研 究

高速度工具鋼の振動切削*

隈 部 淳 一 郎**

Vibrating-cutting of High Speed Tool Steel

Junichiro KUMABE

In the previous report, it is found that the precision cutting of the quenched steel (S55C, H_{RC} 57) can be done, by using the vibrating cemented carbide tool or diamond tool. In order to find out how hard a material can be subjected to precision cutting by means of this vibration cutting by giving the pulsating cutting force a short cycle, this study is carried out. In this report, the results obtained by firstly carrying out the precision cutting of high speed tool steel SKH 2(H_{RC} 64), SKH 3(H_{RC} 64.5) and SKH 4 A(H_{RC} 65) are discussed. Cutting conditions for face cutting; longitudinally vibrated tool (frequency 21.7 kHz, amplitude 15 μ m) is used, cutting speed 30 m/min, feed 0.05–0.12 mm/rev, cutting depth 0.01–0.06 mm, the mixture of machine oil and spindle oil, cemented carbide tool K 03, K 10. Main cutting conditions for shaping: twist vibrating tool (frequency 29 kHz, amplitude 8 μ m) is used, average cutting speed 8 m/min. Cutting resistance, surface roughness, the type of chip, l_T ($=v/f$, v : cutting speed, f : frequency) pattern on the machined surface, the degree of the damage given to the cutting tool and accuracy etc., are examined. By this study, it is proved that the high speed tool steel can be precisely machined with carbide tool removing the flow type chip by means of vibration cutting.

1. ま え が き

筆者が振動切削(研究の初期では超音波振動切削ともいった)を創始した当時は、アルミニウムとその合金、銅とその合金、あるいは低炭素鋼などの軟質金属を対象としていたが、今日では、砥石を用いるのが常識である H_{RC} 57 程度の焼入鋼 (S 55C) でさえも精密加工できることが明らかになった¹⁾。そして、切削工具で精密加工できるかたさの限界が H_{RC} 57 に更新されてきた。こうなってくると一体どの程度のかたさまで切削工具で精密加工できるのだろうかという点に強い関心が寄せられてくる。そこでその限界の究明に挑戦していくことにした。本報は超硬バイトを用い、動特性の異なる実験装置による振動正面削り、振動形削り実験を行い、高速度工具鋼 SKH 2(H_{RC} 64), SKH 3(H_{RC} 64.5), SKH 4 A(H_{RC} 65) の精密切削に挑戦した結果について報告する。

2. 高速度工具鋼の精密切削の可能性の解析

正面削りと形削りのバイト-工作物の振動系をモデル化して図 1 のような 1 自由度として考える。この系に作用する背分力 P_t を慣用切削の直流成分に交流成分が重

疊した波形とせず、図示のような作用時間 t_c 、周期 T のパルス状とし、その振動数 f と工作物の変位 x 方向の振動数 f_n との関係を $f \gg f_n$ とすると、工作物の変位 x は²⁾、

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

k は背分力方向の工作物のばね定数である。すなわち、工作物の変位は時間的変動のない静的変位のみとすることが出来る。したがって、工具逃げ面が背分力方向に不

(a) 正面削り

(b) 形削り

図 1 モデル化したバイト-工作物振動系

* 原稿受付 昭和 49 年 10 月 7 日。昭和 47 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 47 年 4 月 7 日)にて発表。

** 正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町 2753)

(a) 振動切削用に改造した池貝 A 25 型旋盤

(b) 振動切削用に改造した小形形削盤
図 2 実験装置

規則に異常に衝撃されることがなくなり、刃先の異常損傷を防ぐことができるようになる。

このパルス状の切削力は、バイトを切削方向に振動数 f 、振幅 a の正弦波形で振動させ、 $v < 2\pi af$ の切削速度とすることによって実現する。一方、このときの切削温度も切削抵抗の波形と同じようにパルス状になるわけで、パルス状の力をバイト振動 1 周期で平均したのが平均切削力として考えられるのと同様に、平均刃先温度、平均切りくず温度はパルス状の切削温度を平均した値となり、室温とほとんど同じ程度の温度となっているものと考えられる。このことは焼入鋼の切りくずに酸化変色のない現象によって実証されている。

したがって、室温において工作物のかたさよりもわずかでもかたさのかたい切削工具を使用して振動切削すれば、従来砥石を使用するのが常識であった工作物の精密切削ができるように考えられる。すなわち、高速度工具鋼でさえも超硬工具を使用して普通の炭素鋼と同様に直視できる大きさの連続した流れ型切りくずを生成して精密切削することができるはずであるという推理がなされてくる。

図 3 正面削り用バイト形状

図 4
形削り用バイト振動系と刃先形状

3. 実験方法および実験装置

正面旋盤と普通旋盤による正面削りと、形削盤による形削りとによって実験する。切削動力および切削抵抗の測定を、120 VLS 型振動切削正面旋盤⁹⁾ によって行い、切りくず形状、切削面の性状、仕上面あらさの測定および加工精度についての実験を、振動切削用に改造した図 2 (a) に示す池貝 A 25 型旋盤によって行う。形削りは図 2 (b) に示す最大ストローク 250 mm の小形の形削盤を用いて行う。正面削りに使用したバイト形状を図 3 に示す。形削りに使用したねじり振動バイト振動系と刃先形状を図 4 に示す。実験に使用した主な切削条件を表 1

表1 切削条件

条件	正面削り	形削り
バイト材質	K 03(R_A 92), K 10(R_A 91.5)	K 10(R_A 91.5)
バイト形状	図4参照 $R=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ (mm)	図5参照
バイト振動数	$f=21.7$ kHz	$f=21.7$ kHz
バイト振幅	$a=22$ μ m	$a=8$ μ m
振動子形状	2 kW 縦振動 ニッケル磁わい振動子	25 W ねじり振動 フェライト振動子
使用発振機形式	最大出力 2 kW 真空管方式	最大出力 0.2 kW トランジスタ方式
送り	$s=0.05\sim0.12$ mm/rev	(みぞ入れ実験)
切込み	$t=0.01\sim0.06$ mm	$t=0.1$ mm
回転数	220 rpm	200 ストローク/min
工作物形状	40×10×10(mm) (直径×穴径×厚さ)	13×13×100(mm) (横×縦×長さ)
工作物の種類と かたさ	SKH 2(H_{RC} 64) SKH 3(H_{RC} 64.5) SKH 4 A(H_{RC} 65)	SKH 4 A(H_{RC} 65)

にまとめて示す。

まず、研削加工と比較する意味で切削動力を測定し、その測定値から切削抵抗を算出して各材料間で比較検討する。次に、仕上面あらさを測定し、幾何学的あらさと一致するかどうかを確かめ、構成刃先と工具刃先の損傷の程度を幾何学的あらさと狂いの程度から調べる。仕上面の顕微鏡写真による観測を行い、 $l_T(=v/f, v$; 切削速度, f ; 振動数)模様の分布状態を比較し、均一な振動切削機構によって切りくずが生成されたかどうかを調べる。切りくずを各切削条件ごとに採取し、高速度工具鋼の切りくずはどんな形状になるのかを明らかにし、切りくずの変色状態を観測して切削温度発生の有無を確認する。加工精度に関する実験として、その仕上量を実測してバイト刃先の損耗や逃げ量の程度を明らかにする。以上を正面削り実験によって行う。

形削り実験では以上の結果を総括する意味において、図4に示したようなわずかな切削抵抗によってでも損傷しやすいように刃先先端を針状に成形したバイトによるみぞ入れ実験を試みる。切削後のVみぞ加工精度で振動切削による高速度工具鋼の精密切削加工の可否を総合判定する。

4. 実験結果および考察

4.1 切削抵抗

六極の200 W 三相誘導電動機を用いて、平ベルトで主軸を直接回転させるようにしてある120 VLS型振動切削用旋盤の無負荷時の動力は90 Wであった。切削条件を図5に示すようにしたときの所要動力は90.5~92 Wの範囲となった。全所要動力は切込み0.05 mm, 送り

(a) 切削動力と送りとの関係

(b) 切削抵抗と送りとの関係

切削条件

振動数: 21.7 kHz, 振幅: 22 μ m, 主軸回転数: 220 rpm, 工作物直径: 40 mm, 切込み: 0.05 mm, バイト材質: 超硬 K 03, ノーズ半径: 0.5 mm, 切削油剤: 鉱物油 (マシン油+スピンドル油)

図5 正面削りにおける切削動力と切削抵抗

0.08 mm/rev でも、100 W の電球 1 個程度の動力ですむことがわかる。無負荷時の 90 W を差し引いた切削動力と送りとの関係は図5(a)のようになる。SKH 2, SKH 3, SKH 4 A と材種が変わっても○●×印が示すようにほとんど同じ切削動力となっている。この切削動力から主分力を概算すると図5(b)のようになる。この値は t_c 時間のパルス状に作用する主分力をバイトの振動1周期 T で平均した値である。すなわち、主分力にうちかって工作物を回転させるに要する平均の力と動力を示すものである。この実験で高速度工具鋼を切削するときでもその動力と切削力はわずかなものであることがわかる。

4.2 仕上面あらさ

ノーズ半径との関係は図6(a)のようになる。図は、SKH 3 に対して K 10 超硬バイトを用いて切削したときの結果を示す。

図中の曲線は $R_{th} \approx s^2/8R$ の計算式によって得られる幾何学的あらさを示す。●印は、図中に示した仕上面あらさの実測波形から求めた R_{max} の実測値を示す。この図からノーズ半径を 0.5~2.0 mm まで変えても計算値とほとんど一致すると考えられる仕上面あらさとなることがわかる。そして、0.5 μ m R_{max} という平滑な仕上面が振動切削によって得られることがわかる。この結果から振動切削中に刃先の変形や切込みの変動、送りの変動がなかったことがわかる。

切削条件

振動数: 21.6 kHz, 振幅: 22 μm , 主軸回転数: 220 rpm, 工作物材質: SKH 3, 切込み: 0.02 mm, 送り 0.07 mm/rev, パイト材質: 超硬 K 10, 切削油剤: 鉱物油 (マシン油+スピンドル油)

(a) 刃先ノーズ半径と仕上面あらさとの関係

切削条件

振動数: 21.6 kHz, 振幅: 22 μm , 主軸回転数: 220 rpm, 工作物材質: SKH 2, 切込み: 0.02 mm, 刃先ノーズ半径: 0.5 mm, パイト材質: 超硬 K 03, 切削油剤: 鉱物油 (マシン油+スピンドル油)

(b) 送りと仕上面あらさとの関係

切削条件

振動数: 21.7 kHz, 振幅: 22 μm , 主軸回転数: 220 rpm, 工作物材質: SKH 4 A, 送り: 0.07 mm/rev, 刃先ノーズ半径: 0.5 mm, パイト材質: 超硬 K 03, 切削油剤: 鉱物油 (マシン油+スピンドル油)

(c) 切込みと仕上面あらさとの関係

図 6 刃先ノーズ半径, 送り, 切込みと仕上面あらさとの関係

送り s との関係は図 (b) のようになる。図は, SKH 2 に対して K 03 超硬パイトを用いたときの仕上面あらさを示す。計算値とほぼ一致する仕上面あらさとなっている。従来の研削加工では加工後測定してみなければその仕上面あらさを知ることができなかったが, この振動切削では高速度工具鋼の仕上面あらさを計算で求められる。

切込みを変えた場合を図(c)に示す。図は SKH 4 A に対して, K 03 超硬パイトを用いたときの仕上面あらさを示す。計算式が示すように仕上面あらさには切込みは関係しないことがわかる。仕上面あらさの形状は切込みに関係なく大体一定していることが示されている。以上の

$r=0.5\text{mm}$

$r=1.0\text{mm}$

$r=1.5\text{mm}$

$r=2.0\text{mm}$

図 6 (a) の切削条件のときの切片面

図 7 切片面の金属顕微鏡写真

実験での仕上面あらさがいずれも計算値とほとんど一致する幾何学的あらさとなっていることから異常な刃先損傷が生じていないことがわかる。

4.3 仕上面の顕微鏡写真

仕上面の顕微鏡写真の一例を図 7 に示す。図 6 (a) のときの各試験片を真上から顕微鏡で観測した状態で

図6(a)の切削条件での切りくず

図6(b)の切削条件での切りくず

図8 切りくず形状

る。図で縦方向に等間隔に分布する縦線が送り 0.07 mm/rev の送り線で、これらの相隣れる縦線を結ぶ横線の間隔が $l_T (=v/f)$ で、この l_T が無数に分布して、ちょうど畳表あるいはあみだ模様の l_T 模様を呈する。高速度工具鋼の仕上面にも鮮やかな虹面を確認した。

4.4 切りくず

切削条件

振動数: 21.7 kHz , 振幅: $22 \mu\text{m}$, 主軸回転数: 115 rpm ,
送り: 0.07 mm/rev , バイト材質: 超硬 K03, ノーズ半径:
1.5 mm, 工作物: 高速度鋼 SKH2

測定方法

設定切込み $e \text{ (mm)}$	実測値 (mm)
0.008	0.007
0.015	0.020
0.020	0.020
0.030	0.025
0.040	0.036
0.060	0.056

図9 正面削り精度

図6(a), (b)の切削条件のときの切りくずを図8に示す。それぞれ鮮やかな流れ型切りくずとなっている。酸化変色をしていない。HRC 57の焼入鋼、普通炭素鋼と同じような切りくず形状、色彩を呈する。切りくずにはばりがない。この研究で、高速度工具鋼を切削したときでも切りくずは図示のような流れ型切りくずとなることが明らかになった。そして、この酸化変色のない切りくずを生成した事実は切削中の切削温度が上昇しなかったことを実証する。

4.5 加工精度

両端面を平面研削仕上して、平行度0に近く仕上げた工作物を旋盤主軸にチャックして切削する側端面の軸方向の振れを $2 \mu\text{m}$ 以内におさえ、その端面全面を振動切削して切込みの基準面とする。この基準面から所定の切

図10 SKH 4 A (完成バイト) 材を形削りしたときの
みぞの拡大写真

込みを与え、図9に示す切削条件で工作物外周から横送りを与えて切削し、適当な位置で送りを止めてチャックから取り外し、工作物を石定盤上におき、1/1 000 mm 感度のダイヤルインジケータで実際の切込み量を図示のようにして測定したところ、図9のような結果が得られた。設定切込み量と実際の切込み量との差は $5\mu\text{m}$ 以内であることがわかる。以上のようにして振動切削機構によって $H_{RC} 65$ の高速度工具鋼材の精密旋削加工ができるとしてよいと考える結果が得られた。

4.6 形削り

以上の結果をさらに図4に示した要領による形削り実験によって確かめる。SKH 4 A の完成バイトを形削りテーブル上のバイスに取付け、その長手方向表面中央部に図示の振動バイト刃先を用いてみぞ入れ実験を行う。わずかな切削抵抗で折損する形状にわざわざ針状に成形したバイトが損傷することなく、発熱のない流れ型の切りくずを生成して、所定寸法のみぞが加工できるかどうかを実験してみる。いま切込み 0.1mm を与えるとみぞ幅が 0.2mm になるはずである。図10は切削したみぞの拡大写真図である。みぞ幅はたしかに 0.2mm となっている。切りくずは大きくカールした流れ型で、みぞ面には I_T 模様が確認される。鮮やかに切削したことを裏づける形削り面となっている。慣用切削ではこのような現象をみることはできない。

切削方法を変え、工作機械の構造とその動特性を変えても、バイト切れ刃を切削前から別途に設けた振動源で

強制振動させパルス状の切削力が作用するようにして振動切削機構となるようにすれば、K 10 の超硬バイトで $H_{RC} 65$ という高速度工具鋼の精密切削ができることが本研究によって究明できた。

5. む す び

本研究をまとめると次のようになる。

- (1) 高速度工具鋼SKH 4 A のもつ $H_{RC} 65$ までのかたさの工作物が超硬工具 K 03, K 10 を用いた振動切削によって精密切削できる。
- (2) 高速度工具鋼でも切削工具によって酸化変色しない、直視できる流れ型切りくずを生成しうることを発見した。高速度工具鋼を精密切削したときの切りくずとはどんなものであるかを始めて知ることができた。
- (3) 切削直後からチッピングしてしまって切削実験不可能になるだろうとも思ってみたが、その予想はくつがえされて本論で述べたような精密切削ができた。1本のバイトでこの精密切削がどの程度まで維持できるのかが問題になってくる。本研究では同一切削条件での実験個数を5個とした。同一バイトを約20個程度の試験片に使用した場合もある。実用に供しうる工具寿命があると考え、この振動切削では多少刃先がチッピングしても形状に大差のない切りくずを生成することができる。寿命の判定基準をどこに設けるかを明確にして工具寿命を定量的に究明したいと考える。

なお、次報では $R_A 90$ 以上の超硬合金の精密切削の挑戦を試みる予定である。

文 献

- 1) 隈部淳一郎, 大門 守, 谷口 修: 焼入鋼の切削加工に関する研究, 精密機械, 36, 9 (1970) 595.
- 2) 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) 532.
- 3) 隈部淳一郎: 機械工作法 表面加工, 下巻, 実教出版 (1973) 530.