

## ターボ機械の翼振動 (その2：翼振動計測)

三上 隆男\*  
Taka o Mikami

### 1. はじめに

前号では、ターボ機械に特有な振動問題である翼振動のメカニズムについて解説した。今回は、その翼振動を計測する技術について解説する。

翼振動を計測するためにはセンサが必要である。センサはひずみゲージが最も一般的に使用されている。翼は動翼と静翼に分けられる（前号参照）が、動翼の翼振動計測に的を絞って解説する。高速で回転するターボ機械の翼振動を計測するためには、回転系から静止系にセンサ（ひずみゲージ）信号を伝達する手段が必要である。この点がターボ機械の翼振動計測を複雑なものにしている。伝達手段として、従来からスリップリングやテレメータが使用されている。

一方、ケーシングに取り付けたプローブから非接触で翼振動を計測する技術が国内外各社で従来から利用されている。当部はHood社（米国）のNSMS（Non-intrusive stress measurement system）をH16年度に導入し、ターボチャージャの翼振動計測に適用している。

本稿ではひずみゲージによる翼振動計測及び非接触翼振動計測について、できるだけ平易に解説する。

### 2. ひずみゲージによる翼振動計測

ひずみゲージによる振動計測は、最も信頼性の高い確立された方法として古くから行われている。欠点を挙げるとすれば、ひずみゲージ（含むリード線）を接着あるいは溶射する作業が不可欠で、熟練した技能が必要である。また、ひずみゲージはある大きさを有しており、局所ひずみの計測は困難でゲージ面積に相当する範囲の平均的なひずみを計測することになる。

使用するひずみゲージは200℃程度までの温度環境では、市販の箔ひずみゲージを接着剤で貼り付ける（図1参照）。ゲージ長は0.2mm～30mmまでのものが市販されているが、ベース長は接着性を考慮して最小でも3.3mm程度の大きさを有している。対象物の大きさを考慮してひずみゲージを選定する必要がある。接着剤はエポキシ系、

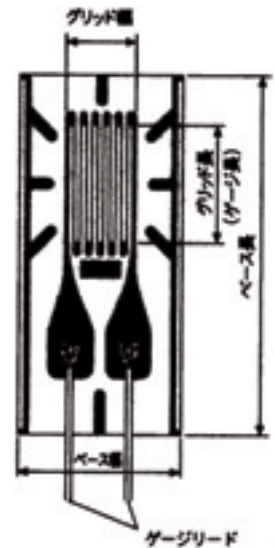


図1 箔ひずみゲージ

\* 計測事業部 計測エンジニアリング部 部長

ポリエステル系等を使用する。それ以上の高温環境では、溶射型ひずみゲージ（フリーフィラメント型ひずみゲージ）をアルミナで溶射して貼り付ける（図2参照）かセラミック系接着剤で貼り付ける。とくに、動翼の場合は高温／高遠心力環境下であり、ひずみゲージが試験中に飛散することがあるため、耐久性の高いひずみゲージ及びリード線の貼付け技術が必要である。図3にターボチャージャのタービン動翼に貼り付けた溶射型ひずみゲージの例を示す。この例ではグリッド幅：3.5 mm、ゲージ長：5 mmのゲージが溶射されている。

高温環境で使用する溶射型ひずみゲージは貼付け時の厚みを0.5 mm以下に抑えているが、計測対象が小型翼の場合、空力性能を阻害したり、剛性（固有振動数）に影響を与えることがあるため、

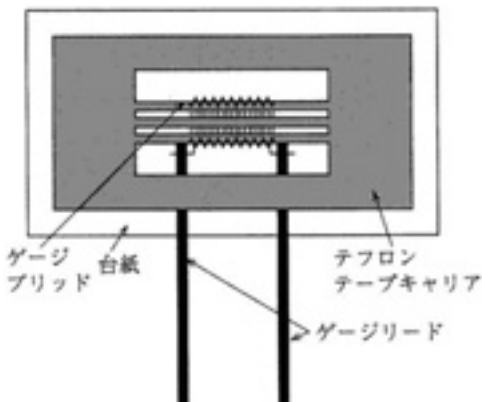


図2 溶射型ひずみゲージ

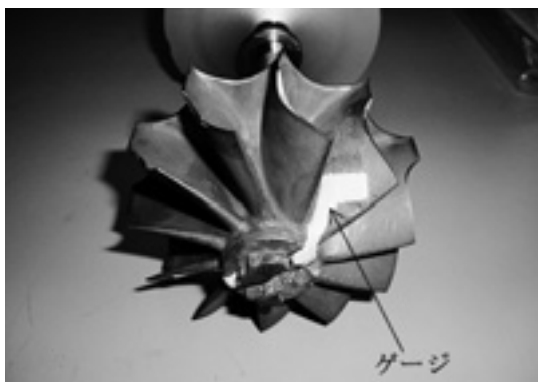


図3 溶射型ひずみゲージの貼付け例

翼面に直接スパッタリングすることによりひずみゲージを形成する薄膜ひずみゲージがI H I空本部分で実用化されている。

### 3. 回転系から静止系への信号伝達

翼に貼付けられたひずみゲージは回転系に存在し、静止系の計器との間で回路を形成して信号をやりとりする必要がある。この目的のために、スリップリングやテレメータが利用されている。

#### 3.1 スリップリング

スリップリングによる信号伝達は古くから最も広く用いられてきた。用途に応じた仕様（最高使用回転数、チャンネル数、寸法、精度、寿命等）を満足するものを選定しなければならない。スリップリングは、ドラム型（リング外周にブラシが接触）、フェース型（円盤の側面にブラシが接触）、特殊型（水銀の流体接触を利用）に大きく分けられる。最近では同時多点計測の要求から多チャンネルのスリップリングも市販されている。

翼振動計測の対象となるガスタービンのような高速回転体の場合は、ドラム型が採用されることが多い。この場合、リングとブラシ間の発熱が問題となるため、図4に示すようにフロン（現在は代替フロン）と潤滑油の混合液を循環させ、冷却・潤滑に使用する。

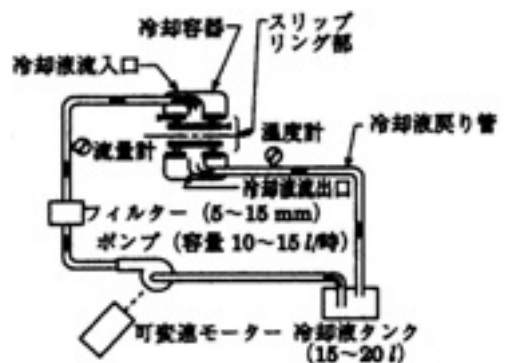


図4 スリップリング冷却システム例

スリップリングは通常、ターボ機械の軸端に設置される。図5に、一例として200チャンネルのスリップリングが航空エンジン軸端に取付けられた状況を示す。設置により軸系の振動に悪影響を与えず、また、自分自身の振動も小さくする必要があるのである。スリップリングと軸との接続方法、スリップリングの固定及び芯出し等検討すべきことが多々ある。熱変形による芯ずれも考慮する必要がある。



図5 多チャンネルスリップリングの設置例

### 3.2 テレメータ

センサであるひずみゲージからの信号を回転側に取り付けた小型の送信器で電波に変調して静止系に伝送する。それを受信機側で復調し、さらに電気信号に変換するのがテレメータである。回転側及び静止側にそれぞれ送信アンテナ、受信アンテナが必要である。

この方式は非接触式であるため、ノイズやドリフトはあまり問題にならない。ただし、回転側に送信器、アンテナ等を取付ける必要があり、他の方法に比べて回転体に対して大掛かりな改造が必要である。また、テレメータは非常に高価であり、同時に送信できる信号もスリップリングに比べて少ないが、取付けスペースの問題で、テレメータを利用するしかない場合が多々ある。また、デジタル処理により多点の信号を同時に出力できるテレメータも近年開発されており、測定点数の問題はなくなりつつある。

電源はバッテリーと誘導電源の2種類が用いられている。前者は回転側に取付けられるが、バッテリー容量により試験時間が制限されると言う欠点がある。しかし、構造が簡単で安価なため広く用いられている。後者は信号受信のアンテナを介して静止側から回転側に誘導電源を供給するもので、計測時間の制限がないが、システムが複雑で高価となる。

図6に誘導電源方式によるジェットエンジンの多チャンネル計測の概念図を示す。

テレメータ計測においては、送信器やバッテリーはできるだけ回転体の中心部に設置し、遠心力の影響を少なくする必要がある。中心部への装着が不可能な場合は、高い遠心力に耐える送信器やバッテリーを選定する必要がある。近年、ジェットエンジン用として300,000 G、120℃雰囲気耐える送信器（例：14.3 mm×16.7 mm×34.5 mm、重量31 g）、超高速回転体であるターボチャージャ用として超小型送信器（例：φ18 mm×L9 mm、重量5 g）が市販されている。図7にテレメータによるターボチャージャの翼振動試験の様子を示す。圧縮機側の軸端に設置したカプセル内に小型テレメータ（φ25 mm×L25 mm）が装着されている。（図8参照）

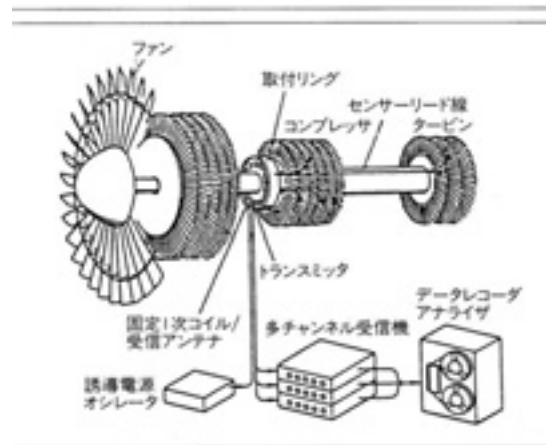


図6 誘導電源による多チャンネル計測例

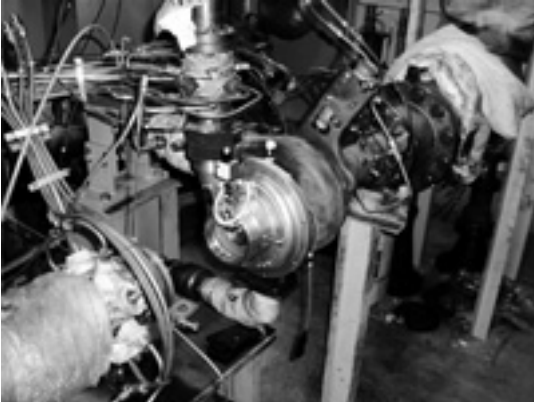


図7 ターボチャージャ翼振動試験の様子

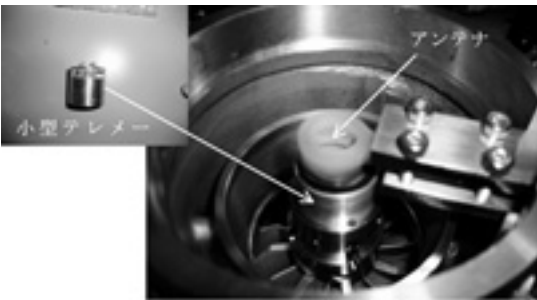


図8 テレメータの装着

#### 4. 非接触翼振動計測

一般には前述のように動翼にひずみゲージを貼付け、スリップリングやテレメータを用いて計測しているが、高温／高速になるとひずみゲージの剥離や信号伝達に不具合が生じ、計測の成功率が低下する。非接触翼振動計測はひずみゲージを使用しないで動翼の振動状況を把握する技術であり、センサの種類により光学的方法と電磁的方法の2種類に分けられる。

##### 4.1 光学的方法

回転中の動翼の先端振幅を静止系から光学的に計測する方法で、I H I 空本部のOPT-V、Hood社のNSMS等がこれに相当する。

図9に光学式翼振動計測法の概念図を示す。静止系のケーシング側からプローブにより翼端部にレーザー光を投光し、反射光を光センサでパルス

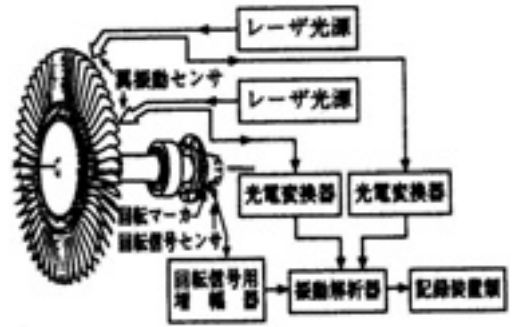


図9 光学式翼振動計測法の概念図

信号として検出し、シャフトの1箇所につけたマーキングを別のセンサで検知して回転信号（リファレンス信号）とする。この回転信号と翼端部のパルス信号との時間差は、もし翼が振動していなければ各々の翼について一定の値をとるが、翼部が振動しているとこの値に変化を生じる。この変化分を検出して解析し、翼の振動を捉えるのがこの方式の原理である。図10にパルス信号の一例を示す。回転信号と翼のパルス信号との時間差の変化分をいかに精度良く検出し信号処理を行うかがポイントとなる。

図11に代表的な2プローブ法による計測の説明を示す。上述のように翼が振動しているためにプローブA-B間を移動する時間のバラツキが生じる。

回転同期振動（回転数の整数倍が翼の固有振動数に一致する場合）について以下に計測原理を解説する。

バネ質量系が加振力： $F_0 \sin(\omega t + \beta)$  を受ける場合の運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t + \beta) \quad (1)$$

この方程式の解は過渡解を無視すると定常解のみが残り、

$$x(t) = X \sin(\omega t + \beta - \phi) \quad (2)$$

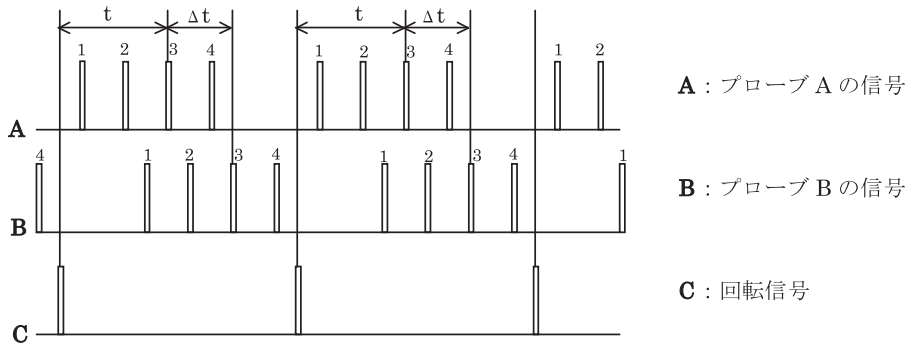


図10 2プローブ法のパルス列

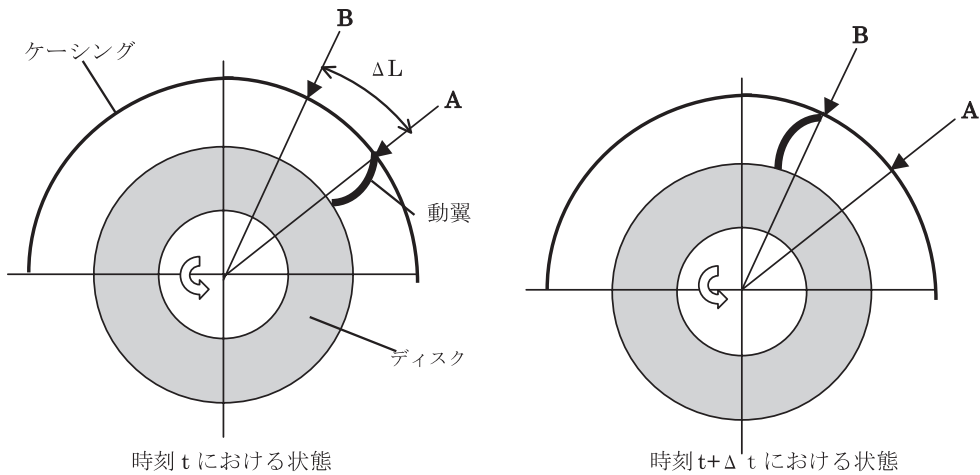


図11 2プローブ法による計測

ここに、 $X$ は定常振動の振幅で、 $\phi$ は位相角である。 $X$ 及び $\phi$ は(2)(1)に代入することにより求めることができ、次の結果が得られる。

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (3)$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (4)$$

さらに、検討を容易にするために以下の量を導入し、(2)式に代入する。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad : \quad \text{不 固有振動数 (rad/s)}$$

$$c_c = 2m\omega_n \quad : \quad \text{限界 係数}$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad : \quad \text{比}$$

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\sqrt{km}}{c} \quad : \quad \text{共振 大係数}$$

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad : \quad \text{振動数比}$$

共振時 ( $\eta = 1$ ) の片振幅を  $a_{res}$  とすると、 $a_{res} = \frac{F_0 Q}{k}$  であり、(2)式は以下の様になる。

$$x(t) = a_{res} \frac{Q(1 - \eta^2)\sin(\omega t + \beta) - \eta \cos(\omega t + \beta)}{Q^2(1 - \eta^2)^2 + \eta^2} \quad (5)$$

$L$ を回転信号からプローブAまでの距離、 $U$ を翼端周速度とすると、時刻  $t + \Delta t$ において動翼先端がプローブBの位置を通る時



$$L + \Delta L = U(t + \Delta t) + a_{\text{res}} \frac{Q(1-\eta^2)\sin\{\omega(t + \Delta t) + \beta\} - \eta \cos\{\omega(t + \Delta t) + \beta\}}{Q^2(1-\eta^2)^2 + \eta^2} \quad (6)$$

ここで、 $L = U \cdot t$ であり、これを (6)式から差し引き整理すると

$$\Delta L = U \Delta t + a_{\text{res}} \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) \frac{Q(1-\eta^2)\cos(\omega t + \frac{\omega \Delta t}{2} + \beta) - \eta \sin(\omega t + \frac{\omega \Delta t}{2} + \beta)}{Q^2(1-\eta^2)^2 + \eta^2} \quad (7)$$

次に、 $\delta t$ を翼振動による信号到着時間のバラツキとし、 $\Delta t = \frac{\Delta L}{U} - \delta t$ を (7)式に代入して高次の微量を省略すると

$$\delta t = 2 \frac{a_{\text{res}}}{U} \left\{ \frac{\omega \Delta L}{2U} - \frac{\left(\frac{\omega \Delta L}{2U}\right)^3}{6} \right\} \frac{Q(1-\eta^2)\cos(\omega t + \frac{\omega \Delta L}{2U} + \beta) - \eta \sin(\omega t + \frac{\omega \Delta L}{2U} + \beta)}{Q^2(1-\eta^2)^2 + \eta^2} \quad (8)$$

ここで、 $\eta$ を変化させた時の $\delta t$ の最大値と最小値の差を求めると、

$$(\delta t)_{\text{max}} - (\delta t)_{\text{min}} = 2 \frac{a_{\text{res}}}{U} \left\{ \frac{\omega \Delta L}{2U} - \frac{\left(\frac{\omega \Delta L}{2U}\right)^3}{6} \right\} \quad (9)$$

左辺を $\tau$ とおき、 $a_{\text{res}}$ を求めると

$$a_{\text{res}} = \frac{U \cdot \tau}{\frac{\omega \Delta L}{U} - \frac{\left(\frac{\omega \Delta L}{2U}\right)^3}{3}} \quad (10)$$

したがって、共振点の近くで回転数を変化させ、プローブ間の通過時間の最大値と最小値の差から (10)式により動翼の振動振幅を求めることができる。

なお、2プローブ法では回転同期振動の回転次数を特定できない。Hood社は3本以上のプローブを使用することにより特定が可能となるシステム (Circumferential Fourier Fit) を開発した。

光学的方法の短所としては、ひずみゲージのように振動応力を直接計測することができず、翼端振幅と最大振動応力との関係を事前に把握しておく必要があることが挙げられる。通常、有限要素

法等による振動解析でモーダル変位とモーダル応力の関係を把握しているが、振動試験機を用いた加振試験により実験的に振幅と振動応力の関係を求める場合もある。

また、光学系を用いているため、オイルミスト、すず等の影響を受け易く、タービン等の計測ではパージが必要である。

しかし、長所としては、計測している全ての翼の振動状態を把握できること、非接触であること、長時間のモニタリングが可能であること、超高速回転体であるターボチャージャの計測が可能であること等が挙げられ、トータル的に見ると、優れた方法である。

#### 4.2 電磁的方法

光学式センサの代わりに渦電流センサを使用する。Hood社は永久磁石を使ったセンサを開発した。非磁性体のケーシングであればケーシングに穴をあけずに翼タイミングパルスを検出することができる (図12参照) ため、Through The Caseセンサと呼ばれる。

強力な永久磁石 (サマリウムコバルト磁石やアルニコ磁石) で磁界を発生させ、翼が通過する際

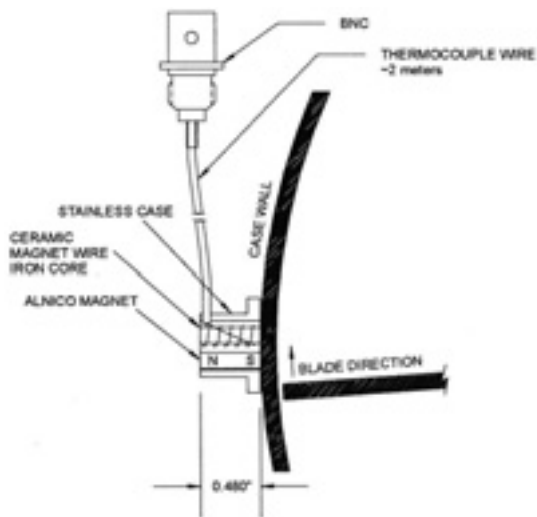


図12 渦電流センサによる計測例

の渦電流の変化は信号受信専用のコイルで検出する。比較的温度の低い圧縮機の計測には大変有効であるが、タービンのような高温雰囲気で使用するのは困難である。しかし、空冷により550℃まで使用に耐えるものが開発されている。

## 5. おわりに

ターボ機械の翼振動計測法について述べた。詳細を割愛したので、不明な点は参考文献を参照頂ければ幸いである。

最近では流体解析技術（CFD）や翼振動応答解析技術の進歩が著しく、かなりの精度で翼振動応力を予測できるようになっているが、高次振動モードの場合は予測が困難であり、実測するしかない」と筆者は考えている。

翼振動計測法は米国、英国を中心に開発がなされているが、非接触翼振動計測が将来的には主流になっていくものと思われる。次号ではHood社のNSMSについて詳しく解説する。

## 参考文献

- (1) 仲田, 皆川, “航空機用ガスタービンにおける計測技術（空力, 構造計測）”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.29 No.6, NOV. 2001, p19～p24
- (2) 岩城, 三堀他, “高圧力過給機の開発時における強度評価（第1報 翼振動の評価）”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.29 No.3, May 2001, p70～p75
- (3) 岩城, 三堀, “小型船用ターボ過給機における翼振動の評価技術”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.29 No.4, July 2001, p51～p55
- (4) Jimbo, K., Aono H., Chikata T., and Hagiwara Y., “Optical Blade Vibration Measurements of Axial-Flow Compressor”, Proc. SESA 1983 Spring Meeting., 1983
- (5) 中野, 望月, “軸流送風機動翼振動の非接触法による計測”, ターボ機械, 講演会, 1985
- (6) Roth, H., “Measuring Vibration on Turbine Blade by Optical Means”, Brown Boveri Review, 64, (1977-1)
- (7) 三上, 松田, “センサ溶射技術”, IIC REVIEW/2004/10. No.32, p40～p44
- (8) 三上, “ターボ機械の翼振動（その1：翼振動のメカニズム）”, IIC REVIEW/2005/4. No.33, p12～p18
- (9) 社団法人 日本非破壊検査協会, “ひずみ測定Ⅲ”平成10年改定版
- (10) (株)共和電業 「ひずみゲージ, センサ計測機器 総合カタログ」2004～2005