

回転機械の振動診断と信号処理

(ロータのトラブル事例と振動解析)

- (1) ベクトルモニタ for バランス
- (2) FSE DFT(FFT)...玉軸受HDD
- (3) フルスペクトル..遠心圧縮機
- (4) キャンベル線図...翼軸連成振動

松下修己 防衛大名誉教授

2011-10-14(金) 特別講演認証コミュニティ @島津・東京支社

vB11-1

(1) ベクトルモニタ トラッキングフィルタ

for
バランスング

vB11-2

ロータ振動の計測 pulse + x(t) + y(t) vB11-3

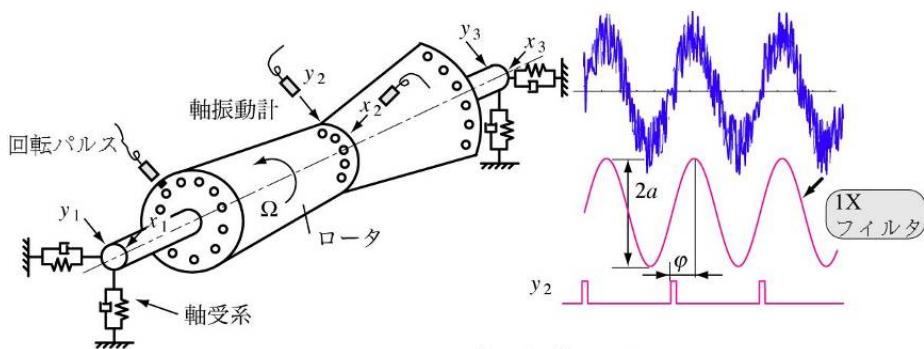


図10・1 ロータ系と振動計測

必要
数学

$$\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \quad \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

必要な数学 for ロータ振動信号処理 vB11-4

vB11-4

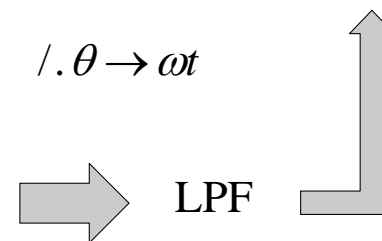
フーリエ級数 $f(t) = f_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + \dots$
 $b_1 \sin \theta + b_2 \sin 2\theta + \dots \quad / . \theta \rightarrow \omega t$

$$a_1 \cos^2 \theta = a_1 \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \quad / . \theta \rightarrow \omega t \quad \equiv a_1 / 2$$

$$b_1 \sin^2 \theta = b_1 \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \quad / . \theta \rightarrow \omega t \quad \equiv b_1 / 2$$

$$ab \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} ab \sin 2\theta \quad / . \theta \rightarrow \omega t$$

欲しい関数を掛ける
平均化



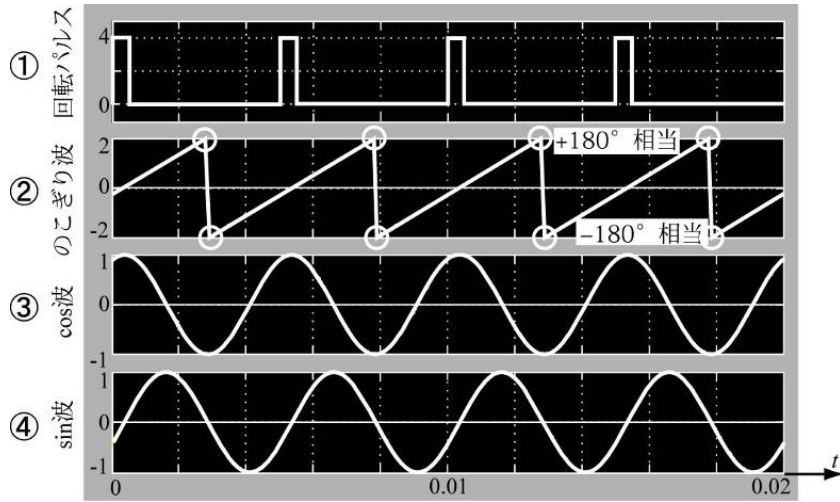


図10.2 PLL 機能と Cos / Sin 関数発生

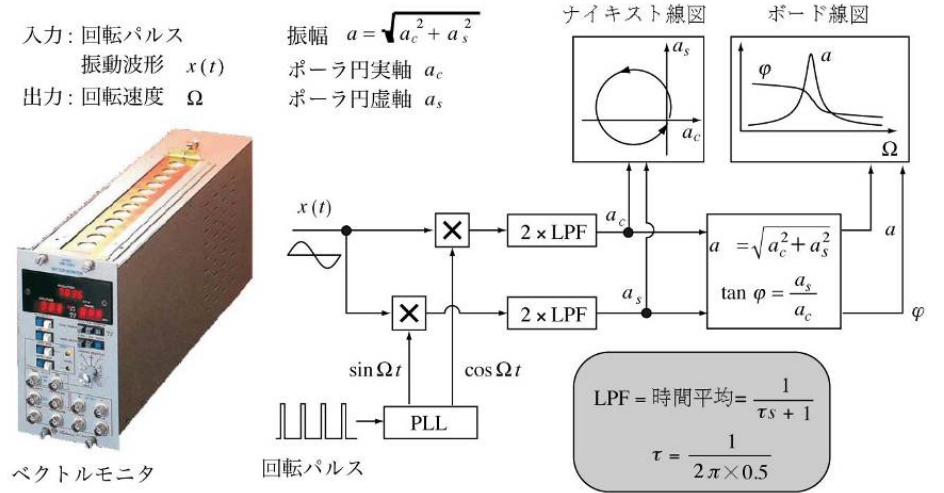


図10.5 ベクトルモニター (バランスアナライザ)

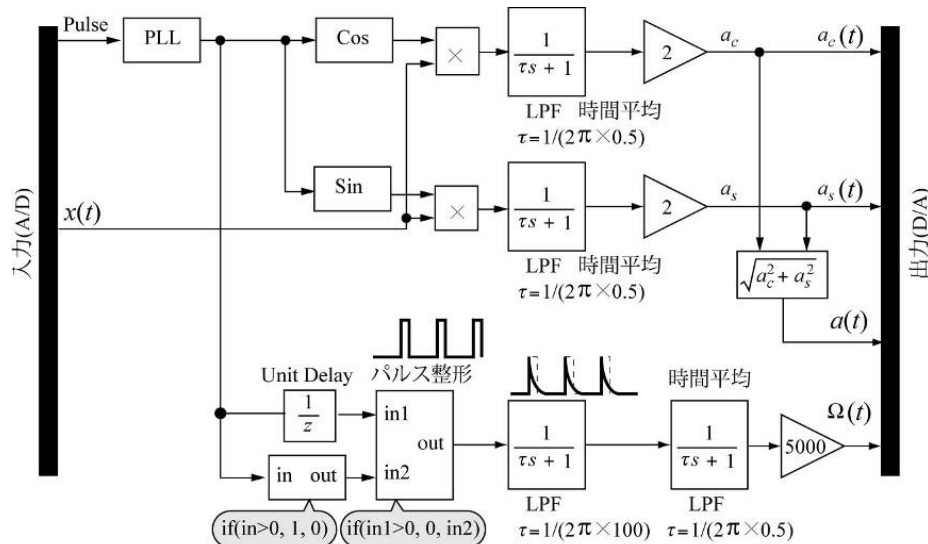


図10.6 トラッキングフィルタを用いたブロック線図

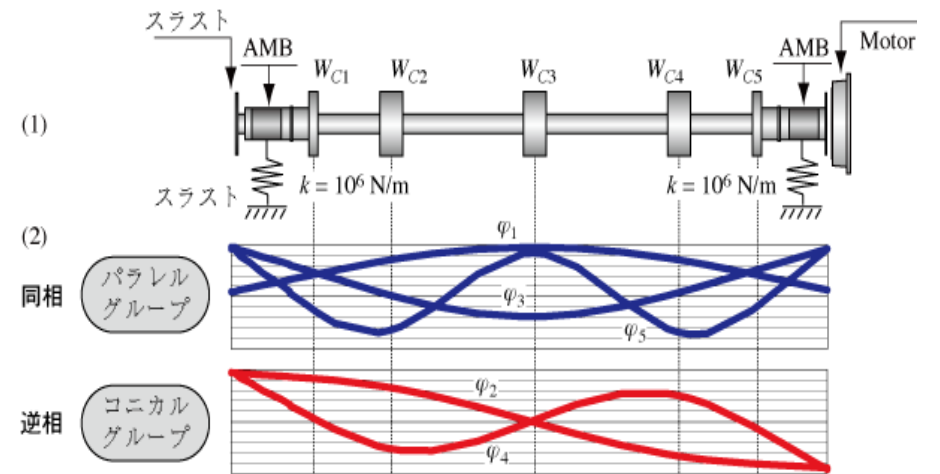
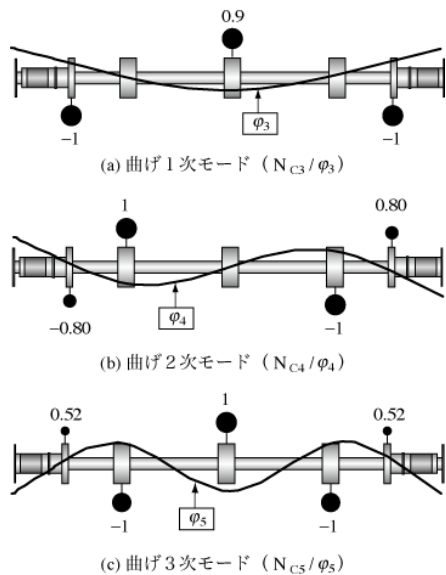


図6.42 固有モード (境界条件: AMB 剛性 $k = 約 1 \times 10^6 \text{ N/m}$)



剛体2+NC3
3面

剛体2+
NC3+NC4
4面

剛体2+
NC3+NC4+NC5
5面

図6・48 釣合わせおもりの比

信じよ
「Pairおもり」

影響係数の
振動センサは
1つ

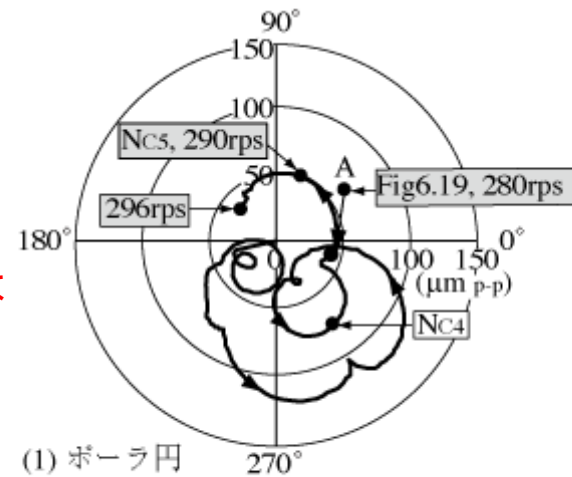


図6・49 曲げ3次モード危険速度 N_{C5} の通過試験

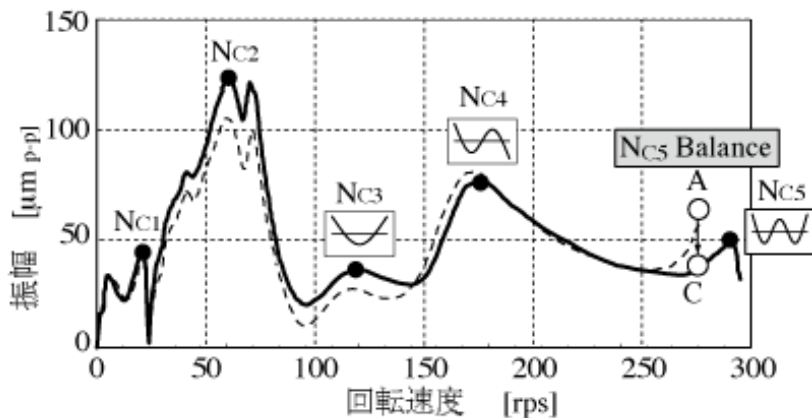
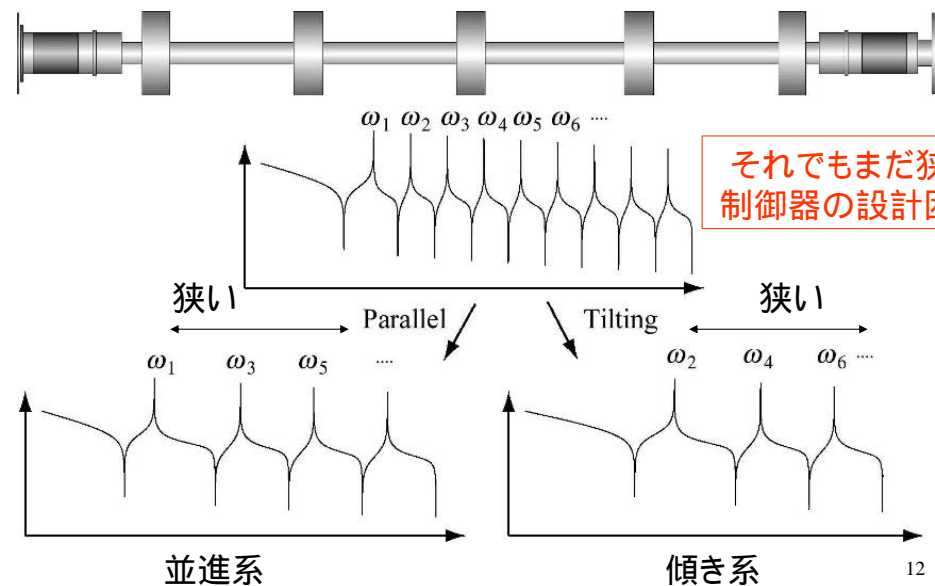
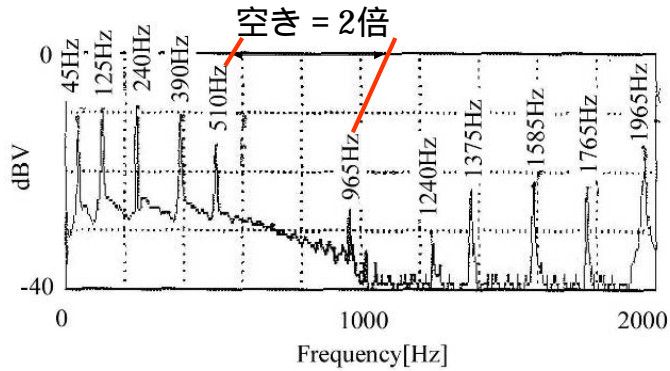


図6・49 曲げ3次モード危険速度 N_{C5} の通過試験



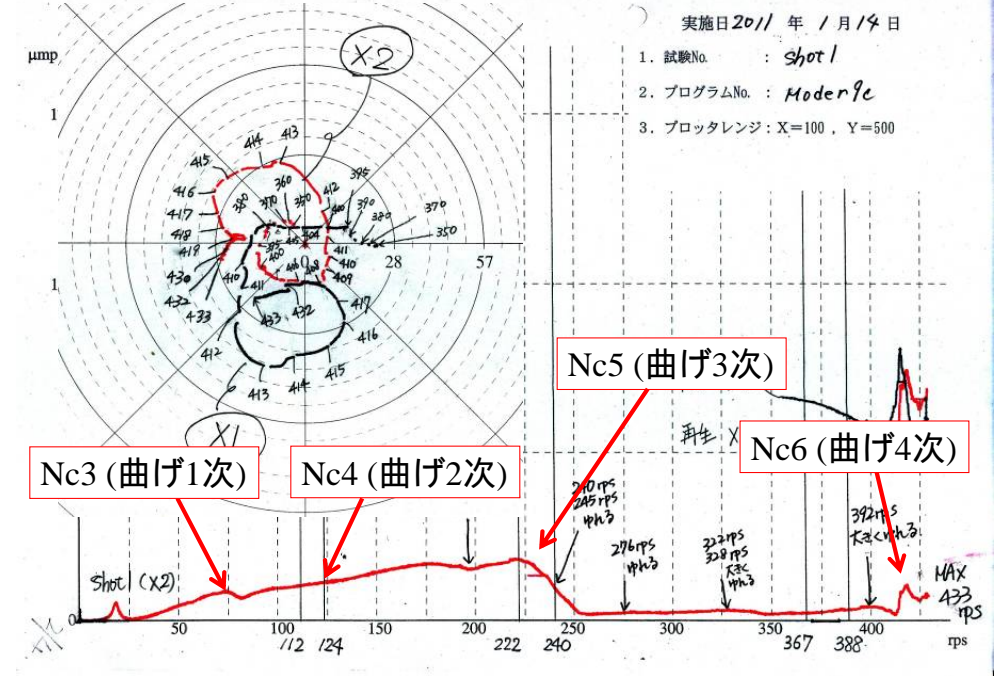
インパルステスト

vB11-13



回転試験結果

vB11-14



油膜軸受(異方性)のだ円軌跡の共振

vB11-15

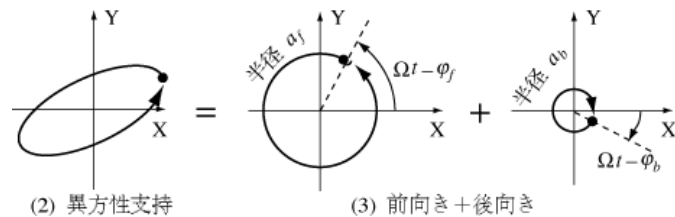


図10・7 ホワール軌跡

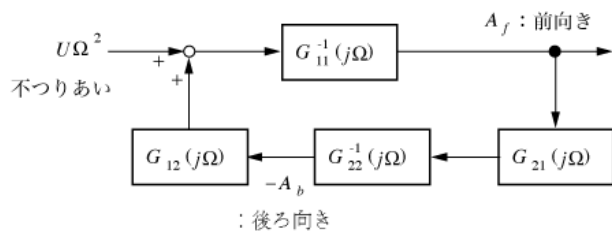


図10・6 不釣りあい振動のブロック線図 (異方性支持)

前向き不釣り合い振動の抽出回路

vB11-16

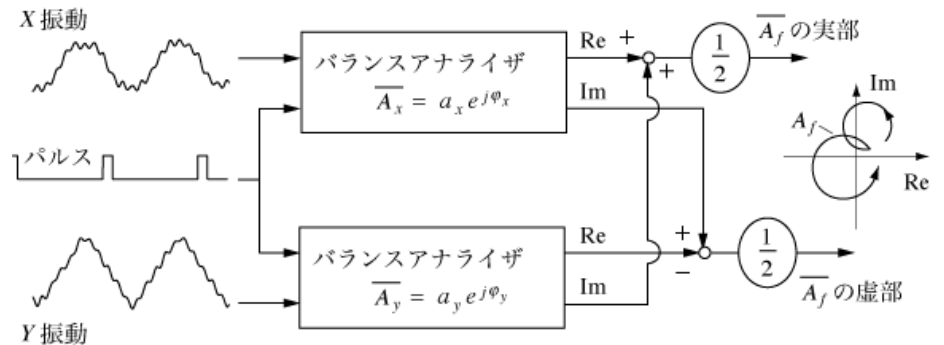


図10・8 バランスアナライザ2台を使う方法

$$\bar{A}_f = (\bar{A}_x - j\bar{A}_y) / 2$$

$$= \frac{1}{2} \{ \text{Re}[\bar{A}_x] + \text{Im}[\bar{A}_y] \} + j \frac{1}{2} \{ \text{Im}[\bar{A}_x] - \text{Re}[\bar{A}_y] \}$$

前向き不釣り合い振動に注目したバランス例 vB11-17

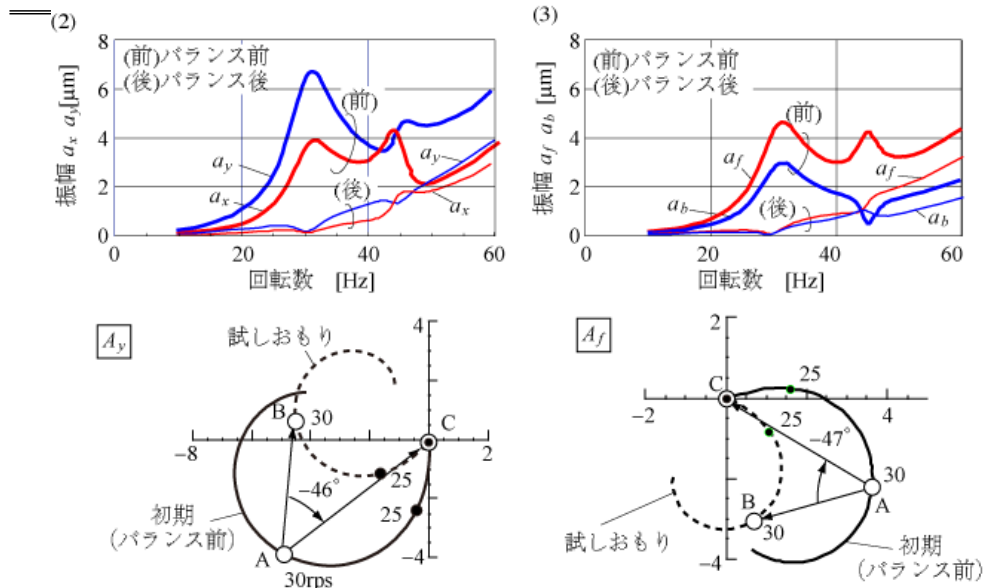


図10-10(2)(3) 位相シフトを使う方法

(2)

FFT

転がり軸受に起因する振動@HDD

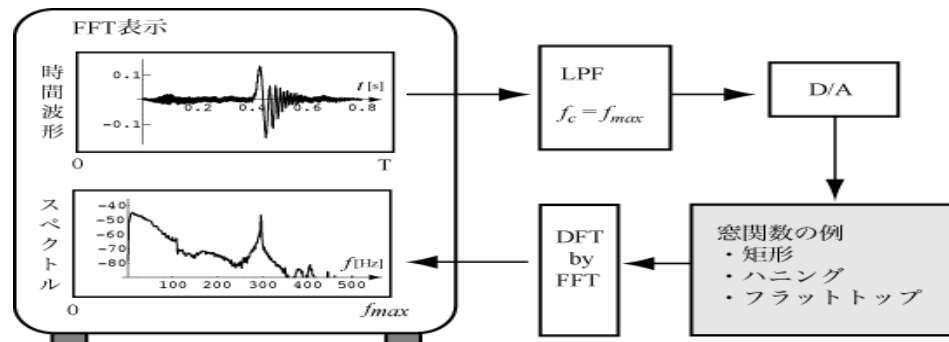
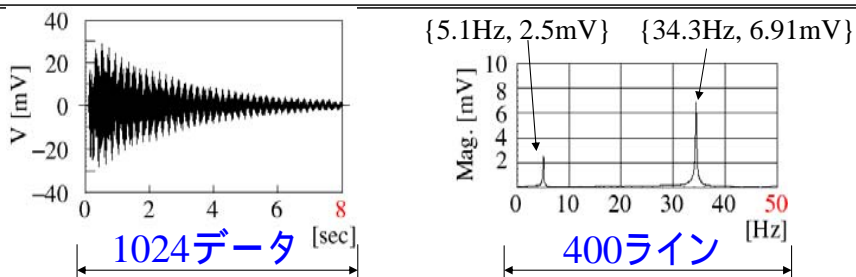


図10-25 FFT解析器の信号処理

vB11-18

FFT Analyzer: 高速フーリエ変換

vB11-19



データ数 $N=1024$
窓時間 $T=8$ (s)

サンプリング時間 $T_s = \frac{T}{N} = \frac{8}{1024}$ (s)
サンプリング周波数 $1/T_s = 128$ (Hz)

周波数分解能 $\Delta f = 1/T = 1/8 = 0.125$ (Hz)

ライン数 $L = \frac{N}{2.56} = \frac{1024}{2.56} = 400$ ライン

最高周波数 $f_{max} = \Delta f \times L = 50$ Hz

÷ 2.56

転がり軸受の励振周波数

vB11-20

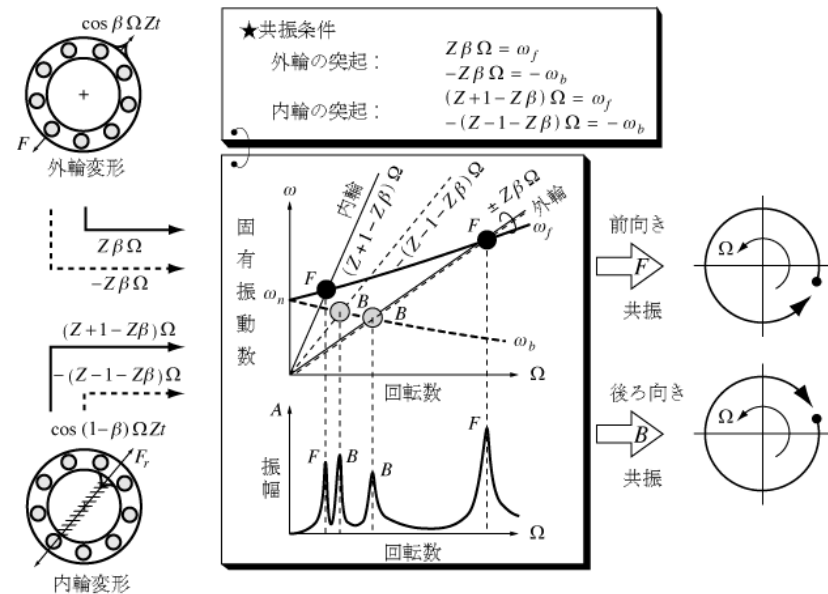
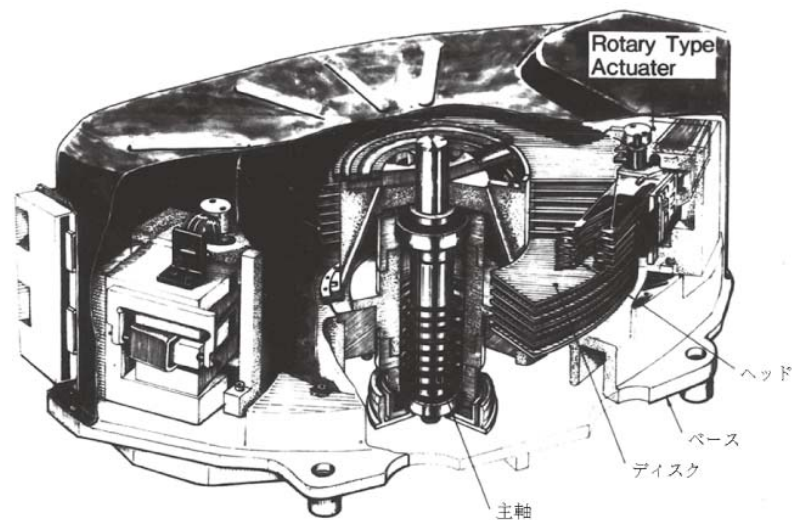
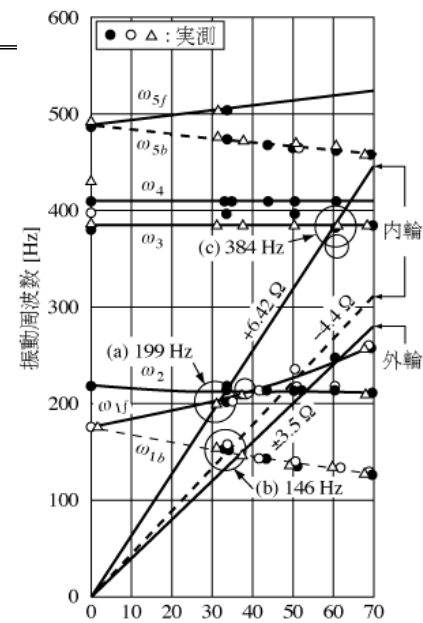


図6-25 玉通過振動



ディスク = 14" (357φ) × 1.9t × 13 枚 Ω = 3600 rpm, 600 MB

図6・26 旧HDD (ロータリ形アクチュエータ)



HDDキャンベル線図
と
振動対策

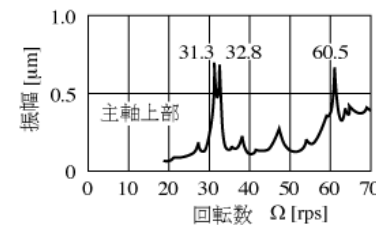


図6・27 HDDのキャンベル線図

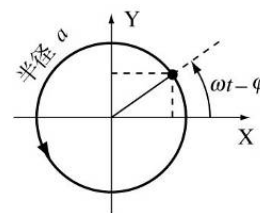
(3)
フルFFT

for

前向き振動と後ろ向き振動診断

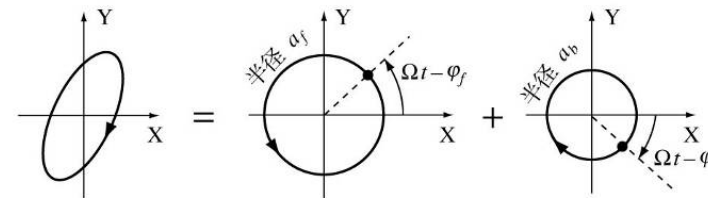
Orbit: 円ふれまわり

だ円ふれまわり



(1) 等方性支持

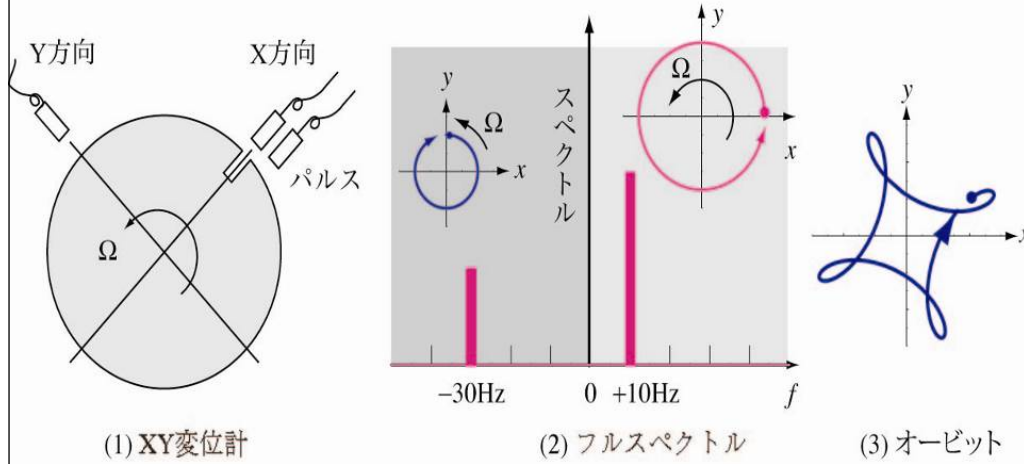
だ円ホワール
とは
前後円ホワールの和



(2) 異方性支持

(3) 前向き+後ろ向き

図10・9 ホワール軌跡



(1) XY変位計

(2) フルスペクトル

(3) オービット

図 10・45 フルスペクトルと振れまわり

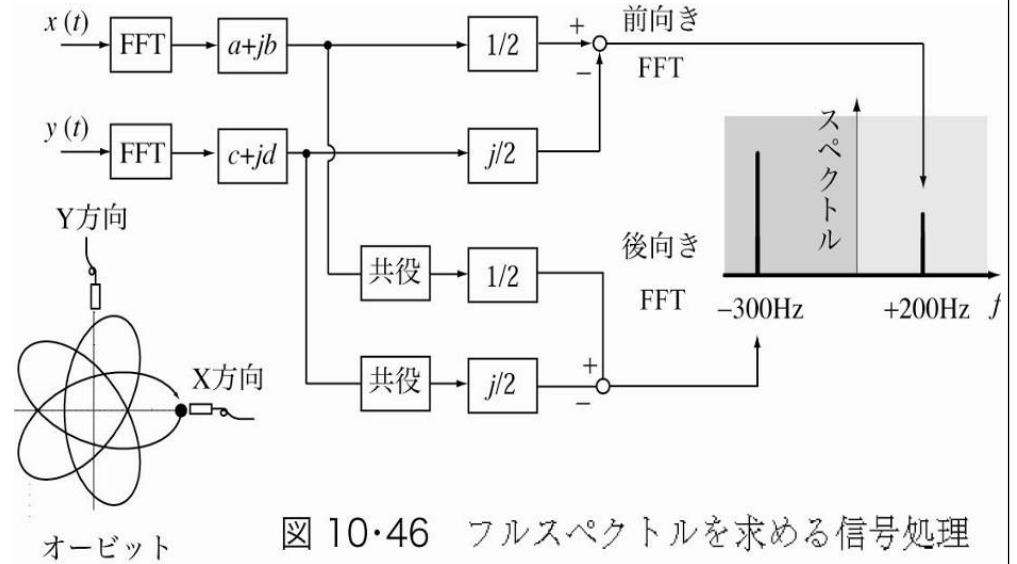


図 10・46 フルスペクトルを求める信号処理

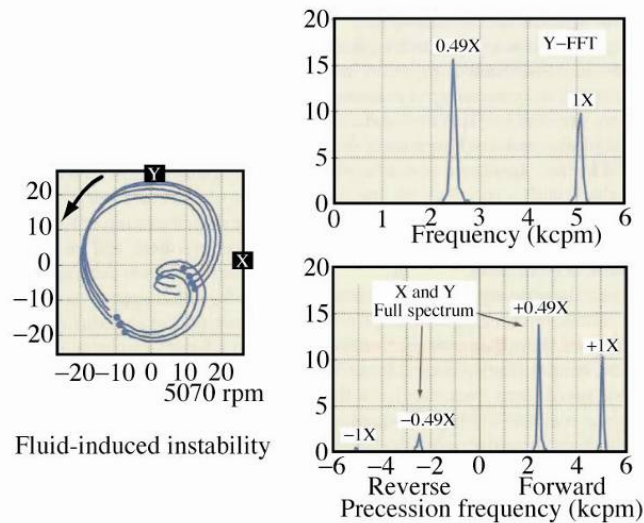


図 10・48 オイルホイップの診断

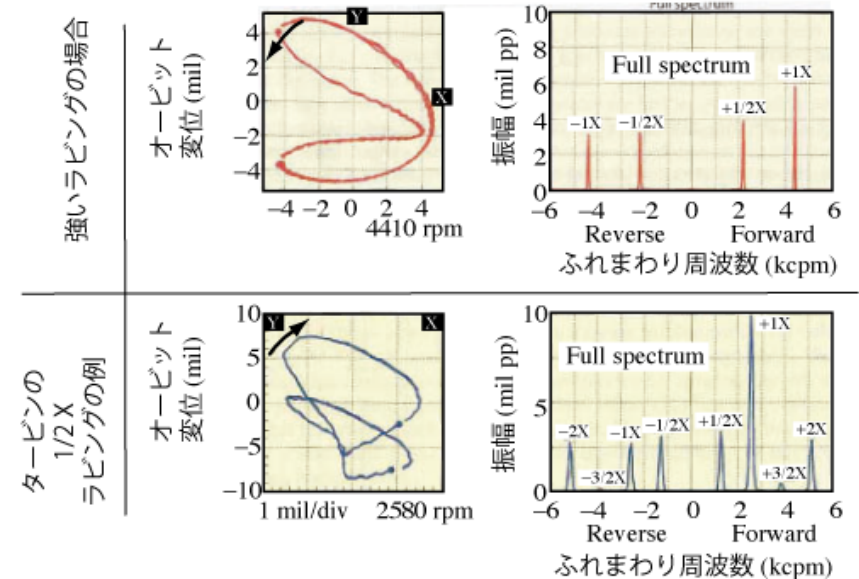


図 10・45 ラビング振動診断 (Forward=前向き Reverse=後ろ向き)

4 orbitに対応するfull spectrumを線で結べ。

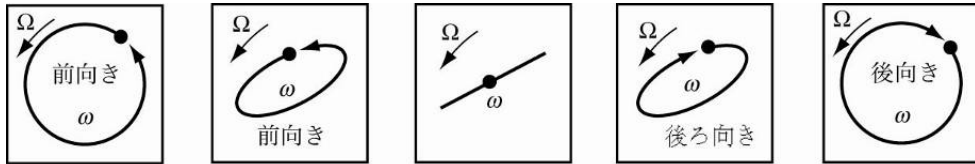


図 10・49 振れまわりオービット (●印, スタート)

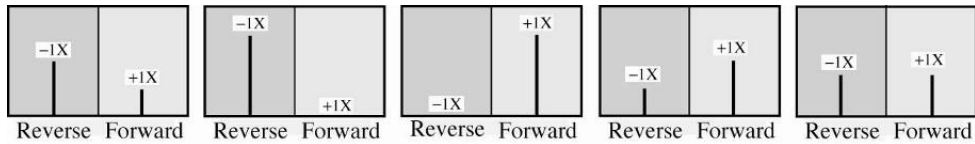
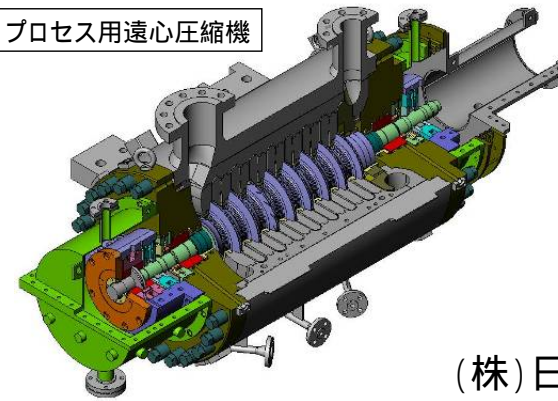


図 10・50 フルスペクトル (Forward=前向き Reverse=後ろ向き)

圧縮機ロータの高速回転試験における
カップリングの異常振動

プロセス用遠心圧縮機



(株)日立プラントテクノロジー
気体機設計部
柳原 一智

2011.09.06 v_BASE

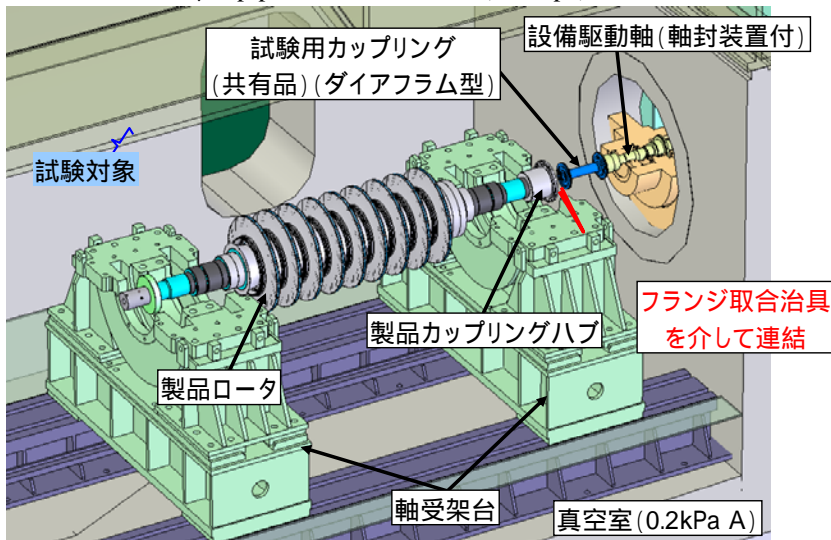
© Hitachi Plant Technologies, Ltd. 2011. All rights reserved.

1.遠心圧縮機ロータの高速回転試験

vB11-31

ロータ単体の軸振動確認試験 (API617で規定)

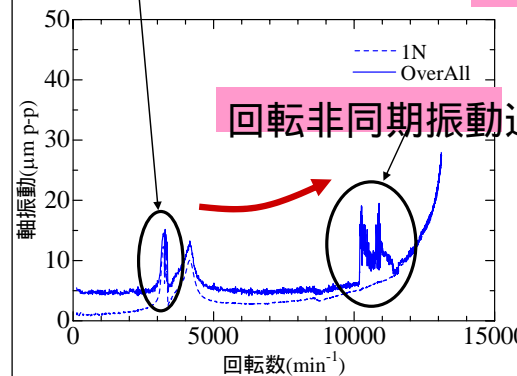
- ・試験回転数 トリップ回転数にて最低5分間保持
- ・クライテリア 軸振動: 25(μm p-p O/A)、軸受振動: 1(mm/s pk)



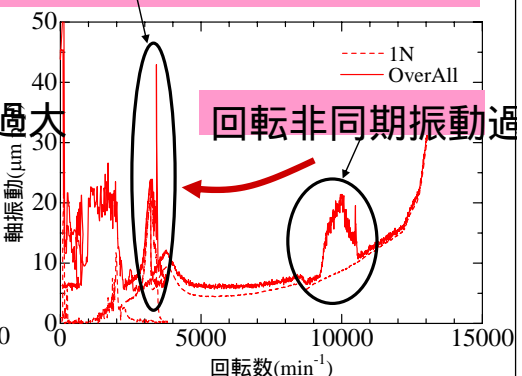
2.発生した現象

共振点付近で軸振動トリップ
試験用CPLG
ダイヤフラム部で破断

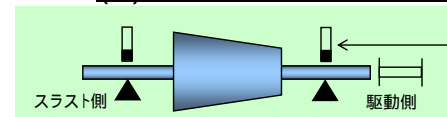
3200min⁻¹付近で共振



(1)昇速時ボード線図



(2)降速時ボード線図

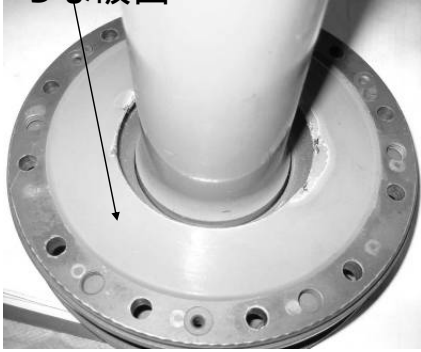


駆動側軸受位置の振動計で計測

2.発生した現象

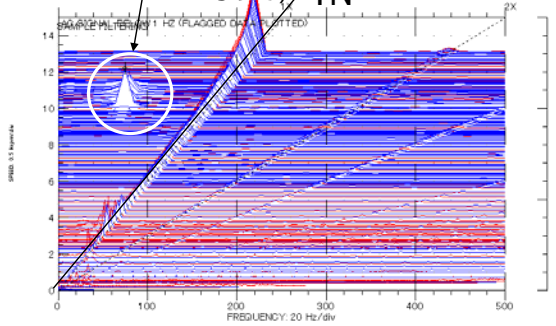
vB11-33

ねじり皺は無く、まさ
らな破面



(3)カップリング破面

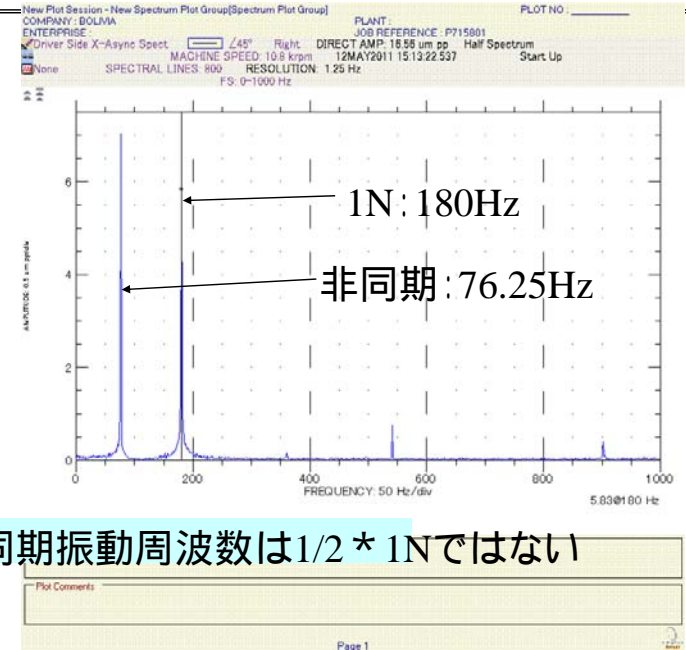
回転非同期振動
(60~75Hz、回転数に
よって可変) 1N



(4)カスケード図

非同期振動補足資料1

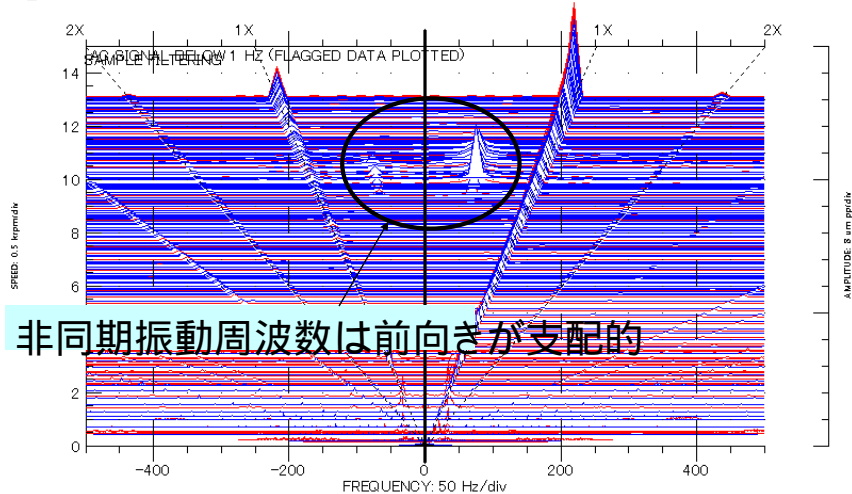
vB11-34



非同期振動補足資料2

vB11-35

Driver Side Y-Sync Wavefo $\angle 45^\circ$ Left Full Spectrum
Driver Side X-Sync Wavefo $\angle 45^\circ$ Right
From: 12May2011 14:11:45 To 12MAY2011 16:21:10 Start Up 37 rpm
None SPECTRAL LINES: 1024 RESOLUTION: 0.039 Hz
FS: 0~39.8 Hz SMPR: 128/16



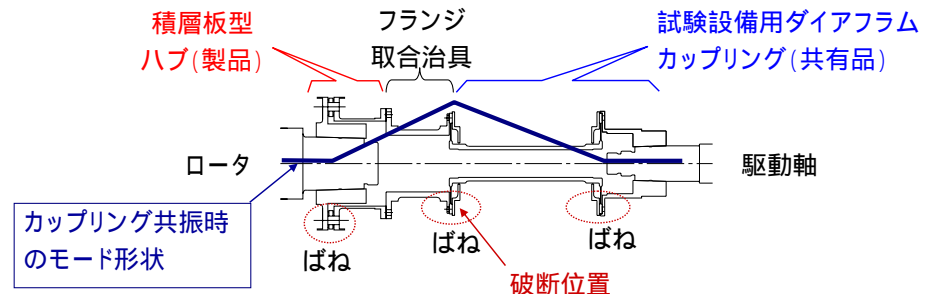
Full Spectrum Cascade

3.原因推定

vB11-36

【状況分析】

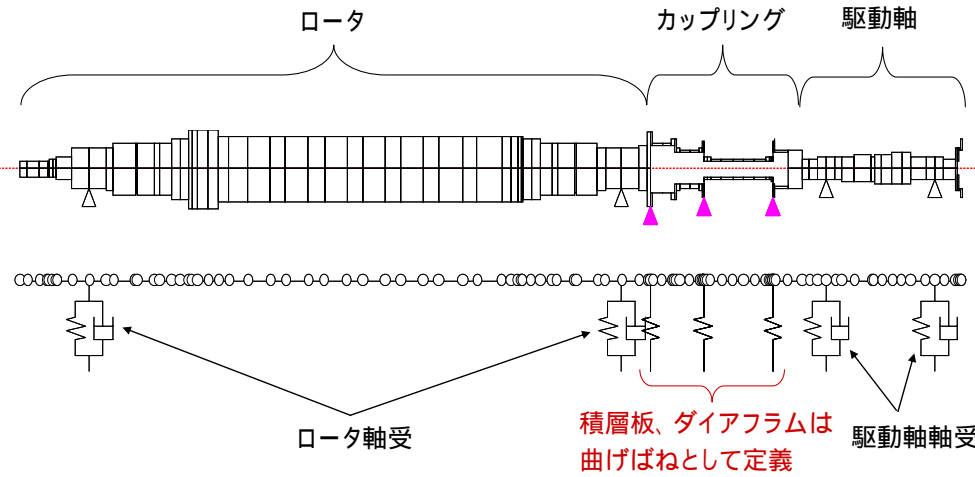
- 1)ロータの曲げ1次危険速度は 4100min^{-1} であり、 3200min^{-1} に危険速度は存在しない。
- 2)カップリングに過度の曲げ荷重または引張圧縮荷重が作用した。(ねじりが原因ではない)
- 3)通常はロータ側ハブはリジッドだが、本事例はロータ側ハブが積層板型であった。



試験用カップリング部を起因とする共振が原因であると推定

4-1 解析モデル

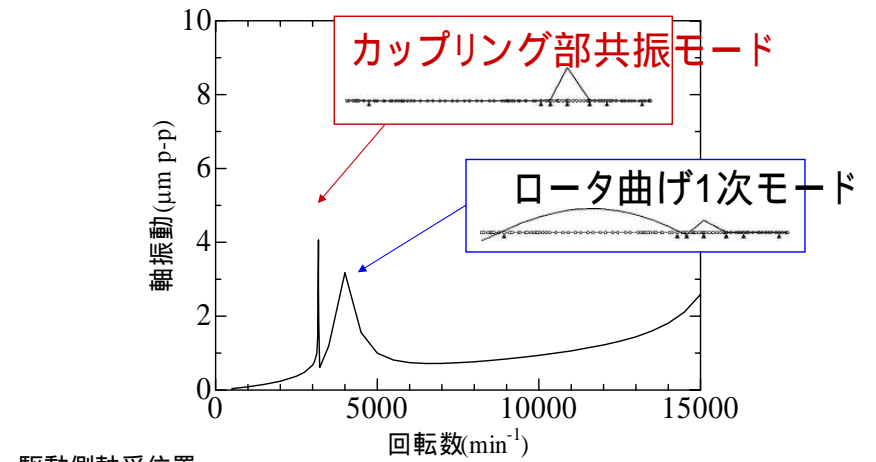
ロータ、カップリング、駆動軸のトレーンで軸振動解析を実施



(1)軸振動解析モデル

4-2 解析結果

3180min⁻¹カップリング部が振動過大となる危険速度が現る。

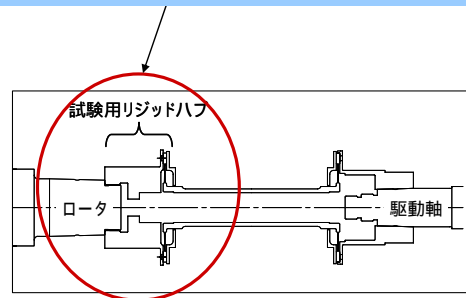


(2)解析結果;アンバランス応答線図

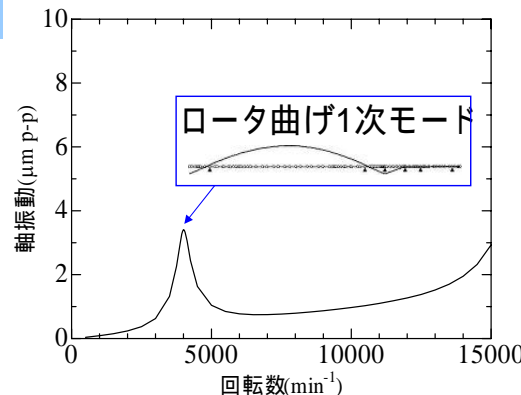
5-1 対策および解析結果

製品の積層板型ハブを使用せず
試験用リジッドハブを使用

ロータ曲げ1次モードのみ現れる



(1)対策後カップリング部

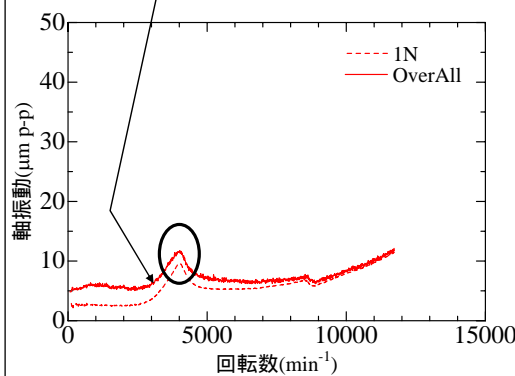


(2)解析結果;アンバランス応答線図
駆動側軸受位置

5-2 対策後試験結果

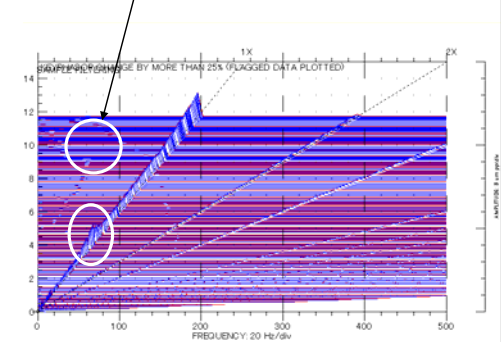
カップリングの共振:発生せず

回転非同期振動:発生せず



(1)ボード線図

駆動側軸受位置の振動計で計測



(2)カスケード図

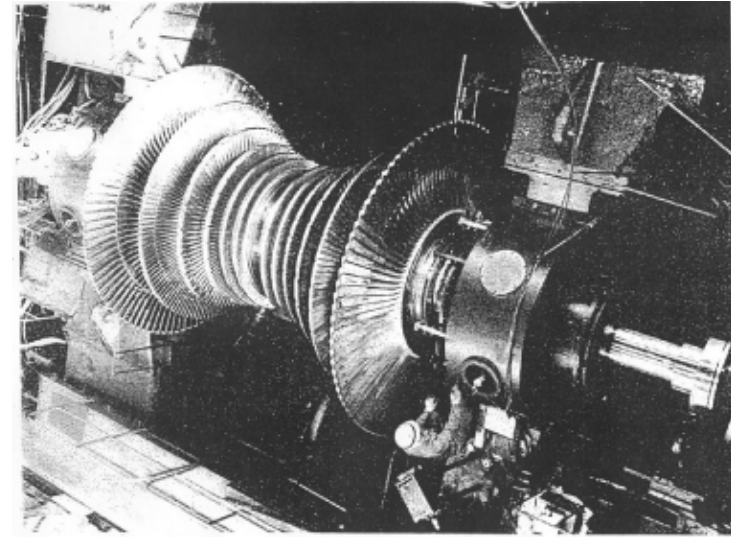


図9-16 タービン軸と長翼

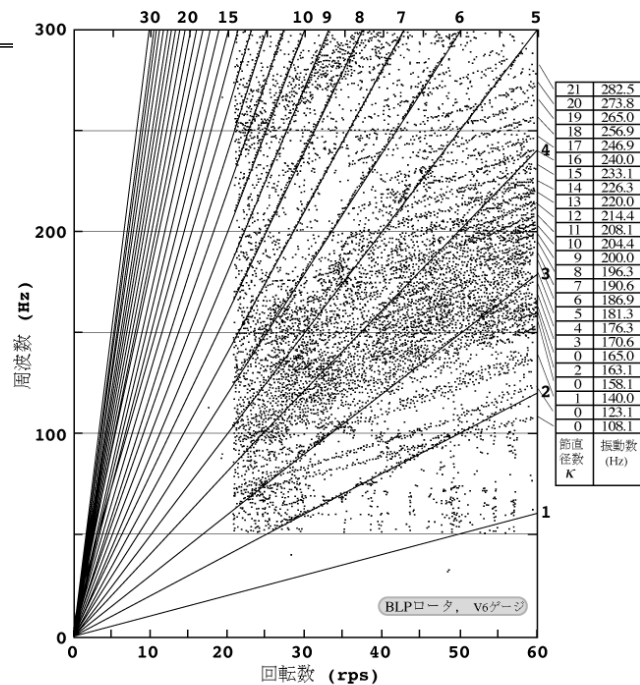
(4)
キャンベル線図

Campbell (GE) さんの線図

vB11-41

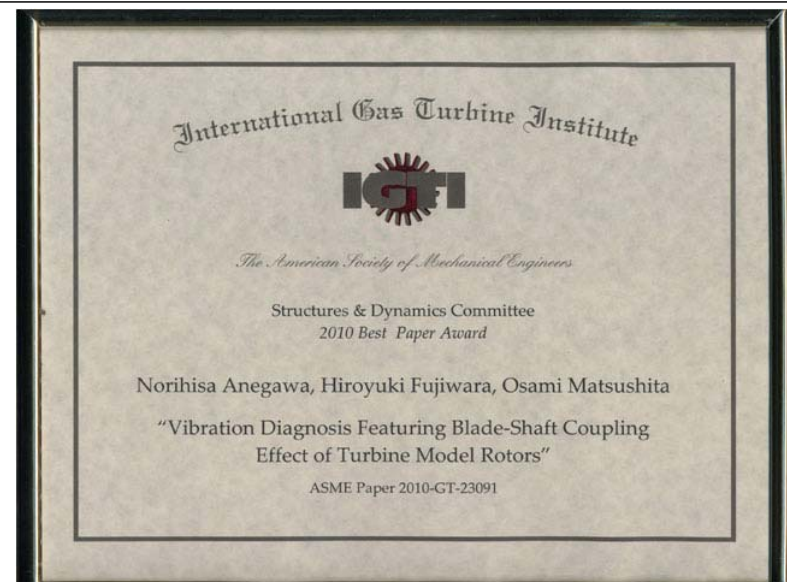
翼軸連成振動解析(姉川) by キャンベル線図 vB11-44

vB11-43



タービン翼
の
キャンベル線図

図9-26 60Hz 33.5インチ 翼キャンベル線図

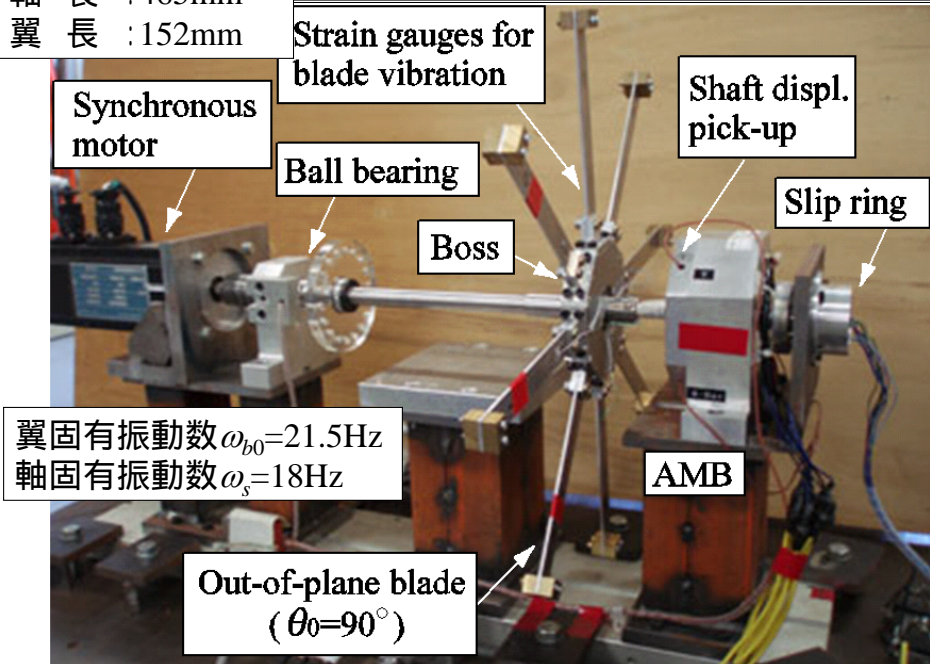


ASME論文賞@TurboExpo2011, Vancouver

質量 : 2.6kg
 軸長 : 465mm
 翼長 : 152mm

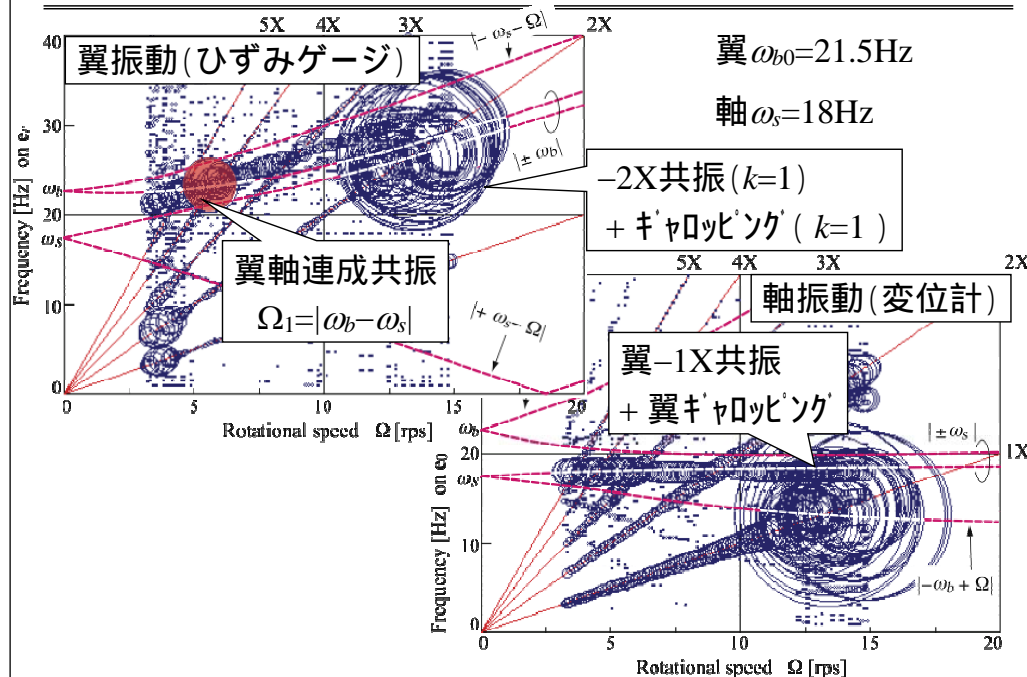
実験装置(面外翼)

vB11-45



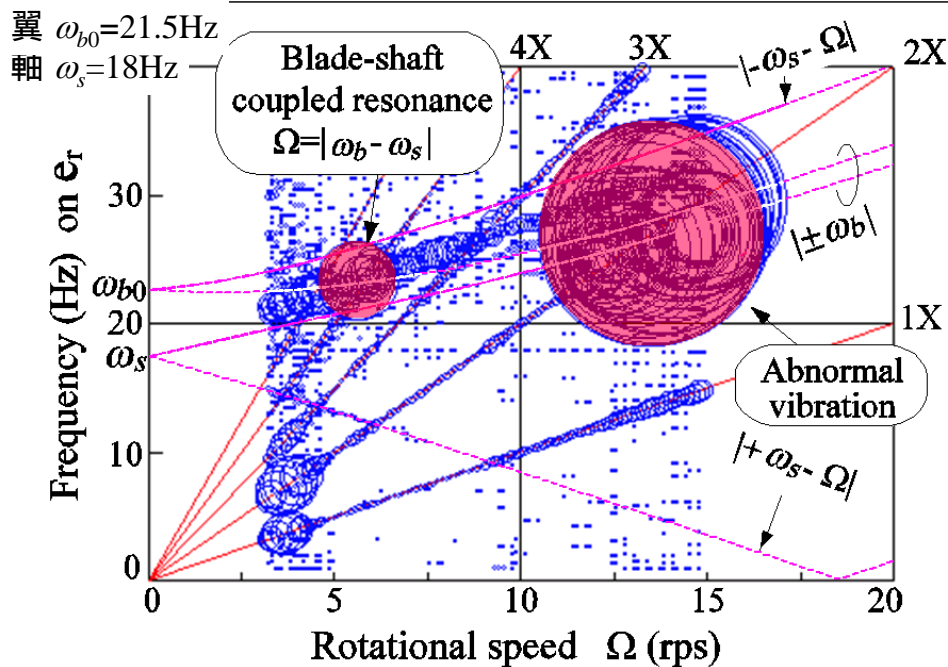
面外翼系のキャンベル線図(大気中)

vB11-46



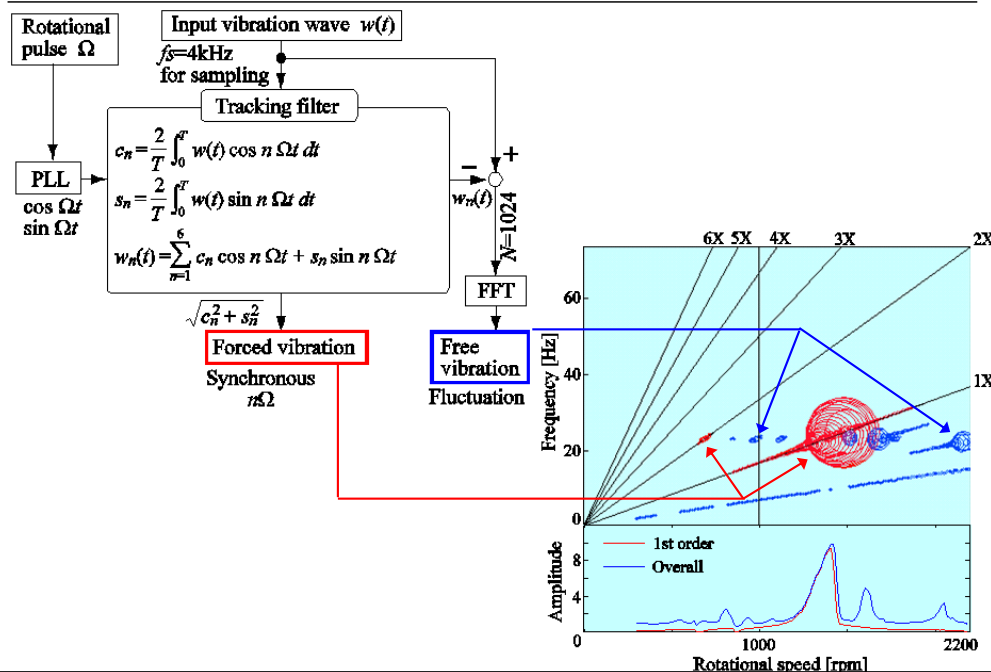
実験結果 面外翼 翼振動

vB11-47



防大キャンベル線図の特徴

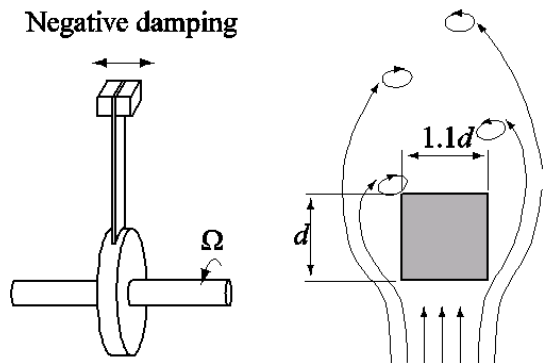
vB11-48



自励振動の考察

vB11-49

Negative damping



ギャロッピング

参考文献

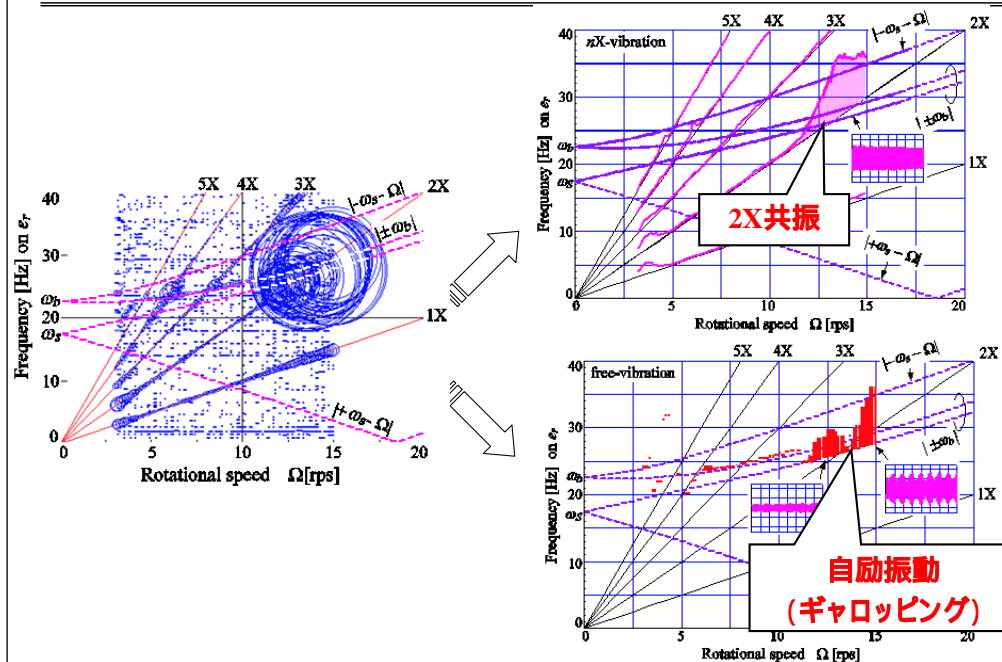
事例に学ぶ流体関連振動第2版(2008)p.84

日本機械学会編

技報堂出版

面外翼の強制/自由振動成分

vB11-50

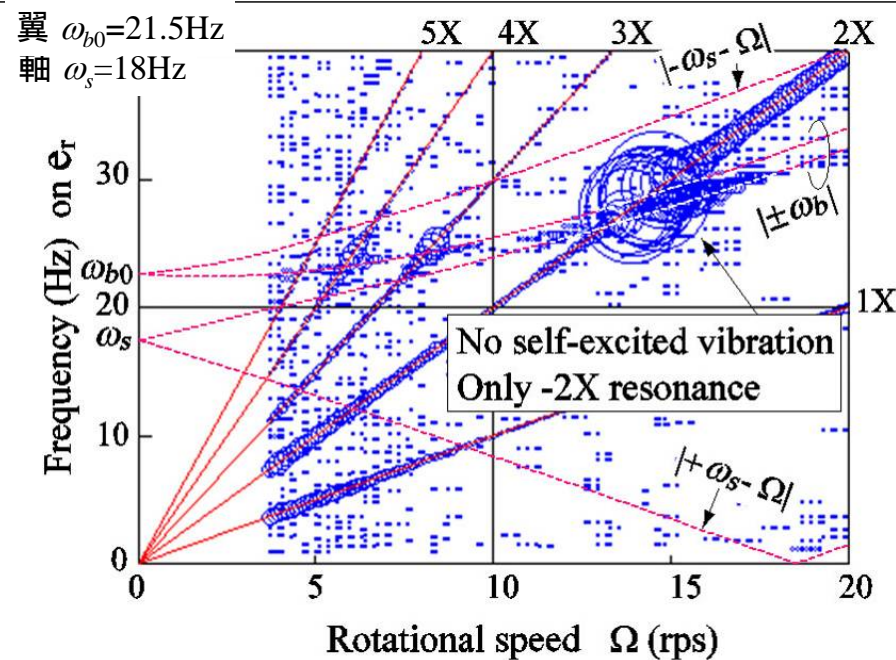


真空中の回転試験

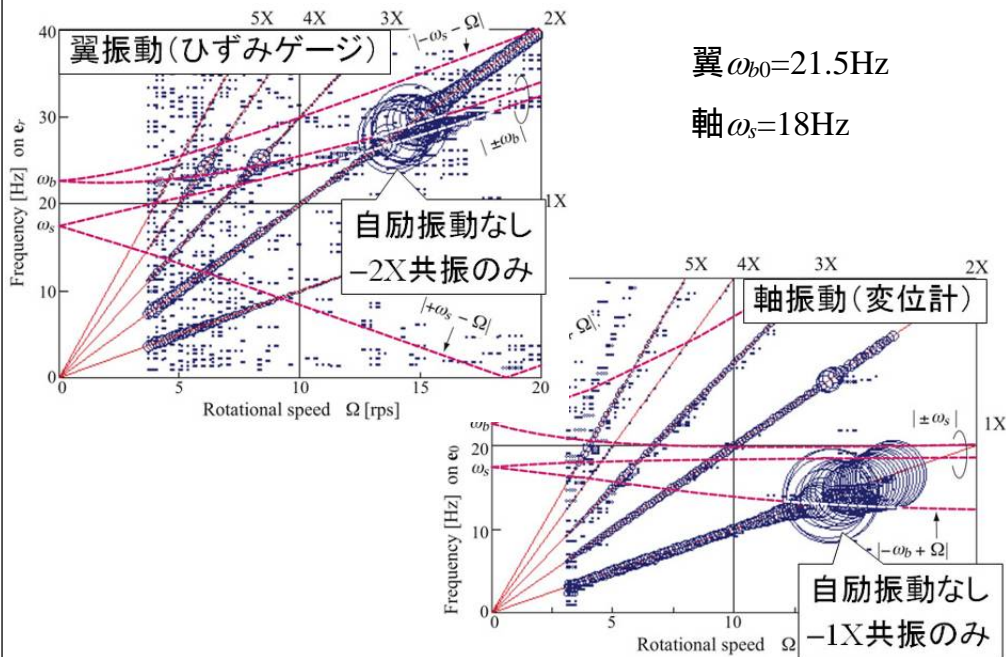
vB11-51



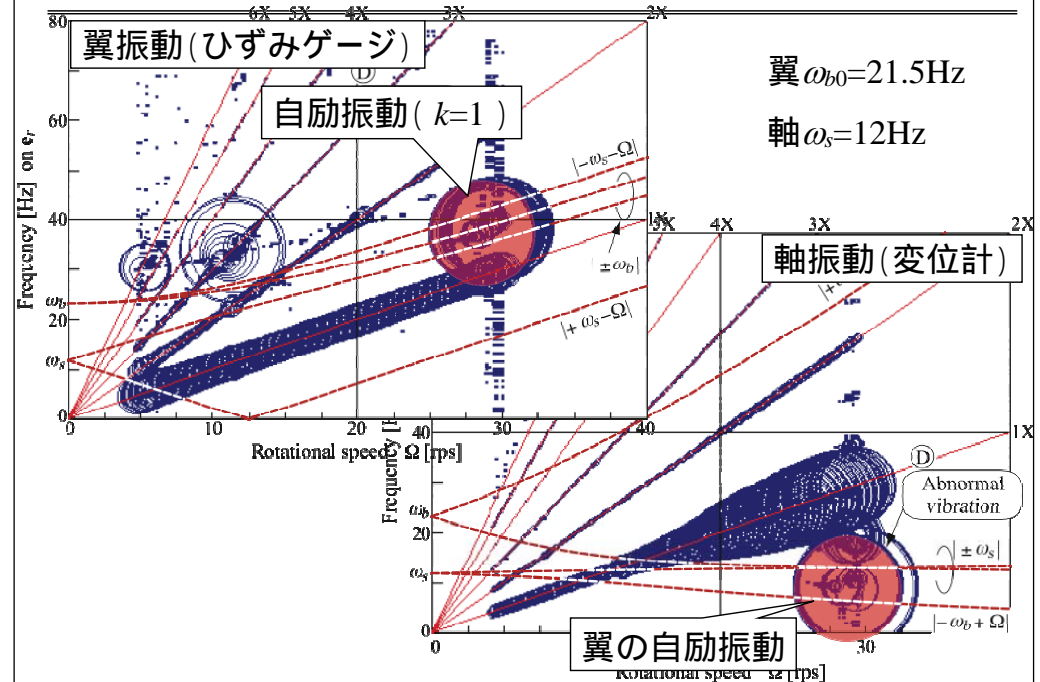
実験結果 面外翼 翼振動(真空中) vB11-52



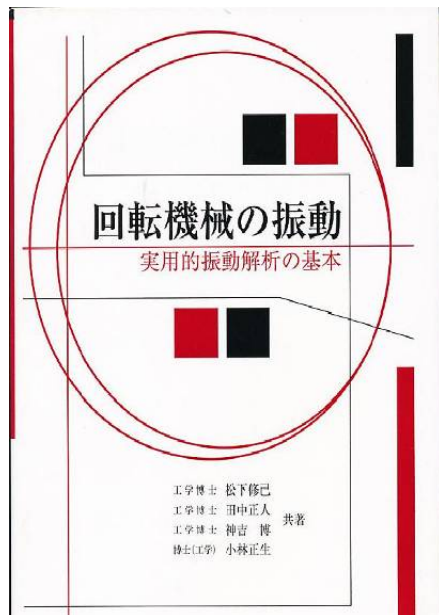
面外翼系のキャンベル線図(真空中) vB11-53



45°翼系のキャンベル線図(真空中) vB11-54



R1: 回転機械の振動、コロナ社, 2009.10 vB11-55



R2: 続編, 2012

1. 概論
2. 油膜軸受
3. 油膜系不釣り合い振動
4. 油膜系安定性
5. 転がり軸受
6. 磁気軸受
7. 強制振動問題
8. 安定性問題
9. ねじり振動
10. 信号処理
11. 振動診断

Thank you. vB11-56

