



ファインセラミックスの超仕上加工*

—加工条件と被削性—

上田隆司** 金曾久佳*** 松森 昇† 杉田忠彰**

Superfinishing of Fine Ceramics
—Finishing Conditions and Machinability of Ceramics—

Takashi UEDA, Hisayoshi KANESO, Noboru MATSUMORI and Tadaaki SUGITA

The method to achieve a productive superfinishing of fine ceramics is investigated experimentally. 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 cutting ability of stone and the machinability of work material are evaluated using the function \bar{d} , which is composed of the finishing condition term and the measured term. The results are as follows. The superfinishing is efficient in the surface refinement of ceramics, when the diamond stone with the suitable bonding strength is used. The stone with low bonding strength should be used on ceramics of low machinability to create some new cutting edges in operation. For Al_2O_3 and Mn-Zn ferrite having high machinability, the stone with high bonding strength should be used to restrain the stone wear. The relation between specific finishing energy k_s and \bar{d} calculated from the experimental results is useful to evaluate the machinability of ceramics, the machinability is best in Mn-Zn ferrite and deteriorates in the order of Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 and ZrO_2 .

Key words: fine ceramic, superfinishing, evaluating function, specific finishing energy, machinability, cutting ability

1. 緒 言

著者らはこれまでファインセラミックスをホーニングで仕上加工する方法について詳細に検討してきたが、その結果、適切な砥粒保持力を持つダイヤモンド砥石を適切な加工条件のもとで用いれば、切りくずを生成しながら加工を行うことができ、材料によっては鏡面を得ることも可能であることがわかった¹⁾²⁾。しかし、砥石作業面が常に加工面に接していることから切りくずの除去が難しく、さらに高精度で、かつ加工変質層の少ない加工面を得ようとする場合、粒度の高い砥石を用いることが困難となる。

そこで本研究では、さらに精度レベルの高い超仕上加工を取り上げ、ファインセラミックスの仕上加工に適用することを試みた。この加工法はホーニング加工と同様砥石作業面が常に加工面に接しているが、砥石

に振動を与えることから、切りくずの除去がたやすくなり、切れ刃の自生作用も促進されることが期待できる。

本報告では、先に導出した加工状態の過酷さを判定できる評価関数³⁾、及び比加工エネルギーを用いることにより、フェライト、アルミナ、炭化けい素、窒化けい素、ジルコニアを超仕上で加工する方法について検討すると共に、これらセラミックスの被削性について評価してみた。

2. 実験方法

2.1 実験装置、実験条件

実験装置の主要部の概略図を図1に示す。棒状の砥石③を加圧アーム⑥のばねによってリング状の加工物①に一定の圧力で押し付け、その外面を仕上げる定圧加工法で行った。加工物には回転運動を与え、砥石には回転方向に垂直な方向の振動を振動ユニット⑦で与えた。測定量は切削抵抗、切削量、砥石損耗量、及び仕上面粗さである。動力計⑤により砥石に作用する加工抵抗法線分力 F_n 及び接線分力 F_t を測

* 原稿受付 平成2年12月3日。1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月7日)にて発表

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学大学院

† 正会員 瑞穂研磨砥石(株)(城陽市寺田袋尻82)

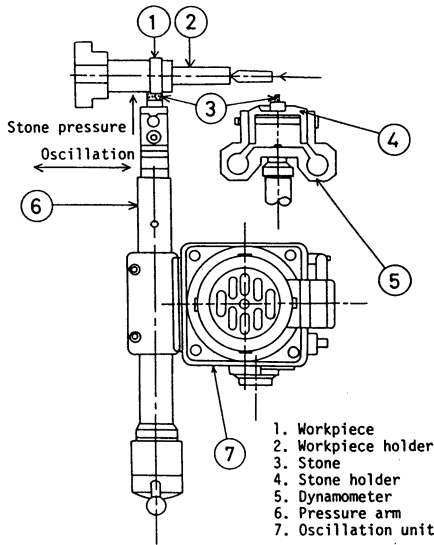


Fig. 1 Schematic illustration of main part of super finishing machine

Table 1 Main finishing conditions

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

定した。なお、振動方向の分力は小さく、無視することにした。切削量は加工前後の重量を天秤で測定し、重量差より求めた。砥石損耗量は電気マイクロメータで基準面との差を測定した。

実験条件を表1に示す。加工速度 V_w 、振動数 N 、振幅 a を変化して適切な加工条件を検討し、その結果より表1の $V_w=40$ m/min, $N=900$ cpm, $a=1.6$ mm を標準的な加工条件とした。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 $t=60$ sの実験を行い、測定を行った。

2.2 実験材料

使用した加工材料の特性値を表2に示す。常圧焼結した Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , ZrO_2 , 及び HiP 焼結した Mn-Zn フェライトである。密度、硬度は測定値であり、ほかはメーカの提供である。形状はいずれも外径

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} MN/m ^{3/2}	3.86	4.81	6.02	8.98	—
Hardness HV	1580	2520	1870	1290	740
Elastic modulus GPa	—	430	284	216	—
Thermal conductivity W/mK	18.4	57.3	12.5	2.1	—

Table 3 Diamond stones used

Symbol	Bending strength MPa	Symbol	Bending strength MPa
SD 1000 M-1	55	SD 1000 M-4	136
SD 1000 M-2	80	SD 1000 M-5	168
SD 1000 M-3	116	SD 1000 M-6	207

(Grain size: #1000, Bond: metal, Concentration: 100)

$D=45$ mm, 内径=25 mm, 長さ $B=20$ mm のリング状である。

使用したダイヤモンド砥石を表3に示す。本研究では先のホーニング加工の結果などを参考にして砥粒保持力が大きいブロンズ系のメタルをボンドとして用いることにした⁴⁾。なお、ビトリファイドボンドは切りくずの逃げ場となる気孔を多数持つため、切れ味はよくなるが、砥粒の保持力が弱く砥石損耗が大きくなる欠点がある。レジンボンドは他のボンドに比べて弾性に富むため切れ刃砥粒がボンドの中に潜り込む傾向にあり、切れ味が悪くなる。

メタルボンドは砥石の切削性に大きく影響する砥粒保持力のコントロールが容易である。そこで、表3に示すように保持力を6段階に変化させることにした。砥粒保持力は砥石の抗折強度 σ_0 で表しており、 σ_0 が大きい砥石で保持力が大きいと判断できる⁴⁾。砥粒には粒度1000の人造ダイヤモンド(G. E. 製, 300シリーズマイクロパウダ)を用い、集中度はいずれも100とした。

加工液には切りくずの排出能力の大きい加工油(比重: 0.84, 粘性: 40°C, 3.3 cSt, 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 データ整理

加工条件の適正、砥石の切れ味、加工材料の被削性、などを判定するために、評価関数“砥石切込み深さ \bar{d} ”を用いることにする³⁾。

振動数 N 、振幅 a で振動する1本の棒状砥石(作業面積 $l \times b$) が直径 D 、幅 B の円筒状の加工物外面を速度 V_w で加工している状態を考えると、このときの砥石切込み深さ \bar{d} は

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w} \left\{ \pi l - 2a \cos\left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a}\right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) \right\}^{-1} \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (1)$$

ただし、

$$\epsilon = \frac{B-l}{2}$$

で与えられることになる。本実験の場合

合、加工物の幅と砥石長さが等しい ($B=l$) ことから

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

となる。

一方、振動数 N で振動する砥石が加工時間 τ の間になす仕事は、

$$F_t N \tau L \quad (3)$$

この間の切削量が ΔD より、単位体積の切りくずを生成するのに必要な比加工エネルギー k_s は、

$$k_s = \frac{NF_t \tau L}{\Delta D} = \frac{2F_t V_w}{\pi^2 DB} (1+K^2)^{1/2} E(k) \frac{1}{d(\delta R)/d\tau} \quad (4)$$

ただし、 L は1回の振動の間に砥石が動く距離であり、第2種楕円積分 $E(k)$ を用いて次のように表される⁵⁾。

$$L = \frac{4V_w}{\omega} (1+K^2)^{1/2} E(k) \quad (5)$$

なお、 $K = \frac{a\omega}{V_w}$, $k^2 = \frac{K^2}{1+K^2}$

一方、切削量 ΔD は \bar{d} を用いると

$$\Delta D = \frac{V_w(\pi l - 2a)}{\pi} \int_0^\tau \bar{d} d\tau$$

与えられ、加工中 \bar{d} が一定のとき、

$$\Delta D = \frac{V_w(\pi l - 2a)}{\pi} \bar{d} \cdot \tau \quad (6)$$

となる。また、 $G = \Delta D / \Delta S$ で与えられる仕上比は

$$G = \frac{V_w(\pi l - 2a)}{\pi l b \delta h} \bar{d} \cdot \tau \quad (7)$$

となる。

したがって、加工実験において、加工物半径減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ 、砥石損耗量 δh 及び切削抵抗 F_t を測定すれば \bar{d} 、 G 、 k_s を求めることができる。

\bar{d} は切削量を一般的な形で表した量とも考えることができ、 \bar{d} 、 G が大きく、 k_s が小さいとき、砥石は切削性がよく、加工材料は被削性がよいと判断することができる。また、 $k_s = \bar{d}$ 線図を用いれば加工材料の被削性をホーニング加工など他の加工法の結果と同じ基準で比較することも可能となる¹⁾。

3. 実験結果、及び検討

3.1 加工抵抗による砥石の加工状態の把握

金属材料を加工する場合、砥石の加工状態は砥石圧力によって大きく変化するが、加工抵抗 F_t を監視す

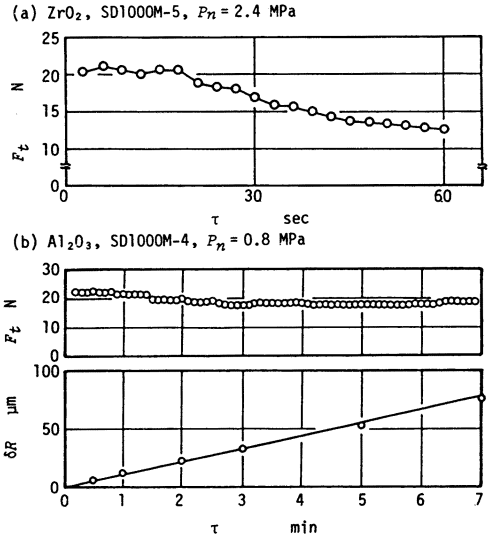


Fig. 2 Decrease of workpiece radius and variation of finishing force as operation proceeds

ることにより、その状態を正確に把握することができた³⁾。そこで、セラミックス加工の場合についても F_t を加工状態の監視信号として用いるため、 F_t 、および加工物半径減少量 δR の時間的変化を調べた結果が図2(b)である。 Al_2O_3 をSD1000M-4砥石で加工しているが、 F_t がほぼ一定とみなすことができ、その間 δR は単調に増加し、直線の勾配で表される加工物半径減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ は変化していない。これに対し、図2(a)は砥石圧力 P_n を上げて ZrO_2 を加工したときの F_t を測定した結果である。加工進行とともに F_t が急激に低下していることから、砥石の切削性が失われつつあることがわかる。砥石圧力を大きくし過ぎたため、切りくずの除去が困難となり、砥石が目つぶれ状態となるためである。したがって、セラミックスの場合も、 F_t を監視すれば砥石の加工状態を把握することができる。超仕上やホーニングのような仕上加工では、加工材料の形状精度の向上や加工変質層(微小クラック、残留応力)の除去の観点から、切りくずを排出する切削状態に砥石を保つことがもっとも基本的な条件である。そこで、本研究では F_t が一定であれば、 $d(\delta R)/d\tau$ が変化せず安定した切削状態にあるものと考えてこの状態を扱うこととし、 F_t が時間とともに変化する状態は加工条件の設定が不適当と判断して研究の対象から除外することにした。

超仕上やホーニングのような仕上加工では、加工材料の形状精度の向上や加工変質層(微小クラック、残留応力)の除去の観点から、切りくずを排出する切削状態に砥石を保つことがもっとも基本的な条件である。そこで、本研究では F_t が一定であれば、 $d(\delta R)/d\tau$ が変化せず安定した切削状態にあるものと考えてこの状態を扱うこととし、 F_t が時間とともに変化する状態は加工条件の設定が不適当と判断して研究の対象から除外することにした。

3.2 加工条件の影響

3.2.1 加工速度の影響

定切込み加工の場合 $d(\delta R)/d\tau$ が砥石切込み速度

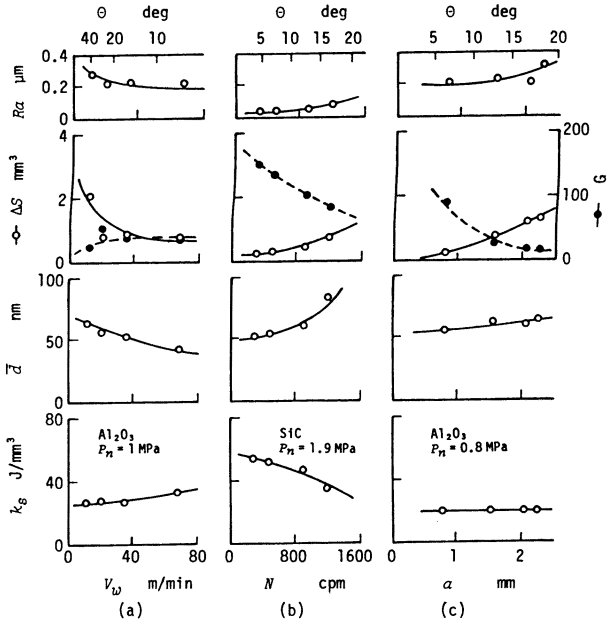


Fig. 3 Influence of operating conditions on finishing performance

とみなせることから、式(2)で与えられる \bar{d} は加工条件だけで決まり、加工条件の過酷さは加工速度 V_w に反比例して緩和されることになる。ところが、定圧加工の場合 $d(\delta R)/d\tau$ が V_w の影響を受けるため、式(2)から加工条件の過酷さに及ぼす V_w の影響を直接知ることはできない。

図3(a)は振動数 $N=900$ cpm一定のもとで V_w の影響を調べた結果である。図より、 V_w が大きくなると \bar{d} が減少し、 k_g が大きくなることから、砥石の切れ味が低下する傾向にあることがわかる。 N が一定のもとで加工速度を高速にすることは

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2aN\pi}{V_w} \quad (8)$$

で与えられる最大傾斜角 θ を小さくする。その結果、切れ刃に作用する交番力の方向の変化が小さくなり、切れ刃の自生作用を抑制することになる。このことは、図において砥石損耗量 ΔS が減少することに現れている。また、定圧加工の場合、加工速度の上昇は砥石切れ刃の加工物への食いつきを浅くする傾向にあり、ホーニング加工でも加工速度の減少によって、砥石の切れ味は低下している⁶⁾。

3.2.2 振動数の影響

加工速度 V_w を一定としていることから、振動数 N を変化すれば最大傾斜角 θ が変化し、砥石の切れ味に大きく影響する。

図3(b)は $N=300 \sim 1200$ cpmでSiCを加工したときの結果である。 N が大きくなるに従い \bar{d} が増大し、 k_g が減少していることから砥石の切れ味が大きく向上していることがわかる。しかし、砥石損耗量 ΔS も増大するため、仕上比 G は大きく低下してしまう。

3.2.3 振幅の影響

ホーニング加工における砥石オーバーランに相当し、主に加工面の形状精度の面から決定されるべき量と考えられるが、ここでは砥石の切削性に及ぼす影響を調べてみた。図3(c)に見るように、振幅 a が大きくなれば最大傾斜角 θ が大きくなることから、 \bar{d} が大きくなる傾向となり、砥石の切れ味は幾分向上している。しかし、砥石損耗量 ΔS の増大が大きく、その結果仕上比 G は大きく低下してしまう。振幅 a を大きくすることに伴い、振動ユニット全体の振動が大きくなり、砥石の異常摩耗を促進するためである。したがって、形状精度が許す限り a は小さく設定すべきであろう。

3.3 ボンド強度の影響

砥石作業面が常に加工材料に接している超仕上げ加工では砥石の砥粒保持力が加工性能に最も大きく影響する。そこで、表3に示すボンド強度 σ_b の異なる砥石でSiCを加工し、 σ_b の影響を調べた結果が図4である。砥石の適正を判断する基本的基準は、砥石圧力 P_n が大きくなるに従い、 \bar{d} が増大、 k_g が減少傾向、砥石損耗 ΔS が適度に増大すること、であるが、 \bar{d} の増大が最も基本的な条件である。

図4では $\sigma_b=80 \sim 207$ MPaの間の砥石を用いてい

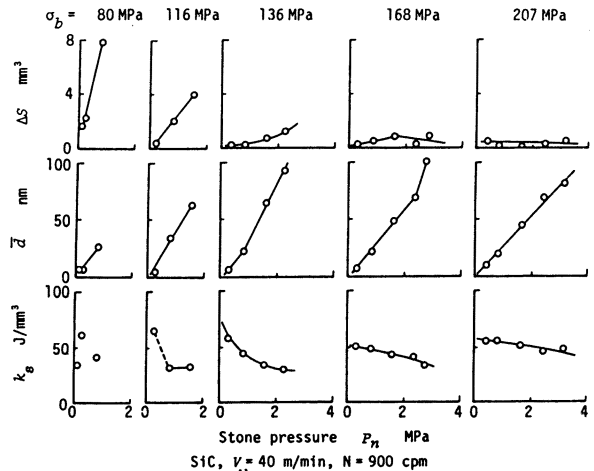


Fig. 4 Comparison of finishing performance of SD stone with different bonding strength

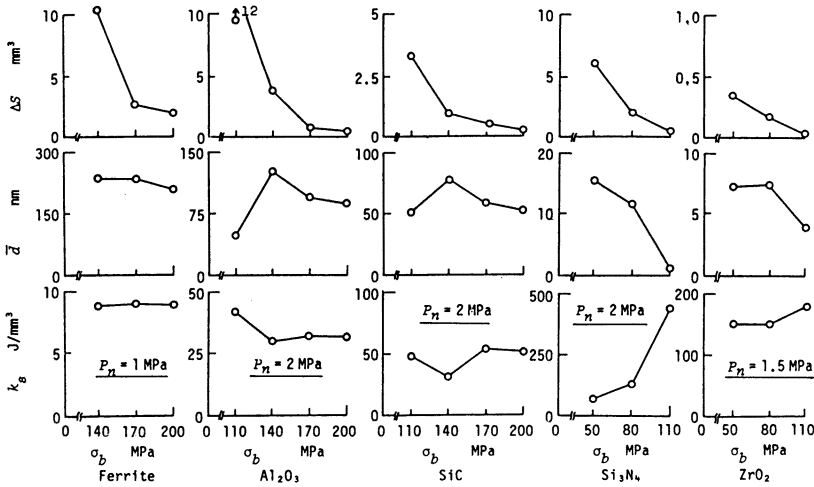


Fig. 5 Influence of bonding strength of SD stone on finishing performance

るが、いずれの砥石においても P_n が大きくなるに従って \bar{d} が増大しており、基本的条件を備えている。しかし、 $\sigma_b=80$ や 116 MPa の砥石では砥粒保持力が小さく、砥石損耗量 ΔS が大きすぎる。逆に、ボンド強度の高い砥石になると、 ΔS が抑えられ過ぎて目つぶれ状態に近づいており、SiC の場合、 $\sigma_b=136$ MPa 程度の砥石が適切と判断できる。

他の加工材料に対しても同様の実験を行い、砥石強度の及ぼす影響をまとめた結果が図5である。この結果より、各セラミックスの加工に適切なボンド強度を定めることができる。

フェライト： σ_b が大きくなると ΔS が急激に低下し仕上比 G が大きく改善されるが、 $\sigma_b=200$ MPa になると \bar{d} が減少する傾向になり $\sigma_b=170$ MPa が上限であろう。

Al_2O_3 ： k_s が小さく、 \bar{d} が大きい $\sigma_b=140$ MPa が適当である。 ΔS を抑えて仕上比 G を大きくしたい場合はボンド強度を上げてよいが、 \bar{d} が小さくなる。

SiC： k_s が小さく、 \bar{d} が大きい $\sigma_b=140$ MPa が適当である。 Al_2O_3 と異なり、 σ_b を大きくし

ても ΔS の減少は小さく、仕上比 G の大幅な増大は望めない。逆に \bar{d} が小さくなり、砥石の切れ味の低下が大きい。

Si_3N_4 ：ボンド強度の影響が典型的に現れており、 σ_b を大きくすると k_s が大、 \bar{d} が小となる目つぶれ加工となって、砥石の切れ味は大きく低下してしまう。 \bar{d} を大きくできないこの材料に対しては、 σ_b を小さくして切れ刃の更新を促進し、砥石の切れ味を優先すべきで、 $\sigma_b=80$

MPa 以下とすべきであろう。

ZrO_2 ：金属に近い性質を持ち、 \bar{d} を大きく、 k_s を小とするためにはボンド強度の小さい砥石を用いるべきであり、 Si_3N_4 と同様 $\sigma_b=80$ MPa の砥石が適当であろう。

3.4 加工材料の被削性

前節の結果より加工に適切と考えられた砥石を用いて、各種セラミックスの加工特性を調べた結果が図6である。横軸が砥石圧力 P_n 、縦軸が比加工エネルギー k_s 、砥石切込み深さ \bar{d} 、砥石損耗量 ΔS 、仕上

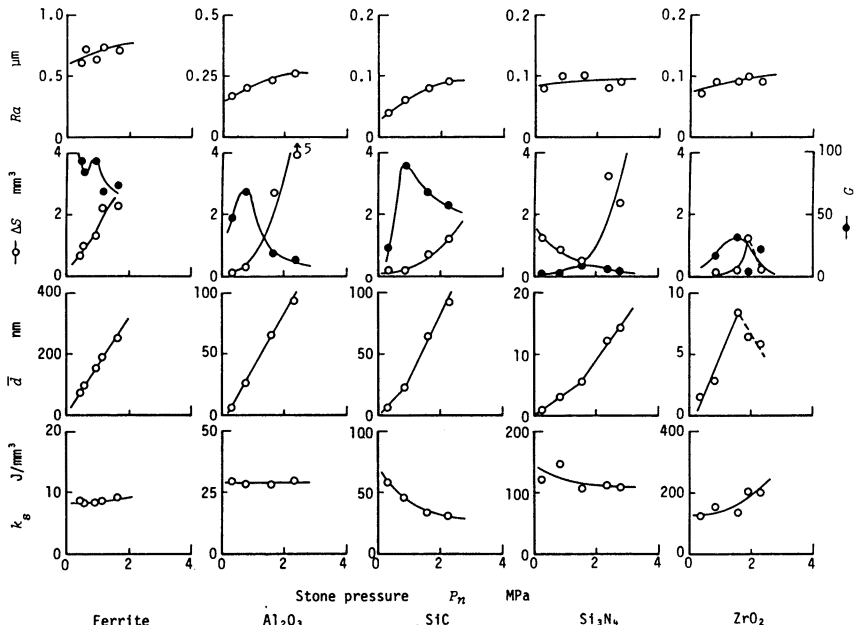
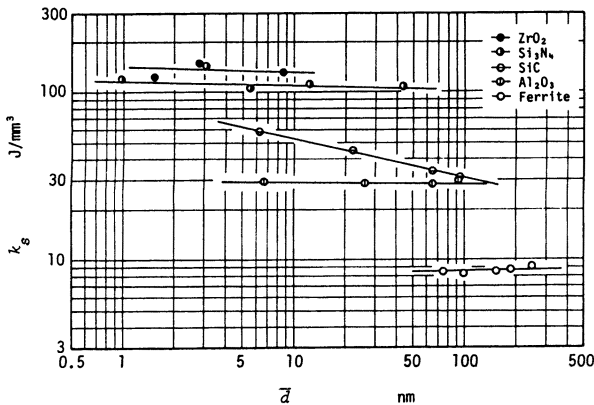


Fig. 6 Comparison of machinability of ceramics

Fig. 7 k_s - \bar{d} relation

面粗さ R_a である。ZrO₂ を除く各セラミックスでは P_n が大きくなると \bar{d} が大きくなり k_s が減少する正常な切削形態を示しており、超仕上によって仕上加工することが十分可能であることがわかる。しかし、ZrO₂ では \bar{d} が $P_n=1.7$ MPa 付近でピークを持ち、これ以上の P_n で \bar{d} が減少し k_s が大きくなっている。この圧力を境にして切削状態から目つぶれ状態へ移行しているためであり、ZrO₂ に対しては砥石圧力の設定が重要となる。

図6の結果における比加工エネルギー k_s を砥石切込み深さ \bar{d} で整理しなおした結果が図7である。ZrO₂ の $P_n > 1.7$ MPa のデータは加工形態が異なるため除外している。左上にある材料ほど被削性が悪く、右下にある材料ほど被削性が良いと判断できる。フェライトが最も良く、Al₂O₃、SiC、Si₃N₄、ZrO₂ の順に悪くなり、被削性のよい材料ほどボンド強度の大きい砥石を用いていることがわかる。一方、SiC では \bar{d} が小さくなると k_s が大きくなる寸法効果が現れているが、他の材料では \bar{d} に関係なくほぼ一定となっている。SiC の焼結粒子の粒内と粒界の強度差が他の材料の場合に比べて大きいことなどが影響しているのではないかと考えている。また、図7を用いればホーニング加工における被削性と比較することもできる¹⁾。

4. 結 言

フェライト、アルミナ、炭化けい素、窒化けい素、ジルコニアといったセラミックスを超仕上で加工する

方法について検討すると共に、砥石を1個の工具にモデル化することによって導出した評価関数を用いてその被削性を評価してみた。得られた主な結果は次のようである。

- (1) 超仕上はセラミックスの仕上加工として十分有効な加工法であり、適切な砥石を用いれば切りくずを生成しながら加工することができるが、ジルコニアの加工には砥石圧力の設定が重要である。
- (2) 砥石ボンドの砥粒保持力が切削性に及ぼす影響は大きく、被削性の良い材料ではボンド強度を大きくして砥石損耗を抑制し、被削性の悪い材料にはボンド強度を下げて切れ刃の自生を促す必要がある。
- (3) 評価関数砥石切込み深さ \bar{d} で比研削エネルギー k_s を整理した k_s - \bar{d} 線図を用いることにより、セラミックスの被削性を簡単に比較することができ、フェライトの被削性が最もよく、アルミナ、炭化けい素、窒化けい素、ジルコニアの順で悪くなる。

終わりに、実験材料の提供を受けた日本特殊陶業(株)、アルプス電気(株)、日本グリース(株)に深謝する。

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——被削性と切りくず生成機構, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 1138.
- 2) 上田隆司, 花見真司, 裏 匡史, 平野 聡, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工——砥石集中度・粒度の影響, 精密工学会誌, 52, 11 (1986) 1889.
- 3) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上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) 上田隆司, 花見真司, 平野 聡, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工——ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響, 精密機械, 51, 6 (1985) 1195.
- 5) 例えば, H. W. Reddick and F. H. Miller: Advanced Mathematics for Engineers, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., (1970) 125.
- 6) 上田隆司, 山本 明: ホーニング加工の高能率化(第1報)——鋳鉄ホーニング加工の高速化, 精密機械, 46, 7 (1980) 818.