

◇ 特集 砥粒加工における振動の功罪 ◇

振動による金型材料の研磨

Lapping of mold material with tool oscillation

水野雅裕*
Masahiro MIZUNO

Key words: lapping, mold, mold material, EDM processed surface, tool oscillation

1. はじめに

中国、インドなどが著しい産業発展を遂げる中、アジアでは製造業を支える金型メーカーの競争が激化している。金型はものづくりの原点であり、金型の品質レベルが各国の生産技術力を示すと言っても過言ではない。金型技術には、設計技術、材料技術、加工技術、表面処理技術、評価技術、組立技術など、さまざまな技術が含まれ、それらの技術は競争の中で年々高度化している。本稿で述べる金型の研磨は、加工工程の中のほんの一工程であるが、高度化が進む金型技術の中で遅れをとってしまった工程のひとつである。金型技術全体の底上げを図るために、その自動化や高精度化が強く求められている。

回転工具で創成できないような異形形状を有する小形金型の形彫りは、一般に、放電加工によって行われる。しかしながら、放電加工によって得られる面は、加工変質層を伴った梨地面である。加工変質層は金型の寿命に影響を与え、梨地状の表面はそれによって作られる部品の表面粗さに影響を与える。近年、加工液に粉末を混入して鏡面を得る加工技術が進み、その結果、一部の金型において放電加工後の研磨加工が省略できるようになってきている¹⁾。しかし、外装面用のプラスチック型やガラス型などには、より小さな表面粗さが要求されるため、放電加工後の研磨を省略することは難しいとされている。

回転工具で創成できないような異形形状を有する金型は、当然、研磨加工も回転工具を用いて行うことができない。そうした金型の研磨は熟練作業者の手作業によって行われている場合が多い。研磨作業は高度な技能と膨大な作業時間を必要とし、金型製作コストの低減と納期短縮の大きな障害となっている。このため、放電加工面を高効率・高精度に研磨する自動研磨装置の開発が長年の課題になっている。こうした課題に対し、最近、放電加工面に電子ビームを間欠的に数分間照射し、表面の急速溶解と急速冷却を繰り返すことで研磨を行う、いわゆる非接触式の研磨技術が開発され、注目を浴びている²⁾。一方、筆者は砥粒を用いた従来からの接触式の研磨技術の高度化を目指している。

本稿では、筆者が金型研磨の自動化を目指して現在行っている、振動を用いた2つの研磨方法について紹介する。

2. 超音波振動を用いた研磨

はじめに紹介する研磨方法は、貫通したキャビティを有する金型を、スラリと超音波振動を用いて研磨する方法である。研究をはじめたきっかけは、歯車用金型の研磨を自動化したいという企業からの要望であった。

2.1 研磨の手順と原理

研磨加工の作業手順を図1に示す。同図の①～④に対応する説明は以下の通りである。①被研磨面である貫通穴内面に離型剤を塗布する。②表面を十分に脱脂したジュラルミン製の振動棒を貫通穴中央に挿入し、振動棒と貫通穴との間隙の下端部の隙間をシリコンゴムで塞ぐ。③振動棒と金型の隙間に適量のエポキシ樹脂を流し込み、金型全体を加熱して樹脂を硬化させ、工具を形成する。エポキシ樹脂は硬化時にわずかに収縮するので、工具と被研磨面との間にはスラリが入り込める程度のわずかな隙間ができる。④シリコンゴムを除去し、工具に超音波振動を与え、上方からスラリを供給して貫通穴内面の研磨加工を行う。

この研磨方法の特徴は、研磨対象の金型から樹脂で型取りして工具を作成するので、被研磨面の形状に柔軟かつ即座に対応できる点と、図1の④のように振動棒の中心軸(z軸:鉛直上向きを正とする)に対してわずかに傾いた方向に振動する超音波振動を樹脂工具表面に与えることで工具と被研磨面との間に入り込んだ砥粒を上方から下方へ効率よく搬送する点にある。後者は振動式パーツフィーダと同じ原理である。

2.2 研磨装置の概要

図2に研磨装置の概要を示す。研磨装置は、振動系、振動系を上下方向に移動するz軸駆動系、振動系をz軸周りに微小回転させるためのC軸回転テーブル、工作物を水平方向に駆動するxyテーブル、スラリ循環系、システム全体を制

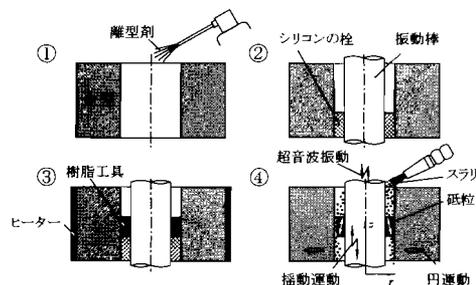


図1 研磨の作業手順

* 岩手大学工学部: 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5
(学会受付日: 2006年12月6日)

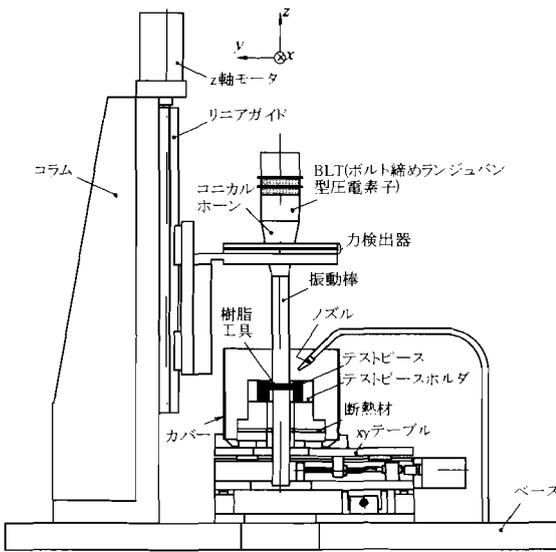


図2 超音波振動を用いた研磨装置の概要

御するパソコンなどから構成されている。工具に作用する力の3分力およびC軸の回転トルクを検出するため、抵抗線ひずみゲージ式の力検出器を用いている。

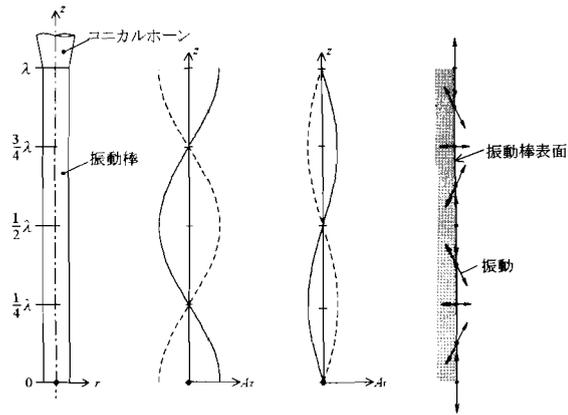
振動系は、公称共振周波数27kHzのボルト締めランジュバン型圧電素子(以下、BLT)、振動振幅を増幅するコニカルホーン、ジュラルミン製の中実振動棒から構成されている。

スラリー循環系は、容量20ℓのスラリタンク、スラリ攪拌装置、最大吐出量517mℓ/hのチュービングポンプから構成されている。

2.3 振動棒表面の振動状態

図3に、長さ λ の中実振動棒が共振状態にあるときの振動状態を示す。振動棒の最下端を $z=0$ とすれば、同図(a)のように、 $z=0, \lambda/2, \lambda$ の位置が振動の腹となり、 $z=\lambda/4, 3\lambda/4$ の位置が振動の節となる。振動棒の z 方向の振幅は振動の腹の位置で最大となるが、この位置では断面応力が変化しないため横ひずみが発生せず、同図(b)のように半径方向の振幅は零となる。一方、節の部分では軸方向の振幅は零であるが、この位置では断面応力の変化が最大となるために横ひずみが最大となり、半径方向(r 方向)の振幅が最大となる。砥粒を上方から下方へ効率よく搬送するような振動は、 $\lambda/4 < z < \lambda/2$ または $3\lambda/4 < z < \lambda$ において生じると考えられる。

振動棒の長さ λ を190mmに決定し、レーザドップラ振動計を用いて振動棒表面の rz 平面上での振動状態を測定した。 $z=90\text{mm}$ における測定結果を図4に示す。予想したように z 方向に対してわずかに傾いた直線的な振動が生じているこ



(a)z方向 (b)r方向 (c)rz平面上
図3 共振状態における振動棒の振動

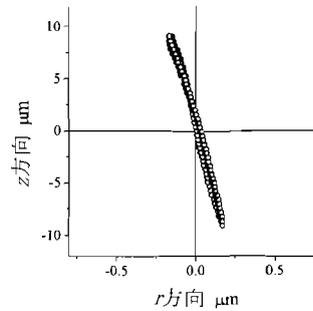
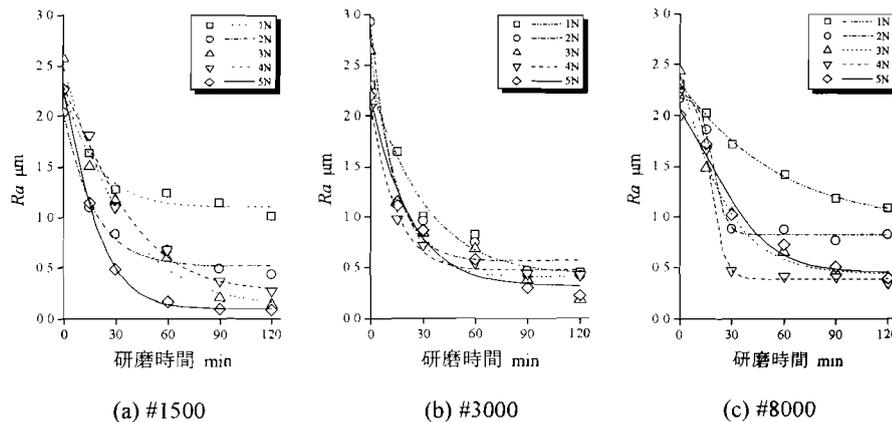


図4 $z=90\text{mm}$ の位置における振動棒表面の振動

とがわかる。以下に述べる研磨実験では、 $z=90\text{mm}$ の位置に工具の z 方向の厚み(4mm)の中心がくるように工具を形成した。

2.4 研磨実験の方法および結果

基本的研磨特性を調べるため、円筒内面の一部を研磨する実験を行った。工作物として用いたテストピースは熱処理されたSKD11改良材(大同特殊鋼(株)製DC53)であり、硬度はHRCで58-62である。被研磨面はワイヤ放電加工で加工された直径22mmの円筒内面であり、その初期表面粗さは算術平均粗さ Ra で1.5-3 μm 、最大高さ Rz で10-20 μm であった。



(a) #1500 (b) #3000 (c) #8000
図5 研磨時間の経過に伴う算術平均粗さ Ra (z 方向)の変化

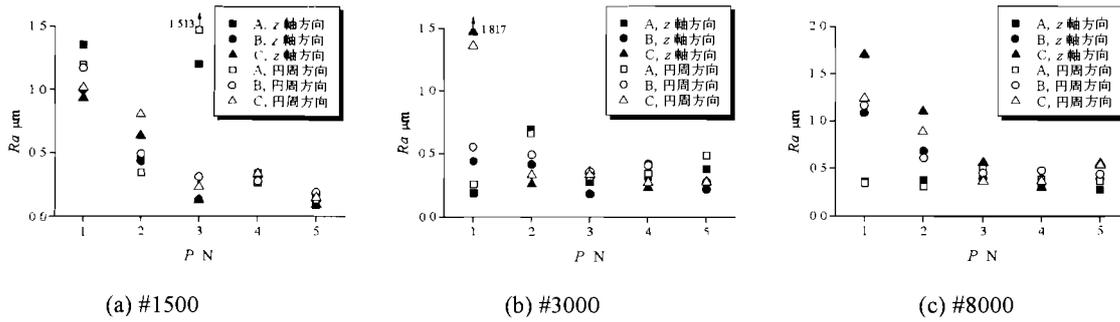


図6 表面粗さの測定位置と測定方向の違いによるばらつき

工具の作成にはスリーボンド製のエポキシ樹脂(主剤 2023, 硬化剤 2105C)を使用した。スラリは、#1500, #3000, #8000のWA砥粒と水溶性研削液(糊マルトー製クーラントCを水道水で50倍に希釈した液)を混合して作成した。砥粒と研削液の混合比は質量比で1:5とした。

本実験ではxyテーブルに速度16.7mm/minの円運動を与えつつ、工具をz方向に速度12.6mm/min, 振幅4mmで揺動させ、テストピース上端からz方向に9mmの範囲の円筒内面を研磨した。半径方向の研磨力は1, 2, 3, 4, 5Nとし、120分間研磨を行った。

研磨時間の経過に伴う被研磨面z方向のRaの変化を図5に示す。図のように、#3000の砥粒を使用した実験では半径方向の研磨力が異なっても粗さの変化の傾向はほとんど変わらなかった。また、この実験結果は、#1500の砥粒を使用して研磨力を5Nにしたときに小さな表面粗さ(Ra0.08μm)が得られることを示している。この理由についてはまだ明らかではないが、小さな砥粒は超音波振動によって工具と被研磨面との間から排除されやすく、そのために研磨効率が低下するのに対し、大きな砥粒は工具と被研磨面との間から排除されにくく、さらに研磨力が大きい場合には砥粒が樹脂工具に埋め込まれ、材料除去形態が研削に近い形になって除去効率が高まるためではないかと考えている。

また、図6には各研磨条件で得られた測定位置と測定方向の違いによる粗さのばらつきを示している。この結果は、#1500の砥粒を使用して研磨力を5Nにしたときの粗さのばらつきが非常に小さいことを示している。

2.5 超音波振動による研磨方法の今後の展開

ここで紹介した研磨実験は単純な円筒内面に対するものであったが、現在は歯車型をテストピースとして実験を行っている。歯車型の歯面を研磨するため、振動系に微小回転を与え、そのトルクを制御しながら研磨を行っている。歯すじ方向の粗さに関してはRa0.07μm以下が得られているが、歯たけ方向の粗さがRa0.7μmと大きいため、今後その改善を行っていく予定である。

3. 楕円振動を用いた研磨

次に紹介する研磨方法は、異形状のキャビティ底面をダイヤモンドコンパウンドと楕円振動を用いて研磨する方法である。この研究をはじめたきっかけは、ICパッケージ用の金型の四角いキャビティの底面を自動で研磨したいという企業からの

要望であった。

3.1 研磨の原理

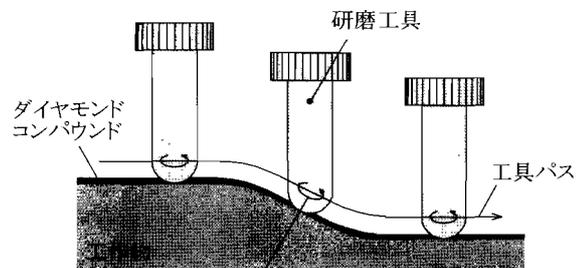
図7のように工具先端に微小振幅の楕円振動を与え、そこにダイヤモンドペーストを供給して研磨を行う。楕円振動によってダイヤモンド砥粒が一方方向に搬送され、その際に材料除去が行われる。パソコンからの指令により被研磨面の傾きに応じて楕円振動の軸の傾きを変化させれば、傾いた面の研磨も可能であると考えられる。

3.2 研磨装置の概要

図8に研磨装置の概要を示す。試作した研磨装置は、工具先端に楕円振動を与える振動系と、振動系を上下方向(z軸:鉛直上向きを正とする)に駆動するz軸駆動系、工作物を水平方向(xy方向)に駆動するxyテーブル、システム全体を制御するパソコンなどから構成されている。工具に作用する力のz方向分力を検出するため、振動系の支持部には4枚の抵抗線ひずみゲージが貼り付けられている。ブリッジからの出力は動力計で増幅され、遮断周波数10Hzのローパスフィルタでフィルタリングされた後、AD変換器を介してパソコンに取り込まれる。この力検出器とz軸駆動系により、z方向の研磨力の平均値を所定の値に維持することができる。

3.3 工具先端に楕円振動を与える振動系

振動系は弾性フレームと2つの積層型圧電素子(以下、PZT)から構成されている。2つのPZTの中心軸は同一のxz平面内にあり、いずれもz軸と45度の角度をなしている。工具は、その先端が2つのPZTの中心軸の交点に位置するように固定されている。各PZTが伸縮すると、2枚の板ばねで支持されたA部とB部が各PZTの中心軸方向に変位し、それらの変位が板ばねを介して工具取り付け部Cに伝わる構造になっている。このように板ばねを介して変位を伝えるのは、互



楕円振動

図7 楕円振動による研磨

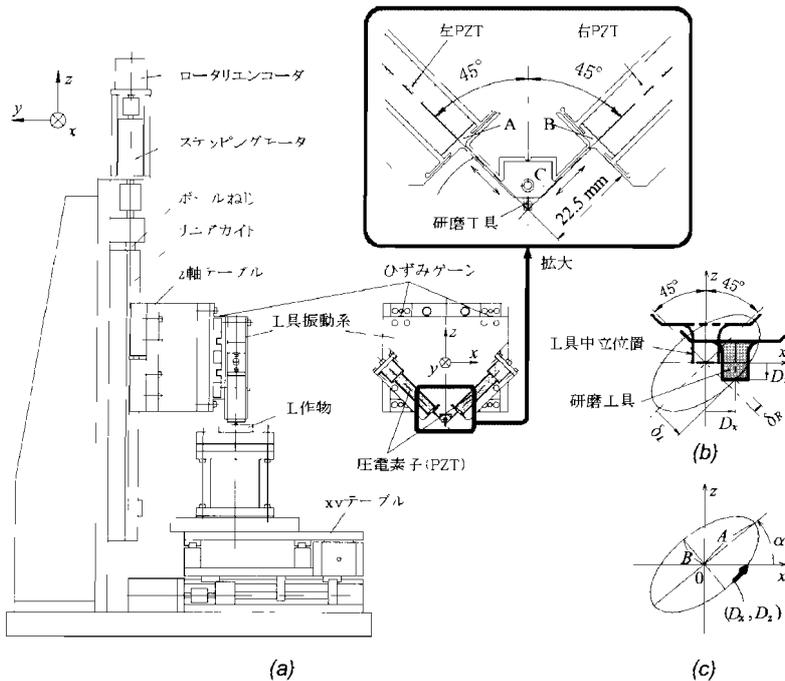


図8 楕円振動を用いた研磨装置の概要

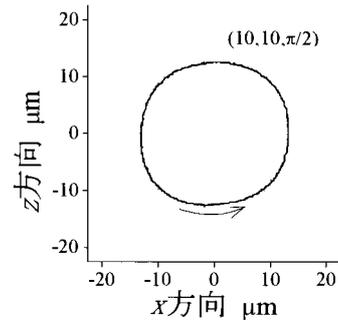


図9 工具振動形態の一例

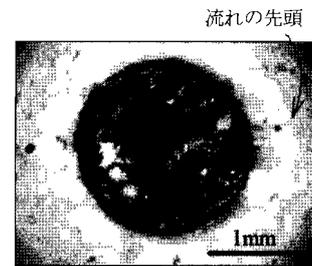


図10 円振動での砥粒の流れ

いに他方のPZTの伸縮を拘束しないようにするためである。

3.4 工具の振動と砥粒の流れ

同じ振幅で位相差が $\pi/2$ radのバイアスされた50Hzの交流電圧を各PZTに与え、レーザドップラ振動計を使用して工具先端の振動形態を測定した。結果を図9に示す。この場合、円振動に近い振動形態が得られることがわかる。ここでは省略するが、各PZTに与える電圧の振幅と位相差を変えることで、直線的な振動やz軸に対して傾いた軸をもつ楕円振動など、さまざまな振動形態が得られることを確認している。図9の振動を直径2mmの円形端面をもつ木質樹脂工具に与え、 $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドコンパウンドを使用して板ガラスの表面を研磨し、そのときの砥粒の挙動を板ガラスの裏側からマイクロスコープを用いて観察した。得られた画像を図10に示す。工具周りのダイヤモンドコンパウンドの濃淡から砥粒が一方方向に流れていることがわかる。

3.5 円振動を用いた研磨実験

一辺2mmの正方形端面を有する木質樹脂工具に図9に示す円振動を与え、2Nの研磨力でDC53 (SKD11改良材)の型彫り放電加工面の研磨加工を行った。実験では $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドコンパウンドを使用し、工作物には速度3mm/min、ストローク4mmの直線往復運動をx方向に与えた。また、工作物送り方向に対する円振動の回転方向の影響を調べるため、UpモードとDownモードの両方で研磨を行った。研磨領域中央のx方向とそれに直角なy方向の算術平均粗さの変化を図11に示す。図のように、120分の研磨でx方向およびy方向ともに Ra が $0.1\mu\text{m}$ 程度の粗さが得られた。また、UpモードとDownモードの間には大きな差はみられなかった。

3.6 楕円振動による研磨方法の今後の展開

ここでは円振動による研磨実験結果だけを示したが、円振動と楕円振動では研磨結果に大きな違いが現れることがこれ

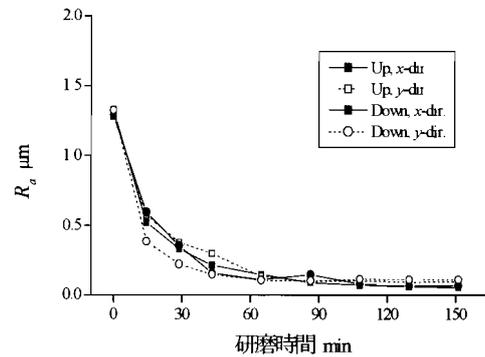


図11 表面粗さの変化

までの実験でわかっている。今後は、どのような楕円振動を用いれば効率的に良好な表面が得られるかについて詳細に調べていきたいと考えている。

4. おわりに

回転工具では研磨が行えないような異形状の金型を接触式方法で研磨する方法としてバレル研磨などの方法もあるが、より高精度に局所的な研磨を行いたい場合には工具の微小振動を用いた研磨に頼らざるを得ない。振動を用いた研磨で重要なことは、工具と工作物の間に適量の砥粒を一様に分散させて供給することであると筆者は考えている。

5. 参考文献

- 1) 後藤昭弘: 粉末混入放電加工による磨きレス金型の製作, 砥粒加工学会誌, 44,6(2000)264.
- 2) 岡田晃, 宇野義幸, 藪下法康, 植村賢介, Purwadi Rharjo: 大面積電子ビームによる金型加工面の高能率仕上げに関する研究(第1報) - 放電加工面平滑化の可能性と基本的加工特性の解明, 精密工学会誌, 69,10(2003) 1464.