振動マルチワイヤソーに関する研究*
(第1報, 装置の原理と基礎実験)石川 憲一^{*1}, 諏訪部 仁^{*2}A Study on Vibration Multi-Wire Sawing
(1st Report, Principle of Apparatus and Basic Experiment)

Ken-ichi ISHIKAWA and Hitoshi SUWABE

In the present paper, a method of vibration multi-wire sawing is devised as a technology utilizing mechanical vibration energy in regard to slicing hard and brittle materials represented by various ceramics. Results obtained through the theoretical analysis and a series of basic experiments are as follows: (1) When the natural frequency of the wire is much greater than the forced frequency, the motion of the wire is that of a straight line (no waves are created). (2) As the amplitude of the wire is increased, the contact interval of the wire gradually approaches 50%. (3) Machining efficiency is proportional to the cutting time, and the machining efficiency of vibration cutting is nearly double that of ordinary cutting. (4) There is scarcely any effect on machining efficiency for the phase angle in this experiment. (5) When the amplitude of wire is larger than the static deflection of the wire, machining efficiency is increased.

Key Words: Multi-Wire Sawing, Vibration, Slurry, Contact Interval of Wire, High Machining Efficiency

1. 緒 言

最近の工学の目覚ましい発達によりセラミックスなどの非常に硬くて、高強度の新素材が数多く開発されつつある。これらは、優れた電磁氣的機能や機械的性質によって電子デバイス素子材料や機械構造用部材として従来の金属材料のみでは成し得なかった部分に利用されるようになってきた。そして、それに伴い、より高精度および高能率の加工法の開発が要求されるが、それらが有する機械的性質に依存して金属材料に比較し極端に加工が困難となっている。

現在、硬ぜい材料の加工法としては、力学的エネルギーを利用した方法(外周刃, 内周刃, マルチワイヤソー, マルチブレードソーなどの各切断方式), 電気的エネルギーを利用した方法(放電加工, 電子ビーム加工, マイクロ波加工など)および光学的エネルギーを利用した方法(レーザ加工)が挙げられる⁽¹⁾。しかしながら, 被加工物の形状, 要求される生産性, 精度および表面性状などによってこれらの加工法の適用範囲が限定さ

れる。本研究においては前述の加工法のうち, 振動多刃方式⁽²⁾にひきつづいて力学的エネルギーを利用した機械的加工法の一つであるマルチワイヤソーを基礎として, 商用電源周波数領域の調和振動を利用した振動マルチワイヤソー方式を新たに考案した⁽³⁾。そこで, 本報告においてはその製作した装置の原理および特性について述べるとともに, その装置を用いて得られた簡単な実験結果についても報告するものである。

2. 工具の挙動

2.1 ワイヤ機構 図1に通常用いられるマルチワイヤソーを基礎として新しく考案された振動マルチワイヤソーのワイヤ機構図を示す。図1において, 新線ボビンから送り出されたピアノ線ワイヤは上方に送られシーソー機構を構成する右側の滑車群に数回程度巻き付けられる。そして, ワイヤは加工部にセットされた4個の多溝滑車の右側2個の多溝滑車に2回巻き付けられた後, 左右4個の多溝滑車に15~20回程度巻き付けられ, 左側の2個の多溝滑車に2回巻き付けられる。その後, 上方のシーソー機構である左側の滑車群に数回ほど巻き付けられ, 巻取ボビンにて回収される。ワイヤの送出し速度は新線ボビン側に取付けられたギヤモータの回転数を調整することにより決定さ

* 昭和63年3月15日 東海支部第37期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年8月3日。

^{*1} 正員, 金沢工業大学(〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)。

^{*2} 准員, 金沢工業大学大学院。

れる。また、ワイヤ張力は巻取ボビン側に取付けられたトルクモータの回転トルクを管理することによって調整される。

ワイヤ駆動は、ワイヤ駆動用モータの回転がフレキシブルなシャフトを介して加工部の多溝滑車に伝達され、それによってワイヤは一定速度で走行する。シーソー用滑車は左右方向に移動可能なスライダ上に案内されている。そして、ワイヤが駆動用モータの回転により走行すると、このスライダ上の滑車群も左右方向に移動し始める。スライダの両端にはリミットスイッチが取付けられており、このスイッチに滑車の一端が接触するとワイヤ駆動用モータが反転する機構となっている。

2・2 ワイヤに付加される振動 振動マルチワイヤソー方式に関し振動を付加させる方法としては、(1)ワイヤ側を振動させる場合と、(2)被加工物側を振動させる場合が考えられる。また、作用する振動は鉛直平面内において、(1)切断方向、(2)ワイヤ走行方向、(3)鉛直方向内における任意の方向などが考えられる。本研究においては、被加工物の質量の変化に依存せず共振振動数を一定に保つために、平行ばねで支持された多溝滑車に左右独立して商用電源周波数以下の調和振動を付加させることにした。また、ワイヤ走行方向および鉛直平面内における任意の方向に振動を付加させる方法については別の機会に譲るものとする。

2・3 ワイヤの挙動 図2に示すように右側の滑車には $y_R = a \sin \omega t$ なる調和振動が、また左側の滑車には右側の振動に対して位相差 θ を有する調和振動 $y_L = b \sin(\omega t + \theta)$ が作用する場合を考える。ここで、 a, b : 振幅、 ω : 円振動数 ($=2\pi f$)、 f : 振動数、 t : 時間とする。

ワイヤ走行方向の任意の地点 x で時刻 t におけるワイヤの変位を $y(x, t)$ とすると、ワイヤの挙動を記述する運動方程式は、

$$\partial^2 y(x, t) / \partial t^2 = C \partial^2 y(x, t) / \partial x^2 \quad \cdots (1)$$

として表される。ここで、 C : 伝ば速度 ($=\sqrt{T/\rho}$)、 T : ワイヤ張力、 ρ : ワイヤの線密度。

励振されたワイヤの挙動を考察するに際して、まず、図2に示すようにワイヤの左端 ($x=0$) を固定し、右端 $x=l$ の地点を振幅 a 、円振動数 ω で正弦振動させると変位 $y(x, t)$ は、

$x=0$ のとき

$$y(0, t) = 0 \quad \cdots (2)$$

$x=l$ のとき

$$y(l, t) = a \sin \omega t \quad \cdots (3)$$

となる。

ワイヤは強制力と同じ振動数で変位するものとする。任意の地点 x におけるワイヤの変位 $y(x, t)$ は、

$$y(x, t) = y(x) \sin \omega t \quad \cdots (4)$$

となる。ここで、 $y(x)$: 任意の地点 x におけるワイヤの変位振幅。

次に、式(4)を式(1)に代入すると、

$$d^2 y(x) / dx^2 + \omega^2 / C^2 y(x) = 0 \quad \cdots (5)$$

を得る。

この式(5)を式(2)、(3)の境界条件のもとで解くと、

$$y(x, t) = a \sin(\omega x / C) \sin \omega t / \sin(\omega l / C) \quad \cdots (6)$$

となる。また、同様に左端にも右端の振動に対して θ という位相を持った調和振動が作用しているために重ね合わせの原理により、

$$y(x, t) = a \sin\{\pi(f/f_0)(x/l)\} \sin \omega t / \sin \pi(f/f_0) + b \sin\{\pi(f/f_0)(l-x)/l\} \sin(\omega t + \theta) / \sin \pi(f/f_0) \quad \cdots (7)$$

が導かれる。ここで、 l : ワイヤ長さ、 f_0 : ワイヤの固有振動数 ($=\sqrt{T/\rho}/2l$)。式(7)で示されるようにワイヤの強制振動数 $\leq$ ワイヤの固有振動数の場合には、ワイヤは直線的に振動をすることがわかる。

図3および図4に式(7)の計算結果を示す。図3は $\theta=0$ のときにワイヤは直線的に上下方向に移動するのみである。また、図4は $\theta=180^\circ$ のときに $l/2$ の点

図1 ワイヤ機構

図2 ワイヤに作用する振動

を中心に点対称の波形をえがくように振動している。

実際にこれらのワイヤ挙動は、左右の多溝滑車に調和振動を付加させたとき ($f_0=943$ Hz, $f=60$ Hz, $T=19.6$ N, $l=150$ mm) のワイヤ挙動の写真を撮影した結果、位相差 $\theta=0$ と $\theta=180^\circ$ のとき、図3, 4に示したワイヤ挙動の計算結果と同様な動きをしていることがわかった。

2.4 ワイヤと被加工物相互間の接触率 振動マルチワイヤソー方式においてスライシング加工を行う場合、左右の多溝滑車に付加される調和振動の位相差が零で左右の振幅が等しいとすると、式(7)よりワイヤの変位は、

$$y = a \sin \omega t \quad \cdots \cdots (8)$$

として、図5のように表される。

マルチワイヤソーに用いられるワイヤは弾性体であるために、実際の加工時においては作用する加工荷重のために δ だけ静たわみを生じる。そのたわみ δ によって図5に示すようにワイヤは時刻 $t_1 \sim t_2$ の間では被加工物と分離することになる。したがって、ワイヤが被加工物から分離し始める時刻 t_1 は、

$$t_1 = \sin^{-1}(\delta/a)/\omega \quad \cdots \cdots (9)$$

となる。ここで、 $\delta \equiv W(l-B)/(4T)$, W : 加工荷重, B : 被加工物幅。

また、被加工物から分離したワイヤが再び被加工物と接触し始める時刻 t_2 は、

$$t_2 = (\pi/\omega) - \sin^{-1}(\delta/a)/\omega \quad \cdots \cdots (10)$$

となる。

よって、振動一周期間におけるワイヤの分離時間 τ は、

$$\tau = t_2 - t_1 = \{\pi - 2 \sin^{-1}(\delta/a)\}/\omega \quad \cdots \cdots (11)$$

となる。

ゆえに、ワイヤの接触率 η [%] は、

$$\eta = \{(2\pi/\omega - \tau)/(2\pi/\omega)\} \times 100 \\ = \{1/2 + (1/\pi) \sin^{-1}(\delta/a)\} \times 100 \quad \cdots \cdots (12)$$

と表される。

式(12)からわかるように、ワイヤの接触率は振幅が加工荷重によるワイヤの静たわみ量より大きくなるまでは100%を保つ。その後、振幅が増加するにつれて減少傾向を示し、ワイヤ接触率は最終的に50%に近づく。

3. 実験結果および方法

図6に2章で考案した原理にもとづいて設計製作された振動マルチワイヤソー装置の概略図を示す。実験方法としては、駆動用モータ⑦の回転を調整してワイヤ走行速度を50~70 m/minに設定し、数分間慣らし運転を行う。その後、駆動用モータの回転を止めワイヤ張力を測定する。これを実験設定ワイヤ張力になるまでトルクモータ⑤の回転トルクを調整しながら繰返す。また、ワイヤ張力の測定は加工部のワイヤに質量0.2 kgのおもりをつり下げ、そのときのワイヤのたわみを測定することによって行われる。そして、ギヤモータ⑩を回転させることによって、2~3 m/min程度の速度でワイヤを新線ポビンから送り出し、ワイヤを実験設定値で走行させることにより慣用切断が行われる。

被加工物⑬は上下方向に移動可能なスライドに案内

図3 $\theta=0$ 時のワイヤの軌跡

図4 $\theta=\pi$ 時のワイヤの軌跡

図5 振動一周期間のワイヤ挙動

された加工台⑭上に固定される。そして、それらは同図に示すようにバランスウェイト方式によって加工荷重を設定する。スラリーは加工液供給装置より連続的に加工部に供給されるとともに自動的に回収される。

低周波発振器からの信号は位相差計を通して電力増幅器に送られた後、左右の加振機③に入力される。そこで生じた調和振動は振動テーブル⑨を介して4個の多溝滑車に伝達される。このときの左右の多溝滑車に加えられる調和振動の位相は位相差計によって調整される。このようにして振動切断が行われる。

主な実験条件を表1に示す。

4. 実験結果および考察

図7にはワイヤ接触率と振幅の関係を示す。実線は理論値で、点は実験値である。実験値は装置にセットしたワイヤと被加工物間に乾電池を用いて通電しオシロスコープ上でワイヤの接触および分離を測定することによって求められる。その結果、実験値と理論値はほぼ一致した。

加工量と加工時間の関係を図8に示す。図8は慣用切断と振幅1 mm、振動数60 Hzの振動切断の場合で、

表1 実験条件

Working load	w	0.33~0.98 N/wire
Frequency	f	60 Hz
Amplitude	a	0~1.0 mm
Phase angle	θ	0~180 deg
Wire running speed	V	100 m/min
Feed speed of new wire		2~3 m/min
Wire diameter		$\phi 0.2$
Wire tension	T	19.6 N
Slurry and concentration		Gas oil + GC [®] 2000 (45%wt)
Workpiece		Glass
Working length	b	100 mm

図6 実験装置概略

慣用切断および振動切断ともに時間の経過に対してほぼ直線的に増大していくのがわかる。また、本実験条件下では振動切断のほうが慣用切断より2.5倍ほど加工量が多い。

図9に振幅と加工能率の関係を示す。本報における加工能率とは1 min当たりの切込み量のことである。本実験条件においてはワイヤの静たわみ δ は理論上0.42 mmとなるため、図9においても振幅が0.42 mmとなりワイヤの静たわみを超えて分離しだすまで加工能率はほぼ一定値を示す。そして、その後は振幅の増加とともに加工部への砥粒の進入効果の増大によって、加工能率は増加の傾向を示す。しかし、振幅が0.75 mmを超えた付近からは加工能率の増加量は減少してくる。これは、有効砥粒の進入効果の増大より接触率の減少効果の影響のほうが大きくなるためと考えられる。

図7 振幅とワイヤ接触率の関係

図8 加工量と加工時間の関係

図9 振幅と加工能率の関係

図10に加工能率と位相差との関係を示す。位相差が $0 \rightarrow 180^\circ$ へ変化すると、加工能率は若干減少する傾向を示した。これは、位相差が零でなくとも図4に示したようにワイヤは平行運動をしなくなる。それゆえ、加工初期においては被加工物が直方体をしているために、その角の部分のみがワイヤと接触しその他の部分ではワイヤと被加工物は十分接触しない状態を生じ、接触率は $\theta=0$ のとき63%であるのに対して $\theta=180^\circ$ のとき27.6%まで減少する。しかしながら、その後加工が進むと被加工物の切断部はある曲率を持つため、例えば位相差 $\theta=180^\circ$ のとき、ワイヤの片端の変位がワイヤの静たわみより小さい場合にワイヤは被加工物の片端から中央部付近まで接触し、その反対側は接触をしなくなる。このような状態を交互に繰り返すために、任意の地点におけるワイヤと被加工物の間の接触率は位相差零とほぼ同様の値となる。このように加工初期において生じた状態によって若干加工能率が減少する傾向を示すものと思われる。

5. 結 言

セラミックスなどの硬ぜい材料のダイシングやスラ

図10 位相差と加工能率の関係

イシングに関して、通常用いられるマルチワイヤソーに振動を付加させる振動マルチワイヤソー方式を考案するとともにその装置を製作し、種々の解析や基本的な加工特性について言及した結果、以下に述べるような事項が明らかとなった。

- (1) ワイヤの強制振動<ワイヤの固有振動数の条件を満たすときワイヤはほぼ直線的に振動する。
- (2) ワイヤ接触率はワイヤの振幅が大きくなるにつれて50%に徐々に近づく。
- (3) 加工量は振動切断、慣用切断とともに時間に対してほぼ直線的に増加する。また、振動切断のほうが約2.5倍ほど加工量が多い。
- (4) 加工能率は位相差が $0 \rightarrow 180^\circ$ に変化してもその影響をほとんど受けない。
- (5) ワイヤの静たわみより振幅が大きくなると加工能率は増加し始め、振幅が0.75 mm付近からは加工能率の増加量は減少の傾向を示す。

文 献

- (1) 杉田・ほか4名, セラミックスの機械加工, ((昭60), 204, 眞賢堂。
- (2) 石川・市川, 精密機械, 49-12 (昭58), 1607。
- (3) Ishikawa, K., U. S. Patent, No. 4574769 (1986)。