

状態監視振動診断技術者コミュニティ
第5回ミーティング

ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in
Turbo Machineries

2013/10/4

株式会社 日立製作所 日立研究所

山口 和幸

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved.

ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in
Turbo Machineries

Contents

1. はじめに
2. 回転軸の強制振動
3. 回転軸の自励振動
4. 羽根車の強制振動
5. おわりに

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved.

ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in
Turbo Machineries

1. はじめに

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved.

1-1. はじめに(概要)

流体回転機械であるターボ機械では、

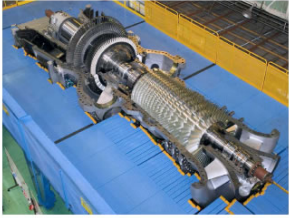
- ・作動流体や軸受の流体力
- ・回転軸の不釣り合い力
- ・モータや発電機の電磁力

などに起因する様々な振動現象が発生する可能性がある。

日本機械学会の振動工学データベースv_BASEから、最近報告されたターボ機械の振動事例をピックアップして紹介する。

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 3

1-2. ターボ機械の例



<http://www.hitachi.co.jp/New/news/month/2010/02/0222a.html>

ガスタービン



http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/energy/renewable_energy.html

風車



<http://www.hitachi-pt.co.jp/products/si/compressor/radial/magnetic.html>

遠心圧縮機



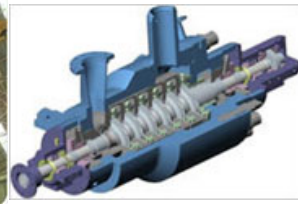
http://www.hitachi-hgnc.co.jp/nuclear/product/abwr/turbine/s_turbine/index.html

蒸気タービン



www.hitachi-yoron.com/2012/01/pdf/hydraulic.pdf

水車

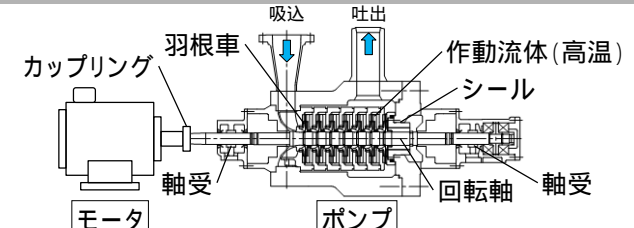


http://www.hitachi-pt.co.jp/products/si/pump/gm_bgm.html

ポンプ

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 4

1-3. ターボ機械のおもな振動



ターボ機械の構造例 (高圧ポンプ)

ターボ機械のおもな振動

分類	回転軸	羽根車
強制振動 (共振) $x = (F/k) / (2 \dots)$	・ミスアライメント ・回転軸熱曲がり ・電磁励振 (モータ, 発電機)	・動静翼干渉 (BPF) ・サージ, 旋回失速 ・ランダム励振
自励振動 < 0	・オイルホイップ (軸受) ・ラビリンスホワール (シール) ・スチームホワール (蒸気タービン)	・フラッタ (流体力)

x : 振動振幅, F : 加振力振幅, k : ばね定数, γ : 減衰比

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 5

ターボ機械の振動事例

Case Studies of Vibration in Turbo Machineries

2. 回転軸の強制振動

2-1. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変⁽¹⁾

対象機械

30MW級ガスタービン

タービンの排気側は試験設備の既設排気ダクトに接続

発生した現象

定格運転中に#2軸受の軸振動値が突変して振動大
振動突変時に軸心位置とオービットが変化
ガスタービンを停止してCold状態に戻すと振動特性も元に戻った

原因推定

熱的なミスアライメント発生が原因と推定

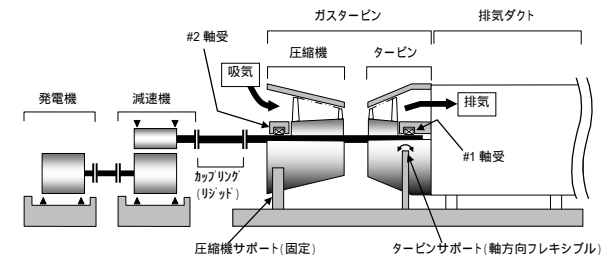


図2-1 軸構成図

2-2. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

解析・データ分析

対象機には以前から軸振動が20~40 $\mu\text{m p-p}$ 程度突変する現象が度々発生
ガスタービンを停止させてCold状態に戻して再起動すると振動特性も元に戻る

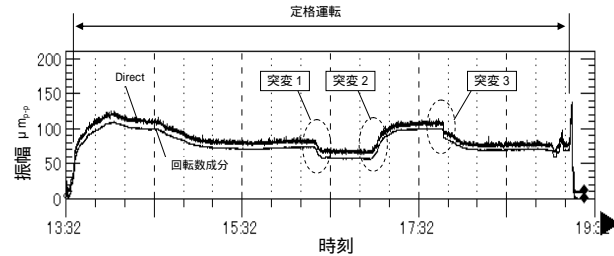


図2-2 #2軸受 軸振動トレンド
(以前から発生していた軸振動突変現象)

2-3. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

解析・データ分析

定格運転中に軸振動値が90~160 $\mu\text{m p-p}$ に急増したため、ガスタービンを非常停止
回転数成分が主

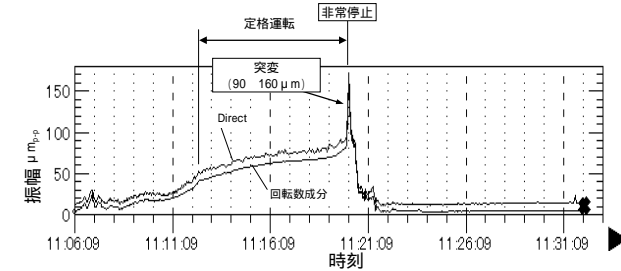


図2-3 #2軸受 軸振動トレンド
(振動大発生)

2-4. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

解析・データ分析

振動突変時、軸心位置は約50 μm 移動
突変前と後でオービットも変化

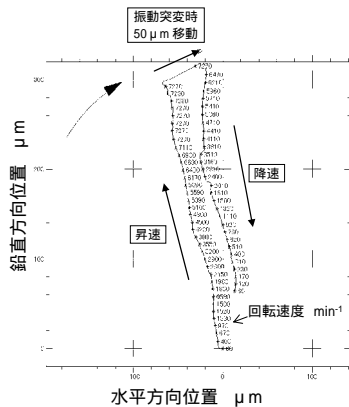


図2-4 #2軸受軸心軌跡

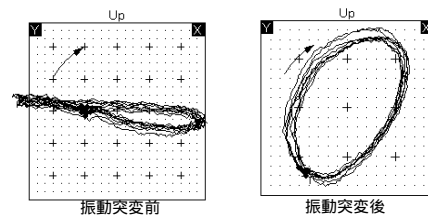
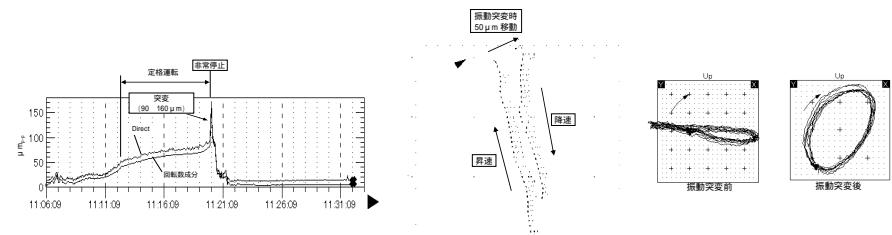


図2-5 #2軸受オービット

2-5. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

解析・データ分析

現象のまとめ
(1)軸振動の突変は20~70 $\mu\text{m p-p}$ で、変動量、発生時刻に再現性なし
(2)軸振動の突変は、回転数成分が主
(3)振動突変時に軸心位置は約50 μm 移動し、突変前と後でオービットも変化
(4)ガスタービン停止後Cold状態に戻して再起動すると、振動特性は元に戻る
ケーシングのスリップによるアライメント変化が原因と推定
ケーシング熱伸びを拘束する部位が無い点検



2-6. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

解析・データ分析

排気ダクトとの結合部は本来はガスタービンの軸方向熱伸びを逃がす構造

ガスタービンのケーシング内側が排気ダクトとの溶接によって熱伸びを拘束されていた

対策・結果

ケーシング内側の溶接部を切除し、正常化
振動突変現象は発生せず

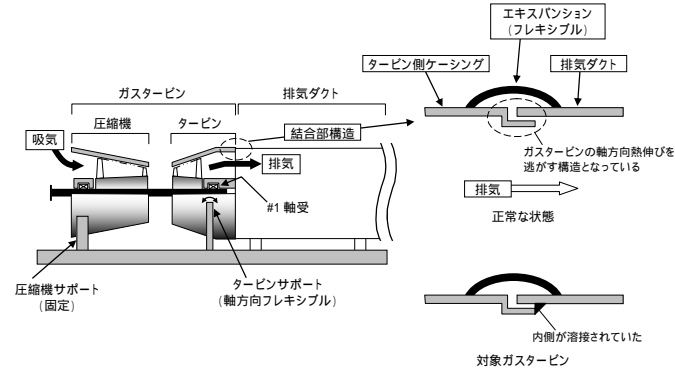


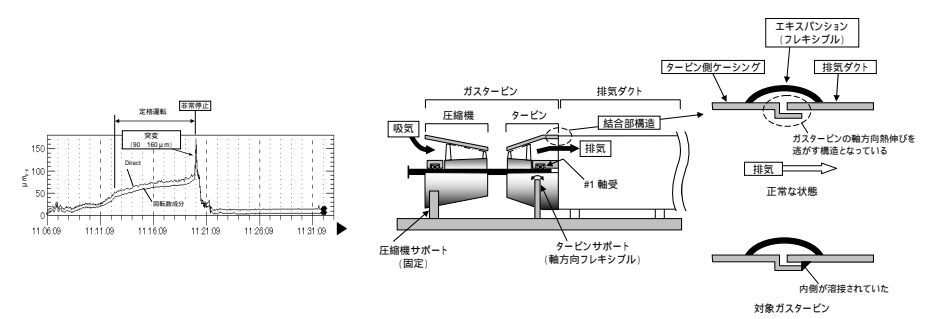
図2-6 排気ダクトとの結合状況

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 12

2-7. ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

教訓

ガスタービンは熱伸びが大きい。熱伸びを拘束してはならない。



© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 13

ターボ機械の振動事例

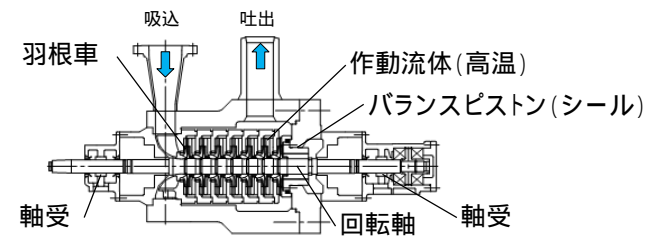
Case Studies of Vibration in
Turbo Machineries

3. 回転軸の自励振動

3-1. 高圧ポンプの不安定振動⁽²⁾

対象機械

2台並列運転もしくは単独運転される横軸多段ポンプ



[ポンプ仕様]
 吸込口径 200mm
 吐出口径 200mm
 羽根車段数 7段
 定格流量 250m³/h
 定格全揚程 16MPa
 定格回転速度 6000min⁻¹
 駆動機出力 1600kW

図3-1 ポンプ概要

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved.

(2) v_BASE(振動工学データベース)フォーラム 資料集(2012), pp.55-56

© Hitachi, Ltd. 2013. All rights reserved. 15

3-2. 高圧ポンプの不安定振動

発生した現象

運転開始から13年経過したポンプを2台並列運転から単独運転に切り替えた後に軸振動、軸受ハウジング振動、吸吐配管振動が同時に急増
 軸受給油温度を変更して計4回試験 単独運転後、振動急増までの時間は9～40分で幅があるが、いずれも現象が再現
 単独運転への切り替え直後に回転同期成分101Hzとは異なる73.5～76.5Hzの成分が発生
 73.5～76.5Hzの成分が72.5Hzに瞬時に移行すると同時に振動が急増

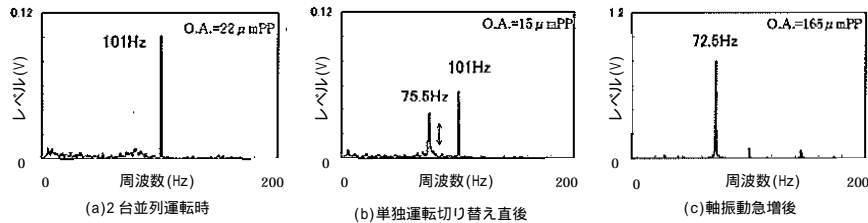
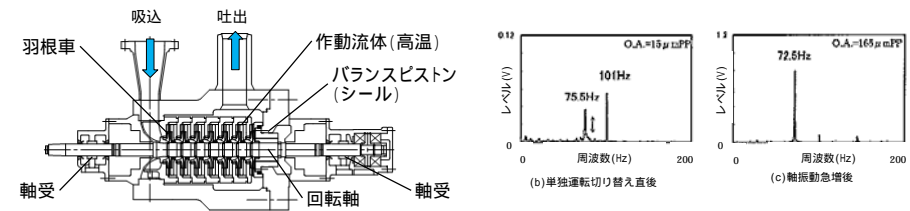


図3-2 反駆動機側軸振動周波数スペクトル

3-3. 高圧ポンプの不安定振動

原因推定

軸振動、軸受ハウジング振動、吸吐配管振動が同時に急増
 振動の起点は軸の振れ回り
 回転同期成分とは異なる73.5～76.5Hzの成分が72.5Hzに移行し振動の主成分となる
 自励振動
 ポンプを並列運転から単独運転に切り替えることで発生
 単独運転への切り替えに伴う吐出圧力の下降 ポンプ内部の環状シールであるバランスピストンでの圧力分布が変化
 流体力が不安定化
 吐出圧力下降後の軸受温度の時系変化
 自励振動が発生



3-4. 高圧ポンプの不安定振動

解析・データ分析

バランスピストンは隙間が1mm以下の環状シール
 長期間の運転により隙間が拡大
 減衰作用から不安定化作用を差し引いた等価減衰 ($C_{xx} - K_{xy}/$) が変化
 バルクフロー理論による流体解析を実施 隙間が大きいほど等価減衰が小さく、自励振動が生じやすい

対策・結果

長期運転による隙間の拡大を確認
 バランスピストンを新品に交換 初期運転時の隙間
 自励振動が解消

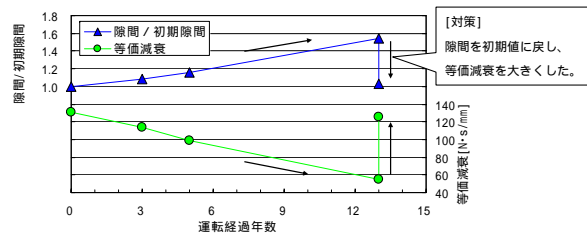
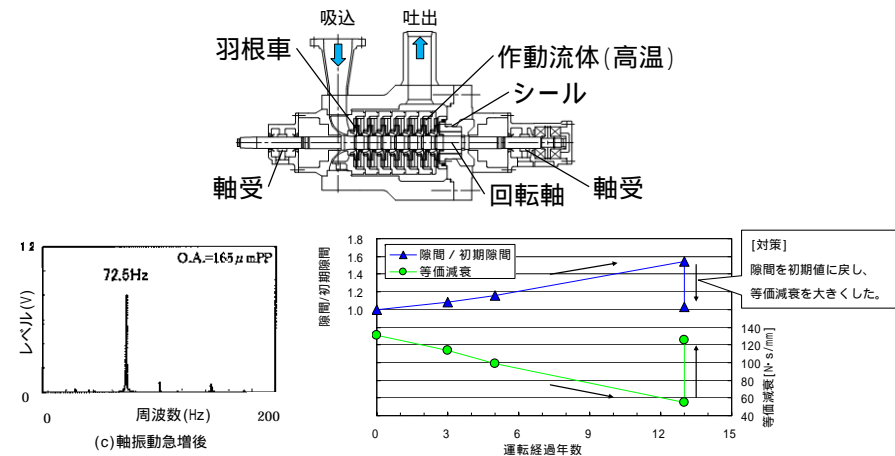


図3-3 バランスピストンの隙間と等価減衰

3-5. 高圧ポンプの不安定振動

教訓

長期に運転されるポンプでは経年変化が必ず生じる。不適合の事象につながる変化は定期点検での点検項目とし、予め許容値を設定することで問題が生じないように管理する必要がある。



ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in
Turbo Machineries
4. 羽根車の強制振動

4-1. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損⁽³⁾

対象機械	ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼
発生した現象	換気ファンの動翼破損・飛散
原因推定	流体励振力によるファン動翼の疲労破壊

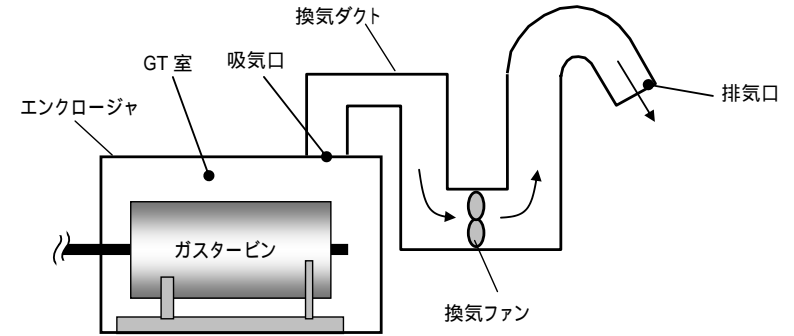


図4-1 機器構成図

4-2. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

解析・データ分析

対象機はエンクロージャ内部に2台設置
吸気ダクトと排気ダクトは2台で共用
1台は非常時のバックアップ用のため、通常2台同時運転する仕様ではない

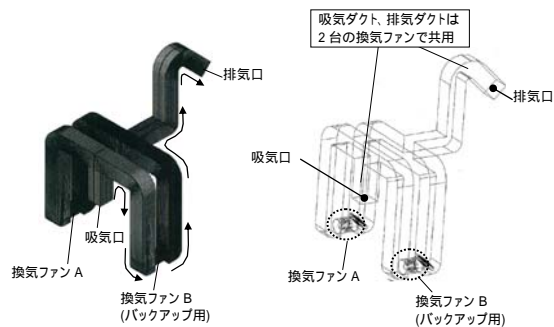


図4-2 換気ファン設置位置及びダクト形状

4-3. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

解析・データ分析

ガスタービン停止中に換気ファンから異音が発生したため点検したところ、ファン動翼1枚の破損、飛散を確認
バックアップ用ファンでも動翼1枚の破損を確認
破断面には疲労破壊の特徴を示すビーチマークを確認

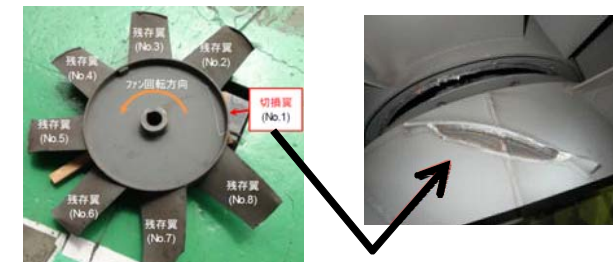


図4-3 換気ファン破損状況

4-4. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

解析・データ分析

破断面に疲労破壊の特徴を示すビーチマークを確認
以下を検討

- (1) 静動翼干渉によるファン動翼共振
検討結果: 動翼固有振動数と静翼通過励振周波数は離調されており、破損原因ではない
- (2) 起動停止に伴う低サイクル疲労
検討結果: 表1より起動は約70回であり、疲労破壊に到る繰り返し数ではない
- (3) その他の流体励振による振動応力
検討結果: 表1より対象機は一時的に2台同時運転されていた(900hr)
何らかの流体励振の可能性有

表1 運転履歴

	運転時間 合計	起動回数	2台同時 運転時間
換気ファンA	約3500 hr	約70回	約900 hr
換気ファンB (バックアップ用)	約1300 hr	約20回	

4-5. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

解析・データ分析

2台同時運転時の特性を調査するため同一機器構成の別機種で再現試験

1台当りの換気流量は約70%に低下
換気ファン作動特性のサージ領域

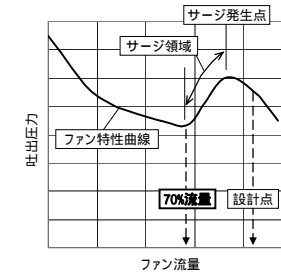


図4-4 換気ファン流量特性

4-6. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

解析・データ分析

換気ファン単体試験で吐出側ダンパを開閉
吐出ダンパを閉じてサージ領域で運転 軸振動値が上昇
80~120Hz近辺に軸振動ピークが発生
翼に何らかの流体励振が作用していると考えられる
この周波数は翼の固有振動数(120Hz)とも近い

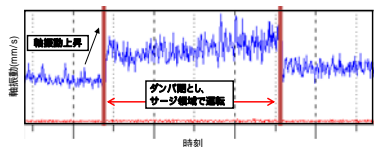
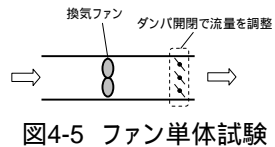


図4-6 換気ファン単体試験
(軸振動トレンド)

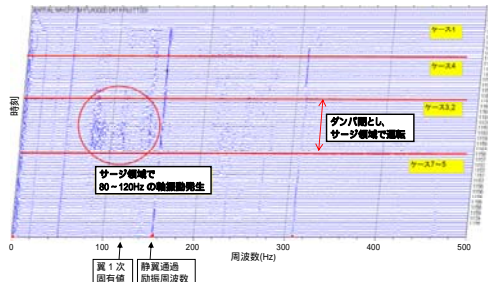


図4-7 換気ファン単体試験
(軸振動ウォーターフォール)

4-7. ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

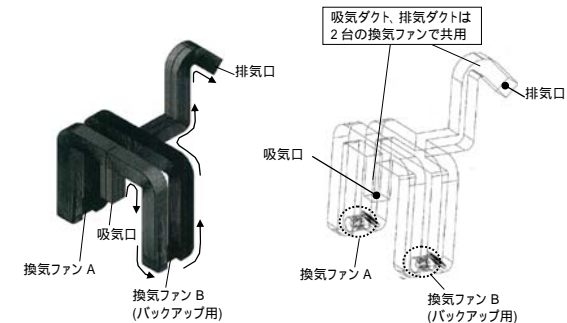
解析・データ分析

破損メカニズム

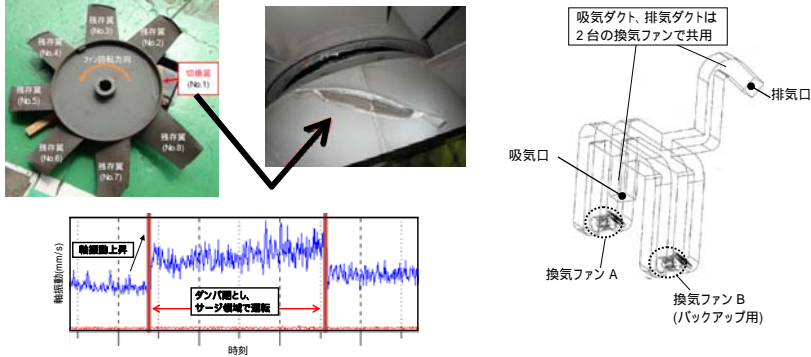
換気ファンを2台同時運転することで、運転がサージ領域となり、流体励振力発生
動翼に過大な振動応力が発生し、疲労破壊

対策・結果

換気ファンは2台同時に使用しないようにした



教訓 換気ファンの運用を変更する際は、作動特性ラインを確認する。安易な変更はしない。



ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in Turbo Machineries

5. おわりに

5-1. おわりに

【回転軸の強制振動】 ケーシング拘束によるガスタービン軸振動の突変

現象 クト拘束によるミスアライメント振動

教訓 タービンは熱伸びが大きい。熱伸びを拘束してはならない。

【回転軸の自励振動】 高圧ポンプの不安定振動

現象 隙間拡大によるラビリンスホワール

教訓 運転されるポンプでは経年変化が必ず生じる。不適合の事象につながる変化は定期点検での点検項目とし、予め許容値を設定することで問題が生じないように管理する必要がある。

【羽根車の強制振動】 ガスタービンエンクロージャ換気ファン動翼の疲労破損

現象 待運転によるサージ域のランダム流体励振

教訓 ファンの運用を変更する際は、作動特性ラインを確認する。安易な変更はしない。

END

ターボ機械の振動事例
Case Studies of Vibration in Turbo Machineries

2013/10/4

株式会社 日立製作所 日立研究所

山口 和幸