

温度監視システムによる工作機械の加工精度向上に関する研究

(第2報)

米山 陽・石黒 輝雄・平川 寛之

Study on Improving Machining Accuracy of Machine Tools by the Temperature Monitoring System (2nd Report)

Akira YONEYAMA, Teruo ISHIGURO and Hiroyuki HIRAKAWA

要 約

高精度な加工を行う上で、工作機械の暖機運転等は必要不可欠な作業である。しかし、作業者が熱的定常状態や主軸の変位量について定量的に把握することは難しく、暖気運転時間や補正量の決定は作業者の経験に頼っている面が大きい。そこで、主軸の熱的安定状態等が把握できる加工支援システムの構築を目的とし、主軸温度計測手法および変位計測手法について検討を行った。その結果、放射温度計により得られた主軸端温度と主軸変位は直線的な相関を示し、主軸端温度計測による主軸変位量予測が可能であることが分かった。また、温度監視システムの有効性について、この手法で補正を行いマシニングセンタによる切削加工実験にて検証したところ、切削面の平面度は1/3に減少し、加工精度が向上することが確認された。

1. 緒 言

近年、機械加工部品の微小・精密化などから、加工現場には更なる高精度化が強く求められており、高精度位置決めが可能なNC工作機械が多く用いられている。特に、直径が1mm以下のエンドミルやドリルなどを用いて加工する場合、 μm 単位での制御が必須となる¹⁾。しかし、これらの小径切削工具を数万rpmの高速回転数領域にて使用した場合、主軸頭の発熱量は数千rpmの一般的な切削時より増大することとなる。そのため、連続加工において主軸頭温度は上昇し、主軸の熱変位により工具先端位置に誤差が生じ、 μm 単位での加工精度に大きく影響することとなる。

熱変位による影響を最小限とし、加工精度を安定させる手段の一つとして、加工前の暖機運転を十分に行い、熱変位が定常状態に移行してから実加工を行う方法がある。しかし現状では、作業者が主軸の温度状況や熱変位の定常状態を定量的に把握することは難しく、暖気運転の実施時間や変位補正量の決定はユーザの経験に頼っている面が大きい。そこで、作業者が現在の機械状態を知る手段があれば、より高精度な加工を実現することが可能である。

前報²⁾においては、放射温度計を用いた主軸温度計測手法により、主軸変位量予測が可能であることを報告した。本報では、これまでに得られた知見を基に温度監

視システムの試作を行い、その実証試験を行った結果を報告する。

2. 周囲温度環境について

3軸立形マシニングセンタでは、主要部位であるベース、コラム、主軸がそれぞれ熱による変形を生じ、工具先端では3次元的な誤差となって現れてくる。中でもZ軸方向は運転による熱影響を最も受け易く、XY軸より変位量が非常に大きくなることが報告されている³⁾。前報までは、主軸変位量の測定は周囲温度環境を一定として評価を行ってきた。しかし、実際の加工現場においては、周囲温度環境を一定にすることが難しい。そこで、温度監視システムにおいて主軸温度以外の監視要素を検討するため、周囲温度環境の変化が主軸変位量に与える影響について測定を行った。

2-1 実験方法

実験には、表1に示す仕様の立形3軸マシニングセンタを使用した。主軸の変位量測定は、CCDカメラ方式の非接触工具位置測定機(大昭和精機㈱, ダイナビジョン)を使用した。マシニングセンタの主軸には、先端を円錐形状に加工した $\phi 4\text{mm}$ の超硬合金製シャフトをツールホルダに取り付け、円錐頂点のZ軸方向の変位を測定した。変位量は、主軸停止状態のシャフト先端位置を $0\mu\text{m}$ とし、主軸とテーブルが近づく方向を正とした。測

表1 マシニングセンタ仕様

主軸テーパ	No. 40 (7/24 テーパ)
最高主軸回転数	20,000rpm
主軸径	φ 65mm
位置決め精度 (公称値)	±1 μm

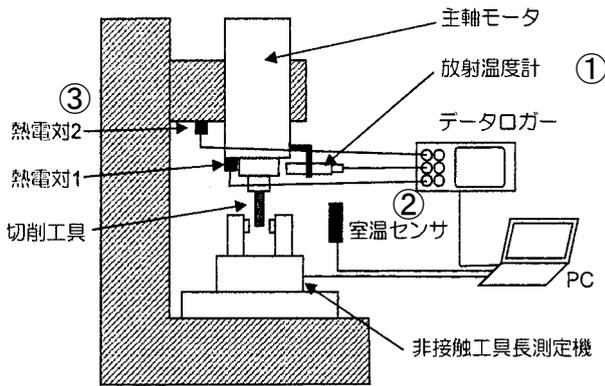


図1 実験方法概要

定データは、測定機の外部出力端子に接続したコンピュータにて記録し、サンプリング間隔は60秒とした。

温度については、図1に示す様に①主軸端温度、②室温、③Z軸ガイド温度を計測した。主軸端温度は放射温度計を使用し、その他の箇所についてはK熱電対を用いて計測した。

実験は、マシニングセンタの主軸を停止した状態で、周囲温度を約1000分で25℃から21℃まで下降させ、その際の主軸変位量および各部温度の変化状況について記録を行った。

2-2 実験結果および考察

図2に、室温を変化させた際の主軸変位量を示す。室温が下降するとともに主軸先端位置はZ軸下方側に変位する傾向を示し、主軸変位量の最大値は約8μmであった。次に図3にZ軸ガイド温度と主軸変位量の相関について、最小自乗法により求めた関係を示す。回帰曲線の傾きは-2.5μm/℃であり、Z軸ガイド温度の上昇時には、Z軸が上方側に変位する傾向があることを示している。これは、主軸が固定されているZ軸が温度上昇に伴い熱膨張し、主軸保持位置が変化したことによるものと思われる。また、室温とZ軸ガイド温度に対する主軸変位について相関係数を求めたところ、室温では-0.64、Z軸ガイド温度では-0.86が得られ、主軸変位に対しては、

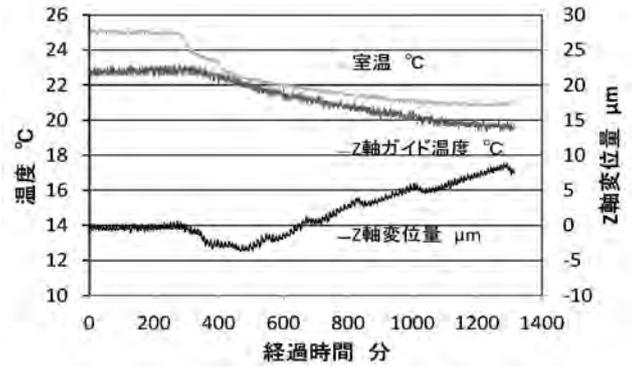


図2 室温変化に伴う主軸変位量

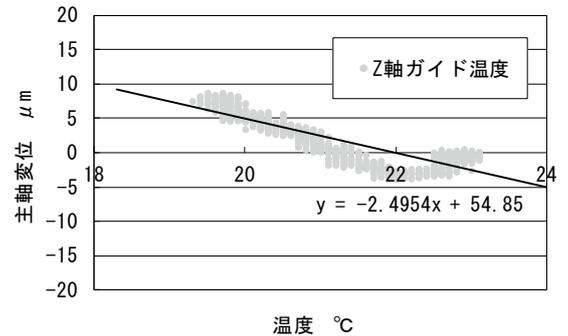


図3 Z軸ガイド温度と主軸変位量の相関

室温よりZ軸ガイド温度の計測が有効であることが判る。これは、Z軸ガイド温度は、外装や熱容量の影響から室温変化に対してヒステリシスが生じるためと考えられる。

3. 温度監視システムについて

これまでのデータを基に、工作機械各部の温度を計測し、主軸変位量の予測を行う温度監視システムの試作を行った。また、試作した温度監視システムの有効性について、マシニングセンタによる切削加工実験を実施し、検証を行った。

3-1 温度監視システム概要

主にマシニングセンタでの使用を想定し、作業者が容易に工作機械各部の温度状況が把握できるように設計を行った。構成および仕様について図4および表2に示す。また、図5にマシニングセンタに設置した状況を示す。

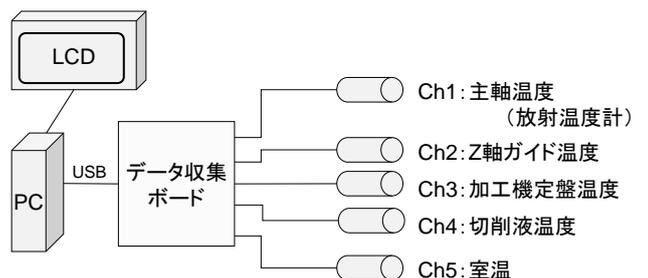


図4 温度監視システム概要

表2 温度監視システム仕様

表示装置	7インチLCD
温度測定Ch	5Ch
インタフェース	USB2.0
測定分解能	0.1℃
サンプリングレート	100kHz(最大)

表3 切削工具

工具形状	ボールエンドミル
工具材種	コーティッド超硬
切削工具径	φ6mm
刃数	2枚

表4 切削加工条件

主軸回転数	S = 14000rpm (Vc=263m/min)
軸方向切込	Ad=0.2mm
サイドステップ	Rd=0.8mm
切削液	オイルミスト



図5 マシニングセンタ操作盤への設置状況

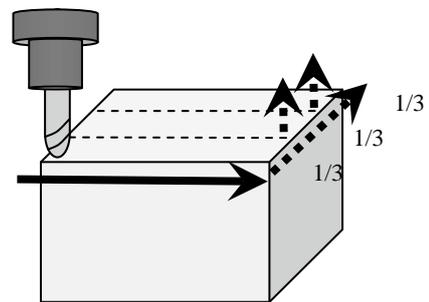


図6 ボールエンドミルによる加工方法

各部温度状況および主軸変位量は、操作盤に設置した小型LCDディスプレイに表示され、作業者が容易に確認することが可能である。

3-2 実験方法

温度監視システムを設置した立形3軸マシニングセンタにより、ボールエンドミルを用いた平面加工実験を行った。被削材の形状は50×50×50mmの直方体とし、プリハードン鋼(NAK55, 40HRC)を用いた。切削工具および加工条件について表3および表4に示す。また、Z軸方向の切削量を均一とするため、加工機定盤に対する被削材加工面の平行度は10μm以下とした。

加工は図6に示す様に、工具軸方向に所定の切込量を与えた後、X軸方向への往復加工とY軸方向へのサイドステップを与えることにより、被削材上面の50×50mm領域を平面形状に加工する方法とした。

また、加工中のATC(工具自動交換装置)動作を想定し、平面加工が1/3進行する毎に加工を中断し、主軸から一旦ツールホルダの脱着を行った後、加工を継続した。

実験中の主軸温度は、温度監視システムを用いて監視を行い、主軸温度の変位量が0.2℃/min以下となるまで、軸送り動作を待機し、主軸温度が一定になったと同時に加工開始を行った。また、比較対象として温度監視システムを使用せず、軸送り動作の待機を行わない通常加工も実施した。

加工面の評価は、三次元座標測定機(株)ミットヨ, Crysta-Apex C7106)および表面形状輪郭形状測定機

(株)小坂研究所, DSF1000)を用いて形状測定を実施し、通常加工と温度監視システム使用時の平面度について比較を行った。

3-3 実験結果および考察

平面加工後の平面度について、三次元座標測定機により測定した結果を図7に示す。通常加工では、平面度が18μmであったが、温度監視システムを使用した加工では平面度が6μmに向上した。更に平面度の比較を詳細に行うため、加工面の断面形状について、表面粗さ輪郭形状測定機による測定を行った。図8に、通常加工および温度監視システムを使用した加工面の測定結果を示す。測定位置は、加工座標でのX軸中央部とし、測定方向はサイドステップ方向とした。図中左端が加工開始位置と

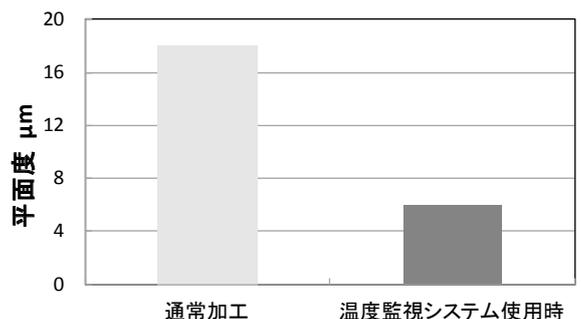


図7 三次元座標測定機による平面度測定結果

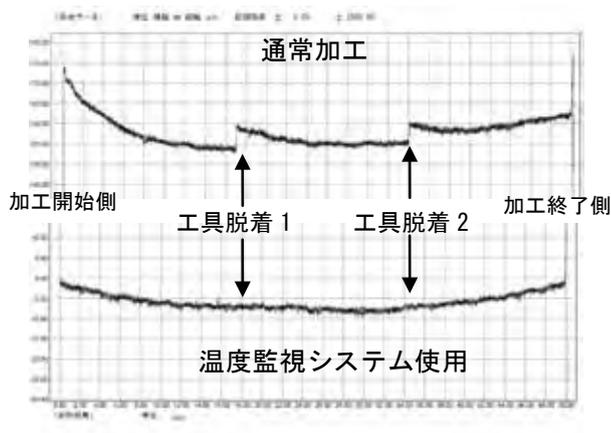


図8 表面粗さ輪郭形状測定機による測定結果

なり、右端が加工終了位置を示している。通常加工と温度監視システム使用時を比較すると、加工開始直後から加工1/3の領域までの変位量が約 $10\mu\text{m}$ 減少している。また、加工途中で実施した工具脱着に伴う変位量が、通常加工では $5\mu\text{m}$ 程度見られたが、温度監視システムを用いた加工では、ほぼ確認できないまでに低下した。

4. 結 言

工作機械の主軸温度状況等から加工精度安定状態を判断する加工支援システムを構築するため、主軸変位および主軸温度の計測手法について検討を行い以下の結果を得た。

- (1) 室温の変化が主軸変位に及ぼす影響について検討した結果、本研究で用いたマシニングセンタでは、Z軸ガイド温度 1°C の変化によりZ軸方向に約 $2.5\mu\text{m}$ の熱変位が生じることが判った。
- (2) 試作した温度監視システムを用いてマシニングセンタによる平面加工実験を行った結果、通常加工と比較して平面度が1/3に向上した。

参考文献

- 1) 松岡 甫篁：機械技術，Vol.59，No.11，p.21-22 (2011)
- 2) 米山 陽，他：温度監視システムによる工作機械の加工精度向上に関する研究，山梨県工業技術センター研究報告，No.26，p.116-119 (2012)
- 3) 杉浦 守彦：機械技術，Vol.58，No.12，p.85 (2010)