

超音波楕円振動切削による精密金型の加工

神戸大学 工学部 機械工学科

教授 森脇俊道

(平成11年度研究開発助成AF-99013)

キーワード：精密金型、超音波楕円振動切削、超精密切削

1. 研究の目的と背景

携帯電話、DVD、コンピュータ周辺装置などIT関連機器に代表される多くの電子・光学・メカトロ機器の主要なパーツには、微細形状でありながら、極めて高い形状精度と良好な仕上げ面あざが要求されるキーコンポーネントが数多く存在する。こうした高度な製品が発展してきた歴史をたどれば、超精密マイクロ部品の量産とコストダウンに対する要求は今後益々増大することが予想され、それに伴ってプラスチック成形用の超精密焼入れ金型に対するニーズは一層高まると考えられる。

一般に精密金型の加工には研削・研磨加工が用いられるが、精密な微細形状加工を含む場合には、砥粒加工では必ずしも高度な形状精度を得ることができず、単結晶ダイヤモンド工具を用いたダイヤモンド切削が用いられる。しかしながらダイヤモンド工具で金型鋼を切削すると、一般には工具の摩耗が著しく実用的ではない。そこで多くの場合代替策として金型表面に無電解ニッケル等のメッキを施し、メッキ層をダイヤモンド切削することが行われている。

これに対して筆者らは、焼き入れ鋼や硬脆材料などの難削材に対して、著しく切削性能を向上させることが出来る超音波楕円振動切削法を開発し、ほぼ実用に近いレベルで焼入れした金型鋼の超精密ダイヤモンド切削を実現することを可能とした。ここでは本加工法の概要と、実験装置ならびに具体的な焼き入れ金型鋼の超精密ダイヤモンド切削加工結果について報告する。

2. 楕円振動切削加工法の原理

楕円振動切削法とは、図1に示すように切削工具に楕円振動（主として円振動）を与えて切削する方法である。この場合、工具切れ刃には主として切削方向と背分力方向から成る面内で楕円振動が与えられている。図における振動

サイクルの内、工具が最も被削材に近づく頃から切削（切りくず生成）が始まるが、同時に工具は背分力方向に移動するため、切削中に切りくずが生成される瞬間には、工具すくい面が切りくずを引き上げるように運動する。そのため工具すくい面と切りくずの間の摩擦が通常の切削に対して逆方向に作用し、むしろ切りくずが強制的に引き出されることになる。

その結果として、切削中の工具すくい面と切りくず間の摩擦力はほぼゼロとなり、さらにせん断角が大きくなって、切りくずが薄くなると同時に、せん断面積が減少して切削力が減少する（通常の切削に対して、数十分の一になることが実験的に得られている）。一般に通常の切削では、せん断角は45度よりもはるかに小さいため、切込み量よりも切りくずは厚い。従ってせん断角が大きくなって、切りくずが薄くなるとせん断面積が減少することは容易に理解できよう。切削力が低下することにより、切削エネルギーについても、工具に振動を与えるために必要なエネルギーを考慮しても数分の一になることが求められている。以上の詳細については別途研究成果⁽¹⁾を発表している。

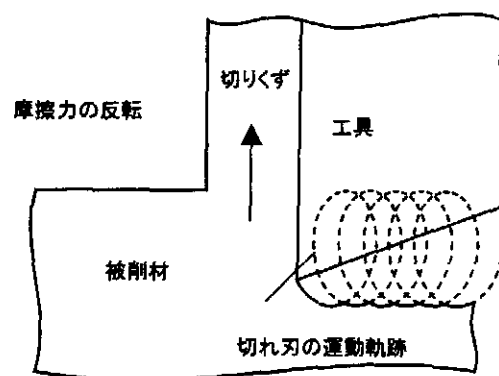


図1 楕円振動切削プロセス

楕円振動切削の利点としてこの他、切削力が小さいために切削力による工作物の変形が抑制され、高い形状加工精度が得られること、断続切削で1周期毎に工具が切りくずから離れるために工具への切削熱の流入が少なく、工具の摩耗が抑制されることなどがあげられる。また切削ばりの発生が押さえられることも明らかとなっている⁽²⁾。

ここで重要なことは、上述のように間欠的な切削運動を実現するため、工具の振動速度は平均切削速度よりも高くなければならないということである。振動速度を高くする方法としては、振幅を大きくするか、振動周波数を上げるかのいずれかである。振幅を大きくすると、仕上げ面上に切削方向の凹凸が残ることになって好ましくない。そこでここでは仕上げ面上の凹凸が十分小さい値になるようにし、且つ十分な振動速度を得るために工具に超音波振動を与えている。また工具が振動する面と切削方向の関係なども重要であるが、それらの詳細については別途⁽³⁾報告している。

3. 実験装置

楕円振動切削では、互いに直交する2方向に同じ周波数で、しかも相互の位相を厳密に制御した振動を加える必要がある。このような楕円振動を生成する方法は種々考えられるが、ここでは図2に示すように梁の曲げ振動を利用した超音波楕円振動切削工具を開発した。これは図に示すように中心が八角柱の梁の互いに直行する面に圧電素子を貼り付け、正弦波の電圧を加えることによって梁に曲げ振動を発生させる。図は3次の共振モードを示している。このモードで振動するとき、梁の端（円柱になっている部分の端面）では、直交する2方向の振動が得られ、結果として端面に取り付けた工具には楕円（または円）軌跡の振動が発生する。ここで互いに直交する面に貼り付けた圧電素子に加える正弦波状の電圧の振幅と位相を制御することによって、任意の楕円（または円）振動を生成することができる。

図3は実験に用いた装置の概要を示している。工具を取り付けた振動子は、ノード点において取付け治具に固定されている。発信器からの超音波信号（約20kHz）は増幅器を用いて電力増幅した後、圧電素子に加えられる。ここでは各方向の振動を光センサーによって検出し、振幅をモ

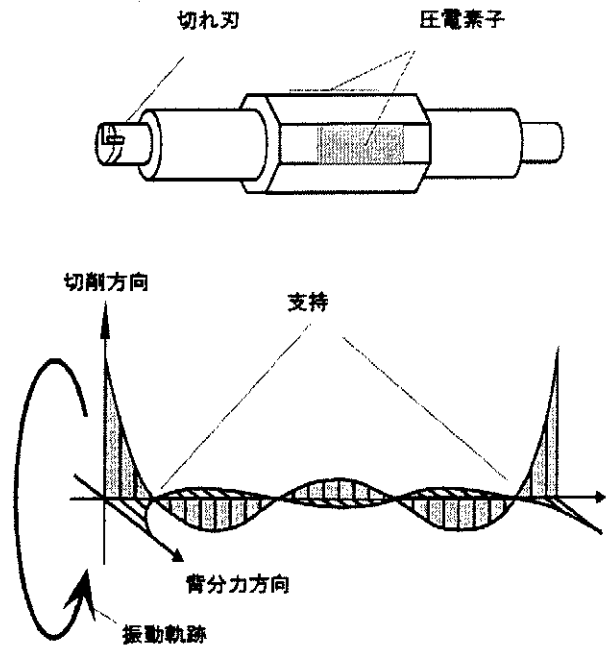


図2 超音波楕円振動切削工具とその振動モード

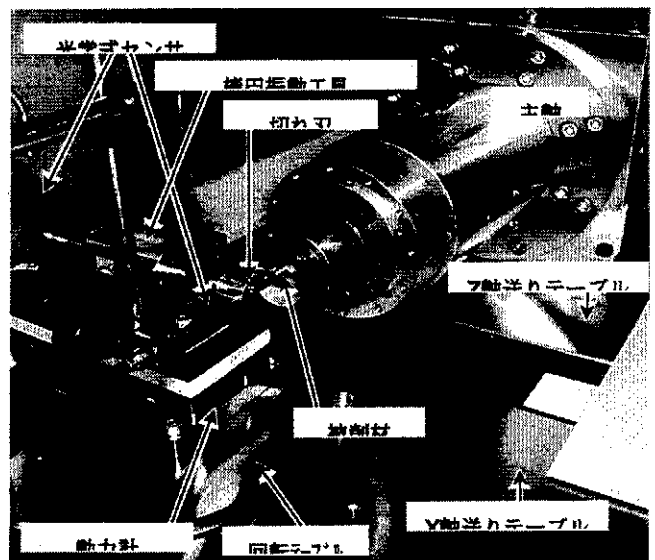


図3 超精密超音波楕円振動切削装置

ニターするとともに、発信装置にフィードバックして振動振幅、位相を常に一定に保つようになっている。長時間の運転では必ず振動子の発熱によって共振周波数が変化するため、自動的に共振点を追従する仕組みが必要となる。

楕円振動工具の下に設置している圧電型動力計は、20kHzの振動成分を検出することは不可能であるが、平均的な切削力を計測するために用いている。また楕円振動工具はロータリーテーブルの上に固定し、振動面と切削面が最も良い関係になるように工具の取り付け角度を調整でき

るようにしている。

4. 実験結果

ステンレス焼き入れ鋼 STAVAX (JIS : SUS420J) の外周旋削を行って得られた仕上げ面とその粗さの測定結果を図4に示す。図中の粗さ曲線は仕上げ面を接触式仕上げ面粗さ計で測定したもので、送り方向と切削方向の2方向に測定した結果を示している。主な加工条件は図の下に示す通りである。図に示すように、本方法では切削方向に凹凸の振動マークが残るが、その大きさは送り方向の粗さに比較しても小さい。なおこの場合の最大粗さは約 $0.03\mu\text{mRy}$ で、鏡面が得られていることがわかる。また図4と同じ条件で切削を続けた結果、切削距離にして約 2500m まで、工具の摩耗はあまり認められず、良好な仕上げ面が得られている。

コンタクトレンズを想定した凹凸の金型(球面)を加工した例を図5に示す。公称曲率半径 20.5mm に対して、凸型球面は $20.5\text{mm}\pm 0.4\mu\text{m}$ 、凹型球面は $20.5\text{mm}\pm 0.3\mu\text{m}$ の形状精度であった。また電子線粗さ解析装置によって求めた表面粗さは凸型球面、凹型球面それぞれに対して $0.060\mu\text{mRy}$ 及び $0.047\mu\text{mRy}$ であった。良好な仕上げ面が得られていることが理解できる。

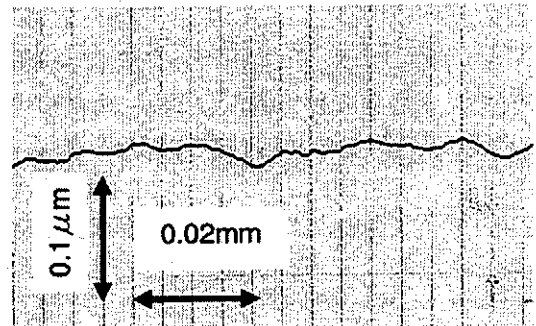
超精密加工機の直線運動機能を利用して液晶ディスプレイのバックライトに用いられる導光板用金型を想定した三角溝の加工例を図6に示す。溝の頂角は 117° で、平均溝間ピッチは設計値 $100\mu\text{m}$ に対して測定値は $99.963\mu\text{m}$ であった。良好な溝の加工が行われていることがわかる。

5. 結論

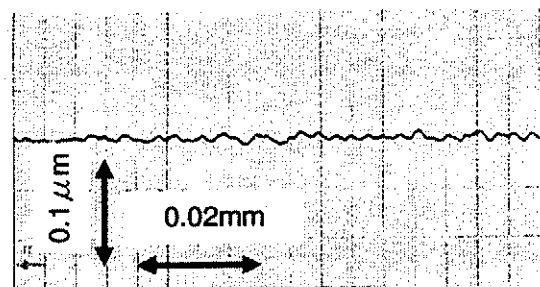
超精密超音波楕円振動切削法により焼入れした金型鋼を超精密ダイヤモンド切削する技術の開発を行った。本加工法はほぼ実用に近い技術水準に達していると考えているが、今後具体的な応用例を追加すると共に、本加工法をより高度化すべく研究を続けていきたい。本報告で紹介したように、超精密超音波楕円振動切削法は超精密マイクロ金型の加工をはじめ、今後多くの分野で応用することが考えられる。



鏡面の写真



送り方向の仕上げ面粗さ



切削方向の仕上げ面粗さ

図4 ステンレス焼き入れ鋼の外周旋削仕上げ面と粗さの測定例

被削材：ステンレス焼入れ鋼 ((JIS:SUS420J) HRC39
切削速度： 3.4m/min 、切込み： $10\mu\text{m}$ 、送り量： $10\mu\text{m/rev}$

謝辞

本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究援助を受けて行ったものであり、関係各位に深甚の謝意を表す。



図5 コンタクトレンズ金型を想定した凹凸金型の加工例

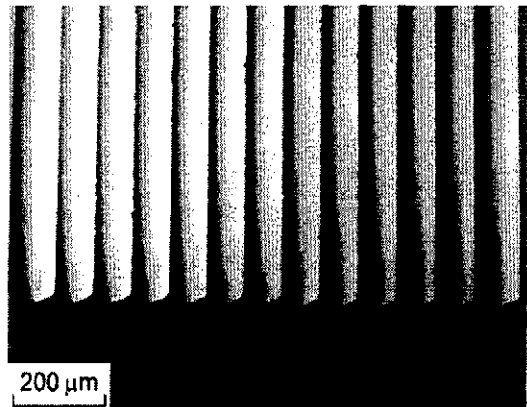


図6 導波板用金型を想定した三角溝の加工例

参考文献

- (1) 社本、森本、森脇：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、馬、森脇：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.
- (3) 社本、森本、森脇：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）441.
- (4) E. Shamoto and T. Moriwaki: Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, 48,1 (1999) 441.