ばりの抑制を目的とする振動穴あけに 関する研究*

竹山秀彦** 加藤俊二** 石渡昭一*** 竹治裕幸***

Study on Oscillatory Drilling Aiming at Prevention of Burr

Hidehiko TAKEYAMA, Shunji KATO, Shoichi ISHIWATA and Hiroyuki TAKEJI

Burr in drilling operations has been a serious problem especially in the area of factory automation and high technology. In order to prevent burr in drilling operations ultrasonic or low frequency vibration has been applied in the direction of drill feed. In this study in order to enhance the effect of oscillation in drilling operations newly developed "radial peripheral lip drill" has been applied as well as the standard type of drill. With the radial peripheral lip drill the radial lip at the corner of drill edge is able to obliquely cut and sharply slice the stock at the hole exit, which would become burr, by the aid of oscillatory motions in the direction of drill feed. Low frequency vibration is as highly effective in preventing burr as ultrasonic vibration except that the former is effective only with the radial peripheral lip drill.

Key words: burr, oscillatory drilling, ultrasonic vibration, low frequency vibration, radial peripheral lip drill

1. 緒 言

機械加工において発生するばりは昔から製造現場における厄介ものとされてきたが、近年の高精度自動生産システムにおいてはさらに深刻な問題となっている。このためばりの除去に関する研究や開発は盛んに行われるようになったが、ばりを発生させないための研究や開発は比較的少ない。本研究は過去の研究結果¹⁾の連想から、延性材料のドリルによる穴あけにおいて、ドリルの送り方向に超音波振動または約500Hz以下の低周波振動を与えることによってばりの発生を抑制することを試みたものである。足立ら²⁾は0~50Hzの周波数範囲で低周波振動ドリル加工の実験を行っているが、とくに周波数の影響も把握する必要があるので約10倍の周波数範囲(0~500Hz)で実験した。本研究においては、穴の出口において塑性変形によりばりとなるべき被削材部分を送り方向の振動変位により鋭利に傾斜切削できるラジアルペリフェラルリップドリルを

開発し、これを用いて振動穴あけの効果を増幅することを試みた。

超音波振動切削のような振動切削における振動変位の方向は従来主運動方向とするのが常識となっているが、本研究の目的からすれば振動方向は送り運動方向にする方が効果的と考えられるだけでなく、そうすることによって工作機械の構造が著しく簡素化され実用性が増してくる。

実験結果からすれば、超音波振動穴あけは振幅が約13 μ m以上であればドリルの種類のいかにかわらず、低周波振動穴あけでは振幅が約20 μ m以上であればラジアルペリフェラルリップドリルを使用する限り出口ばりの抑制に極めて有効であることが明らかになった。

2. 実 験 方 法

実験装置を図1に示す。ここで超音波振動穴あけと低周波振動穴あけとで大きく異なるのは振動源だけであるので、前者に対しては超音波振動発生装置を実線で、後者に対しては油圧ポンプを点線で示してある。図1において、被削材②はフライス盤のテーブル⑤の上に固定した振動子④の上端に取り付け、ドリル①は

* 原稿受付 平成4年11月30日

** 正 会 員 神奈川工科大学 (厚木市下荻野1030)

*** 正 会 員 超音波工業(株) (立川市柏町1-6-1)

Fig.1 Experimental setup

Fig.3 Plan of drill dynamometer

Fig.2 Radial peripheral lip drill

フライス盤主軸に締め付けて垂直方向に送られる。ドリルの送り方向に加える振動変位は本実験においては被削材側で与えられている。もちろん振動変位は主軸側で与えることもできるが本実験では簡単化のために被削材側を振動させるようにしてある。なお、本研究における評価項目は5回の実験における穴の出口に発生するばりの穴の全周にわたっての平均高さである。

2. 1 供試ドリル

本実験に使用した標準型ドリルは直径5mm、先端角120°、ねじれ角30°の超硬ドリルと新たに開発した3種のラジアルペリフェラルリップドリルである。上記ラジアルペリフェラルリップドリルは図2に示すように、標準型ドリルのコーナ部に半径 $R=2.0\text{mm}$, 2.5mm および 4.0mm の丸みを付けたドリルである(コーナ切れ刃とそれに連なるマージンはコーナ半径 R の円弧をドリル軸回りに回転して得られる曲面上にある)。上記ラジアルペリフェラルリップドリルの主な特徴は、ドリルの送り方向の変位によって円弧状切れ刃が穴の出口直前で穴の周縁に塑性的に逃げてばりとなるべき部分を送り方向運動の傾斜切削により鋭利にそぎ取ることができることである。本研究の場合振動速度がドリルの周速に比べて非常に大きいため、穴の貫通直前における切削主運動方向はほぼ振動方向と見なすことがで

きる。したがってこの時点で関与する主切れ刃は円弧状切れ刃で、これと主運動方向となす角は90°より著しく小さくなって傾斜切削が実現される。さらに、このドリルを用いれば、穴のあけ際における切削抵抗ベクトルの大きさが小さくかつその方向が穴の壁面に対し直角に近くなること、およびラジアルリップドリル(刃部が半球面上にあるように研削したドリル)やエリプソイダルリップドリル³⁾(刃部が半楕円面上にあるように研削したドリル)に比べて求心性がよいという利点もある。また、ラジアルリップドリルの場合、一般に主切れ刃の円弧半径がドリル半径よりも大きいので主切れ刃円弧と外周切れ刃とが極端に不連続になり、コーナ部分でラジアルペリフェラルリップドリルのような傾斜切削の効果は期待できない。

2. 2 切削諸元

被削材は $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 5\text{mm}$ の純アルミニウム板で、実験では深さ5mmの貫通穴をあけることになる。ドリル($\phi 5\text{mm}$)の回転速度は115rpmで、ドリルの送り量は 0.08mm/rev および 0.15mm/rev としたが、本報告ではより大きなばりを発生しやすい 0.15mm/rev の場合についてのみ記述してある。なお、構成刃先が発生している状態では穴の仕上面や形状が大きく乱されて研究目的が達成できないので、これを抑えるために低周波振動穴あけにおいては切削油剤としてケロシンを用いて実験を行った。

2. 3 振動条件

超音波加振器は電歪型で発振器の回路は周波数自動追尾振幅方式となっており、最大出力は300W、周波数は20kHzである。超音波振動方向はドリルの送り方向であり、実験で採用した振幅は0(振動を与えない通常の穴あけの場合)、3.5, 7.0, 13.5, 20.0 μm である。

低周波加振器は油圧式で静的理論出力は $\pm 2942\text{N}$ 、

R.P.L.D.; radial peripheral lip drill
Work material: pure aluminum, drill: four types of $\phi 5$ mm sintered carbide drill, spindle speed: 115 rpm, feed rate: 0.15 mm/rev, dry

Fig.4 Effect of amplitude of ultrasonic vibration on burr height

最大速度 ± 45 cm/s, 周波数範囲は0.1~500Hz, 振幅は0~0.3mmで, 指定振幅は一定に自動制御される。実験で採用した振幅は0(振動を与えない通常の穴あけの場合), 10, 20, 30, 40および80 μ mである。

2. 4 切削抵抗ベクトルの測定

穴の出口直前における切削抵抗の大きさと方向(切削抵抗ベクトル)は出口ばりの大きさを左右するという考えから, とくにラジアルペリフェラルリップドリルのばり抑制効果を検証する意味から平面図を図3に示すような動力計を用いて切削抵抗ベクトルを測定した。図3において動力計は両端固定の一对のはりから成っており, その中央に2つ割りされた被削材が取り付けられるので被削材の中心部で紙面に直角方向に穴あけして生ずる切削抵抗ベクトルの半径方向成分を分離して測定できる。一方スラスト成分は前記の一对のはりの側面に直角方向のひずみから半径方向成分と分離して測定することができる。

3. 実験結果

3. 1 超音波振動穴あけ

標準型ドリルとコーナ部半径Rが2.0mm, 2.5mmおよび

Ultrasonic vibration: none

Ultrasonic vibration: 13.5 μ m amplitude

(a) With standard type of drill

Ultrasonic vibration: none

Ultrasonic vibration: 13.5 μ m amplitude

(b) With radial peripheral lip drill (R=2.0mm)

Fig.5 Photos of hole exit drilled with and without ultrasonic vibration

4.0mmのラジアルペリフェラルリップドリルを用い超音波振動を加えない場合を含め超音波振動振幅を3.5, 7.0, 13.5, 20.0 μ mと変化させて純アルミニウムを穴あけしたときの出口ばりの平均高さを示したのが図4である。また, 標準型ドリルとラジアルペリフェラルリップドリル(R=2.0mm)を用い, 超音波振動を加えたときと加えないときの穴の出口の写真を図5に示す。

以上の結果から明らかなことは, 超音波振動振幅が13.5 μ m以上であればドリルの種類のいかんにかかわらず超音波振動のばり抑制効果が非常に大きいことである。また, 図4から超音波振動を加えない場合を含めて振動振幅が7.0 μ m以下の場合もラジアルペリフェラルリップドリルのばり抑制効果がある程度認められる。

3. 2 低周波振動穴あけ

標準型ドリルとコーナ部半径Rが2.0mmおよび2.5mmのラジアルペリフェラルリップドリルを用い, 周波数500Hzの低周波振動を加えて純アルミニウムを穴あけした場合の出口ばりの平均高さとの関係を図6に示す。また, 図7は周波数500Hzと100Hzとした場合の振動振幅と出口ばりの平均高さの関係を示す。さ

R.P.L.D.;radial peripheral lip drill
Work material: pure aluminum, drill: three types of $\phi 5\text{mm}$ sintered carbide drill, spindle speed: 115rpm, feed rate: 0.15 mm/rev, frequency=100Hz, wet

Fig.6 Effect of amplitude of low frequency vibration on burr height

らに、標準型ドリルとラジアルペリフェラルリップドリル(R=2.5mm)を用いて、低周波振動(100Hz)を加えたときと加えないときの出口ばりの写真を図8に示す。

以上の結果から、ラジアルペリフェラルリップドリルを用れば低周波振動穴あけにおいてもばりを抑制できることが明らかである。しかし、低周波振動穴あけにおいては超音波振動穴あけの場合と異なり、標準型ドリルを使用した場合には振幅のいかにかわらず振動の効果は全くないことが明らかになった。換言すれば低周波振動穴あけにおいてはラジアルペリフェラルリップドリルと振動との相乗効果が極めて顕著である。しかし振動振幅が小さい場合、コーナ半径Rの違いによるばり抑制の効果の差異については、実験結果のばらつきが大きいためはっきりしたことはいえない。なおラジアルペリフェラルリップドリルを用いた場合、周波数が比較的高い(500Hz)ときは低い(100Hz)ときに比べ効果を発揮する下限振幅が多少小さくなること以外ばりの抑制効果に大きな差異はない。

4. 考 察

超音波振動穴あけにおいてはもちろん低周波振動穴あけにおいても標準型ドリル以外は送り方向の振動が

Drilling conditions are same as in Fig.6 except frequency: 100Hz and 500Hz; drill: radial peripheral lip drill (R=2.0mm)

Fig.7 Effect of frequency in low frequency vibration drilling on burr height

Fig.8 Photos of hole exit drilled with and without low frequency vibration

ばりの抑制に大きな効果があり、ラジアルペリフェラルリップドリルとの相乗効果があることがわかったが、以下にその理由を考察する。

図9は穴の貫通直前のドリル1回転における片方の周縁切れ刃の軌跡を2次元的に展開した図である。超音波振動穴あけではこの間に10000回以上の、低周波振動穴あけにおいては50~260回の送り方向の変位が重畳されている。送り方向の振動を加えない場合は、切残し部（細斜線部分）が切削抵抗により自由空間に向けて塑性的に曲げられてバリとして残る。ここでラジアルペリフェラルリップドリルを用いて送り方向の振動を加えた場合は、ラジアルペリフェラルリップドリルの円弧状周縁切れ刃の送り方向変位により傾斜切削が行われ、バリとなる前に極めて鋭利にそぎ取られることになる。

つぎに超音波振動穴あけの場合は標準型ドリルでも効果がある理由を考察する。図10は超音波振動穴あけにおけるスラストを各種ドリルに対して、振幅をパラメータとして測定した結果を示したものである（ここで測定されたスラストは測定器系の周波数特性からその平均値と見なされる）。これから明らかなように、スラストは超音波振動振幅の増大とともに減少する。このことはドリル1回転中10000回にも及ぶドリル切れ刃の送り運動方向の微小切削ないし微小変形に基づく応力集中により切りくず生成を容易にすること、そしてその程度は振幅の大きいほど大なることを示している。ここで標準型ドリルの場合は円弧状周縁切れ刃がないために送り運動方向の変位による微小切削は期待できないまでも、1回転中10000回にも及ぶ微小な塑性変形による繰返し応力集中のために切残し部分が穴の壁面に沿ってせん断されやすくなると考えられる。一方、標準型ドリルによる低周波振動穴あけの場合はドリル1回転中の衝撃回数は超音波振動の場合の1/40以下で、切れ刃の送り方向の1ストローク当たりの材料除去量が大き過ぎて微小破壊の集積として材料除去はできないために塑性的に自由空間に逃げてバリとならざるをえない。

Fig.9 Displacement of peripheral lip for last one revolution of drill

R.P.L.D.; radial peripheral lip drill
Drilling conditions are as same as in Fig.4

Fig.10 Effect of ultrasonic vibration on mean thrust force in drilling aluminum

ばりの大きさを左右する要因としては上記以外に穴の貫通直前における切削抵抗ベクトルの方向とその大きさがある。ラジアルペリフェラルリップドリルを用いれば、図9における切残し部分（細斜線部分）の切削厚さは標準型ドリルの場合よりはるかに薄くなり、スラストを減少させることができる。また、ラジアルペリフェラルリップドリルを用いた場合は、図11に示すように、穴のあけ際における円弧状切れ刃による切

Fig.11 Relation between direction of cut force vector and drilling time with two types of drill without vibration

削抵抗ベクトルと穴の軸方向とのなす角 θ が大きくなり、スラストを小さくすることができる。なお、図11の $\tan \theta$ は図3の動力計を用いて計測された切削抵抗ベクトルより $\tan \theta = \text{半径方向分力} / \text{スラスト分力}$ として求めた。

5. 結 論

- (1) ドリルの送り方向に約13 μm 以上の振幅の超音波振動を与えて穴あけをすれば新たに開発したラジアルペリフェラルリップドリルはもちろん標準

型ドリルでもばりの発生を抑制できる。

- (2) ドリルの送り方向に約20 μm 以上の振幅の低周波振動(500Hz以下)を与えて穴あけをすれば新たに開発したラジアルペリフェラルリップドリルを使用する限りばりの発生を抑制できる。
- (3) 上記のように送り方向の振動とラジアルペリフェラルリップドリルとの相乗効果が顕著なことは、本ドリルの円弧状周縁切れ刃による送り方向の傾斜切削によりばりとなるべき切残し部分を鋭利にそぎ取ることを示している。
- (4) ラジアルペリフェラルリップドリルは穴の貫通直前における切削抵抗ベクトルの絶対値が小さくその方向が穴壁に対して直角に近くなるために、振動を加えない場合でもある程度ばり抑制の効果がある。

終わりに、供試ドリルの提供等でご協力いただいた東芝タンガロイ(株)に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) H.Takeyama and N.Iijima: Machinability of Glassfiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining, Ann. CIRP,37/1, (1988)93.
- 2) 足立勝重, 新井典久, 鞍谷文保, 沖田耕三, 脇坂彰一: 低周波振動ドリル加工時に生成されるバリに関する研究, 精密工学会誌, 52,7(1986)1205.
- 3) H.Shikata, M.F.De Vries and S.M.Wu: Experimental Investigation of Sheet Metal Drilling, Ann. CIRP,29/1,(1980)85.

編 集 後 記

本年は冷夏ということで、あまり季節の変化を感じる前に秋となりました。読書にもスポーツにも快適な季節であるこの時期にスポーツ用具に関する特集はタイミングが良いものであったと思います。新たにスポーツを始める方には、用具選択のつぼを得るのに参考になると思いますし、すでに楽しまれている方には、自分の用具を理論的に見直し、スポーツ談義における理論武装ができたことと思います。

会誌編集委員の私の任期も、右往左往している間に残り数か月になりました。特集やグラビアとインタビュー記事の取材先などアップズデイトなものをこころがけてまし

たが、会員の皆様の希望を反映できる取材先や特集のテーマの選定などが、今後の課題とも思います。先の精密工学会春季大会において行った「精密工学会誌」に関するアンケートの特集等に関するご提案に関しましては近年行った特集等と重複するものもあり、今後時期を見てということになりました。ご協力ありがとうございました。

60周年で還暦ということでもないでしょうが、60巻第1号(平成6年1月号)より、会誌のサイズがA4判になり、表紙も変わります(詳細は会告をご覧ください)。サイズの変更により、一部の皆様にはごめんどうをおかけするかもしれませんが、よろしくお願いします。また、今後ともより良い会誌とするため、皆様の会誌編集に関するご批評、ご意見、ご提案等のご協力のほどをお願いします。

(渡辺 巖)