

# 低周波振動ドリル加工に関する研究

## Study on the Low Frequency Vibratory Drilling

足立 勝重<sup>1)</sup>  
Katsushige Adachi

吉川 晃<sup>2)</sup>  
Akira Yoshikawa

The drilling process has a large share in machinings and the most economical method of hole machinings. In the recent years, the improvement of manufacturing system in machineshops has become a serious problem. As a mean to achieve the improvement, the application of numerically controlled machine tools for automatic machining system is to be considered. Therefore, it is very useful to find out the effectual methods for the exhaust position and breaking of chip. In order to solve these problems in drilling, some methods such as the use of special drill, vibratory drilling etc. have been adopted.

Under such a present day situation, this type of low frequency vibratory drilling was chosen as one of the subjects of this study.

At first, the cutting mechanism of it was theoretically discussed, that is, it clarified the relation between cutting force variations and chip breaking, cutting angle or cutting speed and frequency rate with periodical variation of chip thickness by applying low frequency vibrations having a phase difference.

Nextly, drilling test related to cutting resistance, chip shape and frequency rate were examined. Moreover, the experimental results were compared with those in conventional drilling.

Obtained results are as follows :

- (1) From this study, the difference between the cutting mechanism of low frequency vibratory drilling and that of conventional drilling was clarified.
- (2) The cutting angle, the cutting speed during low frequency vibratory drilling changed periodically and these changes were remarkably recognized at the part of drill center.
- (3) The relation between the cutting depth and cutting force (static and dynamic components) was clarified.

### 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、もっとも一般的な機械加工の一つと

---

昭和61年5月26日原稿受理

1)2) 大阪産業大学工学部機械工学科

して古くから用いられている。このドリル加工を穴あけ加工能率の向上の観点からみると、切りくず排出の難易度が重要な基本事項としてあげられる。<sup>1)</sup> 一般に、切りくずの排出性をよくするためには、ドリル側の対策と機械側の対策が考えられる。前者は油穴付ドリル、超硬合金ドリルそして深穴用ドリルがある。また、切れ刃にニックをつける方法<sup>2)</sup>などもある。後者としては、自動ステップ方式あるいは周期的に送りを零にするような断続切削などの方法<sup>3)</sup>がある。

筆者は、いままでにドリル刃先に低周波の強制振動を与えながら、切りくず排出性に効果を与えて穴加工する低周波振動ドリル加工の研究<sup>4)</sup>を行ってきた。そして、その効果の一つとしてアルミニウムのバリについて報告<sup>5)</sup>した。ドリル刃先に振動を与えると、切削速度、切削角などが周期的に変化する。また、位相差を与えることによって切り込み厚さが変化し、それにとまって切削抵抗が変動する。この切削抵抗の変動と切りくず破断あるいは切りくず厚さの関係性を調べることは、切りくず処理とかドリル寿命等の解明という点から重要な課題である。

本研究は低周波振動ドリル加工時の周波数比と切り込み厚さ、切削角、切削速度、切削抵抗の関係性を幾何学的に検討した。そして、周波数比に対する切削抵抗の変動などを詳細に解明するために、試作した急停止付振動加工装置でドリル加工実験を行った。実験では、各種切削条件における周波数比と切りくず形状、周波数比と切削抵抗（静的成分、動的成分）などの関係を明らかにした。

## 2. 低周波振動ドリル加工の切削機構の検討

### 2.1 切り込み厚さの変化

低周波振動ドリル加工の加工方式は機械的あるいは電気—油圧方式による振動源を通常の送りをかけながら、ドリルの送り方向に低周波振動を加えて穴加工するものである。従って、ドリル刃先の真実送り量によって、切り込み厚さが変化したりあるいは切り込み厚さが一定でも切削角が周期的に変化する場合など種々の現象が生じる。たとえば、図1 (a) は切り込み厚さが変化する場合と同図 (b) は切り込み厚さが一定になる場合である。すなわち、同図 (a) はドリルの任意切れ刃A、Bに位相差が生じる場合で、切り込み厚さが断続的に変化する。同図 (b) は位相差が零の場合で、切り込み厚さが連続で波状に変化する。いま、これらの変化について、切り込み厚さを求めるために、ドリル送り方向に正弦波の振動を与えると、ある基準位置0から $\theta$  rad回転した位置の切り込み厚さ $S_t$ は切れ刃Aと切れ刃Bの軌跡の差として式(1)のように求められる<sup>6)</sup>。

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

ここで、 $S$ ：送り (mm/rev)、 $a$ ：振幅 (mm)、 $\theta$ ：回転角 (rad)、 $Wf$ ：周波数比 (cycle/rev) すなわち、 $Z/N \{ Z$ ：振動数 (Hz)、 $N$ ：ドリル回転数 (rps)  $\}$  である。式(1)において、ドリル1回転時にたえず $S_t \geq 0$ が生じる場合は切り込み厚さが連続、 $S_t \leq 0$ が生じる場合は断続状になる。また、位相差を与えた場合の切り込み厚さ最大値 $S_t \max$ と最小値 $S_t \min$ は式(1)から次式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} St \max &= \frac{S}{2} + 2a \sin Wf \frac{\pi}{2} \\ St \min &= \frac{S}{2} - 2a \sin Wf \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図2は式(2)から  $St \min = 0$  とした場合の周波数比  $Wf$  に対する切り込み厚さ  $St$  の関係を示したものである。すなわち、振動ドリル加工時のドリル切れ刃は、回転数、送りそして周期的な振動が加わるので切り込み厚さが変化する。従って、 $St \min = 0$  のときは

$$a = S/4 \sin Wf \frac{\pi}{2}$$

で、 $S = 4a$  の条件となる。また、 $Wf = 2$  の場合、切り込み厚さ  $St$  は一定となり、ドリルが振動するだけで切り込み量は変化しない波状面の加工となる。

## 2.2 切削速度の変化

低周波振動ドリル加工は振幅の変化によって、切り込み厚さが周期的に変化するが、同時にドリル切れ刃の切削速度もたえず変化する。そこで、任意の切れ刃での切削速度について検討した。まず、簡単のため図3に示すように、任意の切れ刃半径を  $r$ 、円周方向を  $X$ 、送り方向を  $Y$  として、それぞれの方向の速度ベクトルを考える。そして、ドリルの円周速度を  $V_r$ 、送り速度を  $V_s$  として振動速度を  $V_a$  とすると、ドリルの各切れ刃における切削速度  $V_{cut}$  は式(3)として表される。

$$V_{cut} = V_r + V_s + V_a$$

$$= \sqrt{r^2 + \left( \frac{S}{2\pi} + \frac{da}{d\theta} \right)^2} \frac{N\pi}{30} \quad (3)$$

ただし、 $da/d\theta = a Wf \cos Wf \theta$  である。たとえば、ドリル回転数  $N = 330 \text{rpm}$ 、送り  $S = 0.10 \text{mm/rev}$ 、振幅  $a = 0.10 \text{mm}$ 、周波数  $Z = 60 \text{Hz}$  とした場合の切削速度は  $r = 1 \text{mm}$  のところで、慣用ドリル加工の場合に比べて約5%の速度変化がある。したがって、送り方向速度 ( $V_s + V_a$ ) は円周方向速度 ( $V_r$ ) に比べて変化率は小さいが、切削角  $\phi$  に変化をもたらす。このことは、各切れ刃によって周期的に切りくずの流出速度に変化を与えるので切りくず排出に変化が起こり、ドリル寿命などの加工特性に効果を与えるものと考えられる。つぎに、切削角の変化について検討する。

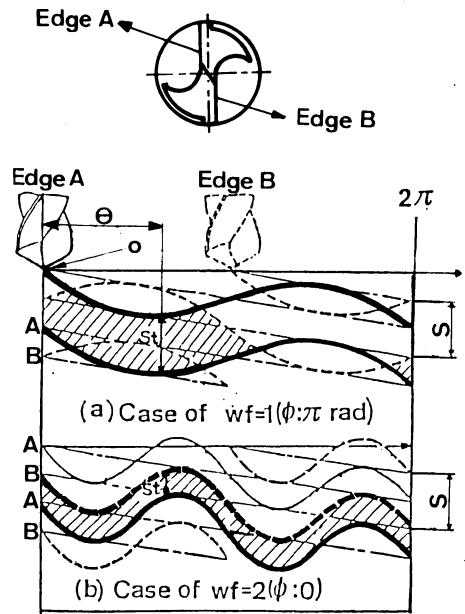


Fig.1 Theoretical chip thickness obtained by phase angles  $\phi$  and feed rate  $S$

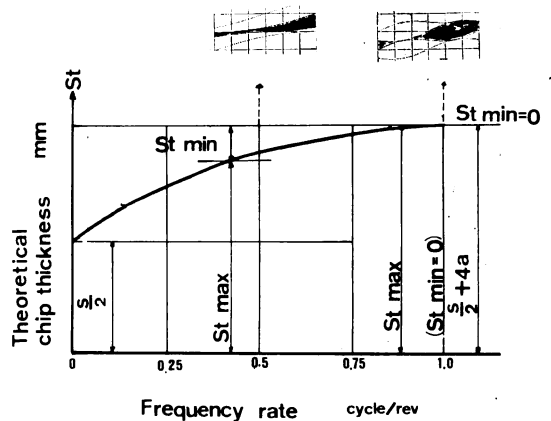


Fig.2 Relation between frequency rate and Theoretical chip thickness

### 2.3 切削角の変化

ドリル切れ刃の任意の半径に対するすくい角、逃げ角の変化について、すでに報告しているので、ここでは、 $V_r$ に対する $(V_s + V_a)$ の角度を切削角 $\psi$  (図3)として求めると式(4)となる。

$$\tan \psi = \frac{S\theta/2 + a \sin Wf\theta}{r\theta} \quad (4)$$

図4は式(4)から、一例として、切り込み厚さが一定となる $Wf = 2$ の場合の $r_1 = 0.75\text{mm}$  (チゼル部)と $r_2 = 4\text{mm}$  (外周部)について求めた結果を示す。図から、 $r_1$ のチゼル部に近い切れ刃の切削角は $\psi \approx 7^\circ \sim -3^\circ$ まで大きく変化する。一方、 $r_2$ の外周部の切れ刃の $\psi \approx 1^\circ \sim -1^\circ$ となり変化が小さいことがわかる。すなわち、ドリル中心部に近い切れ刃ほど振動の効果が大きくなる。

### 2.4 切削抵抗の変化

前節では、切り込み厚さ、切削角そして切削速度が周期的に変化することを明らかにした。つぎに、切削抵抗の変化について検討する。いま、ドリルの先端切れ刃をバイトの刃先とみなして、切り込み厚さが一定の場合の切削抵抗の変化を与える。この場合、切削角は周期的に変化するので切削力も変化する。したがって、図5に示すように、振幅の下り側と上り側においては、ドリルのモーメントとして働く分力 $P_t$ 、 $P_c$ とスラストの分力 $Q_t$ 、 $Q_c$ との関係から主分力 $F_c$ と背分力 $F_t$ が求まる。しかし、理論的に各切削瞬間時の $F_c$ 、 $F_t$ を求めることは困難で、ねじれ角などの変化を無視した場合に近似的に求められる。すなわち、周波数比 $Wf$ によって傾斜角 $\beta$ が生じると、振幅の下り方向 (A点)ではスラストの最大 $Q_{\max}$ 、トルクの最少 $P_{\min}$ になるから $F_{CA}$ 、 $F_{TA}$ は式(5)となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{CA} &= P_{\min} \cos \beta + Q_{\max} \sin \beta \\ F_{TA} &= Q_{\max} \cos \beta + P_{\min} \sin \beta \end{aligned} \right\} (5)$$

同様に、上り方向 ( $\beta$ 点)ではスラストの最小 $Q_{\min}$ 、トルクの最大 $P_{\max}$ になるから $F_{CB}$ 、 $F_{TB}$ は式(6)と表せる。

$$\left. \begin{aligned} F_{CB} &= P_{\max} \cos \beta - Q_{\min} \sin \beta \\ F_{TB} &= Q_{\min} \cos \beta + P_{\max} \sin \beta \end{aligned} \right\} (6)$$

また、ドリル半径方向の単位長さを $dr$ とするとドリルに作用するトルク $P$ 、スラスト $Q$ は

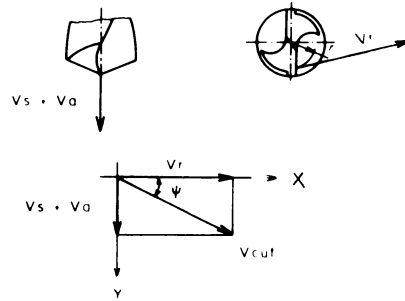


Fig.3 Vector diagram of cutting speed

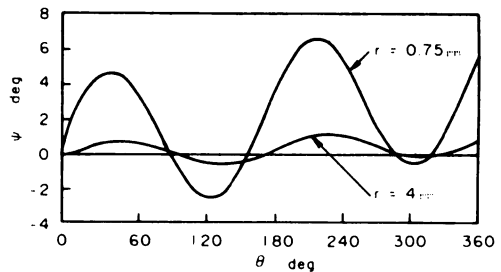


Fig.4 Relation between rotational angle  $\theta$  and cutting angle  $\psi$

式(7)である。

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{3} \quad P &= 2 \int_0^r p r dr \\ Q &= 2 \int_0^r q r dr \end{aligned} \right\} (7)$$

したがって、直径の異なる種々のドリルを用いて、穴を段階的に大きくする下穴加工後の本穴加工時のトルク ( $P_{max}$ 、 $P_{min}$ )、スラスト ( $Q_{max}$ 、 $Q_{min}$ ) の動的な変化を測定すれば、近似的であるがA、B点における半径方向の各点の切れ刃における  $F_c$ 、 $F_t$  が式(5)(6)から求められる。

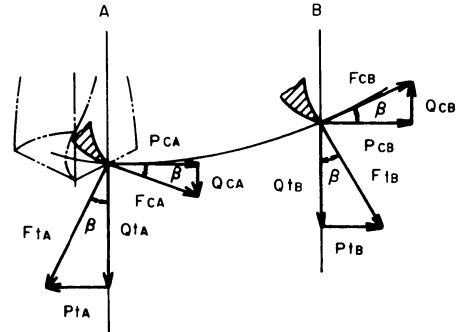


Fig. 5 Cutting forces of twist drill at the points showed as A(Downward) and B(Upward) in vibratory drilling

### 3. 低周波振動ドリル加工の実験的検討

#### 3. 1 実験装置および方法

図6は本研究に使用した低周波振動ドリル加工装置を示す。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、この装置を試作した振動加工装置の主軸部に取り付けている。ドリルは回転と同時に送り方向に最大100Hzまでの低周波の正弦波振動を与えることができる。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型)を使用した。

図7は低周波振動ドリル加工時に発生する切削抵抗の測定結果の一例を示す。図において、切削抵抗の変動の平均値を静的成分とし、静的成分の上下に変動する変動の標準偏差を動的成分として、これらの測定値は電算機で処理した。本実験に使用した被削材は厚さ10mmの黄銅板である。切削は乾式とした。表1に実験条件を示す。周波数比( $Wf$ )はドリル1回転当たり振動回数として表した。 $Wf=0$ は慣用ドリル加工の場合である。

#### 3. 2 実験結果と考察

##### 3. 2. 1 周波数比と切りくず形状の関係

図8は周波数比( $Wf$ )を0~3まで変えた場合の切りくず形状を示したものである。図には上述の幾何学的に考えた式(1)から計算した切り込み厚さ( $St$ )の変化を合わせて示してある。図から、 $Wf=1$ 、3の奇数の場合、 $St$ の変化に対応して断続状の切りくずが生成されることがわかる。一方、 $Wf=2$ の偶数の場合は $St$ が一定となるために連続状の切りくずが排出される割合が大きくなる。

つぎに、送り方向の切り込み厚さに対する切りくず厚さの影響を調べるために、らせん状の切りくず厚さについて検討した。図9は $Wf=0$ と $Wf=1$ の場合の測定結果の一例を示す。この場合、穴あけ深さが2~3mm後のらせん状になった切りくずをとり出し、円板状に焼鈍した後、ポイントマイクロメータで切りくず外縁部にそって厚さを測定した。図からわかるように、 $Wf=1$ の場合の切りくず厚さは $St$ の変化にほぼ対応して約50~100 $\mu m$ の範囲で変化している。一方、 $Wf=0$ の場合は約70~95 $\mu m$ の範囲で変化していることがわかる。すなわち、 $Wf=1$ の場合が $Wf=0$ の場合に比べて切りくずの折断効果が大きい。この理由は位相差

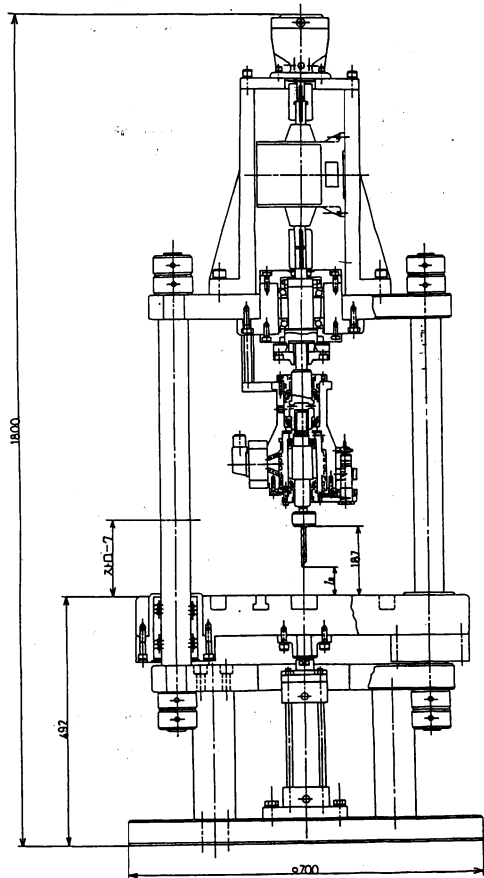


Fig. 6 Experimental apparatus

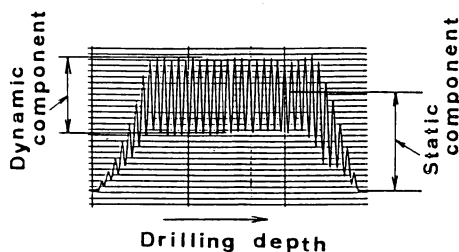


Fig. 7 Model of drilling forces

Table 1 Cutting conditions

Drill dia. $d$ (mm)	8(SKH 9)
Revolution $n$ (rpm)	440
Feed rate $s$ (mm/rev)	0.08
Amplitude $a$ (mm)	0.08
Frequency rate $Wf$ (cycle/rev)	Conventional : 0 Vibratory : 1, 2, 3
Workpiece	(6-4) Brass

によって  $St$  が周期的に変化し、切りくずのピッチ、巻き半径などが異なることによるものと考えられる。

### 3. 2. 2 周波数と切削抵抗の関係

図10は  $Wf = 0 \sim 3$  まで変化させたときのスラスト、トルクの測定結果である。また、 $St$  についても合わせて同図に示してある。図から、

低周波振動ドリル加工時の切削抵抗は  $Wf$  によってかなり変化していることがわかる。特に、 $Wf = 1, 3$  の奇数の場合が  $Wf = 2$  の偶数の場合に比べてトルクの動的成分が大きくなる。また、スラストの動的成分については、トルクに比べて大きな差は認められないが、 $Wf = 2$  の連続の場合が  $Wf = 1, 3$  の断続の場合に比べて小さくなる。一方、 $Wf = 0$  の場合のスラストの静的成分は  $Wf = 1, 2, 3$  の場合に比べて約30%増大し、顕著に差が認められる。

### 3. 2. 3 動的成分の瞬間切削抵抗

動的成分の効果が切りくず形状に与える影響が大きいことから、これらの関係をさらに検討するために拡大波形（瞬間切削抵抗）で調べた。

図11は切り込み厚さの変化が大きい  $Wf = 1$  と変化の小さい  $Wf = 2$  の場合について、それぞれ代表的な切削抵抗の拡大波形を示す。ただし、チゼル部の影響を除いた切れ刃での切削抵抗をみるために、下穴を  $\phi 2$  で加工した場合の被削材に  $\phi 8$  のドリルで穴あけを行った。これら

	$Wf = 0$	$Wf = 1$	$Wf = 2$	$Wf = 3$
St				
Chip				
$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$t_{\text{max}} = 95$ $t_{\text{min}} = 70$	$t_{\text{max}} = 100$ $t_{\text{min}} = 50$	$t_{\text{max}} = 100$ $t_{\text{min}} = 70$	$t_{\text{max}} = 95$ $t_{\text{min}} = 55$

Fig.8 Relation among frequency rate  $Wf$ , theoretical chip thickness  $St$  and chip thickness  $t$

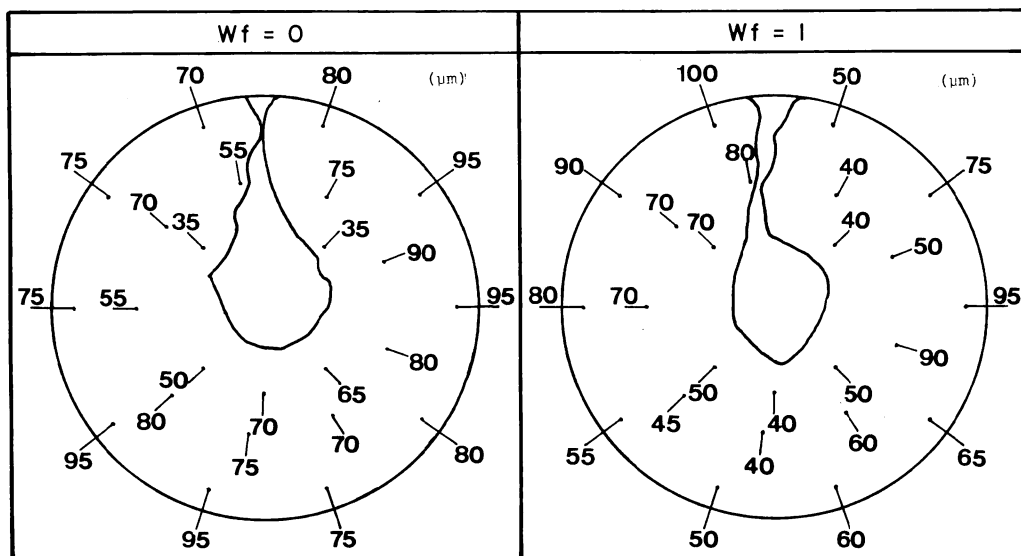


Fig.9 Measured value of chip thicknesses in cases of  $Wf=0$  and  $Wf=1$

の波形からみて、 $Wf=1$ の動的成分が生じる場合はスラストの波形とトルクの波形は時間的に同期して対応している。このような動的成分が周期的に対応する場合は切りくず厚さの変化が大きくなる。この場合は、動的成分が大きくなり、切りくず破断を起こし易くなる。従って、切りくず処理などに効果があるものと考えられる。

一方、 $Wf=2$ の場合は $Wf=1$ の場合と異なり、スラスト、トルクの波形が時間的にずれるという特異な現象が見うけられる。すなわち、スラストの最大でトルクは最小、スラストの最小でトルクは最大になる。この関係については2. 2節で述べたように、 $Wf=2$ のような切

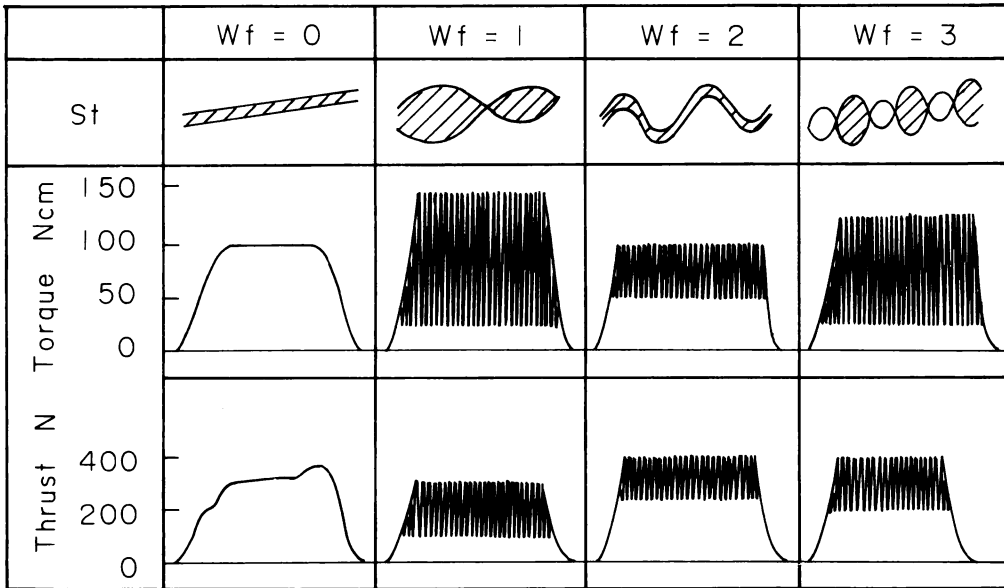


Fig.10 Measured results of cutting force(thrust, torque)

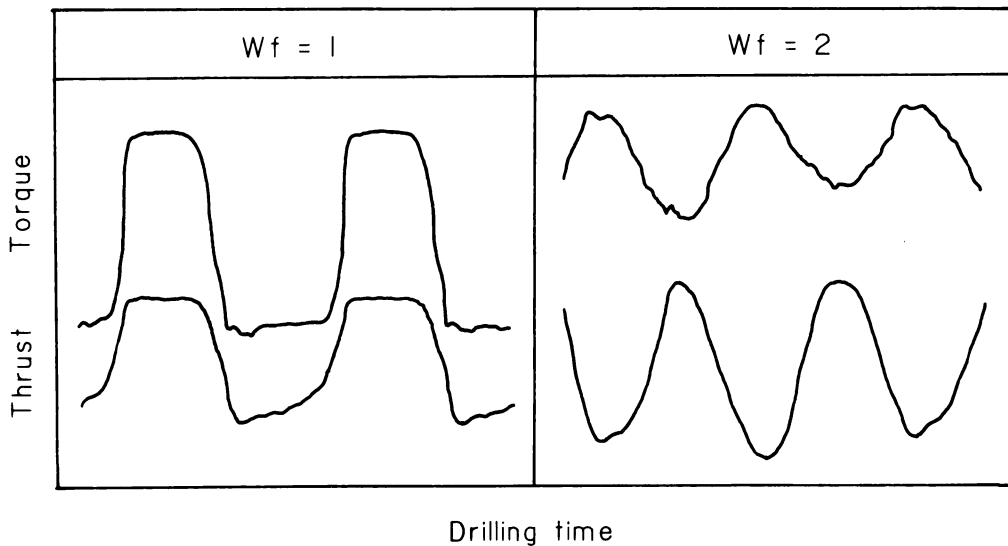


Fig.11 Wave form of thrust and torque in vibratory drilling(in cases of  $Wf=1$  and  $Wf=2$ )

り込み厚さが一定の場合はスラスト、トルクは打ち消すような関係になる。このような波形になるときは切りくずの破断効果が低下する。しかし、前述のようにせん断角、切削角などが周期的に変化するために動的成分が発生する。このような場合は、前節のように切削抵抗（静的、



動的成分)が減少するので、加工精度などの加工特性に効果が得られる<sup>8)</sup>ものと思われる。

また、周波数比Wfが例えば2と3の間で位相差が小数になるような場合の切削抵抗については切り込み厚さStが断続になる場合あるいは連続になる場合によってスラスト、トルクの波形に対する対応関係が異なる。いま、送りsと振幅aの関係がs < aの条件でStが連続となる場合についてみると、ドリルの送り方向の変位と切削抵抗(スラスト、トルク)の関係は図12のようになる。

図12において、位相のずれ( $\phi$ )はWf = i (整数) + j (小数部) とすると  $\phi = j\pi$  で表せる。例えば、 $\phi = 0$  (Wf = 2の場合)の場合のドリル変位とスラスト、トルクの対応関係を求めてみる。すなわちドリル変位は  $Y = Sx/2\pi r + a(x)$  で表され、振幅の傾き角  $\beta = dy/dx$  となる。そこで、 $d^2y/dx^2 = 0$  の条件を求めるとWf x/r = 0で  $\tan \beta = \max$ 、Wf x/r =  $\pi$ で  $\tan \beta$ はminとなる。従って、傾き角 $\beta$ の最大値、最小値の関係は下記の式(8)で表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{下り側} \\ (\tan \beta)_{\max} = s/2\pi r + a Wf/r \\ \text{上り側} \\ (\tan \beta)_{\min} = s/2\pi r - a Wf/r \end{array} \right\} (8)$$

すなわち、Wf = 2の場合、ドリル変位とスラスト、トルクの波形に対する対応関係は、振幅の下り側で  $\tan \beta$ はmaxになる。従って、その点でトルクは最大、スラストは最小となるような時間的にずれて進行する。またドリルの位相のずれがある場合も  $St_{\min} < 0$ の条件であれば、スラストとトルクの対応関係はWf = 2と同様の傾向となる。しかしながら、 $St_{\min} < 0$ の条件の場合、切り込み厚さは断続状となる。従って、スラストとトルクの対応関係はWf = 1の場合と同様の傾向あるいはWf = 1とWf = 2の間断的に波形がずれたりする場合など種々な現象が生じるものと考えられる。

### 3. 2. 3 動的成分と主分力、背分力の関係

切りくず形状はWfが大きな因子となり、それによって動的成分が影響を受けることがわかった。ここでは動的成分の切削力(スラスト、トルク)が主分力、背分力に与える影響について式(5)(6)の関係から検討した。また、Wf = 1の断続の場合は塑性変形と切りくず破断の問題が同時に発生するので問題がある。そこで、簡単のために、通常の二次元切削の応力関係がそのまま適応できるものと仮定して、流れ形の連続切りくずとなるWf = 2の場合について検討した。

実験では、図13(a)に示すようなパイプ状の被削材( $d_2$ :外径、 $d_1$ :内径)を用いて、ドリル中心からの距離に対するスラスト、トルクの関係調べた。同図(b)はスラスト、トルクの実験結果を示す。図からわかるように、スラストについては、チゼルに近い切れ刃の変化が大きく、外周切れ刃に近づくにつれて小さくなる。また、スラストの最大値  $Q_{\max}$  と最小値

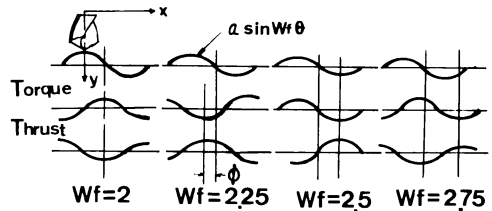


Fig. 12 Relation between phase angle  $\phi$  and periodical variation of wave forms in vibratory drilling forces

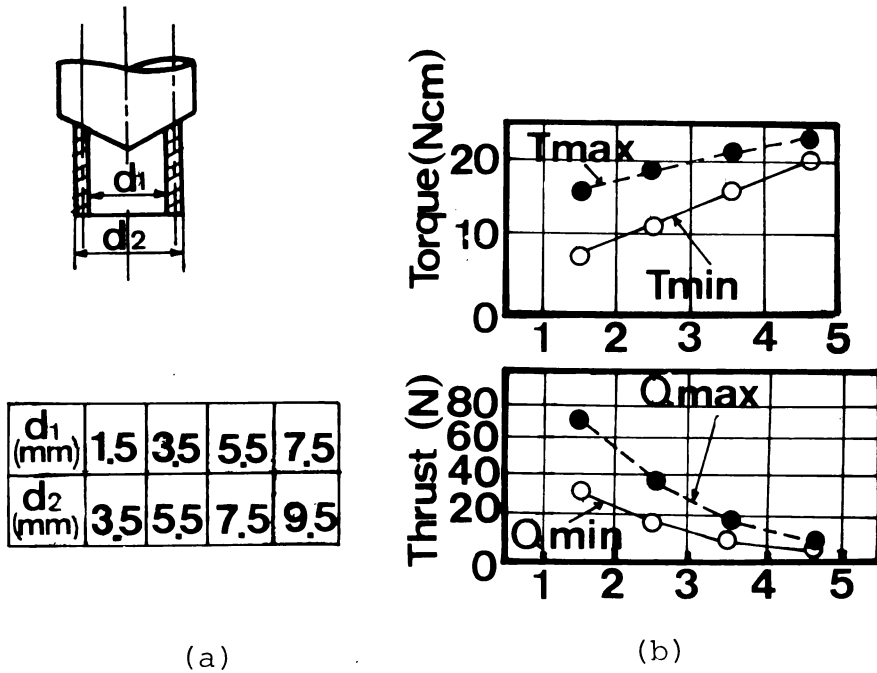


Fig. 13 Experimental values of cutting force(thrust, torque)obtained by prepared hole  $d_1$

$Q_{min}$ の差は外周切れ刃ほど差は小さくなる。一方、トルクについては、スラストの傾向と同様で外周に近い切れ刃ほどトルクの動的成分は大きくなる。次に、図13の実験結果から式(5)(6)と(8)の関係式を用いて、単位幅当りの主分力 $F_c$  (N/mm)と背分力 $F_t$  (N/mm)を求めた。

図14は $F_c$ と $F_t$ を傾斜角の上り(B点)と下り(A点)における計算結果を示す。図から、ドリル中心部に近い切れ刃においては、 $F_c$ 、 $F_t$ の変化が大きく、外周部の切れ刃ほど小さくなるのがわかる。また、ドリル外周部より中心に向かうほど $F_c$ 、 $F_t$ がともに増加するが、上り側の切削の場合がドリル中心に向かってのすくい角の減少率が大きいため、下り側の切削に比べてB点の変化は大きくなる。すなわち、ドリル切れ刃の任意の点においては、単位幅当りの切削力 $F_c$ 、 $F_t$ が同期的に変化する。このことは、切りくず内部の応力変化がおこる。また、2・3節で述べたように切削角の変化と同時にせん断角なども絶えず変化するので、切りくずの流出方向に変化を与えることになり、切削に好影響をもたらすものと定性的に説明できる。

上述の結果から、切削力は周波数比によって種々変化することがわかった。すなわち、周波数比によって切り込み厚さが連続あるいは断続的に変化し、切りくず形状も切り込み厚さの変化に対応して生成させる。しかし、 $Wf=2$ のような切りくずが連続状に排出される場合でも、主分力、背分力が周期的に変化するので切りくず厚さなどにも影響を与える。これらのことは、切りくずの排出機構に効果を与えるものと考えられる。

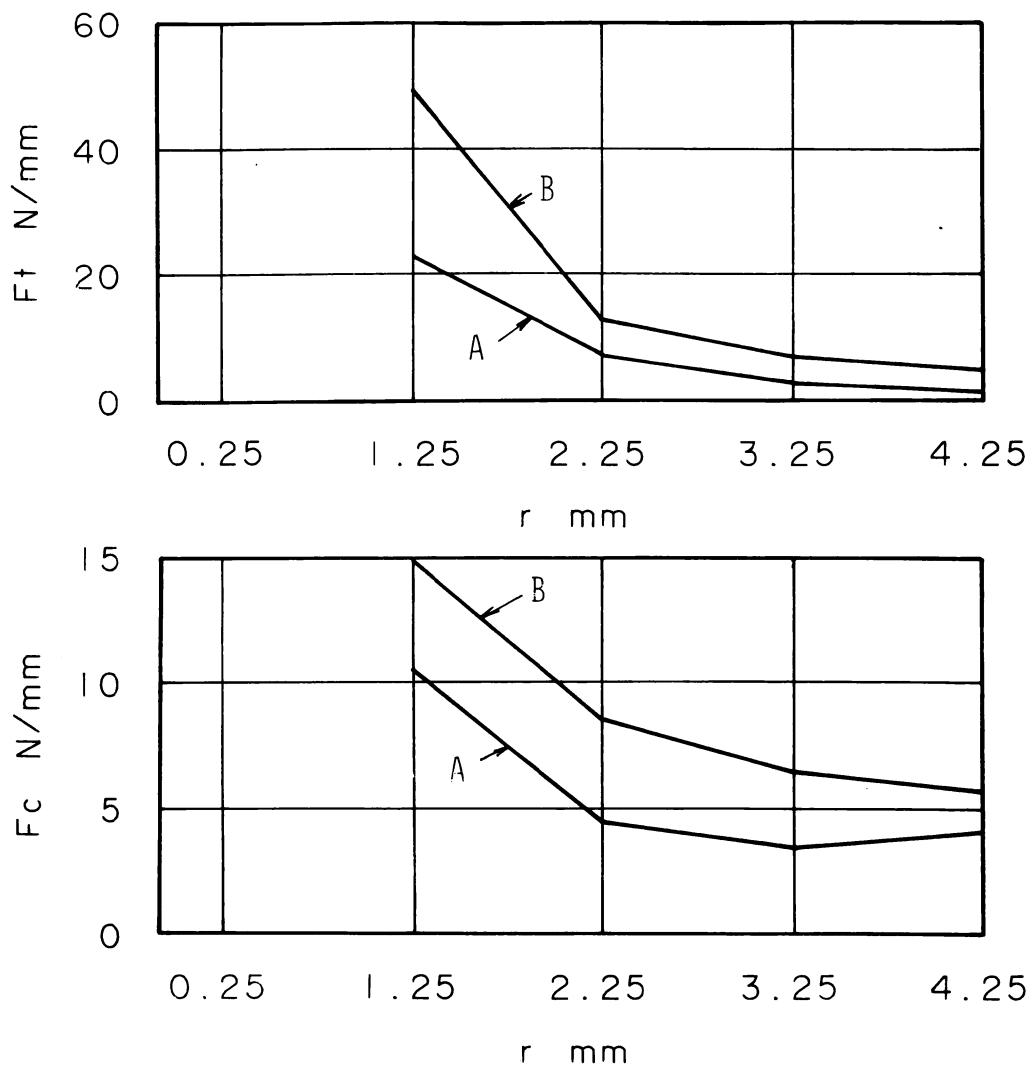


Fig.14 Calculated cutting force  $F_c$  and thrust force  $F_t$  at the points of A(Downward cut) and B (Upward cut)

#### 4. 結言

低周波振動ドリル加工時の切削機構の理論的考察を行い、黄銅を用いたドリル加工実験の結果、次のような結論を得た。

- 1) 幾何学的切り込み厚さ  $St$  を求める式を導き、 $St$  が一定となる場合のスラスト、トルクを主分力、背分力との関係式を求めた。
- 2) 切削角、切削速度は位相差を与えることによって回転方向、半径方向に変化する。そして、ドリル中心付近の切れ刃ほどそれらの変動の差が大きくなることが判明した。
- 3) 周波数比  $Wf$  と切りくず形状の関係については、 $St$  の変化にほぼ対応した切りくずが排

出される。すなわち、 $W_f$  が 1、3 の奇数の場合の切りくずは断続状になり、 $W_f$  が 2 の偶数の場合の切りくずは連続状になる。また、切りくず厚さの関係については、 $W_f = 1、3$  の場合、 $S_t$  の変化に対応して大きく変化する。一方、 $W_f = 2$  の場合は、 $S_t$  が一定となり、切りくず厚さの変化も小さくなる。

4) 周波数比  $W_f$  と切削抵抗の関係については、 $W_f$  によって動的成分は変動する。その変動の大きさは  $W_f$  が偶数の場合より奇数の場合が大きくなる。 $W_f$  が小数の場合の動的成分は  $S_t$  の変化に対応して変動する。また、静的成分については、トルクに対する  $W_f$  の影響は小さく、スラストに対する影響は大きくなる。すなわち、振動ドリル加工時のスラストは慣用ドリル加工の場合に比べて約 30% 減少する。

5) 動的成分の拡大波形（瞬間切削抵抗）は  $W_f = 2$  の場合、スラスト、トルクの波形が時間的にずれる。しかし、 $W_f = 1$  の場合波形はスラスト、トルクが同期して時間的に対応することがわかった。

6) 切り込み厚さが一定となる場合の切削抵抗（動的成分）を用いて、主分力 ( $F_c$ )、背分力 ( $F_t$ ) を定量的に計算した結果、ドリル中心部に近い切れ刃においては、 $F_c$ 、 $F_t$  が大きく、外周部に近い切れ刃の変化は小さくなる。この  $F_c$ 、 $F_t$  が周期的に変化するので切りくずの排出抵抗が減少し、加工特性に好影響を与えるものと考えられる。

なお、本研究は昭和 59 年度大阪産業大学特別研究費によるものであることを付記し、感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- (1) 中山一夫他 2 名：精密機械，43，4（1977）427.
- (2) 小川誠他 2 名：精密機械，50，10（1984）1659.
- (3) I. G. Mansyrev：Machine & Tooling 47，2（1976）39.
- (4) 足立勝重：機械の研究，31，11（1979）1276.
- (5) K. Adachi et proceedings of the 5th I. C. P. E Tokyo 1984.
- (6) 足立勝重：昭和 56 年度精機学会秋季大会学術講演論文集，（1981，10）223.
- (7) 足立勝重他 2 名：精密機械，42，12（1976）47.
- (8) 足立勝重他 2 名：精密機械，43，1，（1977）55.