

# 防振ゴムによる高速輪郭制御運動時の振動抑制

神戸大学 ○石田昂平, 白濱優作, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

## 要 旨

工作機械を高速に動作させた際に発生する機械振動は加工面品位を悪化させる。本研究では、工作機械の機台支持部に防振ゴムを用いた際の振動抑制効果を検討した。加振実験と運動軌跡測定を行った結果、防振ゴムは機械全体の振動特性と運動軌跡に大きな影響を及ぼし、軌跡に生じる振動の振幅を低減できるが、低周波数の振動が発生することがわかった。またこの結果をシミュレーションにおいて再現可能かどうかを検討した。

## 1. 緒 言

製品品質と生産効率の両方を向上するために、工作機械には高速かつ高精度な輪郭制御運動が要求される。しかし工作機械を高速なサーボ系で駆動すると加減速時に発生する慣性力による機械振動が発生し、加工面品位を悪化させることが知られている<sup>1)</sup>。

工作機械の機械振動には、機台支持部の剛性が大きな影響を与えることが明らかにされている<sup>2)</sup>。しかし、機械台支持部の防振ゴムが運動特性に及ぼす影響について検討した例は見当たらなかった。そこで本研究では、加振実験による周波数特性の調査と、高速輪郭制御運動時の運動軌跡の測定を行うことで、防振ゴムによる振動抑制効果について調査したほか、それらの結果をシミュレーションにより表現可能か検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 機台支持部

本研究では、4点支持された小形の立て形マシニングセンタを用いて実験を行った。図1に実験に用いた機台支持部の模式図を示す。図1(a)は通常の機台支持部である。図1(b)は防振ゴムを用いた機台支持部であり、通常の機台支持部の下に防振ゴムを敷いた構造となっている。防振ゴムの材質はクロロプレンゴムであり、厚さは8 mmと20 mmの2種類を用いて比較した。

### 2.2 加振実験

図2(a)に示すように、テーブルに加速度計を設置し、インパルスハンマでテーブルをX軸方向およびY軸方向に加振し加速度を測定する。その結果からFFTアナライザにより加振力からテーブル加速度までの伝達関数を算出した。

### 2.3 運動軌跡測定

図2(b)に示すように、テーブル上にグリッドエンコーダを設置し、輪郭制御運動時のテーブル・ヘッド間の相対変位を測定した。テーブルは図3に示すような対角の長さが200 mmのひし形状に送り速度20000 mm/minで運動させた。

## 3. 数学モデル

### 3.1 工作機械のモデル化

本研究のシミュレーションには、高須賀ら<sup>3)</sup>が構築した数学モデル(図4)を用いた。このモデルはテーブル、サドル、ベッド、コラム、ヘッドにそれぞれX軸方向、Y軸方向、Z軸方向の並進とX軸周り、Y軸周り、Z軸周りの回転の6自由度と、各モータの回転角度のそれぞれ1自由度を持たせた、全体で33自由度を有している。

### 3.2 パラメータの決定

本研究では、機台支持部のパラメータを変更することで機台支持部が機械全体の振動特性に与える影響をシミュレーションで表現できるか検討した。機台支持部は設置面との間のX軸方向、Y軸方向、Z軸方向の剛性と粘性で表現される。これらの剛性と粘性は、CADモデルから求めた機械全体の重心の位置から、前後の機台支持部に作用する荷重の違いを考慮してそれぞれ計算した。計算結果を初期値として、テーブルをX軸方向およびY軸方向に加振した際の周波数特性とそのシミュレーション結果とができる限り一致するように試行錯誤的に機台支持部のパラメータを決定した。

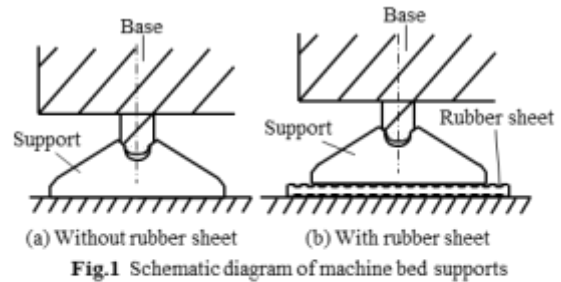


Fig.1 Schematic diagram of machine bed supports

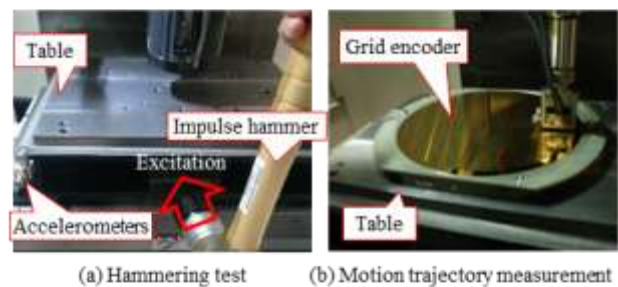


Fig.2 Experimental set-up

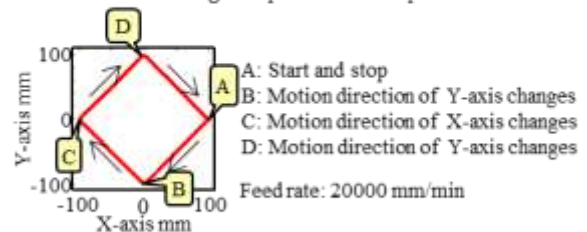


Fig.3 Motion path for the measurement test

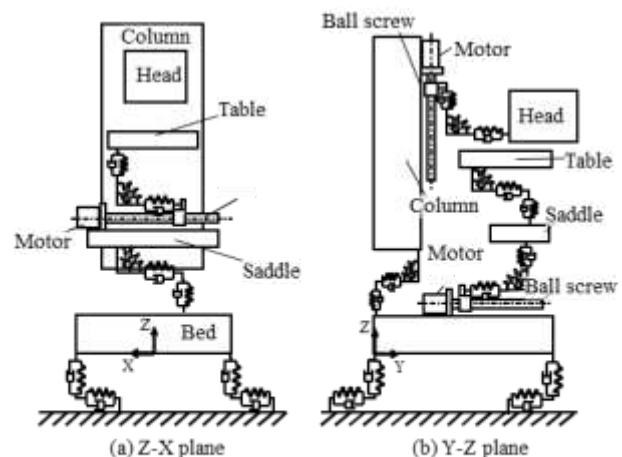


Fig.4 Dynamics model of machine tool structure<sup>3)</sup>

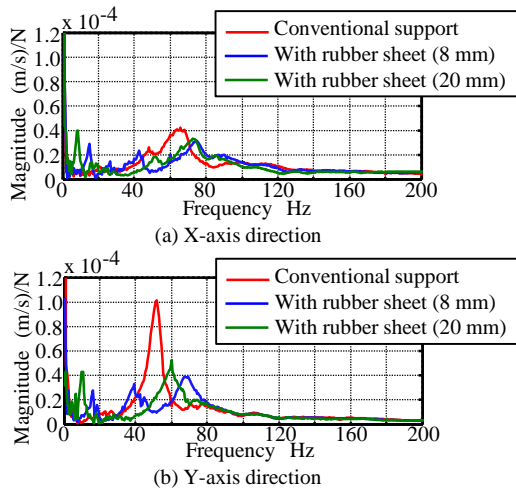


Fig.5 Comparison of measured frequency responses

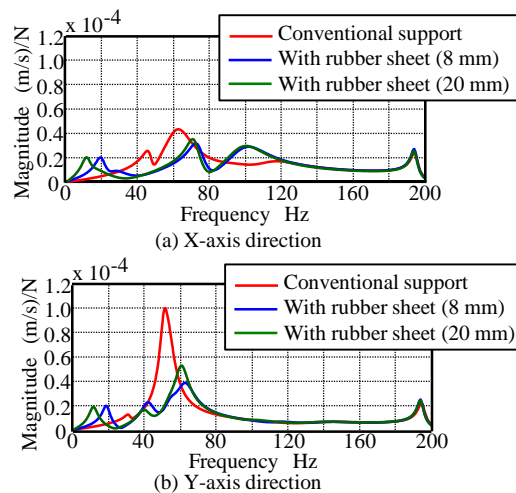


Fig.6 Comparison of simulated frequency responses

#### 4. 防振ゴムの振動抑制効果

##### 4.1 周波数特性

周波数特性の測定結果を図5示す。防振ゴムを用いなかった場合の測定結果において、X軸方向加振時の60 Hz付近の振動は、コラムがベッドに対してY軸周りに倒れる振動モード、Y軸方向加振時の50 Hz付近の振動は、コラムがベッドに対してX軸周りに倒れる振動モードであることがわかっている<sup>3)</sup>。

図5によると、防振ゴムを用いた場合には、X軸方向加振時に60 Hz付近で生じた振動モードが40 Hz付近で現れ、その振動の大きさが小さくなる。また、X軸方向加振時の70 Hz付近には、新たにコラムがY軸周りに倒れるとともに、ヘッドがZ軸周りに回転する振動モードがみられた。

Y軸方向加振時に50 Hz付近で生じた振動モードは、厚さ8 mmの防振ゴムを用いた場合には40 Hz付近に、厚さ20 mmの防振ゴムを用いた場合には60 Hz付近に現れ、その振動の大きさは防振ゴムなしの場合と比べて小さくなった。さらに、厚さ8 mmの防振ゴムを用いた場合には、コラム頂上付近を中心に機械全体がX軸周りに回転する振動モードが70 Hz付近に現れた。

以上のことから、機械台支持部に防振ゴムを用いると、機械全体の周波数特性に大きな影響を及ぼし、防振ゴムを用いなかった場合には生じなかった振動モードが現れることがわかった。

周波数特性のシミュレーション結果を図6に示す。図6によると、防振ゴムを用いることで、X軸方向で60 Hz付近、Y軸方向で50 Hz付近に現れていた振動の大きさが大幅に小さくなることがシミュレーションにより表現できている。しかし、X軸方向加振時に40 Hz付近に現れている振動がシミュレーション結果では現れていないほか、厚さ20 mmの防振ゴムを用いた場合にY軸方向加振時の結果では現れていない40 Hz付近の振動がシミュレーション

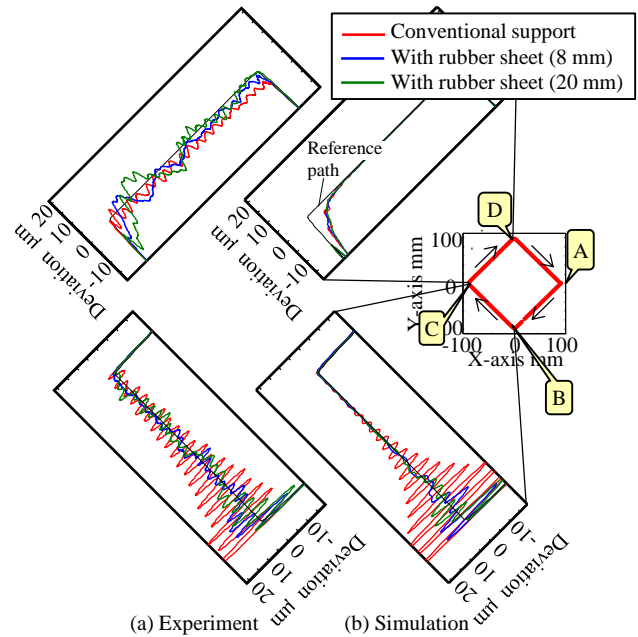


Fig.7 Comparison of motion trajectories

の結果では現れているなど、防振ゴムによる影響を正しく表現できない場合があった。

図5の実験結果、図6のシミュレーション結果ともに、防振ゴムを用いた場合には、20 Hz以下の領域で振動のピークがみられ、これは、機械全体がそれぞれY軸周りとX軸周りに回転する振動モードである。この振動モードの周波数は、防振ゴムの厚さが薄いほど高くなっており、そのことがシミュレーションにより表現できている。

##### 4.2 運動軌跡

高速輪郭制御運動時の運動軌跡の測定結果とシミュレーション結果をそれぞれ図7に示す。図7によると、防振ゴムを用いることで被駆動体質量の大きいY軸の反転後に生じる振動が大幅に低減できていることがわかる。これは、図5および図6の周波数特性において、Y軸方向加振時の50 Hz付近の振動が小さくなったことと対応している。一方、X軸の運動方向反転後には、防振ゴムを用いない場合には目立った振動は発生していなかったにも関わらず、実験結果では、防振ゴムを用いた場合には、低周波数(約10 Hz)の振動が生じている。また、その振動の位相が、防振ゴムの厚さによって変化していることがわかる。シミュレーション結果にはその振動は現れておらず、今後の課題となっている。

#### 5. 結言

本研究において、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 機械台支持部に防振ゴムを用いると、機械全体の周波数特性に大きな影響を及ぼし、防振ゴムを用いなかった場合には生じなかった振動モードが現れる。
- (2) 機械台支持部に防振ゴムを用いることで被駆動体質量の大きいY軸の反転後に生じる振動が大幅に低減できた。
- (3) 防振ゴムによる振動低減効果はシミュレーションで表現できたが、軌跡に現れた低周波数の振動については表現できない場合があった。

今後、軌跡上に低周波数の振動が発生する原因を明らかにする。

##### 参考文献

- 1) 松原厚, 梅本雅資, 濱村実, 藤田純, 甲斐義章, 垣野義昭: ベース振動の影響を受けるNC工作機械送り系(第1報), 精密工学会誌, 70, 4, (2004), pp.583-587.
- 2) D. Kono, S. Nishio, I. Yamaji and A. Matsubara: A method for stiffness tuning of machine tool supports considering contact stiffness, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 90, (2015), pp.50-59.
- 3) 高須賀裕介, 佐藤隆太, 白瀬敬一: ベッドのねじり振動と送り駆動機構の摩擦を考慮した数値制御工作機械の状態方程式表現モデル, 日本機械学会第10回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2014), pp.143-144.