ファインセラミックスの超仕上加工*

——加工表面損傷の曲げ強さへの影響——

上 田 隆 司** 大 野 誉 洋*** 坂 本 智†

Superfinishing of Fine Ceramics
— Influence of Machining Damage on Bending Strength —

Takashi UEDA, Yoshihiro OHNO and Satoshi SAKAMOTO

The machining damage done to the surface of ceramics by superfinishing is investigated experimentally. The bending strength of the ceramics finished is measured. The influence of the grain size and the finishing conditions on the bending strength is investigated. The work materials used are alumina Al_2O_3 sintered under atmospheric pressure and Mn-Zn ferrite sintered under HIP. The results are as follows. Superfinishing is very effective in removing the machining damage and improving the bending strength of the ground ceramic. Using a finer grain under lower stone pressure makes it possible to remove the work material as chips by plastic deformation and decrease the machining damage on the surface. It is estimated that the bending strength is influenced by the median cracks which are formed under the bottom of the groove by active grains. It is possible to increase the bending strength, using the stone under the condition of glazing.

Key words: abrasive grain, ultraprecision machining, ceramics, superfinishing, bending strength, machining damage, plastic deformation, grain size, median crack

1. 緒 言

セラミックスを利用しようとするとき、焼結面のまま加工を施さずに用いることが理想であるが、現在の焼結技術では寸法のコントロールに限界があり、何らかの機械加工を施すのが一般的である。そこで、著者らはこれまで、ファインセラミックスを研削で荒加工し、続いてホーニング¹⁾で加工精度を上げ、必要であれば超仕上げ^{2,3)}で仕上加工を行う加工工程を考え、加工能率の面からこれらの加工法について検討を加えてきた。すなわち、研削で加工量をかせぎ、ホーニングや超仕上げで仕上げることになる。このとき、研削ではもちろんであるが、砥石粒度が細かい砥石を用いる超仕上げにおいても、常に切りくずを生成する状態で加工を行う必要がある。切りくずを生成する状態であれば、砥石圧力が大きくなれば切削量が増え、圧力が小さくなれば切削量が減少する、いわゆる正常な加工状態を保つことができる。ところが、この正常な加工状態が破られると、切削量が砥石圧力に依存しなくなるため形状精度の低下を招くことになる。また、砥石の切れ味も低下していき、研削によって作られたき裂などの加工面損傷を除去できなくなり、仕上加工を施す意味が大幅に低下してしまう。

これまでの研究結果によれば、正常な加工状態を作り出すためには砥石の設計が重要であり、ダイヤモンド砥石に適切な砥粒保持力をもたせる必要がある^{1)~3)}。この点に注意すれば、砥石粒度を細かくしても切りくずを生成する加工状態を保ちながら、鏡面に近い加工面を得ることも可能である。しかしながら、最終仕上げである超仕上げでも切りくずを生成する加工である以上、加工表面に何らかの損傷を与えると考えられる。

そこで本研究では、超仕上げが加工面に与える損傷の程度について、その曲げ強度を測定することにより調べることにし

た。このとき、セラミックスは焼結面のまま用いることが一つの理想と考えられることから、焼結面と同等程度の材料強度が得られることを一つの目安と考えることにした。まず、粒度を #500 から #8000 まで変化させた砥石を用いて加工を行い、切りくずを生成する正常な加工状態にあることを確かめた。次に、加工を施した材料の曲げ強さを測定し、焼結面や研削面をもつ材料と比較することにより超仕上げが加工面に及ぼす損傷の程度について検討した。

2. 加 工 実 験

2.1 実験装置、実験条件

本研究では、曲げ試験との関連から角柱状の加工物を円盤状の砥石を用いて平面超仕上げしている。実験装置の主要部を図1に示す。円盤状の砥石②はチャック①により主軸に取り付け、回転運動を与える。角柱状の加工物③は加工抵抗測定用

Fig. 1 Main part of superfinishing machine

* 原稿受付 平成7年11月15日

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 金沢大学大学院 (現, 光洋精工(株); 柏原市国分東条町 24-1)

† 学生会員 金沢大学大学院

Fig. 2 Finishing direction

Table 1 Finishing conditions

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

(a)Alumina

(b)Mn-Zn ferrite

Fig. 3 Microstructure of ceramics

の動力計⑤に取り付け、加圧アーム⑥により円盤状の砥石②に一定圧力で押しつけるとともに、振動ユニット⑦によって加振する。加工抵抗は動力計⑤を用いて法線分力 F_n および接線分力 F_t を測定した。なお、振動方向分力は小さく、無視することにした。切削量は加工前後の重量差を天秤で測定した。

図2は加工物と砥石の位置関係を表しているが、砥石の回転運動による条痕が加工物長手方向と垂直になる(a)をvertical、長手方向に平行となる(b)をparallelと呼ぶことにする。

実験条件を表1に示す。なお、加工状態を一定とするため、所定の条件で30 s前加工を施した後、加工時間60 sの実験を行った。

2.2 実験材料

供試材料としてこれまで使用してきた材料の中から切りくずを生成しやすいセラミックスを選び出し、常圧焼結したアルミナ、HIP焼結したMn-Znフェライトを用いた。その微細構造が図3である。アルミナは径が5 μm程度の粒状の結晶粒から成っているが、フェライトは25 μm程度と大きく、HIP焼結のため密な構造となっている。その特性値を表2に示す。密度、硬度は測定値であり、他はメーカーの提供である。形状はいずれも長さ $L_w=20$ mm、幅 $B_w=3$ mm、厚さ $H_w=3$ mmの角柱状である。

使用した砥石を表3に示す。本研究ではこれまでの研究結果²⁾を基に、砥粒保持力の大きいブロンズ系のメタルボンドを用いた。砥粒にはG.E.製300シリーズミクロンパウダを用

Table 2 Characteristics of ceramics

	Al ₂ O ₃	Mn-Zn ferrite
Density g/cm ³	3.7	5.08
Bending strength MPa	343	157
Fracture toughness K_{Ic} MN/m ^{3/2}	3.86	—
Hardness HV	1 580	740
Elastic modulus GPa	370	—

Table 3 Diamond stones used

Symbol	Bond	Concentration	Bending strength MPa
SD 500 M	Metal	100	140
SD 1000 M	Metal	100	140
SD 2000 M	Metal	100	140
SD 4000 M	Metal	100	140
SD 8000 M	Metal	100	140

い、#500、#1 000、#2 000、#4 000、#8 000の粒度の砥粒を用いた。砥石形状は、外径 $d_o=60$ mm、幅 $b=20$ mm、内径 $d_i=20$ mmの円盤である。

加工液には、日本グリース(株)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。

2.3 砥石切込み深さ $\bar{d}$ 、比加工エネルギー k_s

砥石の切れ味の評価に評価関数“砥石切込み深さ $\bar{d}$ ”および“比加工エネルギー k_s ”を用いた。 $\bar{d}$ は加工条件の過酷さを表しており、加工量を一般的な形で表しているとも考えられる。 $\bar{d}$ が大きいとき、砥石の切れ味が優れていると判断できる。このとき、 k_s が小さければさらに優れている。 $\bar{d}$ が小さければその砥石の切れ味は悪い。 $\bar{d}$ 、 k_s は加工実験より求まる角柱状加工物の厚さ減少速度 $d(\delta H_w)/d\tau$ 、および加工抵抗接線分力 F_t を用いることにより、次式で表される³⁾。

$$\bar{d} = \frac{\pi B_w L_w}{V(d_i \pi - 2a)} \frac{d(\delta H_w)}{d\tau} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{F_t V}{2\pi B_w L_w} (1 + K^2)^{1/2} E(x) \frac{1}{\frac{d(\delta H_w)}{d\tau}} \quad (2)$$

ただし、 $K=2\pi Na/V$ 、 $x^2=K^2/(1+K^2)$ 、 E は第2種完全楕円積分で、本研究の加工条件では $K \approx 0$ より $E(x) \approx 2\pi$ となる。 B_w :加工物幅、 L_w :加工物長さ、 H_w :加工物厚さ、 V :砥石の回転速度、 d_i :砥石の内径、 a :振幅、 τ :加工時間。

2.4 実験結果

加工形態の確認

材料に加工を施し、曲げ試験によって損傷の程度を調べるわけであるが、切りくずを生成する正常な加工が行われたことを確認する必要がある。一般に、粒度の細かい砥石で加工する場合、砥石の切れ味が失われてしまうことがある。そのとき、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改善は行われず、時にはその低下を招く場合がある。また、研削などの荒加工によってできた加工変質層を十分除去できないことになり、超仕上加工を施す意味が失われてしまう。

そこで、まず加工状態を調べてみた。図4はアルミナを粒度の異なる砥石で加工した結果であり、砥石切込み深さ $\bar{d}$ 、比加工エネルギー k_s を砥石圧力 P_n で整理した結果である。#1 000、#2 000の砥石では、 P_n をあげると $\bar{d}$ は直線的に増加

Fig. 4 Influence of grain size on finishing performance

し k_s はほぼ一定値をとっており、安定した加工状態が得られていることがわかる。#4000 砥石になると $\bar{d}$ は P_n とともに大きくなっているが、 k_s も増大しており砥石の切れ味が少し不安定になってきていると判断できる。#8000 砥石になると、 $\bar{d}$ は小さくほとんど加工が行われておらず、 k_s のばらつきも大きくなって砥石は目つぶれ気味となっている。

加工面の SEM 写真を図 5 に示す。アルミナをみると、#1000 砥石による加工面ではぜい性破壊によるき裂型の切りくずが除去されており、ぜい性破壊が主体の加工が行われているが、#2000 になると塑性変形主体の加工に変化してきていることがわかる。#4000、#8000 砥石になると、砥粒による条痕がわずかに観察される程度であり、特に#8000 では図 5 (c) の表面粗さに見るように 32 nmRy の面粗さが得られている。一方、フェライトでは#1000 砥石においてもすでに塑性変形主体の加工が行われており、#4000 砥石では 60 nmRy の面粗さが得られている。

3. 曲げ強さ実験

#8000 を除く砥石ではほぼ満足できる加工が行われていることがわかった。そこで、これらの砥石で加工を施した材料の曲げ強さを測定し、加工面の損傷の程度を調べることにした。

3.1 実験方法

曲げ試験は引張試験機（島津製作所）を用いて 4 点曲げで行った。上スパンの支点間距離を 10 mm、下スパンを 18 mm とし、クロスヘッドのスピードを 0.5 mm/min とした。試験材料は、表 1 の条件で超仕上げ加工した 20×3×3 (mm) のアルミナ、およびフェライトであり、加工を施した面に引張りのモーメントが作用するようにセットした。加工手順は、最も粗い #1000 砥石で 60 s 加工することから始め、#2000 砥石…と順に粒度を細かくし、所定の粒度の砥石で 60 s 加工した*。加工面以外の長手 3 面は #3000 のダイヤモンドペーストで研磨し、エッジは面取りして、その影響を排除した。また比較のため、平面研削を施した加工物の強度も測定した。研削加工条件を表 4 に示す。

3.2 実験結果

3.2.1 加工方向の影響

加工方向が材料強度に及ぼす影響を調べることによって、強度に及ぼす原因を推定することができる。強度に及ぼす主な要

* 円盤状の砥石を用いているため砥石の内側と外側で加工量に差があるが、その差は小さい。それでも、加工物の左右を適宜入れ換えることによって片減りを防いでいる。

(a) Finished surface of alumina ($P_n=1.8\text{MPa}$) (b) Finished surface of ferrite ($P_n=0.95\text{MPa}$) (c) Surface roughness of finished workpiece

Fig. 5 Influence of grain size on finished surface

Table 4 Grinding conditions

Wheel	SD 150 B
Grinding speed	1 500 m/min
Workpiece speed	12 m/min
Depth of cut	10 μm
Grinding fluid	Solution type

因として、まず加工条痕、および加工条痕直下に形成されるメディアンき裂が考えられる。これらが強度低下の原因になれ

Fig. 6 Influence of finishing direction on bending strength of workpiece

Fig. 7 Influence of grinding direction on bending strength of workpiece

ば、図2(a) ver 方向に加工した加工物の強度が低下することになる。一方、砥粒が材料表面に条痕を作るとき、砥粒の後方に広がる引張応力によってコーンき裂の一種と考えられる微小き裂が発生する場合がある^{*}。このき裂は砥粒の切れ味が低いときに生じやすく、条痕に垂直な方向に入ることから、図2(b)の par 方向に加工した加工物の強度が低下することになる。

そこで、#1000 砥石で加工方向を変えて加工したフェライトの曲げ強さを図6に示す。ver 方向に加工した加工物の平均曲げ強さが98 MPaであるのに対し、para 方向の曲げ強さが145 MPaと50 MPa程度も大きくなっていることがわかる。図7はアルミナを平面研削し、同様に加工方向の強度への影響を比較しているが、para 方向（加工物長手方向に加工）の強度が ver 方向（長手に垂直な方向に加工）の強度の2倍以上になっている。したがって、超仕上げにおいても、研削加工同様、砥粒切れ刃によって材料表面に形成される加工条痕、もしくは条痕直下に形成されるメディアンき裂が材料強度に大きな影響を及ぼすと考えることができる⁴⁾。

そこでこれ以後は、加工の影響が大きい ver 方向に加工した加工物を研究対象にしていくことにする。

なお、超仕上げでは砥石が振動しながら加工するため砥粒の加工方向が変化することになり、本研究の場合、最大傾斜角が14.5°であるが、この角度を大きくすれば材料強度に関する加工方向性の影響を緩和することが可能になると考えられる。

3.2.2 砥石粒度の影響

^{*} 熱応力によるき裂もこの方向に入るが、超仕上げでは熱の影響は小さいと考えられる。

Fig. 8 Influence of grain size on bending strength of workpiece

Fig. 9 Effect of grain size on improvement of bending strength of workpiece

アルミナを#1000、#2000、#8000 砥石で最終加工した材料の曲げ強さをワイブル確率紙にプロットした結果が図8である。砥石粒度を細かくするほど、材料の曲げ強さは大きくなっている。t 検定によれば、これらの強度の間には有意の差がある。したがって、粒度が細かい砥石での超仕上げは加工面に与える損傷を小さくできることがわかる。

ところが、#2000 砥石に対して、簡単な線形破壊力学を適用して加工表面に残留していると予測されるき裂長さを求めると10 μm程度となる。この値は最大粗さ R_y が1 μm以下となる加工面粗さに比べるとはるかに大きい。したがって、加工条痕の強度への影響は小さく、加工条痕直下に形成されるメディアンき裂が材料の結晶粒の大きさや粒界の状況に依存して強度に大きな影響を及ぼすと考えるのが妥当であろう⁵⁾。

図9は砥石粒度の強度への影響をまとめた結果である。破線は基準と考えるべき焼結表面をもつ材料の強度である。アルミナ、フェライトいずれも#2000～#4000 砥石ではほぼ強度が焼結面の強度に飽和する傾向をみせており、#2000程度の砥石による加工で表面に生じる損傷を小さく抑えうることがわかる。このとき、図5との比較により、加工状態は塑性変形が主体の加工となっている。このため、図5(c)より最大粗さ R_y はフェライトで0.2 μm、アルミナでは0.5 μmとすぐれた面粗さが得られており、この程度の粗さに仕上げれば強度的には十分であることがわかる⁶⁾。一方アルミナでは、#8000 砥石の超仕上げによって大きく強度が向上している。材料本来の強度がはっきりしないため詳細はわからないが、#8000 砥石の加工では砥石は目つぶれ気味であったことを考慮すると、砥石の

Fig. 10 Effect of superfiniting on improvement of bending strength of ground workpiece

パニシ作用によって、加工表面に圧縮の残留応力が生じ強度が向上したとも考えられ、今後の検討課題である。

3.2.3 研削加工面の改善

加工能率に重点をおいた加工システムを考えると、研削で荒加工を行い、超仕上げで仕上げ加工を行うことになる。すなわち、効率よく寸法精度を出し、研削によるダメージを超仕上げで除去することになる。そこで、超仕上げによる改善の程度を調べてみた結果が図10である。切込み10 μmで研削加工したアルミナは234 MPaの曲げ強度をもっているが、この材料に#1000 砥石で60 sの超仕上げを施すことで332 MPaとなり、100 MPa程度も強度を回復している。このとき、60 sの加工で表面から500 μmを除去しており、研削によるき裂が線形破壊力学から70 μm程度と推定されることから、単純計算で10 s程度の加工で完全に除去できることになる。#1000 砥石のあと、#2000、#4000 砥石による仕上げを施す時間を考慮しても、ラッピングやポリッシングなどの仕上げ加工法に比べると加工時間を大幅に短縮できることになる。

3.2.4 砥石粒度が材料強度に及ぼす影響の一考察

これまでの検討から、加工条痕の直下に形成されるメディアンき裂が材料強度の低下の原因になると考えられる。そこでここでは、加工面に生じたメディアンき裂が材料強度を支配すると考えることで、砥石粒度が材料強度に及ぼす影響を検討してみる。

球状圧子を破壊じん性 K_{Ic} のセラミックスに押し付けた場合を考えると、圧子半径が遷移圧子半径より小さい場合、荷重 f を大きくしていくと弾塑性境界領域からメディアンき裂が生じ、その深さ C は⁴⁾

$$C \propto \left(\frac{f}{K_{Ic}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

で与えられる。

ところが、表面に長さ C のき裂をもつ材料に均一な単純引張応力がき裂を開口する方向に作用した場合、その材料の破壊強度を σ_F とすると、

$$\sigma_F \propto \frac{K_{Ic}}{C^{1/2}} \quad (4)$$

この2式より

$$\sigma_F \propto K_{Ic} \frac{1}{(f/K_{Ic})^{1/3}} \propto \frac{K_{Ic} K_{Ic}^{-1/3}}{f^{1/3}} \quad (5)$$

一方、砥粒平均径 d_g 、集中度が C_g の砥石に押付け力 F_n を加えた場合を考えると、砥粒1個に作用する押付け力 f_n は

$$f_n \propto \frac{F_n d_g^2}{C_g} \quad (6)$$

そこで、 $f = f_n$ とおくと、式(5)、(6)より

$$\sigma_F \propto C_g^{1/3} K_{Ic} K_{Ic}^{1/3} F_n^{-1/3} d_g^{-2/3} \quad (7)$$

となる。式(7)より、 σ_F を大きくするためには、砥粒径 d_g が小さい砥石を用いること、砥石押付け力を小さくすることが有効であり、その効果は砥粒径を小さくする方が大きいことがわかる。すなわち、粒度の細かい砥石を用いれば、砥石圧力の強度への影響を抑えて、加工面に与える損傷を抑制した加工を行うことができるといえる。

4. 結 言

セラミックスを超仕上げしたとき加工面に生じる損傷について、アルミナやフェライトを加工してその曲げ強さを測定することにより調べた。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) #2000 程度の砥石で仕上げるにより、短時間で効率的に、面粗さを0.2~0.5 μmR_y程度に改善することができ、材料の曲げ強度も焼結面の強度に回復できる。
- (2) 超仕上げで仕上げた材料でもその強度は加工方向に依存し、加工条痕を開口する方向の曲げモーメントに対して小さくなることから、加工表面に現れない損傷の影響を考えなければならない。
- (3) 加工表面に与えるダメージを抑えるためには、粒度の細かい砥石を用いること、砥石圧力を下げることが有効であり、その効果は粒度を細かくする方が大きいと考えられる。

終わりに、砥石およびセラミックスの提供を受けた(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, 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.
- 2) 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.
- 3) 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, 日本機械学会論文集 (C 編), 57, 538 (1991) 2154.
- 4) 張 璧, 戸倉 和, 吉川昌範: ダイヤモンド砥石によるセラミックス研削面の表面性状, 精密工学会誌, 54, 8 (1988) 1537.
- 5) 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.
- 6) 萱場信雄, 藤沢政泰: セラミックスの高効率研削——クラック層深さへの影響, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1986) 355.