

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（工学部・助教授）
Hiroshi YAMAMOTO
(Faculty of 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。

例えば、高い運動精度を有するため、超精密加工機の主軸として用いられることが多い静圧エアスピンドルについては、これまでは、主に軸（ロータ）と軸受の空気による潤滑部分がスピンドル全体の振動特性に及ぼす影響について多くの研究者が着目し、運動精度の向上を図るべく研究が進められてきたが、複数部材をボルトなどにより締結した構造となっているロータの部材相互の締結状態をも考慮した上で振動特性を明らかにする必要がある。

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、表面あらさおよびうねり、締結力などの締結状態がおよぼす影響を明らかにし、振動低減のための指針を示すことを目的とする。

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。本研究においてはロータをエアスピンドルに組み込まず単体で振動特性を測定するため、ロータ材料は加工性の良い普通鋼 (S45C) とした。また部材の締結部分の影響をより明らかにするため、S45Cから削りだした、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。

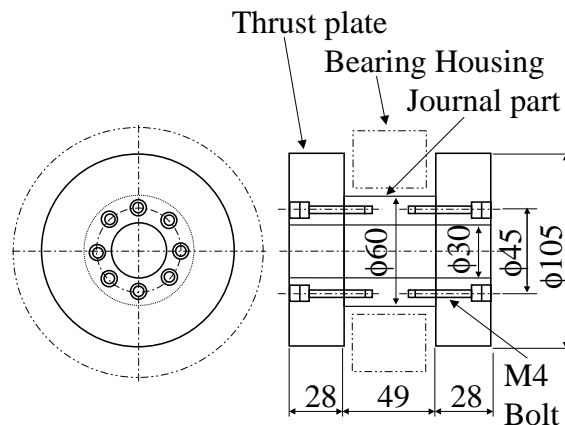


図 1: スピンドルロータ構造概略

2.2 締結面の表面形状 本研究では締結面のミクロな形状誤差である表面あらさとマクロな形状誤差であるうねりが振動特性におよぼす影響を明らかにするため、ボルトにより部材を締結したときのスラスト板およびジャーナル部の接触面に、研削加工を施したロータ (以下 Grinding と呼ぶ)1 個と、旋削加工を施したロータ (以下 Turning1 および Turning2 と呼ぶ)2 個の計 3 個のロータを製作した。そして製作したロータの締結面の表面あらさおよびうねりを明らかにするため、表面形状の測定を行った。研削加工を施した締結面の表面あらさについては、1 軸方向の研削加工を行ったため、各締結面の研削方向に対して平行な方向と垂直な方向に測定した。また旋削加工を施した締結面の表面あらさは円周方向に一様と考え、各締結面の 1 箇所 (最も内側から、ねじ穴を含んで 15mm の範囲) を半径方向に測定した。

表 1 に、測定結果より求めたロータの各締結面の最大あらさおよびまたうねりに相当する締結面の内外周の高低差を示す。表より Grinding1 の表面あらさは Turning1 および Turning2 に比べ著しく小さいことがわかる。また Turning1 と Turning2 について比較すると、その表面あらさは Turning2 の方が小さいが、うねりに相当する内外周の高低差は Turning1 の方が小さいことがわかる。

表 1: 締結面の表面あらさおよびうねり

	Thrust plate Rmax (μm)	Journal part Rmax (μm)	Difference of the height between inside and outside of journal part (μm)
Grinding	0.3	0.6	0.2
Turning1	28	30	2
Turning2	10	15	5

2.3 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。ロータ単体の振動において支配的な振動モードである 3 次までの曲げ振動モードの固有振動数を対象に行った。

3 実験結果

3.1 締結トルクと固有振動数および減衰比の関係 図 2 に固有振動数と締結トルクの間を締結面の表面状態をパラメータとして示す。いずれの場合も締結トルクを大きくすると固有振動数は高くなることが分かる。図 3 に減衰比と締結トルクの間を締結面の表面状態をパラメータとして示す。いずれの場合も締結トルクを大きくすると減衰比は低くなることがわかる。

また、図 2 および 3 に点線で示す Single piece の固有振動数および減衰比の結果から、いずれの場合も固有振動数および減衰比ともに、締結トルクを大きくするにつれ Single piece の値に近づくが、すべての場合について Single piece の固有振動数の方が高く、Single piece の減衰比の方が低くなっていることがわかる。

3.2 表面あらさと固有振動数および減衰比の関係 図 2 より、固有振動数はすべての次数において表面あらさの小さい Grinding の方が表面あらさの大きい Turning1 より 1kHz ほど高くなっている。また、図 3 より、減衰比は Turning1 の方が Grinding より高くなっているが、締結トルクを大きくするにつれその差は減少している。

また、図 2 に点線で示す Single piece の固有振動数および減衰比の結果から、いずれの場合も固有振動数および減衰比ともに、表面あらさが小さい場合の方が Single piece の値に近づいている。

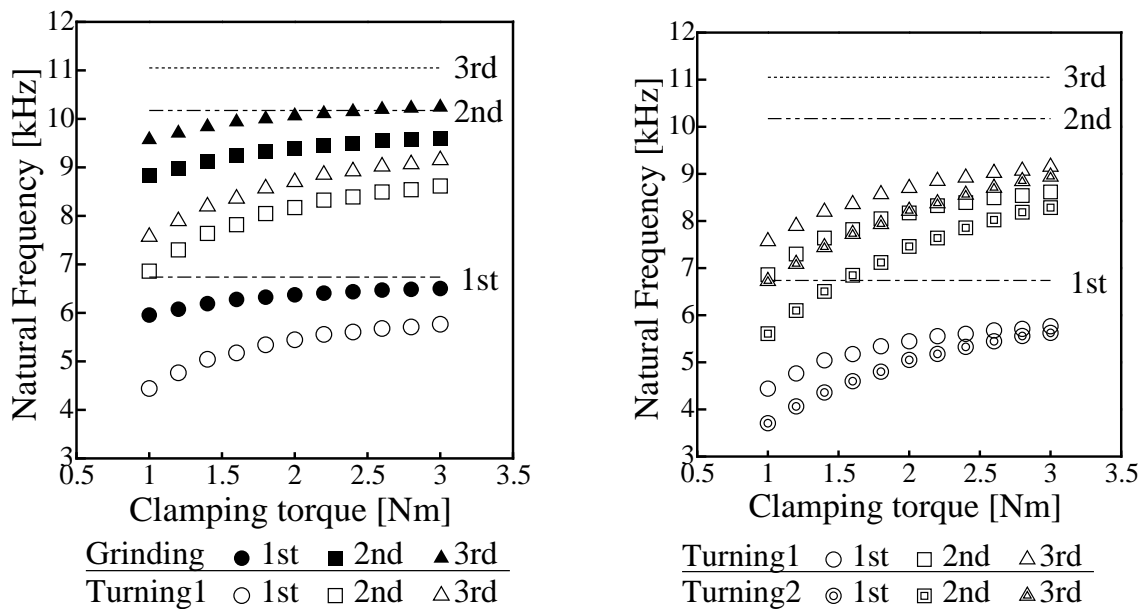


図 2: 締結トルクと固有振動数の関係

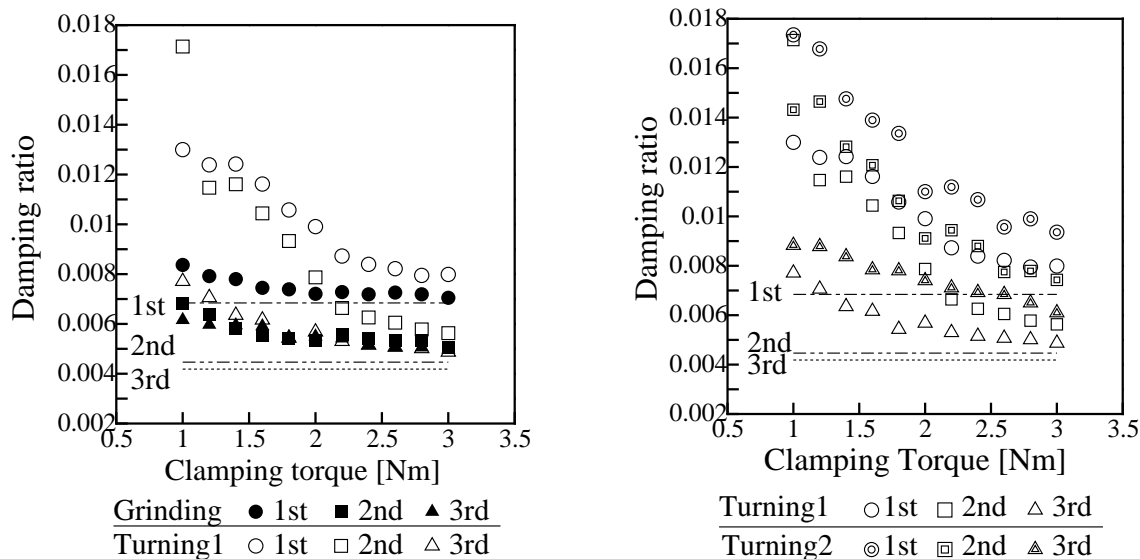


図 3: 締結トルクと減衰比の関係

3.3 表面のうねりと固有振動数および減衰比の関係 図 2 より、固有振動数は締結面の内外周高低差の小さい Turning1 の方が内外周高低差の大きい Turning2 より高くなっていることがわかる。また、図 3 より、減衰比は Turning2 の方が Turning1 より高くなっていることがわかる。

また、図 2 に点線で示す Single piece の固有振動数および減衰比の結果から、いずれの場合も固有振動数および減衰比ともに、表面のうねりが小さい場合の方が Single piece の値に近くなっている。

3.4 考察 締結トルクを高くするほどスラスト板およびジャーナル部の接触力（締結面の押付け力）は高くなるが、接触力が変化しても、スラスト板およびジャーナル部全体の弾塑性変形特性はほとんど変化しないと考えられるので、固有振動数の変化は主に締結状態の変化によるものと考えられる。締結面は平

面ではないため、締結部においては締結面相互は突起頂点でのみ接触しており見掛けの接触面積に比べ実際の接触面積は極めて小さい。そして締結トルクが高い場合ほど、それぞれの接触点における接触面積は増加するとともに接触点そのものも増加するので、全体として接触面積は大きくなる。そこで締結部の接触剛性は高くなり、その結果固有振動数は高くなると考えられる。また表面あらしが小さい場合ほど、あるいは表面のうねりが小さい場合ほど接触面積は大きくなるので、締結部の接触剛性は高くなり、その結果固有振動数は高くなると考えられる。また上述の理由から固有振動数が高くなるため、結果として減衰比が低くなるものと考えられる。

3.5 振動振幅の最大値 外乱力 $F(j\omega)$ に対する変位 $X(j\omega)$ の関係を示す伝達関数 $|H(j\omega)|$ は、 r 次の固有振動数 ω_r において最大値 $|H(j\omega)|_{max} = 1/(2m_r\omega_r^2\zeta_r)$ をとる。ここで m_r および ζ_r はそれぞれ r 次のモード質量およびモード減衰比である。よって、外乱力に対する振動振幅の最大値は $\omega_n^2\zeta$ の値が大きいほど小さくなることがわかる。

表2に、Grinding, Turning1, Turning2における締結トルク 3Nm のときの、1次モードについての $\omega_n^2\zeta$ の値を示す。表より $\omega_n^2\zeta$ の値は Grinding の方が Turning1 より大きくなっており、このことから表面あらしを小さくすることにより、振動振幅を低減できるといえる。また Turning1 に比べ Turning2 の $\omega_n^2\zeta$ の値の方が大きくなっているが、これは表面のうねりは Turning2 の方が大きいものの、表面あらしは Turning2 の方が小さいため、締結トルクが大きい領域では表面あらしの影響が支配的となるためと考えられる。

表 2: $\omega_n^2\zeta$ と締結面状態の関係 (1 次モード, 締結トルク 3 Nm)

	$\omega_n^2\zeta$
Grinding	0.298
Turning1	0.265
Turning2	0.296

4 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) ボルトの締結トルクが大きいほど、固有振動数は高く、減衰比は低くなり、一部品で構成され締結部分が存在しない同寸のロータの値に近づく。また締結トルクが大きくなるにつれ、締結トルクの変化に対する固有振動数および減衰比の変化の割合は小さくなる。
- (2) 表面あらしが小さいほど、また表面のうねりが小さいほど、固有振動数は高く、減衰比は低くなり、一部品で構成され締結部分が存在しない同寸のロータの値に近づく。また締結トルクが大きいほど、うねりの影響は小さくなる。
- (3) 締結面の表面あらしを小さくするほど、固有振動数における振幅を小さくすることができる。