

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760104

研究課題名(和文) 接触剛性の解析に基づく工作機械マウントの設計論の構築

研究課題名(英文) Design of machine tool supports based on analysis of contact stiffness

研究代表者

河野 大輔 (KONO, DAISUKE)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80576504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工作機械のロッキング振動を低減するためのマウントの設計論を構築する。このために、マウント剛性のモデル化に必要な接触剛性について調査し、剛性モデルに基づいてマウントを設計、配置する方法を検討した。マウントの剛性が飽和しないようにバルク剛性と荷重を設定し、ほとんど荷重を作用させないマウントを追加することで、横フライス盤のロッキング振動の固有振動数と減衰比を増大させ、振動を低減することができた。

研究成果の概要(英文)：A design method for machine tool supports is proposed to decrease rocking vibration. The stiffness between contacted interfaces is measured to develop a stiffness model of machine tool supports. Then, a method is proposed to design and locate the supports on the bases of the proposed stiffness model. In this method, the natural frequency of the rocking vibration is maximized by designing the bulk stiffness and the load so as not to saturate the stiffness of the support. Furthermore, the damping ratio of the rocking vibration is increased by adding supports with very small load. The proposed method was used for reducing the rocking vibration of a small knee-type horizontal milling machine.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：工作機械 接触剛性 マウント 動特性

1. 研究開始当初の背景

印刷物などの電子化が進む中、ディスプレイには高輝度・高解像度・軽量・省電力といった性能を高いレベルで同時に備えることが求められている。このために、ディスプレイに用いられる光学素子では、表面の微細な形状によって光学性能を向上させることが考案され、その形状は複雑化している。このような素子の製造に用いる微細金型はダイヤモンド工具を用いた切削加工によって製造されることが多い。しかし、高精度微細金型の加工では工作機械の振動が加工面に転写されるのを避けるために、送り速度と加減速加速度を低くせざるをえず、加工能率が低いことが問題となっている。

工作機械の振動の中でも問題となるのは、最低次の振動モードであるロッキング振動である。特に、ハイゲイン化された送り軸の駆動反力(直動外乱)によって発生するロッキング振動の影響が大きい。

ロッキング振動には工作機械の支持部の剛性(支持剛性)が大きな影響を与える。工作機械は複数のマウントによって支持されているが、工作機械の設計において、機械の動特性を考慮したマウントの設計は行われていない。これは支持剛性がどのようなメカニズムで決まるかが明らかでないためである。つまり、支持剛性が単純にマウントの材質・寸法や形状・数から推定できるわけではない。この原因は、支持剛性には、マウントに存在する接触面での剛性(接触剛性)が大きな影響を与えるためであることが分かってきた。

2. 研究の目的

本研究では、工作機械の動特性を評価基準としたマウントの設計論を構築する。このために、以下の点を明らかにする。

- (1) 接触剛性、接触面荷重、材料表面の弾性率・硬さの関係を明らかにする。
- (2) マウントと設置床に使用する材質に関して、3次元の接触剛性を調査する。調査した接触剛性を考慮して、マウント配置によってマウント剛性がどのように変化するかを明らかにする。
- (3) 工作機械の3Dモデルと駆動条件から、許容振動レベルを満たすためのマウントを設計、配置する方法を構築し、振動低減効果を検証する。

3. 研究の方法

- (1) 材料表面の微小領域での弾性率と接触剛性の関係解明

材料表面の微小領域での弾性率・硬さ・接触面荷重と接触剛性の関係を明らかにし、材料試験の結果を用いて接触剛性を推定する。具体的には、材料表面の微小領域での弾性率を測定して分布剛性を求め、マクロな接触剛性との関係を調べることで接触剛性が決まるメカニズムを解明する。微小領域での弾性

率は、ダイナミック超微小硬度計を用いて測定する押し込み深さ-負荷荷重曲線から求める。

- (2) 材料のせん断接触剛性と圧縮・引張接触剛性の調査

接触面に対して垂直な方向に荷重が作用する場合、接触面に平行な方向の剛性(せん断接触剛性)と垂直な方向の剛性(圧縮・引張接触剛性)が異なると考えられる。金属-金属間、コンクリート-金属間の接触面について、せん断接触剛性と圧縮・引張接触剛性を調べる。また、接触面の角度を変化させることで3次元の接触剛性を制御することができるかを検証する。

- (3) 荷重によって接触剛性が変化することを考慮したマウント配置決定法の考案

接触面荷重によって接触剛性が変化するため、マウントの数とそれぞれのマウントの荷重配分を最適化する必要がある。ここでは、特定の方向への振幅が大きいロッキング振動が生じないようにするため、問題となるロッキング振動の固有振動数を最大化し、減衰比を増大させるマウント配置決定法を考える。また、既に設置されている工作機械について、補助的なマウントを用いて直動外乱振動を低減できるかを検討する。

重心位置とマウント位置を変更できる工作機械のモデルを製作し、荷重測定用の力センサをもつマウントを用いて配置法の効果を検証する。

- (4) マウントの設計論の構築と振動低減効果の検証

(2)、(3)で得られた知見に基づき、工作機械の3Dモデルと接触剛性のパラメータから直動外乱振動を低減するマウントを設計、配置する方法を構築する。ケーススタディとして小型の工作機械のマウントを製作、配置し、振動の低減効果を検証する。

4. 研究成果

- (1) 材料表面の微小領域での弾性率と接触剛性の関係解明

接触剛性が接触面に分布する剛性の和で決まると仮定し、検証を行った。炭素鋼に関して、ダイヤモンド圧子を用いた押し込み試験によって測定した微小な領域での分布剛性と、従来の方法で測定した比較的大きな領域での分布剛性を比較した。

図1に分布剛性の比較を示す。押し込み試験での試験力を400~600mNとした場合、測定した2つの分布剛性はほぼ一致した。しかし、試験力を50~400mNとした場合は微小な領域での分布剛性の方が2~3倍程度大きくなった。また、押し込み試験での試験片の変形挙動は他機関における理論解析の結果と定性的に一致していた。これらの結果と表面粗さによる接触面の微小な起伏を考えると、

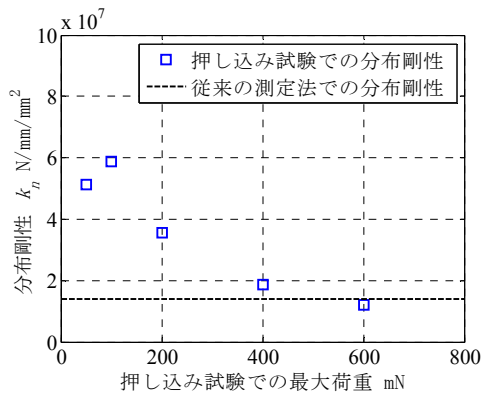


図1 接触面の分布剛性の比較

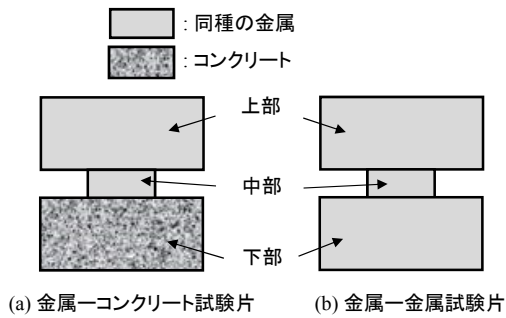


図2 剛性を測定した2種類の試験片

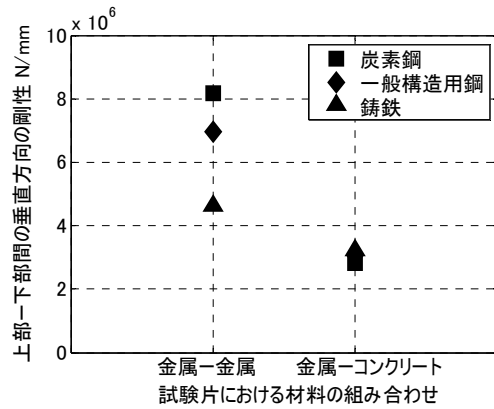
接触面に分布する剛性は微小な起伏による接触荷重の分布によって異なり、比較的大きな領域での分布剛性は、その平均値によって決定されると考えられる。

現実的には接触荷重の分布を把握するのは困難と考えたため、材料試験の結果のみを用いて接触剛性を推定するのではなく、後述する(2)のように様々な材料の接触剛性を測定し、データベース化することとした。

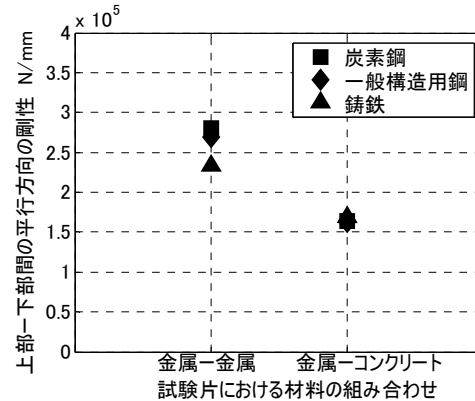
(2) 材料のせん断接触剛性と圧縮・引張接触剛性の調査

炭素鋼、アルミニウム合金、鋳鉄、一般構造用鋼に関して、接触面に平行な方向の接触剛性と垂直な方向の接触剛性、およびそれぞれの方向の分布剛性を測定した。また、炭素鋼、鋳鉄、一般構造用鋼に関しては、コンクリートと接触した場合の接触剛性と分布剛性を測定した。その結果、コンクリートの分布剛性が金属の分布剛性と比較して数十分の一であり、非常に小さいことがわかった。

マウントを模擬した試験片の剛性の測定例として、図2に示す2種類の試験片における上部一下部間の剛性を比較した結果を図3に示す。床に相当する下部の材料を金属からコンクリートに変更すると、剛性が小さく、かつ上部と中部の材料の違いによる剛性のばらつきが小さくなるのがわかる。これは、コンクリートの分布剛性が小さく、コンクリートの剛性によって、上部一下部間の剛性がほぼ決まってしまうことを示している。

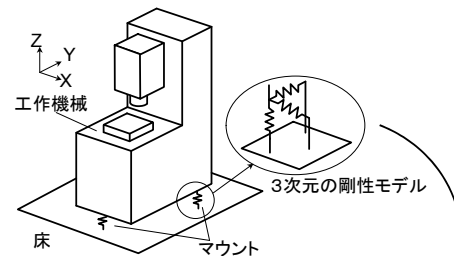


(a) 垂直方向の剛性

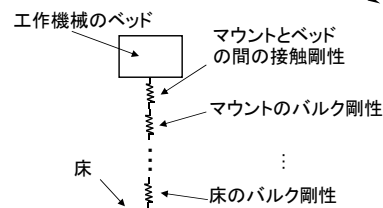


(b) 平行方向の剛性

図3 試験片上部一下部間の剛性の比較



(a) 工作機械の支持剛性のモデル



(b) 各方向の剛性モデル

図4 支持剛性のモデル

(3) 荷重によって接触剛性が変化することを考慮したマウント配置決定法の考案

支持剛性を計算するためのモデルとして、図4に示すような、バルク剛性(部材の弾性率と形状で決まる剛性)と接触剛性が直列に結合された剛性モデルを提案した。接触剛性は荷重と正の相関があるため、支持剛性と荷

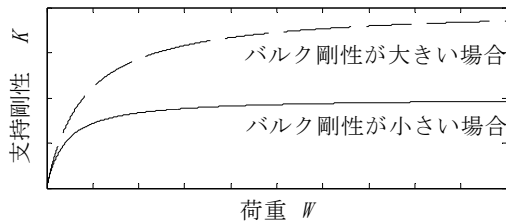


図5 荷重と支持剛性の関係

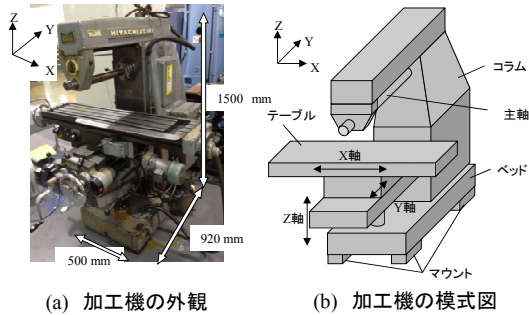


図6 検証実験に用いた横フライス盤

重の関係は図5に示す曲線のようになる。つまり、支持剛性は荷重とともに増大するが、ある荷重からは剛性が飽和してしまう。また、過去の文献より、接触部の減衰（振動を小さくする要因）は荷重と負の相関があるため、支持部の減衰も荷重と負の相関があると考えられる。

支持剛性のモデルに基づいて、特に問題となるロッキング振動を低減する配置法を考案した。具体的には以下の2つの方法を組み合わせる。

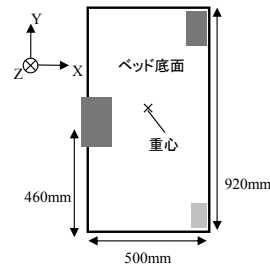
- ①全支持点での支持剛性の和を最大化することで、ロッキング振動の固有振動数を最大化する。このために、作用する荷重で支持剛性が飽和しないように支持点を配置する。
- ②ほとんど荷重を作用させないマウントを追加することで減衰を付加し、ロッキング振動の減衰比を増大させる。

これらの方法の効果を工作機械の小型モデルを用いて検証した。この結果、最も低い固有振動数をもつロッキング振動に関して、固有振動数と減衰比を増大させることができた。

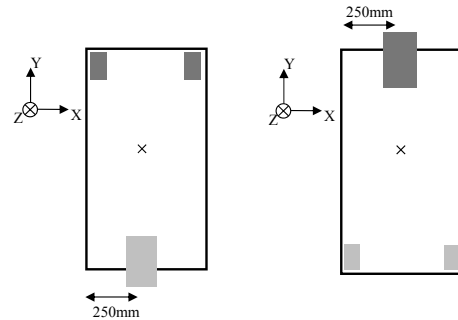
支持剛性を変化させる方法としては、マウントにおける接触面の角度を変化させる方法と、接触面に挿入物を挟む方法を試みたが、モデルで予想する剛性の変化は得られなかった。

(4) マウントの設計論の構築と振動低減効果の検証

(2)(3)での結果を踏まえ、マウントを設計、配置する際の指針が以下のとおり得られた。



(a) 提案手法で求めた配置



(b) 比較のための配置1 (c) 比較のための配置2

図7 検証実験に用いた支持点配置

塗りつぶした長方形が支持点を表し、長方形の大きさは荷重の大きさ、色の濃さはバルク剛性の大きさを表す。

- ①(2)で求めた分布剛性と硬さからモデルを用いて計算される接触剛性と比較して、バルク剛性が十分大きくなるように工作機械のマウントとベッドを設計する。このとき、機械を設置する床（コンクリート）の分布剛性を考慮する。
- ②バルク剛性を十分大きくできない場合は、マウントの数を増やしてマウントに作用する荷重を小さくする、または配置を調整することで、①を満たすようにする。
- ③①②によって振動が十分低減できない場合は、荷重をほとんど作用させないマウントを追加する。

以上の指針の効果を図6に示す小型の横型フライス盤を用いて検証した。検証では、Y軸まわりの回転を伴うロッキング振動の低減を目標とした。

マウントのバルク剛性を大きくするために、レベリングブロックをマウントに用いた。さらに、ベッドのバルク剛性を工作機械の3Dモデルと有限要素法を用いて計算し、①の指針を満たすように3点の支持点を配置した。図7に求めた支持点配置と、比較のための他の支持点配置を示す。

打撃試験によって固有振動数を求めた結果を表1に示す。表1から、提案手法で求めた支持点配置において、Y軸まわりの回転を伴うロッキング振動の固有振動数が最大となっていることが分かる。またこのとき、X軸まわりのロッキング振動の固有振動数が、

表 1 固有振動数の測定結果

支持点配置	ロッキング振動の固有振動数 Hz	
	Y 軸まわり	X 軸まわり
提案手法	27	22.5
比較配置 1	19	22.5
比較配置 2	14.5	29

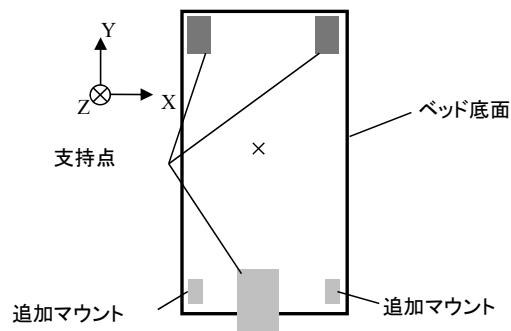


図 8 追加マウントの配置

他の配置と比較して極端に低くなっているわけではないことも分かる。

さらに、図 8 に示すように、図 7 (b) の支持点配置に荷重をほとんど作用させないマウントを追加して、振動を低減できるかを検証した。テーブルをインパクトハンマで Y 方向に加振した際の、加振力に対する Y 方向の主軸変位の応答（コンプライアンス）を図 9 に示す。図 9 より、追加したマウントによって、Y 軸回りのロッキング振動の共振ピークが大きくなっていることが分かる。また、追加したマウントとベッドの間に高減衰ゴムを挿入することで、さらに共振ピークを小さくできることがわかった。

以上のとおり本研究によって、工作機械、マウント、床に使用している材料表面の分布剛性と硬さ、工作機械の 3D モデルから、ロッキング振動を低減するために、工作機械のマウントをどのように設計、配置すればよいかの指針が得られた。そして、その振動低減効果を実験によって検証した。これまで、工作機械のマウントは主に経験的に設計されてきたが、本研究の成果が今後の系統的なマウント設計に寄与することを期待する。また、本研究の成果を用いて、既に設置されている工作機械に適切なマウントを追加し、動特性を向上させることができると考えている。

現状では床表面の分布剛性を、試験片を用いて測定しているが、今後は直接測定できる方法を考え、より実用的なマウントの設計手法に発展させる予定である。

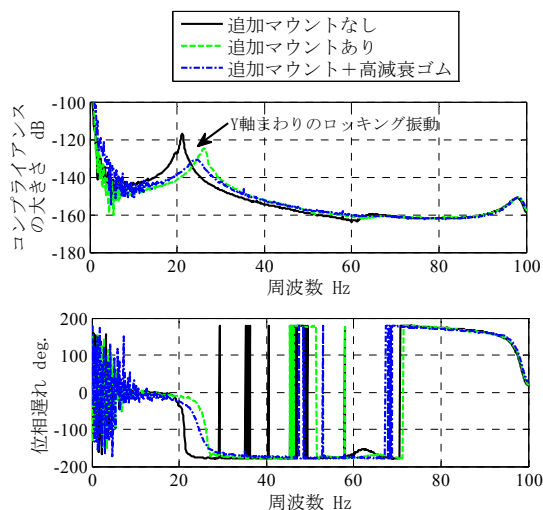


図 9 コンプライアンスの比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Daisuke Kono, Takahiro Inagaki, Atsushi Matsubara, and Iwao Yamaji, "Stiffness model of machine tool supports using contact stiffness", Precision Engineering, Vol. 37, Issue 3, 2013, pp. 650-657, 査読有, DOI:10.1016/j.precisioneng.2013.01.010
- ② Daisuke Kono, Takahiro Inagaki, Atsushi Matsubara, and Iwao Yamaji, "Measurement of Contact Stiffness for Stiffness Estimation of Machine Tool Supports," Key Engineering Materials, Vols. 523-524, pp. 457-462, 2012, 査読有, DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.457

[学会発表] (計 5 件)

- ① Daisuke Kono, "Vibration analysis of machine tools considering contact stiffness of supports," Proc. of the 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2013), 1053, Taipei Taiwan, 13th, November 2013.
- ② 今安森也, 河野大輔, 松原厚, 山路伊和夫: 工作機械の支持剛性を变化させる方法に関する研究, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, A13, 大阪, 2013 年 9 月 12 日
- ③ 西尾修也, 河野大輔, 松原厚, 山路伊和夫: 構造振動を考慮した工作機械の支持点配置に関する研究, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, A14, 大阪, 2013 年 9 月 12 日
- ④ 河野大輔, 松原厚: ナノインデンテーションによる接触剛性モデルのパラメータ同

定, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会, J36, 福岡, 2012 年 9 月 15 日

- ⑤ 西尾修也, 松原厚, 河野大輔: ロッキング振動を考慮した工作機械の支持点配置に関する研究, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, J37, 福岡, 2012 年 9 月 15 日

[その他]

ホームページ: 河野大輔 研究紹介

http://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/people/kono/research_top.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 大輔 (KONO DAISUKE)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号: 80576504

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし