

状態監視振動診断技術者コミュニティ第 13回ミーティング

2023年10月13日 | 事業委員会 対面開催 | 資格認証/認定試験 主催

2023.10.13(金)

題目: 周期構造のモータ・ロータ系の共振現象

防衛大学校 名誉教授 松下修己
osami@tiger.odn.ne.jp

v_BASE Dataの紹介

要旨 ターボ機械の翼が、静翼側との隙間に発生する周方向圧力分布で加振され、共振する現象を動静翼干渉と呼び旧知の振動問題である。一方、モータロータ・ステータ間の隙間の周方向電磁力分布に起因するモータ構造共振は電磁力共振と呼ばれ、音響問題として知られている。両者は、分野は違うが、いずれも周期構造のロータ系共振として、同じ力学で解釈できる。各種分野に対し統一的な解釈として「この横糸」について事例にて説明

1

回転機械の振動

松下、田中、小林、神吉



目次

1. 回転機械の振動問題概説
2. 単振動系の振動
3. 多自由度系の振動とモード解析
4. モード合成法と「擬モーダル法」
5. 不釣り合いとバランス
6. ジャイロ効果と振動特性
7. ロータ軸受系の特性近似評価
8. 開ループと振動特性近似評価
9. 慣性座標系から回転座標へ

10. 翼・羽根車系の振動解析

動静翼干渉系の共振

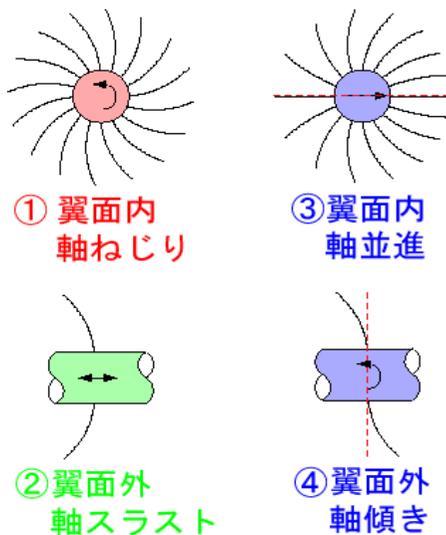
11. ロータ系の安定性問題
12. 軸振動解析ソフトMyROT

M1-2

翼軸連成振動

表 10-4 回転軸と翼との連成

ロータ軸振動		翼・円板振動 (κ = 節直径数)		
		$\kappa=0$	$\kappa=1$	$\kappa=2$
曲げ	並進	—	③	—
	傾き	—	④	—
ねじり		①	—	—
スラスト		②	—	—



タービン翼固有振動数: キャンベル線図

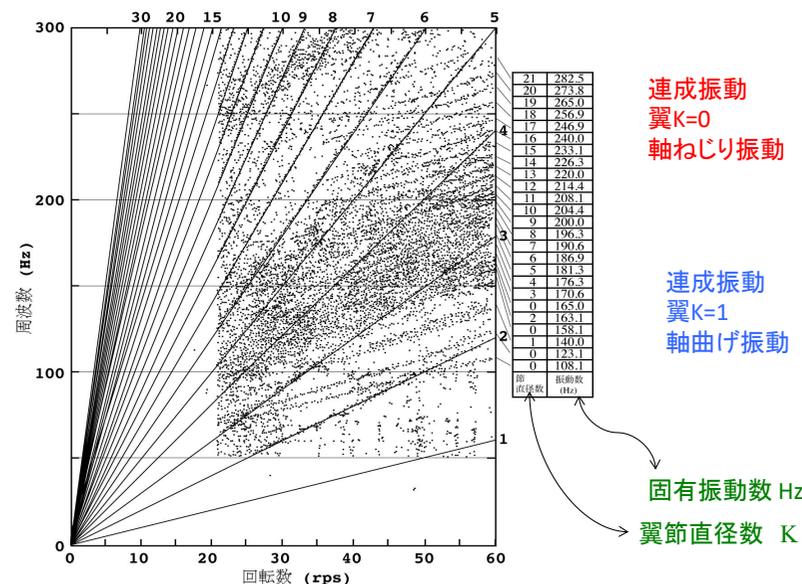


図9-29 60Hz 33.5インチ 翼キャンベル線図 (ズーム分析, BLP, V6ゲージ)

翼・羽根車の振動解析

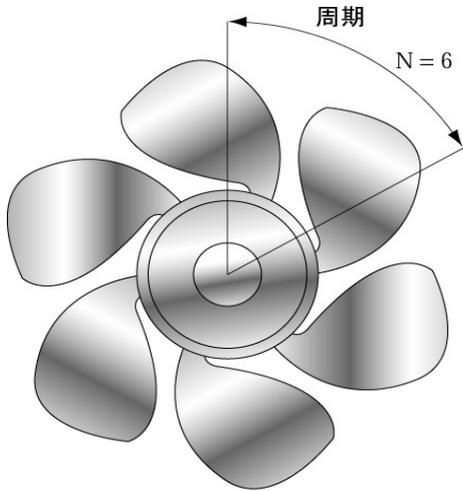


図 10-7 周期構造物

M1-5

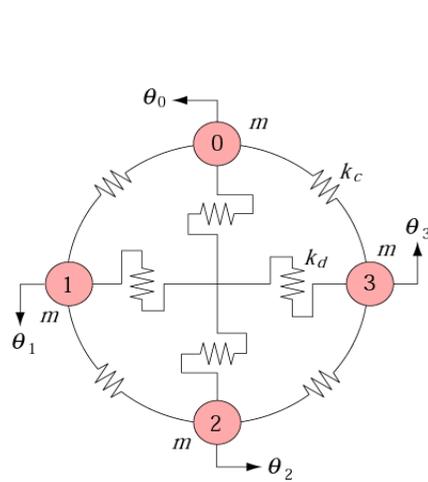


図 10-8 4翼モデル

固有振動数とモード N=4

$\kappa=0$

$\omega_0^2 = k_d/m$

$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} @ \kappa=0$

$\kappa=1,3$

$\omega_1^2 = (k_d + 2k_c)/m$

$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} @ \kappa=1$ $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} @ \kappa=3$

$\kappa=2$

$\omega_2^2 = (k_d + 4k_c)/m$

$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} @ \kappa=2$

M1-6

Cyclic行列のモード次数拡大表現 N=4本翼

$\kappa=0$

$\kappa=1/3$

$\kappa=2$

$\theta_k = k \times \frac{2\pi}{N}$

$M^* = W^t M W$

$K^* = \bar{W}^t K W$

$F^* = \bar{W}^t F$

K=0

K=4

K=1

K=5

K=2

K=6

K=3/1

K=7

$\theta_k = k * 90^\circ$

図 10-8 4翼モデル

拡大モード次数 K

Cyclic行列のモード次数拡大表現 N=8本翼

$\theta_k = k \times \frac{2\pi}{N}$

$M^* = W^t M W$

$K^* = \bar{W}^t K W$

$F^* = \bar{W}^t F$

K=0

K=1,7

K=2,6

K=8

K=9,15

K=10,14

K=3,5

K=4

K=12

図 10-11 固有モード

拡大モード次数 K

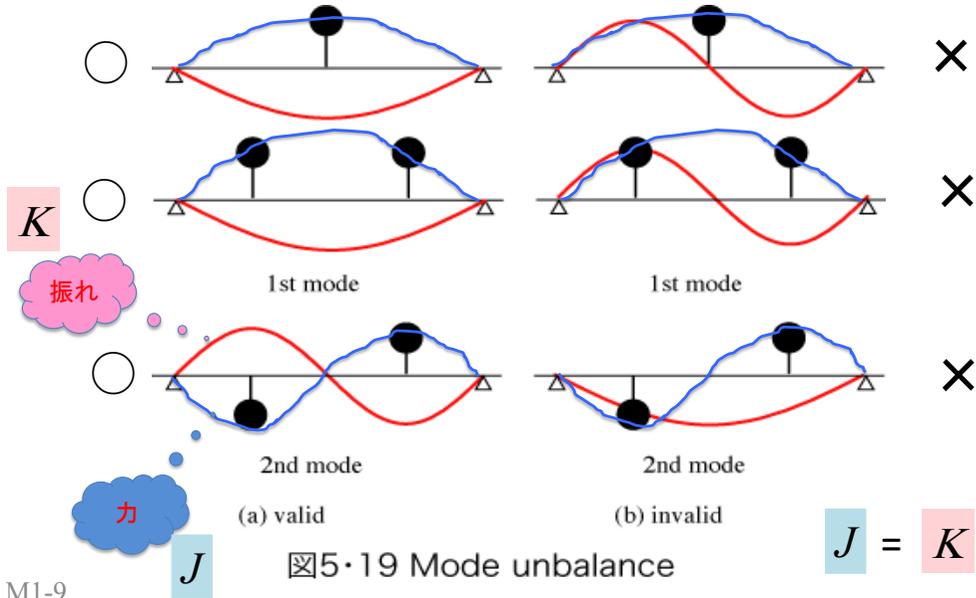
$\theta_k = k * 45^\circ$

$\epsilon_k = e^{j\theta_k}$

$\phi_k = \begin{bmatrix} \epsilon_k^0 \\ \epsilon_k^1 \\ \epsilon_k^2 \\ \epsilon_k^3 \\ \epsilon_k^4 \\ \epsilon_k^5 \\ \epsilon_k^6 \\ \epsilon_k^7 \end{bmatrix}$

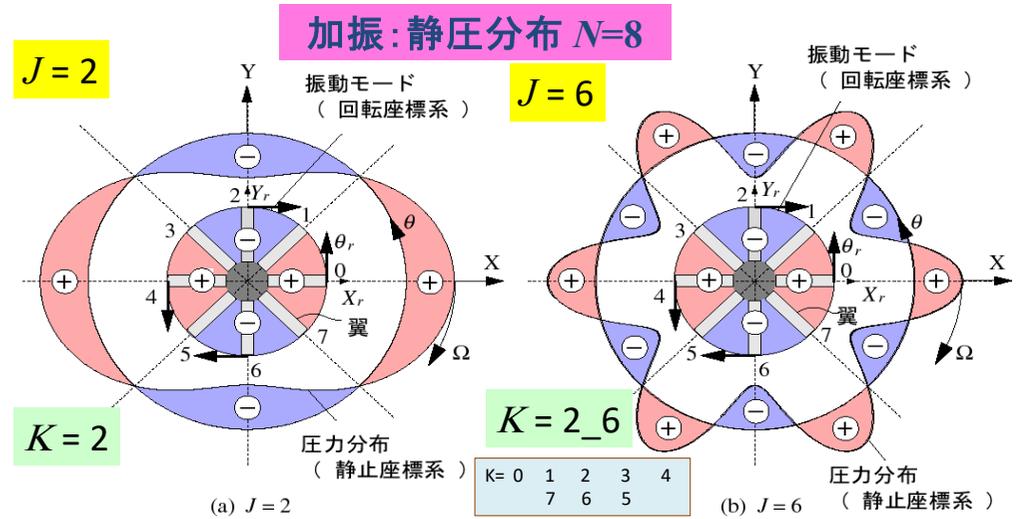
例: N=8 $\theta_k = k * 45^\circ$

モード励振力 = $\Sigma(\text{モード振れ} \times \text{力分布})$



M1-9

固有モードと強制力分布 $N=8$



M1-10

翼の共振条件 $N=8$

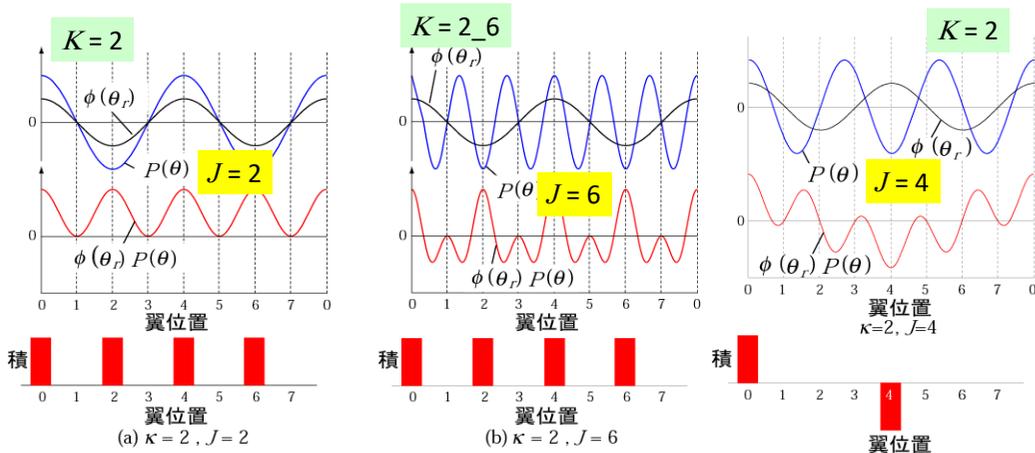


図10・16 モード励振力 (固有モードと分布励振力の積)

図10・18 非共振の例

K= 0	1	2	3	4
	7	6	5	
8	9	10	11	12
		15	14	13

M1-11

キャンベル線図 $N=8$

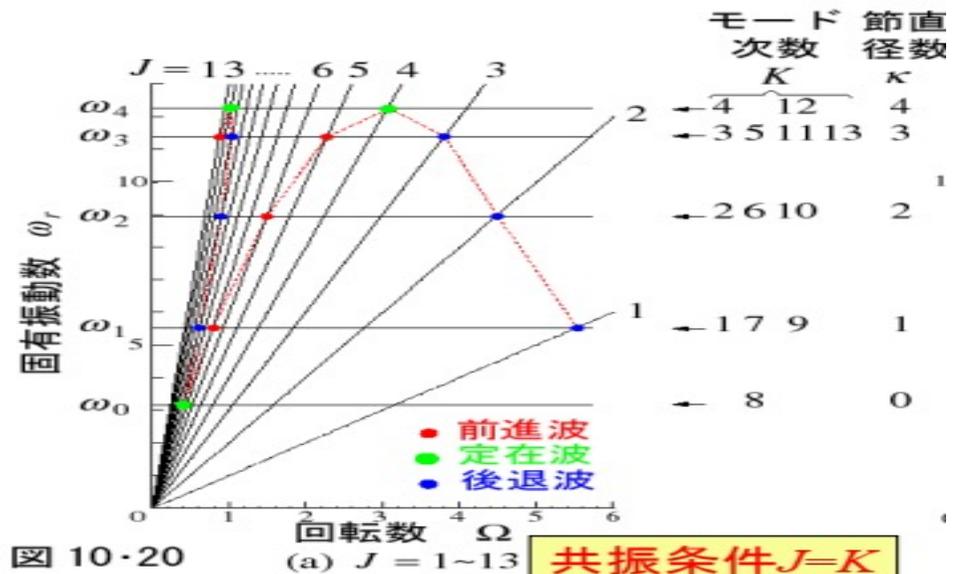


図10・20

(a) $J=1\sim13$

共振条件 $J=K$

1-12

振動伝播波

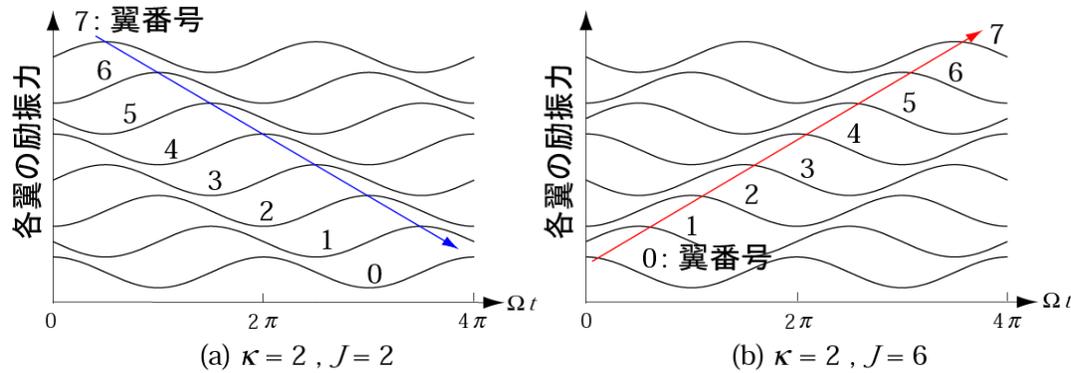


図 10-17 励振力の時間波形

前進

後退

M1-13

事例研究 遠心圧縮機羽根車の共振

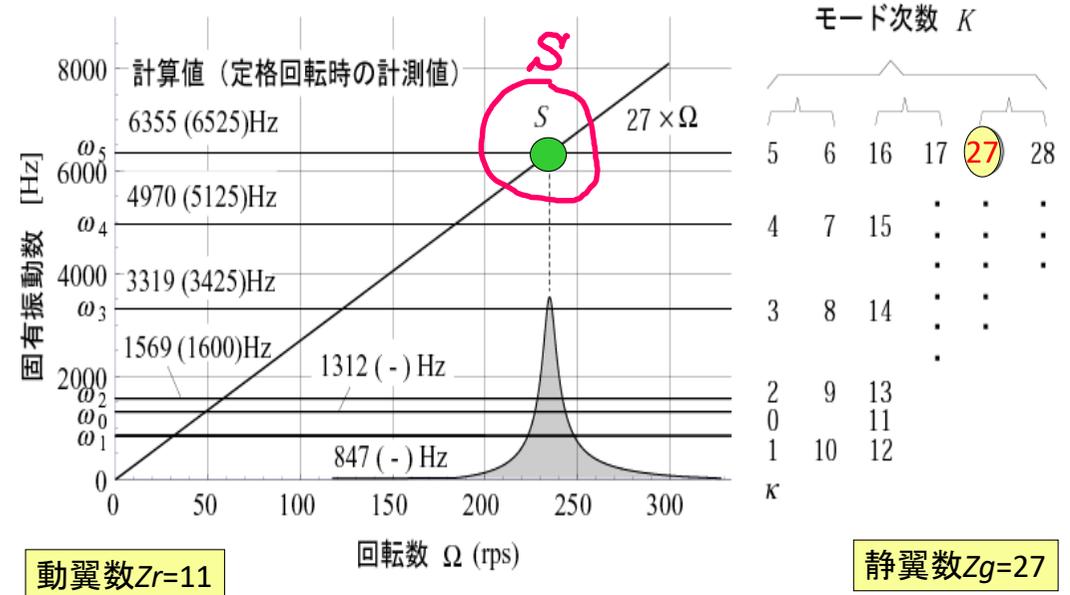


図 10-23 試験羽根車のキャンベル線図

M1-14

事例研究 遠心圧縮機羽根車の共振

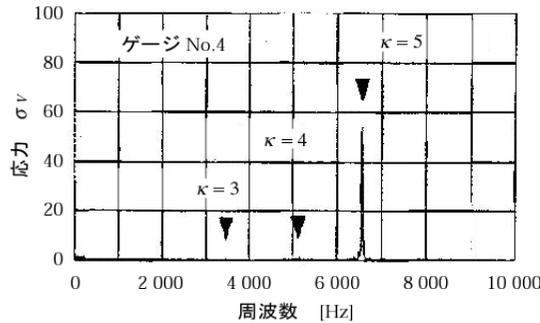


図 10-25 スペクトルのピークホールド結果



図 10-26 羽根車固有振動数解析結果
 節直径数 $\kappa = 5$ のモード (6550 Hz)

PR02-15

ターボ機械: 動静翼干渉における共振

同じ力学

電動機システム: モータの電磁力共振

内積: 20230711 JSME Motor Seminar Demo.nb
 Campbell: 20230829 DD2023_Mag共振.nb - Demo
 赤本図: HIL 動静翼干渉010 赤本10.2.nb

v_BASE@D&D2022

No.24

モータ電磁振動と静動翼干渉問題の類似性

内容

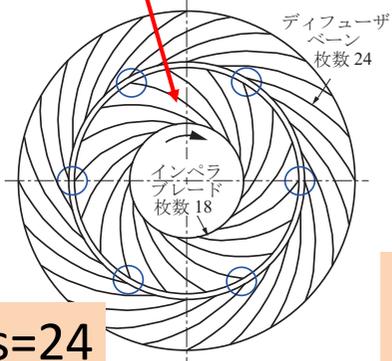
- 1 発生した振動
- 2 翼振動との関連
- 3 モータロータ共振
- 4 共振音の観測
- 5 教訓

2022-09-06@秋田県立大学

防衛大学校名誉教授
松下 修己

類似性: 周期構造物

Zr=18



Zs=24

図4 翼通過周波数(BPF)

表1 アウターロータとターボ機械の翼・羽根車

	ターボ機械	アウターロータ
ロータ側	動翼、羽根車	ロータ・極
周方向一様分布	圧力	磁気
ステータ側	静翼、ガイドベーン	ステータスロット
干渉力	流体圧力変動	磁気吸引力変動

12
Slot

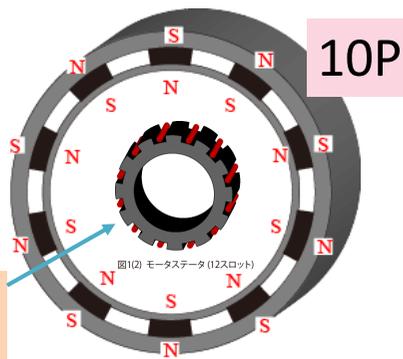


図3(1) モータロータ (10極)
(周期構造)

DENSO ブロー モータ

用途:自動車空調用
定格出力 130w
直流モータ
回転数 max4000rpm
モータ外径80φ

共振音

既発表 by Denso
v_BASE14@2019
の別解釈

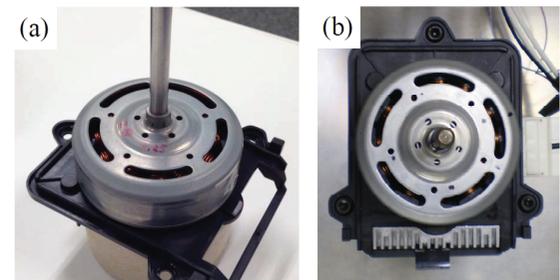


図1 アウターロータモータ (10極 12スロット)

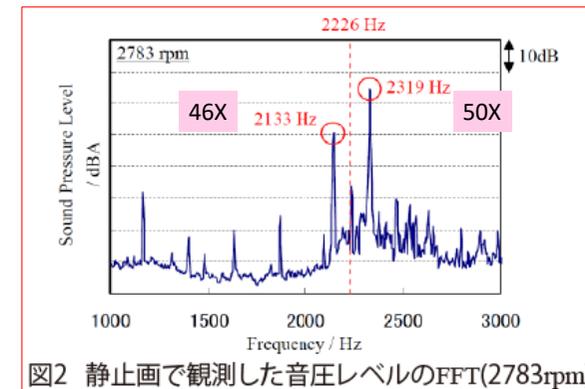
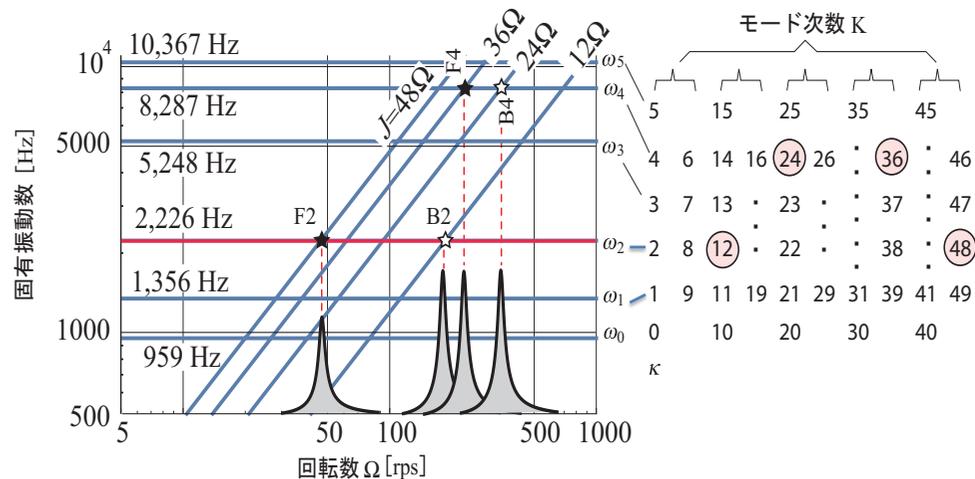


図2 静止画で観測した音圧レベルのFFT(2783rpm)

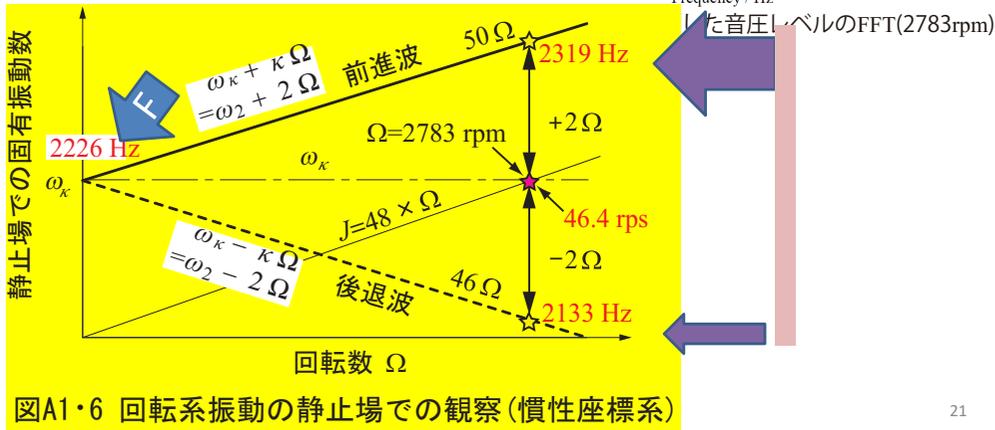
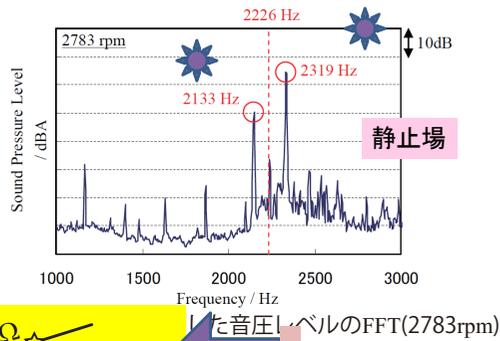
アウターロータの共振

回転場解析



図A1・5 モータロータの共振を示すキャンベル線図 (回転座標系, 両対数軸) 20

回転場振動 共鳴音計測FFT



図A1・6 回転系振動の静止場での観察(慣性座標系)

21

v_BASE@D&D2023

No.25

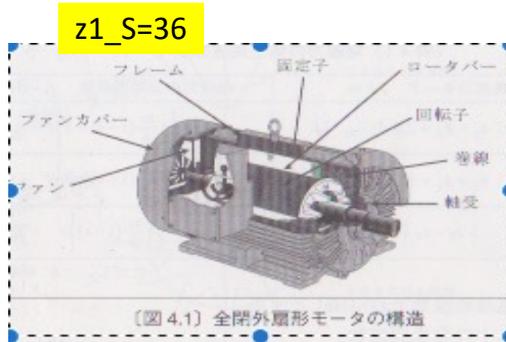
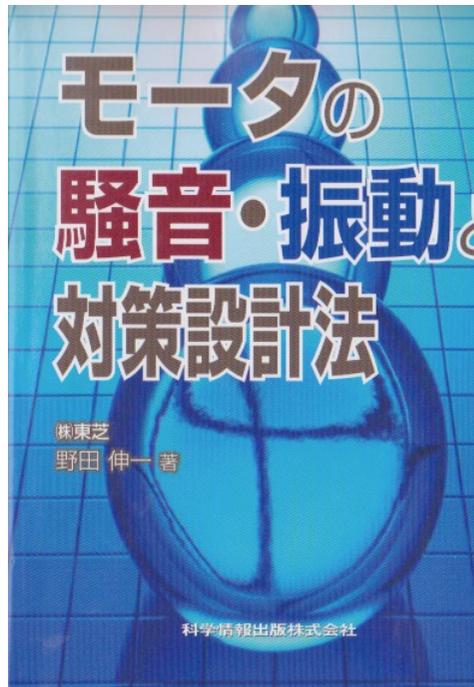
誘導モータ電磁振動と静動翼干渉問題の類似性

内容

- 1 発生した振動
- 2 翼振動との関連
周期構造物の共振
- 3 モータロータ共振
- 4 共振音の観測
- 5 教訓

2023-08-29@名古屋大学

防衛大学校名誉教授
松下 修己



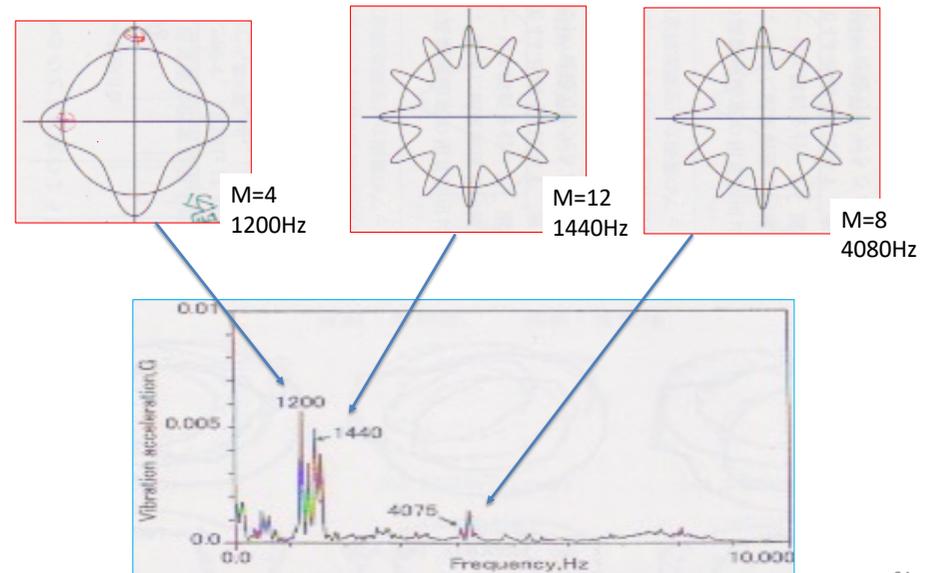
電磁力共振
事例研究
z1(静止)=36、z2=44(回転)
P=2

野田伸一著
科学情報出版

23

野田著

事例：モータ電磁力の共振現象



24

強制力次数 $J=k*zr \ +/- \ 2f$

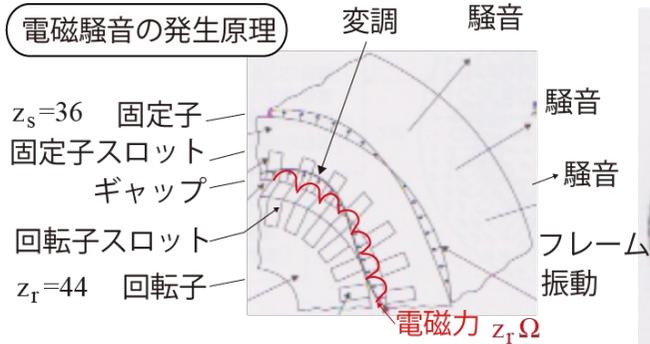


図5 モータ騒音発生模式図

$J=44, 88, 132$

変調 $2f=4fr$

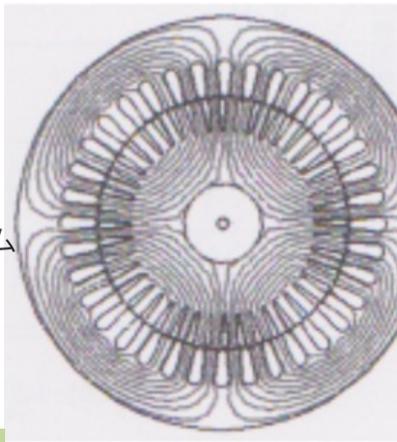


図7 回転磁界 (4p)

野田著

電磁力共振1:

$$B_g \cos n z_2 \Omega$$

$$J=K \quad \text{and} \quad J\Omega=\omega_K$$

$$J=nz_2$$

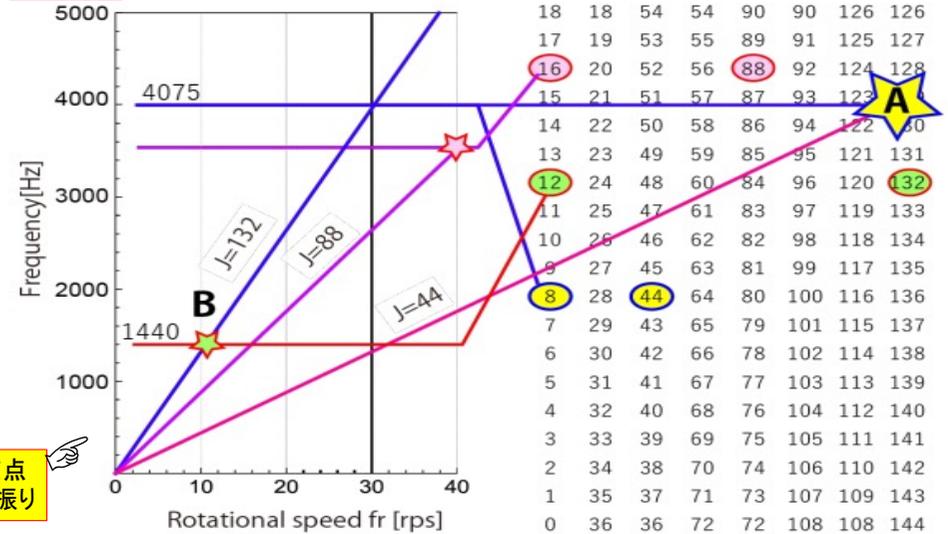


図6 キャンベル線図 (回転子スロット数 z_r 励振) NG

野田著

電磁力共振2:

$$B_g(1+\Delta \cos(2f)) \cos n z_2 \Omega$$

$$J=K \quad \text{and} \quad J\Omega=\omega_K$$

$$J=nZ_2 \pm 4$$

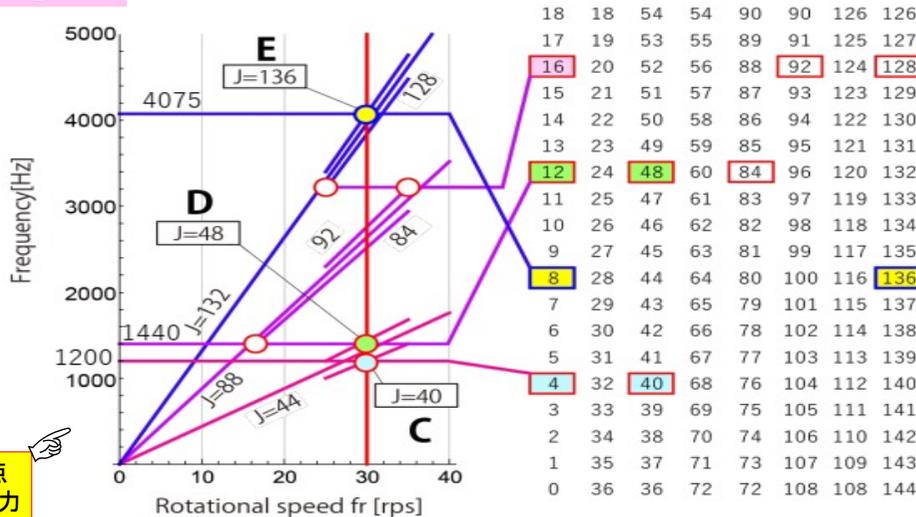


図8 キャンベル線図 (回転磁界 4P 変調考慮) OK

事例3

電磁力励起による電動機の振動放射音解析法

論文

- 正員 塩幡宏規 (日立製作所)
- 非会員 名川泰正 (日立製作所)
- 正員 小林孝司 (日立製作所)
- 正員 小原木春雄 (日立製作所)

電磁力モード M

$$|z_s \pm k| = z_r \pm 2p$$

今後の課題

△ 周期対称

A Method for analyzing Electromagnetic-Force-Induced Vibration and Noise Analysis
Koki Shiohata, Kanako Nemoto, Yasumasa Nagawa, Shigeru Sakamoto, Takashi Kobayashi, Motoya Itou, Haruo Koharagi

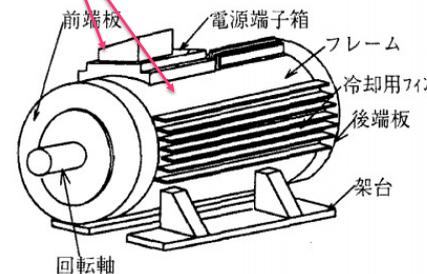


図4 試作誘導電動機外観
Fig. 4. A View of the induction motor

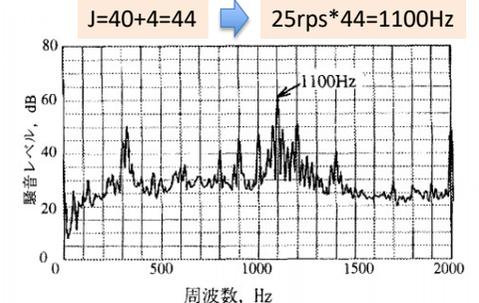


図5 電動機の後端板騒音測定結果(10cm 後方)
Fig. 5. Measured noise level at 10 cm behind rear endbracket

共振モードは複雑



内積を具体邸に計算する
SMORC (Space Modal Resonance Criteria)

$$\gamma = \frac{\|\{\phi_e\} \cdot \{\phi_s\}\|}{\|\{\phi_e\}\| \cdot \|\{\phi_s\}\|} \quad (8)$$

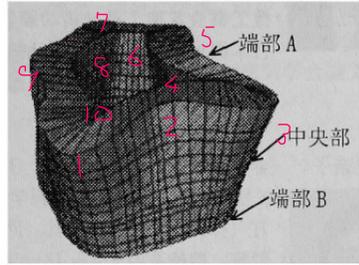
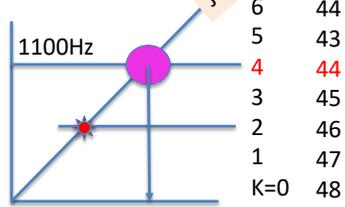


図7 固定子全体の固有モード(1067Hz)

K=5?

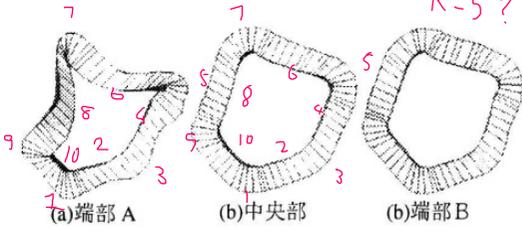


図8 固定子断面の円環モード

Table 2. Space-modal- resonance criteria

構造固有振動数	電磁加振周波数	電磁力円環モード次数	共振判定値 SMORC
1067Hz	1100Hz	0	0.01
		2	0.15
		4	0.21
		6	0.03
		8	0.007
		10	0.006

御静聴、感謝

回転機械の振動
実用的振動解析の基本

工学博士 松下修己
工学博士 田中正人 共著
工学博士 神吉博
博士(工学) 小林正生

コロナ社

第10.2 翼・羽根車振動と共振

実践 機械システムの振動
実機振動問題の簡易解析

工学博士 松下修己
博士(工学) 小林正生 共著

コロナ社

第7.1.1 モータ振動の共振音



教訓