

## 知能化主軸開発のための主軸剛性の測定

京都大学 ○松原 厚, Sarhan Ahmed, 杉原 基之, 茨木 創一

### Measurement of Spindle Stiffness for the Development of Intelligent Spindle

Kyoto University Atsushi MATSUBARA, Sarhan AHMED, Motoyuki SUGIHARA, Soichi IBARAKI

In this research, we measure the spindle stiffness by using a loading device for the development of an intelligent spindle. The spindle displacement and holder displacement are calculated from several displacement signals and tool load is measured with a tool dynamometer. The relationship between displacement and load is shown as stiffness-chart. The nonlinearly characteristics of the spindle-holder system is observed in the measurement results.

#### 1. 緒言

エンドミル加工の知能化を行うためには様々な課題がある。この中で、切削抵抗のモニタリングは重要な課題の一つである。テーブル型の工具動力計は高精度・高応答であるが、高価であり、搭載できる工作物サイズにも制限がある。そこで、加工機本体に切削抵抗のセンシング機能を付加する研究がなされてきた<sup>1)</sup>。これらの中で、主軸の変位を主軸頭内に配置した変位センサで検出してXY方向の切削抵抗モニタリングを行う方法がある<sup>2),3)</sup>。変位センサは応答性が高いため、高帯域での切削抵抗の監視が可能である。

この方法において、主軸変位を切削抵抗に変換するための重要なパラメータは主軸剛性である。しかし、主軸剛性は様々な原因で変化する。例えば、主軸ベアリングの回転体は回転中にその位置や接触角が変化する。主軸回転時にはベアリングが発熱し、主軸を構成する各 부품の熱膨張によって、予圧が変化する。主軸とベアリングシステムは、回転中に、ある熱的・力学的平衡状態となり、結果として主軸剛性が得られるが、これを理論的にモデル化することは難しい。

そこで本研究では、回転中の主軸半径方向の剛性を測定し、これをモデル化する方法を検討する。このため、著者らが開発した知能化主軸を搭載したマシニングセンタ上で、主軸にダミー工具と測定ホルダを装着し、主軸を回転させながら負荷を与えて、主軸系の変位-負荷曲線を求める。本論文では、主軸の運転状態により、剛性曲線がどう変化するかについて調査した結果を報告する。

#### 2. 実験装置と実験手順

図2に主軸剛性測定実験の概略図を示す。実験に用いたマシニングセンタの主軸は#40相当のホルダが装着可能で最高回転数が $2万\text{ min}^{-1}$ である。この主軸は、フロントベアリング近傍に渦電流式の変位センサをX,Y方向に対向させて配置している<sup>3)</sup>。対向したセンサの信号の差分を2で割ることで、主軸ノーズ部での半径方向変位を求める。今回はY軸方向の負荷試験を行ったので、使用したセンサはY軸方向のみである。

主軸には別途、製作した測定用ホルダを装着する。このホルダにも半径方向とZ方向の変位が検出できる測定面を準備しておく。測定面の変位をノーズ変位と同様に変位センサで検出する。この変位をホルダ変位とよぶことにする。ホルダ半径方向変位についてはノーズ変位と同様に対向したセンサ信

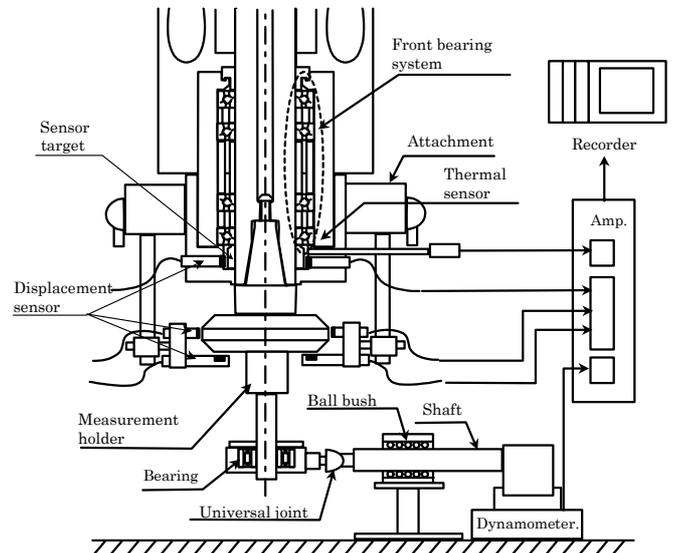


Fig. 1 Schematic of the experiment set up

号から求める。Z軸方向変位からは、後述するようにホルダ回転角度を求める。また、主軸温度の変化を間接的に評価するため、主軸変位センサの近傍には熱電対を配置している。このセンサにより測定された温度を主軸温度とよぶことにする。

測定ホルダには丸棒が装着されており、丸棒の先端はベアリングとハウジングが取り付けられている。ハウジングはユニバーサルジョイントでシャフトにつながれ、シャフト端を工具動力計(キスラー社製、型式:9257B)と接した状態で、ハンドルで送りながら手で負荷を与える。実験手順は以下の通りである。

手順1(コールドスタート時): 機械を立ち上げた直後に、主軸を回転数 $0,1500,3000\text{ min}^{-1}$ で回転させ、それぞれの回転数で、負荷試験を行う。

手順2(ウォームアップ後): 主軸を回転させてウォームアップし、主軸温度が安定したところで回転状態を続けたまま、手順1と逆に回転数を下げながら負荷試験を行う。

手順3(クールダウン後): 主軸を停止させ、主軸温度の低下が落ち着いた状態で、手順1と同様の負荷試験を行う。

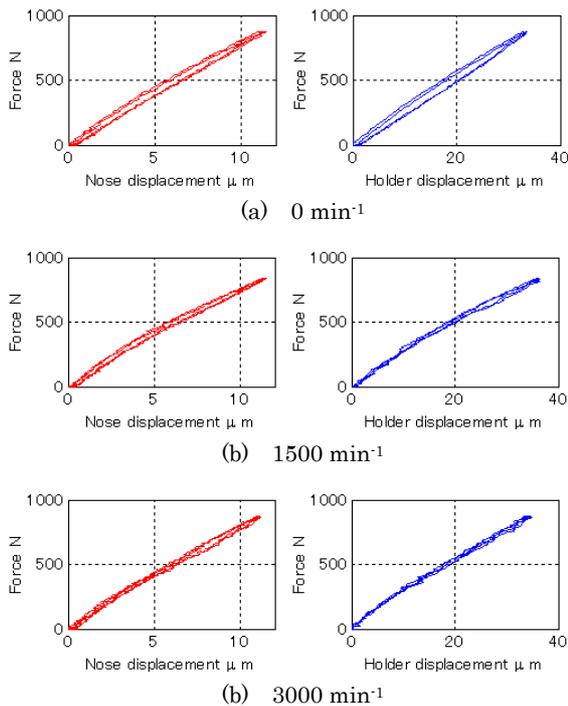


Fig.2 Relationships between displacement and tool load after cold start

### 3. 測定結果

#### 3.1 主軸変位-負荷曲線

コールドスタート後、負荷実験中の主軸温度は 21.5～22.5° Cであった。このときの変位-負荷曲線を図 2 に示す。ただし、図では、測定中の再現性を見るために負荷サイクル 2 回分を描いている。図より、回転数が 0 min<sup>-1</sup> の場合、主軸ノーズ部とホルダ部の変位はヒステリシスループを描くことがわかる。また、このヒステリシスは主軸が回転し、回転数が増加するとともに小さくなるのがわかる。ヒステリシスが小さい曲線からは、負荷が大きくなるとともに剛性が減少する傾向が読みとれる。

主軸を 7000 min<sup>-1</sup> で回転させたところ主軸温度は 24.5° C で安定したのでウォームアップ完了と判断し、負荷実験を行った。図 3 にウォームアップ後の負荷-変位曲線を示す。図 2 のコールドスタート後に比べ、ウォームアップ後のヒステリシスループは小さくなっていることがわかる。

主軸を停止した後、主軸温度は 22.5° C 程度で安定したので、クールダウン後の負荷実験を行った。このときウォームアップ後と同様の実験結果が得られた。ただし、主軸回転数 0 min<sup>-1</sup> の実験では、図 4 に示すように変位がシフトする現象が見られた。また、主軸温度が変化している場合、熱変位の影響と見られる主軸変位が変位センサ信号にあらわれる。従って、回転時の剛性を評価するためには、主軸を回転させ、温度が安定した状態で実験を行わなければならない。

#### 3.2 主軸—ホルダ系の変位モード

ホルダ変位はノーズ変位の数倍となっていることから、主軸—ホルダ系の変位モードは傾きが支配的であることが予想できる。そこで、ホルダ底面の Z 方向変位の測定値  $Z_1, Z_2$  とセンサ間の距離  $L_z$  から、ホルダの回転角度  $\theta_z = (Z_1 - Z_2) / L_z$  を求める。同時に半径方向のノーズ変位の測定値  $S_n$ 、ホルダ変位の測定値  $S_h$ 、センサ間の距離  $L_h$  から主軸—ホルダ系の傾き

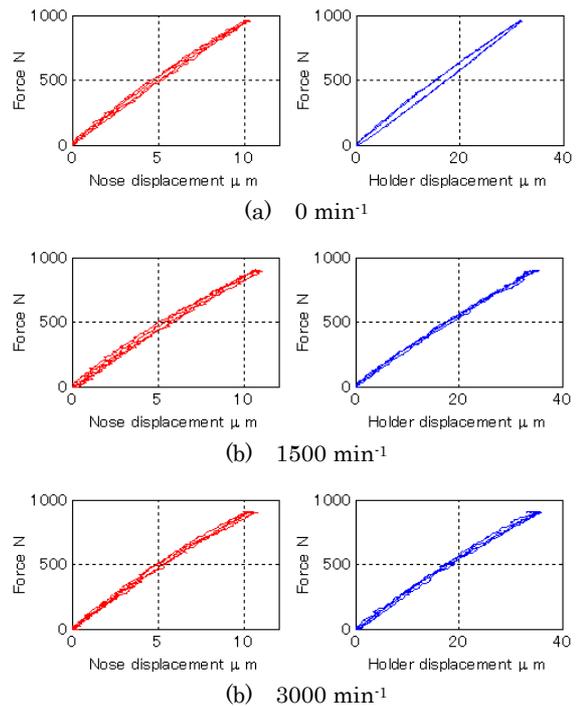


Fig.3 Relationships between displacement and tool load after warm up

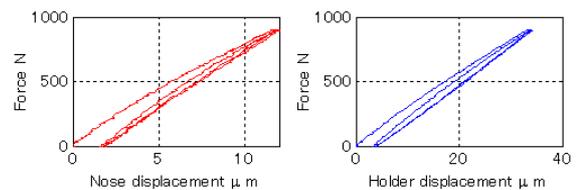


Fig.4 Displacement shift (Spindle speed: 0 min<sup>-1</sup>, after cool down)

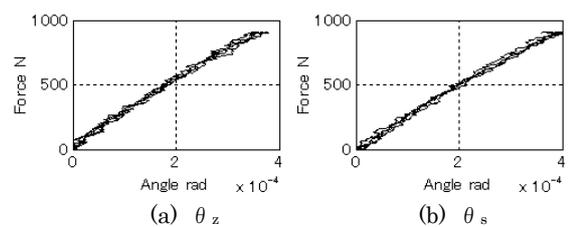


Fig.5 An example of spindle + holder angle (Spindle speed: 3000 min<sup>-1</sup>, after warm up)

角度  $\theta_s = (S_h - S_n) / L_h$  を同様に求め、比較する。この結果の 1 例を図 5 に示す。同図より、両角度はほぼ等しく、変位モードは主軸+ホルダ系の回転が支配的であることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 松原 厚, 機械加工におけるプロセス計測/制御技術の現状と動向, 計測と制御, 41, 11 (2002), 781-785.
- 2) Andreas Albrecht, et al., High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 9(2005-7), 993-1008
- 3) Ahmed A. D. Sarhan, Atsushi Matsubara, et al., Monitoring method of cutting force by using additional spindle sensors, JSME Int. Journal, Series C, 49,2(2006), 307-315.