

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

米山 陽・平川 寛之・石黒 輝雄

Study on Improving Machining Accuracy of Machine Tools by the Temperature Monitoring System

Akira YONEYAMA, Hiroyuki HIRAKAWA and Teruo ISHIGURO

要 約

工作機械の加工精度向上のため、主軸の熱的安定状態等を把握する加工支援システムの構築を目的とし、主軸温度および主軸変位の計測手法について研究を行った。主軸回転中における主軸変位量を計測するため、非接触式工具先端位置測定装置の適用について検討した。その結果、稼働時間経過に伴う主軸変位量が計測可能であることが確認できた。また、主軸温度の変化を捉える手法として、放射温度計の適用について検討を行い、主軸端部温度を安定して連続計測することが可能であり、有効な測定方法であることが確認できた。両方法の組み合わせにより、稼働状態のマシニングセンタにて計測したところ、主軸変位量は、放射温度計により得られた主軸端温度と直線的な相関を示した。このことにより、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示された。

1. 緒 言

近年、機械部品の微小・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、理想的な切削速度を維持するために、主軸には数万 rpm の回転数が要求される上、切削切込み量についても μm 単位での制御が必須となる¹⁾。

しかし、公称位置決め精度が $1\ \mu\text{m}$ 以下であるマシニングセンタを用いても望んだ加工精度が得られなかったり、切削工具が破損するなどの事例が県内企業から寄せられている。これらの原因としては、切削条件や切削工具の不適合、被削材料の難削性などの他に、工作機械主軸の熱変位が大きなファクターとして影響している。工作機械メーカーおよびユーザは、工作機械の熱変位対策として、加工環境の恒温室化、切削液の定温制御、主軸冷却機能など様々な対策を実施しているが、すべての熱変位を防ぐことは困難である。

そこで、本研究では、高速回転主軸を有するマシニングセンタを使用するユーザが主に主軸の熱的安定状態を判断できるツールの開発を目的とした。小径切削工具を数万 rpm の回転数領域にて使用する際は、数千 rpm 程度の一般的な切削と比較すると、主軸頭の発熱量が増大する傾向にある。主軸頭の発熱は、主軸の熱変位となり加工精度に大きく影響することは経験的にも知られている。しかしユーザが、主軸の熱変位自体を無くすこと

はほぼ不可能であるため、加工前は暖機運転を実施し熱変位を定常状態に保ち、加工中はそのつど補正值を入力するなどして対処しているのが現状である。

工作機械のマニュアル等には暖機運転の実施要領等が記載されているが、ユーザ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、暖機運転時間の設定、補正量の入力ユーザの経験に頼っている面が大きい。そこで、ユーザが現在の機械状態を知る手段があれば、熱的定常状態にあることが判り、高精度加工を保つことができる。

本年度は、想定される各種温度要因と加工精度との関係について、定量的に明らかにするとともに、主軸の温度変化と主軸位置の変位について関係を明らかにするため、既存のマシニングセンタにて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。

2. 実験方法

工作機械の熱変形は、従来から多くの研究が行われており、変形予測手法等も示されている^{2,3)}。例えば、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⁴⁾。これは、主軸回転に伴う発熱により主軸が Z 軸方向に熱膨張を起こしているためである。そこで本研究では、最も

大きい熱変位が生じる、Z 軸方向の変位量について測定を実施した。

2-1 実験に用いたマシニングセンタ

実験には、表 1 に示す 2 種類の立形 3 軸マシニングセンタを使用した。どちらのマシニングセンタも高速型の主軸を有するため、主軸冷却装置が付属しており、主軸モータのケーシングに設けられた冷却ジャケットに、一定温度の熱交換用油が循環し、主軸を冷却する構造となっている。

表 1 マシニングセンタ仕様

	A 社製	B 社製
主軸テーパ	No.40 (7/24 テーパ)	No.20 (7/24 テーパ)
最高主軸回転数	20,000rpm	36,000rpm
主軸径	φ 65mm	φ 30mm
位置決め精度 (公称値)	±1 μm	±2.5 μm

2-2 主軸変位量測定

主軸の変位量測定については、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。本測定機は、本体に内蔵した CCD カメラで切削工具先端を連続撮影することにより、工具長を 0.1 μm の分解能で算出する能力を有している。測定は、主軸回転させた状態でも可能であるため、本実験での測定は、主軸回転させた状態で計測した。設置場所は図 1 に示す様に、マシニングセンタ加工テーブル上とし、プレート型治具を介して固定を行った。マシニングセンタの主軸には、BT シャンクツールホルダとスプリングコレットを用いて φ 4mm の超硬合金製シャフトを取り付けた。シャフト先端は約 90° の円錐形状とし、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 μm とし、主軸とテーブルが近づく方向を正とした。測定データは、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 5 秒とした。

2-3 主軸温度計測

主軸の温度計測は、放射温度計（ユーロトロン㈱，Rayomatic）を使用した。計測箇所は、図 1 に示す様に、

主軸最下部であるツールホルダとの勘合部近傍外周とし、放射温度計と測定面の距離はおよそ 10mm とした。放射温度計の出力値は、データロガー内蔵のアンプにて電圧から温度値に変換し、データロガーと接続されたコンピュータにて記録を行った。

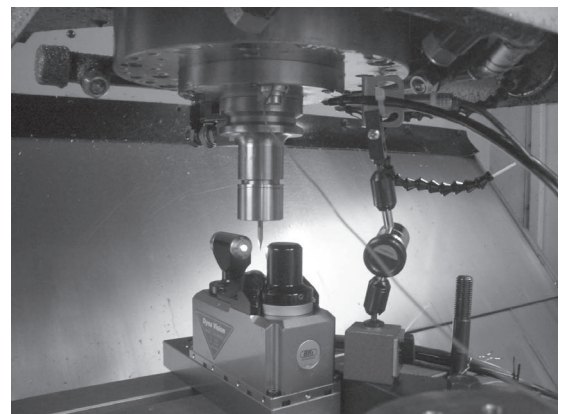
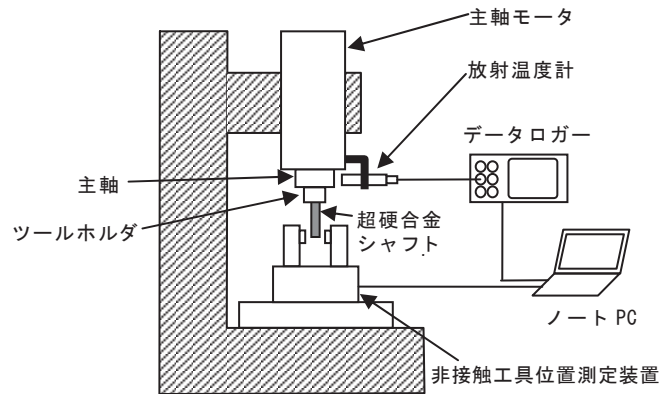


図 1 実験装置概要

3. 結果および考察

3-1 主軸変位測定結果

図 2 および図 3 に、A、B 両社製のマシニングセンタにおいて、主軸を停止状態から一定時間、所定の回転数にて高速回転させた後、再び主軸を停止させた際の主軸変位量（Z 軸方向）について示す。また、図 2 および 3 には、時間経過と主軸回転数（NC 指令値）の関係についても併せて示す。

A 社製マシニングセンタは、15000rpm による主軸回転直後から主軸先端位置が伸びる方向に変位が始まり、およそ 130 分経過後にほぼ変位量は定常状態に達し、その変位の最大値は 42 μm であった。また、主軸回転を 15000rpm から 200rpm に低下させたところ、主軸は縮み方向に変位し、およそ 70 分程度で主軸変位量はほぼ初期位置に復帰した。

B 社製マシニングセンタも A 社製と同様の傾向を示し、主軸回転数 30000rpm では、およそ 15 分後に主軸変位

量はほぼ定常状態に達し、その最大値は $22\mu\text{m}$ であった。また、主軸回転数を 30000rpm から 3000rpm に低下させると、直ちに主軸変位量は縮み方向に変位し、およそ 10 分程度で主軸変位量はほぼ初期位置に復帰した。

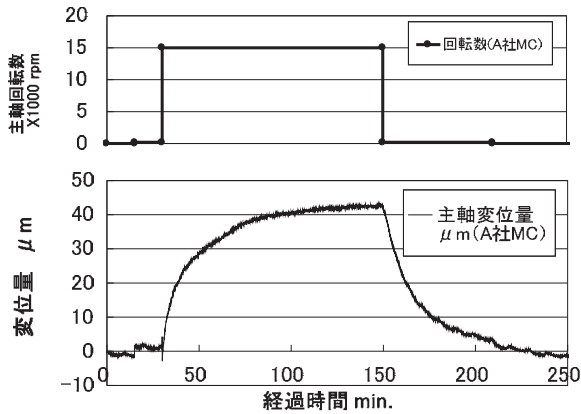


図 2 主軸変位測定結果と主軸回転パターン(A 社 MC)

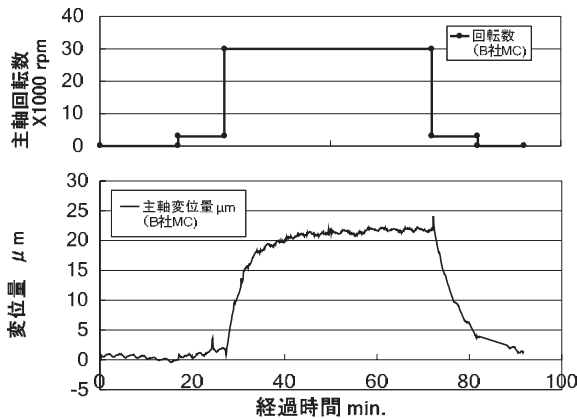


図 3 主軸変位測定結果と主軸回転パターン(B 社 MC)

3-2 温度に依存しない変位について

図 2 に示す主軸変位測定結果を確認すると、 200rpm で回転開始した直後に、Z 軸方向の変位が数 μm 程度生じていることが認められ、低回転かつ回転開始直後であることから温度による影響以外の要因が考えられる。これは、本実験で使用したマシニングセンタを含め、高速型主軸では、定圧予圧式の軸受が用いられることが多く、主軸回転に伴いベアリング位置が変位する構造に起因するためと考えられる⁵⁾。

そこで、温度以外の主軸変位特性について把握するため、主軸を極短時間で回転と停止を繰り返し運転する方法を用いて、回転数毎の主軸変位について測定を行った。図 4 および図 5 に、温度に依存しない主軸変位量を停止状態と回転状態で生じた差分から求めた結果について示す。その結果、A、B 両社のマシニングセンタ共に、温度に依存しない主軸回転数毎の変位量は回転数により一意的な値を示し、A 社マシニングセンタでは、 6000rpm 時に $5\mu\text{m}$ 程度伸びる方向に最大変位し、それ以上の回

転数においては変位量は減少方向に転じ、 20000rpm 時では $2\mu\text{m}$ 程度主軸が縮む方向に変位する傾向が確認された。B 社マシニングセンタでは、主軸の変位量は、回転数と共に直線的に増加し、 36000rpm において $7\mu\text{m}$ 程度、主軸が伸びる方向に変位が認められた。

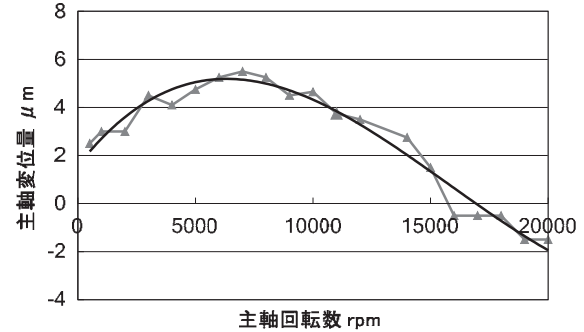


図 4 温度に依存しない主軸変位量 (A 社 MC)

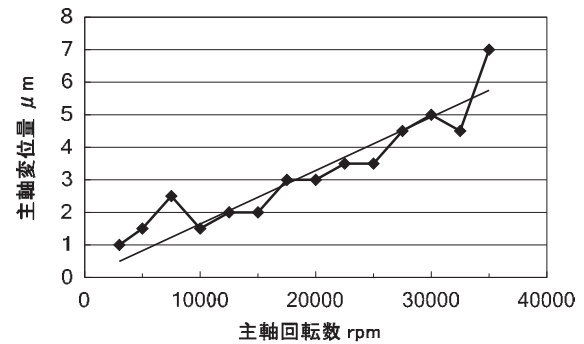


図 5 温度に依存しない主軸変位量 (B 社 MC)

3-3 温度データからの主軸変位量予測について

温度に依存しない主軸変位量が実験的に求められたことから、主軸端での温度測定データから予想される主軸変位量について算出を行った。図 6 および図 7 に、主軸を停止状態から段階的に回転数を上昇させた際の、主軸変位量の予測値と実測値の比較を示す。その結果、両社のマシニングセンタにおいても、主軸変位量の予測値は実測値と $\pm 5\mu\text{m}$ 程度ではほぼ一致し、温度データからの変位量予測がある一定内で可能であることが分かった。

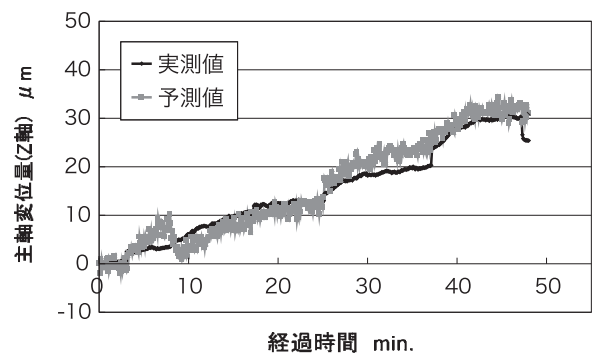


図 6 温度データからの変位量予測値 (A 社 MC)

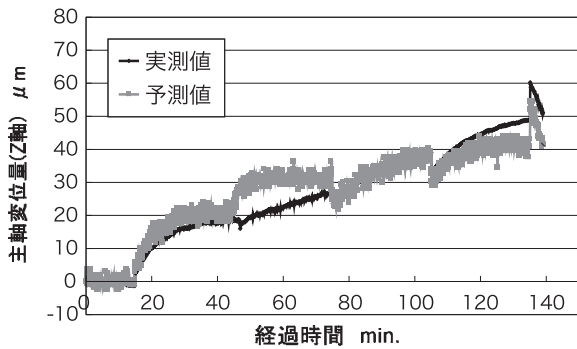


図7 温度データからの変位量予測値 (B社MC)

4. 結 言

工作機械の主軸温度変位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、次の結果を得た。

- (1) 主軸回転中における主軸変位量を計測するため、非接触式工具先端位置測定装置の適用について検討した。また、主軸温度の変化を捉える手法として、放射温度計の適用について検討を行った。その結果、本実験のシステムは主軸端部温度を安定して連続計測することが可能であり、有効な測定方法であることが確認できた。
- (2) マシニングセンタにて計測したところ、主軸変位量は、放射温度計により得られた主軸端温度と相関を示し、温度データによる変位量予測が可能であることが示された。
- (3) 温度データからの主軸変位量予測値と実際に測定した値を比較したところ、およそ $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度で一致した。

以上の結果から、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示された。

参考文献

- 1) 松岡 甫篁：機械技術，Vol.59，No.11，p.21-22 (2011)
- 2) 奥山 繁樹，奥田 広樹，他：精密工学会誌，Vol.63，No.1，p.76 (1997)
- 3) 森脇 俊道，他：日本機械学会論文集(C編)，57巻，539号，p.281 (1991)
- 4) 杉浦 守彦：機械技術，Vol.58，No.12，p.85 (2010)
- 5) 中村 晋哉，垣野 義昭：精密工学会誌，Vol.58，No.12，p.75 (1992)