低周波振動ドリル加工に関する研究*

(黄銅を用いた場合の切込み厚さと切りくず形状,
切削抵抗の関係について)足立 勝重^{*1}, 新井 典久^{*2}, 脇坂 彰一^{*3}
原田 進^{*4}, 服部 英俊^{*5}A Study of the Low Frequency Vibratory Drilling
(Relation Among Uncut Chip Thickness, Chip Shape and
Cutting Force in Drilling of Brass)Kathushige ADACHI, Norihisa ARAI, Shoichi WAKISAKA,
Susumu HARADA, and Hidetoshi HATUTORI

Although, many studies of ultrasonically vibrated drilling have been made, there have been few studies dealing with low frequency vibratory drilling. Given such a situation, this type of vibratory drilling was chosen as one of the subjects of our study, that is, the relation among uncut chip thickness, chip shape and cutting force in drilling of Brass is examined under various drilling conditions. The results obtained are as follows; (1) The chip is continuous when the frequency ratio is an even number and is discontinuous when the frequency ratio is an odd number. The variation in chip shape approximately corresponds to that of the uncut chip thickness. (2) It is found that the application of this investigation to the drilling of Brass is effective for chip breaking.

Key Words: Cutting, Drilling, Twist Drill, Cutting Force, Low Frequency Vibratory Drilling

1. 緒 言

機械加工において、ドリル加工の占める割合は大きく、最も一般的な機械加工の一つとして古くから用いられている。近年、ドリル加工の分野においても切りくず処理を含む能率的な切削方法の開発が一つの研究課題となっている。この問題を解決する一方法として振動ドリル加工が再認識されるようになってきた⁽¹⁾。振動ドリル加工には超音波振動ドリル加工と低周波振動ドリル加工の2種類がある。超音波振動ドリル加工については加工精度の向上、ドリル寿命の増大、切削抵抗の減少など多くの研究成果⁽²⁾⁽³⁾が発表され、その有効性が明らかにされている。しかし、低周波振動ドリル加工については Satel⁽⁴⁾がステンレス鋼の穴加工、Hansen⁽⁵⁾が深穴加工について断片的に研究を行っているにすぎずほとんどまとまった研究はないようである。このような情勢に基づき、まず本報では基礎研究

として、周波数比(ドリル回転数とドリル軸方向振動数の比)と切込み厚さの関係式を誘導した。一方、加工特性が考察しやすい被削性のよい6-4黄銅(C2801)を被削材として低周波振動ドリル加工時の周波数と切りくず外観形状および切りくず各部寸法(ピッチ、傾角、厚さ)の関係について検討した。また、これら各場合の切削抵抗(静的成分、動的成分)の変化についても考察した。

2. 低周波振動ドリル加工時の
切込み厚さの変化

低周波振動ドリル加工とはドリルの軸方向に低周波振動を与えるもので、ドリルの送り量と振幅によって真実送り量が変わり切込み厚さが変化する。また、周波数比によっても切込み厚さが変わる。

図1はドリルの回転角 θ に対する切込み厚さ S_t の変化を示したものである。すなわち、図1(a)は周波数比 $W_f=1$ (位相角 $\phi=\pi$ rad)の場合で、 S_t は断続的に変化する。また、図1(b)は $W_f=2$ ($\phi=0$)の場合で S_t の値は一定であるが波状に変化する。いま、ドリルの軸方向に正弦波の振動を与えると、ドリルがある基準位置0から θ rad回転した位置での S_t の変化は、切れ刃Aと切れ刃Bの軌跡の差として式(1)のよう

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年7月18日。

^{*1} 正員、大阪産業大学工学部 (〒574 大東市中垣内3-1-1)。

^{*2} 正員、同志社大学工学部 (〒602 京都市上京区今出川通烏丸東入)。

^{*3} 兵庫県立工業試験場 (〒654 神戸市須磨区行平町3-1-12)。

^{*4} 正員、東芝機械(株) (〒410 沼津市大岡2068-3)。

^{*5} 学生員、同志社大学大学院。

に求められる。

$$S_t = \frac{S}{2} + 2a \sin W_f \frac{\pi}{2} \times \cos \left\{ W_f \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 S ：ドリルの送り量 (mm/rev)， a ：ドリルの振幅 (mm)， W_f ： Z/N (Z ：ドリルの振動数 (Hz)， N ：ドリル回転速度 (s^{-1})) である。図2は式(1)により W_f と S_t の関係を示したものである。

図から、 W_f 、 S の値によって、 S_t は断続的な変化あるいは一定値で波状的な変化をすることがわかる。ただし、式(1)において、ドリル1回転時に S_t の値が $S_t > 0$ となる場合の切込み厚さは連続、 $S_t \leq 0$ の場合は断続になる。また、式(1)において、切込み厚さ S_t の最大値および最小値は次のように表される。

$$S_t = \frac{S}{2} \pm 2a \sin W_f \frac{\pi}{2} \dots \dots \dots (2)$$

上式中+符号は切込み厚さが最大 (S_{tmax})、-符号は最小 (S_{tmin}) の場合である。式(2)において、断続になる条件は $S_{tmin} \leq 0$ であるから断続の場合の回転角 θ に対する切込み厚さ S_t と周波数比 W_f との関係は次式のように表される。

$$S_t = \frac{S}{2} - 2a \sin W_f \theta \leq 0 \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、 S_t はドリル1回転時に上式が満足される範囲で断続となる。図1、2および後述する図6の斜線部は切れ刃Aと切れ刃Bの軌跡の差を示す。図3は、一例として $W_f = 1.5$ 、 $N = 330$ rpm、 $Z = 8.25$ Hz、 $a =$

0.04 mm の場合のドリル1回転当たりの S_t が断続する範囲 (斜線の部分) を示したものである。すなわち、式(3)において断続となる条件 $S_t \leq 0$ において、 S と a の関係を求めると、 $S \leq 4a$ となる。したがって、この場合の切込み厚さの断続は $S \leq 4a = 0.16$ mm の範囲において生じ、図からドリル1回転当たり4回の割合で切込み厚さが断続になることがわかる。また、これらの関係は図2の $W_f = 1.5$ の場合の S_t の変化とも対応している。 $W_f = 1, 1.25, 1.75$ の場合にも同様のことがいえる。

3. 実験装置および方法

図4は本研究に使用した低周波振動ドリル加工装置の外観を示す。振動発生装置は油圧サーボ機構によって、ドリルに軸方向 (送り方向) の低周波振動を与えるもので、この装置をラム形立 NC フライス盤の主軸部に取付けている。ドリルは回転と同時に送り方向に最大 100 Hz までの低周波の正弦波振動を与えることが

図2 周波数比と切込み厚さの関係

図1 ドリルの回転角に対する切込み厚さの変化 (位相角 $0, \pi$ の場合)

図3 回転角と送り量の関係

できる。切削抵抗(スラスト, トルク)の測定には圧電式切削動力計(キスラー社製 9273 形)を使用し, 出力波形を電磁オシログラフ(三栄測器製 5 L-45 形)で記録した。図 5 は測定した切削抵抗をモデル化して表したものである。図において, 切削抵抗の変動の平均値を静的成分, 変動の成分を動的成分とした。

切りくず形状(ピッチ, 傾角)の測定は投影機で, 切りくず厚さの測定はポイントマイクロメータでそれぞれ行った。ドリルは市販の直径 8 mm (SKH 9) を用い, リップハイト差の小さいドリルを選んで使用した。また被削材は 6-4 黄鋼 (C2801 P, 板厚 10 mm) を用いた。

4. 実験結果と考察

4.1 周波数比と切りくず形状の関係 図 6 は周波数比 W_f を 0~4 まで変えた場合の S_t の変化と切りくず形状の関係を示したものである。いずれも穴深さ 5~6 mm 切削直後の切りくずである。すなわち, 図 6 (a) は $W_f = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ の場合, 図 6 (b) は $W_f = 1.5, 2.5$ の場合, 図 6 (c) は $W_f = 1, 2, 3, 4$ の場合である。ただし, S_t についてはドリル 1 回転当たりの変化が示してある。

図 6 (a) をみると, W_f が小数の場合の切りくずは

図 4 低周波振動ドリル切削装置

図 5 切削抵抗のモデル

	$W_f = 0$ ($\phi = 0$)	$W_f = 0.25$ ($\phi = \pi/4$)
S_t		
Chip		
	$W_f = 0.5$ ($\phi = \pi/2$)	$W_f = 0.75$ ($\phi = 3\pi/4$)
S_t		
Chip		

(a) Cases of $W_f = 0, 0.25, 0.5, 0.75$

	$W_f = 1.5$ ($\phi = \pi/2$)	$W_f = 2.5$ ($\phi = \pi/2$)
S_t		
Chip		

(b) Cases of $W_f = 1.5, 2.5$

	$W_f = 1$ ($\phi = \pi$)	$W_f = 2$ ($\phi = 0$)
S_t		
Chip		
	$W_f = 3$ ($\phi = \pi$)	$W_f = 4$ ($\phi = 0$)
S_t		
Chip		

(c) Cases of $W_f = 1, 2, 3, 4$

Drill dia. = 8mm, Rotational speed = 330min⁻¹,
Feed rate = 0.08mm/rev, Amplitude = 0.08mm

図 6 切込み厚さと切りくず形状の関係

ピッチが周期的に不規則に変化した長いもの ($W_f=0.25$), あるいは数ピッチで折断されたもの ($W_f=0.5, 0.75$) などが観察される。これは、上述したように、周波数比 W_f の値によって S_t の変化が異なることに起因するものと考えられる。図 6 (b) の $W_f=1.5$ と 2.5 の場合の切りくずは両者とも S_t の変化に対応して細かく折断している。このことは図 3 で示した $W_f=1.5$ の場合の切込み厚さの変化がドリル 1 回転当たり 4 回の割合で断続となることから裏付けられる。また、図 6 (c) には W_f が整数の場合の S_t と切りくず形状の関係を示してある。この場合、 W_f が偶数と奇数によって S_t は断続的あるいは連続かつ波状に変化する。

したがって、これらの変化に対応して切りくず形状も折断されたり、連続のらせん状になったりしている。すなわち W_f が 1 の場合は短く折断された円すいらせん状の切りくずを生じている。 $W_f=3$ の場合についても同様の切りくずとなっている。また W_f が 2, 4 の偶数の場合は $W_f=0$ の場合と同様の長い円すいらせん状の切りくずが排出している。

次に、切りくず形状をさらに詳細に検討するために、

Drill dia. = 8mm, Rotational speed = 330min⁻¹,
Feed rate = 0.08mm/rev, Amplitude = 0.08mm

図 7 周波数比と切りくず寸法の関係

切りくず各部寸法 (ピッチ, 傾角, 厚さ) を測定した。

図 7 は、 $W_f=0.25$ と $W_f=0.5$ の低周波振動ドリル加工および $W_f=0$ の慣性ドリル加工の場合のピッチ P と傾角 δ の測定結果を示す。図の上部に P と δ の説明および $W_f=0, 0.25, 0.5$ の場合の切りくずのスケッチ図を示す。またスケッチ図中の番号は下部グラフの測定位置番号と対応させてある。図から、 $W_f=0.25$ と 0.5 の場合の P および δ はある周期性をもって変化していることがわかる。すなわち、 $W_f=0.25$ の場合の P は約 4 ピッチの周期 (切りくずの測定番号 No. 3, No. 7 の場合) で変化している。また δ についても、 P の変化の周期にほぼ対応しており、 P が大きいところでは δ が小さく、 P が小さいところでは δ が大きくなっている。これは $W_f=0.25$ の場合のドリル切れ刃の位相角 ϕ が $\pi/4$ rad になるためと考えられる。したがって、ドリルが周期的に振動すると P が 4 回転ごとに最大 (δ が最小) になるものと思われる。

次に、 $W_f=0.5$ の場合は、 $W_f=0.25$ よりさらに、位相角 ϕ が $\pi/4$ rad ずれるので、ドリルが周期的に振動すると P が 2 回転に 1 回の割合で急激な変化が生じ、不規則なピッチの切りくずが生成される。すなわち、 P の変化は $W_f=0.25$ の場合の 1/2 周期で繰返されることになる。一方、 $W_f=0$ の慣性ドリル加工の場合、

Drill dia. = 8mm, Rotational speed = 330min⁻¹,
Feed rate = 0.08mm/rev, Amplitude = 0.08mm

図 8 周波数比と切りくず形状の関係

P と δ は、ほぼ一定になっている。上述の結果から低周波振動ドリル加工における切りくず形状の変化は W_f の値によって大きく左右されるものと思われる。

図8は $W_f=0.25$ と $W_f=0.5$ の場合の切りくず厚さの測定結果を示す。切りくず厚さの測定は、図中の上のスケッチ図で示すらせん状の切りくず（図7において、測定番号2, 3, 4, に当たる部分の切りくず）を電

(a) Cases of $W_f = 0, 0.25$

(b) Cases of $W_f = 1, 2$

Drill dia. = 8mm, Rotational speed = 330min⁻¹,
Feed rate = 0.08mm/rev, Amplitude = 0.08mm

図9 周波数比と切削抵抗の関係

気炉で加熱した後、円板状にし、その外縁に沿って厚さ t （図中の上を示す）を測定した。ただし、図8の上部に示したらせん状の切りくずにつけた番号と円板状の測定位置番号およびグラフ横軸の測定位置番号は対応させてある。図8のグラフからわかるように、 $W_f=0.25$ の場合の切りくずの外縁の厚さ t は山形に変化している。この傾向は図7のピッチの変化の傾向と対応している。すなわち、図7の切りくずの測定番号2, 3, 4の変化は図8の t の測定番号1~10までの変化にほぼ対応している。この理由として、上述したように、位相角が $\pi/4$ radの周期（片刃あたり）で変化するためと考えられる。したがって、 t は4ピッチ（図7の切りくず測定番号No. 3, No. 7の場合）を周期に増減を繰返しながら変化する。そして、 t が周期的に薄くかつピッチの長くなる部分、例えば、らせん状切りくず片の測定番号、No. ①に近いところで、切りくずは折れやすくなるものと思われる。一方、 $W_f=0.5$ の場合の t も、 $W_f=0.25$ の場合とほぼ同様に山形に変化する。すなわち、この場合の t は図7のピッチの変化からも推察できるように $W_f=0.25$ の場合の1/2周期で増減が繰返される。また、 $W_f=0$ の慣用ドリル加工時の切りくず厚さは測定範囲の全域にわたってほぼ一定になっている。したがって、連続状の切りくずが排出されることになる。

4.2 周波数比と切削抵抗の関係 図9は低周波振動ドリル加工（ $W_f=0.25, 1, 2$ ）時と慣用ドリル加工（ $W_f=0$ ）時の切削抵抗（スラスト、トルク）の測定結果を示す。同図には、 S_t の変化もあわせて示してある。図9(a)の $W_f=0.25$ の場合、ある一定の変動幅をも

Drill dia. = 8mm, Rotational speed = 330min⁻¹,
Feed rate = 0.08mm/rev, Amplitude = 0.08mm

図10 周波数比と切削抵抗（静的成分）の関係

つ動的成分(トルク, スラストとも)がかなり大きく現れる。このような動的成分は S_t の断続的な変化によって生ずるものと考えられる。次に, 図 9 (b) には, $W_f=1$ と $W_f=2$ の場合の動的成分が示してある。 $W_f=1$ の場合の動的成分は, 図 9 (a) の $W_f=0.25$ の場合に比べてトルクで約 20 %, スラストで約 35 % 大きくなる。この動的成分の大きい理由は $W_f=1$ の場合の S_t の断続的变化が $W_f=0.25$ の場合より大きくなるためである。また, $W_f=2$ の場合の動的成分は, S_t の値が一定でかつ波状的に変化するため, $W_f=1$ の場合に比べて, かなり小さくなる。

次に, W_f と切削抵抗(スラスト, トルク)の静的成分について検討する。図 10 は W_f を 0~2 に変化させたときの静的成分を比較したものである。図からわかるように, スラストとトルクの静的成分はほぼ似た傾向を示している。そして, $W_f=0$ の慣用ドリル加工の場合の静的成分(スラスト, トルク)が他の場合に比べて最も大きい。また, 低周波振動ドリル加工時の静的成分についてみると, $W_f=0.5$ の場合が最も小さく, $W_f=2$ の場合が最も大きい。また, $W_f=1$ の場合の静的成分は $W_f=0$ に比べて, スラストで約 10 %, トルクで約 15 % 小さい。一方, $W_f=2$ の場合の静的成分はスラストで約 3 %, トルクで約 8 % 小さくなっている。

上述の結果から, スラスト, トルクの静的成分および動的成分は W_f によって変化することがわかる。そして, 動的成分が大きく, かつ静的成分が小さい場合,

切込み厚さが断続的になるので, 切りくず折断に対する効果が大きくなることがわかった。

5. 結 言

(1) 切込み厚さ S_t と周波数比 W_f の関係式を誘導し, S_t が W_f によって連続的あるいは断続的に変化することを図式的に明らかにした。

(2) 切りくずは, W_f によって連続的あるいは断続的に変化する。また, 切りくず各部寸法(ピッチ, 傾角, 厚さ)の変化は, S_t の変化にほぼ対応していることを明らかにした。

(3) 周波数 W_f と切削抵抗(スラスト, トルク)の静的成分, 動的成分との関係および切りくず折断状態との関係を明らかにした。

以上の結果から, 低周波振動ドリル加工時の切りくずの折断効果は S_t と W_f の関係式から推察できることがわかった。これらのことは切りくず処理に対する一指針を示すものであると考えられる。

文 献

- (1) Kahng, C. H., *SME, TECHNICAL PAPER*, MR77 (1977), 348.
- (2) 隅部, 機誌, 67-540 (昭 39), 88.
- (3) FAIRBANKS, H. V., *Ultrasonics International Conf.* (1975), 107.
- (4) Satel, E. A., Poduraev, V. N., Tuktanov, A. G., and Suvorov, A. A., *Russian Engg. J.*, 42-1 (1962), 56.
- (5) Hansen, W., *Automatic Machining*, 2 (1958), 37.

討 論

〔質問〕 隈部 淳一郎〔宇都宮大学工学部〕

(1) 貴報で明らかにされた周波数比と切込み厚さとの関係式は, この方面の研究には大変役に立つ。ドリルを軸方向に低周波振動数領域で振動させながら穴あけすることの最大の目的はなにか。

(2) 黄銅以外, 例えば, ステンレス鋼についても同様な実験結果が得られるか。

(3) 切削中の騒音はどの程度か。

(4) 実験装置の主軸の振れなどの静的精度およびドリルを主軸にチャックしたときの主軸軸方向, 半径方向のばね定数および固有振動数はいくらかお教え願いたい。

(5) 切りくず温度はどの程度か。

〔回答〕 (1) ドリルを低周波振動させ穴あけすることは, 切りくずをコントロール(切りくず厚さの

変化, 切りくずの折断, 切りくず詰まりの緩和)して, 切りくずの流出を容易にし, さらに穴周辺に生じるバリを制御する。したがって, その結果生じる加工穴の精度, ドリル寿命の向上が, 本加工の最大の目的である。

(2) 本研究室では, 被削材がアルミニウム, ステンレス鋼の場合についても実験を行っている。これらの実験結果は, 黄銅の場合と大体似た傾向を示す。しかし, アルミニウムのような延性材料および被削性のよい黄銅に比べてステンレス鋼の場合, 難削性による変形抵抗の違いなどによって, 切りくずの折断に対する効果はいくぶん小さいようである。

(3) 低周波振動ドリル加工中の騒音(油圧関係を含む)を精密騒音計(BRÜEL & KJÆR 製)によって測定した結果, 88 dB {A} であった。慣用ドリルによる

加工の場合の騒音は 76 dB {A} で、低周波振動ドリル加工に比べて 12 dB {A} 低い。この場合、マイクロホンは切削部から 200 mm 離れた位置にセットした。

(4) ドリルをチャックに取付けた状態でのドリルの振れは、マージン最先端に部において 20 μm 以内とした。ドリルを主軸にチャックしたときの固有振動数はキスラー社の圧電加速度計で測定した。その結果、主

軸軸方向、半径方向とも 95 Hz であった。また、半径方向のばね定数を測定した結果、0.48 N/ μm である。主軸軸方向のばね定数は測定していないが、周波数分析の結果から計算すると、6.5 N/ μm となる。

(5) 切りくず温度の測定は行っていない。今後、適当な方法があれば行ってみたいと考える。