超小型 CNC 精密旋盤の開発*

林 亮** 青山 尚之*** 山中 将†

Development process of micro CNC precision lathe

Akira HAYASHI, Hisayuki AOYAMA and Masashi YAMANAKA

The microfactory is proposed as a compact production system intended for a small precise parts. The use of downsized machines for small parts is effective to decrease energy consumption and a space occupation. The micro CNC precision lathe for the achievement of the microfactory has been developed. The development concept of the micro CNC precision lathe is miniaturization, high accuracy, simplification of installation and operation. The micro CNC precision lathe developed first is a postcard size. This can put out ordinary accuracy for a precise lathe to a plane material. Next, the CNC precision lathe of the developed A4 size enables a more efficient, more flexible cutting. An enough effect for the micro factory achievement can be expected of these micro CNC precision lathes. This paper describes development process of these micro CNC precision lathes.

Key words: microfactory, precision lathe, micro lathe, micro turning system

1. 緒 言

情報通信関連をはじめとする高度に集積・小型化された製品には、微小な機械部品の加工・組立が要求される。その割合が急速に拡大している一方で、生産システムを構成する機械の寸法はほとんど変化していない。このため、スペース、エネルギー効率の悪化や設備投資のコストが見合わないという問題が起きている。これらを解決するために、部品サイズに見合った小さい機械で生産を行う「マイクロファクトリ」という考え方が提案され¹⁾、多くの研究が行われている^{2)~4)}。マイクロマシン関連の展示会、国際ワークショップにおける報告などからも、世界規模でマイクロファクトリの実用化が進められていることがわかる。北原らはマイクロファクトリの有効性を実証するために、外形寸法 32×25×30.5mm のマイクロ旋盤を開発した¹⁾。これは直交する 2 軸には圧電アクチュエータで駆動されるマイクロスライダが用いられ、ストロークは各 4mm である。工作主軸は 1.2W の DC モータにベルトを介して駆動され、最高回転速度は 15000min⁻¹、工作物の最大把持径は 2mm である。同機は岡崎らにより NC 化され、黄銅棒の加工試験により、表面粗さ 0.5 μmRmax、真円度 0.5 μm を得ている⁵⁾。この他にも種々のマイクロ工作機械が開発されている⁴⁾。

2. 開発方針

開発にあたっては、上述した簡単な設置・加工準備・操作に加えて、実用性を重視した場合の最小機械サイズを見極めることを目標とした。さらに、従来の大きさの旋盤の精度を維持しながら小型化することに留意した。一般的な旋盤の機械サイズの導出手順は以下の通りである。

- i) 最初に加工対象とする工作物の最大寸法を決める。これにより、切り込み軸 (X 軸)、トラバース軸 (Z 軸) のストロークを決定でき、ベッドの概略の大きさを決めることができる。

- ii) 必要な切削能力の上限を仮定し、駆動モータ、送り機構を選定する。工作主軸用モータは、最高回転速度、最大トルクより求まる。これと工作物最大把持径より工作主軸台の大きさが決まる。
- iii) 最大切込み時の切削抵抗の大きさから送りモータを選定し、必要なら剛性から直動軸受等の運動支持要素と送りねじを決めることができる。これらより送り装置の大きさが求まる。大きさを決める際には、搭載する主軸台や刃物台の大きさも考慮する必要がある。
- iv) iii) と送り装置の配置、全体の機械構成を総合的に検討してベッドの大きさを決める。このとき製作のしやすさ、操作性、保全性なども合わせて考慮する必要がある。i) で定めた概寸より大きくなることがほとんどである。

本開発では対象とする工作物の大きさを φ5×10mm とした。いわゆる IT 部品と呼ばれる、従来自動旋盤で大量生産される部品の多くはこの寸法範囲に含まれるため、マイクロ旋盤のニーズがある。上述の i) よりベッドの大きさを A6 サイズの 150×100mm とした。このサイズは、前述の北原らのマイクロ旋盤よりかなり大きい。これは主としてストロークの大きさに起因する。次に手順 ii) 以降に従って詳細設計するわけであるが、マイクロ旋盤においては「必要な切削能力の上限」を仮定することが困難である。マイクロ旋盤では工作主軸に使用するモータが小型のためトルクが小さく、加工能力が劣るのは自明である。加工能力が劣るデメリットに対して、省スペース・省エネルギー等のメリットがこれを上回るかを知る必要がある。ここでは A6 サイズが実用的な最小サイズであると仮定し、この範囲に収納できるように機械装置各部の設計を行った。つまり上述の iii) iv) の手順に沿った設計は行っていない。

このように設計したものが MTS1 である。MTS1 を量産化するために仕様を見直したものが MTS2 である。これらを用いて種々の加工試験を行い問題点を抽出した。詳細は後述するが、A6 サイズは実用的な最小サイズとしては小さすぎることがわかった。これを踏まえて機械サイズを見直したものが MTS3 である。表 1 に MTS2, MTS3 の主要仕様を示す。

* 原稿受付 平成 20 年 10 月 10 日

** 正 会 員 株式会社ナノ (横浜市金沢区谷津町86-1)

*** 正 会 員 電気通信大学電気通信学部 (調布市調布ケ丘1-5-1)

† 正 会 員 東北大学大学院 (仙台市青葉区荒巻字青葉01)

Table 1 Specification between MTS2 and MTS3

		MTS2	MTS3①	MTS3②
Size of base		150×100mm	200×300mm	200×300mm
		postcard size	A4 size	A4 size
Maximum processing length		10mm	50mm	50mm
Maximum diameter for work		5mm	10mm	10mm
Byte installation number		1	4	4
Spindle	Declared power	11W	10W	30W
	Bearing	Traction drive	Traction drive	Ball bearing
	Synchronous positioning control	No	Yes 500 division	Yes 2048 division
Table	Guide	Cross roller	Cross roller	Cross roller
	Sending	Triangular screw	Triangular screw	Triangular screw
	Stroke	10mm	55mm	55mm
	Unit of minimum sending	0.2 μm	0.1 μm	0.1 μm
	Rapid speed	2.4m/min	0.6m/min	0.6m/min
	Declared power	3W	10W	30W

Fig.1 MTS1

3. 開発機の詳細と性能評価

3.1 MTS1

3.1.1 構成

MTS1 の外観を図 1 に示す。ベッドには厚さ 20mm のむくの鋳物板材を用い、その大きさははがきサイズの 150×100mm である。通常サイズでは最も簡単なむく板を使用しても全く問題ない。

X, Z 軸テーブルは 80×50mm のモジュール構造とし、X 軸上に主軸、Z 軸上に刃物台を取り付け、それぞれベッド上に固定した。剛性を考慮して 6mm 角のクロスローラガイドを使用し、精度を考慮して精密三角ネジ (M2, P0.2) をモーターで直接駆動している。主軸、テーブル送りの駆動には共に消費電力 2W、直径 10mm、パルス分割数 1024 個の AC サーボモーターを採用した¹⁾。

Table 2 Rigidity result

Table	Radial rigidity	8.9N/μm
	Axial rigidity	1.1N/μm
Spindle	Radial rigidity	2.8N/μm
	Axial rigidity	2.3N/μm

Fig.2 Table positioning accuracy (X axis, 1 pulse sending)

Fig.3 Table positioning accuracy (X axis, 1024 pulse sending)

主軸は AC サーボモーター、トラクションドライブ遊星ローラー減速機、スピンドル支持用アンギュラーボールベアリング、コレットチャックが一体構造となったシンプルな構造にすることにより芯振れを最大限に抑えるようにした。また、トラクションドライブによる減速方式を採用し、剛性とモーターの回転トルクを高めている。

モーターはすべて市販 PC により NC 制御され、テーブル送りの最小設定単位は約 0.2 μm である。また、装置の操作および切削形状の入力は PC 画面を見ながらのマウスによる GUI 入力方式とし、簡単な形状であれば自動で工具の動作軌跡を生成し、切削できるようになっている。

3.1.2 剛性

MTS1 におけるテーブル剛性、主軸剛性は表 2 のようになった。本機は直径 5mm、加工長 10mm までのワークサイズに対応しているものであり、このクラスでは十分な剛性が得られている。

3.1.3 テーブル位置決め精度

MTS1 におけるテーブル位置決め精度の測定結果は以下のようになった。図 2 は 1 パルスごとの、図 3 は 1024 パルス (1 回転) ごとのテーブル位置と目標指令位置との誤差を示している。単一ピッチ誤差は 1 μm 以内に収まっていることが確認された。また、フルストローク (10mm) での累積ピッチ誤差は 5 μm 以内で収まっていることも確認された。

3.1.4 表面粗さ、真円度誤差、形状精度

図 4 に示す形状の工作物を用いて切削試験を行った。材質は C3604 (真鍮), S45C (炭素鋼), SUS303 および 304 (ステンレス), TAB6400 (チタン) である。表 3 に示す条件によって切削試験を行い、表面粗さと真円度を測定した。表に測定結果を合わせて示す。

Table 3 Cutting condition and cutting result

Work material	C3604	SUS303	S45C	SUS304	TAB6500
Byte material	diamond	SKH	SKH	SKH	SKH
Byte nose radius mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Byte rake angle	0°	5°	5°	5°	5°
Incision depth mm	10.0	10.0	10.0	10.0	2.0
Sending speed $\mu\text{m/rev}$	5.0	5.0	3.3	3.3	20.0
Cutting fluid	none	oil	oil	oil	none
Surface roughness $R_a, \mu\text{m}$	0.03	0.13	0.46	0.26	0.55
Surface roughness $R_y, \mu\text{m}$	0.20	1.90	3.96	2.74	4.56
Roundness P-V μm	0.19	0.50	1.33	1.37	5.13

Fig.4 Cutting shape by MTS1

C3604 では表面粗さ $0.03 \mu\text{m}$ (R_a), $0.20 \mu\text{m}$ (R_y), 真円度 $0.19 \mu\text{m}$ (P-V) という精密旋盤並みの仕上がりを得ることが出来た。SUS304, TAB6400 では切削が困難となったが、理由としてモータートルク、主軸剛性の不足等が考えられる。また、形状精度で $5 \mu\text{m}$ 程度の誤差が認められたが、原因は機械原点センサーの誤差によるものであり、センサー精度の向上が課題である。

3.2 MTS2

3.2.1 構成

MTS2 は MTS1 の量産型であり、構成は基本的に MTS1 と同一である。X, Z 軸送りのサーボモーターを高出力のものに変更した。また主軸台モーターは DC モーターに変更した。設置を容易にするために、制御系をワンボックス化し PC との接続を簡素化した。

3.2.2 ベッド厚さの比較試験

前述のように、ここではベッドに鋳物のむく板材を用いている。超精密加工機のベッドとして石定盤を用いることがあるが、精度維持と支持剛性向上に有効である³⁾。機械を小さくすることにより、従来のリブ構造とは異なるベッドを用いるのは、マイクロ旋盤の特徴の一つである。そこでベッドの厚さを変えて切削実験を行い、加工品質への影響を調べた。ベッドは、できるだけ剛性を高くし、厚さ $t=40\text{mm}$ の鋳物のむく板材を用い、重量は 4270g とした。ここでは、 $t=20\text{mm}$, 10mm の鋳物むく板材を用いて、軽量化すなわち剛性を低下させた場合の加工品質への影響を評価する。図 5 に MTS2 の各構成要素の重量割合を示す。ベッド上

Fig.5 Ratio of weight

Fig.6 Pickup is fixed to byte stand, excite byte

Fig.7 Pickup if fixed to spindle, excite byte stand

に載せる装置の合計重量は約 1.5kg である。

ベッドの厚さを変えて次の試験を行った。

- ①主軸を停止させた状態でのインパルス試験
 - (1)刃物台にピックアップを固定、バイトを加振
 - (2)主軸台にピックアップを固定、刃物台後方に加振
- ②切削中の刃物台後方のスペクトルを観察
- ③表面粗さ、真円度の比較

3.2.3 ベッド厚さ比較試験結果

- ①主軸を停止させた状態でのインパルス試験

- (1)刃物台にピックアップを固定、バイトを加振

ベッドの厚さ $t=40, 20, 10$ すべてでほぼ同一の結果となり、ベッドの厚さによる影響は見られなかった。図 6 は $t=40$ の結果である。

- (2)主軸台にピックアップを固定、刃物台後方に加振

ベッド厚さ $t=40, 20, 10$ で細かな違いはあるが切削に影響を及ぼすほどの違いは見られなかった。共通して 3.2kHz 付近にピークがある。図 7 は $t=40, 20, 10$ ぞれぞれの結果である。

- ②切削中の刃物台後方のスペクトルを観察

加工条件はモーター回転速度 $f_m=800\text{Hz}$, 切り込み深さ $20 \mu\text{m}$, 送り速度 20mm/min で直径 10mm の C3604 (真鍮) を単結晶ダイヤモンドのバイトで切削した。図 8 に $t=40, 10$ でのパワースペクトルを示す。

Fig.8 Power spectrum of byte stand while cutting

Fig.9 MTS3

$t=40$ の場合は 2kHz 付近に高いピークが観察されるが、どこから起振されたものかは不明である。 $t=10$ の場合は 3 次成分までのピーク高さがほぼ等しく、そのレベルも $t=40$ の場合に較べて高い。2kHz 付近にも同様のピークが見られるがレベルは低い。4 次成分以上の傾向はほぼ等しかった。

③表面粗さ，真円度の比較

上記②の加工条件での表面粗さ，真円度を比較したところほぼ等しい値を示し，ベッドの厚さの影響は見られなかった。これはベッド上の各装置の剛性に較べて，ベッドの剛性が十分高いためである。

以上の結果，ベッドの厚さによる切削精度への影響はほとんどなく，マイクロ旋盤では見た目のバランスより薄いベッドによって構成が可能である。

3.2.4 MTS2 の問題点

MTS2 の加工精度は問題はなく，加工できる範囲は効果が期待できる。しかしながら，刃物が一つしか装着できないため形状が複雑なものを切削するには刃物を取り替える必要があり，実用的ではない。また，ストロークが 10mm と短く MTS2 で加工できる範囲が限定される。

3.3 MTS3

3.3.1 構成

MTS3 の外観を図 9 に示す。MTS3 のベッドは A4 サイズである。軸配置を変更し，X 軸テーブルに複数の刃物を装着可能なクシ刃型工具台を，Y 軸テーブルに主軸台をそれぞれ配置した。また，主軸の同期位置決め制御を行いネジ切削も可能とした。さらに機械剛性を高め，モーター出力も向上して高硬度材の切削にも耐えられるようにした。

Table 4 Accuracy comparison between MTS1 and MTS3

	MTS1	MTS3
Work material	SUS304	SUS304
Work diameter	5mm	5mm
Incision depth	1 μ m	10 μ m
Sending speed	3.3 μ m/rev	5 μ m/rev
Cutting fluid	oil	oil
Surface roughness, Ra	0.26 μ m	0.06 μ m
Surface roughness, Ry	2.74 μ m	0.46 μ m
Roundness, P-V	1.37 μ m	0.05 μ m

Fig.10 Cutting shape by MTS3

3.3.2 テーブル位置決め精度

モーターのエンコーダー分割数を 2048 パルスのものを使用することにより，理論上の位置決め分解能を 0.1 μ m にしている。MTS3 のテーブル位置決め精度の測定を行った。測定方法は 10mm のイン칭送り位置決めに対し，誤差を測定した。繰り返し行った結果は平均誤差 0.42 μ m であった。これは MTS1 における 10mm 送りの誤差が 3 μ m であったことに較べ精度が格段に良くなっている。

3.3.3 表面粗さ，真円度誤差

表 4 に MTS1 とトラクションドライブ連結タイプの MTS3 の表面粗さ，真円度誤差の比較を示す。

これは，主軸およびテーブルの高剛性化，モータートルクの高出力化，テーブル位置決めの高精度化により，難切削材に対する切削精度の向上につながった。

3.3.4 多種類の被削材の加工

図 10 に示す形状の工作物を用いて切削試験を行った。材質は SUS303 (ステンレス)，NAK55 (金型材)，S45C (鉄)，A2011 (アルミニウム)，C3604 (真鍮)，OFC (無酸素銅) である。SUS303 ではカプラ状の形状を切削し，端面にセンタもみつけ後，ドリルによる直径 1mm の穴あけを行った。NAK55 では直径 2mm，アスペクト比 8.5，先端と根元で径の差は 8 μ m 以内のストレートピンを加工した。S45C では M3P0.5 でネジ有効長 7mm の雄ネジを切削した。A2011 では弾丸状の形状を切削した。C3604 にはステンレスと同様のカプラ形状加工に加え，直径 4mm の中ぐり切削を行った。無酸素銅には端面を平面に鏡面状態にした。

NAK55 と S45C の切削には僅かに切削油を滴下させているが，ほとんどの場合はドライ切削で加工できた。S45C の切削面は多少粗いが，他はいずれも良好な仕上がりが見られた。

3.3.5 多様な形状の加工

C3604 (真鍮) を多様な形状に加工し，その精度を測定した。対象とする加工形状は，①中ぐり，②球，③ネジ，④小径穴とした。

Fig.11 Projection photograph of sphere

Fig.12 Projection photograph of screw head

確認内容は以下のとおりである。中ぐり加工ではチャック剛性や芯振れ、刃物の剛性などが十分か確かめる。球の加工では X、Z 軸テーブルの同期性と象限切替時の挙動を確認する。ネジ切削では主軸との同期性を確認し、小径穴加工では主軸の回転精度や振れの影響が無いかどうか調べる。

①中ぐり

工具にはダイヤモンドバイトを使用し、直径 4mm の中ぐり加工を行った。切削時は穴の内側からオイルミストを混入させたエアを噴出させ切粉を排出した。真円度誤差は穴の入口付近、奥側どちらも $0.30\mu\text{m}$ (P-V) であった。軸方向の表面粗さは R_y で $0.563\mu\text{m}$, R_a で $0.077\mu\text{m}$ となった。

②球

工具には角度 30° 、刃先半径 0.05mm 未満の超硬バイトを使用し、半径 4.5mm の球形状の切削を行った。図 11 に切削した球の投影写真を示す。

象限切替え時の挙動確認は、切削物の顕微鏡による観察をしただけであるが、X テーブルの動作方向が切り替わる点における切削面の乱れはなく均一で、どこがその点であるか確認できなかった。直径は、投影機による 3 点計測の算出値では平均 8.973mm 、マイクロメータによる計測では平均 8.997mm が得られた。

③ネジ

工具には超硬バイトを使用し、切削時は少量の切削油を滴下した。3 針法による測定で有効径は手前から奥にかけて直径 $1.716 \sim 1.712\text{mm}$ となり、外径は直径 1.978mm で JIS に定める精度等級の 1 級に入る寸法が得られた。

累積ピッチエラーは 13 山分で $-0.014\mu\text{m}$ であり、山の角度は左右両側均等に $30^\circ 00'$ であった。図 12 に切削したネジ山の投影写真を示す。

④小径穴

工具には直径 0.12mm の超硬ドリルを使用し、切削油を滴下しながらドリルで断続的に送りを行い、深さ 2.4mm の小径穴を切削した。仕上った穴を投影機で測定したところ、穴径は平均で直径 0.131mm となった。穴径が $10\mu\text{m}$ ほど肥大したのは主にドリルの中心が主軸中心に対し偏心していたことが原因と考えられる。その後、直径 0.10mm の穴あけも試みたが数回の試行においていずれもドリルが折れる結果となった。この場合も主たる原因はやはり主軸とドリルとの偏心と考えられる。図 13 は小径穴切削の写真である。

Fig.13 Small diameter hole

4. 結 論

- (1) はがきサイズの旋盤によっても、真鍮などの被削性のよい素材に対しては精密旋盤級の精度が保証でき、高硬度材に対しては剛性とパワー不足は否めないが、ベッドの剛性による切削精度への影響は小さい。
- (2) A4 サイズの旋盤では様々な素材、切削形状に対して、精密旋盤並みの精度を保証できる。
- (3) はがきサイズ、A4 サイズのようなマイクロ旋盤は微小部品の製作、多品種少量生産に十分な効果を期待する。

5. 今後の展開

今回開発した超小型 CNC 精密旋盤はマイクロファクトリー実現に向け、十分な効果が期待できるが、今後は更なる精度、性能の向上、各種難削材への対応のみならず、フライス盤、研削盤への発展にも展開していく。

謝 辞

本研究の一部は、中小企業総合事業団、平成 14 年度課題対応技術革新促進事業課題対応新技術研究開発事業の助成金により行われたことをここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) T.Kitahara, K.Ashida, M.tanaka, Y.Ishikawa, N.Oyama, Y.Nakazawa: Microfactory and Microlathe, Proc. International Workshop on Microfactories, (1998) 1.
- 2) Y.Okazaki, Microfactory, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 68, 4, (2002) 491 (in Japanese).
- 3) M.Yamanaka: Aiming at the Realization of Microfactory, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 72, 10, (2006) 1185 (in Japanese).
- 4) Y.Okazaki, N.Mishima, and K.Ashida: Microfactory-Concepts, History, and Development, Transactions of the ASME, J.Manufacturing Science and Engineering, 126 (2004), 837.
- 5) Y.Okazaki, T.Kitahara: Development and Evaluation of a Micro-Lathe Equipped with Numerical Control, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 67, 11, (2001) 1878 (in Japanese).
- 6) A.Hayashi, S.Ito, D.Iijima, H.Aoyama, M.Yamanaka: マイクロターニングシステム (MTS), 2002 JSPE Spring Meeting, (2002) 127 (in Japanese).
- 7) A.Hayashi, S.Ito, D.Iijima, H.Aoyama, M.Yamanaka: Micro Turning System: A Super Small CNC Precision Lathe for Microfactories, 2003 JSPE Spring Meeting, (2003) 101 (in Japanese).
- 8) M.Yamanaka, K.inoue, A.Hayashi, S.Ito, D.Iijima: Relation Between Mechanical Characteristic nad Cutting Performance of Micro Lathe -Influence of Bed Rigidity-, 2005 JSPE Autumn Meeting, (2005) 1243 (in Japanese).
- 9) A.Hayashi, S.Ito, D.Iijima, H.Aoyama, M.Yamanaka: マイクロターニングシステム 3 (MTS3), 2003 JSPE Spring Meeting, (2003) 636 (in Japanese).
- 10) A.Hayashi, S.Ito, D.Iijima, H.Aoyama, M.Yamanaka: Micro Turning System 3 (MTS3): cutting form and accuracy, 2004 JSPE Spring Meeting, (2004) 143 (in Japanese).
- 11) H.Nakamura, T.Matsuo, K.Matsuzaki, K.Uemura, T.Kabashima: Development of Micro Servo Actuators, 2nd International Workshop on Microfactories, 133