精密振動中ぐり加工に関する研究*

—普通 鋳 鉄 に つ い て—

隈 部 淳 一 郎** 福 田 俊 穂***

Study on Precision Vibrating Boring

—In Gray Cast Iron—

Junichiro KUMABE, Toshiho FUKUDA

The purpose of this study is to obtain better surface roughness, roundness and cylindricity in boring gray cast iron. The experiments are carried out by the insensitive vibrating cutting mechanism. For this vibrating boring a new ultrasonical torsional vibration boring device can be created. This device fixed on the carriage of the lathe enables to bore a hole of 50 mm in minimum diameter and 180 mm in maximum length. This cutting conditions are as follows: The vibration of tool; in the same direction as that of boring, frequency; $f=20$ kHz constant, amplitude; $a=24\mu$ constant, cutting speed; $11\sim 280$ m/min, depth of cut; $0.02\sim 0.10$ mm, critical cutting speed $v_c=2\pi af$; 181 m/min. The main results are as follows: 1) Machined surface roughness as far as cutting speed 60 m/min that is nearly equal $v_c/3$ coincides with the theoretical roughness. 2) Under 0.04 mm in depth of cut, 0.05 mm/rev in feed, 1.35 mm in nose radius, and 22 m/min in cutting speed, surface roughness of 0.3μ is obtained. This more smoothed surface of $0.3\mu H_{\max}$ has made a new record in cutting gray cast iron. 3) Roundness of 5μ , and cylindricity of 1μ per the bore length of 90 mm are obtained. 4) By this study, it is proved that a hole of cylinder liner can be bored precisely by this vibration boring with carbide tool K10.

1. ま え が き

中ぐり加工では、中ぐり棒が細長いために刃先が変動しやすくまたびり現象が発生しやすい。そのために仕上面あらさがあれたり、テーパのついた加工精度になったりすることが多い。したがって、バイトによる粗仕上げ加工のあと、第二次工程として内面研削加工あるいはホーニング加工を行なわねばならないことが多い。しかし、工作物材料や形状によっては研削砥石が適用できない場合もある。また、しゅう動面としてはバイトの送り目をかえて残しておいたほうが潤滑効果がよくあることがあるので、バイトによる中ぐり仕上のみでの精密穴加工が望まれている昨今である。しかるに、普通切削方法におけるいろいろの条件を組合せた研究については、すべてが究明されているところで、これらについてはいまさら吟味、検討の余地はなく、またたとえ未知の点を究明したからといっても多少の進歩と改善がなされるだけで、大幅な向上を期待しようとするとはまったく別な切

削方法に研究方針を切換えねばならないと考えられる。本研究は、その一つとして振動切削の不感性感動切削機構による振動中ぐりで、どの程度の平滑な仕上面あらさと寸法精度がえられるかを究明しようとするものである。

2. 振動切削による中ぐり棒剛性化効果

穴形状によって中ぐり棒の形状が決まる。中ぐり棒は直径に比較してどうしても細長い形状となる。穴加工の場合には、切削抵抗によるたわみ量を小さくするために、自由に直径を大きくして、その剛性を増すようなことが許されない。したがって、中ぐり棒の固有振動数も当然低くなり、顕著なびり現象とまではいかないときでも、バイト刃先には時間的に変動する変位が生じやすい。バイト刃先の送り精度、回転精度をいくらあげても、また中ぐり棒材質を変えたりしても、仕上面あらさおよび寸法精度を左右するこの刃先の時間的変動を皆無にすることができない。

ここに浮かび上がってくるのが、振動切削の不感性感動切削機構による中ぐり棒の剛性化効果である。すなわち、図1に示すように振動数 f 、振幅 a で振動するバイト刃先先端が上昇端にあるとき、工作物回転中心線と一

*原稿受付 昭和46年6月12日。昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和45年10月8日)にて発表。

**正 会 員 理化学研究所(埼玉県和光市広沢 2-1)

***帝国ビストンリング(株)(長野県岡谷市神明町 2-1-13)

致するように中ぐりバイト刃先を取りつけ、振動切削条件 $v < 2\pi af$ の切削速度 v で切削すれば、振動切削機構で中ぐりすることができる。このとき、旋盤主軸にくわえた工作物と細長い中ぐり棒との剛性を比べてみると、工作物側に比べて中ぐり棒の剛性が少ないことは当然考えられる。たとえば、実験に使用した池貝 A25 形旋盤主軸にくわえた、工作物の水平方向角固有振動数 $\omega_n = 2\pi \times 2000 \text{ rad/s}$ 、水平方向ばね常数は 6000 kg/mm で、中ぐり棒の水平方向角固有振動数 $\omega_b = 2\pi \times 800 \text{ rad/s}$ 、水平方向ばね常数 $k = 800 \text{ kg/mm}$ であるため、工作物を剛として考え、中ぐり棒が弾性振動するものとして、図 2 に示す 1 自由度のモデル化した振動系を考えることができる。バイトの角固有振動数 $\omega = 2\pi \times 20000 \text{ Hz}$ とすると、バイトと中ぐり棒との角固有振動数の比は $\omega/\omega_b \gg 1$ となるために、振動切削によるパルス状切削抵抗の背分力成分によって、中ぐりバイトの水平方向の挙動は、振動切削の動的解析第 2 報¹⁾ で明らかにしたように

$$x = \frac{P_t}{k} \cdot \frac{t_c}{T}$$

P_t : 背分力, k : 中ぐり棒の水平方向ばね常数, t_c : 工具の振動 1 周期ごとの正味切削時間, T : 工具の振動周期. したがって

図 1 中ぐり振動切削の振動方向とバイト切れ刃位置

図 2 モデル化した 1 自由度の中ぐりバイト-工作物振動系

$$x = \frac{P_t}{k \cdot \frac{T}{t_c}} \quad (1)$$

この(1)式は中ぐり棒のばね常数 k を T/t_c 倍大きくしたことを示す。すなわち、中ぐり加工では穴形状に制限されてむやみに直径を太くできない中ぐり棒を、あたかもより大きな穴加工に適するようなより太い直径の中ぐり棒で中ぐりしたと同じ水平方向変位とし、しかも所定の寸法に仕上げうることを示す。これを振動切削による中ぐり棒剛性化効果と名づける。 T/t_c は、バイト振動数 f 、振幅 a 、切削速度 v で変わる。 $T/t_c = 1$ は臨界切削速度のときで、 $T/t_c \doteq v_c/v^{(2)}$ で普通は $v_c/v \doteq 3 \sim 10$ 程度にしているから(1)式の分母は $(3 \sim 10)k$ として表わされ、(2)式となる。

$$x = \frac{P_t}{(3 \sim 10)k} \quad (2)$$

いま、振動切削の P_t が慣用切削と同じであるとしても、中ぐり棒刃先端の水平方向の変位量 x は $1/3 \sim 1/10$ に減少する。しかも、時間的変動がないことを示しているから、真円度 0、円筒度 0 という中ぐり加工をもできる可能性を示す。

3. 中ぐり振動切削バイト振動系の構成と実験装置

パルス状の切削抵抗を発生させ、以上のような都合のよい関係とする振動切削を実施させるためには、中ぐり棒をねじり振動させ、その先端に中ぐりバイトを取りつけ、図 1 のようなバイト振動方向としなければならない。ねじり振動駆動方式には、ねじり磁わい振動子を用い直接駆動方式と、中ぐり棒接線方向に相対して縦磁わい振動子を用いる直取りつけて駆動する接線形駆動方式のふたつとがある。ねじり磁わい振動子の最高出力は現在のところ約 0.2 kW 程度である。一方、縦磁わい振動子は、 2 kW 、 4 kW 程度までは容易に製作される。したがって、大出力のねじり振動バイトを構成させようとすると、現在では縦磁わい振動子による接線形駆動方式によらざるをえない。

実験に使用した中ぐり振動切削バイトの基本構成を図 3 によって説明する。中ぐりバイトと中ぐりバイトホルダおよび磁わい振動子によって構成させた。 λ を 1 波長として、両端面を振動腹として中央を振動節とする $\lambda/2$ の長さを 1 ユニットとして、それぞれを振動腹において

図3 中ぐり振動切削バイト振動系の構成

図4 実験装置

結合していった。中ぐりバイト、ねじり振動源は $\lambda/2$ のままとし、中ぐりバイトホルダは、ユニットを3個結合して、加工穴深さに合せて $3 \times \frac{1}{2}\lambda$ の長さとした。中ぐりバイトとバイトホルダの結合はテーパ結合をして、自由に着脱し、再研削ができるようにした。中ぐりバイトホルダとねじり振動源あるいは接線方向に取りつける縦振動源は、銀ろうをもって接着、固定した。振動源にもっとも近い二つの振動節にまたがるスリーブをそう入し、このスリーブを利用して図3のように、旋盤往復台上に中ぐり振動切削バイト振動系を固定した。

振動駆動方式は接線形として、500 W 振動子を2個相対して取り付け、図4の実験装置を組立てた。振動子の巻線は直列にして、公称出力 2 kW 発振機で駆動した。旋盤主軸に工作物をチャックして、回転させ、中ぐりバイトを縦送りして中ぐり実験を行なうことにした。

4. 実験方法

4.1 工作物材質および形状

工作物材質は鋳鉄 FC30 として、形状を図5に示す。

4.2 中ぐりバイト形状

バイト形状を図6に示す。チップ材質は超硬 K10 である。

4.3 振動切削条件

本研究で用いた切削条件をつぎに挙げる。切込み $a=0.02, 0.04, 0.08, 0.10$ mm. 送り $S=0.05, 0.08, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40$ mm/rev. 主軸回転数 $n=32, 63, 85, 130, 108, 320, 450, 560, 800$ r.p.m. 切削速度 $v=11, 22, 29.5, 45, 62, 112, 156, 195, 280$ m/min. ノーズ半径 $R=1.1, 1.35, 3$ mm. 振動数 $f=20$ kHz. 振幅 $a=24 \mu$ 一定. 出力 $W=500$ W 一定, (公称出力 2 kW 発振機を使用)。

5. 実験結果および考察

5.1 仕上面あらさ

(1)式の分母の T/t_c の変化は、 v_c/v の変化にほぼ等しいと考えてよい。すなわち、切削速度 v と $v_c=2\pi af$ の臨界切削速度との比によって、中ぐり棒剛性化効果が変わる。振動数 f 、振幅 a を一定にして切削速度 v を次第に増速していけば、 v_c/v の比が次第に小さくなり、 x は次第に大きくなっていくはずである。また同時に、 v_c/v が小さくなるため、振動切削の動的解析(第1報, 第2

図5 工作物形状

すくい角: 0° , 前逃げ角: 8° , 横逃げ角: 8°
前切れ刃角: 45° , 横切れ刃角 45° , ノーズ半径
1.1, 1.35, 3 mm

図6 中ぐりバイト形状

報)で明らかにした。変位 x を表わす式の第2項の級数項が影響してきて、変位 x に時間的変動が表われてくる。この水平方向の変位 x 、すなわち切込み t 方向の変動は仕上面あらさに影響してくる。したがって、 v の低いところでは理論値と一致する仕上面あらさを示すであろうが、次第に v を大きくしていくと次第に理論値から離れ始め、 $v=v_c$ のときには普通切削状態になり、仕上面あらさがあらくなってしまふことが想像される。

この中ぐり棒剛性化効果が切削速度の関数として表わされている点を、実験によって確かめてみる。そして、中ぐり振動切削でなしうる仕上面あらさの極限を究明する際の切削速度をどの程度にすればよいかを明らかにする。切削条件は、切込み $t=0.02$ mm, 送り $s=0.1$ mm/

rev, 切削速度 $v=11, 22, 29.5, 45, 62, 112, 156, 195, 280$ m/min で行なった。臨界切削速度は 181 m/min である。各切削速度に対する仕上面あらさの実測値および切削表面の性状の顕微鏡写真を図7に示す。この場合の幾何学的仕上面あらさ H_{th} は 1.1μ である。11 m/min から切削速度を次第に増速していき、 $v=62$ m/min 程度までの実測された H_{max} はいずれも H_{th} とほとんど一致するとみなしてよいと考えられる。 $v=100$ m/min 以上になると、 $H_{max}=8.4 \mu$ と H_{th} からはるかに遠ざかるあらい仕上面あらさとなり、仕上面の顕微鏡写真からわかるようにびびり現象は顕著になっている。さらに $v=170$ m/min 以上になると $H_{max}=12 \mu$ と実に H_{th} の12倍近くにもなるあらい仕上面あらさとなってしまう。

(1)式で、 P_t と v との関係は一定として考えたが、切削方向にバイト1サイクルで切削する長さ $l_T=v/f$ の関係から、速度が早くなると l_T が長くなり、切削比も大きくなることから、また他の研究⁸⁾により、 l_T に比例した切削比も大きくなることから、 P_t も大きな値に変化していることが考えられる。切削速度 v を早くするに従い、 k および P_t が変化して中ぐり棒剛性化効果が次第になくなり、 $v=v_c$ になると普通切削同様の仕上面あらさとなることを確認した。この仕上面あらさと切削速度との関係線図は図8に示すようになっている。この結果から、 $v=v_c/3$ 程度までの切削速度が H_{th} と一致する切削速度で $v=60$ m/min 程度までの仕上面あらさ H_{max} は H_{th} とほとんど一致する仕上面性状となることがわかる。

つぎに切込み t の影響について明らかにする。切削条件としては、切削速度 $v=22$ m/min, 送り $s=0.1$ mm/rev とし、切込み t を $0.02 \sim 0.10$ mm まで変えて、他は実験方法で示した振動切削条件により実験した。その結果図9に示す実験値がえられた。 $t=0.08$ mm 程度までは、 H_{th} に一致する $H_{max}=0.9 \mu$ を示す。 $t=0.10$

振動数 20.15 kHz, 振幅 24μ , 送り 0.1 mm/rev,
切込み 0.02 mm, 刃先半径 1.1 mm

図7 切削速度と仕上面あらさおよび切削表面の性状

切削条件: 振動数 20.15 kHz, 振幅 24μ , 送り
0.1 mm/rev, 切込み 0.02 mm, 刃先半径 1.1 mm

図8 切削速度と仕上面あらさとの関係

切削条件: 振動数 20.22 kHz, 振幅 24μ ,
 切削速度 22 m/min, 送り 0.1 mm/rev,
 刃先半径 1.35 mm

図 9 切込みと仕上面あらさとの関係

mm 付近から, 仕上面あらさが次第にあらくなるような傾向を示し, $H_{\max}=1.9 \mu$ と H_{th} の約 2 倍の値を示している. この H_{th} からはずれた原因は出力の不足によるものと考えられる. 振動子を 1 kW あるいは 2 kW 用にとりかえて高出力とすれば, さらに切込みの大きなところでも, $H_{\max}$ と H_{th} を一致させることができるものと考えられる. しかし 500 W の出力でも $t=0.08$ mm 程度までは H_{th} と一致する. すなわち, この程度の切込みまでは中ぐり棒剛性化効果を維持し, 動的変動をより少なくして中ぐり加工しうることが明らかになった.

つぎに送りとの関係について実験した. 切削条件としては, 上記実験で明らかにされた切削速度範囲内の $v=22$ m/min, 切込み $t=0.04$ mm として, 刃先半径 1.35 mm および 3 mm について, 送り s を 0.05~0.40 mm/rev まで変化させて実験した. えられた仕上面あらさの実測値 $H_{\max}$ と切削表面性状を図 10 に示す. 図でわかるように $H_{\max}$ は H_{th} とよく一致している. 顕微鏡写真真上でところどころ大きな凹みがあるのは, 鋳鉄特有のピンホールである. 普通切削では, ピンホールもバイト二番面で工作物表面を摩擦してしまうために最表面層が流動して埋められてしまい, 顕著にみとめられないのが普通であるが, この振動切削ではピンホールがつぶされずに明りょうに確認される. 実測値 $H_{\max}$ と送り s との関係を図示すると図 11 のようになる. $s=0.05$ mm/rev では $H_{\max}$ が実に 0.3μ となり, $H_{th}=0.2 \mu$ に比べてわずか 0.1μ の差で一致する仕上面となっている. また刃先半径 3 mm の場合では送りを 0.1~0.4 mm/rev まで幾何学的あらさに一致しうることがわかった. 刃先半径 1.35 mm のバイトによるあらさ 0.3μ と合わせて考えれば, 0.3μ から 6.8μ の広範囲にわたって計算した幾何学的あらさどうりの仕上面あらさを中ぐり加工で実現しうることが明らかになった. そして, 虹面模様の中ぐり面となることも確かめた. この鋳鉄の仕上面あら

振動数 20.22 kHz, 振幅 24μ , 切削速度 22 m/min,
 切込み 0.04 mm, 刃先半径 1.35 mm

図 10 送りと仕上面あらさ, 切削表面の性状との関係

切削条件: 振動数 20.22 kHz, 振幅 24μ ,
 切削速度 22 m/min, 切込み 0.04 mm,
 刃先半径 1.35, 3.0 mm

図 11 刃先半径 1.35 mm および 3 mm のバイトによる送りと仕上面あらさとの関係

さが 0.3μ までえられたことは, 先に報告した端面切削⁴⁾では $H_{\max}=0.5 \mu$ とした限界を更新したことにな

図 12 工作物取付方法によって変わる加工精度

る。このときの仕上面性状を示す顕微鏡写真から、計算した $l_T = v/f = 18 \mu$ が規則的に分布していることも確認した。これは中ぐり加工の際にも規則的なパルス状切削抵抗が作用したことを実証する。バイト刃先は振動切削による中ぐり棒剛性化効果により、時間的変動なく縦送りされ、中ぐり振動切削加工したことを証明するものである。

5.2 寸法精度

どの程度の円筒度、真円度がえられるかを明らかにする。 $v=22 \text{ m/min}$, $t=0.04 \text{ mm}$, $s=0.1 \text{ mm/rev}$, $f=20.2 \text{ kHz}$, $a=24 \mu$, 刃先半径 $R=1.35 \text{ mm}$ の切削条件で実験した。工作物の外周を四爪チャックでくわえて、中ぐり加工後、1/1000 mm ダイヤルインジケータを往復台上におき、往復台を 90 mm 移動させて、水平方向に円筒度を測定した結果、針の振れが 1 目盛以内となった。つぎに主軸を回転してインジケータの振れを読んだところ、これも 1 目盛以内となっていることがわかった。このことは使用した旋盤のベッド、往復台、主軸の回転によって創成される、幾何学的円筒内面どうりの穴面を実現したことを意味する。つぎにチャックからはずして、円周を 20° おきに 18 等分し、深さ 100 mm の穴の D_1 , D_2 , D_3 の 3 カ所で、シリンダゲージでその直径

を測定した。標準ゲージの直径で画いた真円に対して、シリンダゲージの読みの差を 2 等分して、これを斜眼方眼紙上に点記していったところ、図 12 の左列に示す結果となった。図からわかるように、極端にひずんだ形状に変形してしまうことがわかった。これは明らかにチャック力による影響である。切削速度が遅くてよいので、遠心力の影響を考慮する必要がなく、切削抵抗も小さくなるためあらかじめ軽くチャックしてはいたが、まだそのわずかな半径方向の締付力も無視できないことがわかった。そこでこの影響を除くために、面板に工作物を取りつける方法を用いた。図 12 中央に示すように、左図に比べれば変形量は穴全面に一樣になり、その絶対値ははるかに小さくはなった。しかし、まだ取付接触面の影響が入っているように考えられるので、面板の端面および工作物の取付側端面の平面度を修正した結果、図 12 の右列に示すような、 5μ の真円度とするところまでできた。工作物肉厚を厚くし、取りつけ状態、接触面状態を修正することによって、この 5μ はさらに更新され、より真円に近い穴がえられるものとする。

個々の穴直径の直円からの狂いの大きさがわかったが、これらの穴円周上の各点が軸方向にどのような関係で立体的に結ばれて、穴を形成しているかを調べ

る。シリンダライナの円筒度についての JIS D 3103 に準じて、シリンダゲージを軸方向にそう入していき、その針の振れの最大値、最小値を求めた。その結果は 90 mm の間で 6μ の円筒度となり、主軸側直径が大きく、切削開始端面の穴径が小さい穴形状となっていることがわかった。一方、旋盤の主軸中心線と、往復台の縦方向の運動との水平面内平行度を調べると、300 mm について 8μ となって 90 mm につき 4.8μ の割合で、主軸側の穴径が大きくなる状態となっていた。このことから旋盤 8 本のレベリングボルトで、ベッドのレベルを調整して修正してやれば、よりまっすぐな穴面とすることができるように考えられる。そこで、調整、実験を繰返した結果、穴長さ 90 mm の間で、直径差 1μ の円筒度をうることができた。すなわち、真円度 5μ を示す軸直角断面を軸方向にその輪郭を重ね合わせて、そのねじれひずみを 1μ 程度とするとまっすぐな穴形状を加工することができた。

6. む す び

本研究で明らかにされた点を要約するとつぎのようになる。

- 1) 振動切削による中ぐり棒剛性化効果を明らかにした。
- 2) 長さ 100 mm の鋳鉄材中ぐり加工用のねじり振動による、中ぐり振動切削バイトおよび装置を明らかにすることができた。駆動源から 310 mm 離れた点のバイト刃先に、通常は誘起されやすい曲げ振動や

縦振動をまったく発生させないで、ねじり振動のみの振動姿態とすることに成功した。

- 3) 臨界切削速度 $v_c=181$ m/min に対して、60 m/min 程度まで $H_{\max}$ は H_{th} と一致する。
- 4) 鋳鉄の旋盤仕上面あらさのいままでの限界であった $H_{\max}=0.5\mu$ を更新して、 $H_{\max}=0.3\mu$ の仕上面あらさを確認した。
- 5) 送り $s=0.4$ mm/rev 程度の高送りまで実験して、 $H_{\max}=0.3\sim 6.8\mu$ の広範囲にわたって、計算した幾何学的仕上面あらさと一致する仕上面あらさを、中ぐり加工で実現することができた。
- 6) 普通旋盤を中ぐり振動切削用に併用して、外径 125 mm、内径 110 mm、深さ 100 mm の鋳鉄材工作物に対して、真円度 (直径法) 5μ 、旋盤ベッドを調整することによって円筒度 90 mm の間で 1μ の精度の中ぐり加工がなされた。

本研究では 100 mm までを実験したが、さらに深さの深い場合にはどうなるかなどの関心が、本研究の終了とともに深まってきた。その他、鋳鉄以外の材質に対して今後研究を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 隈部淳一郎, 谷口 修: 振動切削の動的解析 (第 2 報), 精密機械, **36**, 8 (1970-8).
- 2), 3) 隈部淳一郎: 超音波振動切削に関する研究 (第 3 報), 日本機械学会論文集, **27**, 181 (1961-9).
- 4) 隈部淳一郎, 福田俊穂: 旋削仕上面あらさ向上に関する研究 (普通鋳鉄について), 精密機械, **36**, 6 (1970-6).