

精密機器の振動特性に部材締結部がおよぼす影響の解明

Effect of Jointed Layer on Vibration Characteristics of High Precision Machine

プロジェクト代表者：山本 浩（理工学研究科・助教授）
Hiroshi YAMAMOTO

(Graduate School of Science and Engineering, Associate Professor)

1 緒論

超精密加工機などの精密機器は、一般に複数の部材から構成されており、複数部材の潤滑部分、あるいは複数部材のねじやボルトによる締結部分が存在するため、単一部品の振動特性とは非常に異なる振動特性を示す。精密機器の性能向上のためには、その運動精度の向上が必須であり、そのためには、まず系の振動特性の高精度の把握と、それに基づく振動低減指針の提案は最も重要な課題の一つである。

本研究は、精密機器の振動振幅の低減を図るため、静圧エアスピンドルのスピンドルロータを対象として、その固有振動数および減衰比などの振動特性に、構造部材の締結面の形状、締結力などの締結状態がおよぼす影響を明らかにするとともに、締結部の等価剛性および減衰モデルを提案し、その同定手法を明らかにすることを目的とする。

2 実験装置および実験方法

2.1 スピンドルロータ構造概略 図1に本研究で対象とするスピンドルロータの構造概略を示す。ロータは静圧エアスピンドルにおけるスラスト軸受面に対応するスラスト板2枚と、ジャーナル軸受面に対応するジャーナル部により構成され、ジャーナル部のそれぞれの端面にボルトによりスラスト板が取り付けられている。また部材の締結部分の影響をより明らかにするため、2枚のスラスト板およびジャーナル部が一体となった、すなわち締結部分が存在しない同寸のスピンドルロータ（以下、Single piece と呼ぶ）も製作した。これらについて実験モード解析により固有振動数、減衰比、振動モードを求めた。

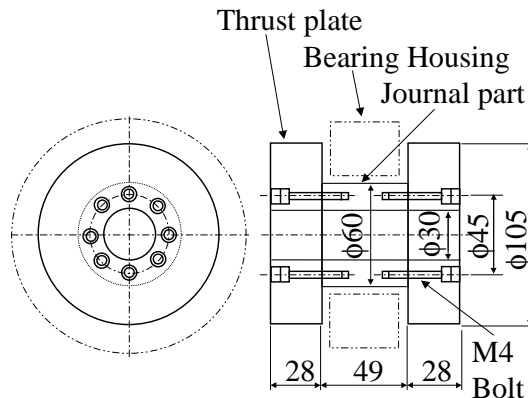


図1: スピンドルロータ構造概略

2.2 実験方法 スピンドルロータを柔らかい台（スポンジ）の上に置いた自由支持状態で、インパルスハンマでロータを打撃したときの打撃力信号と、スピンドルロータのスラスト板上面の最も外側の部分に取り付けた加速度センサにより得られる加速度信号をFFTに入力し伝達関数を得る。得られた伝達関数をカーブフィットすることにより、固有振動数および減衰比と振動モードを求める。

3 締結部等価剛性および減衰同定方法

締結部の動的変形特性はボルトの弾性及び接合面の局所的な弾塑性に起因しているが、マクロに見た機械的特性は、接合面に対して垂直方向と水平方向のばねおよび減衰に近似できると考えられる。そこでここでは、スラスト板とジャーナル部が、単位面積あたり k_z および k_r のばね定数をもつ垂直方向および水平方向のばねと、単位面積あたり d_z および d_r の等価ヒステリシス減衰係数をもつ垂直方向および水平方向の減衰要素で結合していると考えた、図2のような力学モデルと仮定する。この力学モデルに対し締結部分が曲げ変形、せん断変形、圧縮および引っ張りを受けて変化する6次までの振動モードの固有振動数および減衰比を有限要素法を用いて解析し、ロータの固有振動数および減衰比の実験値から等価ばね定数および等価減衰係数を同定した。2つのばね定数 k_z および k_r と、2つの減衰係数 d_z および d_r は、感度解析の手法を用い、2つの振動モードに対応する固有振動数および減衰比の実験値より同定することができる。よって、こうして同定された等価ばね定数および減衰係数を用いて他の固有振動数および減衰比を計算したとき、この計算値がどの程度一致するかによってこの締結部ばねおよび減衰モデルの妥当性の有無が判定できる。

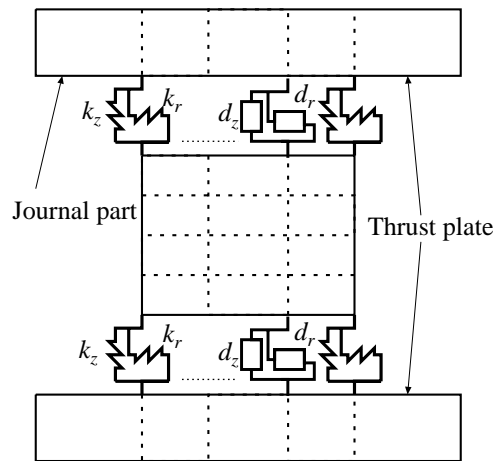


図 2: 解析モデル

4 結果

4.1 締結面表面形状が固有振動数および減衰比におよぼす影響 図3に、ボルト穴近傍にざぐり加工を施さない場合とざぐり加工を施した場合での、1次振動モードにおける固有振動数および減衰比と締結トルクの関係を示す。

いずれの場合も締結トルクが高くなるにつれ、固有振動数は高くなり減衰比は低くなる。そして、ざぐり径 $d_c = 6\text{mm}$ の場合は、ざぐりの無い場合より固有振動数は高くなるが、これは、ざぐりの無い場合には、ボルト穴近傍では接触圧力は高く、ボルト穴から遠い領域では接触圧力はやや低くなってしまいが、ボルト穴近傍にざぐり加工を施した場合は、全体的にほぼ均一の圧力分布となるため、締結面全体における接触面積が大きくなり、締結面における剛性が高くなるため、固有振動数が高くなると考えられる。またざぐり径 $d_c = 8\text{mm}$ の場合はざぐり径 $d_c = 6\text{mm}$ の場合に比べ固有振動数は低くなるが、これはざぐり径が大きくなったことにより締結部の面積そのものが小さくなったため、剛性が低下し固有振動数が低くなったと考えられる。

また、ざぐり径 $d_c = 6\text{mm}$ の場合はざぐりの無い場合より固有振動数は高くなるにもかかわらず減衰比も高くなるが、ざぐり径 $d_c = 8\text{mm}$ の場合はざぐり径 $d_c = 6\text{mm}$ の場合に比べ減衰比は低くなることから、振動低減という観点からは、最適なざぐり径が存在するといえる。

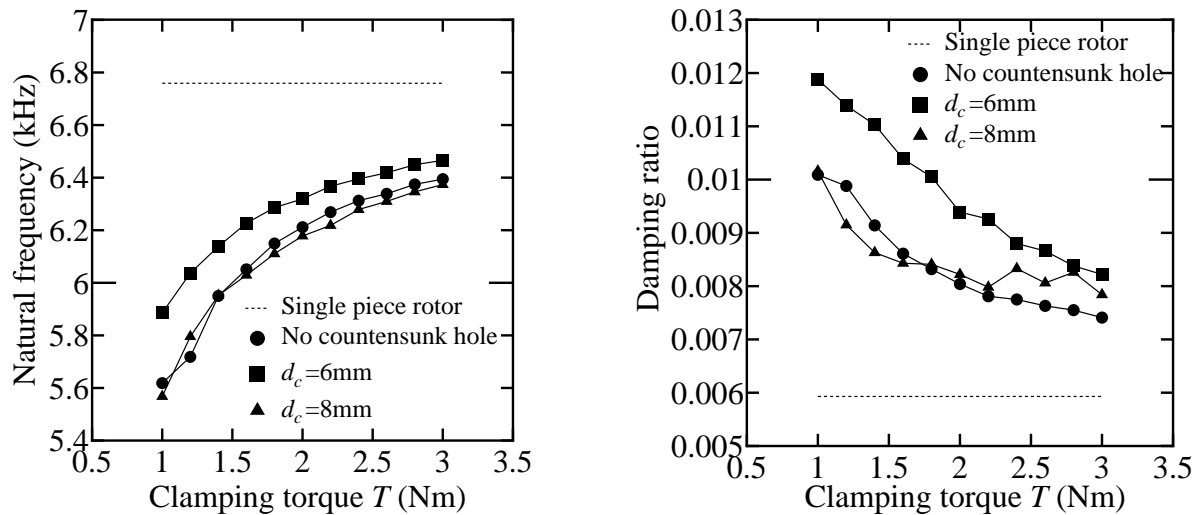


図 3: 締結トルクと固有振動数および減衰比の関係

4.2 締結部剛性の同定 図 4 にボルト穴近傍にざぐり加工を施さない場合における、締結トルクと締結部等価ばね定数 k_z および k_r の関係と、実験および同定したばね定数を用いた計算により得られた、1~6 次の固有振動数と締結トルクの関係を示す。

図 4 より締結トルクが高くなるにつれ k_z も k_r もともに高くなるが、締結トルクの変化に対しては k_r に比べ k_z の方が大きく変化する。また、図 4 において、同定に使用していない 3 次~6 次までの固有振動数を比較すると 3 次から 5 次までは、締結トルクを大きくすると実験値に対する解析値の誤差は大きくなるがその誤差は最大で、それぞれ 1.5%、6.0%、6.1%であり、また、6 次においては、締結トルクを大きくすると実験値に対する解析値の誤差が僅かではあるが小さくなり、その誤差は最大で 8.2%であった。以上のように、実験結果に比べ解析結果の固有振動数はやや大きくなったがかなりよく一致しており、このことから、提案した解析モデルと同定手法は妥当であるといえる。

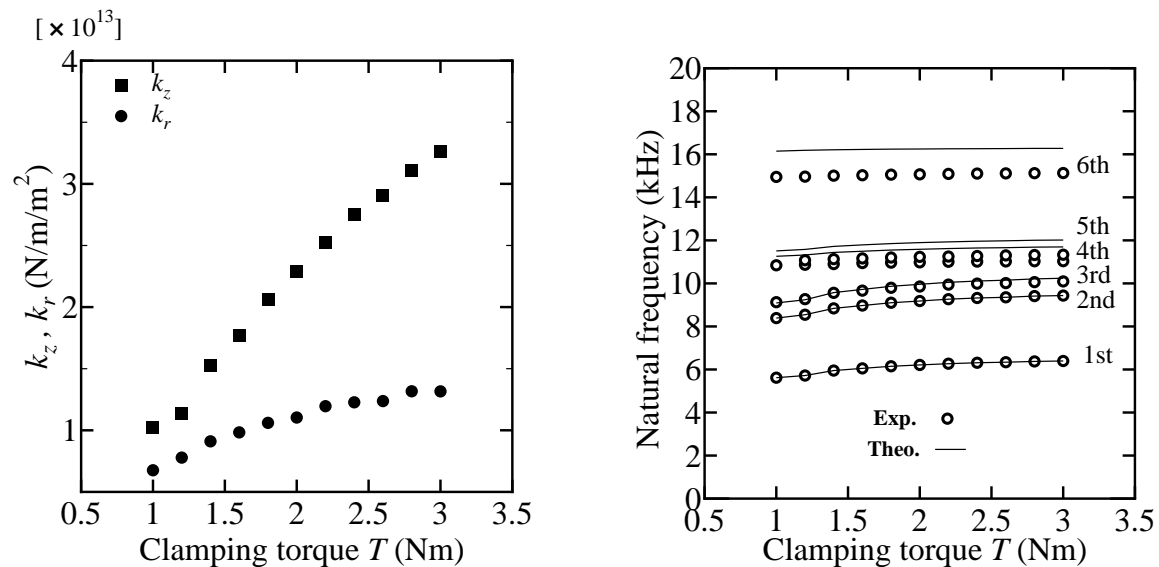


図 4: 締結トルクと等価剛性および固有振動数の関係

4.3 締結部減衰の同定 図 5 にボルト穴近傍にざぐり加工を施さない場合における、締結トルクと締結部等価減衰係数 d_z および d_r の関係と、実験および同定した減衰係数を用いた計算により得られた、1~6 次の減衰比と締結トルクの関係を示す。図 5 において、同定に使用していない 3 次以降の振動モードでの

実験値と解析値の誤差は、3次では-6.5%~6.9%、4次では67.9%~87.7%、5次では29.4%~53.2%、6次では-11.5%~-23.3%と6次振動モードを除き、実験値よりも減衰比は低い値で求められていることが確認できる。4次より高次の振動モードにおける、実験値と解析値における減衰比の大きな誤差は、図4に示すように、4次より高次の固有振動数については、解析値の方が実験値より高くなっており、かつその差は高次モードほど大きくなることに対応している。

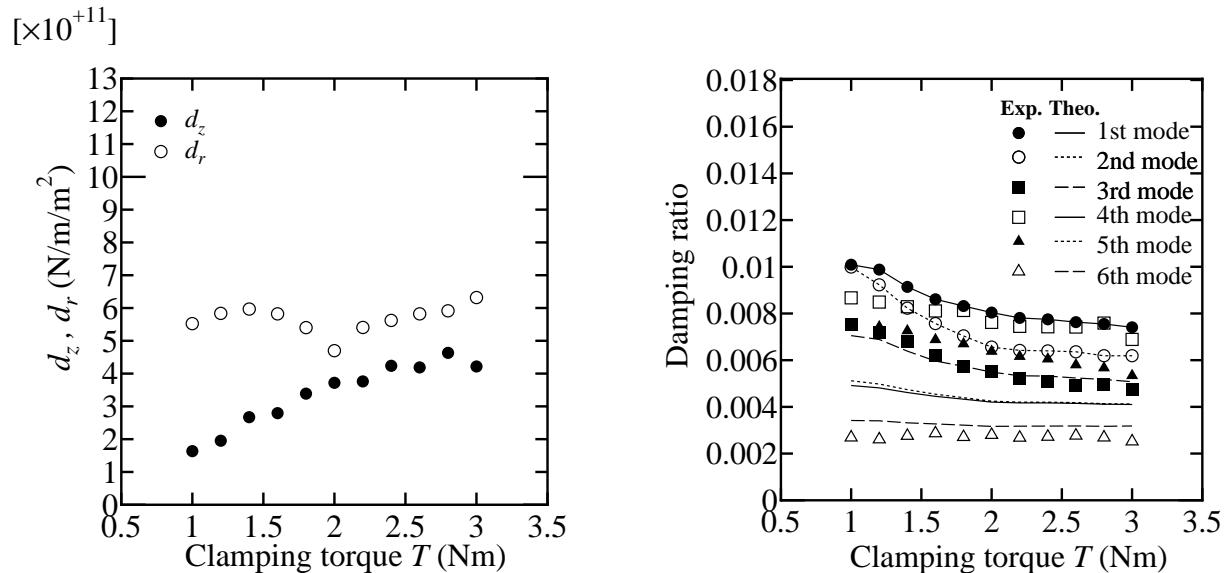


図5: 締結トルクと等価減衰係数および減衰比の関係

5 結論

本研究では精密機器の振動特性に部材締結部がおよぼす影響を明らかにし、振動振幅の低減を図ることを目的として、スピンドルロータの曲げ振動モードに着目し、締結状態が振動特性におよぼす影響を実験モード解析により明らかにした。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) ざぐり径によらず、ボルトの締結トルクを高くするほど固有振動数は高くなる。またざぐりの無い場合よりざぐり径を6mmとした場合の方が固有振動数は高くなるが、ざぐり径を8mmとした場合は6mmの場合よりも固有振動数は低くなる。さらに、ざぐり径を6mmとした場合にもっともモード減衰比が高くなることから、適当な径のざぐりを設けることにより、固有振動数およびモード減衰比を高めることができ、結果として系の振動振幅を低減し得る。
- (2) 締結部を等価剛性および等価減衰でモデル化し、実験により得られた低次の2つの固有振動数およびモード減衰比の値を用いて、締結面における接線および法線方向の2つの締結部等価剛性および減衰を同定する手法を開発した。そして、有限要素法による定式化に基づいた、締結部剛性および減衰を同定する数値解析プログラムを作成し、実験により得られた固有振動数およびモード減衰比の値を用いて締結部等価剛性および減衰係数を同定した。同定プログラムにより求めた締結部剛性および減衰を用いることにより、締結部剛性および減衰の同定に用いていない高次の固有振動数およびモード減衰比を高い精度で求めることができ、本研究で提案した等価剛性および減衰モデルは妥当であることを明らかにした。