タッチセンサと数学モデルを利用したマシニング センタの熱変形の測定と分解*

松 尾 光 恭** 安 井 武 司*** 稲 村 豊 四 郎***

Measurement and Decomposition of Thermal Deformation of a Machining Center
by Using Touch-Probe and Mathematical Model

Mitsuyasu MATSUO, Takeshi YASUI and Toyoshiro INAMURA

An effective method has been proposed to evaluate the thermal deformation of an NC machine tool. This method uses a touch probe and a master block, as well as a mathematical model of thermal deformation derived based on the finite element method. Thermal displacement between the spindle and the table is measured for three directional components in Y-Z plane of the machine along the Z axis movement. Then, by determining the parameters in the mathematical model so that the measured thermal deformation fits the corresponding value of the model, each deformation of the head and the column as well as its change due to relative position is clarified. Experiments have been carried out by rotating the main spindle of a machining center without cutting to verify the effectiveness of the method.

Key words: thermal deformation, master block, machining center

1. は じ め に

生産工程の自動化、無人化の進行に伴い、マシニングセンタに代表される NC 工作機械は長時間、断続無人運転されるようになり、このためこれら機械の非定常熱変形が加工精度の不安定要因の主題目となりつつある。ところで、これへの対策として熱的に安定な機械を作るには、加工点での熱変位を測定評価¹⁾²⁾するだけでなく、機械を構成している各要素の熱変形がどの程度これに寄与しているかを知ることが重要である。また構成要素の相対位置が変化すれば、加工点への寄与の程度も変化する。したがって、これらを明らかにできれば工作機械を製造する上で有効な熱対策ができる。一方、熱変形の補正、制御³⁾⁴⁾の立場からは、ワーク座標系の原点の移動と座標系自身のゆがみの両者を区別する必要がある。最近の NC 機で比較的容易に行えるのは原点移動補正のみで、これが有効なのは加工空間が小さいか、原点移動に比較して座標系のゆがみが小さい場合に限られる。したがって制御の有効性や限界を知るためには加工点での原点移動量だけ

でなく、ゆがみの原因となる各構成要素の熱変形を知ることが重要である。いずれにしても機械の各構成要素の熱変形が問題となるが、加工点での誤差を測定する方法はいろいろあっても、機械の構成要素個々の熱変形まで知ることはほとんどできない。

本研究ではマシニングセンタを例として、その主軸回転に伴う YZ 面内の加工点での熱変位 3 成分を、タッチセンサとマスタブロックによる簡便な方法によりまず測定する。この時、コラムとヘッドの主要点での温度も同時に測定し、得られた熱変形と温度測定値をもとに、有限要素法から導かれる関係式のパラメータを決定し、これに基づいて機械各部、特にヘッド、コラム、ボールねじの熱変形が求められることを示す。さらにこれらの変形の加工点への寄与率を予測、分析し、この寄与率がヘッドとコラムの相対位置によりどう変化するかも検討する。

2. タッチセンサによる熱変形測定

立型マシニングセンタのヘッドの Z 軸位置変化に対して主軸～テーブル間の熱変位の変化が測定でき、しかも多種類の成分が測定できる方法としてマシニングセンタ(軸移動量 $X \times Y \times Z$: $760 \times 410 \times 485$ mm, 主軸回転数: $25 \sim 4500$ rpm, 主軸端テーパ: ISO-40, 主軸電動機: AC 5.5 kW, 重量: 5800 kg) にタッチ

* 原稿受付 昭和 64 年 1 月 6 日。昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和 63 年 3 月 17 日)にて発表

** 正 会 員 福井県工業技術センター(福井市若菜町 920)

*** 正 会 員 金沢大学工学部(金沢市小立野 2-40-20)

Fig. 2 Thermal deformation measured after 1 and 4 h

パラメータとする形式の熱剛性システム方程式となっている。ただ、入出力を与えて未知パラメータを求める場合に問題となるのは次数 (N_c, N_h) をどう決定するかである。有限要素モデルを改良する場合のように温度-変位に関するモデルがあらかじめ設定してあって、そのモデルに含まれるパラメータを決定、調整する場合⁵⁾はよいが、本研究のように単に入出力情報だけからシステムの構造を決定する場合は、この次数そのものも決定する必要がある。しかしシステムの次数(パラメータの数)を決定する一般的方法はないので、採用するコラムやヘッドの温度測定位置と測定点数は、冗長であるが試行錯誤的に決定する。

4. 実験および解析結果

4.1 測定結果

主軸回転開始後1hおよび4h後のヘッド(1),(2)での熱変位3成分の測定結果を図2に示す。また機械のヘッド、コラムの主要点での温度上昇の測定結果を図3に示す。角度成分のばらつきが幾分大きいものの180mmの測定範囲で3成分とも直線的に変化するものとみなせる。このことは他の測定時間においても同様であった。Z成分と角度成分は温度上昇時のヘッド固定位置の違いが特徴的に現れており、1h後では

Fig. 3 Temperature rise in the head and the column induced by main spindle rotation (spindle speed 1000 rev/min)

ヘッド(1),(2)とも同じZ方向に変位していたものが4h後には互いに逆方向に変位している。図3に示したヘッドの温度上昇が(1)と(2)で同程度であることからその変形も同じと考えてよく、したがってこの結果はコラム(ボールねじを含む)の温度分布の相違による変形状態の違いを示している。Y成分は両者傾向的にも量的にも顕著な差はない。ここでヘッドの変形はZ軸位置に無関係に一定であるから、これら直線の勾配はヘッドの対偶であるコラムとZ軸ボールねじの熱変位変化率を示している。この勾配による変化分は、ある位置(たとえば図2のZ=0の位

Table 1 Relation among the points of temperature measurement, the thermal displacements predicted based on the measured temperatures and the measured thermal displacements at cutting point

Points of temperature measurement shown in Fig. 3				Head Column 6 11, 15			Head Column 6 11, 13, 15			Head Column 2, 6 11, 15			Head Column 2, 6 11, 13, 15		
Displacement			δ_m	δ_e	δ_h	δ_c	δ_e	δ_h	δ_c	δ_e	δ_h	δ_c	δ_e	δ_h	δ_c
Z μm	Head position	(1) $Z=0$	-22	-23	15	-21	5	-21	22	-21	13				
		$Z=-180$	-44	-47	-38	-9	-40	-26	-14	-45	-42	-2	-41	-35	-6
	(2)	$Z=0$	44	41	-35	75	42	65	42	-43	85	41	-35	76	
		$Z=-180$	6	-1	33	3	-23	26	0	43	3	38			
Y μm	Head position	(1) $Z=0$	-101	-101	-96	-5	-98	-93	-5	-100	-97	-3	-98	-97	-1
		$Z=-180$	-94	-93	3	-93	0	-92	5	-94	5	-94	3		
	(2)	$Z=0$	-105	-110	-86	-24	-108	-84	-24	-110	-89	-21	-109	-89	-20
		$Z=-180$	-100	-102	-16	-103	-19	-102	-13	-103	-13	-103	-14		
θ s	Head position	(1) $Z=0$	-8	-9	-10	1	-9	3	-10	-9	-1	-9	-10	1	
		$Z=-180$	1	2	12	0	-12	12	1	10	0	10			
	(2)	$Z=0$	-29	-28	-9	-19	-28	-11	-17	-29	-7	-22	-28	-8	-20
		$Z=-180$	-20	-16	-7	-18	-7	-17	-10	-18	-10	-18	-10		

δ_m, δ_e : Measured (regression value shown in Fig. 2) and predicted displacements at cutting point, respectively
 δ_h, δ_c : Decomposed thermal displacements of head and column, respectively

置)をワーク原点として原点移動補正を行ってもなおかつ残る量である。Z成分の勾配は大きく、4h後で200mmのヘッド移動に対してヘッド(1)で20 μm 、(2)で40 μm 変化するのに対し、Y成分の方は小さく10 μm 以下(測定中の収縮方向を考慮するとさらに小さい)である。したがってY成分は変位の絶対量としては大きいものの熱変位が原点補正で対応できることを示している。

4.2 寄与率分析結果

3節での議論に基づき、加工点変位およびヘッドとコラムの主要点の温度測定値を使って5h後の加工点での熱変位予測値を求め、実測値と比較した結果を表1に示す。同表にはヘッドとコラムの寄与率も示している。本実験では独立な温度分布がヘッド(1)と(2)の2通りしかないので次数をあまり多くとれないため、ヘッドとコラムの温度分布を特徴的に示す温度測定点を採用した。なお式(1)を適用するにあたっては180mmのZ軸移動範囲内で変位が直線的に変化することを考慮すると

$$\{C_i(Z)\} = \{C_{0i}\} + \{\Delta C_i\}Z$$

とできるので、式(1)を式(2)のように変形して用いた。

$$\begin{aligned} \{\delta(t, Z)\} = & \sum_{i=1}^{N_c} [\{C_{0i}\} + \{\Delta C_i\}Z] T_{c,i}(t) \\ & + \sum_{i=1}^{N_h} \{H_i\} T_{h,i}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

また式(2)中のパラメータの決定には、標準的なマトリクス形式の最小自乗法を使っている。表1に示した

加工点変位の予測値 δ_e は上記手続きにより求めたパラメータを改めて式(2)に代入し、計算したものである。この式から求められるヘッド、コラム各々の寄与率 δ_h, δ_c は、単独に測定することは困難であるが、採用した温度測定位置や測定点数に影響されずにほぼ一定の値が得られていること、また表には示していないが、推定されたヘッドの変形のY、Z成分について、ヘッドの温度分布の平均温度から単純熱膨張として計算した結果ともほぼ一致していたことなどから妥当な値が推定されていると考えられる。

図4に表1の最初のケースの時間経過に対する熱変位推定結果を示す。3成分とも実測値と良好な対応を示している。ただZ成分の最初の1~2hでの対応が幾分悪いが、主軸テーパ部の初期熱変形によるタッチセンサのシフト誤差によるものと考えられる。図5, 6, 7は、図4の各成分をコラムとヘッドの寄与率で示した結果である。Z成分(図5)はヘッド(1), (2)でコラムの変形が大きく異なっており、ヘッド(1)はヘッドの変形が常時支配的でコラムの寄与が少ないのに対し、ヘッド(2)ではヘッドと逆方向へのコラムの変形が大きく寄与し、図4に示したような早期での変形方向の反転現象の原因となっている。したがってZ成分は温度分布にもよるがコラムの寄与率が大きく、これを考慮した補正が必要であることがわかる。一方、Y成分(図6)はコラムの寄与がいずれの場合も少なく、全体的にヘッドの変形が支配的であることがわかる。そしてこのことはY成分の熱変位補正がヘッドの温度だけである程度可能であることを示唆し

Fig. 4 Comparison of the predicted (shown by lines) and measured (shown by points) thermal displacements at cutting point

Fig. 5 Decomposed deformation of the head and the column (Z direction)

ている。角度成分 (図7) ではコラムの傾きがヘッド (1) と (2) で全測定範囲で正負まったく逆方向になっている。このコラムの傾き θ_c は、コラム案内面～主軸中心間寸法 L (図1中の440 mm) を作用長として主軸端側で $L\theta_c$ 分の効果として図5のコラムの寄与

Fig. 6 Decomposed deformation of the head and the column (Y direction)

Fig. 7 Decomposed deformation of the head and the column (θ direction)

率の中に含まれてくる。この効果がヘッド (1), (2) で逆向きになることが図4のZ成分や図5のコラムの寄与率に大きな相違を生じさせる主因となっている。図8に図7の結果に従って推定した5h後のコラムの熱変形モードを示す。これは一般に認められているものと同様な結果となっている。

4.3 ボールねじの伸び

前述のように図5に示したコラムの主軸端でのZ成分寄与率 δ は、コラムの角度変位 θ_c による効果とコラムとボールねじ自身のZ方向変位 δ_c からなっている。図9は5h後でのこの関係を、図5に示したコラムのZ成分寄与率 δ (ボールねじの伸びも含まれる) と図7のコラムの角度変位から求められるZ成分への寄与率 $L\theta_c$ とをヘッドのZ軸移動量に対して示した結果である。図中の δ (実線) と $L\theta_c$ (破線) との差がコラムとボールねじの変形分 δ_c を表す。こ

Fig. 8 Thermal deformation of the column predicted by the angular displacement

Fig. 9 Column deformation in Z direction and its decomposition into the value due to angular displacement of the column and the value due to expansion of the ball screw

の図から δ_c はヘッド (2) の方が (1) に比較して量的にも、また Z 軸移動範囲での変化量としても大きい。これは図 3 のコラム案内面の温度分布からもわかるように、ヘッドとコラムの結合部となるボールねじナット部より下側での温度上昇がヘッド (1) より大きいためである。 δ_c をさらにコラムとボールねじの変位に分離することは、ボールねじの熱変位が支配的になり、しかもヘッド (1), (2) とは独立な温度分布をもつような場合でのデータがないのでできない。ただし $Z=0$ に対してヘッドを移動した時の δ_c の変化量 (図

中の斜線部) がボールねじの伸びによることだけはわかる。図 3 上側図中の $\blacktriangle$ は、測定点 16 とほぼ同じ位置にあるコラム内部のボールねじ支持端での温度測定値を示しているが、この結果からボールねじ収容空間の温度分布も図 3 と同様な分布をしているものと考えられる。実際別途ボールねじ自身の温度を測定したところ同様な分布をしており、しかもナット位置付近では 1~2 K 高いことがわかった。この場合のナットの移動範囲は図 3 に示すとおりであり、この領域での温度分布によるボールねじの熱膨張を計算したところおおむね図 9 の値と一致していた。

5. 結 論

マシニングセンタの主軸回転に伴う熱変形をタッチセンサを利用して測定し、得られたデータからヘッドとコラムの変形を推定した。その結果、ヘッドの Z 軸移動に対して Z 方向変位と角度変位が大きく変化し、原点移動による熱変位補正では不十分であることが判明した。また、これまでボールねじの熱変位は軸移動によるナットや支持軸受での発熱による温度上昇が支配的要因であるとの見解が一般的であったが、今回の結果からヘッドやコラムの温度上昇によってもボールねじの温度が上昇し、これによる熱変位が Z 軸座標のゆがみに相当大きく影響することを確認した。

おわりに、本研究は「北陸マシニングセンタ研究会」の研究活動の一環として行ったものであり、ご意見、ご援助いただいた会員諸氏に対し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. Tlustý and G. F. Mutch: Testing and Evaluating Thermal Deformation of Machine Tools, Proc. 14th Int. MTDR Conf., (1973) 285.
- 2) 奥島啓式, 垣野義昭, 菊池敏彦: 工作機械の熱変形に関する研究 (第 2 報), 精密機械, 38, 7 (1972) 565.
- 3) 竹内芳美, 大久保信行, 佐田登志夫: 温度分布測定による工作機械構造の実時間熱変形制御, 精密機械, 42, 11 (1976) 1043.
- 4) 佐田登志夫, 竹内芳美, 平元一之, 佐藤 真, 鈴木博一: 計算機補正による数値制御工作機械の加工精度の向上, 精密機械, 45, 11 (1979) 1286.
- 5) 稲村豊四郎, 寺崎尚嗣, 安井武司, 高木和憲: 実験データにもとづく熱剛性シミュレーションモデルの改良, 精密工学会誌, 54, 10 (1988) 1909.