粗粒ダイヤモンド砥石による ファインセラミックスの超平滑研削の可能性*

安井 平 司** 山崎 豪***

Possibility of Ultra-Smoothness Grinding of Fine Ceramics Using a Coarse Grain Size Diamond Wheel

Heiji YASUI and Go YAMAZAKI

This report aims to investigate experimentally the possibility of ductile-mode ultra-smoothness grinding of fine ceramics using a coarse grain size diamond wheel. According to previous experiments, the results obtained in the ductile-mode surface plunge grinding of fine ceramics using a coarse grain size diamond wheel, showed that grinding groove heights over 200nm(Ry) were formed on the workpiece surface by the cutting edges. To diminish the groove heights, in the research, the grinding groove height diminishing-method in which cross-feeding the workpiece at high speed normal to grinding direction is done together with simultaneously feeding at a extremely slow speed parallel to grinding direction, is devised and the availability of the method is examined by surface grinding experiments. The fine ceramic used is the hot pressed silicon carbide. The grinding wheel is the metal bond diamond wheel of the grain size of mesh #140 and the concentration of 50. The ground workpiece surface is observed with differential interference microscope and SEM, and its roughness is measured with a interferometric surface profiler and AFM. Using this diminishing-method, the grinding groove height diminishes considerably and the surface smoothness below 10nm(Ry) or 2nm(Ra) is attained.

Key words: Fine ceramics, Silicon carbide, Ductile-mode grinding, Ultra-smoothness grinding, Surface plunge grinding, Grinding groove height, Diamond wheel, Coarse grain size, Metal bond

1. はじめに

ファインセラミックスの高平滑研削には、工作物にぜい性破壊を生じない延性モード研削加工を行うことが肝要である¹⁾。この目的のため、通常、粒度#800より細かい、細粒・微粒のダイヤモンド砥石の使用が検討されている^{2),3)}。しかし、細粒・微粒の砥石では目直しが難しい。また、微小な研削抵抗で砥粒切れ刃が脱落し、加工精度に影響を及ぼすため、加工能率を大きく向上することは困難である⁴⁾。そこで、別報⁵⁾では、汎用平面研削盤を用い、常用砥石周速度の20m/sで、粒度#140、集中度50と粗粒で、集中度が小さく、かつ、砥粒の脱落が少ないメタルボンドダイヤモンド砥石での延性モード研削の可能性を平面プランジ研削法で検討した。その結果、ホットプレス法やHIP法で製造された炭化けい素や窒化けい素セラミックスについて、粒度#140の粗粒砥石でも、形直し・目直しを、丁寧に施すとともに、前研削も加えて、切れ刃逃げ面を適当な大きさにすると、研削方向平行仕上面粗さが10nm(Ry)以下の延性モード高平滑研削が可能であることがわかった。しかし、平面プランジ研削では、生成される研削条痕により、研削方向直角仕上面粗さが200nm(Ry)を越えるようになり、ラッピング面に匹敵するような超平滑研削はなし得なかった⁶⁾。

本研究では、粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの超平滑研削を目的として、研削条痕高さを低減する研削条痕高さ低減法を考え、検討した。その結果、条痕高さが低減

Fig. 1 A micrograph, and a profiler's 3D image and 2D profiles of the HPSC ceramic surface formed by plunge grinding at $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$ with the #140 diamond wheel [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t_s=5\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

でき、研削方向直角仕上面粗さも向上し、10nm(Ry)以下のラッピング面に近い仕上面が得られたので、報告する。

2. 研削条痕高さ低減法

図1にホットプレス法で製造された炭化けい素セラミック(HPSC)を、粒度#140の粗粒ダイヤモンド砥石を用い、平面

* 原稿受付 平成14年6月7日

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

*** 学生会員 熊本大学大学院(現,TMAエレクトロニクス(株),長崎市丸尾町6-14)

Fig.2 Traverse grinding method

プランジ研削法で、別報で示したような延性モード研削した場合の工作物表面の顕微鏡写真と表面形状測定機による仕上面粗さ像を示す。図1(a)の顕微鏡写真と図1(b)の測定機3次元像より、工作物表面には、研削方向平行な研削条痕が生成されるのが明確にわかる。また、図1(c)の測定機2次元像より、研削方向平行仕上面粗さ H_p は R_y 値(測定機像では、P-V 値)で約13nm、 R_a 値では約2.5nmとラッピング仕上面粗さに匹敵する程度になっているのがわかる。この一方、研削方向直角仕上面粗さ H_n は、生成した研削条痕のため、 R_y 値で約150nmにもなるのがわかる。3次元的にみた仕上面粗さは、図1(b)より、 R_y 値で約200nm、 R_a 値で30nmであり、研削条痕の高さが3次元仕上面粗さに密接に関係していると言える。したがって、仕上面を超平滑化するには、この条痕を除去、あるいは、条痕高さを低減させる必要がある。この研削条痕高さを低減させるための方法としては、図2に示すような、平面トラバース研削法の適用が考えられる。この場合の加工時間 T_w は、図2から容易に考えられるように、次式で示される。

$$T_w = (L_w/v_{wp}) \cdot (B_w/f_n) \quad (1)$$

ここで、 L_w :工作物長さ、 B_w :工作物幅、 v_{wp} :研削方向平行送り速度、 f_n :一パス当たりの研削方向直角送り量

(1)式において、通常の平面トラバース研削による仕上面粗さ向上を考え、例えば、 f_n を砥石幅 B_g の1/10とすると、(1)式の (B_w/f_n) は、 $(10B_w/B_g)$ となる。仮に、 $B_w=B_g$ とすると、研削時間は $T_w=10(L_w/v_{wp})$ となり、プランジ研削の所要時間($B_w=f_n$ の場合)である $T_w=L_w/v_{wp}$ の10倍となる。

ところで、別報⁹⁾で示したように、粗粒ダイヤモンド砥石でファインセラミックスの延性モード研削を行うには、研削方向平行テーブル速度 v_{wp} を非常に遅くする必要があり、別報⁹⁾の例では、 $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$ である。これに加えて、上述のようにトラバース研削の効果を出すために、 f_n を小さくすると、加工時間が極端に長くなる。そこで、 v_{wp} を遅く、延性モード研削が可能であることに加えて、研削条痕を低減するためのトラバース研削もできる方法として、図3(a)の模式図に示すような方法(以下、条痕高さ低減法と記す)を検討することにした。工作物を、非常に遅い研削方向平行送り速度 v_{wp} で送るのに加えて、同時に、速い研削方向直角送り速度 v_{wn} で送る方法である。

この条痕高さ低減法の基本的な考え方は、粗粒ダイヤモンド砥石でファインセラミックスの延性モード研削を行うために、 v_{wp} を非常に遅くするので、研削方向に工作物が移動している

(a) Method A (used in this experiment)

(b) Method B (Reference figure)

Fig.3 Grinding groove height diminishing-method

Fig.4 Relationship between parallel step distance f_p and geometrical parallel surface roughness H_p

間に工作物を研削方向直角にすばやく送り、トラバース研削効果をかけてしまおうとするものである。研削方向平行と直角の同時に工作物を送る研削法には、図3(a)の本実験で用いた方法と(b)の参考図の方法の2方法が考えられる。後者の図3(b)の方法では、図2のトラバース研削で示したように、研削時間が長くなる。そこで、 $v_{wn} \gg v_{wp}$ として、研削時間を長くせずに、トラバース研削効果を得ようとするものである。

この条痕高さ低減法の研削時間は、工作物研削方向直角送り端点での研削方向平行送り間隔を f_p とすると、次式で求まる。

$$T_w = (2B_w/v_{wn}) \cdot (L_w/f_p) \quad (2)$$

ここで、 $f_p = (2B_w/v_{wn}) \cdot v_{wp}$ 、 $v_{wn} = (2B_w/f_p) \cdot v_{wp}$ (3)より、

$$= L_w/v_{wp} \quad (4)$$

(4)式よりわかるように、 $v_{wn} = (2B_w/f_p) \cdot v_{wp}$ を満たせば、 T_w は v_{wp} のみによって決まり、プランジカットの場合と同様になる。さらに、 $v_{wn} \geq (B_w/f_p) \cdot v_{wp}$ を満たすと、同じ工作物表面を通過する砥石作業面が増加するので、よりトラバース研削効果を増すことが考えられる。上述のように、 $v_{wn} \gg v_{wp}$ としたのは、このような点を考慮したものである。

ところで、 f_p については、仕上面粗さを考えると、ある程度以上に大きくできない制約が生じる。図3(a)に示されるように、研削パス回数 (i) から $(i+2)$ 回目への研削方向平行送り間隔 f_p の砥石移動により、図4に示すような、工作物へ転写される砥石形状の巨視的干渉が生じる。この干渉で生じる幾何学的仕上面粗さ H_{pt} は砥石直径を D_g とすると、次式で求められる。

Table 1 Experimental conditions

Grinding method	Grinding groove diminishing-method
Wheel	SD140Q50M (Outer dia:φ200mm)
Workpiece	HPSC (Length×Width: 10mm×10mm)
Wheel speed	$V_g = 20$ m/s
Resultant feed	$v_{wc} = 3.33$ mm/s
Parallel feed	$v_{wp} = 0.0037\text{--}0.0185$ mm/s
Parallel distance	$f_p = 20$ μm
Depth of cut	$t = 5$ μm
Crossfeed width	$B_{sw} = 18$ mm
Coolant	Soluble (1/50) Flow rate : 12 L/min

$$Hpt = f_p^2 / 4Dg \quad \text{----- (5)}$$

この仕上面粗さ Hpt は、例えば、直径φ200mmの砥石では、 $f_p = 100\mu\text{m}$ にすると、(5)式より、約14nmとなる。したがって、この点を考慮して、所要の仕上面粗さに応じて、 f_p を設定する必要がある。ところで、(3)式より、 f_p を小さくしても、 v_{wp} を同じにするためには、 v_{wn} を速くする必要がある。このようなことも含め、 $v_{wn} \gg v_{wp}$ とする、工作物を研削方向にほぼ垂直に送る条痕高さ低減法を考えた。

3. 実験方法および条件

実験は X,Y,Z の各方向に1μmの最小設定値をもつNC装置を改造した NC 平面研削装置 (図4) で行った。研削方向平行送り速度 v_{wp} と研削方向直角送り速度 v_{wn} は、本実験での工作物幅 $B_w = 10\text{mm}$ よりも広い幅 $B_{sw} = 18\text{mm}$ を考え、 B_{sw} および v_{wp} と v_{wn} の合成速度 $v_{wc} = \{(v_{wn})^2 + (v_{wp})^2\}^{1/2}$ を決めることで、決定した。工作物幅 B_w よりも広い幅 B_{sw} を考えたのは、各パス毎に、砥石を工作物端から離して研削するためである。なお、 v_{wp} は、別報のプランジ研削での延性モード研削条件である $v_{wp} = 0.05\text{mm/s}$ よりも遅い、 $v_{wp} = 0.0037 \sim 0.0185\text{mm/s}$ とした。これは、より延性モード研削になり易くするためである。表1に、主な実験条件を示す。工作物には、ホットプレス法で製造した炭化けい素 (HPSC) を用いた。砥石は、粒度#140、集中度50と粗粒で砥粒密度の小さいメタルボンドダイヤモンド砥石を使用した。仕上面は微分干渉顕微鏡で観察し、仕上面粗さは、光干渉式非接触表面形状測定機および AFM で測定した。研削抵抗は、半導体ゲージを貼附した、八角形弾性リングで測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 研削条痕高さ低減法の効果

図5に、プランジ研削法と条痕高さ低減法を用いて研削した場合の工作物仕上面を比較して示す。研削条件は、前者が、テーブル速度 $v_{wp} = 0.05\text{mm/s}$ 、砥石切込み $t = 5\mu\text{m}$ で、後者は、合成テーブル速度 $v_{wc} = 3.33\text{mm/s}$ ($v_{wp} = 0.0037\text{mm/s}$)、 $t = 5\mu\text{m}$ 、 $f_p = 20\mu\text{m}$ である。なお、実験前に、プランジ研削の場合に、延性モード研削が可能になるように、砥石作業面を調整した。図より、両仕上面とも延性モード研削面であるが、プランジ研削法では、研削条痕が見られるのに、条痕高さ低減法では、研削条痕が観察し得なくなっているのがわかる。なお、プランジ研削では、さらに遅い v_{wp} でも、研削条痕が生成したことを付言する。

図6に、図5の条痕高さ低減法での仕上面 (□約 $240 \times 240\mu\text{m}$) を表面形状測定機で測定した結果を示す。図6(a)より、仕

Fig.4 Appearance of NC grinding machine

Fig.5 Micrographs and SEM photographs of the HPSC ceramic surface formed at $v_{wp} = 0.05\text{mm/s}$ by plunge grinding, and at $v_{wc} = 3.33\text{mm/s}$ and $f_p = 20\mu\text{m}$ by grinding groove diminishing-method with the #140-mesh diamond wheel

上面は、プランジ研削法のように、研削方向に連続した盛り上がり条痕 (図1) によって形成されるのではなく、不連続な短い条痕によって形成されているのがわかる。そして、図6(b)の2次元像より、研削方向平行仕上面粗さ H_p は R_y 値で約7nm、 R_a 値では約1.7nmであり、また、研削方向直角仕上面粗さ H_n は、 R_y 値で約10nm、 R_a 値では約2nmになっている。3次元的にみた仕上面粗さは、 R_y 値で約30nm、 R_a 値で約3nmであり、ラッピング面粗さに匹敵する超平滑面近い表面となっている。

図7に、図6の仕上面を AFM で、さらに詳細に測定した結果を示す。なお、図の3次元像は、表面に形成される微小痕が明確になるように、表面の凹凸を反転している。図より、仕上面には、ぜい性破壊痕が見られず、ほぼ、延性モード研削面になっているのがわかる。また、図の2次元像より、研削方向平行仕上面粗さ H_p は、A-A'線で示される良い場所では、 R_y 値 (AFM 像では、 R_{max} 値) で約3nmで、B-B'線で示される微小穴が見られる場所でも、 R_y 値で約10nmである。さらに、研削方向直角仕上面粗さ H_n は、C-C'線で示される代表的な場所において、 R_y 値で約8nmになっている。このように、微小部分では、超平滑研削面に近い表面になっているのがわかる。

4.2 研削方向平行送り間隔 f_p の研削特性への影響

図8に、 $v_{wc} = 3.33\text{mm/s}$ 、 $t = 5\mu\text{m}$ で条痕高さ低減法を用い、 f_p を変えて研削した場合の仕上面を比較して示す。図より、

Fig.6 HPSC ceramic surface ground at $v_{wc}=3.33\text{mm/s}$ and $f_p=20\mu\text{m}$ with the #140 diamond wheel by grinding groove height diminishing-method [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t=5\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

Fig.7 An AFM 3D image and 2D profiles of the HPSC ceramic surface ground at $v_{wc}=3.33\text{mm/s}$ and $f_p=20\mu\text{m}$ with the #140 diamond wheel by grinding groove height diminishing-method [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t=5\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

$f_p=20\mu\text{m}$ の場合には、微小な脆性破壊痕もほとんど見られない。しかし、 $f_p=60\mu\text{m}$ や $f_p=100\mu\text{m}$ になると、微小な脆性破壊痕が散見されるようになり、 f_p が増加すると微小な脆性破壊痕が発生し始める傾向があるのがわかる。 $f_p=100\mu\text{m}$ の場合には、 $v_{wp}=0.0185\text{mm/s}$ であり、プランジ研削では、 $v_{wp}=0.05\text{mm/s}$ でも、微小な脆性破壊痕もほとんど発生しておらず、条痕高さ低減法の方が、幾分か脆性破壊を生じやすいように考えられる。

図9は、図8の $f_p=60\mu\text{m}$ で研削した場合の工作物表面をAFM

Fig.8 Influence of parallel step width f_p on the HPSC ceramic surface ground at $v_{wc}=3.33\text{mm/s}$ by grinding groove height diminishing-method with the #140 diamond wheel [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t=5\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

Fig.9 Micrograph of the HPSC ceramic surface ground at $v_{wc}=3.33\text{mm/s}$ and $f_p=60\mu\text{m}$ grinding groove height diminishing-method with the #140 diamond wheel [SD140Q50M, $V_g=20\text{m/s}$, $t=5\mu\text{m}$, Soluble(1/50)]

で観察した結果である。図より、仕上面には、微小痕が散見しているのがわかる。微小痕の大きさは、B-B'ラインの2次元プロフィールから、直径で数 μm 以下であり、深さは75nm程度である。この微小痕を省いて測定したA-A'ラインとC-C'ラインのプロフィールから、研削方向平行仕上面粗さ H_p は、 R_y 値で約5nm、研削方向直角仕上面粗さ H_n は、 R_y 値で約12nmに

Fig.10 Relationship between surface roughness H and parallel step distance in case of grinding groove height diminishing-method

Fig.11 Relationship between grinding force and parallel step distance in case of grinding groove height diminishing-method

なっている。同様な結果は、 $f_p=100\mu\text{m}$ の場合でも得られた。

図10に、図8の仕上面から得られた、 f_p と仕上面粗さHとの関係を示す。なお、各データの値は、表面形状測定機3Dデータを4ヶ所を取り、その3Dデータ上の10ヶ所をランダムにとった、計40ヶ所の2Dプロファイルデータの平均値である。ただし、微小痕は省いた。図より、 f_p を大きくしても、研削方向平行および直角の両仕上面粗さとも、ほぼ変わらない傾向が見られる。また、研削方向平行仕上面粗さよりも、直角仕上面粗さの方が幾分か大きくなる傾向が得られる。この結果から、 f_p をこの程度の範囲で大きくしても、条痕高さは相当低減され、超平滑研削面に近い表面に加工し得ると言える。

図11に f_p と研削抵抗 F との関係を示す。図より、 $f_p=20\mu\text{m}$ の方が、 $f_p=60\mu\text{m}$ 以上よりも幾分か法線および接線の両研削抵抗ともに大きくなる傾向が見られる。 f_p の増加は除去速度の増加となるので、単純には、研削抵抗が大きくなることが考えられるが、そのようになっていない。 $f_p=20\mu\text{m}$ の場合、脆性モード研削状態よりも、研削抵抗が大きくなると考えられる延性モード研削状態が、 $f_p=60\mu\text{m}$ 以上よりも、より強くなるためと推測している。なお、 f_p がさらに大きくなると、研削抵抗が増加することは、容易に考えられる。

Fig.12 Relationship between vickers hardness and parallel step distance in case of grinding groove height diminishing-method

図12に f_p と研削仕上面表層の工作物硬度 HV との関係を示す。なお、参考のためラッピング後の工作物表面硬度も示す。図より、全体的にラッピング硬度よりも幾分小さくなるが、 f_p を変化させても、硬度に大きな変化は見られない。

5. まとめ

粒度#140の粗粒メタルボンドダイヤモンド砥石による炭化けい素セラミックの延性モード超平滑研削の可能性を、研削方向と平行に極低速度で工作物を送ることに加えて、研削方向直角に高速で、同時に送る研削条痕高さ低減法を考案し、検討した。

- 1) 研削条痕高さ低減法では、ブランチ研削法でみられる研削方向平行の連続した長い研削条痕は形成されず、不連続な短い研削条痕が形成され、条痕高さ低減効果がみられる。
- 2) 研削条痕高さ低減効果により、粒度#140の粗粒ダイヤモンド砥石による炭化けい素セラミックの研削で、 R_y 値10nm以下、 R_a 値3nm以下の超平滑研削仕上面を得ることができた。
- 3) 微小破壊痕は、工作物軸方向直角送り端での研削方向平行送り間隔が $f_p=20\mu\text{m}$ では、工作物仕上面に、ほとんど見られなかったが、 $f_p=60\mu\text{m}$ 以上では、幾つか散見するのが観察された。

実験に協力を得た平田勲氏ならびに砥石、研削液、工作物のご提供を得た、ノリタケダイヤ(株)、ユシロ化学工業(株)、東陶機器(株)の各社に謝意を表す。本研究の一部は平成11年度科学研究費(基盤研究(C))：課題番号11650132)により行った。

参考文献

- 1) 宮下政和：ぜい性材料の延性モード研削加工技術—ナノ研削技術への道、精密工学会誌、56、5(1990)782。
- 2) 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(第1報)—仕上面の生成機構に関する基礎的考察、精密工学会誌、57、8(1991)1406。
- 3) 餅田正秋、鈴木英明、島宗 勉：ファインセラミックスの研削仕上面状態に及ぼす加工条件の影響(第1報)—SiC、Si3N4およびAl2O3の仕上面生成機構—、精密工学会誌、57、2(1991)304。
- 4) 安井平司、有野芳弘、松永邦夫：粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの延性モード高平滑研削(第1報)—粒度#140のメタルボンドダイヤモンド砥石による延性モード研削—、精密工学会誌、63、9(1997)1270。