粗粒ダイヤモンド砥石を用いた正面研削によるセラミックスの鏡面創成*

水谷 勝己** 足立 和俊*** 田中 芳雄†

Creation of Mirror Surface of Ceramics by Face Grinding with a Diamond Wheel of Coarse Grains

Katsumi MIZUTANI, Kazutoshi ADACHI and Yoshio TANAKA

Face grinding with a diamond wheel of coarse grains is attempted to create mirror surface of ceramics. The face grinding needs to keep the condition that the work is fed almost perpendicular to the grinding direction at extremely low feed rate. Grinding experiments to verify the possibility for creating mirror surface showed that the grinding with #140 diamond wheel could form mirror surface in SiC and Si_3N_4 which had small compressive residual stress and undetectable hardness degradation, but could not form mirror surface in ZrO_2 because of its overabundant transformation to monoclinic phase. Mirror surface of SiC was realized even at a large depth of cut such as 600 μm in this face grinding. The sharp edge on the wheel was formed automatically at the corner between the worn flat surface of a grain and the newly created surface by partial chipping of the flat surface.

Key words : mirror surface, face grinding, structural ceramics, coarse grain, diamond wheel

1. 緒 言

構造用セラミックスを鏡面に仕上げるために研削後にラッピングやポリシングが施される。これに対し、高精度の研削盤とダイヤモンド砥石を用いて研削のみによってより高能率に鏡面を得ることが試みられている^{1)~3)}。そのような試みの大部分は微細な砥粒の砥石（微粒砥石）を用いるものである。セラミックスに対する流動型材料除去の必要条件として微小な切込み深さとその切込み深さのもとで切りくず生成を可能とする鋭い切れ刃が挙げられるが、微粒砥石はもともと鋭い切れ刃を有するためその条件は比較的容易に満たされる。ただ、砥石ボンド面からの砥粒の適切な突出しを制御することが問題で、インプロセス電解ドレッシング(ELID)法が効果を上げている²⁾。しかし、微粒砥石を用いた鏡面研削は前加工としての粗粒砥石による加工を避けることが出来ない。もし、比較的粗粒の砥石によってセラミックスを鏡面に加工することが出来れば、同一研削盤上の一つの砥石で粗から仕上げまでを簡易にかつ能率良く加工をすることが可能になるものと考えられる。その実現のためには、粗い砥粒に鋭い切れ刃を持たせること、低い砥粒密度を補償する加工を行うことが主要な課題である。

本研究では、粗粒ダイヤモンド砥石によるセラミックスの鏡面研削の可能性を低速被削材送りの正面研削において検討する。それを、炭化けい素、窒化けい素、部分安定化ジルコニアの3種のセラミックスを被削材として種々の条件で研削し、研削後の表面粗さ、残留応力や硬さなどを微粒砥石のものと比較することによって調べる。

2. 低速被削材送りの正面研削

粗粒砥石は鏡面創成を目的とした研削では切れ刃の鈍さおよび切れ刃密度の低さが問題となる。切れ刃密度の低さに関しては、図1(a)に示す正面研削（研削方向と被削材送り方向とがほぼ直交する）を極低速度の被削材送りで行えば、一つの切れ刃が加工面上のわずかに離れた位置を順次通過するので、その低さは補償される。一方、図1(b)に示す砥石外周による研削（慣用の平面研削）では、研削方向と被削材送り方向が平行であるため切れ刃密度の低さは砥石幅方向には補償されない。

粗い砥粒に鋭い切れ刃を持たせるためには、何らかの方法で切れ刃の成形を行わざるを得ない。有効なものとしてダイヤモンドによる砥石のツルーイングとその後にポリシングを行う方法が報告されている⁴⁾。切れ刃成形のための付加的な作業を導入するのは本研究の趣旨から外れると考えた。ここでは、研削中に切れ刃が自生的に鋭く形成されることを期待し、特別なことは何もしなかった。極低速の被削材送りのもとでは砥粒は加工面と長い距離にわたり摩擦されるので、切れ刃のポリシ

Fig.1 Two grinding modes

* 原稿受付 平成9年5月9日

** 正会員 大阪府立産業技術総合研究所（現 近畿大学生物理工学部；和歌山県那賀郡打田町西三谷930）

*** 正会員 大阪府立産業技術総合研究所（和泉市あゆみ野2-7-1）

† 正会員 大阪府立大学工学部（堺市学園町1-1）

Table 1 Mechanical properties of work

Materials		SiC	Si ₃ N ₄	ZrO ₂
Density	g/cm ³	3.1	3.2	6.1
Vickers hardness	GPa	30	15	12
Fracture toughness	MPa·m ^{1/2}	3.5	7	7-9
Bending strength	MPa	810	1000	1180
Thermal conductivity	cal/cm·s·°C	0.19	0.03	0.008

ングや部分破壊が生じ鋭く形成されるのではとの考えによる。

3. 実験方法

本研究で用いたセラミックスは、 β 型 SiC 粉末を常圧焼結した炭化けい素、 N_2 雰囲気中でガス圧焼結した窒化けい素および 3 mol% の Y_2O_3 を添加した部分安定化ジルコニアである。これらのセラミックスの機械的性質を表 1 に示す。それぞれを 33 mm × 4 mm × 5 mm (長さ×幅×高さ) に成形して研削に供した。被削材幅 4 mm は使用したカップ型砥石の直径 50 mm に比べて小さく、加工面全面にわたり送り方向と研削方向の直交条件をほぼ満たしている。

研削砥石は粒度が #140, #800, #2400 のカップ型レジノイドボンドダイヤモンド砥石で (φ50 mm, ダイヤ層幅 6 mm), このうち #140 のものを粗粒砥石として多用した。砥石のツレーイングはメタルボンドダイヤモンド砥石により行い、ドレッシングは #140 と #800 のものについては WA スティック砥石により行った。#2400 のものについてはドレッシング作業を行っていない。

研削実験は空気軸受の砥石軸を有する精密縦軸研削盤 (光洋機械 FRG-131; 軸の回転精度 0.1 μ m, スラスト剛性 200 N/ μ m) 上で行った。研削抵抗の 3 分力は被削材直下に取り付けた水晶圧電式動力計 (キスラー 9257A) で測定した。研削条件は表 2 の通りである。研削後には研削面を SEM で観察するとともに表面粗さ計 (タリサーフ 6) で粗さを測定した。また、残留応力は X 線応力測定装置 (理学 MSF-2M) により、硬さを超微小硬度計 (島津 MCTM-200) により測定した。

4. 実験結果および考察

3 種のセラミックスのうち、まず、硬さが高くじん性が低い流動型の材料除去とすることが難しいとされている炭化けい素を取り上げる。図 2 に砥石切込み深さが一定 (3 μ m) で、被削材送り速度を種々変えて研削したときの表面粗さを示す。表面粗さ R_{max} は研削方向と直角に測ったもので、送り速度は砥石 1 回転当たりの送り量 f で表している。#140 砥石の R_{max} は f の減少につれて直線的に減少するが、やがては一定となる。また、#800 と #2400 砥石の R_{max} は f の減少に対して互いに似た変化を示し、 f が 10 μ m/rev より大きいときには #140 のものより小さいが、それ以下では #140 のものとはほぼ同じである。結局のところ、本実験ではいずれの粒度の砥石においても得られた最良の粗さは $R_{max} \approx 0.05 \mu$ m であった。そのような粗さを示す研削面は、#140 砥石、 $f = 0.3 \mu$ m/rev のものについて示せば図 3 のごとくである。この面の評価のための比較面として同図に SiO₂ 粉末によるフロートポリシング面をあわせて示す。フロートポリシングは巨視的な損

Table 2 Grinding conditions

Grinding wheel	SDC140R100B, SD800R100B, SD2400-100B
Peripheral wheel speed	V=471m/min
Work feed	$f=0.3-50 \mu$ m/rev
Wheel depth of cut	$d=0.5-620 \mu$ m
Grinding fluid	Yusiroken SC526

Fig 2 Relation between surface roughness and work feed

Fig. 3 SEM photographs of SiC surfaces ground with #140 wheel and float polished

傷を生じない加工法とされているので⁵⁾、ポリシング面に現れた欠陥は気孔など材料に内在していたものであるとみなすことが出来る。図 3(b)のポリシング面において縁が白く光る箇所は凹みで、この材料はわずかであるが気孔などの欠陥を有するものである。これと比較して、図 3(a)の研削面では凹みがやや多いものの全体としてはポリシング面に近い平滑な面となっている。

このような炭化けい素の鏡面を得たときの #140 の砥石表面の代表的な砥粒切れ刃は図 4 のごとくである。いずれの砥粒も逃げ面は摩耗して平坦であり、部分的な欠けによって複雑な縁を呈し、中には複数の部分に分離した切れ刃を持つものもある。そして、鋭い切れ刃は摩耗面と部分的な欠けによる新生面との縁に形成されている。

被削材を低速度で送る本研削法では、深いと予想される前加工の損傷を 1 回の研削で除去して鏡面に仕上げるべきである。

Fig. 4 Abrasive grains on #140 wheel surface

Fig. 5 Effects of wheel depth of cut on surface roughness and grinding force

その実現の確認のため砥石切込み深さ d_a を変えて研削した。図 5 は d_a と $R_{\max}$ の関係を #140 砥石の場合について示したものである。同図には被削材幅で除した研削抵抗の主分力 (F_t/b) と背分力 (F_n/b) もあわせて示す。図 5 では、 $R_{\max}$ は 600 μm の大きな d_a においても悪化せず、 d_a に対して一定である。研削後の砥石の形状を調べたところ、砥石前縁部は摩耗して円弧状を呈していた。それゆえ、砥石前縁部のそれぞれの箇所は互いに分担しながら前加工面と仕上げ面の間の材料を除去し、それに続く平坦部が仕上げを担っていたことが推測される。また、砥石切込み深さが大きくなった場合、研削抵抗の主分力は主として砥石前縁部での材料除去によって生じるためほぼ比例的に増加するが、背分力は主として砥石と被削材の接触面全体にわたる力に支配されるため変化しない。

Fig. 6 Relation between surface roughness and work feed

つぎに、窒化けい素及び部分安定化ジルコニアの場合について調査する。砥石切込み深さを一定 ($3\text{ }\mu\text{m}$) にして被削材送り速度を変えたときの窒化けい素の R_{max} を図 6 (a) に、部分安定化ジルコニアの R_{max} を図 6 (b) に示す。#140 砥石による窒化けい素の R_{max} と f の関係は炭化けい素の #140 砥石の R_{max} と f の関係ではなく、#800 や #2400 砥石のものに類似している。これは窒化けい素の流動型材料除去となりやすい性質の反映であるとみられ、この材料の良好な表面粗さを期待させる。しかし、窒化けい素の R_{max} は炭化けい素のものより小さくなることはなかった。また、部分安定化ジルコニアの R_{max} が炭化けい素や窒化けい素のものに比べてかなり大きいことは予想外であった。図 7 に部分安定化ジルコニアの #140 砥石、 $f=0.3\text{ }\mu\text{m/rev}$ の研削面 (a) をフロートポリシング面 (b) と共に示す。研削面は結晶粒の脱落と見られる小さい凹みが至る所に存在し、鏡面とはなっていない。このように、巨視的な取扱いにおける材料のじん性や硬さから予想される流動型材料除去の容易さと得られた表面粗さの順序が一致しないのは、ここで対象としている微細な破壊痕やそれに対応した小さな粗さが材料の微構造の影響を強く受けたことによるものであると推察される。特に、炭化けい素などに比べて低い硬さと高いじん性を持つ部分安定化ジルコニアが鏡面とならなかった理由は以下のように考えられる。

部分安定化ジルコニアの高いじん性は正方晶から単斜晶への応力誘起相変態によるものであることが知られている。粗大砥粒、低速被削材送りの正面研削では、研削面上の微小領域のそれ

ぞれは何回かの繰返しの負荷と発生した熱の影響を受け (例えば、被削材送り速度 $f=0.3\text{ }\mu\text{m/rev}$ のとき、切れ刃逃げ面の長さを $10\text{ }\mu\text{m}$ とすれば 30 回以上)、正方晶から単斜晶への変態や変態した単斜晶の破壊が生じると推測される。その確認のために研削面の単斜晶を調査した。図 8 に #140 砥石を用いた $f=0.3\text{ }\mu\text{m/rev}$ の部分安定化ジルコニア研削面の単斜晶含有率分布を示す。同図には同じ粒度の砥石による慣用の平面研削のもの (横軸平面研削盤、砥石周速 1600 m/min 、砥石切込み深さ $5\text{ }\mu\text{m}$ 、被削材送り速度 20 m/min) もあわせて示した。ここでの単斜晶含有率分布は入射角の種々異なる低角度入射 X 線解析の結果を基に算定する方法によっている⁶⁾。図 8 によると、表面の単斜晶含有率は低速被削材送りの正面研削においては 50% にも達しており、慣用研削面の 25% 程度と比べて大きい。従って、このような単斜晶に富む面はじん性が低下しており、繰返しの次の負荷により容易に破壊し、図 7 (a) で示されるような面になるのであろう。

Fig. 8 Fraction of monoclinic phase of ZrO_2 surface ground with #140 diamond wheel

(a) Ground surface

(b) Polished surface

Fig. 7 SEM photographs of ZrO_2 surfaces ground with #140 wheel and float polished

Fig. 9 Residual stress of machined surface

(a) SiC

(b) Si_3N_4 (c) ZrO_2

Fig. 10 Dynamic hardness of machined surface

粗粒砥石、低速被削材送りの正面研削が繰返しの負荷を研削面に与えているとすれば、加工面は変質している可能性がある。それを加工面の残留応力と硬さについて調べた。残留応力を図9に、ダイナミック硬さを図10に示す。#140 砥石によるものは、部分安定化ジルコニアにおいて異常に大きい残留応力と硬さの低下がみられるが、他の材料に関しては#2400 砥石やフロートポリシングによるものと比べて特別の差異は認められていない。ただ、ここでの調査は加工変質の一部にすぎず、本研削面の加工変質に関する幅広い検討は今後の課題である。

5. 結 言

粗粒のダイヤモンド砥石によるセラミックスの鏡面創成の可能性を研削方向と被削材送り方向が直交する正面研削によって検討し以下の知見を得た。

- (1) その正面研削を低速の被削材送りで行うことにより#140の砥石を用いて炭化けい素と窒化けい素を鏡面にすることが出来る。加工変質は、残留応力と硬さの低下については#2400砥石による研削面や SiO_2 の粉末によるフロートポリシング面と同程度に小さい。また、砥石切込み深さをある程度まで大きくしたとしても良好な表面粗さは保たれる。
- (2) 粗粒砥石の鋭い切れ刃は、摩耗した平坦部と平坦部の部分的欠けによる新生面との縁に自生的に形成される。
- (3) 部分安定化ジルコニアに対しては低速被削材送りのもとでも#140の砥石によって鏡面とすることが出来ない。その研削面は、研削中の繰返しの負荷により変態して単斜晶の高い含有率を示し、また、#2400 砥石の研削面と比べて大きな圧縮残留応力や硬さの低下を示す。

参 考 文 献

- 1) 市田良夫, 貴志浩三, 蓮田裕一, アクバリ・ジャワード: ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 57, 8 (1991) 1406.
- 2) H. Ohmori: Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding for Optical Parts Manufacturing, Proc. 7th Int. Prec. Eng. Seminar, (1993) 134.
- 3) 阿部耕三, 安永暢男, 宮下政和, 吉岡潤一, 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.
- 4) 田村利夫, 山倉英雄, 梶田正美: 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.
- 5) Y. Namba and H. Tsuwa: Float Polishing of Mn-Zn Ferrite and Characteristics of Finished Surfaces, Proc. 4th Int. Conf. Prod. Eng., (1980) 1017.
- 6) K. Mizutani, K. Murata and Y. Tanaka: Multiple Low Angles of Incidence X-ray Diffraction Method for Nondestructively Determining the Depth-dependent Fraction of a Phase in the Surface Layer, J. Appl. Phys., 76, 6 (1994) 3511.