

ファインセラミックスの超仕上加工*

——砥石粒度の加工特性への影響——

上田隆司** 金曾久佳*** 大野誉洋† 杉田忠彰**

Superfinishing of Fine Ceramics
— Influence of Grain Size on Finishing Performance —

Takashi UEDA, Hisayoshi KANESO, Yoshihiro OHNO and Tadaaki SUGITA

Influence of the grain size of diamond stone on the superfinishing performances is investigated experimentally. The mechanism of chip formation is investigated by observing the shape of chips and the finished surfaces of workpiece with scanning electron microscope. The work materials used are alumina (Al_2O_3), silicon carbide (SiC), silicon nitride (Si_3N_4) and zirconia (ZrO_2), which are sintered under the atmospheric pressure, and Mn-Zn ferrite, which is sintered under HIP. The grain size of stone is changed from #500 to #8000. The results are as follows. The diamond stone with suitable bonding strength makes it possible to remove the work material as chips even if its grain size is finer than #1000. Two types of chips are observed; one is the crack-type chips which are made by brittle fracture, and the other is the flow-type chips which are made by plastic deformation. As the grain size of stone becomes smaller, the shape of chips changes from crack-type to flow-type. The critical grain size is dependent on the work materials and it becomes smaller in the order of ZrO_2 , Mn-Zn ferrite, Al_2O_3 , Si_3N_4 and SiC . The condition of making the flow-type chips is important to obtain the mirror surface of ceramics.

Key words: fine ceramics, superfinishing, grain size, mirror surface, crack-type chip, flow-type chip

1. 緒 言

前報¹⁾では、アルミナ、炭化けい素、窒化けい素、ジルコニア、フェライトといったセラミックスをとりあげ、加工速度、砥石圧力、振動数、振幅といった条件が超仕上加工の加工特性に及ぼす影響を調べ、適切と考えられる加工条件を定めた。また、ダイヤモンド砥石のボンド強度が砥石の切れ味に与える影響を検討し、加工能率の面から適切なボンド強度を定めた。さらに、加工状態の過酷さを判定できる評価関数、砥石切込み深さ、および比加工エネルギーを用いることにより、これらの材料の被削性についても評価することができた。

そこで、超仕上における砥石粒度の影響について検討することにした。粒径を小さくして鏡面を得ようとするとき、砥石に切削性をもたせ切りくずを生成しながら面粗さの改善を行う必要があるが、高硬度のセラミックスでは単に砥石との摩擦による塑性流動によって面粗さが向上する場合も生じるため、その判断が重要となる。

本研究では、粒度を#500から#8000にまで段階的に細かくすることにより、砥石の切れ味に注目しながら加工面の粗さに及ぼす影響について調べ、超仕上の仕上加工としての有効性について検討してみた。また、切りくずや加工面の観察から切りくずの生成形態がぜい性破壊型から塑性変形型^{*}へ変化していく様子についても調べ、加工材料との関連性についても検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置、実験条件

実験は1本の砥石に一定圧力を加え、リング状の加工材料の

円筒外面を加工する定圧加工法で行った。実験装置の主要部を図1に、実験条件を表1に示す。測定量は、加工中の加工抵抗法線分力 F_n および接線分力 F_t 、切削量、表面粗さである。

なお、加工状態を一定とするため、所定の条件で30s前加工を施した後、加工時間 $\tau=60$ sの実験を行っている。

2.2 実験材料

実験に使用した加工材料は前報と同様、常圧焼結したアルミ

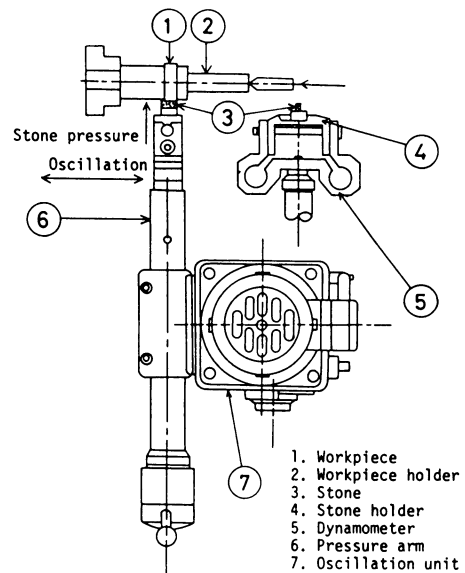


Fig. 1 Main part of experimental set up

* ここでは次のように考える。ぜい性破壊型：ぜい性破壊によって結晶粒度の大きなき裂型切りくずを生じる加工形態。塑性変形型：砥石-加工物接触域が塑性変形でとどまっておき、見かけ上流れ型切りくず、もしくは微細な粒子状の切りくずを生成する加工形態。ただし、金属の場合と異なり、流れ型切りくずの強度は極めて小さく、簡単に微細な粒子状の切りくずに分解してしまう。このことから、微細粒子型切りくずと呼ぶべきかもしれない。

* 原稿受付 平成7年5月29日

** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

*** 正会員 渋谷工業（株）（金沢市大豆田本町甲58）

† 光洋精工（株）（柏原市国分東条町24-1）

Table 1 Experimental conditions

Finishing speed V m/min	40
Frequency N cpm	900
Amplitude a mm	1.6

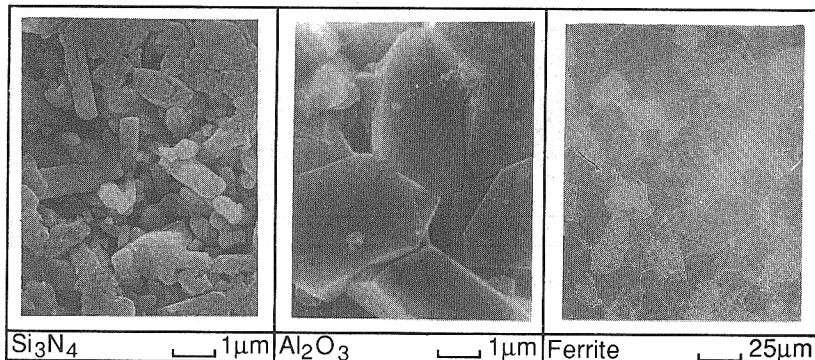


Fig. 2 SEM photographs of microstructure of ceramics

ナ、炭化けい素、窒化けい素、ジルコニア (PSZ) および HIP 焼結した Mn-Zn フェライトである。図 2 に窒化けい素、アルミナ、フェライトの微細構造を、表 2 にその特性値を示す。アルミナは $5\mu\text{m}$ 程度の粒状の結晶粒となっているが、窒化けい素は六角柱状の $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ が複雑に入り組んでおり、そのまわりを球状の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ が埋める構造となっている。これに比べ、フェライトの結晶粒は $25\mu\text{m}$ 程度と大きく、HIP 焼結のためすきまなく詰まった密な構造となっている。

試料形状はいずれも外径 $D=45\text{ mm}$ 、内径 $=20\text{ mm}$ 、長さ $B=20\text{ mm}$ のリング状である。

表 3 に使用したダイヤモンド砥石を示す。前報の結果を基に、メタルボンド砥石とし、砥石曲げ強さを 80 MPa としている。砥粒には G.E. 製 300 シリーズミクロンパウダを用い、粒度を #500, #1000, #2000, #4000, #8000 の 5 段階に変化させた。集中度はいずれも 100 である。また、比較のため、#8000 のビトリファイドボンド砥石も用いた。

加工液には、日本グリース社製の加工油 (比重: 0.84, 粘性: 3.3 cSt (40°C), 添加成分: 硫化油脂 7%, 油脂 5%, 塩素化パラフィン 2%) を用いた。

Table 2 Characteristics of ceramics

	Al_2O_3	SiC	Si_3N_4	ZrO_2	Mn-Zn ferrite
Density g/cm^3	3.7	3.12	3.26	5.90	5.08
Bending strength MPa	343	441	735	980	157
Fracture toughness K_{IC} $\text{MN/m}^{3/2}$	3.86	4.81	6.02	8.98	2.0
Hardness HV	1580	2520	1870	1290	740
Elastic modulus GPa	370	430	284	216	162

Table 3 Diamond stones used

Symbol	Bond	Concentration	Bending strength
SD 500 M	Metal	100	80 MPa
SD 1000 M	Metal	100	80 MPa
SD 2000 M	Metal	100	80 MPa
SD 4000 M	Metal	100	80 MPa
SD 8000 M	Metal	100	80 MPa
SD 8000 V	Vito.	110	—

2.3 データ整理

砥石の切削性の判定には、砥石切込み深さ \bar{d} 、比加工エネルギー k_s および仕上比 G を用いることにする²⁾。長さ l の棒状砥石が振動数 N 、振幅 a で振動して直径 D 、長さ B の円筒外面を加工しており、本研究では (砥石長さ l = 加工物長さ B) であることから、砥石切込み深さ \bar{d} は

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w(\pi l - 2a)} \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (1)$$

また、振幅 a が小さい場合、比加工エネルギー k_s は

$$k_s = \frac{V_w}{\pi DB} \frac{1}{\frac{d(\delta R)}{d\tau}} F_t \quad (2)$$

仕上比 G は

$$G = \frac{\Delta D}{\Delta S} \quad (3)$$

で与えられる。ただし、 τ は加工時間、 $d(\delta R/d\tau)$ は加工物半径減少速度、 ΔD は加工量、 ΔS は砥石損耗量である。

\bar{d} は加工量を一般的な形で表した量と考えることができ、 \bar{d} が大きく、 k_s が小さいとき砥石の切れ味がよく、さらに G が大きくなると砥石の切削性がよいと判断することができる。

3. 実験結果

3.1 加工特性

一般に砥粒の粒度が細くなり、砥粒径が小さくなると砥石の切れ味は大きく低下してくる。しかし、加工変質層が薄く、表面粗さが小さく、形状精度にすぐれた高品位な加工面を得るためには常に切りくずを生成する正常な加工を行う必要があり、砥石は常に切削性を持っていなければならない。切削性が失われると、砥石は単に加工面をこする状態となり、仕上面粗さは改善されても、形状精度の低下をまねき、前加工による加工変質層の除去ができなくなり、良好な品位の仕上面を得ることができない。また、加工条件によっては加工変質層を増大させる場合も生じる。砥石の加工特性も不安定となる。

3.1.1 窒化けい素の加工

一例として、窒化けい素を #500 ~ #8000 の砥石を用いて加工した結果を図 3 に示す。砥石圧力 P_n を変化させて加工しており、砥石切込み深さ \bar{d} 、比加工エネルギー k_s 、仕上面粗さ R_a への影響を調べている。#8000 を除くいずれの砥石でも、 P_n が大きくなるに従い \bar{d} は直線的に増大しており、正常な加工が行われていることがわかる。このため、 k_s もほぼ一定もしくは減少する傾向を示している。一方、粒度が粗くなるに従い、 \bar{d} の傾きが緩くなって、 k_s が大きくなっており、また図 2 では省略しているが仕上比 G も低下していくことから、砥石の切削性は低下している。

ところが、#8000 の砥石では、 \bar{d} は非常に小さく、ほとんど切削が行われていない。 k_s も P_n とともに大きく増大していくことから、砥石は切りくずを伴う加工を行わず、摩擦状態にあることがわかる。#8000 のメタルボンド砥石では砥粒間隔が狭く、切りくずの逃げ道が確保できないためと考えられ、ボンドを強制的に除去する方法、もしくは切りくずの逃げ場を持つボンドの使用を考えなければならない。

図 3 における k_s を \bar{d} で整理しなおした結果が図 4 であり、

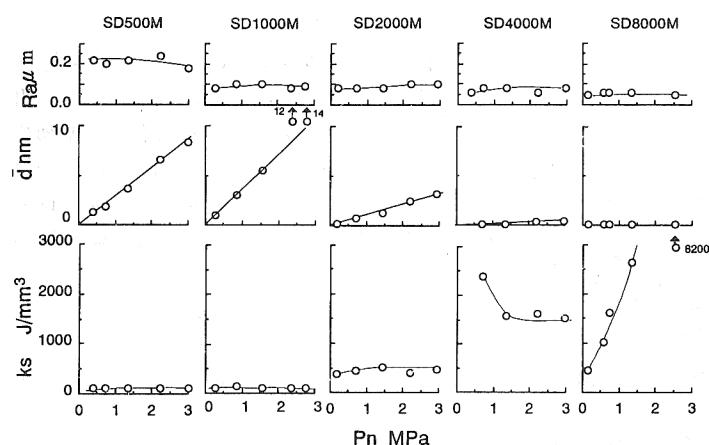
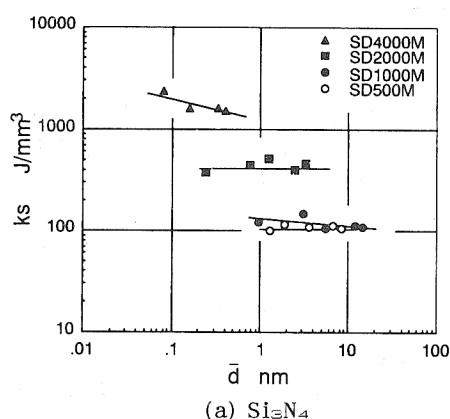
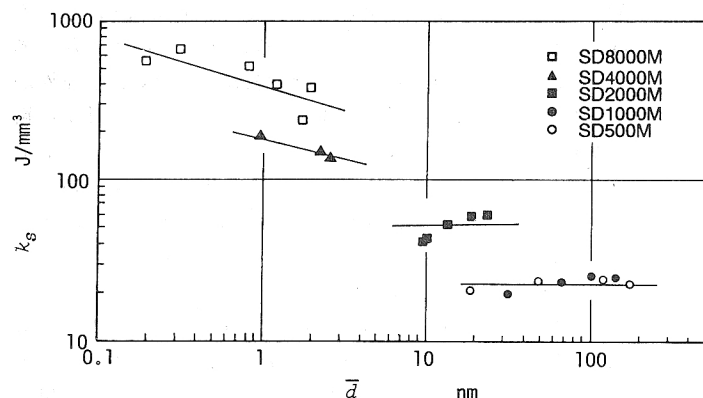


Fig. 3 Comparison of finishing performances of Si_3N_4 when different grain size stones are used



(a) Si_3N_4

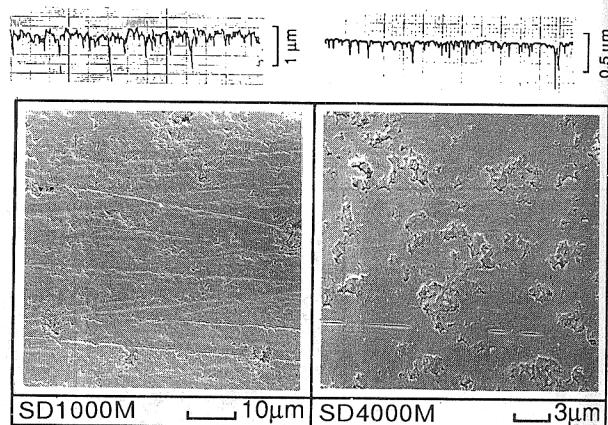


(b) Al_2O_3

Fig. 4 k_s - \bar{d} relation

砥石の切れ味を簡単に比べることができる。比較のため、被削性のよいアルミナの結果も示す。(a)の窒化けい素を加工した場合、左上に位置する#4000の砥石の切れ味が悪く、右下に位置する粒度の粗い砥石ほど切れ味が良い。また、#500と#1000の砥石の切れ味はほぼ同じと判断できる。(b)のアルミナを加工した場合にも同様の傾向を示している。また、同じ材料をホーニングで加工した場合と比較すると³⁾、超仕上げの結果はいずれもホーニングより左上に位置しており、超仕上げが精度レベルの高い加工法であるといえる。

図5は加工面の仕上状態であり、#1000、#4000の砥石で加工した面を比較している。#1000砥石では、砥粒が通過した条痕に沿って多数のくぼみができており、ぜい性破壊によ



($P_n=1.55\text{MPa}$)

($P_n=1.02\text{MPa}$)

Fig. 5 SEM photographs of finished surface of Si_3N_4

てき裂型の切りくずが除去されたことがわかる。粒度を細かくするに従い、くぼみの大きさや数が減少していき、#4000砥石になると加工面粗さは大きく改善されるが、依然として多数の浅いくぼみが観察される。砥石の切れ味が低下したため加工量が減少し、#2000砥石の加工でできたくぼみを除去しきれなかったこと、および材料自身の持つ気孔が現れていること*、によるものである。

3.1.2 加工材料の影響

図6は各セラミックスの加工特性を砥石粒度で整理した結果である。(a)フェライト、(b)アルミナ、(d)窒化けい素では、粒度が細くなるに従い、砥石切込み深さ \bar{d} が小さくなり、逆に比加工エネルギー k_s が大きくなって、砥石の切れ味は急激に低下している。後の3.2節で考察するように、粒度が細くなるに伴いき裂型から流れ型の切りくずへ変化していくことによるものと考えられ、仕上面粗さ R_a も大きく改善されている。

これに対し、(c)炭化けい素では粒度の変化に対して k_s 、 \bar{d} 、 R_a はいずれも大きく変化していない。粒度に関係なくき裂型の切りくず生成が支配的であることによるものと考えられる。このため、粒度の粗い砥石による加工ではアルミナと比較すると \bar{d} が小さく k_s が大きくて被削性は悪いが、粒度が細くなると被削性は逆の傾向になる。

3.1.3 ビトリファイドボンドによる切れ味の改善

図3の結果より、窒化けい素を#8000砥石で加工した場合、 \bar{d} が極めて小さく、砥石は目つぶれ気味で、切りくずを生成する加工を行うことができない。そこで、ボンドをビトリファイドとすることで、切れ味の改善を試みた。ボンドの中に気孔が形成され、切りくずの逃げ場となることが期待できる。図7(a)はその加工特性であるが、砥石圧力 P_n が大きくなるにつれて \bar{d} が増大しており、切りくずを生成する正常な加工が行われていることがわかる。このため、比加工エネルギー k_s も小さく、 P_n に関係なくほぼ一定値をとっている。しかし、砥粒保持力が低いため、砥石損耗量が大きくなってしまふ欠点があり今後の課題である。図7(b)は加工面のSEM写真である。わずかに条痕が残っているが、鏡面が得

* 加工面に気孔が現れているのは、切りくずを排出する仕上げ加工を行っているためであり、切りくずを排出することなく摩擦による塑性流動によって粗さを改善する場合には気孔はふさがれ観察することができなくなり、見かけ上鏡面が得られる。

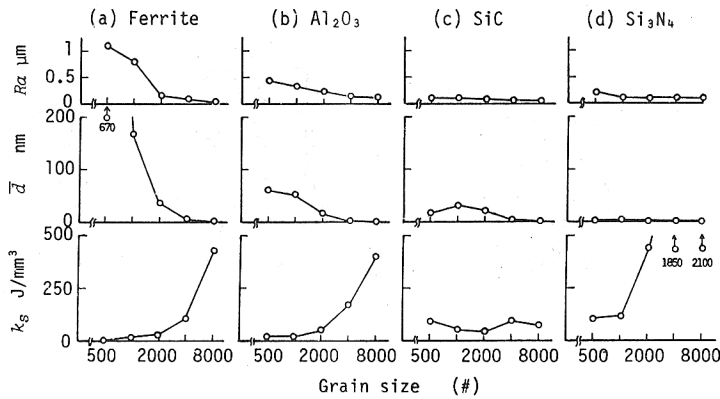
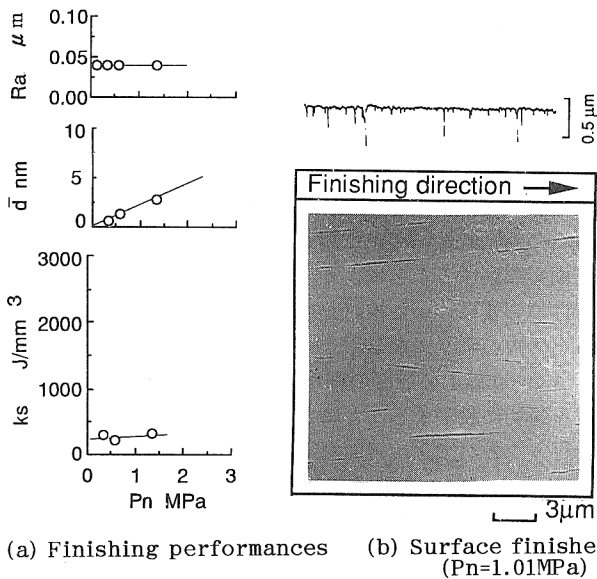


Fig. 6 Influence of grain size on finishing performance

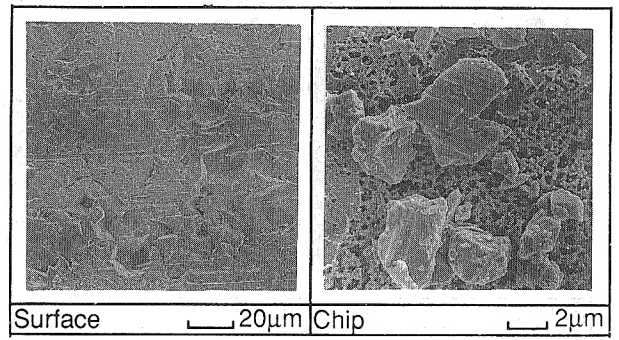

 Fig. 7 Finishing performances of Si_3N_4 with vitrified bond stone (SD 8000 V)

られ、また、加工物中に存在する気孔も観察でき、良好な加工面が得られていることがわかる。

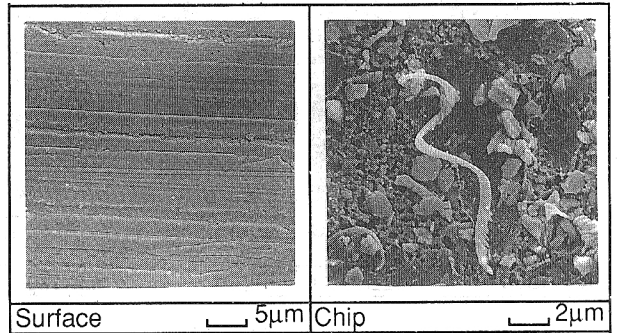
3.2 切りくずの生成機構

個々の砥粒の切削作用の集積が加工面の性状や切りくずの形態に現れると考えられる。そこで、切りくずおよびその切りくずが生成されたときの加工面を観察した。切りくずは加工液とともに加工中に採取し、ポアサイズ $0.1 \mu m$ のメンブランフィルタ (TOYO 製) を使って真空吸引法でろ過し、これを灯油で洗浄後、 10^{-5} Torr の真空中で乾燥し、SEM により観察した。なお、砥石圧力はいずれも $P_n=1 MPa$ に近い圧力に設定した。

図8はフェライトを (a) #1000, (b) #2000 の砥石で加工した場合を比較している。加工面より、#1000, #2000 砥石で加工形態がぜい性破壊型から塑性変形型へと変化し、表面粗さが大きく向上していることがわかる。#1000 砥石による加工面では結晶粒単位の大きさのくぼみが多数観察されるが、#2000 砥石ではこのようなくぼみは全くなく、砥粒による条痕だけが観察される。このため、切りくず形状にも大きな差があり、#2000 ではその大きさが小さく、しかも流れ型の形状を保ったままの切りくずも観察できる。砥粒径が小さくなるに従い作業砥粒数が増し、砥粒1個にかかる法線力がぜい性破壊を起こすための臨界荷重より小さくなり、砥粒-加工物接触領



(a) SD1000M stone used



(b) SD2000M stone used

Fig. 8 Finished surface and chips of ferrite

域が塑性変形でとどまっているためと考えられる⁴⁾。フェライトのようなもろい材料でも、加工条件を適切に選べば、流れ型の加工が可能であることがわかる。

図9はアルミナを (a) #1000, (b) #2000 の砥石で加工した場合である。この場合も、加工形態がぜい性破壊主体から塑性変形主体へと変化していることがわかる。しかし、フェライトほど明確ではなく、(b) #2000 でもぜい性破壊型の加工が一部で行われており、切りくずが除去された小さなくぼみが残っている。切りくずには小さいながらも流れ型の切りくずが観察できる。砥石には多数の切れ刃があり、過酷な状況にある砥粒はき裂型の切りくず、そうでない砥粒は流れ型の切りくずを生成する加工を行い、このような働きをする砥粒の割合が粒度や砥石圧力によって変化すると考えることができる。すなわち、粒度が細くなると、ぜい性破壊型加工の砥粒の割合が減り、塑性変形型加工の砥粒の割合が増えることになる。

図10は炭化けい素を #8000 で加工した場合であるが、この場合は #8000 まで粒度を細かくしてもき裂型の切りくず生成が支配的であることがわかる。他の材料に比べ、硬度が高く降伏しにくいと考えられる。

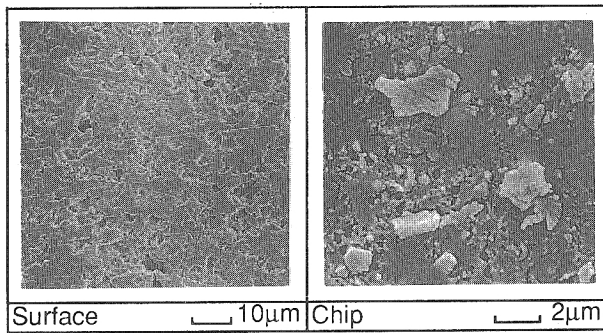
図11はジルコニアを #1000 砥石で加工した場合であるが、ぜい性破壊型の切りくずは全く生成されず、塑性変形型の切りくずが多数観察できる。他の材料に比べ、硬度が低く破壊じん性が高いためである。

以上の実験結果より、#1000, #2000, #4000, #8000 の砥石に対し、切りくず生成の形態は次のようになる。

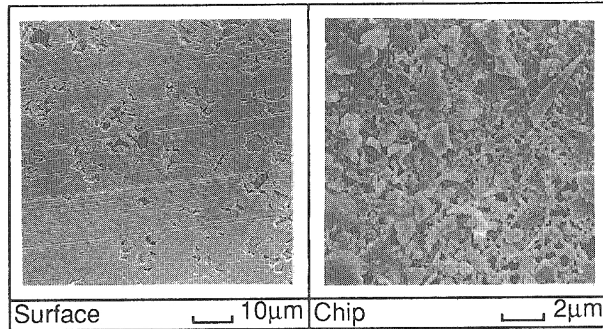
ジルコニア：#1000 砥石ですでに塑性型

フェライト：#1000 砥石までぜい性型、#2000 砥石から塑性型主体

アルミナ：#1000 砥石までぜい性型、#2000 砥石から塑性



(a) SD1000M stone used



(b) SD2000M stone used

Fig. 9 Finished surface and chips of Al_2O_3

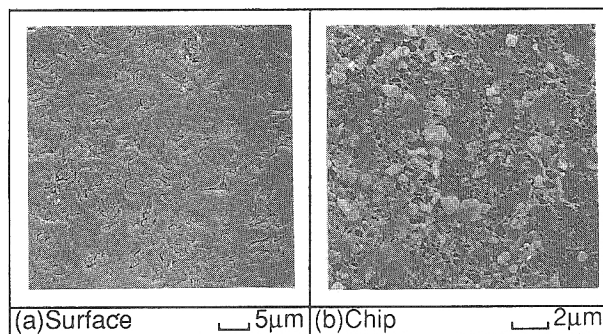


Fig. 10 Finished surface and chips of SiC with SD 8000 M

型主体

窒化けい素：#4000で塑性型に変化と推定

炭化けい素：#8000砥石までぜい性型が主体

細かく検討すればむずかしい判定となるが、本研究の加工条件の範囲ではおよそ上のようにまとめることができる。すなわち、ジルコニアがもっとも流れ型の切りくずを生成しやすく、炭化けい素がもっとも流れ型の切りくずを出しにくいことにな

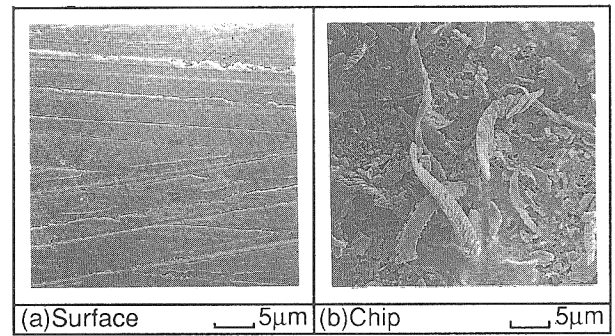


Fig. 11 Finished surface and chips of ZrO_2 with SD 1000 M

る。硬度が高く、流れ型の切りくずを生成しにくい炭化けい素をホーニングのような衝撃的な力の加わらない加工法で加工した場合、き裂型の切りくずを生成できない加工条件となることが多く、砥粒は加工物と弾性的に接触しているだけで食い込むことができず極めて被削性の悪い材料となる³⁾。

4. 結 言

粒度を変化させた砥石を用いて種々のセラミックスを加工し、砥石の加工特性について調べるとともに、切りくずの形状や加工面を観察することにより、切りくずの生成形態に及ぼす材料特性の影響について検討を加えてみた。得られた結果をまとめると、次のようになる。

- (1) #1000以上の粒度の細かい砥石を用いても、ボンド強度を適切に設定することにより、切りくずを生成する加工を行うことができ、鏡面を得ることができる。
- (2) 大きな粒状のき裂型切りくずと、微細な粉状の切りくずからなる見かけ上流れ型の形状をした切りくずが観察され、砥石の粒度が細くなるに従って、き裂型から流れ型へと変化していく。
- (3) ジルコニア、フェライト、アルミナ、窒化けい素、炭化けい素の順に流れ型の切りくずを生成しにくくなる。

終わりに、実験材料の提供を受けた(株)ミズホ、日本特殊陶業(株)、アルプス電気(株)に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 金曾久佳, 松森 昇, 杉田忠彰: ファインセラミックスの超仕上げ加工, 精密工学会誌, 57, 7 (1991) 1229.
- 2) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上げの加工機構に関する研究, 日本機械学会誌 (C 編), 57, 538 (1991) 2154.
- 3) 上田隆司, 花見真司, 裏 匡史, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 1138.
- 4) 田中芳雄: セラミックスの機械的性質と被加工性, ニューセラミックス, 5 (1988) 37.