パイプフレーム構造 CNC 旋盤の開発*

鈴木直彦** 森本喜隆*** 金子義幸** 廣崎憲一† 岡崎祐一††

Development of Desktop CNC Lathe with Pipe Frame Structure

Naohiko SUZUKI, Yoshitaka MORIMOTO, Yoshiyuki KANEKO, Kenichi HIROSAKI and Yuichi OKAZAKI

While many components used in automobiles, household electric appliances, etc., are becoming more compact, the size of most machine tools used for machining such components remains unchanged. Therefore, to improve the efficient use of factory space and economical use of energy, machine tools are required to be compact adopting to the size of workpieces.

Therefore, in spite of the many requirements of the market related to the miniaturization of machine tools, a miniaturized NC machine tool has not been widely regarded. The conventional structure of machine tools such as a cast body or welded steel plate body is recognized as being the best. This preconception is one of the obstacles to solving this problem.

We have developed a new CNC lathe with a pipe frame structure. This structure is expected to enable the miniaturization of machine tools while ensuring sufficient space for the discharge of cutting chips. In this structure, the heat transfer between the pipe elements and connecting blocks strongly affects the axial displacement of the pipes.

In this paper, we investigated fundamental performance of the developed lathe, and machined workpieces precision by comparing those of conventional lathes.

Key words: machine tool, CNC lathe, pipe structure frame, machining precision

1. はじめに

加工部品の小形化・高精度化は実際に工作機械を使っても
のづくりを行う現場においては、自動車部品、家電部品、医
療機器部品をはじめとして、多くの部品の高精度化、小形化
がすすんでいることから明らかである¹⁾。しかし、それら
の部品を加工するための工作機械は、工作物に対して大きい
ままである。その理由として、加工精度や機械性能を満足さ
せるために、安全率を多くとり剛性を過剰に設計してしま
いがちになり、結果的に機械が大きくなってしまうことが考
えられる。それに対して生産現場では、工場のスペース効率
向上や省エネルギー化を目的とした「工作物の大きさに合
った工作機械の小形化」に対する要求が強くなっている²⁾。

著者らは、小形化として「対象工作物の加工径に対して、
機械幅を 10 倍程度の大きさとする」ことを目標として、直
径 30mm 以下の対象工作物について従来機と同等の加工が可
能で、かつ工作物の搬入・搬出などの自動化への対応も可能
とした、機械幅が 300mm~500mm ほどの省スペース CNC 旋
盤や NC フライス盤を開発してきた³⁾⁴⁾。これらの工作機械
は工場の省スペース、省エネルギー化を重視する顧客を中心
に、普及がすすんでいる。さらなる「小形化」を達成するた
めの重要な項目として、軽量化が挙げられる。工作機械を小
形化すると自動的に各部の軽量化も図られることになり⁵⁾、
工作機械の小形化と軽量化には密接な関係がある⁶⁾。しかし、
課題として工作機械の小形軽量化を達成するためには、限ら

れた機械構造体であるベッドの寸法における機械剛性と切粉
排出空間の確保の両立が求められる。

筆者らはこの課題を解決するために、新たな旋盤ベッド構
造としてパイプフレーム構造に着目した⁷⁾。鋼管によるフレ
ームの構造は建築物や橋梁など多様な部分で用いられ、特に
大きな空間を持った建築物に利用され、高い剛性と空間の確
保を可能としている⁸⁾。このパイプフレーム構造を用いるこ
とで、工作機械の構造体に求められる機械剛性と切粉排出空
間の確保の両立を図る。また、近年では工作機械の構造体の
一部に軽量化を目的に CFRP 材を用いる試み⁹⁾¹⁰⁾もあり、将
来的にパイプ構造体に CFRP 材を用いることも考えられる。

一般的な構造体の例として鋼管を長方形に組んだ構造を
ラーメン構造、三角形を基本にして組んだトラス構造が挙げ
られる。この構造体の部材となるものを鋼管、すなわちパイ
プ材を用いて CNC 旋盤のベッドの構造体とすることを考案
した。パイプフレーム構造はパイプとブロックの組み合わせ
た箱型構造で構成されている。フレームにパイプを用いた理
由には、軽量化と同時に設計、組立ての簡易化を図る目的が
ある。パイプを用いることによりパイプ及びパイプ構造体内
の空間に各種制御機能や電装部品の配置、切粉排出処理機構
を設置するスペースとしても使用することができる。この箱
型の組み合わせは比較的容易に構造変更できるため設計の自
由度も増す。

本報告ではパイプフレーム構造を工作機械の構造体に用い
るための基礎的な構造形状及び剛性について検討する。パイ
プフレーム構造を形成するパイプとブロック間の結合に最適
な接着剤の選定として結合強度の比較、結合部の形状の比較、
および耐久性について調査を実施した。さらに、この実施し
た結果を基に化学接着剤を用いてパイプフレーム構造体の単
純モデルを制作し、剛性の確認および耐久性の調査を実施し

* 原稿受付 平成 30 年 5 月 28 日

掲載決定 平成 30 年 10 月 22 日

** 正 会 員 高松機械工業(株) (石川県白山市旭丘 1-8)

*** 正 会 員 金沢工業大学 (石川県野々市市扇ヶ丘 7-1)

† 正 会 員 石川県工業試験場 (石川県金沢市鞍月 2-1)

†† 正 会 員 産業技術総合研究所 (茨城県つくば市梅園 1-1-1)

Table 1 Physical properties of adhesive

Items	Epoxy resin adhesive (Threebond TB2087)		Acrylic resin adhesive (Threebond TB3921/26)		Elastic adhesive (Threebond TB3952)	
	Resin	Hardener	Resin	Hardener	Resin	Hardener
Viscosity Pa·s (25℃)	13.0	30.0	5.1	5.1	30.0	15.0
Specific gravity (25℃)	1.16	0.96	1.06	1.10	1.14	1.00
Gelling time (25℃)	150 mins		4~7 mins		20 mins	
Standart curing condition (25℃)	24 hours		15 mins		7 days	
Tensile strength MPa	67.0MPa		22.5MPa		5.5MPa	

た。これらの結果を基にベッドにパイプフレーム構造を用いた CNC 旋盤を試作し、この試作 CNC 旋盤を用いて機械剛性および加工能力の調査を行った結果について報告する。

2. パイプ結合強度の確認

パイプフレーム構造体を構築する上で課題となるのが、パイプとパイプとの接合方法である。一般的に機械構造体の結合にはネジ締結が用いられるが、パイプを結合するにはパイプ端にフランジ部を設けるなどの方法がある。しかし、何本ものパイプが一か所に結合する場合を考えると結合部自体が大きくなるものとなる恐れがある。そこで、我々はこの課題を解決するために、近年、機械構造物への用途が拡大している化学接着剤による結合を試みた。

2.1 試験片および試験方法

接合に適した接着剤の調査として表 1 に示す接着剤 3 種を用いての評価を実施した。調査に用いた接着剤はエポキシ系、アクリル系、及び弾性性質を持つものである。図 1 に接合部の評価に用いた試験片を示す。試験片の材質には SS400 材を用いた。2 つのパイプ間に重なり合う接合部を設けて、この部分に接着剤を塗布し接着を行った。この接合部の評価のため接合長さ L と、2 つのパイプ間に設ける接合隙間 b を変化させた試験片を用意した。

接着した試験片は引張り試験機（株式会社津製作所製 オートグラフ DSC-25T）を用いて、2 つのパイプ材が接合部で破断するまでの破断強度の調査を実施した。引張り試験機における引張速度は全て 10mm/min に統一して試験を実施した。

2.2 接着剤及び接合形状による破断強度

図 2 は接合長さ L が 4mm、接合隙間 b が 0.07mm における各種接着剤の破断強度を示す。グラフには接着剤メーカーから提示のカタログ値による破断強度と実際に引張試験にて評価した破断強度を示す。エポキシ系接着剤とアクリル系接着剤のカタログ値に大きな違いは無いが、実際の破断強度は共に高い値を示し、特にエポキシ系が高い強度を示す。弾性系接着剤の接合強度は、先の接着剤 2 種より 2 割程度の結果となった。この結果からパイプ間の接合には 3 種の中ではエポキシ系接着剤が最も適していると考えられる。

次に接合長さ L が接着強度に及ぼす影響を調査した結果を図 3 に示す。接合隙間 b を全て 0.07mm とし、接合長さ L は 4mm、8mm、12mm と変化させた場合の接合強度について調査を行った。接着剤は先の調査で最も接合強度が高かったエポキシ系接着剤を用いている。その結果、接合強度は、ほぼ接合長さに比例して増加する傾向であることがわかった。これ

Fig.2 Comparison of tensile load in difference of the bonding type

Fig.3 Comparison of tensile load in difference of the bonding width

Fig.4 Comparison of tensile load in difference of the bonding gap

Fig.5 Comparison of tensile load between before and after of high-temperature environment and immersed in the coolant

らもメーカーの理論値よりも強度が高い傾向を示す。次に接合隙間 b について調査した結果を図 4 に示す。接着長さ L を全て 4mm とし、接合隙間 b は 0.07mm, 0.15mm, 0.3mm と変化させた場合の接合強度について調査を行った。この場合も接合剤はエポキシ系接着剤を用いている。いずれの場合も破断強度はほぼ同じ値であり、接合隙間の大小は大きく接合強度に影響を及ぼさないことがわかった。

以上の結果よりパイプ間の接合には 3 種の接着剤では調査を行った中ではエポキシ系が最も適しており、また接合長さが大きいほど強度が増す。接合隙間は接合強度に大きく影響しないことがわかった。

2.3 加工液浸漬における耐久性

工作機械の構造体は加工の際に用いる加工液が表面上に付着する可能性が高い。近年の加工液の成分として浸透性を高めるための化学物質が含まれるのも多く、この成分が接着剤の結合力を弱める可能性がある。そこで化学物質からなるシンセテック系加工液（希釈率 20 倍）にエポキシ系接着剤で接合した試験片を 60℃ に保った状態で 30 日間、浸漬し破断強度の変化を確認した結果を図 5 に示す。接着長さ L は 4mm、接着隙間は 0.07mm の試験片を用いている。浸漬前と浸漬後の破断強度は 2 割程度の低下がみられる。限定的な試験ではあるが、工作機械の構造体の結合に接着剤を用いる場合には加工液の影響による強度低下を避けるため、塗装皮膜や保護カバー等で影響を避ける必要がある。

3. パイプ構造体の評価

現在検討しているパイプフレーム構造の基本形は、パイプとブロックの組立により構造体を構築するものである。このパイプとブロックの接合部には先項で評価した接着剤を用いるが、構造体とした場合の剛性や耐久性は重要な技術課題である。そこで、パイプフレーム構造体におけるパイプ接合技術の基礎的な調査として構造体の剛性や耐久性に及ぼす影響について調査する。

一般的にパイプおよびブロックが鋼鉄製であるならば溶接やろう付けにより接合することが考えられる。一方、本研究では工作機械として基準となるベース面を組立てと同時に創成できることが望まれている。したがって、溶接など熱エネルギーによる接合方法では熱影響によるひずみが大きく、ベース面の精度維持が難しいことが予想される。このため、本研究では熱的要因によるひずみが無視できると考えられる化学接着剤による接合を接合方法に採用した。

ここでは、接着による構造体の接合に関する知見を得るため、パイプフレームによる試験体モデルを製作し、接着方式が構造体の剛性および耐久性に及ぼす影響を溶接接合やろう付け接合方式と比較し調査を行った。

3.1 試験体の製作

実験に用いたパイプフレームの構造体の模式図を図 6 に示す。試験体は、ベースプレートとパイプ材および接合ブロックで構成され、高さ 225mm、幅 200mm、長さ 400mm である。ブロックは S45C 材を用い、一辺が 40mm の立方体となっている。ベースに取付ける下部のブロックの X 方向 1 辺のみ 65mm としている。パイプ材は STKM13C 材を用い、直径 20mm、肉厚 3mm である。パイプ材 A は長さ 150mm とし、構造体の X 方向、Y 方向のパイプ材として用い、ブロックと

Fig.6 Evaluation model of pipe frame

Fig.7 Assembled pipe frame models due to differences in conformation in bonding type

の接着長さを 15mm としている。また、パイプ材 B は長さ 400mm であり、構造体の Z 方向のパイプ材として用い、ブロック内を貫通することによって接着長さを 40mm として、より剛性を得る工夫をしている。ベースプレートの材質は S45C で、400mm×260mm×板厚 20mm の大きさである。このベースプレートと下部のブロックは M10 のボルトにて各ブロック毎に計 6 本で固定した。

パイプ材とブロックの接合方法は以下の 4 種類とした。

また、図 7 にそれぞれの試験体の外観写真を示す。

- ・接着方式(a)はエポキシ系接着剤を用いて接着を行った。パイプとブロックの接合隙間は半径方向で 0.10mm とした。
- ・接着方式(b)は上記と同様の接着剤を用いて接着し、パイプとブロックの接合隙間は 0.25mm とした。これはコストダウンを図るためにパイプの外径加工を施さず、素材パイプをそのまま使用することを想定している。そのため、素材径のばらつきを考慮して接合隙間を大きく見積もったタイプも製作を行った。
- ・溶接方式(c)は一般的に広く使われる溶接方法として、ガスシールド・アーク溶接を用いて接合した。溶接による結合は高い結合剛性が得られると考え接着方式との比較として作成した。パイプとブロックの隙間は半径方向で 0.10mm とした。
- ・ろう付け方式(d)は銀ろうを接合部に溶かしこみ接合を行った。パイプとブロックの隙間は半径方向で 0.10mm とした。溶接よりも低温となるため熱歪が小さいと考えられるが、接合の際に用いたフラックスの使用により外観に酸化が

観察される。

試験用パイプフレーム構造体の評価として静剛性測定、疲労試験による耐久性の評価を行った。各測定および試験・評価方法を以下に述べる。

3.2 静剛性評価

図 8 に静剛性測定方法の模式図を示す。試験体は L 字形の試験体保持用ジグに取り付けられ、図中に示すブロック⑤にボルトを用いて +Y 方向に強制変形を与え、静荷重を負荷した。ボルトはロードセルに連結されており、負荷された Y 方向荷重を計測することができる。ブロックの変形量の測定は、精度が要求されるため、三次元測定機を用いることとした。

図 9 にブロック⑤に静荷重 500N を与えた場合のブロック⑤の Y 方向における剛性値を図 7 で示す各接合方法別に比較した結果を示す。

最も変形量が小さく剛性が高いのは溶接方式(c)であった。図 8 の 3D モデルを使って各要素の結合を完全固定した場合の FEM 解析による剛性値についても図 9 に示しているが、この結果と溶接方式(c)はほぼ一致した値を示す。このことから溶接方式(c)でのガスシールド・アーク溶接はほぼ結合部においては完全結合ができていと考えられる。構造体本来の剛性が FEM 解析結果または溶接の測定結果とすれば、その値よりも低くなっている剛性値は、接合層の影響によるものと考えられる。その値は、接着方式(b)が最も低く 8.3N/μm となり、次いで接着方式(a)が 10.0N/μm、そして、ろう付け方式(d)が 11.1N/μm となった。

接着方式(a)は溶接方式(c)と比較して 2 割程度の剛性低下がみられる結果となった。また、接着隙間が多いほど、剛性の低下が発生する。破断強度にはさほど接着隙間の影響は見られないが、負荷荷重による変形には接着層部の変形の影響が表れるものと考えられる。

3.3 耐久性評価

次に接合部の耐久性を評価するために構造体の疲労試験を疲労試験機（株式会社島津製作所製 EHF-UM 300KN-70L）を用いて行った。疲労試験は、図 10 に示すように静剛性の測定と同じく試験体保持用ジグを用いて、静剛性測定で負荷を加えたブロック⑤と構造的に对称の位置となるブロック②に繰り返し荷重を与えた。疲労試験の試験条件を表 2 に示す。試験荷重を圧縮荷重として片振幅 500N とし、オフセットは振幅に対する 20%の 100N と設定した。500N とした理由は、試験に用いたパイプフレーム構造体は、この後に製作するパイプフレーム構造 CNC 旋盤の体積比で約 1/20 モデルとなっており、加工負荷としては 1000N を想定している。想定する加工負荷の 1/20 としては 50N となるが安全率を 10 倍として耐久試験での荷重を 500N とした。周波数は、接着剤を用いた接着方式(a)、(b)の試験体では 1Hz とし、溶接方式(c)、ろう付け方式(d)の試験体は 5Hz とした。接着方式(a)、(b)を 1Hz としたのは、接着材自体がもつ減衰係数が比較的高い材料の場合、繰り返し荷重によって発熱しこの影響が出るのを防ぐためである。

疲労試験前後における塑性変形について調査を行った。図 7 で示した各ブロックの疲労試験前後における荷重無負荷状態の Y 軸方向の変形量を調査した結果を図 11 に示す。図 11 の横軸の数値はブロック番号を示し、縦軸の変形量は負荷方向を正值としている。図より、接着方式(b)は変形量が大きくなっている。これは、接合部の接着層の厚みが大きく、

Fig.8 Experimental set up for investigation method of static rigidity

Fig.9 Comparison of tensile strength for bonding type

Fig.10 Detail of fatigue test

Table 2 Test conditions of fatigue test

Endurance test	EHF-UM 300KN-70L(SHIMADZU Corporation)
Load direction	Compression
Load amplitude	Pulsating load 500N p-p (Preload 100N - Max load 600N)
Repeat count	100,000
Load frequency	1Hz (Adhesive bonding joint A,B) 5Hz (Welding joint, Brazing joint)

Fig.11 Displacement measurement results of fatigue test

接着層が塑性変形したためと考えられる。また、他の方式においても平均的に $2\sim 4\mu\text{m}$ 変化が生じているが、変形の方が負荷方向と反対になっている場合もあり、疲労試験による変形も考えられるが、測定における誤差も含まれている。この結果より接着方式において接着厚みを 0.1mm 程度に設定すれば、静剛性は溶接接合(c)より 2 割程度低下するが、十分な耐久性をもつ構造体を作り出せることがわかった。

4. パイプフレーム構造旋盤の製作と評価

これまで得られた結果を基に、実際の加工が可能なパイプフレーム構造ベッドを用いた CNC 旋盤の製作を行った。評価の比較とするために、主軸ユニット、スライドユニットは既存の鋳鉄構造ベッド CNC 旋盤で用いているものと同じとし、ベッドのみを鋳鉄からパイプフレーム構造に置き換えた CNC 旋盤とした。

4.1 パイプフレーム構造旋盤の製作

本研究にて製作したパイプフレーム構造ベッドを用いた CNC 旋盤の仕様を表 3 に示す。機械サイズは幅が狭く、奥行きが長い形状としている。これは、機械を並べた際に作業者の移動量が少なくできる利点がある。主軸仕様は小径加工部品を対象として高回転を実現している。

鋳鉄製ベッドの場合、ベッド製作は鋳型に鋳鉄を流し込む鋳造によって形作られる。ベッドと構成部品の結合面など精度が必要な部分は大型の加工機によって加工がなされる。

工作機械による加工精度を得るために、機械に求められる項目として機械移動軸の真直度、各移動軸間の平行度、直角度などが挙げられる。通常の鋳鉄製ベッドの場合、加工機による加工によってこれらの精度を保証している。しかし、パイプフレーム構造ベッドにおいてはベッド組付後に加工を

Table 3 Specifications of the newly developed CNC lathe

Items		Specifications
Head stock	Chuck size	Collet chuck 3inch
	Maximum speed	$10,000\text{min}^{-1}$
Tool post type		Horizontal linear
Size		$440^W \times 1450^L \times 1050^H\text{mm}$

Fig.12 Production method of pipe frame structure

行う方法もあるが、今回は組付け方法を検討し治具上にて組付けを行うことで、必要な精度を得る方法を用いた。この方法を用いることで、ベッドを加工するための大型の加工機を必要とせずとも、工作機械の構造体に求められる精度が得られる一手法としてなり得る。

図 12 にパイプフレーム構造ベッドの製作手順を示す。図 12(a)に示すような Z、X 方向の平面度が要求精度を満足し、X、Z、Y 方向の直角度も要求精度を満足させた治具ベースを準備した。この治具ベース上に図 12(b)に示すように X 軸、Z 軸スライドベースを取付ける。次に、図 12(c)に示すように、この治具ベース上に取付けた X 軸、Z 軸スライドベースを基準としてパイプフレーム構造を構成するパイプ、ブロックを 2.2 項で最も接合強度が高かったエポキシ系接着剤にて接着を行った。先の 3.2 項で最も静剛性が高かったガスシールド・アーク溶接を用いなかった理由として、溶接接合による高熱を局部的に与えることによって、熱による歪が発生する可能性¹¹⁾が考えられる。これが残留応力となり、パイプフレーム構造ベッドを治具ベース上から取り外した際に変形を引き起こす可能性が考えられる。そこで、結合時に熱の発生や歪の発生の可能性が低い接着剤を用いた。最後に図 12(d)に示すように、パイプフレーム構造ベッドを基準ベースより切り離すことで製作が完了する。この製作過程でパイプフレーム旋盤を製作し、JIS B6331-1 で規定された数値制御旋盤の精度検査の該当する項目において規定値内であることを確認している。

図 13 に製作した CNC 旋盤の機械構成図を示す。開発した CNC 旋盤のフレームはパイプを直線的に配置し、それぞれのパイプはブロック材を用いて接合される。ブロックは S45C 材を用い、パイプ材は STKM13C 材を用いている。ブロック材とパイプ材の接着部長さを基本 25mm と大きくすることにより十分な強度を得られようとして工夫している。特に Z 軸方向に配置したパイプは、ブロック内を貫通することによって接着長さを 60mm としより剛性を得る工夫をしている。より剛性を得るための方法として、ブロック間に斜材を取付けトラス構造としている。

この構造を用いることでパイプの長さやブロックの配置を変更、追加することで種々の形状の構造を容易に作り出すことが可能となる。また、機械の小形化の際の課題である切粉排出空間を犠牲とすることなく、剛性を保ちながら小形化を実現することが期待できる。パイプフレーム構造はパイプ軸方向に変形の伸びや力が伝わるため、外力や熱による変形が単純となる特性がある。

筆者らはこのパイプフレーム構造の特性を生かして、機械の発熱による熱変形を簡便な制御手法にて抑制することが可能な方法¹²⁾、及び、振動制御手法について先に研究を行い、振動振幅を半減させる効果を得ている¹³⁾。

機械の移動軸は、フレーム上に Z 軸スライドユニットを配置し、さらにその上に主軸ユニットを搭載する主軸移動方式とした。また、X 軸スライドユニットはパイプフレーム側面に取付板を介して設置し、くし型刃物台に加工工具を取り付けて加工を行うようにした。機械の操作者は X 軸スライドユニットに近い側に立ち Z 方向を向いて操作を行う。機械正面は -Z 方向から機械を見た側としている。表 4 は既存の同程度のサイズ、仕様の鋳鉄構造体を採用している CNC 旋盤と製作したパイプフレーム構造 CNC 旋盤の各部

Fig. 13 Structure of newly developed pipe frame CNC lathe

Table 4 Weight of part unit

Unit	Structure of pipe frame CNC lathe	Structure of cast iron CNC lathe
Spindle unit+Z axis stage unit	140kg	140kg
X axis stage unit	70kg	70kg
Structure (in this X, and Z axis slide base)	Pipe frame 315kg (130kg)	Cast iron 820kg
Overall weight of machine	525kg	1030kg

Fig. 14 Displacement measurement point and load point

Fig. 15 Comparison of stiffness value

重量及び総重量を比較した結果を示す。主軸、X、Z 軸スライドユニットは同じものを使用しているため同じ重量である。構造体で比較するとパイプフレーム構造体は鋳鉄構造体に対して約 6 割の軽量化となっている。パイプフレーム構造体の重量には X、Z 軸スライドベースの重量も含まれており、パイプフレーム部のみの重量は 185kg である。機械総重量で比較するとパイプフレーム構造 CNC 旋盤は約 5 割の軽量化を実現できた。

以上の結果より、パイプフレーム構造体を用いることで鋳鉄構造体より軽量化を図ることが可能である。今後の検討課題ではあるが、構造体の切り屑排出空間を含む内部空間を確保しながら、軽量化による重量低減分の機械サイズの低減が図れる可能性がある。

4.2 パイプフレーム構造旋盤の剛性評価

製作したパイプフレーム構造旋盤の剛性を確認するために、図 14 に示すように主軸ユニットの先端に X 方向、Y 方向にそれぞれ 200N の負荷を与えた場合の主軸-刃物台間の相対距離の変化を測定した。工作機械の 1 つである旋盤は主軸先端に取付けた加工材と、刃物台上に取付けた加工工具によって切削加工を行う。このことから、工作機械の剛性とは主軸-刃物台間の相対変位をいかに小さく保つかが重要である。そこで相対変位の測定には、主軸に取付けたテストバーを刃物台に取付けたマイクロメータにて、X 方向負荷の場合は X 方向、Y 方向負荷の場合は Y 方向にセットして測定を実施した。この測定した値より剛性値を算出した結果を図 15 に示す。比較として製作したパイプフレーム構造旋盤に剛性を、より得るために斜材を取付け可能としてあるが、斜材の有り、無しの場合、及び同サイズの従来構造である鋳鉄構造のベッドを用いた工作機械についても測定を実施した。パイプフレーム構造体で斜材を取付けることで、X 方向、Y 方向とも斜材の無い場合に対して約 2 倍の剛性が得られていることがわかった。

パイプフレーム構造旋盤で斜材有りの場合と従来構造と比較すると、X 方向の剛性値は 4 割程度の剛性となった。Y 方向においては従来構造とほぼ同等の剛性の確保ができている。X 方向はパイプ材の曲げ方向であり、この方向の剛性確保については今後の課題である。Y 方向はパイプ材に対して軸方向となり、剛性の確保が得られやすい方向である。

4.3 パイプフレーム構造旋盤の加工性能

製作したパイプフレーム構造 CNC 旋盤の加工性能を評価するために、実際に加工を行い加工精度の調査を実施した。

加工材料の形状は直径 18mm、長さ 40mm の丸棒を用い

図 16 に示すように長手寸法 15mm 分を主軸に把握させて、把握の反対側を端面から長手方向で 20mm の加工を実施した。

加工評価としては、機械剛性の評価方法の一つである、加工した加工材の真円度の楕円成分の大きさによる評価方法¹⁴⁾を用いた。機械剛性の評価に用いる加工材料は S45C 材とし、また、機械の振動特性は、主軸の各回転数における真円度で評価する方法を用いた。機械の振動特性の評価に用いる加工材料は快削黄銅 C3604BD 材とした。両試験の加工条件を表 5 に示す。

加工による機械剛性を評価した結果を図 17 に示す。比較として製作したパイプフレーム構造旋盤と同サイズの従来構造である鋳鉄構造のベッドを用いた工作機械についても測定した。切込み量、送り量が増加するに従い真円度の楕円成分

Fig. 16 Cutting workpiece

Table 5 Cutting conditions

Cutting conditions	Cutting capacity test	Roundness test
Cutting workpiece material	S45C	C3604BD
Cutting tool material	Coated carbide	Single crystal diamond
Spindle speed	1,800min ⁻¹	2000, 4000, 6000, 8000min ⁻¹
Depth of cut	1.0, 2.0 mm	0.1mm
Feed speed	0.2, 0.25mm/rev	0.02mm/rev

Fig. 17 Cutting capacity test of workpiece (S45C)

Fig. 18 Roundness of test workpiece (C3604BD)

が増加していく傾向を示す。この楕円成分値が大きくなると加工びびりが発生する。この加工条件下においては加工表面にびびりの発生は確認されないが、切込み、送り量が増すと真円度の楕円成分が増す傾向が見られる。また、チャック把握部より距離が遠くなると楕円成分が大きくなる傾向を示す。

製作したパイプフレーム構造旋盤と鋳鉄構造の旋盤では、切込み 2mm, 送り 0.25mm/rev の条件では真円度における楕円成分の大きさに差が見られるが、切込み 2mm, 送り 0.20mm/rev 以下の条件においては、ほぼ同等の結果であり、パイプフレーム構造ベッドが加工機として適用可能な結果が得られた。一般的な旋削加工で発生する切削負荷は主分力方向が最も大きく、図 15 で示したように Y 方向については鋳鉄構造の旋盤とほぼ同等の剛性を確保していることより、大きな違いがみられなかったと考えられる。X 方向については、鋳鉄構造の旋盤と比較して剛性が劣る結果となっているが、比較的に加工負荷の小さい背分力方向となるため、加工には大きく影響しない結果となったと考えられる。

機械の振動特性の評価は各主軸回転数による加工を実施した加工材の真円度を評価した。その結果を図 18 に示す。この場合もパイプフレーム構造旋盤と同サイズの鋳物構造のベッドを用いた工作機械についても調査を実施した。鋳鉄構造の旋盤による真円度は、どの回転数においてもほぼ一定である。一方、パイプフレーム構造旋盤は主軸 6,000 回転時における真円度の増加がみられる。これはパイプフレーム構造旋盤の固有振動値として 96.8Hz で主軸、刃物台が X 方向に逆位相になる振動モードを確認しており、この影響と考えられる。しかし、鋳鉄構造旋盤にて実際に生産加工している対象ワークにおいて、真円度 0.5 μ m 以下を求められる場合は限られており、パイプフレーム構造旋盤は一般的な量産部品を加工するために求められる加工精度は確保できている。

5. 結 言

本研究では、工作機械の小形化、軽量化を目的とし、この課題を達成できると考えるパイプフレーム構造を用いるための基礎的な調査、及び実際にパイプフレーム構造を用いた旋盤を製作し評価を実施し、以下の結果を得た。

- (1) パイプフレーム構造に用いるパイプとブロック間の接合に接着材を用いた場合、接着剤は調査の中ではエポ

キシ系接着剤が最も接合強度が高く、工作機械での使用環境を想定した評価において 2 割程度の強度低下に留まることを確認した。

- (2) パイプフレーム構造体とした場合、接着方式は溶接方式と比較して 2 割程度の剛性低下となる。また、接合隙間が大きいとより剛性が低下し、耐久試験においても変形量が増大する。
- (3) パイプフレーム構造体を用いた工作機械の静剛性は従来構造の工作機械と比較して、地面より水平方向は 4 割程度の剛性であるが、垂直方向は従来機とほぼ同等の剛性を有する。
- (4) 加工性能としては従来機とほぼ同等の加工性能を持っていることから、生産用 CNC 旋盤として十分に通用する性能を有する。

参 考 文 献

- 1) 岡崎：マイクロファクトリ，精密工学会誌，**68**, 4 (2002) 491.
- 2) 黒田：部品と工場の進化を支えるモノづくり革新技術，デンソーテクニカルレビュー，**20**, (2015) 26.
- 3) Y. Kaneko : Development of Ultra Slim Utility Type of CNC Lathe Adapted to Automation, Int. J. Automation Technology, **4**, 2 (2010) 138.
- 4) N.Suzuki, and Y.morimoto :Development of Desktop Machine Tool with Pipe Frame Structure, Int. J. Automation Technology, **9**, 6 (2015) 720.
- 5) 清水：工作機械の小形軽量化，精密工学会誌，**60**, 7 (1994) 920.
- 6) 廣垣，青山他：デスクトップ型 5 軸制御工作機械の LCA を用いた環境負荷の考察，日本機械学会論文集，C 編，**75**, 752 (2009) 1135.
- 7) N. Suzuki, and Y.morimoto :Development of Ultra Small Size CNC Lathe by pipe frame structure, Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting : 2, (2010)183.
- 8) 日本建築学会，鋼管トラス構造設計施工指針・同解説，丸善，2002,19.
- 9) H.-C.Möhring : Composites in production machines, Procedia CIRP **66**, (2017) 2.
- 10) Lee, Dai Gil et al., Design and manufacture of composite high speed machine tool structures, Composites Science and Technology, **64**, (10-11) (2004),1523.
- 11) 酒井，佐々木：工作機械製作における溶接技術の導入と問題点，溶接学会誌 **45**, 4 (1976) 273.
- 12) 森本，鈴木他：パイプフレーム構造 CNC 旋盤の振動制御，精密工学会誌 **78**, 5 (2012) 420.
- 13) 鈴木，森本他：パイプフレーム構造 CNC 旋盤の熱変形制御，精密工学会誌 **83**, 5 (2017) 453.
- 14) 藤村，安井：工作機械と生産システム，共立 (1985) 199.