

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560238

研究課題名（和文） 原子力発電機用タービンの翼・軸連成振動解析

研究課題名（英文） Analysis of blade-shaft coupled vibration of turbine-generator sets

研究代表者

藤原 浩幸 (FUJIWARA HIROYUKI)

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号：60531994

研究成果の概要（和文）：タービン翼のような長翼を持つ回転機機械では節直径 0 と 1 ( $k=0,1$ ) で翼軸連成振動が発生することが知られている。本研究では主に、後者の翼の  $k=1$  と回転軸の曲げ振動との共振現象を扱う。数値シミュレーションと実験により、軸回転数が翼の固有振動数  $\omega_b$  と回転軸の曲げ固有振動数  $\omega_s$  との差になったときに、翼と軸の共振現象が確認された。

研究成果の概要（英文）：In rotor systems having a long-axis blade such as a turbine, zero and one modal diameter ( $k=0$  and  $k=1$ ) modes are well known with respect to blade-shaft coupled vibration. This study deal with the latter case that blades ( $k=1$ ) are coupling with bending shaft vibration. In simulations and experiments, the coupled resonance was confirmed at the rotational speed which is  $|\omega_b - \omega_s|$  (where  $\omega_b$  is blade natural frequency and  $\omega_s$  is shaft natural frequency).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	0	1,300,000
2011 年度	700,000	0	700,000
2012 年度	700,000	0	700,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	0	2,700,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御，翼軸連成振動，回転機械，磁気軸受

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や環境問題に対する意識が高まり、クリーンエネルギーとして原子力および風力発電事業が見直されていた。原子力発電の力学的特徴は、火力発電に比べ  $1/2$  の回転数で運転されており、同等出力確保のために長翼が採用されていることである。このため、翼は振れやすく、高度な安全性の確保が重要である。風力発電も同様に、超長翼のため支柱破壊による転倒事故など、損傷の危険性ははらんでいる。

翼振動解析は翼設計段階における重要な課題である。特に原子力発電用のタービン翼は火力発電用に比べ長翼であり、翼固有振動数は低くなる。例えば、一番外側の最長  $L=0$  翼の最低次固有振動数は、火力用では約  $150\text{Hz}$  であるのに対し、原子力用では大幅に低くおよそ  $50\text{Hz}$  となっている。一方、加振力は電源周波数  $50/60$  や  $100/120\text{Hz}$  付近だから、両者が一致し共振し大事故に至る危険性がある。

また、風力発電の翼も超長翼構造である。

翼単体は簡単な構造をなしているので詳細な設計計算がなされている。しかし、架台構造や地盤の影響などが大きく、翼単体解析では不十分と考えられ、翼系と支持系との連成振動に基づいた設計手法の確立が必要と考えられる。

このような状況で、翼系と軸・架台系の連成振動問題は比較的新しい課題である。翼振動解析は翼中心部固定（回転軸振動無視）の理想的境界条件での計算であり、一方、回転軸振動解析は翼を剛体（翼振動を無視）とした解析であり、効果的な連成解析手法を欠いている。本研究は、効果的な連成振動解析法を提案することを目指している。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、このような発電用タービンの長翼構造と、回転軸や架台などの支持構造との連成振動メカニズムの解明を行うことで、連成振動の観点から、安全設計手法および安全運転評価指標を示すことである。

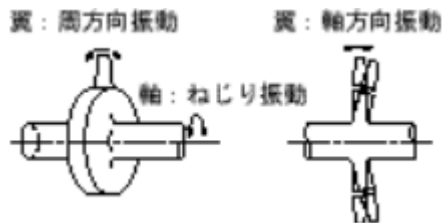


図1 タービン翼の振動挙動

図1はその連成問題の事例である。同図に示すようにタービン翼はねじられた形状をしているため、周方向、および、軸方向に振動が発生する。特に、原子力発電用タービン翼は長翼で、全体の翼剛性は落ち、このような翼振動モードは軸振動と連成しやすい。

表1は翼と軸の連成条件をまとめたものである。同表①が翼の節直径  $k=0$  の周方向振動と翼のねじり振動との連成を指す。現状では、この翼・軸ねじり連成振動問題のみがタービン発電機の翼軸連成ねじり振動解析を踏まえた ISO22266-1 として定着してきた。

表1 回転軸と翼円板との連成

ロータ軸振動	翼・円板振動			
	K=0		K=1	
	面内	面外	面内	面外
ねじり	①			
縦		②		
曲げ	並進		③	
	傾き			④

一方、他の連成振動条件（表1の②、③、④）に対しては注目されておらず、詳細な解析も行われていない。風車の振動問題は同表③、④に関係する。

本研究では特に直径節  $k=1$  の面内振動、面外振動と軸の曲げ運動との連成振動（表1の③、④）に着目する。この節直径  $k=1$  の翼振動と軸・架台系との曲げ連成振動では、周知の不平衡トルク加振 100/120Hz 以外に、翼の偏心や傾きなどの不つりあい、風などの流体力、地震など、多くの加振形態が存在す複雑な連成共振の可能性がある。

本研究では、このようなタービン翼と回転軸の連成振動に関して、①以外に、③および④についてもその効果・影響を明らかにし、タービンや風車設計におけるモデル化手法、解析・診断手法を示す。

モデル化では非常に複雑で多自由度の翼軸連成モデルを効率的に解析できるようにモード合成法を応用した縮小モデル化手法を用いる。また、そのモデルを利用して解析を行う。作成したモデルが妥当であるか確認するため、現象を再現できる実験装置を用い検証実験を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 解析対象

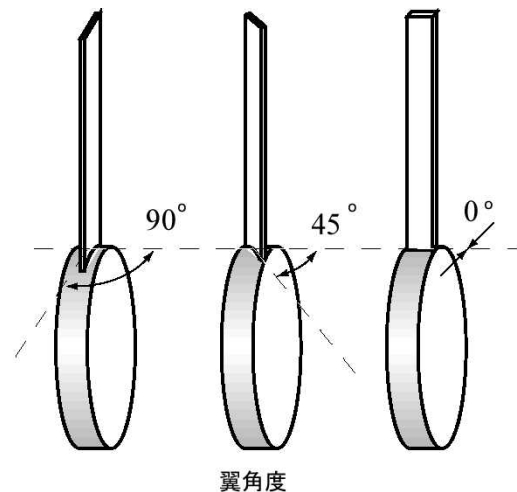


図2 翼の角度

回転円板に対して図2のような角度を持った翼を検討する。軸に対して  $90^\circ$  の翼は面外振動をするため、節直径  $k=1$  のモードでは、軸の傾き（曲げ）振動との連成が研究対象となる。また、軸に対して  $0^\circ$  の翼は面内振動をするため、節直径  $k=1$  のモードでは軸の並進振動との連成が研究対象となる。また、45度の翼を準備し、面外振動と面内振動の両方の性質をもった翼に対しての連成振動も検討した。

### (2) モデル化と数値計算

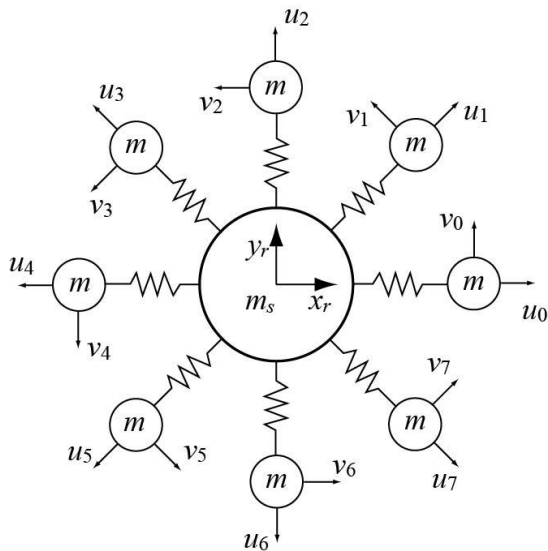


図3 8本翼のモデル

数値解析には図3の示すモデルを用いた。8本翼のモデルで、翼1本を質量とばねで近似し、最終的には8本翼の振動モードを考えて2自由度まで縮小した。回転軸のモデルに後から付加できる、モード合成法を採用しているため、回転軸のモデルと同時に計算し、翼と軸の連成振動を解析できる。

回転軸は磁気軸受で支持し、解析、実験において曲げ固有振動数を調整できるようにした。また、実験では、浮上制御の回路に加振用の信号を付加することで、軸への曲げ加振実験を実施した。

### (3) 実験装置

図4に実験装置を示す。玉軸受と磁気軸受で支持、その間に翼を固定するための円板を設置する。軸振動は磁気軸受の制御に用いているセンサを併用し、翼の振動はひずみゲージによって測定した。ひずみゲージは回転系にあるため、軸端に取り付けたスリップリングから信号を取り出した。左端にはモータを設置し、一定の回転数で回転させることができるようになっている。

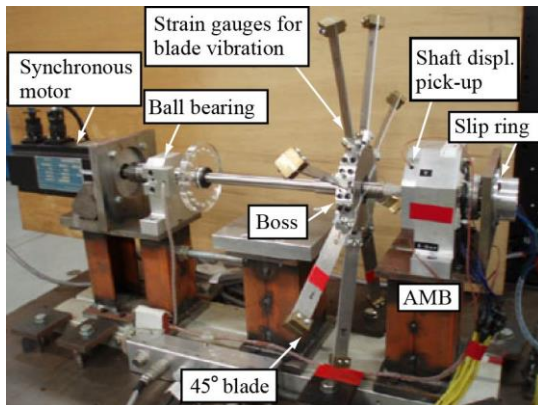


図4 実験装置

翼の角度は円板への固定治具を3種類準備することで対応した。翼の先端にはおもりを取り付け固有振動数が約22Hzになるよう調整している。また、磁気軸受の剛性を変えることで軸の1次固有振動数が約8Hzになるよう調整している。

## 4. 研究成果

### (1) 翼軸連成モデルの導出

図3に示す8本翼のモデルをモード合成法により縮小したモデルが次式である。

$$\begin{bmatrix} m_s + 8m & 4m \\ 4m & 4m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + j\Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -8m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & 4k_b - 4m\Omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \eta \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$z$  は翼の根本の座標であり、軸に重ね合わせることができる。また、 $\eta$  は翼のモード座標になっており、 $k=1$  の運動を表している。この式より、軸のモデルと重畳し、固有振動数および安定性の解析を行った。

### (2) 数値シミュレーション

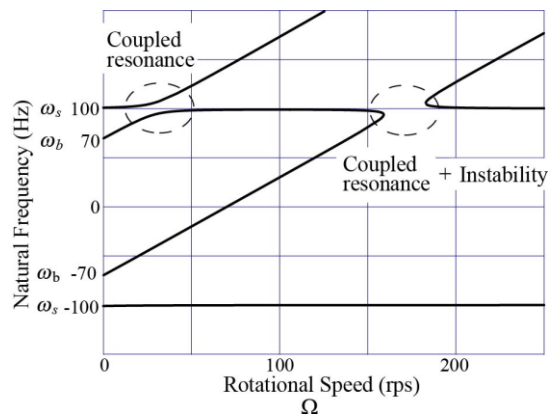


図5 固有値マップ

導出されたモデルを用いて固有値解析を行った結果が図5である。この例は回転軸の固有振動数が100Hz、翼の固有振動数が70Hzの例である。横軸が軸の回転数、縦軸が固有振動数であり、回転数の上昇による固有振動数の変化がわかる。ここで、回転軸の固有振動数は前向きと後ろ向きがあるためそれぞれをプラスとマイナスで表現している。

軸の固有振動数は回転数によらず、一定となり、翼の固有振動数は回転数とともに上昇する。図の破線で囲まれた回転数付近で連成共振が起こり、約30rpm、170rpmとなった。これは、回転数 $\Omega$ が

$$\Omega = |\omega_b \pm \omega_s| \quad (2)$$

となったときである。30rps 付近では回転数の上昇とともに、翼の固有振動数と軸の固有振動数が近づくことで連成共振が起こり、170rps では不安定振動となる（図では線が分断される）。ただし、翼の固有振動数  $\omega_b$  は遠心力によって上昇するため、共振が発生する回転数はこれより大きくなるとかんがえられる。また、実際の機械では 170rps にあたる部分まで回転数を上げることはないため、実験では図の 30rps に相当する部分に着目して実験を行った。

### (3) 実験結果

図 4 の実験装置を用いて実験を行った。図 6 に実験結果の一例を示す。横軸が回転数、縦軸は観測された振動を表し、図中の青い円の大きさが振動振幅の大きさを表す。また、この測定結果はひずみゲージの振動を測定したものであり（回転座標系）、図 5 の結果から回転数分を引いたものに相当する。

回転前の翼固有振動数は 22Hz、軸の固有振動数は 8Hz であり、遠心力の効果も考慮した翼の固有振動数の計算結果を  $\omega_{b0}$  から続く赤い線として示した。 $\omega_s$  から続く斜めの 2 本線が回転軸の固有振動数であり、この交点である 30~40rps 付近で大きな円が描かれていることから、大きな連成共振振動が起こったことがわかる。

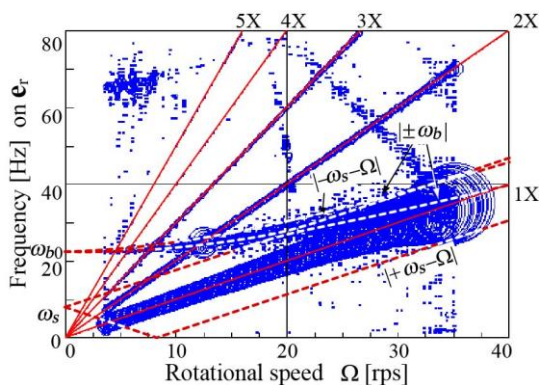


図 6 キャンベル線図

### (4) 翼軸連成振動を考慮した翼設計

数値解析の通り、翼の節直径  $K=1$  のモードと軸の固有振動数が特定の回転数で連成共振することが実証された。よって、本モデル化手法は有効であり、長翼を持つ回転機械の設計には、このような翼と軸の連成共振を回避することが必須と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① A. Okabe, T. Kudo, K. Shiohata, O. Matsushita, H. Fujiwara, H. Yoda, S. Sakurai, Reduced modelling for turbine rotor-blade coupled bending vibration analysis, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 査読有, Vol.134, 022502, 2012

② N. Anegawa, H. Fujiwara, O. Matsushita, Vibration on diagnosis featuring blade-shaft coupling effect of turbine rotor models, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 査読有, Vol.133, 022501, 2011

③ 姉川憲永, 藤原浩幸, 松下修己, タービンモデルロータにおける翼軸連成問題と翼振動診断, ターボ機械, 査読有, 第 38 巻, 第 8 号, pp.477-487, 2010

[学会発表] (計 6 件)

① 姉川 憲永, 藤原 浩幸, 松下 修己, ロータ振動診断におけるキャンベル線図の応用, Dynamics and Design Conference 2012, CD-ROM 論文集 833, 査読なし, (2012. 9. 18, 横浜市)

② 工藤健, 岡部明, 塩幡宏規, 松下修己, 藤原浩幸, 依田秀夫, 桜井茂雄, タービンの翼軸連成曲げ振動解析向け等価質点モデル化, Dynamics and Design Conference 2011, CD-ROM 論文集 535, 査読なし, (2011. 9. 6 高知市),

③ A. Okabe, T. Kudo, K. Shiohata, O. Matsushita, H. Fujiwara, H. Yoda, S. Sakurai, Reduced modelling for turbine rotor-blade coupled bending vibration analysis, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011: Power for Land, Sea and Air, GT2011-45776, 査読有, (2011. 6. 14, Vancouver, Canada)

④ 姉川憲永, 藤原浩幸, 松下修己, タービンモデルロータの翼振動診断について, Dynamics and Design Conference, 2010, CD-ROM 論文集 444, 査読なし, (2010. 9. 14, 京都市)

⑤ T. Tsuji, H. Fujiwara, O. Matsushita, Vibration diagnosis on a torsional and bending coupled rotor system, The Seventh International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, 130, 査読有, (2010. 6. 22 Stratford-upon-Avon,

U. K.)

- ⑥ N. Anegawa, H. Fujiwara, O. Matsushita, Vibration on diagnosis featuring blade-shaft coupling effect of turbine rotor models, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT2010-23091, 査読有, (2010. 6. 14 Glasgow, U. K.)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤原 浩幸 (FUJIWARA HIROYUKI)  
防衛大学校・システム工学群・准教授  
研究者番号 : 60531994