楕円振動切削加工法 (第1報)*

—加工原理と基本特性—

社 本 英 二** 森 本 祥 之*** 森 脇 俊 道**

Elliptical Vibration Cutting (1st Report)
- Cutting Principle and Basic Performance -

Eiji SHAMOTO, Yoshiyuki MORIMOTO and Toshimichi MORIWAKI

The present paper presents a new cutting method named "Elliptical Vibration Cutting". Synchronized two-directional vibration is applied to the cutting edge in the plane including the cutting direction and the chip flow direction. The chip formed is mainly pulled out by the tool while the tool moves in the chip flow direction, and then the tool is restored to the cutting point without cutting in each cycle of the vibration. Orthogonal cutting experiments of copper are carried out within a scanning electron microscope, and it is confirmed that chip thickness, cutting force and cutting energy are reduced remarkably by applying the method proposed. Generation of burr is restrained, and quality of finished surface is also improved.

Key words: elliptical vibration cutting, chip thickness, cutting force, lubrication

1. 結 言

切削加工法は、基礎的かつ代表的な機械加工法であり、あらゆる工業製品を製造する上で最も重要な基盤技術の一つである。このため、切削加工における被削性を向上させることを目的として数多くの研究が行われてきている。切削機構の観点から考えると、工具すくい面における摩擦力の低下、すくい角の増大、被削材料の変形破壊特性の改善などが被削性を向上させる上で最も重要であると考えられる。こうした観点から、例えば高圧クレーントの供給¹⁾、ロータリ工具²⁾や拘束工具の適用³⁾、快削材の開発⁴⁾⁵⁾、振動切削加工法の適用⁶⁾⁷⁾などが試みられている。中でも、切りくずと工具すくい面の間に働く摩擦力は、被削性を向上させるための根本的な“妨げ”になっており、従来の手法ではこの摩擦力を“減少”させることによって、切削力や切削熱の発生を低減し、ある程度被削性を向上させることに成功している。

これに対して本研究では、工具に楕円振動を付加することによって、すくい面上での摩擦力の方向を“反転”し、この摩擦力を逆に“利用”して切りくずの排出を促進する新しい切削加工法(楕円振動切削加工法と呼ぶ)を考案している⁸⁾。本手法では、すくい面上での摩擦力を制御し、例えば反転することさえも可能であるため、従来の手法に比べて大幅な切削力の減少、切削熱発生の抑制などを期待することができる。

ここでは、まず幾何学的に工具の軌跡を算出することによって、提案する楕円振動切削加工法の加工原理について検討を行う。次に、走査型電子顕微鏡内部で楕円振動切削加工を行い、切削過程の直接観察等によってその特性を明らかにする。具体的には、切りくず厚さや切削力の減少、仕上げ面性状の向上、バリの発生の抑制などの効果を確認するとともに、切削に必要なとされるエネルギーを切削力の測定値から算出してその値が大幅に減少することを示す。

2. 楕円振動切削加工法の原理

図1は楕円振動切削加工法における切削過程を示している。本切削実験においては二次元切削加工を行い、被削材に切削運動を与えるが、ここでは理解を容易にするため、工具に対して切削運動と楕円振動の両方を付加している。図中に破線で示す工具刃先の軌跡は、図の下に示す加工条件を仮定し、コンピュータによる数値計算によって描いたものである。

本手法では、切削速度(平均的な切削速度)に比べて、切削方向の最大振動速度が十分に大きくなるように加工条件を設定し、図に示すような間欠的な切削を行う。図(a)から(d)に示す切削過程は、楕円振動切削加工の一周周期を表しており、図(a)においては、工具は切りくずから離れた状態にあって下方に移動している。その後、図(b)に示すように切削を開始し、極めて微小な切込みで仕上げ面を生成した後、図(c)に示すように工具は主に上向きの速度をもって材料の除去を行う。図(d)に示す瞬間において切削方向の速度成分がゼロになり、工具は切りくずから離れて再び図(a)の状態に戻る。

以上のように、実際に切削を行っているのは図1(b)から(d)までの期間であり、この間の工具の運動が重要である。仕上げ面は、図1(b)に示されるように切削開始直後に生成され、この時の切込み量は極めて小さい。主な材料除去は、図1(c)に示されるように、工具すくい面が前回までに生成した切りくずに接触してから行われる。図1(b)に示されるように切削開始直後には、工具の運動速度の切込み方向成分が切りくず流出速度より小さいため、従来の切削方法と同様に切りくず流出を妨げる方向の摩擦力が生じる。その後、次第に工具運動速度の切込み方向成分が大きくなり、切りくず流出速度を上回ると摩擦力の方向が反転する。

以上に述べたように、楕円振動切削加工法では、従来切りくず排出の妨げとなっていた摩擦力を逆に利用し、切りくずを引張り出す方向に変えることが可能である。その結果、せん断角が増大し、せん断面積が減少することで切削抵抗が減少する。

また、上述の摩擦力の方向が反転する期間は、楕円振動の軌跡や周波数によって変化すると考えられ、これを利用して平均的な

* 原稿受付 平成7年9月25日

** 正 会 員 神戸大学工学部(神戸市灘区六甲台町1-1)

*** 住友電気工業(株)(伊丹市昆陽北1-1-1)

Cutting speed: 16 m/min, Depth of cut: 30 μm , Frequency of vibration: 40 kHz,
Amplitude of vibration in cutting direction: 10 μm , Amplitude of vibration in thrust direction: 15 μm

Fig. 1 Principle of elliptical vibration cutting

摩擦係数を任意に制御することや、見かけ上マイナスにすることも可能であると考えられる。

3. 走査型電子顕微鏡内楕円振動切削装置と加工条件

本研究では、提案する楕円振動切削加工法の基礎的な切削機構について検討し、その特徴を明らかにするため、次のような切削実験を行う。まず、楕円振動の一周周期内における切削過程を詳細に検討するため、振動の周波数及び切削速度を低くし、図2に示すように、走査型電子顕微鏡 (SEM) 内部で加工実験を行って切削過程の直接観察を行う。図3は、SEM 内部で楕円振動切削を行うことができるように開発した小型の二次元楕円振動切削加工装置を示している。本装置では、工具に二つの圧電素子を互いに直角に取り付け、各々に加える電圧の周波数、振幅や位相差を変化させることによって任意の刃先振動軌跡を得ることが可能である。これらの圧電素子に加える電圧は、図2に示すように走査型電子顕微鏡の外部から供給する。また、被削材には、顕微鏡外部に固定したモータによって一定速度の切削運動を与え、これによって切削を行う。切削力は、工具下方に取り付けた圧電型の3分力動力計により測定する。この場合、工具に振動を付加すると、それだけで動力計には工具部分の質量による慣性力が測定されてしまう。本実験では、その値は常に測定すべき切削力の 1/10 以下であったが、より正確に切削力を求めるため、切削中の測定値から

上述の慣性力を差し引いて切削力を算出した。

本研究では、比較のために普通の切削加工法および一般的な従来方式の振動切削 (以後従来振動切削と呼ぶ) 加工法による加工実験も行い、これらの方法に対する楕円振動切削加工法の特徴について比較・検討する。このため、切込み量と切削速度は一定とし、工具に与える振動のみを次のように変化させる。まず普通切削の場合には、工具に振動を与えない。従来振動切削では、工具に対して切削方向の直線的な振動を付加する。ただし、この振動方向が完全に切削方向に一致すると、逃げ面が常に被削材に接触し、工具摩耗等の問題が発生するため、通常は工具逃げ面が仕上げ面から離れる側に振動方向を若干傾斜させて加工を行う⁶⁾⁷⁾。そこで本研究でも従来振動切削の場合には、振動方向を切削方向から約 20° 傾斜させた直線振動を付加する。その片振幅は 5 μm とする。楕円振動切削の場合には、ここでは円振動を付加し、その軌跡の半径を 5 μm とする。振動の周波数については、観察を容易にするために 1.2 Hz とする。

主な実験条件をまとめて表1に示す。被削材には、被削性の良い無酸素銅を用い、切削幅は 0.25 mm とする。工具材質は高速度工具鋼とする。工具のすくい角、逃げ角は、それぞれ 0°、30° とする。ただし楕円振動切削においては、振動の周期内で常に瞬間的な切削方向が変化するため、これに伴って瞬間的なすくい角と逃げ角は変化する。工具の刃先丸み半径については、普通切削実

Fig. 2 Cutting experiment within scanning electron microscope

Fig. 3 Microcutting device with elliptical vibration tool

Table 1 Experimental conditions

Tool	Material	High speed steel
	Rake angle	0°
	Relief angle	30°
Workpiece	Material	Oxygen free copper
	Width(Cutting width)	0.25 mm
Vibration	Ordinary cutting	No vibration
	Conventional vibration cutting	One directional vibration mainly in cutting direction Freq.: 1.2 Hz, Amp.: 5 μ m
	Elliptical vibration cutting	Circular vibration Freq.: 1.2 Hz, Radius: 5 μ m
Cutting conditions	Cutting speed	260 μ m/min
	Depth of cut	10 μ m

験の途中で切削運動を急停止し、被削材側に転写された形状として測定を行った。その結果、ここで使用した工具の刃先丸み半径は約 1 μ m であった。

4. 楕円振動切削加工法による加工結果

各切削加工方法によって得られた切りくずの SEM 写真を図 4

に示す。これらの写真は、切削運動を急停止して工具を取り除いた後に撮影したものである。また図 5 は、加工中に測定した切削抵抗である。普通切削の場合の横軸は時間を表しているが、従来振動切削および楕円振動切削の場合の横軸は、工具振動の位相を表しており、工具が切りくずから最も離れる瞬間(図 1 (a) 参照)をゼロとしている。

図 4 (a) および図 5 (a) は、普通切削実験の結果を示している。図 4 (a) より、切りくず厚さは約 80 μ m であり、切込み量が 10 μ m であることを考慮すると比較的厚い切りくずであると言える。また、図 5 (a) より、切削力はほぼ一定値を示しており、その値は主分力が 5.4 N、背分力が 2.2 N である。

従来振動切削の場合には、図 4 (b) に示されるように、普通切削の場合とほとんど変わらない切りくずが生成されている。また、この方式で

は間欠的な切削を行うため、図 5 (b) に示されるように、切削力も間欠的に生じている。従って、平均的な切削力は普通切削より小さくなるが、実際に切削を行っている瞬間の切削力については、主分力、背分力ともに普通切削の場合とほぼ同程度である。

図 4 (c)、図 5 (c) は楕円振動切削加工によって得られた結果であり、それぞれ従来の手法による結果と拡大率、縦軸尺度が異なっている。普通切削および従来振動切削の場合と比較して、切りくず厚さが約 1/8 に減少しており、切込み量との比からせん断角を求めると約 50° になる。切削力については、主分力が最大で 1.0 N であり、普通切削および従来振動切削に比べて 1/5 程度になっている。また、この主分力を時間的に平均すると 0.29 N となり、普通切削に比べて 1/18 以下にまで減少している。背分力の測定結果を見ると、負になっている期間が存在する。このことは、すくい面上での摩擦力が従来の切削方法の場合と比較して反転していることを示している。すなわち、この期間では、工具振動速度の切りくず流出方向成分が切りくず流出速度を上回り、切りくずの排出を促進する作用が生じているものと考えられる。振動 1 周期分の背分力を時間的に平均すると、-0.04 N と負の値になる。このような見かけ上負の摩擦力は、従来の“潤滑”という観点からは決して達成することのできない現象である。このように従来の手法では不可能であった摩擦力の反転によって、せん断角が通常では考えられない程に増大し、切削力が大幅に低減されていると考えられる。

次に、切削熱の発生や工具摩耗に大きな影響を持つ切削エネルギーについて検討する。まず、従来振動切削加工法においては、実加工時間が見かけより短くなっているが、その分実切削速度が上昇する。従って、実加工中の切削力が普通切削の場合とほぼ同じであることから、切削エネルギーも同程度であると考えられる。楕円振動切削加工法の場合には、実加工中の切削力が大幅に低減されることから、切削エネルギーも大幅に減少すると推測される。ただし楕円振動切削においては、切込み方向にも仕事をするため、切削力の低下は直接的には切削エネルギーの低下を意味しない。そこで、以下の方法によって各切削方法において必要とされる仕事率を算出した。

Fig. 4 SEM photographs of cutting processes

普通切削の場合には、切削方向が一定であるため、切削速度と主成分力の積によって仕事率を算出することができ、図5(a)に示す測定値より $23 \mu\text{W}$ と計算される。他方、従来振動切削と楕円振動切削の場合には、瞬間的な切削速度ベクトルと切削力ベクトルの内積によって瞬間的な仕事率を算出しなければならない。切削中の切削速度ベクトルを正確に測定することは困難であったため、ここでは非切削時に工具の運動を測定し、被削材の切削運動を加算して相対的な切削速度ベクトルを算出した。その相対切削速度ベクトルと図5(c)に示す測定値から求めた切削力ベクトルを用い、楕円振動切削における仕事率を算出した結果を図6に示す。図において、仕事率が負になる瞬間が存在するのは、実際の切削時には弾性変形が生じ、計算上の相対切削速度ベクトルに誤差が発生するためである。この負の仕事量は、切削終了時の弾性回復によって生じており、切削開始時の弾性変形に費やされる仕事量によって相殺されると考えられることから、全体としての仕事量は正確に算出できているものと考えられる。図6より、楕円振動切削における仕事率は最大で $33 \mu\text{W}$ 程度であり、時間的に平均する

(a) Ordinary cutting

(b) Conventional vibration cutting

(c) Elliptical vibration cutting

Fig. 5 Cutting force measured

と $7.3 \mu\text{W}$ となる。すなわち、楕円振動切削では、普通切削に比べて $1/3$ 以下のエネルギーで同体積の被削材を除去することができる。このことは、単に小さな動力で加工し得る可能性を示すのみならず、本手法が切削熱の発生や工具摩耗を大幅に抑制し得る可能性を持つことを示唆している。なお、同様の計算により、従来振動切削における仕事率を算出したところ、最大で $180 \mu\text{W}$ 、平均で $18 \mu\text{W}$ となり、平均値として普通切削の場合に近い値と

Fig. 6 Energy required in elliptical vibration cutting

Fig. 7 SEM photographs of finished surfaces

Fig. 8 Profiles of finished surfaces in cutting direction

なった。

図7に、各切削方法によって得られた仕上げ面のSEM写真を示す。図より明らかなように、普通切削による仕上げ面の表面には大きな凹凸が見られ、切削の幅方向に25 μm 程度の幅の大きなバリが発生している。従来振動切削では、仕上げ面は滑らかになり、バリの幅も小さく(10 μm 程度)になっている。楕円振動切削の場合には、仕上げ面の凹凸についても、バリについても極めて小さく、SEM写真ではほとんど観察することができない。

図8は、図7に示す仕上げ面の断面形状を切削方向に測定した結果である。拡大図に示すように、従来振動切削および楕円振動切削においては工具の振動による微小な凹凸が発生している。しかしながら、最大粗さ R_{max} の値については、どの加工方法においても大きな違いはなく約0.2 μm である。

図7に示す写真からも明らかなように、仕上げ面性状は、普通

切削よりも従来振動切削の方が良く、これよりもさらに楕円振動切削の方が良好になっていることが分かる。これは、振動切削加工においては、振動1周期ごとに切削力がゼロになって弾性変形が無くなること、楕円振動切削においては背分力が大幅に減少すること、さらに仕上げ面生成が極微小な切込みで行われることが原因として考えられる。

5. 結 論

工具すくい面上での摩擦力を反転することができる楕円振動切削加工法を提案し、走査型電子顕微鏡内部において実際に二次元楕円振動切削加工実験を行った。その結果、楕円振動切削加工法は、普通の切削加工法および従来の振動切削加工法と比較して、以下のような効果を持つことが分かった。

- (a) 切りくず厚さが大幅に減少する(約1/8)。
- (b) 切削力が大幅に低下する(実加工時で1/5程度、背分力については時間的な平均値でほぼゼロになる)。
- (c) 同体積を除去するのに必要なエネルギーが大幅に減少する(約1/3)。
- (d) 仕上げ面性状が向上し、バリの発生が抑制される。

本研究で示した切りくず厚さ、切削力、切削エネルギーの減少等の効果は極めて基本的なものであり、これらの基本的効果から、例えば工具摩耗の抑制、加工変質の減少など、より実用的な多くの効果を期待することができる。今後は、これらの実用的な効果を検討するとともに、実用的な切削速度で加工するために必要となる楕円振動の高周波数化、高速化に取り組んでいきたい。

参 考 文 献

- 1) R. Wertheim, J. Rotberg and A. Ber: Influence of High-Pressure Flushing through the Rake Face of the Cutting Tool, Ann. CIRP, 41, 1 (1992) 101.
- 2) E. J. A. Armarego, V. Karri and A. J. R. Smith: Computer-Aided Predictive Models for Fundamental Rotary Tool Cutting Processes, Ann. CIRP, 42, 1 (1993) 49.
- 3) E. Usui, K. Kikuchi and K. Hoshi: The Theory of Plasticity Applied to Machining with Cut-Away Tools, Tran. ASME, J. Eng. Ind., 86, 2 (1963) 95.
- 4) M. C. Shaw et al.: Leaded Steel and Real Area of Contact in Metal Cutting, Tran. ASME, July (1957) 1165.
- 5) 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎: 基礎切削加工学, 共立出版,(1984).
- 6) 隈部淳一郎: 精密加工 振動切削—基礎と応用—, 実教出版,(1979).
- 7) T. Moriwaki, E. Shamoto and K. Inoue: Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration, Ann. CIRP, 41, 1 (1992) 141.
- 8) E. Shamoto and T. Moriwaki: Study on Elliptical Vibration Cutting, Ann. CIRP, 43, 1 (1994) 35.