスアライメントが発生した際、回転成分(fr)とその2倍成分(2fr)の成分が現れる。

本装置でミスアライメントを再現した結果、上記の成分が発生したことを確認した。(Fig.12)

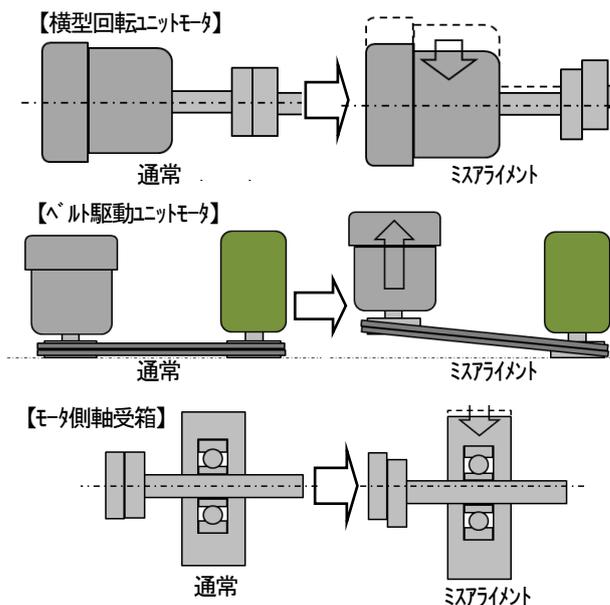


Fig. 11 ミスアライメントの再現メカニズム

Table2 各ユニットのモータリフト方向

部位	水平方向	垂直方向	軸方向
横型回転ユニット	○	○	○
ベルト駆動ユニット	○	—	○
モータ部軸受箱	○	—	—

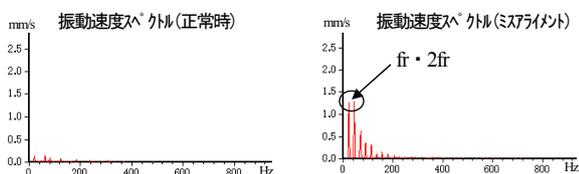


Fig. 12 ミスアライメント再現時の周波数データ

3.5 軸受外輪クリーブ

(1) 事象概要

軸受外輪クリーブは軸受外輪への与圧低下や軸受外周の摩耗等に伴って本来固定されるべき外輪が断続的に空転する事象である。[2]

軸受ブラケットの摩耗や鉄粉の発生に伴う潤滑剤の汚濁と性能低下、ベアリング潤滑不良から派生する軸受損傷等、設備への影響は多岐にわたる。[2]

発生初期段階で特有の兆候が現れることから、事象の特徴を知ることは事象の早期検知に有効となる。

(2) 再現メカニズム

フライホイール側軸受箱(Fig5_④)にラジアル与圧を調整するネジを設け、意図的に軸受クリーブが発生しやすい条件を再現する。(Fig.13)

(3) 事象再現時の振動データ

軸受外輪クリーブ発生時、外輪キズ成分(f_0)および回転成分(f_r)が現れる。

本装置で軸受外輪クリーブを再現した結果、上記の成分と事象発生時特有の異音を確認した(Fig.14)

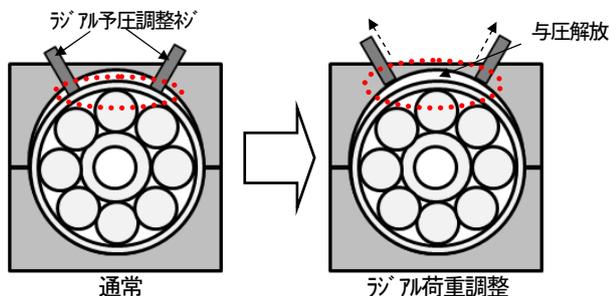


Fig. 13 軸受外輪クリーブ再現メカニズム

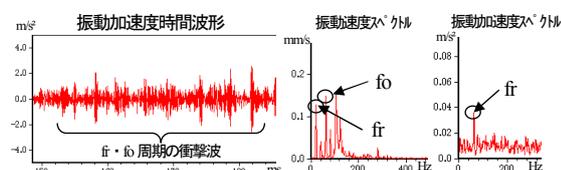


Fig. 14 軸受外輪クリーブ再現時の周波数データ

3.6 電磁振動

(1) 事象概要

電磁振動はモータ内の回転子と固定子のギャップの不平衡が原因で生じる電氣的な振動である。

電磁振動は回転子と固定子のギャップの不平衡は軸受の摩耗、アンバランス、ミスアライメントが原因で発生することもあり、これらの事象との相関性を把握することが必要である。

(2) 再現メカニズム

横型回転ユニットのモータ(Fig.5_①)に備え付けられた軸受固定ネジを緩めて締め代にあそびを持たせ、ミスアライメントによる偏心を与えることでモータ内部のギャップに不平衡が生じて電磁振動が発生する。

(Fig.15)

(3) 事象再現時の振動データ

電磁振動が発生した際、電源周波数の2倍の成分(約100Hz)が発生する。

本装置で電磁振動を再現した結果、同様の周波数成分が現れることを確認した。(Fig.16)

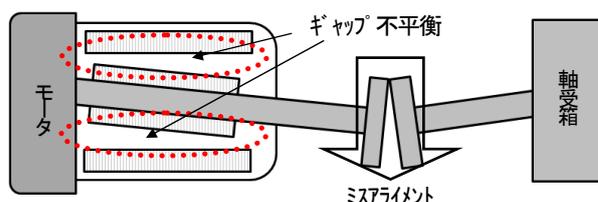


Fig. 15 電磁振動再現メカニズム

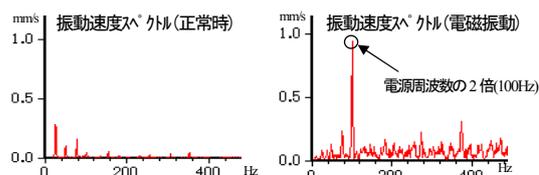


Fig. 16 電磁振動再現時の周波数データ

3.7 ガタ

(1) 事象概要

基礎部やベースフレームの老朽化に伴う剛性低下や経時的負荷に伴う固定部の緩み等が生じるとガタが発生する。

ガタが発生すると回転機器全体が回転モーメントを受けて振動過多となるため、回転軸の軌道に影響を与える他、軸受への負荷が増大する。

ガタの発生はその後の分解点検の内容にも影響を与えることから、特徴を把握しておくことが重要である。

(2) 再現メカニズム

各ユニットが搭載された架台は架台剛性調整ボルト

(Fig.17)で支持している。これを緩めることで架台の一部がベースフレームを含む振動系から切り離し、意図的にガタを発生させることができる。(Fig.18)

(3) 事象再現時の振動データ

ガタ発生時、回転成分の分数($1/2f$)が現れる。

本装置でガタを再現した結果、上記の周波数成分が発生することを確認した。(Fig.19)

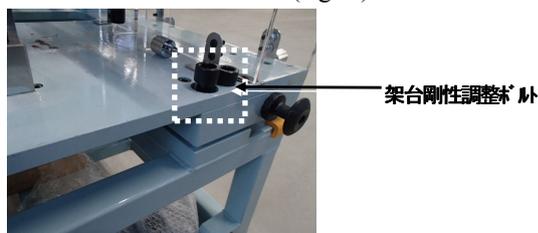


Fig. 17 架台剛性調整ノブ外観

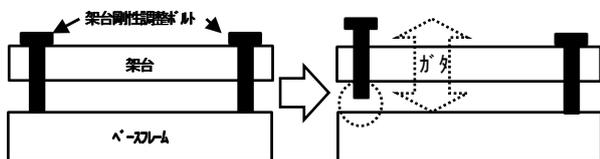


Fig. 18 ガタ再現メカニズム

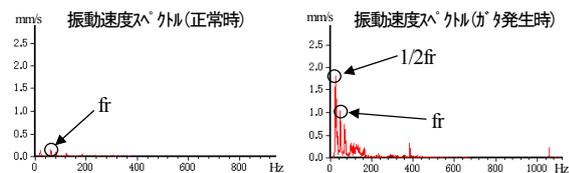


Fig. 19 ガタ再現時の周波数成分

3.8 共振

(1) 事象概要

回転機器における共振事象は、運転に伴って発生する振動が同系他部位の固有振動数と近似して振動過多に至る事象である。大きな変位量を伴う振動が発生し、軸受に過大な負荷を与える要因となる。[1]

また、共振は回転機器に付随する配管系においても発生する。共振による過大な振動に長期間曝された場合、配管の破断に繋がる。

共振のメカニズムを理解することは、共振の回避方法を検討する上でも重要となることから習得が必要となる。

(2) 再現メカニズム

本訓練装置は、3.7 項の通り剛性を変化させて共振を発生させやすい構造としている。また、インバータ制御によって回転数を操作することができるため、共振点となる危険速度を求めることができる。

(3) 事象再現時の振動データ

本装置の架台をガタが発生する状態とし、モータ

の回転数を徐々に上げていくと、500~520rpm で架台が大きく揺動した。その後、回転数を上げていくと揺動が減衰して800rpm以降から変位量が安定した。(Fig.20)

これは共振点となる危険速度が500rpm付近にあることを示している。

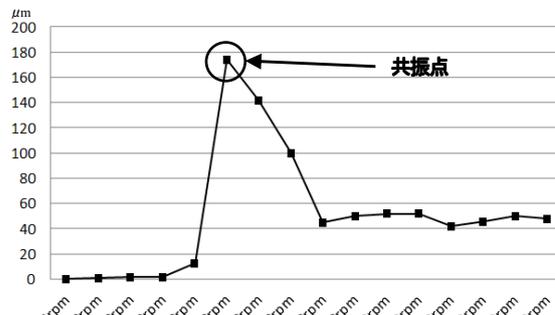


Fig. 20 共振前後の振動速度

3.9 圧力変動による振動増加

(1) 事象概要

ルーツ式ブロワでは運転状態の変化に伴って一時的な振動増加が発生する事象が発生している。回転機器自体の直接的な異常ではないが、他の異常事象との判別を行う上で特徴を理解しておくことが重要となる。

(2) 再現メカニズム

模擬配管のバルブ(Fig.5_⑦)を操作することで、ルーツ式ブロワに圧力変動の影響を与える。

圧力計を備え付けているため、圧力と振動の相関性を確認することができる。

(3) 事象再現時の振動データ

当該事象発生時の特徴として、インペラ振動(f_z)が著しい増加が挙げられる。

本装置の模擬配管のバルブを全閉にしてルーツ式ブロワの振動を測定した結果、インペラ振動が増加していることを確認した。(Fig.21)

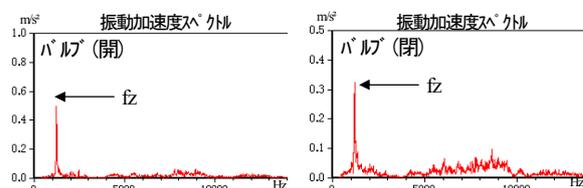


Fig. 21 バルブ操作前後の振動速度

3.10 攪拌抵抗の変化に伴う振動変化

(1) 事象概要

流体量や流体粘性の変化に伴って攪拌抵抗が変化し振動の変化が現れる。また、端部に向かうほど遠心力により主軸の振れ回りが大きくなるため、軸受支持部に負荷が集中し、潤滑剤の劣化や軸受の摩耗損傷の原

因にもなる。

攪拌機は攪拌槽が床下であり、直接的な観察ができないため、実際の挙動のイメージが困難であった。

(2)再現メカニズム

流体の攪拌抵抗を再現するため、インペラ (Fig.5_⑩) の角度を変えられる仕様とした。(Fig.22)

また、流体を貯留させる槽を透明なアクリル製とすることで、本来見ることができないインペラや主軸の挙動、流体の状況を観察できる仕様とした。(Fig.5_⑪)

(3)振動データ

攪拌抵抗が原因となって振動が増加した場合、インペラ周波数成分が現れる。

本装置で流体(水)を攪拌した結果、インペラ周波数成分が現れることを確認した。(Fig.23)

また、インペラの角度の増加に比例して振動値が増加することを確認した。(Table 3)

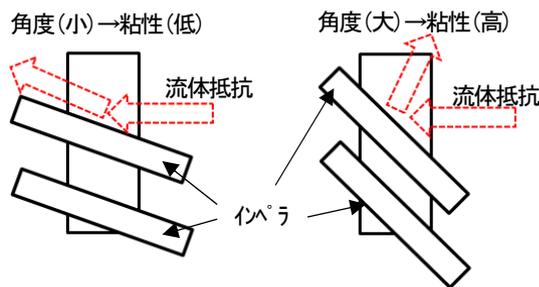


Fig. 22 インペラ角度と粘性再現の相関図

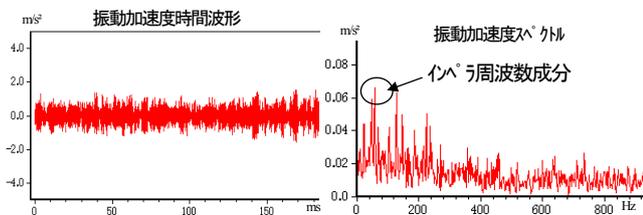


Fig. 23 攪拌時の周波数データ

Table3 インペラ角度と振動速度値

インペラ角度	10°	20°	30°	40°	50°
振動速度 (mm/s)	0.25	1.12	1.74	2.60	3.42

※回転数：800rpm

4. 活用計画

4.1 訓練項目

(1)基礎教育

六ヶ所再処理工場およびその他大型プラントにおいて保全業務に従事する場合、回転機器や潤滑剤に係る知識が必須となる。

本装置は回転機器の基本となる構成を為しているため、基礎的な知識を得る教材として活用する。

(2)振動診断技術者教育

本訓練装置は振動診断技術の育成と向上を主な目的としている。各種回転機器の構成を模擬しており、発生し得る異常振動を再現できることから、振動診断技術者の体系的な教育を可能とする教材として活用できる。

(3)運転員教育

本装置は回転機器において発生する表面化した異常(異音、揺動、触振動)を体験できることから、設備を巡視する運転員を対象に異常察知の感覚を養う教材として活用する。

(4)補修訓練

本装置は各種回転機器の構成を模擬していることから、回転機器の補修訓練の教材として活用する。

Table4 訓練装置を活用した教育・訓練

訓練項目		目的
基礎教育	回転機器の基礎	回転機器の構造の基礎について習得する。
	軸受について	軸受に関する基礎知識について学習する。
	潤滑剤について	潤滑剤の種類と目的について学習する。
振動診断技術教育	振動測定	振動測定器に操作方法を習得する他、各機種種の適正な測定箇所を理解する。
	聴診検査	各種振動異常が発生した際の異音の種類、聴診棒に使用方法を習得する。
	振動診断	各種振動異常の振動データ解析を習得する。
運転員教育	異常体感訓練	回転機器の異常振動状態を観察し、視覚、聴覚、触覚から回転機器の危険性を体験する。
補修訓練	回転機器補修	モータールーツ式ブロワの分解・組立や軸受交換作業を通して補修技術を習得する。

4.2 訓練スケジュール

本訓練装置の訓練スケジュールを Fig.24 に記す。

本装置の基本操作を習得した後、講師として「基礎教育」、「振動診断技術教育」、「運転員教育」を当社社員および協力会社を対象に逐次実施する。

特に振動診断技術教育においては、10~12月に予定されている ISO18436-2 準拠機械状態監視診断技術者(振動)の合格を目標として教育を実施する。

2月以降は軸受やシール類の消耗品の劣化を想定し、それらの交換作業を兼ねた補修訓練を実施する。

2020年度以降はこれらの訓練を並行して随時実施し、社内および協力会社の技術力向上に資することとしたい。

項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
訓練装置操作訓練												
(1)基礎教育												
(2)振動診断技術教育												
(3)運転員教育												
(4)補修訓練												

Fig.24 訓練スケジュール

5. 結言

本訓練装置は六ヶ所再処理工場設置回転機器の振動診断から得られた経験をフィードバックしているが、いずれのユニットも汎用的な構成であり、他プラントの回転機器の振動診断に通用する機能を有している。

本訓練装置を活用し、六ヶ所再処理工場および他プラントの保全活動に有用な影響を与える考究活動や人材育成を推し進めていきたい。

謝辞

本装置の開発にあたっては、JFEプラントエンジニアリング(株)、(株)沢田テクニカルサービスに製作支援および多様な指導と助言等、多大なるご尽力を頂いた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- [1] 佐々木一人、瀬川佑太、吉村定志、他 “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- ”、日本保全学会 第11回学術講演会 要旨集、2014、pp.439-446.
- [2] 佐々木一人、瀬川佑太、吉村定志、他 “六ヶ所再処理工場の横型遠心ファンにおける軸受外輪クリープの振動診断について ”、日本保全学会 第12回学術講演会 要旨集、2015、pp.309-314.
- [3] 佐々木一人、瀬川佑太 “電動機のウェーブワッシャ不良による深溝玉軸受の早期損傷メカニズムと振動診断 ”、日本保全学会 第14回学術講演会 要旨集、2017、pp.21-24.



写真 回転機異常振動模擬訓練装置を使用した聴音検査実習の様子