楕円振動を用いた超精密切削*

Ultraprecision Cutting by Applying Elliptical Vibration

社本英二** 鈴木教和**

Eiji SHAMOTO and Norikazu SUZUKI

Key words

ultraprecision cutting, elliptical vibration, ultrasonic vibration, vibration control, difficult to cut materials

1. はじめに

近年、デジタル家電や光通信技術の普及に伴い、液晶用導光板、ホログラム光学素子など、精密かつ微細な加工を必要とする電子光学部品の需要が増加している。これらの内でプラスチック部品の量産用金型にはステンレス焼入れ鋼、ガラス部品用金型には超硬合金などの高硬度材料を使用することが望ましい。しかし、これらの高硬度材料に対して従来の超精密ダイヤモンド切削を適用することは、激しい工具摩耗や被削材の脆性破壊のために実用上不可能である。また、研削、研磨を適用することも、微細形状、特にシャープエッジを含む場合には困難である。このため、ガラス部品については実用化に至っておらず、プラスチック部品については妥協策として無電解ニッケルリンなどのめっきを施し、めっき層のダイヤモンド切削を行って金型として使用されている。しかし、この場合にも工具寿命と型寿命が十分ではなく、納期延長やコスト増大などの問題を残している。

これに対して筆者らは、特に難削材料に対して著しい切削性能の向上をもたらす新しい加工法（楕円振動切削加工法と呼ぶ）を考案している。これまでの筆者らの研究^{1)~6)}により、本手法によって金型用の焼入れ鋼やタンゲステン合金の超精密ダイヤモンド切削を実現し得ることが確認されており、上述のような高硬度材料の超精密微細加工に対して新しい可能性が見出されている。

鈴木教和

2000年神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。同年日立製作所生産技術研究所に入社。2002年名古屋大学大学院工学研究科助手。超音波振動制御系の設計や超精密切削、CMP（ケミカルメカニカルポリッシング）などの研究開発に従事。

*原稿受付 平成18年1月30日

**正会員 名古屋大学大学院工学研究科（愛知県名古屋市千種区不老町）

社本英二

1989年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期過程修了。工学博士。同年神戸大学工学部助手。1994年助教授。2002年名古屋大学大学院工学研究科教授。その間、ブリティッシュコロンビア大学客員研究員。精密加工法や精密機械要素の研究開発に従事。

本稿では、楕円振動切削加工法の原理、加工システムについて述べ、金型材料の超精密微細加工事例について紹介する。また最近の研究成果として、実用的な自由曲面を持つ金型の磨きレス鏡面加工を実現するために開発している3自由度楕円振動システムについても述べる。

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運動するため、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が減少し、条件によっては摩擦方向が反転して切りくずが引っ張り出される。その結果、せん断角が大幅に増加し、切りくず厚さや切削抵抗が著しく減少する。

一方、間欠的な切削を実現するため、原理的に振動速度に比べて切削速度を低くしなければならない短所がある。また、振動軌跡の変化が加工精度や仕上げ面性状に直接影響を及ぼし、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。このため、切削中の振動軌跡を精密に一定に保つ振動制御システムが不可欠となる。

3. 楕円振動切削加工システム

3.1 超音波楕円振動装置

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。そこで、筆者らは図2に示す2自由度の超音波楕円振動工具³⁾を開発している。な

図1 楕円振動切削加工プロセス

図2 開発した楕円振動工具

図3 開発した楕円振動制御システム

お、図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、工具本体中央部の直交する4面に駆動用圧電板が貼付けられている。上下2枚の圧電板を振動子に対して逆向きに貼付けて同相の正弦波電圧を与えると、圧電板が伸縮し、図に示すように約20 kHzの3次の曲げ振動モードが発生する。表裏2枚の圧電板にも同様に電圧を与え、同一周波数の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付けることで工具の振動状態を測定する。

本手法では、前章で述べたように切削中の振動軌跡を一定に保つことが重要であり、ナノメートルオーダの仕上げ面粗さを得るためにはナノメートルオーダの安定化制御を実現しなければならない。しかし、共振状態の2自由度の振動を超精密に安定化する試みは過去に例がなかったため、独自に図3に示す楕円振動制御システムを開発した。本装置では、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、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制御を行っている。この際、励振力を与える2方向の間で振動が干渉し合う問題が生じ易く、安定な制御が困難になる。この干渉は共振状態に特有の現象であり、ローカルなクロスフィードバックによって除去し得ることが分かっている⁴⁾。これを装置化したものが図内の干渉除去装置であり、この装置によって干渉を除去した上で励振電圧は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。なお、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

図4 振動制御を検証するための端面旋削実験

よって変化するため、これに対応して共振周波数を自動的に追尾する制御も同時に行っている。

3.2 振動制御の有効性

超音波楕円振動の安定化制御がどの程度有効に機能するのか、また超精密加工を実現し得るかどうかを検証するため、図4に示すように焼入れ後の金型鋼（SUS420J2、HRC40）に対して端面旋削実験を行った。ここでは、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、切削力負荷の変動を与えた。また切込み量が増加した後に、切削油剤（白灯油）のミストを停止し、その後は刷毛を用いて手作業で鉱油を供給してその違いによる影響も合わせて検討した。

図5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5(a)に示されるように、振動制御を行わない場合には、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。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断続的に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5(b)に示されるように全ての制御変数が一定に保たれており、切込み量の変化や切削油剤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6に被削材の仕上げ面写真および断面曲線を示す。図6(a)が振動制御を行わなかった場合、図6(b)が行った場合の加工結果である。図6(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5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6(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、切込み量が変動しているにもかかわらず、ミスト供給時の加工精度は極めて良好であり、形状精度0.2 μm以下の超精密加工が実現している。なお、ミスト

図 5 加工中における制御量の変化

図 6 楕円振動の安定化制御による加工精度の向上

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である。

3.3 新しい楕円振動切削加工システムの開発⁵⁾

従来の金型加工では、加工後に磨き工程が必要とされることが多く、これに多大な時間とコストが費やされる。これに対して、焼入れ鋼に対して直接ダイヤモンド鏡面切削を行うことが可能な楕円振動切削加工法をエンドミル加工に置き換えることができれば、切削による磨きレス加工が可能となると考えられる。しかし、図2に示す楕円振動切削装置は、振動工具の形状や振動方向による制約から加工

可能な被削材形状が制限されてしまう欠点があった。そこで現在、振動工具の形状に起因した制約が少なく、実用的な自由曲面を持つ金型に対して任意の楕円振動軌跡を用いて加工を行うことが可能な3自由度超音波振動装置(図7参照)の開発を行っている⁵⁾。

また、超精密加工での本加工法の実用化を目指し、超音波振動装置メーカー(多賀電気(株))と共同開発した市販用の超精密超音波楕円振動切削加工装置を図8に示す。図は、本加工法に適する特殊仕様の超精密切削加工機((株)ジェイテクト製AHN05)に、共同開発した振動工具を組み込み、端面旋削加工を行っている様子を示している。

図7 開発した3自由度楕円振動工具

図8 超精密超音波楕円振動切削装置（多賀電気製）と超精密加工機（豊田工機製 AHN05）による旋削加工の様子

4. 金型材料の超精密加工

開発した工具振動システムを超精密加工機に搭載し，ステンレス焼入れ鋼とタングステン（W）合金の超精密/微細加工に適用した事例について紹介する。

図9は，焼入れ後の金型鋼（HRC53）に対し，3章で述べた加工システムを用いて超精密微細加工を行った例である。ここでは，液晶ディスプレイ用導光板の金型を想定し，多数の浅い三角溝を加工している。溝形状と同じ形状の単結晶ダイヤモンド工具を用いてプレーナ加工を行い，刃先形状を転写することで，写真に示されるように良好な鏡面が得られている。300 μm ピッチのシャープな溝形状が正確に転写されており，40 nm Rz 程度の良好な仕上げ面性状が得られている。

ガラスレンズの金型を想定したW合金の球面加工例を図10に示す。本加工に用いたW合金は，ガラス成形用の金型材料として優れた特性を持つが，その特殊な加工特性のために従来の機械加工法では良好な光学表面と微細形状を両立することができない。これに対して，図8に示す市販楕円振動切削加工装置を適用することにより，図に示すように実用的な鏡面加工を実現することができる。

5. おわりに

本稿で述べたように，楕円振動切削はこれまでの常識を超える可能性を秘めた切削加工法であり，従来の加工法と比べて多くの際立った特徴を有している。ここでは，本手法の原理，実用化する上で重要となる超精密な超音波楕円振動制御システム，および高硬度金型材料の超精密/微細加工への適用例を紹介した。今後，本手法の実用化が進み，加工技術の発展や電子光学デバイスなどの性能向上，コスト低下などに貢献できることを期待したい。

(a) 仕上げ面の外観

(b) 送り方向の断面図

図9 導光板金型を想定した金型鋼の超精密微細加工例

〔加工条件〕被削材：焼入れ鋼（SUS420J2），HRC53，切削条件：切込み1 μm ，送り300 μm ，切削速度0.25 m/min，工具：単結晶ダイヤモンド，V型117°，すくい角0°，振動：円軌跡，片振幅3 μm
〔測定結果〕最大粗さ：40 nm Rz

図10 レンズ金型を想定したタングステン合金の超精密加工例

〔加工条件〕被削材：W合金（三菱マテリアルシーエムアイ製BMF06），Hv370，切削条件：切込み2.5～5 μm ，送り3.75 $\mu\text{m}/\text{rev}$ ，主軸回転数56 rpm，振動：円軌跡，片振幅2 μm ，周波数38.7 kHz，工具：単結晶ダイヤモンド，R1 mm，すくい角0°，加工形状：球面，曲率半径20（左）/15（右）mm，直径11 mm
〔測定結果〕最大粗さ：40 nm Rz

参考文献

- 1) 社本，他2名：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.
- 2) 社本，他2名：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.
- 3) E. Shamoto and T. Moriwaki: Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, **48**, 1 (1999) 441.
- 4) 社本，他4名：楕円振動切削加工法（第4報）—工具振動システムの開発と超精密切削への応用，精密工学会誌，**67**，11（2001）1871.
- 5) E. Shamoto, et al.: Development of 3 DOF ultrasonic vibration tool for elliptical vibration cutting of sculptured surfaces, Annals of the CIRP, **54**, 1 (2005) 321.
- 6) 鈴木，他4名：楕円振動切削によるタングステン合金の超精密微細加工，2005年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集（2005）201.