傾斜面への微小径穴加工における超音波振動の効果*

大 西 修** 鬼 鞍 宏 猷**

Effects of Ultrasonic Vibration on Microdrilling into Inclined Surface

Osamu OHNISHI and Hiromichi ONIKURA

This paper describes the effects of ultrasonic vibration on the characteristics of microdrilling into inclined surface. In the experiment, duralumin with an inclined surface of 15-60 degrees is drilled with ultrasonic vibration by carbide drill of diameter 1mm. The frequency of ultrasonic vibration is 40kHz and its amplitude is 3.5 μ m. As a result of the experiment, it is found that ultrasonic vibration improves dimensional accuracy and form accuracy. By observing the drilling process at the beginning of penetration using a quick-stop device and by analyzing radial forces, it is cleared that applying ultrasonic vibration improves the engage performance of drill at the hole entrance. The reason for this may be that effects of ultrasonic vibration such as hammering motion, reduction of cumulative displacement of drill due to intermittent cutting and reduction in friction reduce the skidding and the wandering of a drill at the hole entrance. Because the microdrilling with ultrasonic vibration into a workpiece which has large inclination angle such as 60 degrees could be done well and has better accuracy than microdrilling without vibration, it is found that application of ultrasonic vibration is useful to drill into an inclined surface.

Key words: microdrilling, ultrasonic vibration, inclined surface, drilling mechanism, drilling accuracy

1. 緒 言

ドリルによる穴加工は、加工能率や加工精度および取り扱いやすさの点で優れた加工法である。しかしながら、ドリルが小径になればなるほど切りくず排出の困難さやドリルの剛性低下などの問題によりその加工は非常に難しく、さらに加工対象がドリル軸に対して垂直な面ではなかったり、曲面であったりした場合はより一層困難なものとなる。しかるに近年の製品の小型化・高精度化に伴い、小径の穴に対する要求も厳しいものとなってきており、上記のような傾斜面や曲面への高精度・高能率穴加工も求められている。

著者らはこれまでの研究において、従来の小径ドリル加工に軸方向の超音波振動を援用しながらドリル軸に対して垂直な平面に穴加工を行い、超音波振動を付加した場合、穴の加工精度の向上、摩擦の低減などによる切削抵抗の低減、ドリルの食いつき性の向上、切りくず排出性の向上などといった効果があることを明らかにした¹⁾²⁾。これらの効果、特にドリルの食いつき性の向上という効果が発揮されるならば、傾斜面や曲面への穴加工にとって非常に有意義であると思われるが、傾斜面や曲面への超音波振動穴加工の効果についての報告はほとんどないばかりか³⁾、超音波振動穴加工の報告自体少ない¹⁾²⁾。

現在、傾斜面や曲面に対してドリル加工する方法には、エンドミルによる座ぐりやセンタ穴加工といった前加工を施したり、あるいはブシュを用いて加工するといった対策がとられているが、超音波振動を付加することで上手くブシュレス傾斜穴加工が行えるならば、作業工程数や加工時間の削減につながる。

そこで、本報では、軸方向の超音波振動を付加した超硬ドリルを用いて、所定の傾斜角を持つ工作物に穴加工を行うときの加工特性を明らかにし、そのメカニズムを考察する。

2. 実験装置および方法

図1に使用した実験装置の概要を示す。立形フライス盤の主軸頭に超音波振動主軸を固定し、主軸端のドリルホルダにドリルを取りつけている。超音波振動主軸内の圧電素子により、ドリルは軸方向に振動数約40kHz、振動片振幅約3.5 μ m（無負荷時）の振動をしながら回転することができる。使用したドリルは図2に示すようなルーマ形ドリルで、直径1mm、溝長10mm、先端角130°、ねじれ角30°、第一逃げ角15°、第二逃げ角30°、材質：微粒子超硬合金（HF-K10）である。工作物はフライス盤のテーブル上の穴加工用4分力動力計（キスラー9272型）に固定台を介して取り付けられており、材質はジュラルミン A2017

Fig.1 Experimental equipment

Fig.2 Geometry of drill used

* 原稿受付 平成15年1月30日

** 正会員 九州大学大学院（福岡市東区箱崎6-10-1）

Fig.3 Geometry of workpiece

Fig.4 Definition of forces direction for a drill

Fig.5 Diameter of drilled holes

(HV81)で、形状は図3に示すように、加工面が水平面に対して15°, 25°, 30°, 45°, 60°の傾斜を持っている棒状試片である。なお、工作物の傾斜角が25°より小さいときはドリル切れ刃のセンタ側から工作物に食いつき始め、傾斜角が25°のときはドリル切れ刃全体が工作物に食いつき始め、そして傾斜角が25°より大きいときはドリル切れ刃のコーナ側から工作物に食いつき始める。ドリルにかかる力の向きは図4のように定める。

実験は、主軸回転数1000~3000min⁻¹、送り3~7μm/rev、穴深さ3~5mm(止まり穴。特に断りのない場合3.5mm)、乾式の条件で行われた。

3. 実験結果

3.1 加工精度

3.1.1 穴入口の直径

図5に工具顕微鏡を用いて直角2方向(XY方向)に穴入口の直径を測定し、その平均をとったものを示す。ここで、記号○, △は超音波振動を付加しなかった場合, ●, ▲は超音波振動を付加した場合を示したもので、記号の形状で回転数の違いを示している。傾斜角15°で送りが7μm/rev、回転数が1000min⁻¹および3000min⁻¹のとき、振動を付加しない条件では穴径の拡大量が11~75μm(平均44μm)であったが、振動を付加した条件では20~27μm(平均23μm)となり、振動を付加することで穴径の拡大量は小さくなるとともに、穴径のばらつきも小さくなった。この傾向は他の条件でも同様であった。また、傾斜角45°で送りが7μm/rev、回転数が1000min⁻¹および3000min⁻¹のとき、振動を付加しない条件では穴径の拡大量が143~155μm(平均149μm)であったが、振動を付加した条件では48~117μm(平均77μm)となり、振動の有無に関わらず傾斜角の増大に伴い穴径の拡大量も大きくなった。

3.1.2 穴入口形状

図6に加工穴入口を軸方向から見たときの走査電子顕微鏡写真を示す。この写真から、振動を付加しない場合はいずれも穴形状が歪んでおり、また、傾斜角が大きくなるにつれその歪みがかなり大きくなることがわかる。一方、振動を付加した場合、

Fig.6 Photographs of hole entrance

Fig.7 Profile curves on the hole wall

傾斜角の増加に伴い穴形状は歪むものの、振動を付加しない場合よりも歪みは小さく、良好な形状であるといえる。

3.1.3 穴内面軸方向断面曲線

図7に粗さ計で測定した穴内面軸方向断面曲線を示す。振動を付加しない場合、粗さは数μmであるが、20μm程度の大きなうねりが見られた。一方、振動を付加した場合、粗さは振動を付加しない場合と同程度であるが、大きなうねりは見られなかった。

3.2 切削特性

3.2.1 切削抵抗

図8に傾斜角15°の工作物を加工したときの平均切削抵抗を示す。Y方向半径力は振動の有無による顕著な差は見られなかったが、その他の加工力については、振動を付加することで減少している。

Fig.8 Average drilling forces (Inclination angle=15°)

Table 1 Drill breakage in various drilling conditions

φ deg	Ultrasonic Vibration	n=1000min ⁻¹		n=3000min ⁻¹	
		f=3μm/rev	f=7μm/rev	f=3μm/rev	f=7μm/rev
15	With	◎	◎	◎	◎
	Without	◎	◎	◎	◎
30	With	◎	◎	◎	◎
	Without	◎	◎	◎	◎
45	With	◎	◎	◎	◎
	Without	◎	◎	◎	○
60	With	◎	○	◎	◎
	Without	◎	×	◎	×

φ: Inclination angle, n: Rotational speed, f: Feed

×: Breakage(2 drills), ○: Breakage(1 drill), ◎: No breakage

3.2.2 ドリルの折損状態

表 1 に主軸回転数 1000min⁻¹ および 3000min⁻¹, 送り 3μm/rev および 7μm/rev, 穴深さ 3.5mm で実験を行ったときのドリル折損状態を示す。1つの条件で2回ずつ実験を行っており、2回とも加工可能な場合は◎, 1回折損した場合は○, そして2回とも折損した場合は×と記している。振動を付加しない場合で送りが大きいときおよび傾斜角が大きいときにドリルは折損した。

4. 考 察

4.1 ドリル食いつき時の加工穴の様子

図 9 にドリルが工作物に接触してから両切れ刃が完全に食いつくまでの間の加工に関与している領域の変化の様子を示す。なお、図 9 の(a)~(d)のそれぞれにおいて、上側の図は側面から、下側の図は上面から見たものである。軸直角面への穴加工の場合 (図 9(a)), 加工開始時から2つの切れ刃およびチゼルエッジで加工に関与する部分は、ドリル軸中心に対して点対称となる。したがって、X方向およびY方向の力は釣り合っている。一方、傾斜面への穴加工の場合 (図 9(b), (c), (d)), 加工開始時から2つの切れ刃およびチゼルエッジで加工に関与する部分つまり作用長さは、ドリル軸中心に対して点対称とはならない。したがって、この作用長さの差 (以下、これを“不釣り合いの長さ”という) に応じた半径力をドリルは受けることとなる。

実際のドリル食いつき時の加工の詳細を調べるために、工作物を切削急停止装置²⁾上に固定し、ドリル食いつき時の加工の進展の様子を調査した。ドリルおよび工作物は2章で示したものと同一ものを使用した。加工条件としては、主軸回転数 4000min⁻¹, 送り 3μm/rev, 穴深さ約 0.002~1.250mm (止まり穴), 乾式である。図 10~12 に加工穴入口を軸方向から見たときの走

Fig.9 Change of effective cutting area

査電子顕微鏡写真を示す。

傾斜角 15° のとき (図 10), ドリルは切れ刃センタ側から工作物に食いつき始めるが、振動を付加しない場合、ドリルの2つの切れ刃の作用長さが違うため (図 9(b)), その差である不釣り合いの長さに応じた半径力を受け、ドリルの振れまわりが軸直角面への加工に比べて大きくなっていることがわかる。一方、振動を付加した場合、穴底につちうち³⁾の痕跡が見られるが、傾斜面を加工することで両切れ刃の作用長さが釣り合っていないにも関わらず、振れまわりの跡もほとんど見られず、安定した加工が行われているのがわかる。

傾斜角 25° のとき (図 11), ドリルは切れ刃全体が一度に工作物に食いつき始めるが、ドリルは食いつき始めの不安定なときに切れ刃全体で食いつき (図 9(c)), 大きな力を受けるために、振動の有無に関わらず、加工の初期においてドリルが滑ったような痕跡が見られる。しかしながら、この場合においても振動を付加することで、滑りが小さくなり、また、振れまわりの痕跡も小さくなっている。振動を付加しない場合については、ドリルが斜面を滑ったためにリーディングエッジで削り取られたと思われる部分が確認される。

傾斜角 45° のとき (図 12), ドリルは切れ刃コーナ側から工作物に食いつき始めるが (図 9(d)), 振動の有無に関わらず、斜面を滑ったために、リーディングエッジで削り取られたと思われる

Fig.10 Photographs of hole bottom (Inclination angle= 15°)

る部分が生じるのがわかる。なお、この領域は振動を付加することにより小さくなり、また、振れまわりによる痕跡も小さくなっていることが確認される。

以上のように、 45° までのどの傾斜角でも、振動を付加することで、ドリルの滑りおよび振れまわりは低減されることがわかる。

4.2 ドリル食いつき時の半径力の変化

図13にドリルに作用する半径力の変化を示す。なお、ドリルと工作物が接触を開始する点を穴深さ 0mm としている。振動を付加しない場合、いずれの傾斜角においてもX方向半径力は正の向きに極大値を、Y方向半径力は負の向きに極小値をとったあと、 0 近傍に戻る傾向が見られる。

図14に傾斜角 45° 、主軸回転数 3000min^{-1} 、送り 0.1mm/rev におけるドリル両切れ刃の不釣り合いの長さをドリルが剛体で形状が幾何学的にも正しいとして計算したものを示す。ドリルの両切れ刃の作用長さの差である不釣り合いの長さは穴深さ 0.39mm 付近で最大となり、穴深さが 1mm のとき（このとき両切れ刃が完全に穴に入る）に 0mm になることが図よりわかるが、傾斜角 45° のときの実際の加工の様子（図13(b)左）を見ると、ちょうどこの不釣り合いの長さが最大となる穴深さ 0.39mm 付近で半径力は極値をとり、そのあと徐々に減少している。

以上のことより、ドリルの両切れ刃が完全に穴に入るまでの間、ドリルの両切れ刃の作用長さに差ができ、このドリルの両切れ刃の不釣り合いの長さに伴った半径力をドリルが受けるため図13左列のような波形になったと思われる。もっとも、ドリルの両切れ刃が完全に穴に入り込めばドリルの両切れ刃の不釣り合いの長さは零になるため、半径力は零になるはずであるが、

Fig.11 Photographs of hole bottom (Inclination angle= 25°)

Fig.12 Photographs of hole bottom (Inclination angle= 45°)

Fig.13 Change of radial force during drilling

Rotational speed: 3000min⁻¹, Feed: 0.1mm/rev, Inclination angle: 45°

Fig.14 The length of the unbalance between two cutting edges which are actually cutting

実際にはX方向に正の値、Y方向に負の値が残留している。これは、ドリルが完全に穴に入るまでの間に受けた半径力により、ドリルが本来穴をあける予定の位置からずれたところに食いつくことが主要な要因であると思われる。

一方、振動を付加した場合は、半径力の変動振幅は大きいものの平均値は振動を付加しない場合よりも小さくなる。

4.3 超音波振動付加による加工精度向上のメカニズム

ドリル食いつき時の挙動について見ると、振動を付加した場合、4.1節および4.2節で示したようにドリルのすべりと振れまわりの抑制および半径力の低減が認められるが、これは、チゼルエッジが工作物に楔をうち込むようなつちうち作用²⁾、工作物に対してドリルが食いついては離れ食いついては離れと断続的に加工が進行するため本来穴をあけるべき位置からのずれも超音波振動の周期に合わせてドリルの曲げに対する復元力により零に戻るといったドリル変位累積の抑制作用²⁾および摩擦の低減によって切削抵抗が低減すること¹⁾などといった効果によ

り、通常の穴加工の場合に比べて食いつき時のドリルの歩行運動は抑えられ、ドリルの食いつき性あるいは求心性が向上したためと思われる。この食いつき性の向上により、3章で示したような寸法精度や形状精度といった加工精度の向上および加工可能な条件の拡大といった結果が得られたものと思われる。

また、振動を付加した場合、切りくず厚さの減少、切りくず流出速度の増加、切りくず形状の変化などによって切りくずの排出性が向上することおよび瞬間的な加工となることによる切削温度上昇の抑制、断続的な加工となるため乾式の場合はドリルと切りくずの間に空気が流入して工作物表面に酸化膜が形成されることなどによってドリルへの凝着が抑制されることといった効果のため、3.1.3項で示したように穴内壁の表面性状も向上したものと思われる。

5. 結 言

直径1mmの超硬ドリルを用いて、15°~60°の傾斜角を持つ工作物（ジュラルミン）に止まり穴加工を行い、超音波振動を付加することによる効果を分析・検討した。その結果、以下の様にまとめられる。

- (1) 超音波振動を付加することで、穴の寸法精度、形状精度および穴内壁の表面性状の向上が認められた。穴の寸法精度および形状精度の向上については、振動を付加することによるドリルの食いつき性の向上効果のため、穴内壁の表面性状の向上については、振動を付加することによる切りくずの排出性の向上効果や切りくずの凝着の抑制効果のためであると思われる。
- (2) 傾斜面への加工では、ドリル食いつき時にどうしても半径力の不釣り合いが生じ、その力の影響で、通常の穴加工では穴の加工精度の悪化といったことが起こる。しかし、超音波振動を付加した場合、小刻みな断続切削によるドリル変位の累積の抑制、摩擦の低減およびつちうち作用などといった効果のため、ドリルの食いつき性は向上する。そのため、加工精度の悪化やドリル寿命の短縮といった傾斜面への穴加工における問題を緩和する。
- (3) 超音波振動を付加した場合、60°という大きな傾斜角度を持った工作物でもブシュレスで加工でき、穴の加工精度も振動を付加しない場合に比べて良いことから、超音波振動小径穴加工はブシュレスでの傾斜穴の加工法として、有効な手法であると思われる。

謝 辞

本研究にあたり、貴重なご援助およびご意見をいただいた(株)岳将の岳 義弘氏、圧電型切削動力計のご援助をいただいた日本キスラー(株)、ならびに実験に協力された学生、宮本定明君(現、日本電気(株))および熊本光利君(現、三菱冷熱工業(株))に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 鬼鞍宏猷、大西 修、馮 金海、神田敏和、森田貴博：超音波振動が小径穴の加工精度に及ぼす効果、精密工学会誌、62, 5 (1996) 676。
- 2) 鬼鞍宏猷、大西 修：超音波振動小径穴加工における切削機構、精密工学会誌、64, 11 (1998) 1633。
- 3) D. Zhang, X. Feng, L. Wang and D. Chen: Study on the Drill Skidding Motion in Ultrasonic Vibration Microdrilling, Int. J. Mach. Tools Manufact., 34, 6 (1994) 847。
- 4) 隈部淳一郎：振動切削—基礎と応用—、実教出版、(1979)。
- 5) 竹山彦彦、加藤俊二、石渡昭一、竹治裕幸：ばりの抑制を目的とする振動穴あけに関する研究、精密工学会誌、59, 10 (1993) 1719。