

超音波楕円振動を利用した 小型金型の磨き加工に関する研究

水野雅裕*¹, 井山俊郎*¹, 木村 元*¹, 三船英伸*¹, 和村広見*²

Polishing of Small-sized Mold with Elliptical Ultra-sonic Vibration

Masahiro MIZUNO, Toshiro IYAMA, Hajime KIMURA, Hidenobu MIFUNE and Hiromi WAMURA

放電加工によって型彫りされた金型は、表面粗さの改善や加工変質層の除去のために後加工としてさらに磨き加工が必要である。複雑な形状を有する小型金型の場合、その磨き加工は手作業で行われているのが現状である。しかし熟練技能者不足と低加工能率などの問題から、磨き加工の自動化あるいは半自動化に対する要求は非常に強い。こうした背景から、新しい磨き加工方式の開発に取り組んだ。提案する磨き加工方式の最大の特徴は、磨き加工の対象となる金型から直接型取りした樹脂製工具の表面に超音波楕円振動を発生させ、これによってスラリーの供給と排出を効率よく行いながら加工するところにある。本論文では、この加工方式の基本特性を調べるために円筒内面の磨き加工実験を行い、砥粒サイズや加工圧力などの加工パラメータが加工面の表面粗さや加工能率に与える影響を調べた。その結果、A砥粒# 3000のスラリーを用いて加工圧を31~47kPaとした場合にRa0.05 μ m程度の良好な表面粗さが比較的高能率に得られることがわかった。

Key Words : Polishing, Polishing Machine, Mold, Elliptical Ultra-Sonic Vibration

1. はじめに

OA機器の小型化に伴って、複雑な形状を有する小型金型の需要が増加してきている。こうした金型の型彫りはもっぱら放電加工によって行われている。しかし、放電加工によって得られる表面粗さは金型の表面粗さとしては不十分であり、また、加工変質層も金型の寿命に大きな影響を与えるので、後加工としてさらに磨き加工が必要である。

一般に、複雑形状を有する金型の磨き加工はスティック砥石やダイヤモンドペーストを用いて手作業で行われている。手作業で行われている最大の理由は、金型の生産が典型的な多品種少量生産であり、人手の方がさまざまな金型形状に柔軟に対応できるからである。しかし一方で、金型の磨き加工には高度の熟練技能と多大な時間を要するので、その自動化あるいは半自動化に対する要求

は非常に強い。こうした背景から、本研究では新しい磨き加工方式の開発に取り組んだ。

本研究で磨き加工の対象とする金型のモデルを図1に示す。特徴として、貫通穴を有すること、穴の内部にインボリュート歯形と段差部があることなどが挙げられる。この金型の場合、歯形があるので回転工具は適用できない。また、段差部の磨き加工に対しては工具の直線運動さえも適用できない。本研究はこのような複雑な形状を有する金型に対しても磨き加工が行える装置を開発、提案するものである。

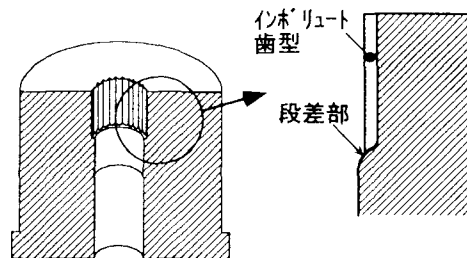


図1 磨きの対象とする金型のモデル

*1 岩手大学工学部 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

*2 ミクニアデック (〒020-0173 岩手郡滝沢村滝沢字外山309)
学会受付日 1998年7月21日

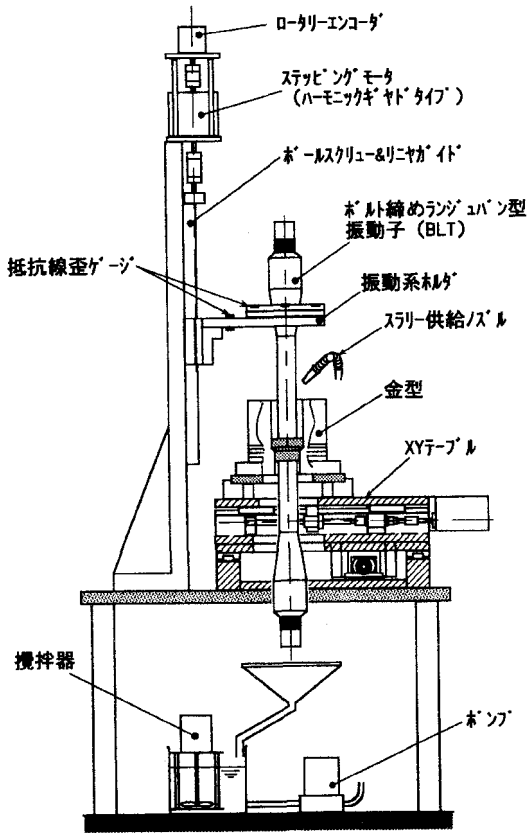


図2 加工装置の概要

2. 開発の目標

貫通穴を持った金型に対する新しい磨き加工装置を開発するにあたって、次の6つの目標を立てた。

- ①複雑形状を有する小型金型に対して、柔軟かつ即座に対応できること
- ②加工能率が高いこと
- ③磨きむらが少ないこと
- ④熟練工と同程度かそれ以上の表面粗さが得られること
- ⑤形状をできるだけ崩さないこと
- ⑥機械製作コストおよびランニングコストが比較的安いこと

磨き加工装置の実用化を図るためには、以上の条件がすべて満足される必要がある。

3. 加工原理

前項の目標を達成すべく考案した磨き加工方式の加工原理について述べる。

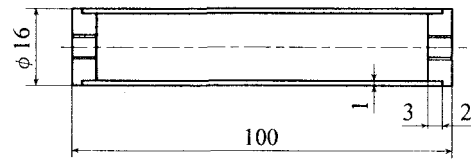


図3 パイプの形状

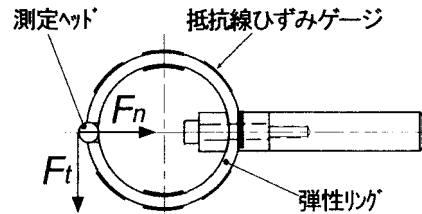


図4 リング型二分力動力計

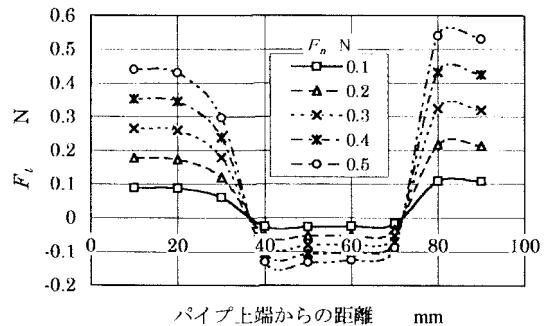


図5 パイプ表面に生じる搬送力

まず、開発目標②を実現するために超音波振動を利用することにした。用いた超音波振動子の振幅は約 $5\ \mu\text{m}$ と小さいものの周波数は約27kHzと高く、その平均摺動速度(約130mm/s)は熟練工が細部を手磨きする際の手の動きに比べて高速である。

図2は加工装置の概要図である。振動系は超音波振動子である二個のボルト締めランジュバン型圧電素子(以下、BLT)とそれらの振動振幅を増幅するためのホーン、一本のアルミニウムパイプから構成されている。パイプの両端はねじによってホーン端面に接続されており、パイプはホーン端面の振動によって加振される。その結果、パイプにはパイプ軸方向の縦振動とパイプ半径方向の横振動が生じ、それらが合成されてパイプ表面の一部に超音波楕円振動が生じる。

使用するパイプ(図3)の表面に発生する超音波楕円振動の発生状態を調べるために、リング型二分力動力計(図4)を用いて搬送力を測定した。図5は押しつけ力 F_n をパラメータにしてパイプ軸方

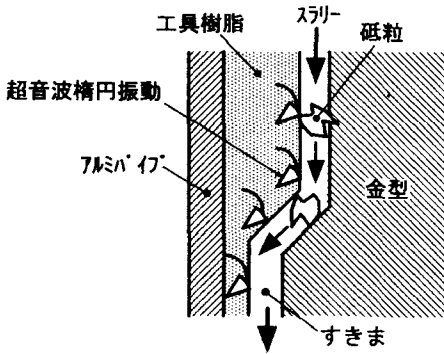


図6 超音波楕円振動を利用した磨き加工のメカニズム

向の搬送力 F_t の分布を測定した結果である。なお、ここでは上部BLTと下部BLTに与える電圧に 10° の位相差を与えることにより、より大きな超音波楕円振動を発生させている。搬送力の大きさは接触する物体間の摩擦係数によって異なるので、この実験結果から定量的な議論はできないが、パイプの上部と下部には下向きに物体を搬送しようとする超音波楕円振動が生じていることが明らかである。また、搬送力 F_t は押しつけ力 F_n が大きいほど大きくなるのがわかる。

本加工方式ではこの超音波楕円振動を用いてスラリーに含まれる砥粒を効率よく加工点に供給しながら加工を行う。そのためには、振動面と被加工面との間の隙間を、使用する砥粒の直径程度に小さくしなければならない。これに対し、本加工方式では次のような方法をとる。まず、離型剤を塗布した金型に表面を脱脂したパイプを挿入する。次に、両者の隙間にエポキシ系の樹脂を充填する。エポキシ系の樹脂は硬化時にわずかに収縮するので、硬化した樹脂の表面と金型との間にはスラリーが入り込める程度の隙間ができる。そして樹脂がパイプに固着した後で樹脂表面に超音波楕円振動を発生させてこれを加工に利用する。この方法では、金型から直接型取りした樹脂を工具として用いるので、さまざまな形状の金型に柔軟かつ即座に対応できる。したがって、開発目標①を実現することができる。

図6は、超音波楕円振動を利用した磨き加工のメカニズムを模式的に示したものである。一般的な超音波加工とは異なり、本加工方式では砥粒が加工面に対して浅い角度で衝突するので、粗さの山の部分が集中的に削り取られることが期待される。また、超音波楕円振動により砥粒が金型隅部

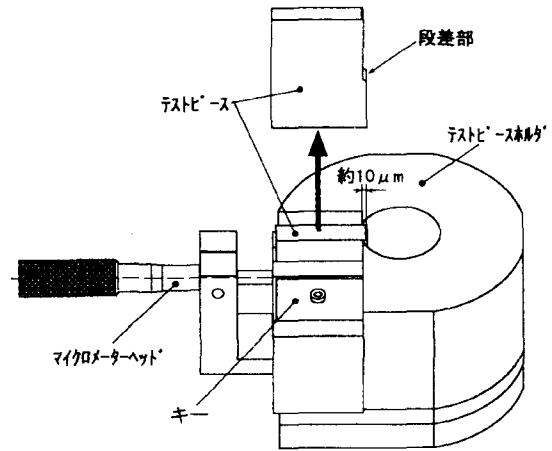


図7 実験用金型

に運ばれるので、金型の磨き加工で特に難しいとされている金型隅部の磨き加工も可能になると考えられる。

4. 加工システム

試作した加工装置は、前項で述べた振動系に加えて、金型をXY方向に移動させるためのXYテーブル駆動系、振動系ホルダを上下方向に移動させるための駆動系、振動子や駆動モータに電力を供給するための電源装置、それらを総合的に制御するためのパソコンから構成される。また周辺機器としてスラリー循環装置とスラリー攪拌器を備えている。

開発目標③を実現するためには被加工面に垂直な方向の加工圧力を加工中一定に保つ必要がある。そこで、振動系ホルダに板バネと抵抗線歪ゲージからなる3軸力センサを付加し、その出力に応じてXYテーブルと振動系ホルダを駆動して加工圧力を調整している。なお、工具樹脂に作用する加工力は力センサに作用するモーメントから算出している。この方式の採用により、たとえ工具に摩擦が生じたとしても一定の加工圧力を維持できるようになった。なお、使用したXYテーブル駆動系および振動系ホルダ駆動系の位置決め分解能は計算上約 $1\mu\text{m}$ である。

5. 加工実験

5.1 実験方法および実験条件

実験に使用した実験用金型を図7に示す。実験用金型は図1の金型から歯形部を取り除いたもの

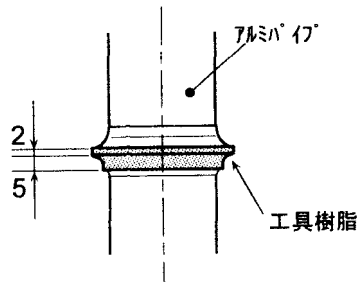


図8 工具形状

で、円筒内面と段差部を有している(ただし今回の実験では、本加工方式の基礎特性を調べるために円筒内面に対する加工実験だけを行う)。加工時間の経過に伴う表面粗さの変化および累積材料除去体積を測定できるようにするため、この金型の一部は、くさび型キーを解除することによって取り外せるようになっている。以下ではその部分をテストピースと呼び、それを固定している部分をテストピースホルダと呼ぶことにする。テストピースの幅は6.3mm、被加工面の曲率半径は10.50mmである。これに対し、テストピースホルダ内面の曲率半径はテストピース被加工面のそれよりも約 $10\mu\text{m}$ 大きく製作されている。そして、テストピースをテストピースホルダに対して約 $10\mu\text{m}$ 突き出して設置することにより、加工中、工具がテストピースホルダに接触しないようにした。これにより正確な加工圧を与えることができる。なお、テストピースにはHRCで58~62に処理されたSKD11改良材(大同特殊鋼(株)DC53)を用いた。また、被加工面の初期面は型彫り放電加工で加工された面であり、その粗さは算術平均粗さ R_a で $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ である。

工具に使用した樹脂はエポキシ系接着剤である。この接着剤はエポキシ樹脂の主剤と変性ポリオールの硬化剤を1:1の体積割合で混合するタイプで、硬化前の粘性は比較的高い。また、主剤と硬化剤を混合するとおよそ5分で硬化が始まり、常温で1時間、 0°C では8時間前後で実用強度に達する。この樹脂は粘性が高いため、主剤と硬化剤の混合中に多量の気泡が混入してしまう。そのため、真空ポンプを用いて樹脂内の気泡を可能な限り取り除いている。また、実験では工具の強度を高めるために樹脂に砥粒を混合している(重量比で10:1の割合とし、#400~#1500のスラリーを用いる場合には#1500のA砥粒を、#3000のス

ラリーを用いる場合には#3000のA砥粒を樹脂に混合)。工具形状を図8に示す。工具は図7の実験用金型からではなく、工具製作のために別に用意した金型から型取りして製作した。

スラリーには、水溶性の研削液(水道水で50倍に希釈)にA砥粒を5:1の重量比で混合したものをを用いた。実験に用いた砥粒の粒度は#400、#800、#1500、#3000の4種類である。スラリーの供給量は $17\text{ml}/\text{min}$ とした。

加工は、工具半径方向の振幅が約 $3\mu\text{m}$ の超音波楕円振動に加え、工具を上下方向に揺動させて(揺動振幅7mm、平均揺動速度 $0.4\text{mm}/\text{s}$)行った。また、加工圧力は16k、31k、47k、62k、78kPaの5種類で行った。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 加工圧力および砥粒粒度が表面粗さに与える影響

図9は、加工圧力とスラリー中の砥粒粒度をパラメータにして、加工時間の経過に対する被加工面の工具揺動方向の表面粗さ R_a の変化を調べた結果である。加工時間として工具揺動方向の単位長さ当たりの加工時間をとった。いずれの加工条件においても加工開始直後に R_a の急激な減少が見られる。この変化は、スラリーに粒度番号の大きな砥粒を使用した場合、特に顕著である。手磨きの場合、はじめは粒度番号の小さな砥粒を使用し、表面粗さの変化を見ながら徐々に粒度番号の大きな砥粒に変えていくのが効率的であるとされている。しかしこの加工方式においては、はじめから最終仕上げ用の、粒度番号の大きな砥粒をスラリーに使用した方が効率的であると言える。これは、粒度番号の大きな砥粒の方が工具と被加工面の間に入り込みやすく、その結果、被加工面への作用砥粒数が多くなるためであると考えられる。加工時間の増加とともに R_a の変化は次第に小さくなるが、最終的に得られる表面粗さも粒度番号の大きな砥粒のスラリーの方が小さくなっている。さらに、各々のグラフから、加工圧力が低すぎると表面粗さの低減率が小さくなる傾向があることがわかる。しかし逆に高すぎても同図(a)のように表面粗さの低減率が小さくなる場合がある。これは工具と被加工面の間に砥粒が入り込み難くなるためであると考えられる。したがって、使用する砥粒の粒径に応じた適切な加工圧力が存在するものと考えられる。

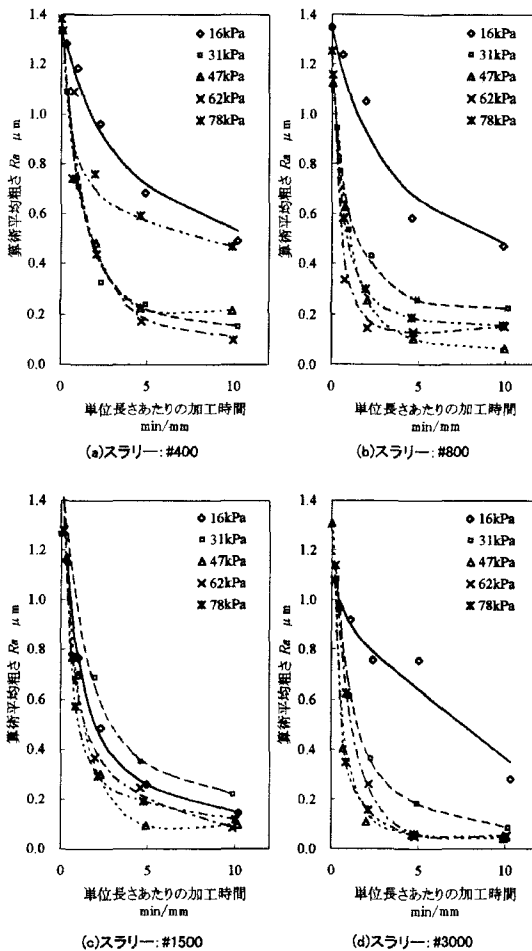


図9 加工時間の経過に伴う
工具揺動方向の表面粗さの変化

一方、図10はテストピース円周方向の表面粗さ Ra の変化を調べた結果である。加工開始直後は図9と同様に Ra の急激な減少傾向が見られるが、加工時間の経過に伴って Ra が増加傾向に転じている結果がいくつかみられる。これは工具に生じたキャビテーションの影響によるものと考えられる。225分加工を行った後の工具の写真を図11に示す。工具の加工面自体にはキャビテーションは現れていないが、側面にははっきりとキャビテーションが現れている。このキャビテーションの発生により、加工圧力が円周方向に様でなくなり、その結果、被加工面に凹凸が生じて表面粗さが増加傾向に転じるものと考えられる。このような結果を招かないようにするために、キャビテーションに強い工具樹脂材料を見出す必要がある。

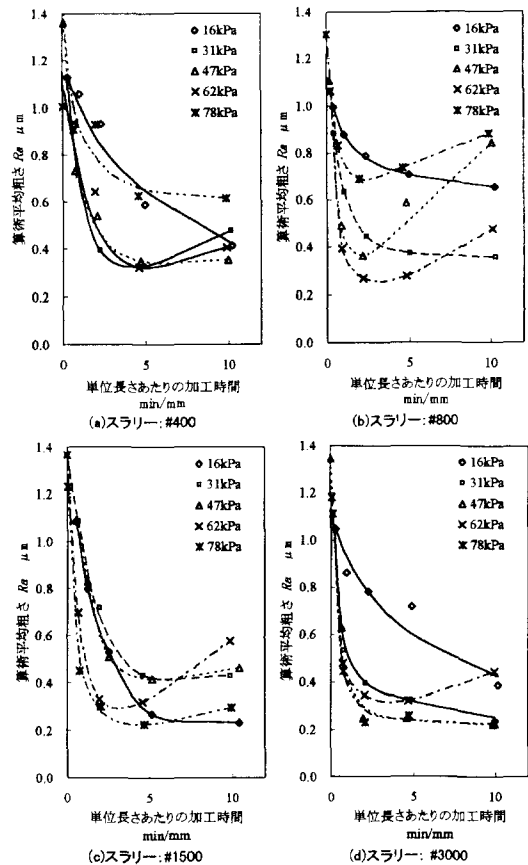


図10 加工時間の経過に伴うテストピース
円周方向の表面粗さの変化



図11 工具に生じるキャビテーション

5.2.2 表面粗さと材料除去体積

金型の磨き加工では、放電加工によって型彫りされた金型の初期形状をできるだけ崩さずに表面粗さを改善することが重要である。このことは少

ない材料除去体積で表面粗さを改善することに通じる。そこで材料除去体積と表面粗さの関係を調べることにした。一定時間(225分)加工を行った後のテストピースの材料除去体積と工具揺動方向の表面粗さ R_a の関係を図12に示す。材料除去体積はテストピースの重量の変化を精密天秤で測定し、それをテストピースの比重で割ることによって求めた。図には#3000のスラリーと砥粒を含まない樹脂だけの工具の組合せで加工した結果も(#3000)としてプロットしている。今回の加工条件の中では、#3000のスラリーを使用して加工圧力を31k~47kPaとしたときの結果が最もグラフの原点に近い位置にプロットされており、要求に適した加工条件であることがわかる。これに対し、#3000の砥粒を使用して加工圧力をさらに高くしても同程度の表面粗さは得られるが、材料除去体積が大きくなるので、初期形状を崩す可能性があると言える。

図13はテストピース円周方向の表面粗さ R_a に対する結果である。キャビテーションの影響が現れるため、図12よりも傾向がつかみにくいが、やはり#3000のスラリーを使用して加工圧力を31k~47kPaとして得られた結果が原点に近い位置にプロットされている。

6. 結 言

本論文では超音波楕円振動を利用した小型金型磨き加工装置を試作し、これを用いて円筒内面の磨き加工を行った。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) #400の砥粒よりも#3000の砥粒の方が高能率に表面粗さを改善することができた。
- (2) #3000の砥粒を使用した場合、最終的に得られた工具揺動方向の表面粗さは算術平均粗さで $0.05\mu\text{m}$ 程度であった。
- (3) 使用する砥粒の粒径に応じた最適な加工圧が存在する。
- (4) 現在使用している工具樹脂の場合、加工時間の増加とともにキャビテーションが生じ、それが加工面円周方向の表面粗さに影響を与える。

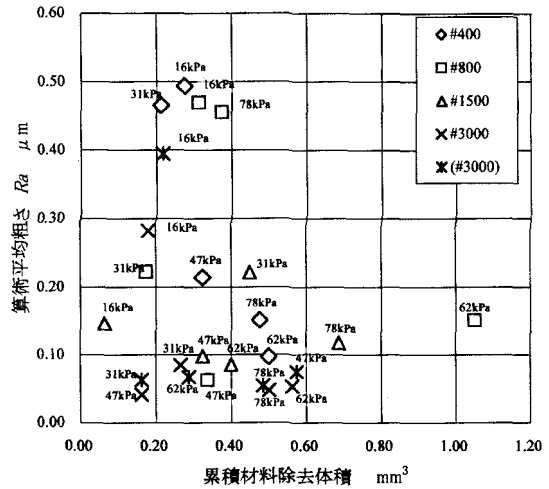


図12 工具揺動方向の表面粗さと累積材料除去体積の関係

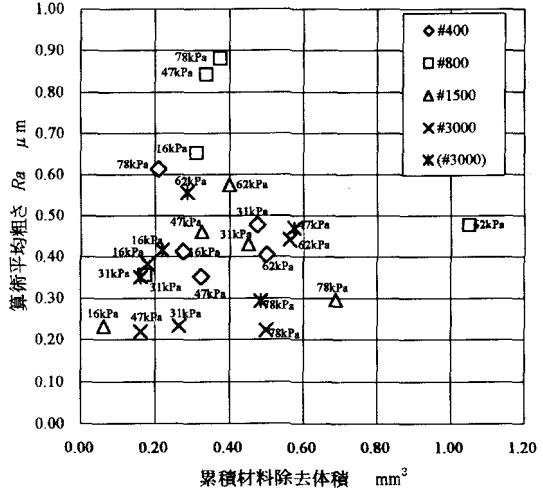


図13 テストピース円周方向の表面粗さと累積材料除去体積の関係

- (5) #3000の砥粒を使用し、加工圧力を31k~47kPaとしたときに、比較的少ない材料除去体積で良好な表面粗さが得られた。

謝 辞

本研究は、岩手県産学共同研究促進事業の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。