最近の回転機翼の振動計測技術

問 瀬 正 隆**・ 金 子 康 智***
角 家 義 樹***

Latest Technology in Vibrational Measurement for Rotational Machinery Blades

By Masataka Mase, Yasutomo Kaneko, Yoshiki Kadoya

There are many machines having rotating parts such as blower, compressor including steam turbine and gas turbine. The moving blades, in particular, among rotating parts are the major element which has an influence upon the product reliability. The purposes of measuring the blade vibration are classified into the followig three categories.

The first purpose is the quality evaluation of the products, and it is confirmed by a vibration test that the prototype, the actual machine, etc. have the same vibration characteristics as they are designed. The second purpose is the investigation for studying the phenomenon of blade vibration and its causes. Particularly, the information which is obtained from the vibration measurement plays an important role in solving the problems in vibration. The third purpose is the monitor of vibration and diagnosis of abnormality needs of which are recently increasing. This purpose is positioned intermediately between the above purposes. When the vibration is measured for any purpose, it is required that blade frequency, vibration mode and vibration response as well as exciting force and damping. However, in order to execute the vibration test meeting the purpose, it is important that not only the vibraton phenomenon but also the procedure for measurement are fully understood and the appropriate measuring methods are selected.

On the other hand when the blade vibraton tests are classified from the viewpoint of measuring method, they are roughly divided into the blade vibration tests under stationary condition and under rotating condition. The blade vibration test under stationary condition is fundamentally same as the vibraton test of general structures, however in the blade vibration test under rotating condition the technology and procedures peculiar to the vibration measurement of the rotors are required for all of measuring sensor, wiring method, transmission method of signals, and analysis method of data. In consideration of these matters, the recent tendency for the measuring method of vibration of high speed turbine blades is described in this paper.

1. ま え が き

蒸気タービン、ガスタービンを始めブロー、コンプレッサなど回転部品を持つ機械は多い。回転部品の中でもとくに動翼はその製品信頼性を支配する主要要素であり、翼振動を計測する目的は、つぎの3つのカテゴリーに分類される。

第一の目的は製品の品質評価であり、試作品、実機製

品などが設計計画通りの振動特性を有していることを振動試験により確認する。第二の目的は翼振動の現象や原因を究明するための調査であり、とくに振動問題を解決する場合には振動計測から得られる情報が重要な役割を果たす。第三の目的は両者の中間的な位置付けで最近ニーズが増大してきている振動監視や異常診断である。これらいずれの目的を持った振動計測においても、翼振動数、振動モード、振動応答、場合によっては励振力や減衰量を計測することが必要となるが、目的に合致した振動試験を行うためには振動現象だけではなくその計測手法についても十分に理解し、適切な計測法を選定することが重要である。

一方、翼振動試験を計測法の観点から分類すると、図

*原稿受付 平成2年5月30日

**正会員 三菱重工業(株)(高砂市荒井町新浜2-1-1)

***三菱重工業(株)(高砂市荒井町新浜2-1-1)

図1 翼振動試験法の分類

1に示すように静止中の翼振動試験と回転中の翼振動試験とに大別される。静止中の翼振動試験は一般構造物の振動試験と基本的に変わるところがないが、回転中の翼振動試験では計測センサ、配線法、信号の伝送法、データ分析法のいずれにおいても回転体の振動計測に特有な技術、処理法が必要となる。

ここでは、最近の高速回転タービン動翼の振動計測法の動向について記述する。

2. 静止中の翼振動計測

2.1 一般計測 一般の振動計測にはその目的に応じて非常に多くの振動計が使用されているが、翼振動計測用のセンサは、以下の要求を満足しなければならない。

- a) 小型、軽量で翼の振動特性を変化させない。
- b) 高い振動数、場合によっては数10kHzまで安定した計測ができる。
- c) 信頼性が高い。

このため、一般の翼振動計測に使用されるセンサはつぎの3種類である。Ⅰ) 圧電型加速度計、Ⅱ) 静電型マイクロフォン、Ⅲ) ひずみゲージ、以下においてこれらを使用した翼振動計測の概要を示す。

(1) 固有振動数 固有振動数の計測には、通常FFTによる周波数分析が利用される¹⁾。これは最も一般的で間違いも少なく取扱いも簡単であるが、ハンマリングで加振を加えた時に生じるビビリなどの影響を判断する必要がある。これに対し周波数応答関数を計測し、これから固有振動数を求める方法が用いられることがある。この場合、振動応答と同時に加振力を計測する必要があるが、振幅と位相が同時に得られるため正確な判断ができる、振動モード、減衰比も同時に得られるなどの利点も多い。

(2) 減衰量 回転機翼の減衰、すなわちダンピングは材料それ自身の持つ材料ダンピング、翼を組立てることにより生ずる構造ダンピング、流体中を運動することによる空力ダンピングから構成されるが、構造体としてはこれらが一体となって計測される。これを定量的に求めるには、以下の方法がある²⁾。

- a) 振動波形から求める方法

- b) 周波数応答関数から求める方法
- c) ボード線図の位相から求める方法
- d) コクアド線図から求める方法
- e) ナイキスト線図から求める方法

このいずれの方法によってもそれぞれの計測が正しい限りにおいて同一の値となるべきであり、その時の状況に応じて分析法を選択すれば良い。

(3) 振動モード 最も簡単な振動モード計測法は移動計測法である。すなわち翼を加振により共振させておき、振動計測点を移動させ各位置の振幅と位相を計測することにより振動モードを求める。この計測には市販のモード分析器が使用される。モード分析器は基準信号 $F \cos \omega t$ と振動信号 $A \cos(\omega t + \theta)$ をそれぞれベクトル量と考えたときのスカラー積 $A \cdot F \cdot \cos \theta$ の値を直接指示させる計器である。

なお、最近は実験モーダル解析技術が飛躍的に進歩したため、この原理に基づいた市販のモーダル解析ソフトにより高度なモード解析が容易に行えるようになってきている³⁾。

やや特殊な事例に属するが、図2はロータ円板に植込まれた全周の翼振動モードを計測するため翼根、翼溝の間に水を注入し、これに液体窒素を噴付けて翼根部を氷結させることにより翼とロータを一体化し、モーダル解析により振動モード計測を行った例である。

2.2 特殊計測 翼はその断面形状がそりを持ち、かつ高さ方向にねじられており、場合によっては互いに結合された複雑な構造となっている。このため低次の振動モード計測は、前述の一般計測法でもとくに問題なく処理できるが、高次の振動モードの計測になると相当な困難が伴う。

これに対処するためレーザ、赤外線などを用いた多くの特殊計測法が利用されている。ここでは翼振動試験に適用される特殊計測法について示す。

(1) 連続波ホログラフィ法 連続波レーザを用いたホログラフィ振動計測には時間平均法、スロットボ法、参照光変調法、改良型時間平均法など種々の方法がある

図2 モーダル解析を利用した翼振動モードの計測例

が、いずれも図3に示すように、共振状態にある翼表面からの反射光と参照光を用いてホログラム乾板上に干渉光を記録するものである。代表的な計測法の特徴を以下に示す。

a) 時間平均法 振幅0の位置、すなわち節線部に最も明るい干渉縞ができ等振幅線を明らかにできるが、位相情報は得られない欠点がある。

b) 参照光正弦波位相変調法 時間平均法で計測できない振動の相対的位相を計測するために考案されたものであり、時間平均法と異なる点は図3における参照光の光路にある鏡 M_3 を翼の任意点の振動に同期させて振動させるということである。このようにして得られるホログラムを再生させると翼面上の任意点と同位相で振動している位置に最も明るい干渉縞を得ることができる。したがって位相と振幅の情報を得ることができる。

連続波レーザを用いたホログラフィ法による振動計測

図3 ホログラム作成の基本原則

図-4 タービン動翼のホログラフィ計測結果

では共振状態にある物体の振動モードを写真として記録できる利点があるが、防振定盤が必要であり過渡振動の計測ができない、暗室が必要などの制約がある。図4に蒸気タービン長翼の高次振動モードを計測した例を示す。

(2) リアルタイムホログラフィ法^{4), 5)} 翼の変位パターンを実時間で観測できる計測法である。加振器を用いた周波数スイープ加振試験により翼の固有振動数、および振動モードを実時間で観測することができる。図5に示すようにサーモプラスチック乾板で静止状態のホログラムを作成する。このホログラムを通じて振動状態の翼を観察すれば静止状態の再生光と振動状態の物体光が干渉し、振動振幅に対応した再生像すなわち振動モードパターンが得られる。観察した振動モードパターンは時刻ごとに变化する性質上ビデオ等に記録することが多く、時間平均法に比較して大振幅でもコントラストの良好な等振幅線を得ることができるが、節線や位相の情報は得られない。

(3) レーザスペckル法⁶⁾ 図6に示すように金属やプラスチックなどの拡散反射面にレーザ光を照射したとき、その拡散光の中に生じる斑点の模様をスペckルパターンと言う。スペckルパターンは物体の変形により、それに関係した量だけスペckルが移動する性質を持っている。この性質を利用して表面の変位を計測する

図5 リアルタイムホログラフィ法

図6 レーザスペckル

方法としてスペックル写真法、2波長レーザスペックル歪計測法がある。レーザスペックル法は翼根の応力集中部のように狭い部分の観測には適しているが、ポイント計測のため同時多点計測には向きであり、また変位や回転が過大な場合には適用困難である。

(4) 赤外線熱弾性法 物体にひずみ変化が生じるとそれに対応した温度変化が生じる、これを熱弾性効果と呼んでおり金属のような等方性の材料では応力変化と温度変化の関係が一義的に決まる。また、表面温度と放射エネルギーとの間にも一定の関係が成立するため、放射エネルギーを検知することにより物体のひずみ変化、すなわち振動応力を検出できることになる。計測の概要を図7に示しており以下の特徴を持つ。

- a) 翼定常温度は振動と相関がないため高温場でも計測が可能である。
 - b) データをリアルタイムで演算処理するため、その場で判断が可能であり、かつディスプレイはカラー表示で振動モードが判り易い。
 - c) レーザホログラフィでは防振定盤や暗室が必要であるが、このような特別な配慮は必要としない。
- (5) レーザドップラ法 表面速度を持つ物体、すなわち振動している翼表面から散乱された光はドップラ効果により周波数変調される。このドップラ周波数を計測すれば振動速度を知ることができる。照射レーザを計測しようとする共振状態にある翼に対してスキニングして行けば全体の振動速度モードが判明する。赤外線熱弾性法と同一の利点があり手軽に使用できる。図8に計測例を示す。

図7 赤外線熱弾性法のシステム構成

図8 レーザのドップラ効果を用いた振動分布の計測例

3. 回転時の翼振動計測

回転中の翼振動計測には、回転側に直接センサやリード線を取り付る方法が広く採用されてきたが、遠心力や流体力からこれらをいかに保護するかの問題と回転場の信号をいかに静止側に取り出すかの問題がある。一方最近の動向として回転体にセンサを取り付けず静止側から計測する方法も研究開発が鋭意進められており実用化の段階にある。

3.1 回転体より信号を取り出す方法

回転中の翼に取り付けたストレインゲージ、温度、圧力などのセンサ信号を外部に取り出す方法により、計測法は以下の2つに分類される。

(1) スリップリングによる方法 最も一般的な方法がスリップリングによる静止部へのデータ取出しである。スリップリングは回転側のリングと静止側のブラシの接触を介して電気信号をリード線により取り出すものであり以下の特徴がある。

- a) 信号伝達の原理が簡単
- b) 測定精度が良く多点同時計測が可能
- c) スリップリング自体に電気的な調整部分がなく保守整備が容易

このような利点を持つ反面、以下の問題点を持つ。

- a) スリップリングは必ず軸端に取り付けることになるため、リード線配線のため軸の加工が必要である。
- b) ブラシにより信号伝達するためノイズの原因になり易い。
- c) ブラシの機械的接触から使用回転数に限界がある
- d) 高速回転の場合はスリップリング本体に振動が伝達されるとノイズの原因となるため、フレキシブルカップリングの使用などの対策が必要

とくにスリップリングを使用する場合、回転軸中心にリード線引出し用の孔を加工する必要がある、試験機以外では使用しにくいのが実情である。スリップリングを使用した回転振動試験の例を図9に示す。最近では1万回転を超える計測も実施されている。

(2) テレメータによる方法⁴⁾ 回転側のセンサで計測された電気信号を回転側に取り付けたテレメータ発信器により100MHz前後の搬送波で周波数変調し静止側の受信アンテナへ非接触にて伝送する方法である。この信号伝送法はFM放送と同一原理であり以下の長所を持っている。

- a) 回転体に特別な加工をしなくても計測が可能であり実機の計測に適している。
- b) 回転数変化に対するノイズの変化が少なく安定した精度で計測ができる。

反面、実際の計測においては以下の問題点がある。

- a) 計測点1点に対してそれぞれ高価な発信器、電源

図9 スリップリングを利用した回転振動試験装置例

図10 テレメータを使用した回転振動試験の概要

バッテリーが必要であり、かつ搬送波の周波数帯域に制限があるため同時に多点の計測が困難である。

b) 発信器（トランスミッタ）は高温に弱く、計測温度が高い場合には、冷却を考慮する必要がある。

c) 圧力、温度、静応力、変動応力などの計測項目に応じたトランスミッタを選定する必要がある。

テレメータ計測の概念図を図10に示す。トランスミッタは回転体に取付けられるため必然的に高速心力場に置かれることになる。テレメータ計測技術は基本的には既に完成されたものであるが、高温化、多点同時計測化、リード線配線技術については現在も研究開発が進められている。さらに長期間の計測に対しては、バッテリー電源に代わる電磁誘導方式による外部電源供給法の研究、および回転停止時に電源を切る遠心力を利用したGスイッチなどが試用されている。

3.2 静止側より計測する方法 静止側にセンサを設置し回転中の翼振動を計測する方法は現在いくつかの方法が提案されており、実用化の段階にある。

(1) 光ファイバセンサ方式⁷⁾ 回転する翼の外周ケー

動翼がセンサを通過する際のパルス信号

動翼1の振動波形

図11 非接触翼振動計測の原理

シングの円周方向に複数個の光ファイバセンサを設置しておく。翼がセンサを通過するとき生じるパルス信号の発生時刻が翼が振動しない場合と振動した場合とで時間差を生じることを利用して翼の振動を計測するものである。この原理を示したものが図11であり、翼が振動しないときには各センサを通過する時刻、すなわち回転角は同一であるが、翼が振動すると翼の通過速度が早くなったり遅くなったりする。この時間差を計測することにより振動数、振動振幅を計測することができる。あるセンサを通過したときの時間差を Δt とするとこの時の翼の振幅 δ は以下の式で表されることになる。

$$\delta = \Delta t \times \text{翼先端周速}$$

このセンサを円周上に配置しておけばその位置における振幅と位相情報を得ることができ翼振動数、振幅が判る。

通常のタービンでは翼先端周速は音速前後にあり、振幅を精度良く計測するためには、きわめて早い時計が必要となる。現在の装置は理論分解能0.01mm程度にまで機能向上がなされている。

光ファイバセンサ方式は以下の特徴がある。

a) 振動波形を再現できるだけの適当な数のセンサを円周上に取付けることにより振動数、振幅が翼全数に対して計測できる。

b) 回転側にセンサ等を取付ける必要がないため実機への適用が容易であり、かつ計測のための準備期間が短くてすむ利点がある。

一方つぎの難点があり注意を要する。

a) 光、レーザ光を利用するため長期間計測における汚れ対策が必要である。

b) 原理的に翼の先端振幅のみの計測であるため先端に振幅のない振動モード計測はできない。

c) 振幅の計測であるため事前に振動モードを計算し

図12 蒸気タービン動翼の共振通過時の応答

図13 イメージ・デ・ローテータの原理

て応力との対応を取っておく必要がある。

図12に円周の一部に10程度のセンサを配置して計測した例を示している。回転を変化させ計測することにより共振通過時のピークを取らえることができキャンベルダイアグラムを得ることができる。

(2) 回転体ホログラフィ法⁸⁾ 回転体ホログラフィとは回転体の振動をレーザホログラフィで計測する技術である。計測法について従来より種々の方法が試みられてきたが現在実用化されているのはイメージ・デ・ローテータを用いる方法である。図13にその原理を示す。静止プリズムに写った回転体の像を半透鏡を介して観測す

ると反時計方向に同一回転角だけ回転した像が見える。逆に物体を止めた状態でプリズムを角度 θ だけ回転させ、これを介して観測すると 2θ だけ回転した物体像が見える。すなわち物体の回転に同期を取りその回転数の $1/2$ で回転するプリズムを介して物体を観測すると物体は静止した状態に見えることになる。このように本計測法は光学系の調整にかなりの精度が要求されること、特別な計測室が必要なこと、計測室の関係で大型回転機械の計測には不向きなどの難点があるが、一方で回転中の振動モードを干渉縞の形で可視化することができ振動振幅分布が求まるなどの利点がある。

4. 回転機翼の振動データ処理

回転機翼の振動計測データには必ず回転数のパラメータが含まれており、単に時間軸データを周波数領域に変換しただけでは振動現象についての十分な情報を得ることができないことが通常である。以下において回転機翼で一般に良く用いられているデータ処理技術を示す。

(1) オーダトラッキング分析法 オーダ数の特定次数、ハーモニック成分に着目し、その成分の振動が回転数の変化に対してどのように変化するか調べる分析法をオーダトラッキング分析と言う。この例を図14に示すが回転中の翼には円周方向流れの不均一から生じる励振力が作用し、この励振力は回転数の整数倍の周波数成分を持つ。励振力の周波数と翼の固有振動数が一致したとき翼は共振状態となるが、オーダトラッキング分析を使うと共振状態となったときの回転数、ハーモニック数、その他のハーモニック成分の振動の大きさを同時に知ることができる。また回転数変化試験でこれを求めることは周波数応答関数を求めたこととなり、ダンピング量をも計測できることになる。

(2) オーダレシオトラッキング分析法 横軸に回転数
 次数, すなわちハーモニック次数を取って周波数分析す
 る方法であり次数比分析法とも呼ばれている。本法によ
 れば回転数に同期した振動と非同期の振動を明確に区別
 することができるのでフラッタ現象などのような回転数
 非同期の振動現象を考察する場合には判り易い分析法で
 あると言える。これを模式的に示したものが図 15 であ
 る。

(3) コンポジットパワースペクトル分析法 各試験条件
 のもとでのパワースペクトル分析結果から任意の周波数領
 域に含まれるパワーを求め, 各試験条件に対応させてプ
 ロットすることによりどれだけの振動パワーが発生して
 いるかを調べる方法である。本分析法を用いると回転数
 などの試験条件の変化によって振動のパワーがどのよう
 に変化するかを明確にすることができる。この分析法の
 模式図が図 16 である。

(4) タイムスペクトルマップ分析法 振動現象が周波
 数領域において時間的にどのように変化するかを調べる
 ための分析法であり, 時間-振動レベル-周波数の関係

を 3 次元的に図示するものである。時間経過とともに振
 動現象が変化する場合には本分析法を用いると, 現象に
 含まれる周波数成分の時間的な変化が把握し易い。図 17 に
 タイムスペクトルマップ分析の一例を示しているが, 同
 一回転数でのデータであるにもかかわらずアンバランス
 による振動成分が時間とともに減少し系の固有値成分が
 増加して行く様子が明確に読み取れる

(5) RPM スペクトルマップ分析法 各回転数におけ
 る振動の周波数分析を行い回転数-振動レベル-周波数

図 14 オーダトラッキング分析

[イ] 周波数分析

[ロ] オーダ・レシオ・オーダートラッキング分析

図 15 オーダ・レシオ・トラッキング分析

図 16 コンポジットパワースペクトル分析

図 17 タイムスペクトルマップ分析

図 18 RPMスペクトルマップ分析

の関係を3次的に図示する分析法である。分析例を図18に示すが、回転数の変化によって生じる翼振動数の変化やハーモニック励振力による共振現象などが一目瞭然に理解できる。

(6) キャンベルダイアグラム分析法 各回転数における振動周波数分析を行ない、横軸に回転数、縦軸に振動数を取り、回転の整数倍すなわちハーモニックスの周波数を斜めの直線で表わしたグラフに振動レベルの大きさを円の大きさに表示する分析法をキャンベルダイアグラム分析と言う。分析の一例が図19である。これより翼振動数、応答の大きさ、特定ハーモニックスとの共振現象などが容易に把握できるため翼振動計測データの分析には最も多く利用されている分析法である。

図19 キャンベルダイアグラム分析

5. ま と め

最近の回転機翼の振動計測動向について簡単に記述したが、いずれの計測においても回転に伴い遠心荷重、振動、衝撃、流体との摩擦などの外力を受け、さらに機械の種類によっては高温、高湿の雰囲気、あるいは水中に置かれるなどの苛酷な条件下に置かれるのが通常である。このような条件ゆえにその機械の保全性やその他の現象検討のため振動計測を要求されるものが多い。

ここで示した方法はこのような各種の条件と必要とされる計測項目、およびその機械の構成、配置などから可能な計測法を考察して選定することが好ましい。また得られた計測データは着目する現象に応じた分析法を選定すべきであるが、一般に計測された振動データは種々の要因によるノイズ成分や考慮外の要因による成分を含むなど非常に複雑なものであり、かつ全ての現象を必ずしも取らえたものではないのが普通である。そのためこのような計測技術の進歩とは相反するが、計測データの分析、解釈は工学的判断が依然として重要であることも事実である⁹⁾。

以上回転機翼の振動計測法につき記述したが、これらを扱う関係者の一助となれば幸いである。

文 献

- 1) 城戸, 2チャンネルFFTアナライザ活用マニュアル, 日本能率協会.
- 2) 長松, モード解析, 培凡館.
- 3) 大久保, 機械のモーダルアナリシス, 中央大学出版.
- 4) 白木, 梅村, タービン翼の振動測定法, 舶機誌9-8(昭49-8).
- 5) 田中, タービン翼, 円板の連成振動解析, 三菱重工技報14-2(1977-3).
- 6) 光応用計測の基礎, 計測自動制御学会.
- 7) 梅村, 他, ガスタービン高圧コンプレッサの光方式による翼振動監視, 内熱機関28-361(1989-11).
- 8) 村田, 黒田, イメージ・デローテータを用いたホログラフィ干渉法による回転物体の振動解析, 光学15-3(1986), 226.
- 9) 神吉, 日本機械学会第661回講習会教材, 1987-12, 41.