レジンボンド極微粒ダイヤモンドホイールによる 円筒鏡面研削技術の研究*

周 立波** 庄司克雄** 厨川常元** 海野邦彦*** 大下秀男†

Cylindrical Mirror Grinding with Resinoid-Bonded Extremely Fine Grit Diamond Wheels

Libo ZHOU, Katsuo SYOJI, Tsunemoto KURIYAGAWA, Kunihiko UN'NO and Hideo OHSHITA

The goal of this paper is a mirror grinding of ceramic cylinder with an extremely fine grit diamond wheel. An ultra precision cylindrical grinding machine and a truing and dressing device for it are designed and built. For a mirror grinding, a very fine infeed motion and a low vibration are needed to avoid sinking diamond grits into a bond material with an unexpectedly large force on individual grits. Therefore, the grinding machine has a hydrostatic wheel spindle and a hybrid infeed mechanism. The latter one consists of a ball screw and a DC servomotor for a rough feed, and four piezoelectric actuators for a fine feed. The piezoelectric actuators are mounted in the ball screw nut. Vibration amplitude of the wheel head was less than 0.1 μm and the minimum depth of cut was 0.01 $\mu\text{m}/\text{step}$. After truing and balancing a resinoid-bonded diamond wheel (SD5000B) on the machine precisely, a mirror grinding of a partially stabilized zirconia cylinder was carried out. A peak-to-valley height of the ground surface was 53 nm and a maximum chipping length on the edge was 0.5 μm or below.

Key words: cylindrical mirror grinding, extremely fine grit diamond wheel, resinoid bond, truing, dressing, ceramic cylinder, piezoelectric actuator

1. 緒 言

セラミックスや半導体のような硬ぜい材料の鏡面加工においては、クラック層など前加工の影響層を完全に除去する必要がある。また最近では、非球面加工に代表されるように、仕上げ面粗さと同時に形状精度も要求される加工が多くなっている。したがって、研削のように加工能率の高い鏡面加工が可能であれば、大幅な加工時間の短縮になる。このような工業界からの要請に呼応して、我が国でもダイヤモンドホイールを用いた鏡面研削に関する研究が行われている^{1)~8)}。

これらの鏡面研削の手法は、大きく2つに分けられる。その1つは、砥粒の先端を切りそろえて切れ刃の負のすくい角を大きくして、いわゆる「延性モード」研削を行おうとするもの^{1), 2)}である。もう1つは極微粒もしくは超微粒ホイールを用いて砥粒1個あたりの切りくずサイズを小さくしようとするもの^{3)~6)}である。一方、鏡面研削にはレジンボンドが有効であるが、後者の場合、砥粒の埋没現象が問題になる⁷⁾。すなわち、研削熱によって結合剤が軟化し砥粒が結合剤中に埋没する現象である。これを防ぐには、個々の砥粒に加わる研削力をできるだけ小さくする必要がある⁸⁾。そのためには微小切込み装置を備えた研削盤と、同時研削砥粒数をできるだけ多くするためにホイール断面が中凸にならないような高精度のツルーイング装置が不可欠である。

本研究ではこれらの点に留意し、微小切込み装置を備えた超精密円筒研削盤とカップツールを応用した精密ツルーイング装置を試作し、レジンボンド極微粒ダイヤモンドホイールによるセラミックスの円筒鏡面研削を試みた。

2. 微小切込み装置を備えた超精密円筒研削盤の試作

前述したように砥粒の埋没を避けるには、研削点における研削熱の発生を抑制するとともに、加熱時間を小さくすることが肝要である。そのためには、砥粒切削断面積と砥石・工作物接触長さをできるだけ小さくする必要がある⁸⁾、微小切込みが可能で、振動の小さい、いわゆる超精密研削盤が不可欠である。

図1に、本研究で試作した超精密円筒研削盤の構成を示す。砥石ヘッドの案内は微小切込みの際のスティックスリップを小さくするために油静圧軸受とし、前後4個のポケット圧を操作して浮上量を約1.0 μm に調整した。静圧軸受のポケット圧と浮上量との関係は、図2のようになった。砥石ヘッドの半径切込みは、粗動送りと積層型圧電アクチュエータを用いた微小送りに分けた。粗動送り機構は、10000 p/rのロータリエンコーダーを内蔵したDCサーボモータとリード4 mmのボールねじにより構成した。

図3は、後ろ向きに0~500 Nの負荷を加えた状態で、サーボモータに前進、後退それぞれ20パルスの指令を連続して与えたときの砥石ヘッドの変位を電気マイクロメータ(分解能0.1 μm)で測定した結果の例である。図では、重複しないように記録を上下に平行移動してある。この結果のように、いずれの場合にも、一方向送りでは指令パルスに対して変位(0.4 μm)が正確にตอบสนองするが、送りの向きを変えると約2.4~3.0 μm のバックラッシュが認められた。

図4は、微小送り機構の詳細図である。ボールねじのブッシュと切込み送りテーブルの間に、4個の積層型角柱圧電素子(以下、PZTと略す)を挿入した。そして個々のPZTには、ボルトとスプリングワッシャにより約300 Nの予圧を作用させた。カタログによれば、PZT1個の発生する最大力は約3500 Nで、無負荷時最大伸びは約6.5 μm であった。表1に、切込み装置に使用した各要素の仕様を示す。

* 原稿受付 平成7年1月9日

** 正会員 東北大学工学部(仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 正会員 豊田工機(株)(刈谷市朝日町1-1)

† 正会員 大阪ダイヤモンド工業(株)(堺市鳳北町2-80)

Fig. 1 Schematic drawing of newly developed cylindrical grinder

Fig. 2 Relation between hydraulic pressure and gap

Fig. 3 Infeed motion by servomotor

Fig. 4 PZT fine infeed unit

Table 1 Specifications of infeed unit

Servomotor	Power	0.25 kW
	Torque	2.4 N·m
	Encoder	10000 p/r
Ball screw	Lead	4 mm
	Stroke	50 mm
PZT	Size	10×10×9 mm ³
	Capacitance	6.5 μF
	Max. operating voltage	DC 100 V
	Expansion at DC 100 V	6.5 μm
	Max. pushing force	3500 N
	Pre-load	300 N

粗動送りで砥石ヘッドを前進させた後、さらに PZT により微小切込みを与える。PZT への印加電圧と砥石ヘッドの変位との関係は、図 5 のようになった。すなわち、印加電圧が約 20 V になるまでは変位せず、その後は直線に沿って前進し、100 V で変位は 4.7 μm になった。印加電圧が約 20V になるまで変位しないのは、

PZT に予圧を加えたことによりゼロ点が遷移した結果である。そして印加電圧を減少させると、砥石ヘッドは曲線に沿って後退するが、電圧をゼロにしても元の位置に戻らず、約 2.4 μm の変位が残った。これは、ボールねじのバックラッシュのためである。

実際の研削に際しては砥石ヘッドの切込み動作しか行わない

Fig. 5 Infeed motion by PZT actuator

Fig. 6 Dynamic behavior of the grinder

ため、PZTの前進動作における直線部分を使えば十分である。そこで、粗動送りで研削開始直前まで砥石ヘッドを前進させ、微小送り装置だけを用いて鏡面研削を行った。本実験では12 bit D/Aコンバータを用いて印加電圧を制御したので、切込みの分解能は理論的には1.15 nmになった。また実験で使用したテーブル速度の範囲では、電気マイクロメータ（分解能0.1 μm）で確認できるようなスティックスリップは起こらなかった。

個々の砥粒に過大な研削力を作用させないためには、砥石軸の回転精度を高くし、振れ、特に微小振動を極力抑える必要がある。そこで砥石軸には油静圧軸受を使用した。砥石軸モータの動バランスも、単体で振れが0.5 μm以内になるよう調整し、伝動用ベルトには内面を研削した平ベルトを使用した。油圧ポンプは当初、砥石ヘッド上に搭載していたが、大きな振動発生源となることが明らかになったので、機外に移した。その際、配管も鋼製のものから、振動を吸収しやすい耐圧ゴム製に替えた。図6は、レーザドップラ振動計で測定した砥石ヘッドの振動速度を比較したもので、それぞれ(a)油圧ポンプを砥石ヘッド上に搭載したとき、(b)機外に移した後、(c)ダイヤモンドホイールを1000 rpmで回転させたとき、の結果である。なお速度振幅 a 、振動周波数 ω の正弦

Fig. 7 Truing device

Table 2 Truing conditions

Machine	Cylindrical grinder
Diamond wheel	SD1500P150B (350D×15T×3X, 1A1)
Wheel speed V	5.8 - 8.3 m/s
GC cup wheel	GC400 - 3000 (90D×20W, cup)
Cup wheel speed V_c	3.3 - 6.7 m/s
Reciprocation	18 stroke/min
Depth of cut Δ_r	0.4 - 8 μm/step
Coolant	Chemical solution type

波振動と考えれば、振動振幅は a/ω で与えられる。なおダイヤモンドホイールを取り付けて回転させたときの、動バランスモニタで測定した砥石ヘッドの振れは、0.1 μm以下であった。

また砥石軸の2か所の油圧ポケットの油圧（ポケット圧）を半導体圧力センサにより検出し、計算により研削抵抗の垂直分力と水平分力をインプロセスで測定できるようにした。これによりホイールの研削状態を随時監視した。

3. ツルーイングおよびドレッシング

ホイール断面（幅方向）が中凸であったり円周方向にうねりがあると、局所的に砥粒に過大な研削力が作用することになる。したがって特に極微粒ダイヤモンドホイールでは、高精度のツルーイングが要求される。カップツールによるツルーイングでは、ツルーイング時の抵抗が小さく、しかもクロス送りを与えないので真直度の高いツルーイングが可能である⁹⁾。そこで、ツルーイングにはカップツール法を採用した。

使用した精密ツルーイング装置の概観を図7に示す。ツルーイング工具であるGC砥石に、小型ACモータによる強制回転と上下方向の往復運動を与えている。このときGC砥石の回転軸が左右に傾いていると、ホイール断面にその傾きに等しいテーパが形成される。また上下に傾いた場合には、中凹あるいは中凸の断面になる¹⁰⁾。したがって、GC砥石の回転軸がホイール軸とカップツールの上下方向の案内面に垂直になるよう微調整する必要がある。図の回転ステージとクランプレバー（それぞれ、縦横2方向）はそのためのものである。

極微粒ダイヤモンドホイール(SD1500P150B)に対して、ツールであるGC砥石の粒度を変えてツルーイング実験を行った。ツル

(a) Truing force

(b) Reduction of wheel radius

Fig. 8 Truing performance

Fig. 9 Wheel run-out and cutting edge density

ーイング条件を表2に、図8に(a)ツルーイング抵抗と(b)ツルーイング量の変化を示す。またツルーイング後のダイヤモンドホイールの真円度と砥粒切れ刃密度 (SEMにより測定) を図9に示す。なお比較のために、インプリダイヤモンド工具 (IDD60) による実験結果をあわせて示した。ツルアの粒径が大きいくほどツルーイング能率は大きくなったが、ツルーイング後のホイールの真円度や切れ刃密度が低下した。これは、GC 砥石の脱落粒の粒径が大きくなるほど、脱落粒によるボンド除去作用が大きくなるためである。極微粒ホイールでは、特に切れ刃密度の低下は砥粒埋没の原因になるので避けなければならない。なお図9において、インプリダイヤモンド工具の場合の砥粒切れ刃密度が特に大きくなっているが、これは工具によりダイヤモンド砥粒がボンド面に押し込められた結果である。この状態では砥粒突出量がほとんどなく、また仮にドレッシングを行ったとしても砥粒切れ刃先端が摩滅しているために、研削には適さない。そこで、以下の研削実験では、#1500 のホイールについては#3000 の GC 砥石を、#3000、

Table 3 Grinding conditions

Machine	Cylindrical grinder
Diamond wheel	SD1500P150B, SD3000P150B, SD5000P150B (350D×15T×3X, 1A1)
Wheel speed V	16.7 m/s
Workpiece	ZrO ₂ (φ100×10W)
Work speed V_w	0.5 m/s
Depth of cut f	0.01 - 1.2 μm/step
Infeed rate Δ	0.01 - 0.06 μm/rev
Coolant	Chemical solution type

(a) Grinding force

(b) Roughness

Fig. 10 Influence of depth of cut f

#5000 のホイールについてはそれぞれ#5000, #8000 の GC 砥石を使用した。

4. 研削実験

個々の砥粒に大きな研削力を作用させないためには、ホイールの集中度は高い方がよい。そこで、以下の研削実験で使ったホイールでは集中度を 150 にした。工作物には、磁気テープ用ナイフスリットの下刃の研削を想定し、HIP 処理をしたジルコニアセラミックスリングの両側面をポリシングした ($R_{\max} = 40 \text{ nm}$) のものを使用した。またエッジのチッピング状態を SEM 観察するための検鏡片として一部を取り外しできるようにした。研削条件を表3に示す。ホイールの周速を上げると、主軸軸受がポケット圧の雑音が高くなった。これは、加速度計では検出できないような高周波の微小振動が軸に発生したものと考え、本実験ではホイール周速を 16.7 m/s にした。

円筒研削では平面研削と違い、切込み操作が研削中に行われる。したがって、工作物 1 回転当たりの半径切込み量 Δ と同時に、1 ステップ当たりの切込み量 f が重要である。すなわち f が大き過ぎると、切込み操作を行った瞬間に局部的に大きな研削力が作用することになる。特にレジンボンド極微粒ホイールでは、 f が大

Fig. 11 Influence of grit size number

Fig. 12 Mirror finished ZrO_2 ceramic ring

きくならないように注意する必要がある。図 10 は、工作物 1 回転当たりの半径切込み量 Δ を一定にして、(a)研削抵抗（垂直分力と水平分力の合力）と(b)仕上げ面粗さに対する f の影響を調べた結果である。 Δ が同じであっても、 f が大きくなると研削抵抗の増加率が大きくなり、仕上げ面粗さも大きくなった。したがって以下の研削では、1 ステップ当たりの切込み量 f をすべて $0.01 \mu m/step$ とした。

図 11 は、SD1500, SD3000, SD5000 の極微粒ダイヤモンドホイールによる仕上げ面粗さを比較したものである。図 12 は SD5000 による研削面の一例で、 $R_{max} = 53 nm$ の仕上げ面が得られた。また SEM による観察では、エッジのチッピングは $0.5 \mu m$ 以下で、ほとんど確認できなかった。なお、試作した超精密円筒研削盤はトラバース機能がないため、以上の実験はすべてプランジ研削で行ったものであるが、当然、トラバース研削を行えばより粗さの小さい鏡面が得られる。

5. 結 言

レジンボンド極微粒ダイヤモンドホイールは鏡面研削に適しているが、研削中に個々の砥粒に大きな研削力が作用すると研削熱のために砥粒の塑性的な埋没が起きる。本研究では、それを防ぐために、積層型圧電アクチュエータによる微小切込み機能を備えた超精密円筒研削盤とカップツールを応用した精密ツルーイング装置を試作し、HIP 処理をしたジルコニアセラミックスの円筒鏡面研削を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 超精密円筒研削では、工作物 1 回転の半径切込み量を小さくするだけでなく、切込み操作時の 1 ステップの切込み量を小さくすることが重要である。
- (2) カップツールによるツルーイングでは、ホイールよりもやや粒径の小さいビトリファイド GC 砥石がツールとして適している。
- (3) SD5000P150B を用いたジルコニアセラミックスのプランジ研削で、 $R_{max} = 53 nm$ の仕上げ面が得られた。また SEM による観察では、エッジのチッピングは $0.5 \mu m$ 以下であった。

謝 辞

本研究は、(財)工作機械振興財団および精密工学会産学協同協議会「極微粒を用いた超精密鏡面研削に関する研究分科会」より助成を得て行った。また工作物は東洋刃物(株)により提供を受けたことを記して謝辞とする。

参 考 文 献

- 1) 田村利夫, 山倉英雄, 樹田正美: 切れ刃先端を研磨仕上げしたメタルボンドダイヤモンド砥石の高精度ツルーイング, 精密工学会誌, 59, 12 (1993) 1979.
- 2) 阿部耕三, 安永暢男, 宮下政和, 岡田潤一, 大東聖昌: ぜい性材料の超精密研削技術の研究, 精密工学会誌, 59, 12 (1993) 1985.
- 3) 大森 整, 中川威雄: 電解インプロセスドレッシングを利用したメタルボンド超砥粒砥石による鏡面研削法, 砥粒加工学会誌, 34, 3 (1990) 14.
- 4) 市田良夫, 貴志浩三, 蓮田裕一, アクバリ・ジャワド: ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究, 精密工学会誌, 57, 8 (1991) 1406.
- 5) 市田良夫, 貴志浩三, 蓮田裕一: セラミックスの精密研削における微粒ダイヤモンド砥石の最適研削条件, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1065.
- 6) 王序進, 庄司克雄, 中村 等, 田中憲司: 超微粒ダイヤモンドホイールによる平面ホーニング, 1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994) 479.
- 7) 周立波, 厨川常元, 庄司克雄: 極微粒ホイールのツルーイング, ドレッシングおよび研削特性, 砥粒加工学会誌, 36, 4 (1992) 239.
- 8) 唐建設, 庄司克雄, 周立波, 大下秀男: 極微粒ダイヤモンドホイールの研削特性, 日本機械学会第 71 期通常総会講演論文集, (1994) 417.
- 9) 松井正己, 庄司克雄, 山尾昌道: ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルーイングに関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, 52, 2 (1986) 291.
- 10) J. Tamaki and K. Syoji: Development of Truing Technique for Diamond Wheel in Cylindrical Grinding, Bull. JSPE, 23, 4 (1989) 316.