楕円振動切削加工法 (第4報)*

—工具振動制御システムの開発と超精密切削への適用—

社 本 英 二** 鈴 木 教 和*** 森 脇 俊 道** 直 井 嘉 和†

Elliptical Vibration Cutting (4th Report)

- Development of Tool Vibration Control System and Its Application to Ultraprecision Cutting -

Eiji SHAMOTO, Norikazu SUZUKI, Toshimichi MORIWAKI and Yoshikazu NAOI

A new tool vibration system is developed for the ultrasonic elliptical vibration cutting, and it is applied to ultraprecision cutting of hardened steel in the present research. A method and a device to remove crosstalks between the two directional vibrations are developed, so that the two directional vibrations can be controlled independently. Then, a controller is developed to keep the elliptical vibration to have a desired locus, where the amplitudes of the two directional vibrations, phase shift between them are kept to be desired values and the vibration frequency is locked to an average of their resonant frequencies. The developed vibration control system is applied to ultraprecision diamond turning of hardened steel, and an ultraprecise steel mirror with a shape accuracy of about 0.1 μm is achieved.

Key words: elliptical vibration cutting, vibration control, crosstalk, ultraprecision diamond turning

1. 結 言

近年, IT 産業の発展に伴い, 液晶用導光板や DVD 用ピックアップレンズなど, 超精密微細加工が必要なプラスチック製光学部品が急増している. これらの量産には焼入れ鋼金型の超精密微細加工が必要とされているが, ダイヤモンド切削は激しい工具摩耗のために適用することができず, 砥粒加工は微細形状に適さないため, 現状技術ではこれを実現することができない. このため, 妥協策として無電解 Ni-P メッキを施してメッキ層のダイヤモンド切削が行われているが, 型寿命が短い等の問題を抱えている.

一方, 著者らは, 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, 切りくずを引っ張り出してそ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)を提案している¹⁾²⁾. そして, 2 次元切削加工において, 切りくず厚さ, 切削力, 切削エネルギーが極端に減少すること等の基本特性を確認²⁾し, 楕円振動の条件すなわち振動周波数や振動軌跡の影響について明らかにしている³⁾. さらに, 3 次元切削である旋削加工に適用し, バリの抑制, 加工精度の向上, びびり振動や被削材の工具への凝着の抑制等の実用的効果があることを確認している⁴⁾. その後, 本手法によって通常切削では激しい工具摩耗のために不可能である焼入れ鋼のダイヤモンド切削を実現し, 仕上げ面粗さ 40 nm Ry 以下の鏡面加工を達成している⁵⁾. なお, 切削方向の直線状振動切削加工法によっても鋼のダイヤモンド切削が可能であることが示されている⁶⁾⁷⁾が, 楕円振動切削加工法ではこれに比べてさらに工具寿命が 3 倍程度長く, 面粗さや刃先の耐チッピング性にも優れている⁵⁾.

以上のように, 本手法は数々の優れた特性を持つことが確認されており, 特に金型業界からは上述した焼入れ鋼金型に対し

て直接超精密ダイヤモンド切削を行い得る技術として期待されている. しかし, 実用的に見た場合, 上述した仕上げ面粗さだけではなく, 同時に高い形状精度を達成しなければならない.

そこで本報では, 本手法において形状精度劣化の主要因となる振動軌跡の変動を抑制するシステムを開発する. まず, 楕円振動軌跡を安定化制御する際に大きな問題となる 2 方向の振動間の干渉を取り除く手法を考案し, 干渉除去装置を開発してその有効性を実証する. 次に, 2 方向の振動振幅制御, 位相差制御, 共振周波数自動追尾を同時に行う工具振動制御システムを開発する. そして, 開発した工具振動システムを用いて実際に焼入れ鋼の超精密切削実験を行い, 本手法の有効性を実証する.

2. 楕円振動切削加工法の原理

楕円振動切削加工法では, 図 1 に示されるように, 工具刃先に楕円振動を付加して間欠的な切削を行う. 切りくず生成時に, 工具が主に切りくず流出方向に速度を持つため, 切削油剤などのすくい面摩擦低減効果をはるかに超えて摩擦力の方向が反転し, 切りくずが引っ張り出される. その結果, セン断角が増加し, 切りくず厚さや切削抵抗が著しく減少する.

本加工法では, 振動軌跡の変化が加工精度や仕上げ面性状に

Fig. 1 Elliptical vibration cutting process

* 原稿受付 平成 13 年 6 月 4 日

** 正 会 員 神戸大学工学部 (神戸市灘区六甲台町 1-1)

*** 日立製作所(株) (横浜市戸塚区吉田町 292 番地)

† エコー電子(株) (志木市柏町 4-8-41)

Fig. 2 Ultrasonic elliptical vibrator developed

直接影響を及ぼす。特に、切込み方向の振動振幅の変動はそのまま仕上げ面に転写される。また、切削方向の振動と2方向の振動間の位相差についても、これらが変化すると切削力が変化し³⁾、その結果として加工精度に悪影響を及ぼすため、結局切削中の振動軌跡を一定に保つ必要がある。

3. 工具振動制御システムの開発

3.1 超音波楕円振動子と干渉除去手法

前述の加工原理より、切削速度を実用域に近づけるためには、それに応じて振動速度を高くする必要がある。ただし、振動振幅を大きくすると、仕上げ面上に残る切削方向の振動マークが大きくなるため³⁾、精密な加工を行う場合には振動振幅を小さくして、振動周波数を高くする必要がある。そこで、著者らはすでに約20 kHzの超音波楕円振動工具⁴⁾⁵⁾を開発しているが、ここでは若干の改良を加えて、図2に示す振動工具を開発している。ここでは、図2に示すように切削方向と振動工具の中心軸に垂直な方向を垂直方向と呼ぶことにする。

本工具では、工具体中央部の直交する4面に駆動用圧電板を貼り付けている。上下2枚の圧電板を振動子に対して逆向きに貼り付けて同相の正弦波電圧を与えると、圧電板が伸縮し、図に示すように3次の振動モードで曲げ振動が発生する。この共振周波数は約20 kHzである。左右2枚の圧電板にも同様に電圧を与え、この2方向の曲げ振動に位相差を与えて合成することによって、工具中心軸に垂直な面内で楕円振動軌跡を得る。この位相差や振動振幅を変えることにより任意の楕円振動軌跡を得ることが可能である。また、図に示すように振動子に測定用の小型圧電板を貼り付けることで工具の振動状態を測定する。

楕円振動の軌跡制御を行う際、励振力を加える2方向では、お互いに独立して振動することが望ましい。ところが実際には、2方向の振動が干渉し合うため、お互いの方向に独立して振動を励起することが困難である。ここで言う干渉とは、2つの振動方向のうち、一方のみに励振電圧を加えた時に、その方向だけではなくもう1つの方向にも振動が生じてしまう現象である。図3は、開発した楕円振動子の周波数応答特性を示したものであり、(a)は切削方向、(b)は垂直方向のみに励振電圧(100 Vp-p)を加えた場合の結果である。図より、両方向の共振周波数付近において、励振力を加えていない方向に数十%以上の干渉が生じていることが分かる。

この干渉における1つの特徴は、励振方向に比べて干渉方向の位相遅れが大きくなっていることである。この現象は、剛性

(a) Excited in cutting direction

(b) Excited in normal direction

Fig. 3 Frequency responses of elliptical vibrator

の干渉項を仮定し、次式のような簡単なモデルによって表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 F , x , m , c , k はそれぞれ励振力、変位、質量、減衰、剛性を表し、添え字1, 2は切削方向と垂直方向を示す。

ここでは、この干渉のメカニズムに着目し、次のように干渉を除去する手法を提案する。すなわち、式(2)に示すように、剛性の干渉項 k_{12} , k_{21} を打ち消す項を意図的に左辺の励振力に足し合わせることで、2方向間の干渉を除去する。

Fig. 4 Method to remove crosstalk

$$\begin{cases} F_1 \\ F_2 \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 & k_{12} \\ k_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} \\ = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{cases} + \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} \quad (2)$$

上述の手法に基づき、本研究で開発した干渉除去装置を図4に示す。本装置では、センサ用圧電板の出力電圧を利用し、これに適当なゲインを掛けて剛性の干渉項 k_{12} , k_{21} を打ち消すように励振電圧を補正する。補正された励振電圧は、電力増幅器を介して圧電板に印加されて振動子を励振する。実際には、圧電板における印加電圧と励振力の間の関係 Q_1 , Q_2 を知る必要はなく、方向1の励振電圧 E_1 を与えた状態で方向2の変位 x_2 が0になるように干渉除去用ゲイン1を調整し、同様の試行によってゲイン2を調整すればよい。

本干渉除去装置を用いて干渉除去を行った場合の周波数応答特性を図5に示す。図に示されるように、本手法によって、ほぼ完全に2方向の振動間の干渉を除去し得ることが分かる。

3.2 工具振動のフィードバック制御システム

前章で述べたように切削中の振動軌跡を一定に保つため、まず2方向の振動の振幅とその間の位相差を一定に保つようにフィードバック制御を行う。また、振動系の共振周波数はその時の負荷状態、温度、支持状態によって変化するため、一定の高い振動振幅を維持するために共振周波数の変化を自動的に追尾する制御も同時に行う。

開発した工具振動システム全体を図6に示す。

図に示すように、測定用圧電板から検出される信号をフィードバックすることで振動軌跡の制御を行う。コントローラからの励振電圧は、前述の干渉除去装置を通して電力増幅器に入力され、振動子に貼り付けた駆動用圧電板に印可される。

開発したコントローラのブロック線図を図7に示す。図に示されるように、まず2方向の振幅制御は、変位信号を振幅検出部分で振幅値に変換した後、PI制御によって行われている。位相差制御については、2方向の変位信号からその位相差を検出し、PI制御器を介して2方向の励振電圧間の位相差を操作することで目標値

(a) Excited in cutting direction

(b) Excited in normal direction

Fig. 5 Frequency responses with developed crosstalk remover

Fig. 6 Vibration control system for elliptical vibration cutting

Fig. 7 Controller to keep desirable elliptical locus

Fig. 8 Method to chase average resonance frequency

に追従させている。さらに、共振周波数自動追尾制御に関しては、各方向の励振電圧に対する変位応答の位相遅れを検出し、その重み付き平均値が -90 度になるようにPI制御器によって発振周波数を操作している。

ここで、上述の共振周波数自動追尾制御が行う操作を、図8の周波数応答図を用いて示す。本研究で用いる振動工具では、励振する2方向の共振周波数を正確に一致させるようにその形状を調整しているが、それでも図8に示すように2方向の共振周波数は完全には一致していない。そこで、本システムにおける共振周波数自動追尾では、2方向ともに高い振動振幅が得られるように、2方向の位相遅れの重み付き平均値が -90 度になるように制御を行う。図では、重みの比率を1:1にした場合の例を示しており、両方向の共振周波数のほぼ中央において位相遅れの平均値が -90 度になっていることが分かる。なお、平均の重みについて、例えば切削方向を0、垂直方向を1とした場

合、負荷などによって共振周波数が変化しても垂直方向の振動振幅が優先的に維持され、切込み量の変動を生じにくい。その代わりに、切削方向の振動は共振から外れて減少し、間欠切削の度合いが減少して工具冷却に支障をきたす可能性がある。従って、この重みの設定は、状況によって加工精度と工具寿命のどちらを優先するかによって決めればよいと考えられる。

開発した制御システムにおける各制御ゲインを試行法によって決定し、各制御変数のステップ応答を測定した結果を図9に示す。ここで、各PI制御器の制御則は $K_p(1+1/(Tis))$ によって表され、各ゲインの値は表1に示す値に調整されている。図9に示されるように、直接仕上げ面に影響を与える振幅制御について

は10 ms程度の短時間で整定していることが分かる。これに比べて、位相差制御と共振周波数自動追尾制御については整定時

Fig. 9 Step responses of controlled parameters

Tabel 1 Adjusted control gains

	Proportional gain K_p	Integral time T_i
Amplitude control in cutting direction	53.6 V/ μm	1.30 ms
Amplitude control in normal direction	132 V/ μm	1.32 ms
Phase control	102 deg/deg	8.30 ms
Resonance chase	11.8 kHz/deg	8.05 ms

Fig. 10 Shape of workpiece

Fig. 11 Setup for face turning experiment

間が長くなっているが、これらは仕上げ面に直接的な影響を与えないため、振幅制御ほどの即応性は必要ないと考えられる。なお、図中に見られるノイズは主に振幅検出器および位相検出器に起因するものであり、振動子では共振を利用しているため正確な正弦波振動を生じている。

4. 超精密切削への適用

4.1 実験装置および方法

本章では、開発した工具振動システムをステンレス系焼入れ鋼の超精密切削加工に適用し、主にその加工精度への影響について検討を行う。本実験では、図10に示す形状の被削材を用いて、図11に示すように端面旋削加工を行う。半円状にすることで1回転ごとの断続的な切削を行い、さらに前加工面に20 μm の段差をつけることで切込み量を変化させ、これらの切削力負荷の変動が振動系に与える影響を検討する。また切込み量が増加した後に、切削油（白灯油）のミストを停止し、その後は手作業で鉋油を供給してその違いによる影響も合わせて検討する。

Table 2 Experimental conditions

Tool	Material	Single crystal diamond
	Rake angle	0 deg
	Clearance angle	15 deg
	Vibration angle θ	60 deg (see Fig. 11)
Workpiece	Nose radius	1.0 mm
	Material	Stainless steel (SUS420J2)
Cutting conditions	Hardness	HRC40
	Feed rate	16.7 $\mu\text{m}/\text{rev}$
	Depth of cut	5 $\rightarrow$ 25 μm
Vibration conditions	Rotational speed	30 min^{-1}
	Locus	Circle (radius: 4 μm)
	Resonant frequency	20.09 kHz

Fig. 12 Transient responses of controlled parameters at beginning of cutting

本実験の条件を表2にまとめて示す。なお比較の対象として、振動軌跡を制御しない状態でも同様の実験を行う。

4.2 実験結果および考察

本実験では、被削材が半円状であるため、1回転ごとに断続的な切削を行って振動状態が変動する。この1回転内での切削

Fig. 13 Changes in controlled parameters during machining

開始の瞬間における振動状態の変化を図 12 に示す。この時点では、切込み量が $25\ \mu\text{m}$ であり、ミストを供給している。図に示されるように、開発した工具振動制御システムを用いた場合には、断続的に切削を開始する瞬間においても振動状態がほぼ一定の値に保たれていることが分かる。位相差が若干変化し、目標値に回復するまでに約 $25\ \text{ms}$ を要しているが、重要な振幅値にはほとんど変化がなく、安定な制御が行われている。一方、振動制御を行わない場合には、振動振幅が最大 $0.8\ \mu\text{m}$ 程度減少し、位相差と平均位相遅れにも大きな変化が見られる。なお、位相差および平均位相遅れに見られる $200\ \text{Hz}$ 程度のノイズは位相検出器に起因するものである。

図 13 は、加工の開始から終了までの全期間の振動状態の変化を示している。図 13(a) に示されるように、振動制御を行わない場合には、まず時間が経過すると共に振動状態が変化していることが分かる。これは、振動および切削の開始に伴って発生する熱によって振動工具の共振周波数（1 番下の図に示す平均位相遅れを参照）が変化し、これによって振動振幅等も変化したものと考えられる。次に、切込み量が増加した後に、切削荷が増大することによって振動状態の変動量（図における線の

太さ）が大きくなっている。この点については、本加工が 1 回転ごとの断続切削であるため、空転中には毎回切削荷が 0 になっていることに注意されたい。また、切削油のミストを手作業の供給に切り替えた後に、振動状態が不安定になっていることが分かる。これは、ミスト供給時のように圧縮空気を吹き付けないこと、油の粘度が若干高いことにより、工具すくい面上に切削油と切りくずが溜まることによって振動工具の動特性が変化したためである。一方、振動制御を行った場合には、図 13(b) に示されるように全ての変数が一定に保たれており、切込み量の変化や切削油供給方法に関係なく、所望の楕円振動軌跡が維持されていることが分かる。

図 14 に被削材の仕上げ面写真および断面曲線を示す。図 14(a) が振動制御を行わなかった場合、図 14(b) が行った場合の加工結果である。図 14(a) に示されるように、振動制御を行わない場合には、ミスト加工時には鏡面が得られているものの、形状精度が低いことが分かる。この断面形状は、主に図 13 に示される垂直方向振動振幅の変化に対応している。一方、振動制御を行った場合には、図 14(b) の写真に示されるように、全面にわたって鏡面が得られている。また、切込み量の変動しているに

Fig. 14 Improvement of machining accuracy by developed vibration control system

もかわらず、ミスト供給時の加工精度は極めて良好であり、形状精度 $0.1 \mu\text{m}$ 程度の超精密加工が実現している。なお、ミスト停止後に切込み量が増大しているのは、圧縮空気の断熱膨張によって冷却されていた工具および被削材の収縮が回復したことによるものと考えられる。

以上のように、楕円振動制御システムを開発することにより、焼入れ後の金型鋼に対して超精密レベルの加工精度を達成することに成功した。

5. 結 言

本研究では、安定した任意の楕円振動軌跡を得ることのできる工具振動制御システムを開発し、焼入れ鋼の超精密ダイヤモンド切削に適用した。本研究で得られた主な成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 楕円振動軌跡をフィードバック制御する際に問題となる2方向の振動間の干渉を取り除く手法を考案し、実際に干渉除去装置を開発してその有効性を実証した。
- (2) 上述の手法によって干渉を除去した上で、2方向の振動の定振幅制御、定位相差制御、および2方向の平均共振周波数を自動追尾する制御を同時に行うシステムを開発し、安定した任意の楕円振動軌跡が得られることを確認した。
- (3) 開発した振動制御システムを利用することにより、切削負

荷、切削油、熱などの外乱に対して、所望の楕円振動軌跡を維持し得ることを確認した。そして、その結果として、振動軌跡を制御しない場合に比べて大幅に加工精度を向上し、焼入れ後の金型鋼に対して形状精度 $0.1 \mu\text{m}$ 程度の超精密ダイヤモンド切削を実現した。

参 考 文 献

- 1) E. Shamoto and T. Moriwaki: Study on Elliptical Vibration Cutting, Ann. CIRP, **43**, 1 (1994) 35.
- 2) 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法(第1報)―加工原理と基本特性, 精密工学会誌, **62**, 8 (1996) 1127.
- 3) 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法(第2報)―振動条件の影響に関する検討, 精密工学会誌, **65**, 3 (1999) 411.
- 4) 社本英二, 馬春翔, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法(第3報)―三次元切削への適用と実用的諸効果の検討, 精密工学会誌, **65**, 4 (1999) 586.
- 5) E. Shamoto and T. Moriwaki: Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, Ann. CIRP, **48**, 1 (1999) 441.
- 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) 森脇俊道, 社本英二, 井上健二: ステンレス鋼の超精密超音波振動切削加工の研究, 精密工学会誌, **57**, 11 (1991) 1983.