超音波振動を援用した金型の鏡面仕上げ加工(第2報)*

—自作電着工具による加工試験・研削挙動の観察—

原 圭祐** 磯部浩巳*** 吉原英雄† 久曾神 煌†† 柳 和久††

Ultrasonically Assisted Machining for Mirror Finishing of Die (2nd report)
—Grinding Test with Self Electroplated Tool and Observation of Grinding Behavior—

Keisuke HARA, Hiromi ISOBE, Hideo YOSHIHARA, Akira KYUSOJIN and Kazuhisa YANAGI

Dies for injection molding parts such as cellular phones and light conductive parts require a high quality surface finish in terms of both appearance and integrity. Manual finishing is an important die manufacturing process, which decides the surface roughness of a die and influence the accuracy of its shape. However, manual polishing consumes several days to finish the die surface. Therefore, high precision die milling or grinding are required that improve surface roughness, in order to minimize polishing operation. In the previous report, ultrasonically diamond grinding experiments were carried out to confirm ultrasonically oscillation effect for die steel face grinding. And mirror surface was obtained. However, tool form error and run-out prevent 3D form mirror grinding. Because high shape accuracy tools are essential for high precision 3D form grinding. This paper provides results of toolmaking and performances of electroplated tools in ultrasonically assisted grinding. Electroplated tools can perform ultrasonically assisted face grinding and ground surface has roughness $0.24\mu\text{mRz}$.

Key words : ultrasonically assisted grinding, electroplated diamond tool, die steel, mirror finishing

1. 緒 言

近年、携帯電話のボタンや液晶パネルといった光透過部品の需要が増大している。これらの光透過部品は金型による射出成型加工で生産される。金型成形では金型の形状が製品に転写されるため、金型には厳しい幾何公差のみならず外観的な鏡面仕上げが求められる。そのため金型生産の最終工程で熟練工による手作業研磨仕上げが行われている。しかし、手仕上げ工程は数日単位を要し、金型生産期間短縮の妨げになるほか、機械加工面と比べて平面度、直角度などの幾何公差が劣るという欠点がある。

鏡面加工を目的とする超精密機械加工の1つに、ダイヤモンド工具を用いた加工がある。ダイヤモンドは高硬度、高熱伝導率、鋭利な切れ刃など工具として優れた特性を有し、硬脆材料、非鉄金属などの超精密加工に適している¹⁾²⁾。しかし、ダイヤモンド工具で鉄系材料を加工し、工具が973K以上になると、ダイヤモンド中の炭素原子は鉄と化学反応し³⁾、急速に摩耗することが知られている。

隈部により提唱された超音波振動援用加工⁴⁾は、超精密切削⁵⁾やセラミックス、ガラスなどの高脆材の加工⁶⁾において優れた成果をあげている。工具を超音波領域で振動させることで、工具と加工物間の相対速度が上昇し、瞬間的に隙間が生じ、そこに加工液が流入し温度の低下、潤滑・切屑排出の促進などの効果が期待される。また、超音波振動を援用したダイヤモンド工具による鉄系材料の加工では、工具と加工物の連続接触を避けることができ、加工部の温度をダイヤモンドと鉄の反応温度(973K)以下に保ち、化学反応を防ぐことで、ダイヤモンドの工具として優れた特性を鉄系金属の加工においても発揮できることが報告されている⁷⁾。

筆者らは前報⁸⁾において、ダイヤモンド電着工具を用いた超音波振動援用正面研削を行い、工具砥粒の脱落・摩耗なくワンパスで金型鋼NAK80の準鏡面仕上げ($0.40\mu\text{mRz}$)を実現した。しかし、超音波

スピンドルは軸方向に超音波振動を発生、工具に伝達させる特殊な構造を持つため、スピンドルの半径方向の回転振れも大きくなり、3次元形状の精密研削は困難である。また、超音波領域で振動させられる工具は、形状、重量、長さ自由度が少なく、市販の汎用工具が使用できない場合が多い。本研究の目的は、金型表面の仕上げ研削を実現することである。そこで回転振れの抑制、超音波スピンドルで発振可能な工具を機上で調整しながら自作することを目的に、電着工具を機上で製作・成形する手法を提案する。本報では前段階として、ダイヤモンド電着工具を自作、正面研削試験を行い、加工性能を調査した。同時に、工具軸にダイヤモンド砥粒を1粒だけ電着した工具を試作、加工試験を行い、研削挙動を調べた。

2. 実験装置・方法

2.1 ダイヤモンド砥粒電着方法

今回製作した電着工具の台金形状を図1に示す。工具軸は①先端径 $\phi 1.7$ (Type 1) ② $\phi 4$ の超硬シャンク(Type 2)の2種を用いた。電着工程は、①台金の脱脂②酸洗(エッチング)③ダイヤモンド砥粒の電着からなる。台金の脱脂は、界面活性剤水溶液への浸漬による洗浄(5分間)の後、苛性ソーダを添加した界面活性剤水溶液で $5\text{A}/\text{dm}^2$ の電流密度で1分間陰極電解脱脂を行った。各工程間には水洗を行っている。工具軸へのダイヤモンド砥粒電着は、図2に示すような電着槽を用いてワット浴で行った。ダイヤモンド砥粒を電着槽内のフィルタ中に入れ、局部的に砥粒密度を高くし、その中に電着工具軸を挿入して表1の条件で電着を行った。電着は、①電気Niメッキで砥粒を工具軸へ付着させる、②追メッキを行い砥粒を工具軸に完全に固定するの2工程からなる。電気メッキにおけるメッキ厚 h は

Fig. 1 Design of base shank for electroplated tool

* 原稿受付 平成18年8月22日

** 学生会員 長岡技術科学大学大学院 (新潟県長岡市上富岡町1603-1)

*** 正会員 長野工業高等専門学校 (長野市徳間716)

† 正会員 (財)にいがた産業創造機構 (新潟市万代1-2-1)

†† 正会員 長岡技術科学大学工学部 (新潟県長岡市上富岡町1603-1)

Fig 2 Electroplating method

Table 1 Conditions for electroplating	
Current density	2A/dm ²
Liquid temperature	40 ~ 45°C
Liquid pH	4.5 ~ 5
Electroplated abrasive	TOMEI diamond #100/120 (Ave. dia. 150μm)

以下の式(1)のメッキ時間と電流密度の関数として得られる⁹⁾。

$$h = \frac{kIt}{\rho A} = \frac{k}{\rho} it \quad (1)$$

ここで、 k ：電気化学等量 g/Ah (Ni：1.095 g/Ah)， I ：電流 A， t ：メッキ時間 h， ρ ：メッキ金属密度 g/cm³ (Ni：8.9g/cm³)， A ：メッキ部面積 cm²， i ：電流密度 A/cm²

今回はNiを電流密度2A/dm²でメッキするので、(1)式は、

$$h = \frac{k}{\rho} it = \frac{1.095}{8.9} \times 2 \times 10^{-2} \times t = 0.0025t \text{ cm} \quad (2)$$

となる。すなわち、1時間あたりのメッキ厚さは25μmである。今回電着した砥粒は#100/120で、平均粒径が150μmである。また電着工具の砥粒突出量を砥粒径の約半分の75μmとしたので、メッキ厚は約75μmとなり、砥粒固定のため電気メッキに要する時間は約3時間である。自作した工具(Type 1)と市販工具(FSK AAR47：φ2 / #100)の端面を撮影した顕微鏡写真を図3に示す。砥粒の集中度はいずれも150程度であり、市販品と同等の工具の製作ができた。

2.2 加工機械

本研究では前報⁸⁾と同様に、汎用縦型NCフライス盤(牧野精機MHNC-405)の主軸頭を、60kHzの超音波スピンドル(岳将URT-V04-612S)に交換した工作機械を用いた。加工装置の概要図を図4に示す。超音波スピンドルは、回転運動と同時に60kHzのZ軸方向超音波振動を工具に与えることができる。主軸の最高回転速度は10000min⁻¹である。工具の振れまわりを抑えるため、工具ホルダの工具取付穴は機上でセルフカットを行い、工具の静的半径方向振れを10μm以下に調整した。超音波スピンドルの振動周波数は工具の全長によって変化する。そのため超音波スピンドルの仕様(60±0.5kHz)に入るように工具シャンクをカッターで切断し工具長を実物調整した。スピンドルに工具ホルダを介して工具を取り付け、超音波発振を行った結果、Type 1, 2の工具ともにZ方向の振幅は1μm、半径方向の振動振幅は0.1μm以下であった。

2.3 加工方法

ワークは、プラスチック射出成型金型用の金型鋼 NAK80(析出硬化系 プリハードン鋼、JIS 相当なし、40HRC)を使用した。ワーク表面をエンドミルで溝加工によって10×10mmのセルに区切り、各セルの表面をエンドミルで正面切削し、前加工とした。前加工条件を表2に示す。ある1つの加工条件に対して、このセル1面を使用する。前加工後のワークの表面粗さは2μmR_aであった。

本研究で行った加工の概要図を図4に示す。ワークはフライス盤テーブル上に固定される。超音波スピンドルに取り付けられた工具にはZ軸方向の超音波振動(60kHz)と同時にスピンドルの回転運動が与えられる。本実験はワーク表面の正面研削を行うので、工具のZ軸方向運動を固定し、ワーク座標に対してX-Y軸方向に工具を送った。切削液は油性(JIS N4-7種)を用い、加工中適宜スポイトで滴下した。

(a) electrodeposited tool (Type 1) (b) commercial tool
Fig 3 Microphotographs of electroplated tool

Fig 4 Scheme of ultrasonically assisted grinding equipments and the ultrasonically assisted grinding

Table 2 Pre-machining conditions	
Tool	NS Tool MSE230 φ2.5
Spindle speed	6000 min ⁻¹
Feed rate	120 mm/min
Depth of cut	0.1 mm
Radial depth of cut	0.5 mm

2.4 加工後の評価

加工表面の仕上がり状態を評価するため、送り方向およびピック送り方向に沿った表面粗さの測定および、光学顕微鏡による加工痕の観察を行った。

現在、「鏡面」の基準・規格、評価方法は確立されておらず、定量的な評価は難しいが、一般に0.1μmR_a以下とされている¹⁰⁾。なお本論文ではR_a>0.1μmであっても加工面に文字などを反射して写し込める面を「準鏡面」と記述した。加工前後には光学顕微鏡を用いて工具端面の砥粒の摩耗状態を観察した。

3. 加工実験結果

3.1 加工パラメータの加工面に及ぼす影響

3.1.1 工具回転速度の影響

超音波スピンドルに取り付けた工具の回転速度を変化させて加工実験を行った。実験条件を表3に、仕上げ面写真、顕微鏡写真および送り方向に沿って測定した断面曲線を図5に示す。加工時間は12min/100mm²であった。4000min⁻¹で加工した面は0.24μmR_a、7000min⁻¹では0.28μmR_aと文字を明瞭に写す準鏡面に仕上げられた。9000min⁻¹では0.80μmR_aのやや曇った面となった。断面曲線観察の結果、スピンドル回転速度が速い9000min⁻¹の加工面には、高さが約0.4μm、波長が約110μmの周期的な凹凸があることが確認できる。この波長は、工具1回転あたりの送り量*l_r*と考えられる。工具1回転あたりの送り量*l_r*は以下の式(3)で計算される。

$$l_r = \frac{F}{S} \text{ mm} \quad (3)$$

ここで、 F ：送り速度 mm/min， S ：スピンドル回転速度 min⁻¹である。回転速度が9000min⁻¹のとき、 $l_r=110\mu\text{m}$ となり、これは周期的な凹凸の波長と一致した。回転速度が4000min⁻¹、7000min⁻¹と遅いときには*l_r*と一致した間隔の凹凸高さは約0.15μmと小さかった。これ

よりスピンドル回転速度を速くすると表面粗さが悪化し、加工面の鏡面反射性も劣ることがわかった。表面粗さ悪化の原因は、断面曲線の凹凸波長がスピンドル回転速度に依存していることから、加工中にスピンドルが回転することで発生する工具ワークの相対振動によるものと考えられる。また、断面曲線で得られる凹凸の波長と理論値の一致は、工具刃が1枚のときに成立するものである。

断面曲線を観察すると、さらに波長が5~20 μm 程の周期的な凹凸があることがわかる。この波長は、工具の超音波振動1周期あたりに工具が被削材を掃く長さ l_U と一致している(図6)。 l_U は以下の式(4)より計算できる。

$$l_U = \frac{2\pi \times 10^3 \cdot S}{60f} \quad \mu\text{m} \quad (4)$$

ここで、 r : 工具の半径 mm, S : スピンドル回転速度 min^{-1} ,

f : 超音波振動の周波数 Hz

l_U と、周期的な凹凸の間隔は、観察結果と計算結果がほぼ一致することが確認できた。続いて、この凹凸の高さを断面曲線より読み取り、その値を h_r とする。また、この高さを理論的に計算した値 h_{th} と比較する。理論計算式をたてる上での仮定は以下に示す。

1. 砥粒の先端半径は200 μm である
 2. 加工に作用する砥粒は、工具最外周の1粒のみである
 3. 回転速度に比べて送り速度は遅く、その影響を無視できる
- 仮定1は、工具の砥粒形状を観察した結果より得た。仮定2は、断面曲線の凹凸波長が理論値と一致することおよびワンパス加工をしたときのカットマーク径が工具径と一致することより得た。工具周方向に図6のような砥粒が掃くカットマークが加工面に転写され、 h_{th} を求める以下の式(5)が得られる。

$$h_{th} = \frac{1}{8R} l_U^2 = \frac{1}{8R} \left(\frac{2\pi \times 10^3 \cdot S}{60f} \right)^2 = \frac{1370 \cdot r^2 \cdot S^2}{f^2 \cdot R} \quad \mu\text{m} \quad (5)$$

ここで、 R : 砥粒の先端半径 μm , r : 工具の半径 mm,

S : スピンドル回転速度 min^{-1} , f : 超音波振動の周波数 Hz
スピンドル回転速度と理論および実測した凹凸の高さの関係を図7に示す。理論計算による凹凸の高さ h_{th} と実測の凹凸高さ h_r が非常に近いことが確認できる。このような結果が得られたことは、前述の仮定が裏付けされたことを意味する。すなわち仮定2より、主に工具軸に電着された単一の砥粒のみで加工していると考えられ、加工を行う砥粒が少なくとも準鏡面仕上げができることを示している。

3.1.2 ピック送り量の影響

ピック送り量を変化させた加工実験を行い、加工面に及ぼす影響を調査した。実験条件を表3、仕上げ面写真、顕微鏡写真および断面曲線を図8に示す。加工面はいずれも0.37~0.40 μmRz の準鏡面に仕上げられた。ピック送り量が最も小さい $P=10\mu\text{m}$ の断面曲線には、表面に深さ0.2 μm ほどの傷(図中○印)が多く付いていることが確認できた。ピック送り量が最も大きい $P=30\mu\text{m}$ の加工面には傷が少なかった。ピック送り量が小さいほど工具が加工後の面に接する時間が長く、この間に加工液中の切屑などにより加工面が傷つけられる可能性が高いためと考えられる。

Table 3 Experimental conditions for verifying effect of grinding parameters

Spindle speed	S	4000*, 7000, 9000 min^{-1}
Feed rate	F	500, 1000*, 1500 mm/min
Radial depth of cut	P	10, 20*, 30, 40** μm
Axial depth of cut	h	10 μm
Ultrasonic vibration (Freq. / Amp.)		60kHz / 1 μm
Cutting fluid		Oil based cutting fluid (JIS N4-7)
Tool		Type 1

*Standard condition, **Apply for endurance test

3.1.3 送り速度の影響

送り速度を変化させた加工実験を行った。実験条件は表3に、仕上げ面写真、顕微鏡写真および送り方向に沿って測定した断面曲線を図9に示す。加工実験の結果、送り速度が1500mm/minと速いときには、工具1回転あたりの送り量 l_R に一致した間隔の凹凸がはっきりと見られ、表面粗さは0.98 μmRz と粗く、加工面には綾目模様が見られる。送り速度が500~1000mm/minと遅いときには綾目模様がみられず、断面曲線の観察からも l_R に一致した凹凸は確認されな

(a) Photographs, roughness Rz values and microphotographs of ground surface

(b) Profiles of ground surface

Fig. 5 Results of experiment for verifying effect of spindle speed

Fig. 6 Geometry of theoretical surface texture ground by ultrasonic assisted grinding

かった。表面粗さは $0.37\mu\text{mRz}$ の準鏡面が得られた。送り速度を 500mm/min と遅くした場合、表面に深さ $0.2\mu\text{m}$ 程度の傷が入っていることが確認された。この原因は、ピック送り量の場合と同じく、送り速度が遅いほど加工後の面に接する時間が長く、切屑などにより加工面が傷つけられる可能性が高いためと考えられる。

Fig 7 Relationship between profile height and spindle speed

(a) Photographs, roughness R_z values and microphotographs of ground surfaces

(b) Profiles of ground surface

Fig. 8 Results of experiment for verifying effect of radial depth of cut P

3.2 工具の耐久試験

電着した工具を用いて連続加工を行い、工具砥粒の摩耗、加工時間に対する表面粗さの変化を調査した。加工条件は表3の標準条件である。実験は、①粗さ測定面を $P = 20\mu\text{m}$ ($0.24\mu\text{mRz}$ 達成条件)で 100mm^2 加工、②工具を摩耗させるため $P = 40\mu\text{m}$ で 1000mm^2 加工(加工時間 30min)、を繰り返す。工具の顕微鏡観察の結果を図10に、加工時間と表面粗さの関係を図11に示す。ツルーイング後から加工時間 150min までは、加工面粗さの悪化、工具砥粒の脱落は確認されなかった。しかし、加工時間が 300min に達する直前で、加工中に砥粒が脱落する音が確認された。この後 $P = 20\mu\text{m}$ で加工を行ったところ、表面粗さが $0.71\mu\text{mRz}$ とツルーイング直後の $0.33\mu\text{mRz}$ に比べ2倍に悪化した。工具を顕微鏡観察した結果、砥粒の脱落、摩耗が確認された。これより、加工時間 150min、加工面積 5000mm^2 までは、ツルーイング直後の加工性能を維持して研削を継続できた。携帯電話金型1つの仕上げ加工面積が 10000mm^2 程度であるので、

(a) Photographs, roughness R_z values and microphotographs of ground surfaces

(b) Profiles of ground surface

Fig. 9 Results of experiment for verifying effect of feed rate F

1本の電着工具で携帯電話金型の半分程度の仕上げ研削ができる。

3.3 単一砥粒電着工具による加工

3.1.1 節で行った波長 $5\sim 20\mu\text{m}$ の周期的な凹凸高さの理論計算と実測値の比較から、加工時には工具に電着された砥粒1粒のみで加工を行っている可能性が高いことを指摘した。そこで本節では、砥粒を1粒だけ電着した工具を製作、加工を行い、仕上げ面外観、断面曲線を調査した。工具の形状は、図1のType2の形状とし、軸端面に1粒だけ砥粒を電着した。工具の顕微鏡写真を図12に示す。砥粒は、工具軸の中心から1.2mm離れたところに固定された。

最初に工具をツルーイングせずに加工を行った。加工条件は表4に、加工面の顕微鏡写真を図13に示す。加工試験の結果、送り速度が速い またはピック送り量が大きいときは綾目模様が目立つ面になり、通常の電着工具で加工を行った結果と傾向が一致している。送り方向の断面曲線を観察した結果からも、送り速度が速い またはピック送り量が大きい場合には λ_r と等しい間隔の凹凸が確認された。

次に、ツルーイング後に加工を行った。仕上げ面写真を図14に示す。加工の結果、表面粗さが $0.14\sim 0.17\mu\text{mRz}$ と通常工具による加工よりも良好な仕上げ面を得た。これは、加工に作用する砥粒が1粒でも $0.2\mu\text{mRz}$ 以下の準鏡面仕上げができることを意味する。つまり曲面などを鏡面研削するとき、工具と工作物の接触部分が少なく加工に作用する砥粒が少なくても鏡面仕上げできる可能性がある。また、ツルーイングを行うことで加工面の表面粗さおよび鏡面反射が改善できることを確認できた。

Fig. 10 Microphotographs of tool end face

Fig. 11 Relationship of process time between roughness R_z
grinding conditions: $S=4000\text{min}^{-1}$, $F=1000\text{mm/min}$, $P=40\mu\text{m}$

Fig. 12 Microphotographs of single grain electroplated tool

Table 4 Experiments conditions for grinding test with single grain electroplated tool

Spindle speed	S	$4000^*, 7000\text{min}^{-1}$
Feed rate	F	$500^*, 1000\text{mm/min}$
Radial depth of cut	P	$20^*, 30\mu\text{m}$
Axial depth of cut	h	$5\mu\text{m}$
Ultrasonic vibration (Freq./Amp.)		$60\text{kHz}/1\mu\text{m}$
Cutting fluid		Oil based cutting fluid (JIS N4-7)
Tool		Type 2 (show Fig. 9)

*Standard condition

Fig. 13 Microphotographs of ground surface by single grain electroplated tool (before truing)

Fig. 14 Photographs of ground surface finished by single electroplated tool (after truing)

4. 結 言

本報では、ダイヤモンド電着工具を自作し、軸方向超音波振動を援用して金型鋼の正面研削加工実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) スピンドル回転速度 4000min^{-1} 、ピック送り量 $20\mu\text{m}$ 、送り速度 1000mm/min の加工で $0.24\mu\text{mRz}$ の準鏡面を得た(加工時間 $12\text{min}/100\text{mm}^2$)。回転速度 9000min^{-1} の加工では、工具回転一送りの間隔に等しい波長の凹凸が目立つ面となった。凹凸の発生原因は、スピンドルの回転振動によるものと考えられる。
 - (2) ピック送り量が小さく、送り速度が遅い、加工時間が長くなる加工条件では加工面に深さ約 $0.2\mu\text{m}$ の傷が入りやすくなった。
 - (3) 自作電着工具の耐久加工試験の結果、加工面積 5000mm^2 まで砥粒の脱落・摩耗無く加工できた。この面積は携帯電話筐体金型仕上げ面積の約半分に相当する。
 - (4) 砥粒を1粒電着した工具を用いた加工試験の結果、通常の電着工具による加工と同等以上の仕上げ面 ($0.14\mu\text{mRz}$) を得た。
- 以上の結果より、自作電着工具を用いた超音波振動援用研削により、3次元形状の鏡面研削を実現できる知見を得た。

謝 辞

この研究は、都市エリア産学官連携促進事業、および(財)ユニオンツール育英奨学会の2005年度助成金を受けて行われた。この場を借りて、関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木浩文他：マイクロ非軸対象非球面のフライカットに関する研究 2005年度精密工学会春季大会講演論文集, (2005) 787.
- 2) H. Hocheng, M. L. Hsieh, Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds, Machine Tools & Manufacture **44** (2004) 1607.
- 3) 島田尚一他：鉄系金属の加工におけるダイヤモンド工具の損耗機構, 2005年度精密工学会春季大会講演論文集, (2005) 681.
- 4) 隈部淳一郎：精密加工振動切削基礎と応用, 実教出版, (1979).
- 5) 社本英二他：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, 精密工学会誌, **67**, 11 (2001) 1871.
- 6) 隈部他：セラミックスの重量振動加工, 精密機械, **52**, 11 (1986) 23.
- 7) 例えば, 根津憲太郎他：断続切削による鉄系材料加工における単結晶ダイヤモンド工具の摩耗抑制, 2005年度精密工学会春季大会講演論文集, (2005) 1279.
- 8) 原圭祐他：超音波振動を援用した金型の鏡面仕上げ加工(第1報)-ダイヤモンド電着工具を用いた金型鋼の正面研削, 精密工学会誌論文集, **72**, 9 (2006) 1134.
- 9) 石原他：先端技術に対応するめっきの基礎, 槇書店, (1994).
- 10) 田村武夫他：みがき工程における超硬合金放電加工面の表面完全性に関する研究, 電気加工学会誌, **35**, 78 (2001) 12.