振動を利用した外周刃切断の加工特性に関する研究*

石川憲一** 諏訪部 仁** 梶田一也*** 畛田道雄†

A Study on Vibration Cutting Characteristics Using OD-blade

Ken-ichi ISHIKAWA, Hitoshi SUWABE, Kazuya MASUDA and Michio UNEDA

The purpose of this study is to develop a new method in order to improve efficiency and accuracy on cutting using OD-blade for hard and brittle materials, such as various ceramics, single-crystal silicon, etc. This new method is the cutting technique applying mechanical vibration. In this paper, the findings of this investigation on the vibration cutting applying low frequency vibration for a workpiece at parallel direction to the cutting, are reported. The main results obtained are as follows. When the vibration velocity amplitude is larger than the cutting speed (feed speed of the workpiece), grinding force in the vibration cutting is less than the one in the conventional cutting. The tool life in the vibration cutting is improved to compare with the conventional method, and further processing accuracy is improved. With this study, it is proved that this vibration cutting has the possibility of effective cutting method using OD-blade.

Key words: grinding, vibration, OD-blade, diamond grain, vibration cutting

1. 緒 言

現在、硬ぜい材料の加工技術は一般に力学的エネルギーを利用する機械的加工法が主流であり、振動を利用した加工法も多く報告されている¹⁾²⁾。その機械的加工法の中でも外周刃を用いた砥粒加工法が最も一般的な精密研削切断法である³⁾。外周刃による硬ぜい材料の切断加工ではカーフスを最小限にするために砥粒層および支持する台金をできる限り薄くする必要があるが、台金が薄くなれば薄くなるほどブレードの側面方向への剛性は低下し、砥石の偏摩耗を生じるようになる。そして、この偏摩耗したブレードで加工を行うと切断加工中にブレードのたわみを生じ、工作物の加工精度の劣化は免れない。そのため偏摩耗ブレードを修正するためのドレッシング⁴⁾やツルニング⁵⁾技術等が報告されている。

本研究では、従来の外周刃切断方式に比して高能率・高精度を実現させるための新しい加工技術の開発を目的としている。そこで、図1に示すように加工中の工作物に対して低周波領域の振動を切断送り方向と同方向に付加して加工を行う加工技術を創案した。本論文では、この振動の効果を利用して切断加工を行い、加工特性や加工精度の観点から検討した結果を報告する。また、偏摩耗ブレードを用いた場合の高精度化に関しても実験的に検討し、振動外周刃切断の加工特性について言及するものである。なお、切断送り方向と垂直方向に振動を作用させる場合については次報で扱う予定である。

2. 実験装置および方法

図2に切断加工に使用した実験装置の概略図を示すが、本装置はスピンドルに空気静圧軸受を使用したスライディングマシンである。本論文における無振動切断とは通常の切断方式のことを意味する。切断加工の際には加工台上に八角リング式動力計を取り付け、その上に固定された工作物を実験設定条件で回転する外周刃ブレードによって湿式で切断加工を行う。その際加

工部で生じる垂直方向荷重と水平方向荷重の平均値を測定することにより加工特性を評価する。一方、振動切断では図3に示す加振装置を用いて工作物に切断送り方向と同方向に低周波振

Fig. 1 Outline of vibration cutting using OD-blade

① Compressor	⑧ OD-blade
② Regulator of oil temperature	⑨ Workpiece
③ Waterproof cover	⑩ Controller
④ Vibration exciter	⑪ Tank of working fluid
⑤ Handle of Z axis	⑫ Pump
⑥ Nozzle of working fluid	⑬ Handle of Y axis
⑦ Air spindle	⑭ Air dryer

Fig. 2 Outline of experimental apparatus

* 原稿受付 平成7年6月28日

** 正 会 員 金沢工業大学 (石川県野々市町扇が丘7-1)

*** 正 会 員 金沢工業大学大学院 (現, (株)不二越; 富山市石金20)

† 学生会員 金沢工業大学大学院

Fig. 3 Outline of vibration exciter

Table 1 Experimental conditions

Workpiece and size	Soda glass, 50×60×10 mm
OD-blade size and type	φ 125×1 mm, SD # 200 Metalbond
Bleed speed V	1 963 m/min
Depth of cut c	8.0, 11.0 mm
Feed speed $\dot{X}$	20-80 mm/min
Amplitude a	0-0.6 mm
Frequency f	0-28 Hz
Grinding fluid	Water soluble coolant (50 : 1)

域の振動を付加して切断加工を行う。本加振装置の構造はスピードコントロールモータの回転運動をタイミングベルトを介して偏心機構部に伝達する。ここで、その回転運動を往復運動に変化させ、これを加工台に伝達することにより近似的な調和振動として加振させる。振動数はスピードコントロールモータの回転数を調整することにより0～28 Hzの間で任意に設定できる。振幅は偏心機構部の偏心量を調整することにより0.05～1.0 mmの間で任意に設定できる。また、加工台の振動によって生じる慣性力が機械全体に伝わり、工作精度の劣化を避けるためにカウンタバランスを設けてある。加工台での振動が位相反転部を介して、加工台および動力計と同質量のカウンタバランスに伝達されることにより、加工台の振動による慣性力を加振装置内でキャンセルできるようになっている。また、主な実験条件を表1に示す。

3. 切断荷重の挙動

図4に振動数と切断荷重の関係を示す。同図は送り速度を20～80 mm/minと変化した場合における垂直方向荷重の挙動を示している。実験結果より、各々の送り速度における切断荷重は無振動切断時より振動切断時の方が減少していることが分かる。

そこで、そのような現象を明らかにするために振動切断におけるブレードと工作物との挙動について考察すると次のようになる。振動切断における切断加工中のブレードと工作物の運動は図5に示すように、振動1周期当たりで切断時と非切断時を生じる。ここで、工作物の振動変位を x とし、図5において切断終了時刻、すなわち工作物の振動速度 $\dot{x}$ とテーブル送り速度 $\dot{X}$ との合成速度が0となる時刻を t_1 とすると、 t_1 に関して次式を得ることができる。

$$\dot{X} + a\omega \cos \omega t_1 = 0 \quad (1)$$

ここで、速度比 V を $V = a\omega / \dot{X}$ と表すと、次式を得る。

$$t_1 = \frac{\pi - \cos^{-1} \frac{1}{V}}{\omega} \quad (2)$$

また t_y を切断開始時刻とすると、時刻 t_1 から時刻 $2\pi/\omega + t_y$

Fig. 4 Relationship between frequency and normal grinding force

Fig. 5 Model of displacement and velocity in one cycle⁶⁾

までの振動変位の差がブレード移動距離に等しいことより、

$$a \sin \omega t_1 - a \sin \left\{ \omega \left(\frac{2\pi}{\omega} + t_y \right) \right\} = \dot{X} \left(\frac{2\pi}{\omega} + t_y - t_1 \right) \quad (3)$$

となる。式(2)を式(3)に代入することにより、

$$\sin \omega t_y = -\omega \frac{t_y}{V} + \sin \left(\cos^{-1} \frac{1}{V} \right) - \frac{\pi + \cos^{-1} \frac{1}{V}}{V} \quad (4)$$

を得る。式(4)の超越方程式を解くことにより t_y が得られる。従って、振動1周期当たりの切断時間は時刻 $2\pi/\omega + t_y \sim 2\pi/\omega + t_1$ であり、非切断時間は時刻 $t_1 \sim 2\pi/\omega + t_y$ となる。

これより振動切断時においては連続切断現象を生じることが分かる。その結果、非切断時にはブレードと工作物の相互間には分離現象が生じるために加工部への加工液の流入が促進されると共に、冷却作用が向上することからブレード表面の砥粒の熱的摩耗は抑制される。また、ブレード後方からの切りくず排除が促進され、さらに振動の極値を過ぎて工作物が切込み方向に移動する工程、すなわち、図5においての非切断時間

Fig. 6 Relationship between frequency and contact ratio

Fig. 7 Change in grinding force when cutting repeats 150 times

中の時刻 $(3/2)\pi/\omega \sim 2\pi/\omega + t_f$ では前方からも排出されるようになる。そのため切りくず排除を十分に行うことができるようになり、ブレード表面砥粒の目づまりを抑制することが可能である。また、振動切断時には外周刃ブレードは短時間で工作物に切込みを行うようになる。ここで振動1周期と切断時間との割合を接触率(=切断時間/振動1周期 $\times 100$ (%))とすると振動数と接触率の関係は図6ようになる。同図より振動切断時における接触率は振動1周期に対し、例えば $\dot{X}=40$ mm/min, $a=0.4$ mm, $f=20$ Hz の場合においては約8.9%程度であることが分かる。このように振動切断では短時間内で切断加工を行うことから、ブレード外周面には無振動切断時よりも大きな衝撃力がパルス的に連続して作用し、切断時に砥粒に付着した切りくずを除去させることが可能となる。また、その衝撃力により自生発刃現象が生ずる。従って、振動切断では以上のような効果をもたらすことが可能であるため、無振動切断時に比して研削性能は向上し、切断荷重は減少するものと考えられる。

図7に振動切断時の切断回数と切断荷重の関係を示す。同図は150回連続して切断加工を行ったときの垂直方向荷重と水平方向荷重の挙動をそれぞれ示している。無振動切断の場合、切断回数を重ねると砥粒の摩滅、脱落および目づまりが切断回数の増加と共に生じやすくなるため、切断荷重は切断回数に比例して増加する傾向を示す。一方、振動切断の場合、切断回数を

Fig. 8 Observation of blade surface after 150 cuts

Fig. 9 Observation of grain after 150 cuts

重ねても切断荷重はほぼ一定値を保つことが分かる。振動切断では図5に示したように、断続切断となることから加工液の流入が促進され、砥粒の熱的摩耗や目づまりの抑制効果等がもたらされる。それ故、研削性能を維持しながら切断回数を重ねることができるため、切断荷重はほぼ一定値を保つと考えられる。そこで、無振動切断時と振動切断時におけるブレード外周面の観察を試みた。図8はその光学顕微鏡観察写真、図9はSEM写真を示している。それぞれの図において(a)無振動切断時、(b)振動切断時($f=28$ Hz, $a=0.4$ mm)のものである。なお、図8においては写真の右側にモデル図を示し、モデル図の黒い部分は砥粒を表し、砥粒内の白い部分は摩滅部分を表している。また、細線で囲んだものは砥粒の脱落部分を示している。観察結果から無振動切断時には砥粒の摩滅や脱落痕が振動切断時より多く見られている。一方、SEM写真においても無振動切断時では砥粒の摩滅のみならず表面に付着した切りくずが顕著に観察でき、ブレードの切れ味の低下がうかがえる。振動切断時には砥粒が一部微少破壊している部分が観察できる。この微少破壊によって砥粒は自生発刃現象を伴い、常に新しい切れ刃を介して研削加工が行われるものと考えられる。

図10は無振動切断で150回連続して切断加工後、研削能力が低下したブレードをドレッシングせずにそのまま用いて、振動切断を行った場合の切断荷重の挙動を示している。振動切断開始後の切断回数が25回程度(同図横軸では151~175回程度)までに切断荷重は急激に減少していき、その後、図7に示した振動切断時における切断荷重の値に収束していることが分かる。これは振動切断を行うことにより、無振動切断の際に摩滅や目づまり等を起こして研削能力を失った砥粒のドレッシング効果による切れ刃回復現象が生じ、通常の振動切断における切断荷重と同程度の値にまで収束するものと考えられる。従って、振動切断では研削能力が低下したブレードの切れ味を回復

Fig. 10 Dressing effect by vibration

Fig. 11 Relationship between frequency and grinding ratio

Table 2 Wear volume of OD-blade after 150 cuts
dimension: μm

Frequency Hz	0	10	20	28
Diameter direction	10.53	13.16	13.18	13.47
Thickness direction	2.45	1.47	1.33	1.20

させるというような特徴的な効果も見受けられる。

4. ブレードの摩耗特性

図11に振動数と研削比の関係を示す。ここで、研削比は(工作物除去量/ブレード摩耗量)で表される。ブレード摩耗量はブレードの直径方向と厚さ方向の2方向をマイクロメータを用いて実測し、その測定結果を表2に示す。同図より無振動切断時に比して振動切断時の方が研削比は向上し、さらに振動数の増加により研削比は向上することが分かる。ブレード摩耗量の測定結果より、ブレード直径方向に関しては無振動切断時に比して振動切断時の方が摩耗しやすいことが分かった。これは振動切断時では振動による衝撃力がブレード直径方向に対して付加されることに起因するものと考えられる。また、ブレード厚さ方向に関しては無振動切断時に比して振動切断時の方が摩耗しにくいことが分かった。この理由としては、無振動切断の場合、砥粒突出し量やブレード形状の不均一性の影響から切断加工中に加工軌道が変化することがある。そのため、ブレード側面には余分な負荷が加わりながら切断加工を行うことからブレード側面の摩耗量は増大する。一方、振動切断の場合、切断

Fig. 12 Relationship between frequency and normal grinding force when using asymmetrically worn blade

加工中に生じる加工軌道の変化を分離・接触現象によって自己修正が行われる。それ故、ブレードのたわみを抑制しながら切断加工が行われることに起因して、ブレード側面の摩耗を抑制することが可能となる。振動数を増加させると振動1周期当たりの切込み量が減少するのみならず、さらに微少断続切断が行われ、ブレード側面の摩耗は抑制されるようになる。従って無振動切断時に比して振動切断時の方が研削比は向上するのみならず、振動数の増加によっても研削比は向上する。

5. 偏摩耗ブレードによる加工特性

図12に偏摩耗ブレードを用いて切断加工を行った場合の振動数と切断荷重の関係を示す。偏摩耗ブレードは正常ブレードの外周面を約20°にGC砥石を用いて研削することにより人為的に作製したものを使用した。無振動切断の場合、図4に示した正常ブレードによる結果に比して偏摩耗ブレードでは切断荷重はいずれの送り速度に対しても正常ブレードより大きいことが分かる。偏摩耗ブレードでは左右の形状が異なるため加工軌道が変化しやすく、垂直荷重としては正常ブレードが工作物を切断するための切断抵抗のみならずブレードのたわみによる復元力が作用する。そのため、正常ブレードの結果と比して切断荷重が増大するものと考えられる。一方、振動切断の場合の切断荷重は図5に示されている正常ブレードによる振動切断時の切断荷重の値と同等な値にまで減少していることが分かる。その理由としては、振動切断では加工軌道の変化に対する自己修正が可能であり、偏摩耗の影響を軽減することができるためであると考えられる。

次に、振動切断の持つ加工軌道の自己修正効果は工作物を切断した場合の表面うねりに影響を及ぼすと考え、切断された工作物の表面うねりの測定を触針式表面粗さ計を用いて試みた。図13に正常ブレードと偏摩耗ブレードを用いた場合の振動数と表面うねりの関係を示す。同図より無振動切断時より振動切断時の方が表面うねりは減少し、振動数を増加させるとさらに表面うねりは減少していることが分かる。特に、偏摩耗ブレードではその傾向が顕著である。このことから振動切断を行うと、ブレードと工作物の間には分離・接触現象を伴う断続切断現象を生じることにより、ブレードの原点への自己修正を行うことが可能であると言える。

Fig. 13 Relationship between frequency and waviness

Fig. 14 Observation of chipping

6. 加工精度

図14は $\dot{X}=40$ mm/min, $c=8$ mmで切断加工後の工作物を上面より観察したチップングの結果を示している。また、チップングは最大の部位を撮影した。同図(a), (b)はそれぞれ正常ブレードを用いた場合の無振動切断時、振動切断時($f=10$ Hz, $a=0.1$ mm)の結果を示す。また、同図(c), (d)はそれぞれ偏摩耗ブレードを用いた場合の無振動切断時と振動切断時($f=10$ Hz, $a=0.1$ mm)の結果を示す。同図より、

正常ブレードを用いた場合においては無振動切断時より振動切断時の方が最大のチップング量は軽減されていることが分かる。無振動切断の場合、切断加工中に生じるブレードのたわみに起因する切断抵抗の水平分力がチップングを発生させる原因となる。この水平分力の加工中の変動によって工作物はそのエッジ部に大小のチップングを生じる。これに対し、振動切断の場合には切断加工中に生じる加工軌道の変化の自己修正が可能であるため、加工開始から終了まではほぼ一定のチップングを生じ、そのチップングの大きさは無振動切断時に生じる最大チップング量の大きさより減少する。一方、偏摩耗ブレードを用いて振動切断を行うと、正常ブレードを用いた場合の振動切断時(同図(b))と比較すると低品位にはなるが、無振動切断時(同図(a))よりはチップング量の軽減が可能となる。

7. 結 言

外周刃切断方式において工作物に切断送り方向と同方向に低周波領域の振動を付加してスライシング加工を行った結果、以下に述べる事柄が明らかとなった。

- (1) 正常ブレード、偏摩耗ブレード共に無振動切断時より振動切断時の方が切断荷重は減少する。
- (2) 振動切断では研削能力の低下を防止できるために、連続加工を行っても切断荷重は増大しない。
- (3) 研削能力の低下したブレードを用いて振動切断を行うと、そのブレードの研削能力を回復させる効果がある。
- (4) 無振動切断時に比べ振動切断時の方が研削比は増大する。
- (5) 正常ブレード、偏摩耗ブレード共に無振動切断時より振動切断時の方が表面うねりは減少する。
- (6) 正常ブレード、偏摩耗ブレード共に無振動切断時より振動切断時の方が最大のチップングは減少する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、隈部淳一郎、神 雅彦、西尾彰文：重畳振動切削によるセラミックスの精密穴加工，精密工学会誌，55, 2 (1989) 366。
- 2) 例えば、隈部淳一郎、西尾彰文：セラミックス用の新しいボール盤の試作と精密重畳振動穴あけ，精密工学会誌，55, 9 (1989) 1621。
- 3) 石川憲一：スライシング加工技術の現状と展望，精密工学会誌，60, 2 (1994) 163。
- 4) 例えば、柳下福蔵，小林重治：液体ホーニングによる超砥粒砥石のドレッシング法の開発（第6報），1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1993) 941。
- 5) 例えば、周立波，庄司克雄：超砥粒総型ホイールのツルーイングに関する研究，1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1993) 927。
- 6) 石川憲一，諏訪部 仁：だ円振動を付加されたナイフ状刃物による軟質高分子材料の切断に関する研究，日本機械学会論文集（A編），52, 476 (1986) 781。