環境保全を考慮した熱変形対策による高精度旋盤の開発*

金子 義 幸^{*1}, 田 辺 郁 男^{*2}
磯 部 稔^{*3}, 前 田 充 夫^{*3}Development of a High Precision Lathe with Countermeasure
of Environmental Preservation for Thermal DeformationYoshiyuki KANEKO^{*4}, Ikuo TANABE,
Minoru ISOBE and Michio MAEDA^{**} Takamatsu Machinery CO., LTD.,
1-8 Asahigaoka, Matto-shi, Ishikawa, 924-8558 Japan

As higher precision machining is required, reducing thermal deformation of a machine tool becomes more important. On the other hand, it is also necessary to save energy for the earth and people. Therefore, we developed a new lathe with environmental preservation countermeasure. In this report, the new design of lathe structure for reducing thermal deformation has been experimentally investigated. Concepts of these designs are a suitable cost of machine tool, low running cost, low maintenance cost and high precision machining. Three countermeasures which are a design of zero-center on three directions, a self forced cooling technology and a three-layers structure using thermal insulation unit were proposed for reducing thermal deformation. The developed lathe was evaluated in experiment. It is concluded from the results that thermal deformation of the lathe with these countermeasures was smaller than that of a conventional lathe. In addition, these countermeasures don't use forced cooling system and reduce energy and oil for working its.

Key Words: Thermal Deformation, Machine Tool, Lathe, High Precision, Environmental Preservation

1. 緒 言

最近、工業製品の高精度化、高品位化に伴って、従来にも増して高精度な加工が要求されてきている。一方、工業生産活動に対しても環境保全・省エネルギー化対策が要求されてきており、従来のように高精度加工を支援するために恒温環境を整えることや、多数の冷却装置を用いた強制冷却を行なうことが困難になりつつある。

そこで本研究では、環境保全・省エネルギーを考慮した熱変形抑制対策を施した旋盤を開発し、その効果を評価する。具体的には、三次元ゼロ芯設計技術⁽¹⁾、セルフ強制冷却技術^{(2)・(3)}、断熱ユニットを用いた三層構造(後述)の3つの対策を施した実機旋盤を試作し、その熱変形挙動の測定・評価を行い、本対策の効果について検討を実施した。

2. 環境保全を考慮した熱変形対策

ここでは、新しい旋盤に施した三次元ゼロ芯設計技術⁽¹⁾、セルフ強制冷却技術^{(2)・(3)}、断熱ユニットを

用いた三層構造の3つの対策に関して説明する。

2・1 三次元ゼロ芯設計技術 三次元ゼロ芯設計技術⁽¹⁾は、機械構造が熱変形することを容認して、切削点が直交3軸各方向の熱変形の基点となるように熱対称な構造とする対策である。概要を図1に示す。従来から工作機械に使用されているゼロ芯構造⁽⁴⁾では、主軸台支持部分の影響により、主軸上下方向の変形については抑制効果がでにくくなっていた。そこで本対策では、主軸台とベースの間に断熱の目的でジルコニア製の間座を入れることにした。さらに、主軸台とベースとの空間には、熱放射を防止するためのアルミ板を設置することにより、主軸から支持部への熱

Fig.1 Design of zero-center for three directions

* 原稿受付 2004年3月11日。

^{*1} 正員、高松機械工業(株) (☎ 924 8558 松任市旭丘1-8)。

^{*2} 正員、長岡技術科学大学 (☎ 940 2188 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*3} 高松機械工業(株)。

E-mail: kaneko@takamaz.co.jp

放射の影響を抑制し、結果として上下方向への熱変形を抑制可能とした。Z方向については、クイル構造として主軸台正面のみにボルト締結することにより、熱変形が主軸台後方へ逃げるようにした。今回の試作旋盤において、機械のコンパクト化も考慮する必要から、X軸方向については構造上完全なゼロ芯構造にはできなかった。しかし、本機は刃物の送り（切り込み）方向をY軸方向として、その影響がでにくい構造にした。

2・2 セルフ強制冷却技術 セルフ強制冷却技術^{(2)・(3)}は、撥水性および給水性の良い素材を工作機械の主軸台正面、背面、上面に貼付し給水させた後、水の蒸発に伴う気化熱で主軸部分を強制冷却するものである。概要を図2に示す。素材の貼付場所を主軸台正面、背面、上面としたのは、主軸の回転速度増加に伴う強制対流が主軸台各部の素材表面部で発生し、素材の活発な乾燥を促し、結果として大きな熱伝達率によって強制冷却ができると考えたからである。

Fig.2 Self forced cooling

Fig.3 Three-layers structure using thermal insulation unit

今回は、とくに強制対流発生のために、フィン形状をした一体型のフランジを主軸前後両側に取付けた。予備実験で各面での風速を熱線式センサにより測定したところ、上面においては正面、背面に比べて風速が小さかったため、補助的に出力16Wのファンを1個設置して冷却効果を高めることにした。今回主軸台端面には、給水素材としてPVAスポンジ、保水素材としてポリオレフィン系多孔質樹脂を組み合わせたものを貼付した。主軸台上部に給水タンクを設置してその中にPVAスポンジを入れて毛细管現象を利用して素材に水を給水させる。また、フィン是一体型のフランジとしたことにより、回転時のバランスや騒音についても従来型の機械とほぼ同程度に抑制できた。

以上、前節および本節は著者のプロトタイプ実験をもとに実用化のための実機試作である。

2・3 断熱ユニットを用いた三層構造 旋盤における一般的な熱源としては、主軸軸受、油圧チャッキングシリンダ、油圧供給ユニット、切削油ユニット、主軸モータ、強電ボックスなどがある。最近では機械の省スペース化が要求されているため、これら熱源は機械に緊密に配置されることになる。それにより複雑な熱変形をおこし、ある熱源要素に注目した熱変形対策をしても、それだけで加工精度が十分に向上することがむずかしい状況にある。そのため、主軸軸受、チャッキングシリンダの主軸部熱源は、三次元ゼロ芯設計、セルフ強制冷却の技術により対策が可能であるが、その他の熱源においても対策が必要となる。そこで、これまで点在していた主軸部以外の熱源を可能な限りベッドの下空間部に配置して、それとベッド上の加工部分との間に断熱ユニットを設置する構造を提案した。概要を図3に示す。断熱ユニットには、水が20リットル充填でき、吹出口付きの出力16Wのファン2台を対角に取付けることにより、カバー内の空気を平均風速7m/sでユニット内へ送った。さらに、断熱層とベース底部の間に18mmの空間を設けた。これにより、強制対流による水の攪拌および気化促進を行った。これらを集合化させ、水の対流による温度分布の均一化と水の蒸発による気化熱冷却によって温度上昇を抑制し、加工部への熱遮断が可能となると考えた。これは、本報で新たに提案する熱変形対策である。

3. 対策を施した旋盤の評価

3・1 製作した旋盤の実験方法 前章で述べた3つの対策を施した旋盤を製作して実験を行った。図4に製作した旋盤を、表1に今回の試作旋盤と比較実験に使用した従来型旋盤の仕様を示す。図5に熱変形の測定概要を示す。主軸にはテストバーを取付け、刃物台

には低熱膨張鋳物で作成した治具に渦電流式の変位センサ（分解能 $1\mu\text{m}$ ）を5個取付け、テストバーの X, Y, Z 各軸方向の主軸-刃物台間の相対変位を1時間ごとに8時間まで測定した。測定は、 X, Y 方向は共にテストバーの先端と根元の各2ヶ所（150mm間隔）で行い、 Z 方向はテストバー取付部端面1ヶ所で行った。また、相対的傾きはテストバーの先端と根元の変位測定値から計算によって求め、 α は Z 軸上、垂直方向2点（ $Y1, Y2$ ）、 β は Z 軸上、水平方向2点（ $X1, X2$ ）の変位測定値から算出した。熱源を含む機械各部（図5中、●：表面部、○：構造内部の計28点）にT型熱電対を取付けて温度分布測定を行った。実験は室温 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度40%～

Fig.4 Photograph of the new lathe

Table 1 Specification of the new lathe and the conventional lathe

		New	Conventional
Head stock	Height of center from floor mm	800	950
	Spindle rotational speed min^{-1}	6000	4500
Tool post	Stroke of X axis mm	120	120
	Stroke of Z axis mm	140	275
Main motor	Power kW	AC 5.5/3.5	AC 5.5/3.5
Hydraulic unit	Power kW	0.75 (Inverter)	0.75
Cutting oil motor	Power kW	0.25	0.25
Insulation unit	Size	1060 × 524 × 60	
	inner	Water, 20liter	
Weight kg		2000	2200
Total size mm		1600 × 1450 × 1650	1720 × 1350 × 1650

50%でコントロールされた恒温恒湿室で行った。

3・2 各対策の効果の評価 それぞれの熱変形抑制対策の影響について評価を行った。対策の比較条件としては、①対策なし（ N :従来型）、試作旋盤において、②三次元ゼロ芯設計技術（ Z ）のみ、③三次元ゼロ芯設計技術（ Z ）+セルフ強制冷却技術（ S ）の2つを採用、④三次元ゼロ芯設計技術（ Z ）+断熱ユニットに水を充填（ I ）の2つを採用、⑤試作旋盤において3つの対策全てを実施の場合（ ALL ）として効果の確認を行った。主軸回転速度の条件は図6に示すような実際の加工条件の回転速度変動のプログラムを繰り返した場合（ $CaseA$ ）と4500 min^{-1} 一定で回転させた場合（ $CaseB$ ）の2つとした。図7に主軸回転速度変動時での各条件での主軸ハウジング表面部（図5中a点）の温度変化を示す。これより、三次元ゼロ芯設計技術を

Fig.5 Experimental set-up for measuring thermal deformation

Fig 6 Curve of spindle speed for evaluation

採用した試作旋盤の場合は従来型に比べて主軸の温度変化が小さくなっている。特にセルフ強制冷却技術と断熱ユニット対策を実施した場合はさらに温度変化が小さい。これより主軸部の熱影響が効果的に低減できていると言える。また、テストバーの各軸方向の相対変位、相対的傾きの測定結果については、図8に示すように各測定値を測定前基準よりのずれ量の絶対値の総和を測定回数で割って偏差としたものを各条件でまとめ、比較しやすくした。その結果を図9に示す。これより、各対策の実施の違いによる影響を見ると3つの対策を全て実施した場合が、各軸相対変位、傾きともに最も小さくなっている。また、主軸を4500min⁻¹一定（CaseBの場合）で回転させたときも、3つの対策を全て実施した場合は、従来機に比べて変形が小さくなっており、主軸回転条件によらず同ような抑制効果があった。

さらに、断熱ユニットの効果確認のために、従来型の場合と試作旋盤で断熱ユニットに水を充填した場合

Fig.7 Temperature change of headstock at various conditions

Fig.8 Calculation method of thermal deformation for evaluation

としない場合の3通りについて、ベース左右（図5中、b, c点）の温度差と傾きについて測定を実施した。傾きはベースの研磨面に水準器を置いて測定した。得られた結果を表2に示す。これより、従来型では最大で約5℃発生したベース左右の温度差が、断熱ユニット対策により、その差はほぼゼロになっている。また、試験終了時のベースの傾きは、従来型で0.04mm/m発生して

Fig.9 Thermal deformation of the lathe with three countermeasures

Table 2 Effect of the thermal insulation unit

	Gradient of the bed for 8hours mm/m	Difference between temp. at b and at c °C
Conventional; N	0.04	5.3
Zero-center; Z	0.02	0.9
Zero-center and Thermal insulation unit; Z+I	0.01	0.5

いるが、断熱ユニット対策によって 0.01mm/m となった。これより、熱源の隔離と断熱ユニットに水を充填する対策により熱変形抑制効果が高くなっていることがわかる。

3・3 一般工場環境下での熱挙動 一般工場環境下での熱変形挙動を検討するために、恒温室の設

Fig.10 Room temperature change in a general factory

(a) Relative displacement

(b) Angular displacement

Fig.11 Experimental results of thermal behavior of a new lathe in a general factory

定を図10に示すように、6時間で 8°C 上昇、その後2時間で 5°C 減少するような環境を恒温室にて模擬的に再現して実験を行った。これは最も条件が過酷な冬季の一般工場を想定したものである。途中、値が上下に変動しているのは、恒温空調設備の設定と追従の時間差が原因と思われる。図11に得られた実験結果と、比較として恒温環境下での結果を併せて示す。これより、相対変位は、室温変動のゆるやかな前半は、環境の違いによる差は見られないが、室温が急に下がり始めると変形が大きくなっており、恒温環境下との違いが大きく見られる。このことから、一般工場環境下においても3つの対策は有効であるが、急激な温度変化に対して熱容量の違いから生じる熱変形の影響を小さくすることは難しく、今後他の対策が必要と考えられる。一方、相対的傾きは小さく安定していた。これは三次元ゼロ芯構造の影響が大きいものと考えられる。

次に、一般工場環境下での従来型と試作旋盤について比較を行った。主軸回転速度を図6中CaseAと同じ条件とした時の測定結果を図12に示す。これより、試作

(a) Relative displacement

(b) Angular displacement

Fig.12 Experimental results of thermal behavior of two lathes in a general factory

旋盤は従来型に比べて室温変動による変形の影響が小さく、本対策は環境の違いによる影響も少なくでき、有効な対策手法であると考え、これらは、三次元ゼロ芯構造とセルフ強制冷却による効果であると考えられる。

3・4 実切削試験による評価 図13、表3に示すような試験片および切削条件にて8時間の経時変化切削試験を実施した。恒温恒湿環境下での試験結果を図14に示す。図中、 の部分は、作業者の休憩を想定し、あえて加工を停止して機械を待機状態のままにしておいた時間である。また、比較のため従来型旋盤における試験結果も併せて示す。これより、試作旋盤は従来型よりも加工径変化が小さくなっている。

また試作旋盤で3・3節と同条件の室温変動環境下での切削試験結果を図15に示す。室温変動環境の場合、試験開始と同時に加工径が細くなり次第にまた太

Fig.13 Testpiece

Table 3 Cutting test condition

	Rough processing	Finishing
Spindle speed	2000 min ⁻¹	2000 min ⁻¹
Cutting depth(radius)	0.1 mm(2 times)	0.05 mm
Feed speed	0.1 mm/rev	0.05 mm/rev
Environment	DRY	DRY
Chucking pressure	2.0 MPa	
Cycle time	85 sec

Fig.14 Experimental results of continuance cutting test in an air conditioning room

Fig.15 Experimental results of continuance cutting test in a general factory

くなる傾向が見られ、これは、Y方向の相対変位と α 方向の相対的傾きが影響したものであるが、絶対量として $-5\mu\text{m}$ に抑えられたことは評価できる。

以上のように、三次元ゼロ芯設計技術、セルフ強制冷却技術、断熱ユニットを用いた三層構造の3つの対策は、恒温環境のみならず、負荷変動や室温変動環境に対しても、熱変形抑制効果があり、工業的に有効であると考え、また、消費電力量の比較から、本試作機は従来機に冷凍機を使用した場合に比べて約40%削減できた。

4. 結 言

三次元ゼロ芯設計技術、セルフ強制冷却技術、断熱ユニットを用いた三層構造の3つの対策には旋盤の熱変形抑制効果があることが確認できた。これより、従来の強制冷却装置や恒温環境設備を稼働させるために必要となる電力や冷却油の使用が減少し、環境保全、省エネルギー化を考慮した熱変形対策が可能である。

謝 辞

この研究はNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）との共同研究「エネルギー使用合理化工作機械等技術開発プロジェクト」として、助成を受けて行われたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 田辺, 山中, 水谷, 山田, 機論, 65-639, C, (1999), 4508-4513
- (2) 田辺, 松下, 中橋, TRUONG, 機論, 66-649, C, (2000), 3150-3155
- (3) 田辺, 中橋, 松下, TRUONG, 機論, 66-649, C, (2000), 3156-3161
- (4) 例えば, 桜庭, 機械設計, 32-15, (1988), 33-36