

## 高速スピンドルの新たなバランス修正法(多速度・多面法)

New balancing correction method of high-speed spindle(Various speed・multi-plane method)

中藤彰規\*  
Akinori Nakato

Key words : machine tool spindle,high-speed spindle motor,high-speed slicer,cyclone separator,turbo molecular pump

### 1. 緒言

本技術開発のきっかけは、某繊維メーカーから「繊維巻取り装置の振動を運転領域全域で簡単に低減できるものはないだろうか」と相談を持ちかけられた事に始まる。繊維巻取り装置は高速回転し、しかも巻き取るスピードを変化させて運転するため、運転領域全域で振動を抑える必要がある。しかし、従来技術のバランス修正方法は、一定回転でバランス測定を行うため、運転領域全域で振動を抑えるには長時間のバランス修正作業を要した。

そこで、運転領域全域の振動を抑えることが簡単にそして効率良くできるように新たなバランス修正法の開発に取り組んだ。

以前から本技術の考えは持っていたものの商品化までに約2年半の歳月を費やした。繊維メーカー・工作機械メーカーにプロトタイプを持ち込み何度も実験を繰り返した。さらにバランス修正の作業性も考慮して展示会であらゆる産業分野の方々の意見を聞いた。そして新たなバランス修正法である多速度・多面法を採用した世界で初めての弾性ロータ用フィールドバランスの商品化に成功した。

これから、この多速度・多面法の有効性と効果について事例を元に述べると共に、回転体(ロータ)のバランス修正を行うのに重要なポイントとなるロータの分類、危険速度について説明する。

### 2. ロータと危険速度

#### 2.1 剛性ロータと弾性ロータ

ロータは軸のたわみ性から剛性ロータと弾性ロータに分類される。

剛性ロータは回転速度が危険速度に比べて十分低く、弾性変形が無視できるロータである。それに対して弾性ロータは回転速度が危険速度の付近またはそれ以上あり、弾性変形が無視できないロータのことである。

従って同じロータでも、使用回転数が危険速度より低いかそれ以上であるかにより、剛性ロータと弾性ロータに分類されることになる。このことから本来ならばロータの分類によってバランス修正法を変える必要があるが、従来から行われていた

バランス修正法ではロータの分類に関係なく同じ修正法が用いられている。(従来のバランス修正法とは、ロータをある一定速度で回転させ、その回転数のみでバランス修正を行うこと。)

その場合、剛性ロータに限れば従来からの方法でバランス修正は可能だが、弾性ロータになるとバランス修正が不可能だったり、バランス修正ができたとしても運転領域全域の振動が低減しないために、バランス修正作業に長時間を要していた。

この問題を解消するために弾性ロータのバランス修正に着目し、新たなバランス修正法の多速度・多面法を開発するに至った。

#### 2.2 弾性ロータの危険速度

弾性ロータの危険速度とは、ロータの曲げ固有振動とそのロータを回転させた時の回転数が一致したときの回転数を表し、ふれまわり振幅はピーク値を示す。このときの回転軸の変形モードは固有振動モードの形と同じになる。

図1は、ビルトインモータの回転軸が1次～3次の危険速度に到達した時の回転軸の振動モードを表している。

除々に回転数が上がっていくと、最初に1次の固有振動モードが現れる。この時には回転軸の中央部が大きく振動する振動モードが発生し、さらに回転数を上げていくと2次、3次の振動モードが現れてくる。

このような弾性ロータの振動(弾性変形)を抑えるために、バランス修正はとても重要な作業といえる。

### 3. 従来のバランス修正法

従来技術ではロータを剛性ロータとしてバランス修正を行っていた。従来の計測方法はロータの回転数が定常状態において振動ベクトルを取得し、その振動情報から演算を行い、バランス修正を実施している。

図2は、ある弾性ロータの振動特性を表したグラフで、横軸に回転数、縦軸に振動量を表示している。1)はバランス修正前の状態で、各回転数における振動量をプロットしていき、それを線で繋げたものである。

2)は修正前の状態から、従来技術によりバランス修正(8,600rpmにて実施)した後に全域の振動をみたものである。この測定回転数を8,600rpmにした理由は、このような振動量が大きい危険速度付近の回転数では振動ベクトルが不安定

\* シグマ電子工業(株)開発課:〒719-0104 岡山県浅口市金光町  
占見新田185-3

になり、バランス修正が困難であるため、比較的振動ベクトルが安定している回転数を選んで行った。

バランス修正を実施した8,600rpmでは振動が低減しているが、それ以外の回転領域では不釣り合い振動が残留している。

従来技術では剛性ロータのバランス修正を考えた場合には有効な手法だが、図2のように、運転領域に危険速度を持つような弾性ロータのバランス修正には、様々な問題点が発生する。すなわち、機械寿命の低下、騒音公害、工作機械においては加工精度の低下といった様々な問題が発生する。

このように危険速度を超えて運転する弾性ロータのバランスを修正する場合、従来方法では運転全回転領域の不釣り合い振動を低減させることは困難になる。

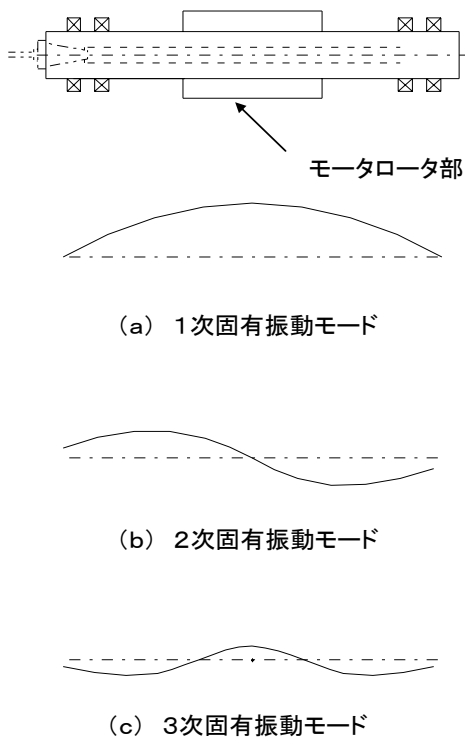


図1 固有振動モード

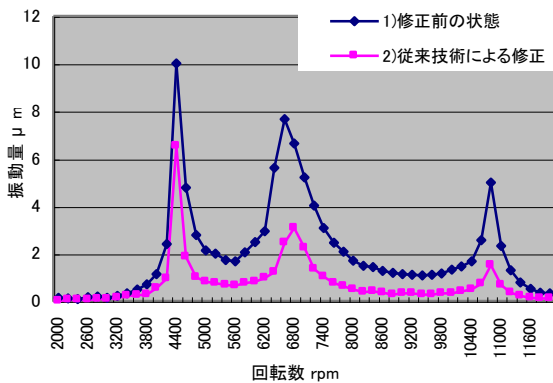


図2 振動量—回転数特性

図3は、ロータの回転数N1からN29まで各回転数における振動ベクトルの軌跡を描いている。このロータは危険速度を超えて運転しているため、弾性ロータとして扱われる。弾性ロータはこのように回転数の増加に伴い、振動ベクトルが刻々と変化していく。弾性ロータを従来方法により回転数N21にて測定した場合、従来方法ではロータを剛性ロータとしてバランス修正を行っているため、回転数N21での振動ベクトルV21は、回転数が増えたと振動ベクトルの方向は一定であるとしていた。そのため、従来方法ではV21のみの振動ベクトルから釣り合い計算を行うため、V21の振動は低減させることが可能だが、その他の回転数での振動は低減されない。

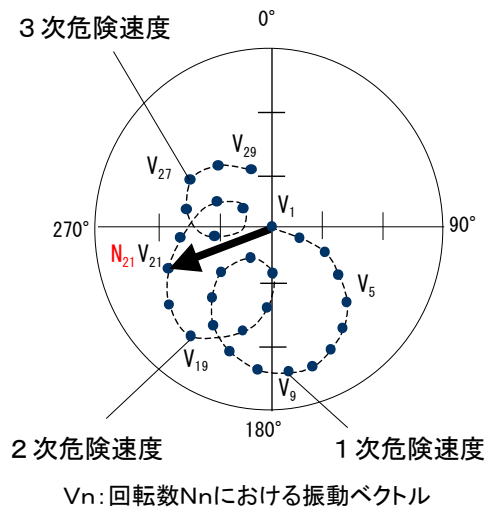


図3 不釣り合い振動ベクトル

#### 4. 多速度・多面法の開発

##### 4.1 開発に至る背景

先程述べた問題を根本的に解決するため多速度・多面法を開発した。工作機械の主軸は高速回転化・大型化に伴い、その曲げ剛性は相対的に低下し、運転領域に危険速度を持つようになってきている。

図4は、ある工作機械メーカーの主軸を測定したもののだが、横軸に回転数、縦軸に振動量をとったグラフである。ロータの回転数が上昇するにつれてロータの不釣り合いによってロータが徐々に弾性変形をしはじめ、危険速度に達すると振れまわり振幅は最大になる。さらに回転数を上げていくと、2次の危険速度が現れた。このように振動量が急激に大きくなる点が危険速度(固有振動数)である。

弾性変形を起こすようなロータのバランス修正を行う場合、先程述べたように従来のバランス修正法では運転全回転領域で十分な釣り合い状態を得ることが難いため、弾性ロータ用としてのバランス修正法の開発が強く望まれていた。

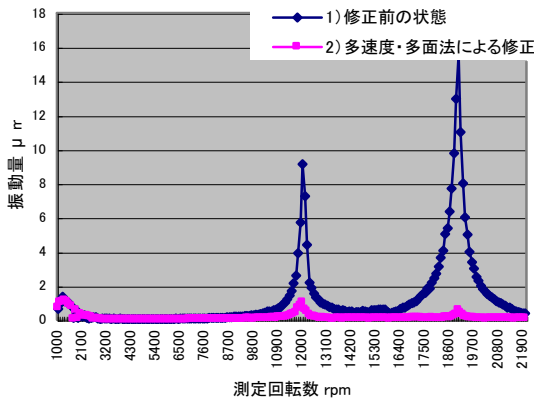


図4 振動量一回転数特性

#### 4.2 多速度・多面法を利用したバランス修正法

多速度・多面法の計測方法は、ロータの回転数が定格まで上昇中に、任意の測定間隔で振動ベクトルを自動的に取得し、全ての振動データから最小二乗法を利用して演算を行い、バランス修正を実施する。図3は、V1 からV29 まで任意の測定間隔で取得した全ての振動ベクトルから釣合い計算をしてバランス修正を行うため、運転全回転領域の不釣合い振動を一括して低減させることが可能である。

多速度・多面法の効果を説明するために、多速度・多面法を利用して弾性ロータのバランス修正を行った場合と、従来方法を利用してバランス修正を行った場合とを比較した。

図5は、横軸に回転数、縦軸に振動量を取り、1) バランス修正前の状態、2) 従来技術による修正、3) 多速度・多面法による修正を表したグラフである。このグラフをみると多速度・多面法による修正を行ったものは全域に渡って振動量が大幅に低減していることが分かる。

この結果から、可変速運転をするようなロータには、有効なバランス修正法といえる。近年の工作機械は、高速化に伴い今後益々多速度・多面法を使用したバランス修正方法が必要になると考えられる。また、マシニングセンタ等の様々な回転数で加工する工作機械の場合、使用回転数の制約を受けず、運転全回転領域に渡って、高精度な加工が実現可能になる。

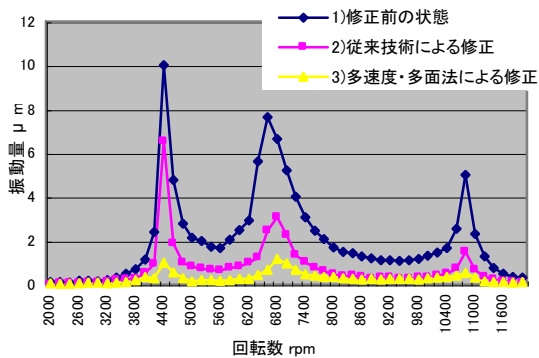


図5 振動量一回転数特性

#### 4.3 高速スピンドルのバランス修正法

図6は、一般的なビルトインモータの主軸を表す。

従来のバランス測定法では、ロータを剛性体と考えバランス修正を実施していたため、修正面A(①)と修正面D(④)の主軸の両端 2 面でバランス修正をおこなっていた。真のアンバランス位置と修正面の二点間に剛性があるロータ(つまり剛性ロータ)の場合はこれで成立するが、高速化に伴い弾性的になってきている現代のスピンドルではこれは成り立たない。

特にビルトインモータの主軸のバランス修正を行う場合、不釣合いの主原因が構造上モータロータ部に存在するため、それを無理やり主軸の両端でバランス修正を行うと、ねじり振動等が発生してしまう危険性がある。

従って、主軸の両端だけでなく、不釣合いの主原因であるモータロータの両端(図5②, ③)にも修正面を設けることが必要になる。そうすることにより、バランス修正の修正効率が向上し、スムーズにバランス修正作業が行える。

あるメーカーでは、多速度・多面法を導入したところ、従来方法より作業効率が4倍上がった実績がある。

また、通常スピンドルのバランス修正は、軸受付近に振動センサを設置して行う。それにより確かに軸受部の振動は小さくなり、軸受に負担がかからないため機械の寿命という点からみると効果はあるが、加工精度という点からみると工具の振れを無くすことが必要になる。

そこで非接触の変位センサを使い、工具の振れと軸受部の両方の振動が低減するようにバランス修正を行えば、より高性能な機械を実現可能である。

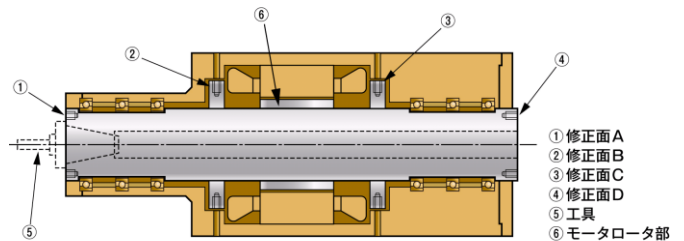


図-7 ビルトインモータの主軸  
図10 ビルトインモータの土脚

#### 5. 弾性ロータ用フィールドバランス

我々は先述した多速度・多面法をバランス測定器(フィールドバランス)に導入した。その特徴は、

① 運転全回転領域の振動を抑える事を可能にした。これは先程説明した多速度・多面法を導入することにより運転領域に危険速度を持つ弾性ロータのバランス修正が可能である。

② 修正面数が最大 4 面まで可能になる。従来の方法を利用したフィールドバランスは主に剛性ロータのバランス修正を目的としていたため、修正面数は最大 2 面であったが、この多速度・多面法を導入したバランス測定器は釣合い計算に最小二乗法を利用することにより、振動センサが1個か、もしくは2個で最大4面まで測定可能である。

図7は、実際の修正画面表示である。これは A, B, C, D の 4 面で修正した場合の各面の修正指示量を表示している。

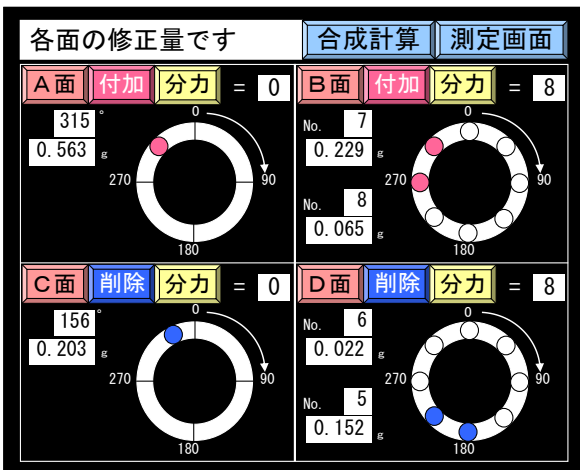


図7 修正画面

③修正結果の予測機能がある。これは測定を行う前にバランス修正後の振動量を予測する機能で、図7のように各修正面の修正指示量どおりに修正作業を行えば、計測範囲の振動が低減した様子をグラフで表示できる。

図8は、その実際の測定画面である。振動センサを 2 個使用して測定を行っており、(A)線がバランス修正前の振動波形、(B)線が取得した最新の振動波形、(C)線が予測した振動波形である。また、修正面A～Dを自由な組み合わせで選択でき、その選択した修正面で実際に修正を実施した場合の予測波形も確認できるため、最も効率の良い修正面の選択が可能である。

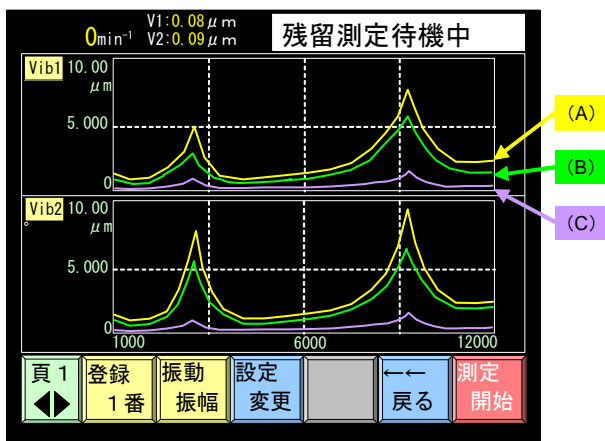


図8 測定画面

④修正回転数の選定に熟練度を必要としない。先述したように従来の方法で弾性ロータのバランス修正を行う場合、危険速度付近を避けてバランス修正を行わなくてはならない。また、バランス修正が行い易い回転数を見つけ出すといったことが必要になってくる。しかし、この測定器を使用すれば、全領域の振動データを抽出して計算を行うため、そのような熟練

度を必要としない。

⑤タッチパネルによる対話方式のため操作が簡単で、グラフ表示により、初期の不釣り合い振動と修正後の残留振動の比較等が容易に行える。

## 6. 結言

本技術は高速運転するロータ、特に弾性ロータのバランス修正を目的として開発され、バランス修正作業に熟練度を必要とせず、効率良くできることが特徴である。

今後の課題としては、計測スピードを上げる必要がある。現在は計測精度を維持するために振動データの取得に制限があり、計測時にはロータの加速または減速スピードを緩めなければならない。そのため、計測前にはデータ取得の条件を設定する必要がある。現在、我々はそのような設定をしなくても機械の実使用運転の加減速スピードで計測ができるように計測・演算処理のスピードを上げることに取組んでいる。

それが達成できれば、バランス修正作業時に剛性ロータ、弾性ロータの分類を意識すること無く、どのような機械でも通常運転させるだけでバランス状態が分かり、さらに作業効率を上げることができると考えている。

## 謝辞

本技術開発の実施にあたり、実験にご協力いただいた東芝機械(株)田中克敏技監、TMT マシナリー(株)北川尚央氏に御礼申し上げます。

## 7. 参考文献

- 1) 塩幡宏規, ターボ機械のバランシング(基礎から応用まで)ターボ機械, 30, 5(2002)312.
- 2) 社団法人 日本機械学会, 機械工学便覧(1987) A3-172