振動切削による超精密円筒加工*

隈部 淳一郎** 平 井 聡*** 早乙女 辰男†

Super Precision Cylindrical Machining by Vibration Cutting

Jun-ichiro KUMABE, Satoshi HIRAI and Tatuo SOUTOME

The purpose of this investigation is an invention of theory and technics on surface roughness ≈ 0 , roundness ≈ 0 and cylindricity ≈ 0 machining. This is analyzed according to the principle of making a precise circle. In this study, the method of precision cylindrical machining can be created by combining the insensitive vibration cutting mechanism, (40 Hz + 30 kHz) superposition superfinishing, the main spindle system with the air bearing and the carriage system with the pneumatic floating slideway. The concrete methods are as follows: In the first process, the work which is chucked on the main spindle with air bearing is machined as acting a continuously and systematically pulsating cutting force by the ultrasonic vibration cutting mechanism. In the following process, the work is finished by the newly developed (40 Hz + 30 kHz) superposition superfinishing device. Key points of the technics are as follows: The one is a contrivance of the carriage system with the pneumatic floating slideway for making high straightness and rigidity. The other is a contrivance for making accurate motions and no reaction of the (40 Hz + 30 kHz) superposition superfinishing device. After all, to actualize machining surface roughness of $0.05\text{--}0.15\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$, roundness of $0.02\text{--}0.1\text{ }\mu\text{m}$, cylindricity of $\approx 0\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}/50\text{ mm}$ are succeeded in work material of aluminum alloy, brass, carbon steel, stainless steel and hardened steel (HRC 35, 39). Therefore, it is found that the super precision cylindrical machining can be realized by means of this new machining process and its lathe.

Key words: air bearing, pneumatic floating slideway, vibration cutting, superposition superfinishing, precision cylindrical machining, surface roughness, roundness, cylindricity

1. ま え が き

本研究は表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 、円筒度 ≈ 0 の超精密円筒を得ることができる加工方法を究明し、新しい旋盤を創作することを目的としている。筆者らはまず最初に、両センタ支持方式によって、センタ穴を振動ラッピングしてセンタ穴の形状精度、面精度を高め、工作物の剛性と回転精度を高めて振動切削を行い、真円度 ≈ 0 加工ができることを明らかにした¹⁾。次に、主軸に空気軸受を用いた旋盤を試作し、チャック方式によって振動切削したあとに重畳超仕上することによって表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 加工ができることを明らかにした²⁾。

この工具刃先を主軸回転中心軸と平行に送ることができれば円筒度 ≈ 0 となるはずである。そこで、往復

台を直進性が高められる非接触形の平面案内機構に改造して、円筒度 ≈ 0 加工に挑戦した。その結果、念願であった表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 、円筒度 ≈ 0 の超精密円筒加工ができるようになったので報告する。

2. 振動切削と重畳超仕上による超精密円筒加工法

バイトによる超精密円筒加工は、主軸回転中心軸の振れを極小化し、切削時における工作物およびバイト刃先を不動化し、バイト刃先を主軸回転中心軸と平行かつ真直ぐに一定の速度で縦送りすることによって実現するはずである。この具体的方法と旋盤について考える。

主軸回転中心軸は振れの極小化およびバイト刃先の不動化については前報²⁾で既に究明し、報告してあるので省略し、ここではバイト刃先を主軸回転中心軸に平行に直進させる縦送りについて考える。

これは、しゅう動面を空気圧や油圧や磁力などで浮かせた非接触形平面案内機構とした往復台を用いるこ

* 原稿受付 昭和61年8月23日、昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和60年10月14日)にて発表

** 正会員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町2753)

*** 学生会員 宇都宮大学大学院

† 正会員 パイロット万年筆(株)(平塚市西八幡1-4-3)

とにより、案内面上の摩擦係数のばらつきやスティックスリップなどによる不連続運動を防ぎ、さらに、空気膜あるいは油膜による平均化効果によって案内面の形状精度の誤差の影響を無視できるようになって、主軸回転中心軸と平行に直進させることができる。

したがって、非接触形の軸受を用いて主軸を支え、非接触形平面案内機構による往復台を用いた旋盤を創作して振動切削することにより超精密円筒加工を実現させるように考えられる。この平面案内装置としては、この振動切削によって切削抵抗が慣用切削の $1/3 \sim 1/30$ 程度に減少するので、周辺機器やメンテナンス等が簡便な剛性の低い空気圧を利用した機器ですむことになる。

そこで、主軸は前報で用いた空気軸受をそのまま用いることにし、往復台を空気圧を利用した平面案内機構によって改造した。そして、この新しい振動切削旋盤によって、振動切削してみたところ切削面は振動切削特有の l_T マーク³⁾ ($l_T = v/f$) による虹面模様を共存させた鏡面になった。その真円度波形はほとんど正円になっているが、図 1 の図 (a) のように、ところどころに $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度の微小突起が生じている。この微小突起 ΔR は、切込みを小さくした軽切削を繰り返しても除去することがどうしてもできない。往復台を非接触形に改造することによって、この微小突起を皆無とすることができるとの期待ははずれた。この微小突起 ΔR は、主軸駆動時のベルトの振動や床の振動などの外乱により、送りや切込みが瞬間的に微小変化して生ずるためであると考えられる。

そこで、この振動切削面上の微小突起のみを図 1 (b) のように砥石を工作物表面に定荷重で押し付けて削除するようにする。このようにすれば、工作物が逃げても砥石はほぼ正円の工作物外周面に密着し、見掛け上図 (b) のように、工具-工作物振動系を考える必要のない状態となって真円度 ≈ 0 加工を実現させる。この加工は、剛性の低い空気軸受および往復台を用いているため、加圧力を小さくしても能率よく仕上加工ができる重畳超仕上げ²⁾ によって行う。重畳超仕上げは図示のように、砥石を低周波振動 (振動数 F , 振幅 A) に超音波振動 (振動数 f , 振幅 a) を重畳して、超仕上げする方法である。この重畳超仕上げにより、振動切削による表面粗さ $R + \Delta R$ の範囲内でその砥粒径で加工しうる一様な表面粗さに仕上加工したところで、超音波振動を停止して低周波振動のみとして、砥石を目づまりさせて迅速に表面粗さ ≈ 0 に鏡面加工する。

以上のように、まず、振動切削して、そのあとに、その表面粗さの範囲内で重畳超仕上げ砥石を精密縦送り

(a) Vibration cutting

(b) ($F, A + f, a$) Superposition superfinishing

Fig. 1 Super precision cylindrical machining

して、重畳超仕上げすることによって、円筒度 ≈ 0 、表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 の超精密円筒加工を実現させうると考えた。

3. 実験装置および方法

この考え方を確かめるために試作した新しい振動切削旋盤を図 2 に示す。主軸台には、前報で利用した空気軸受主軸台を用いた。この主軸は、供給気圧 735 kPa のときに、主軸端から 100 mm の切削点での半径方向のばね定数が $2.84 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、軸方向のばね定数が $13.0 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、半径方向の固有振動数が 417 Hz の特性を持っており、この主軸を、本旋盤から離れた机上に、防振ゴムを介して取り付けられた東芝製 LD 70 型 0.75 kW の DC モータを利用して、つなぎめの厚さ 0.5 mm、幅 25 mm のポリエステル製の平ベルトによって回転させた。

往復台には、(株)不二越製エアスライド ASM-200 E を使用した。この往復台を、新たに考案した図 3 のねじ送り装置によって精密縦送りした。この送り装置について説明する。図において、送りねじ ⑤ に、ナット保持具 ③ に対して相対して位置する 2 個のナット

Fig. 2 Experimental device

Fig. 3 New feed mechanism of pneumatic floating slideway

②を回り止め板で支えてら合させる。このナットは3本のボルト④を設けて、その先端の鋼球を介してナット保持具③に加圧して、ねじ軸方向のがたを取り除いて固定する。そして、ナット保持具③の上面に設けた軸を往復台①に取り付けた板⑥の穴にはめ合わせ、ナット保持具③がその中心軸 $\overline{OO}$ のまわりに自由に回転し、さらに上下動できるようにする。このような装置を考案して、ナット②の端面と送りねじ⑤の中心軸との直角度等のはめ合い精度の誤差が往復台の直

進精度に与える影響を少なくし、しかも送り剛性を高め、往復台①の直進性を高めて精密縦送りができるようにした。

この送りねじを、旋盤から離れた場所に3相誘導電動機と減速機を設置し、つながめのないポリエステル製の平ベルトとプーリを用いて回転させた。このようにして往復台を、供給気圧392 kPaにおいて、送り方向の剛性10.8 N/ μm 、垂直方向の剛性94 N/ μm という高い剛性を持って精密縦送りして円筒度 ≈ 0 加工への挑戦が試みられるようにした。振動切削装置は、前報²⁾で説明したねじり振動子、振幅拡大用ステップホーン、バイトシャックによって構成した

ねじり振動系バイトを使用した。そして、バイト刃先を振動数20.7 kHz、振幅22 μm で超音波振動させた。重量超仕上装置としては、振動系及び装置全体を軽量化して、往復台に作用する反力が小さくなるように特に工夫し、長時間使用しても安定した低周波振動及び超音波振動が得られるように考案した図4に示す新しい重量超仕上装置を用いた。この装置を用いて、超仕上用砥石①を超音波縦振動子④、振幅拡大用ホーン③、砥石シャック②によって、振動数30 kHz、

Fig. 4 Superposition superfinishing device with (40 Hz+30 kHz) longitudinal vibration hand stone

振幅 $8\mu\text{m}$ で超音波振動させた。そして、この超音波振動砥石全体を同一軸線上に配置した可動ブランジャ⑤と低周波振動用ソレノイド⑥によって超音波振動と同方向に、振動数 40 Hz、振幅 0.7 mm で低周波振動させて重畳超仕上するようにした。この新しい装置を用いることによって、往復台を加振せずに往復台の直進性に影響を与えることなく精密縦送りができた。

図 5 の図 (a) に 20 kHz ねじり振動系バイトによる旋削装置、図 (b) に (40 Hz+30 kHz) 重畳超仕上装置を示す。

表 1 に、実験条件と工作物形状及び材質を示す。バイト材質は、振動切削に適材としている超硬 K10 を用いた。切削油剤としてはマシン油とスピンドル油の混合油を用いた。重畳超仕上では細粒砥石を用いても、これを見掛け上大粒径化させて切削能率を向上させることができるので、ここでは、迅速に鏡面仕上することに力点をおいて、細粒の #3 000 砥石を用いた。焼入鋼には、WA, Vit 砥石を用い、その他には、GC, PVA 砥石を用いた。

以上の実験条件で加工した工作物の表面粗さ、真円度、円筒度を定量的に測定し、鏡面の程度はこれを目視して定性的に比較して、吟味、検討した。表面粗さの測定には小坂研究所 SE-3 A 型万能表面形状測定器を用い、真円度の測定には、東京精密ロンコム 2 C 型真円度測定器を用いた。円筒度は、加工中、まず 1/1 000 mm マイクロメータを用いて測定し、工作物両端の直径差がゼロ近くになったところで加工を止め、主軸から工作物を取り外し、上記の真円度測定器で円筒度を測定し、両者の値を比較し、吟味、検討して信頼度の高い値をもって表した。

(a) Ultrasonic vibration cutting device with 20 kHz torsional vibration tool

(b) Superposition superfinishing device with (40 Hz+30 kHz) longitudinal vibration hand stone

Fig. 5 Vibration cutting and superposition superfinishing device

4. 実験結果及び考察

まず、最初にアルミニウム合金と黄銅に対する加工表面と表面粗さ、真円度、円筒度について説明する。振動切削面は振動切削特有の l_T マークが見られる虹面模様となった。これを GC #3 000、幅 6 mm、長さ 6 mm の PVA 砥石を用いて、加圧力 20 kPa として他は

Table 1 Experimental conditions

Vibration cutting conditions		Profile of work ;
Frequency f	20.7 kHz	
Amplitude a	22 μm	
Rotational frequency N	50 rpm	
Feed S	0.03 mm/rev	
Cutting tool	Carbide K 10	
Cutting edge angle	10°	
Minor cutting edge angle	10°	
Depth of cut t	3-10 μm	
Cutting fluid	Machine oil + Spindle oil	
Superposition superfinishing conditions		Material ; Aluminum alloy HB 84 Brass HB 108 Stainless steel HRB 89 Carbon steel HRB 91 Hardened steel HRC 35 Hardened steel HRC 39
Frequency F	40 Hz	
f	30 kHz	
Amplitude A	0.7 mm	
a	8 μm	
Stone	WA # 3 000 RH 20 GC # 3 000 PVA	
Rotational frequency N	190 rpm	
Pressure P	44-98 kPa	
Feed S	0.01 mm/rev	
Cutting fluid	Light oil	

表1の条件で重畳超仕上げすることによって0.05～0.07 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の表面粗さ、0.1 μm の真円度を得ることができた。円筒度として、アルミニウム合金に対してはほぼ0 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ 、黄銅に対しては0.5 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ が得られた。非接触形の案内面としたことによって、アルミニウム合金、黄銅のような軟質金属を0.05～0.07 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 程度の鏡面とし、真円度を0.1 μm に向上させて、円筒度 ≈ 0 の超精密円筒面に加工できることがわかった。

次にステンレス鋼については、振動切削面を、GC # 3 000、幅6 mm、長さ6 mmのPVA砥石を用いて、加圧力61 kPaとして他は表1の条件で重畳超仕上げすることによって、0.05 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の表面粗さ、0.02 μm の真円度が得られた。円筒度としては0.5 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ が得られた。炭素鋼に対しては、GC # 1 000、幅6 mm、長さ4 mmのPVA砥石、加圧力122 kPaとして、0.15 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の表面粗さ、0.1 μm の真円度、0 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ の円筒度が得られた。この実験により、ステンレス鋼や炭素鋼の鉄金属に対しても、アルミニウム合金や黄銅のような軟質金属と同様に、この新しい旋盤による加工システムによって鏡面をした真円度 ≈ 0 、円筒度 ≈ 0 の高精度円筒面に超精密加工できることがわかった。

焼入鋼 HRC 35 と焼入鋼 HRC 39 に対する結果を図6に示して説明する。加工面は図示のような鮮やか

な鏡面となった。その表面粗さは0.07～0.1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 、真円度は0.02～0.03 μm 、円筒度として、焼入鋼 HRC 35 に対しては0.25 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ 、焼入鋼 HRC 39 に対しては、ほぼ0 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ が得られた。空気軸受を使用した主軸に焼入鋼をチャックし、固体接触する従来の旋盤の往復台を利用した場合の真円度は0.1 μm^2 であったが、往復台を非接触形に改造したことにより真円度を0.02～0.03 μm に向上させるとともに、円筒度を0.25 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ 以下の高い精度に加工することに成功した。

以上の実験により、本研究で創作した新しい振動切削旋盤によって、軟質、硬質金属材料にかかわらず、これを表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 、円筒度 ≈ 0 に超精密円筒加工できることを確かめることができた。

5. む す び

- (1) 表面粗さ、真円度及び円筒度をいずれもゼロとする超精密円筒加工方法として、主軸を非接触形の軸受で支持し、往復台しゅう動面を非接触形とした旋盤で振動切削した後、その工作物をワンチャックのまま、重畳超仕上げして、前加工の表面粗さを取り代として、仕上げ加工する加工システムを創案した。
- (2) 主軸は前報²⁾で用いた空気軸受を用いて支持し、往復台を空気圧を利用した非接触形の往復台

Fig. 6 Machined surface and accuracy of hardened steel HRC 35 and hardened steel HRC 39

に改造して、振動切削装置及び重畳超仕上げ装置を取り付けた超精密振動切削旋盤を創作した。

- (3) この旋盤によって、表面粗さを $0.07\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 、真円度を前報における固体接触の往復台によるときよりも向上させて、ほぼゼロとも言える $0.02\sim 0.03\mu\text{m}$ となし得た。そして、円筒度を 50 mm と短い工作物に対してではあるが、軟質、硬質金属材料にかかわらず、 $0\sim 0.5\mu\text{m}$ に加工できることを確かめた。
- (4) 本研究によって、円筒表面を表面粗さ ≈ 0 、真円度 ≈ 0 、円筒度 ≈ 0 の超精密加工する加工方法とその振動切削旋盤の基本的な構想を明らかにする

ことができた。

今後は、この旋盤の実用化研究とセラミックスの超精密円筒加工に対しても、この加工システムが適用されるかどうかを確かめる研究へと発展させる予定である。

参 考 文 献

- 1) 隈部淳一郎、斉藤輝雄、田中幹男：超精密振動切削，精密機械，41，10（1981）1252.
- 2) 隈部淳一郎、蜂須賀 勝：超精密円筒加工，精密機械，48，10（1982）1324.
- 3) 隈部淳一郎：振動切削の基礎と応用，実教出版社（1979）57.