ファインセラミックスの研削抵抗および 加工表面性状に関する研究*

由井明紀^{*1}, 渡部武弘^{*2}, 吉田嘉太郎^{*2}

The Effects of Surface Grinding Conditions upon the Grinding Force and the Surface Characteristics of Fine Ceramics

Akinori YUI, Takehiro WATANABE, and Yoshitaro YOSHIDA

The effects of static stiffness of surface grinding machines, and the grinding conditions upon the grinding force and the surface characteristics of fine ceramics are described. There is a critical point in the relation between the table feed rate and the grinding force under the condition of constant removal rate. Fine ceramics ground at a lower table feed rate than the critical point and in an up-cut grinding condition exhibit a surface of quasi-brittle fracture and a greater grinding force. Grinding at a higher table feed rate and in a down-cut grinding exhibits a quasi-plastic flow surface and a lower grinding force. The surface grinding machine with a lower static stiffness exhibits quasi-plastic flow surfaces.

Key Words: Fine Ceramics, Grinding, Surface Integrity, Static Stiffness, Grinding Force

1. 緒 言

金属材料とは加工特性の異なるファインセラミックス研削加工用平面研削盤を設計する際、その使用目的に応じて最適剛性値を持つような設計を行う必要がある。一般的に平面研削盤の過剰静剛性は、機械コストの上昇のみならず、作業性の低下、機械専有面積の増加を招く。一方、過小静剛性はファインセラミックスの切残しによる寸法精度の低下を招く⁽¹⁾。さらには研削比の低下⁽²⁾、加工能率の低下を招き、製品加工コストの上昇を引き起こす。また、平面研削盤の静剛性の高低が被削ファインセラミックス製品の表面性状や破壊強度を左右する可能性もある。

ところが、従来、ファインセラミックス研削加工用平面研削盤の機械仕様は、被削材の加工能率の観点のみにより決定されていた。また、研削盤の静剛性と研削比に関する研究論文⁽²⁾や平面研削加工方法と研削抵抗、表面粗さなどに関する研究論文⁽³⁾および研削加工面粗さと材料強度に関する論文⁽⁴⁾については若干発表されているが、研削加工方法および研削盤静剛性と研

削加工面性状に関する研究論文は少ない。

そこで本報では、ファインセラミックスの切残し量および表面性状の観点から平面研削盤設計時に最適機械仕様を決定するための基礎実験を行う。具体的には、まず、ワークテーブル送り速度、切込み深さ、研削加工能率、平面研削盤の静剛性、研削方法の違いなどと法線および接線研削抵抗との関係について明らかにする。次いで、平面研削盤の静剛性、研削抵抗、研削方向とファインセラミックスの加工面性状との関係について検討する。

2. 実験装置

実験に用いたファインセラミックス (Al_2O_3) の機械的性質を表1に示す。使用したファインセラミックスをラップ加工した面と、この面から KOH を用いたエッチングにより不純物(ガラス質)を除去し、結晶体の状態を明らかにした走査形電子顕微鏡 (SEM) 写真を図1に示す。結晶体には粒径 10 μm 以内の結晶粒とボイドがランダムに混在している。

本実験における研削加工条件を表2に示す。平面研削盤は、クリープフィード研削加工用のものでワークテーブルは DC サーボモータによって駆動されている。図2に示すように平面研削盤のワークテーブル上

* 昭和63年7月15日 東海支部浜松地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年10月2日。

*¹ 正員、千葉大学大学院 (〒260 千葉市弥生町1-33)。

*² 正員、千葉大学工学部。

に静剛性の小さなジグを設置することにより、見掛け上の平面研削盤の静剛性（ダイヤモンドホイールとワークテーブル間の静剛性）を変えることができる。ジグを設置する前の静剛性は $37 \text{ N}/\mu\text{m}$ であるが、ジグを設置することにより静剛性は $5 \text{ N}/\mu\text{m}$ になる。

実験中は法線研削抵抗 F_n および接線研削抵抗 F_t の2分力について動力計を用いて検出し、増幅後ペンレコーダに記録している。測定した法線研削抵抗 F_n の方向はファインセラミックスを押し付ける方向を正方向とし、接線研削抵抗 F_t の方向はダイヤモンドホイールが連れ回る方向を正方向とする。

研削加工表面の性状については、SEM 写真を用いて観察し、さらに触針式表面粗さ計を用いて研削加工面の表面粗さを測定した。

実験中ダイヤモンドホイール外周面の性状をできるだけ一定に保つために、研削長が 17 mm と 30 mm の比較的短いファインセラミックス試料を用いて研削加工実験を行った。また、一連の研削加工実験の開始直前には、毎回 GC 砥石を用いたロールドレッサによってダイヤモンドホイールのツルージングおよびドレッシングを行っている。

3. 加工能率一定研削

単位時間あたりの除去量が一定になるように、(ワ

ークテーブル送り速度 v) $\times$ (切込み深さ t) を一定値に設定する研削加工方法を加工能率一定研削と呼び、単位時間・ダイヤモンドホイール単位幅あたりのファインセラミックス除去量を $Z' \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$ で表す。以下に報告する研削実験はすべて加工能率一定研削による。加工能率一定研削を行うことにより、生産量を一定に保ちながら最適研削加工条件を探することができる。また、ワークテーブル送り速度と設定切込み深さの影響を明らかにすることができる。

図3に除去量 $Z' = 50 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$ 、ワークテーブル送り速度 $10 \sim 2000 \text{ mm/min}$ 、切込み深さ $5000 \sim 25 \mu\text{m}$ の研削条件でファインセラミックスをワンパスダウンカット研削した際の、法線研削抵抗 F_n および接線研削抵抗 F_t を示す。

ワークテーブル送り速度 100 mm/min 、設定切込み深さ $500 \mu\text{m}$ 付近で研削抵抗値が大きく変化している。この大きく変化する点を折れ点と呼ぶことにする。図3より、法線研削抵抗 F_n 、接線研削抵抗 F_t ともに折れ点より高速側（高テーブル速度、低切込み側）の研削加工条件ではほぼ一定値を示すが、折れ点より低速側（低テーブル速度、高切込み側）では急激に研削抵抗が上昇する。これを、金属材料を円筒研削加工した際の接線研削抵抗の式⁽⁵⁾

表1 セラミックスの機械的性質

Material	Al_2O_3
Vickers hardness (GPa)	16
Bending strength (MPa)	310
Young's modulus (GPa)	220
Density (g/cm^3)	3.8
Poisson's ratio	0.25
Sintering	Cold press
Aluminium content (%)	97
Fracture Toughness ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	4.5

表2 研削加工条件

Grinding wheel	MD 200/230 RS4V20 ($\phi 180 \times 12.6 \text{ mm}$)
Wheel peripheral speed	1200 m/min
Table speed	10~2000 mm/min
Grinding fluid	Emulsion type (30X)
Static stiffness	$37 \text{ N}/\mu\text{m}$, $5 \text{ N}/\mu\text{m}$
Grinding type	One pass grinding
Depth of cut	$25 \sim 10000 \mu\text{m}$
Length of cut	17 mm, 30 mm
Truing	Roll dresser (GC200G)
Work piece	Aluminium oxide ($17 \times 14 \times 70 \text{ mm}$) ($30 \times 14 \times 70 \text{ mm}$)

(a) ラップ加工面 (b) エッチング面

図1 実験に用いた Al_2O_3 の SEM 写真

図2 実験装置

$$F_t = k_0 B \mu^{-2\epsilon} t^{1-0.5\epsilon} \left(\frac{v}{V} \right)^{1-\epsilon} \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d} \right)^{-0.5\epsilon}$$

ただし $K_s = K_0 \cdot a_m^{-\epsilon}$ (1)
と比較検討する。ただし k_0 は研削抵抗定数, B は研削幅, μ は切れ刃の平均間隔, t は砥石の切込み深さ, v は工作物の送り速度, V は砥石の周速度, D は砥石の直径, d は工作物の直径, a_m は砥粒加工断面積, k_s は比研削抵抗, ϵ は補式に示す定数である。本実験は平面研削加工であるので d は無限大である。2 分力比 F_n/F_t が一定であると仮定し, $v \cdot t$ = 一定であるので, 式(1)は,

$$F = K v^{-0.5\epsilon} \dots\dots\dots (2)$$

で表すことができる。ここで K は定数項である。

ワークテーブル送り速度が折れ点より小さい範囲では, ファインセラミックスの研削加工においてもこの式を満足できる。ただし, 金属材料では, $\epsilon = 0.25 \sim 0.5$ なる値となるが, 本実験では $\epsilon = 1.5$ になった。つまり, 同一切りくず断面積あたりの比研削抵抗は金属材料よりファインセラミックスのほうが大きいことがわかる。

ファインセラミックス研削の場合はいったん脆性破壊が進行し始めると, 小さなエネルギーで加工が進行する。図3より, 折れ点より高速側では $\epsilon = 0$ となり, 式(1)は次式で示される。

$$F = k_0 B \frac{v \cdot t}{V} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)より, $v \cdot t$ は一定であるので, F も一定値になり*, 実験結果とも一致することがわかる。

切残し量の観点から平面研削盤の静剛性について検討すると, 折れ点より低速側で研削加工を行う仕様の

平面研削盤(クリープフィード研削盤)は, ダイヤモンドホイールとワークテーブル間およびワークテーブル送り方向の静剛性を特に高くする必要がある。

接線研削抵抗(水平方向分力) F_t は, 研削弧のほぼ中央を研削点と考え, 研削点におけるホイールの接線方向および半径方向に働く力の水平方向分力の合力により決定される。下向き研削においては, それぞれの分力の方向が異なること, 研削条件によりこれら水平方向の大きさが異なることなどに起因し, その合力として表される接線研削抵抗 F_t の方向が変化すると考えられる。

一般に, 砥石軸駆動馬力 N は次式で与えられる。

$$N = \frac{F_t \times V}{102 \times 60 \times \eta} \dots\dots\dots (4)$$

ただし η は機械効率を示す。

上式より, 折れ点付近の加工条件における研削加工においては, 砥石軸駆動馬力は理論上限りなく小さくてよいことになる。しかし, 砥石軸駆動動力の設計値を求める際には F_n による摩擦力も存在するので必ずしも小さくすることはできない。

折れ点付近で研削加工を行う平面研削盤では, ワークテーブル送り方向の静剛性は低くてもよいが, 接線方向に押付け力がかからないためワークテーブル送り方向のバックラッシュがあってはならない。バックラッシュがあると, ワークテーブル送り方向の振動がおり, ファインセラミックス加工表面にびびりが発生する⁽⁶⁾と言われているが, 図3の結果からも十分に証明できる。そのため, ワークテーブル送り方向の剛性には十分注意して設計する必要がある。

折れ点より高速側の加工条件で研削加工を行う仕様の平面研削盤のほうが研削抵抗が小さく, 切残し量の観点からは有利である。したがって, 折れ点より低速側で研削加工を行う平面研削盤では, 折れ点より高速側の範囲で研削加工を行う平面研削盤と比較して, ダイヤモンドホイールとワークテーブル間の静剛性を高くする必要がある。

以上の結果より, 現在最も一般的に使われているワークテーブル油圧駆動形平面研削盤の油圧回路の設計においては, ワークテーブル送り速度が大きく, 切込みが小さい場合には回路効率がよく, ワークテーブル送り速度を上げやすいメタイン制御回路にしたほうが有利である。逆に, テーブル速度が小さく, 切込みが大きい場合にはテーブル駆動力の大きなメタアウト制御回路にしたほうが有利である。

図4に $Z' = 500 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$ の研削加工条件で,

図3 ワークテーブル送り速度と研削抵抗

*1 討論(4)参照。

折れ点より高速側（切込み深さ $250\ \mu\text{m}$ 、テーブル送り速度 $2000\ \text{mm/min}$ ）と低速側（切込み深さ $10000\ \mu\text{m}$ 、テーブル送り速度 $50\ \text{mm/min}$ ）で研削加工した際のファインセラミックス加工面の SEM 写真を示す。

図 4(a) のワークテーブル送り速度が小さく、研削抵抗の大きな研削条件で加工したほうが塑性流動的表面を呈している。以下、塑性流動的という表現を使用しているのは、実際には研削熱による表面のガラス質化が考えられるからで、今後検討する予定である。この研削条件ではダイヤモンドホイールの切れ刃が小角度で突入するために上滑りを起こしやすい。また、切込みが深いために研削液が入りにくいためにファインセラミックス加工点は高温になる。したがって、ヤング率が下がり塑性流動的表面を呈しているものと思われる。逆にワークテーブル送り速度が大きく研削抵抗の小さな図 4(b) の研削条件で加工したほうが研削加工点での温度が低く、脆性破壊的表面を呈しているものと思われる。

研削表面粗さについては、折れ点より低速側の研削条件で加工したほうが塑性流動的加工表面のために表面粗さが小さくなり、高速側の条件に近づくにつれて脆性破壊的加工表面になるために表面粗さが大きくなる。

4. 除去量と研削抵抗

単位時間・ダイヤモンドホイール単位幅あたりの除去量 Z' が 50 , 500 , $1000\ \text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ の各研削条件になるようにテーブル送り速度および切込み深さを設定してファインセラミックスを研削加工した際のテーブル送り速度と研削抵抗 F_n の関係を図 5 に示す。

図 5 より、除去量 Z' を 2 倍に設定すると法線研削抵抗

(a) $v=50\ \text{mm/min}$,
 $t=10000\ \mu\text{m}$

(b) $v=2000\ \text{mm/min}$,
 $t=250\ \mu\text{m}$

($Z'=500\ \text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, Down cut)

図 4 ワークテーブル送り速度による SEM 写真

抵抗 F_n 、接線研削抵抗 F_t ともに 2 倍になる。つまり、除去量 Z' と研削抵抗の間には比例関係がある*2。

したがって、切残し量の観点から平面研削盤の静剛性について検討すると、ファインセラミックス加工用平面研削盤を設計する際には、設定除去量に比例してダイヤモンドホイールとワークテーブル間の静剛性およびワークテーブル送り方向の静剛性を決定する必要がある。

本実験の範囲内では、除去量 Z' と SEM 写真による表面性状および表面粗さの間には際だった関係は認められない。

5. 平面研削盤の静剛性と研削抵抗

図 2 に示すジグを設置することにより平面研削盤の静剛性を変更して研削加工を行い、平面研削盤の静剛性と研削抵抗の関係を調べる。図 6 に、ファインセラミックスを $Z'=50\ \text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ の研削条件で研削加工した際の平面研削盤静剛性と研削抵抗の関係を示す。

(a) 法線研削抵抗

(b) 接線研削抵抗

図 5 除去量 Z' と比研削抵抗

*2 討論(5)参照。

また、研削加工面の SEM 写真を図 7 に示す。図 7 より高剛性条件で研削加工したファインセラミックス表面のほうが脆性破壊的表面を呈し、低剛性条件で研削加工した表面のほうが塑性流動的である。それは低剛性条件では研削加工中の研削力が平面研削盤によって緩衝されやすく、瞬間的な力がファインセラミックスにかからないために脆性破壊を起こしにくいという理由によるものと考えられる。

図 7 の試料については、静剛性の高い平面研削盤で研削加工するより静剛性の低い平面研削盤で研削加工したほうが表面粗さは小さくなる。これは、上述の低剛性条件で研削加工した場合は塑性流動的表面性状を呈していることから説明できる。

ただし、静剛性の低い平面研削盤では切残し量が大きく、寸法精度を出すことはできない⁽¹⁾。そこで、研削加工条件についても十分な検討を加える必要がある。

6. 上向き研削と下向き研削

上向き研削と下向き研削による研削抵抗の違いを比較するために、 $Z'=50 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$ の研削条件でファインセラミックスを平面研削加工した際の法線研削抵抗 F_n および接線研削抵抗 F_t とワークテーブル送り速度あるいは設定切込み量との関係を図 8 に示す。図 8 に示すように、上向き研削のほうが下向き研削よりは法線研削抵抗 F_n 、接線研削抵抗 F_t ともに大きい。

これは、下向き研削ではダイヤモンドの粒が大角度を持って突入してファインセラミックスを除去しやすくなっているのに比べ、上向き研削では小角度で突入するため上滑り現象を起こしファインセラミックスに

うまく食い込めず法線研削抵抗が高くなっているものと考えられる。

したがって、切残し量と法線研削抵抗の観点からファインセラミックス研削加工用平面研削盤を設計する場合、上向き研削の仕様ではダイヤモンドホイールとテーブル間の静剛性は下向き研削の仕様と比較して高い設計にする必要がある。

さらに、上向き研削および下向き研削によるファインセラミックス研削加工表面の SEM 写真を図 9 に示す。図 9 より加工表面性状については、上向き研削加工した表面のほうが脆性破壊的表面を呈し、下向き研削加工した表面のほうが塑性流動的である。図 8 の研削加工条件において、2 分力比 F_n/F_t については下向き研削では 4.5、上向き研削では 7 で上向き研削のほうが大きくなっている。つまり、上向き研削のほうが脆性破壊しやすく、下向き研削のほうが塑性流動しや

(a) 静剛性 37 N/μm (b) 静剛性 5 N/μm
($Z'=50 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$, $v=2000 \text{ mm/min}$, $t=25 \mu\text{m}$)

図 7 平面研削盤静剛性による SEM 写真

図 6 平面研削盤の静剛性と研削抵抗

図 8 研削方向と研削抵抗

(a) 下向き研削

(b) 上向き研削

($Z'=1\,000\text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, $v=2\,000\text{ mm/min}$, $t=500\text{ }\mu\text{m}$)

図 9 研削方向による表面性状 (SEM 写真)

すい。研削加工面粗さについても上向き研削のほうが大きく、SEM 観察の結果とも一致する。

7. 結 言

(1) ファインセラミックスの加工能率を一定にした平面研削において、法線および接線研削抵抗が急に変化する折れ点が存在する。

(2) (1)の折れ点よりワークテーブル送り速度が低速側（クリープフィード領域）で研削加工したほうが、塑性流動的加工表面を持ち、表面粗さも小さくなる。

(3) (1)の折れ点より高速側（設定切込み量が小さく、テーブル送り速度が大きい側）では法線研削抵抗 F_n および接線研削抵抗 F_t が、ともにほぼ一定値を示す。

(4) (3)の法線研削抵抗および接線研削抵抗の値は、ファインセラミックスの除去量 Z' に比例する。

(5) 平面研削盤の静剛性により、ファインセラミックスの表面性状は異なる。静剛性の高い平面研削盤で研削加工したほうが、脆性破壊的加工表面を持ち、

表面粗さは大きくなる傾向にある。

(6) 上向き研削のほうが下向き研削よりは、研削抵抗が大きい。また、下向き研削では研削条件により接線研削抵抗の方向は変化する。しかし、上向き研削では、接線研削抵抗の方向は常に一定である。

本報では、ファインセラミックスの表面性状を SEM 写真および表面粗さにより評価・検討したが、今後、構造用材料としてのファインセラミックス加工状態を正確に評価するために、ファインセラミックスの破壊強度と研削加工面性状の関係を明らかにしたい。さらには研削加工点温度と研削メカニズムの関係についても検討を行っていきたい。また、塑性流動的表面ができる原因についても検討を加えたい。

最後に、本研究の遂行にあたり各種のファインセラミックス試料をご提供いただいた東陶機器(株)、京セラ(株)、ならびにビトリファイドボンドダイヤモンドホイールをご提供いただいた(株)エフエスケーの各社に厚くお礼申し上げる。また、実験に協力いただいた本学学生 清水 健君および鶴木升義君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 由井・渡部・吉田, 平面研削盤の剛性とファインセラミックスの研削精度に関する研究, 機論, 53-495, C (昭62), 2396.
- (2) 富森, ファインセラミックスの研削加工, 砥粒加工研究会会報, 28-1 (昭59), 1.
- (3) 鄭・稲崎・松井, ファインセラミックスの高効率研削加工に関する研究, 機論, 53-408, C (昭62), 209.
- (4) 拓殖・米屋・井上・久保, AIN 系セラミックス材料の破壊強度(1), 昭和48年窯業協会年会講演要旨集, (昭48), 114.
- (5) 小野, 研削仕上, (昭37), 22, 慎書店.
- (6) Weck, M. and Teipel, K., *Dynamisches Verhalten Spanender Werkzeugmaschine*, (1977), Springer-Verlag KG, Berlin west.

討 論

〔質問〕 稲崎 一郎 (慶応義塾大学理工学部)

(1) 図6の結果に関して 静剛性の相違によって法線研削抵抗が異なるとしているが、図6に示されている切込み深さは真実切込み深さか。もし設定値であるならば、剛性が低い場合に真実切込み深さは小さくなるから、研削抵抗が小さくなるのは当然と思われる。研削抵抗は単位時間当たりの除去量に関係し、機械の剛性には無関係と考えられる。

(2) 表2の研削条件に関して 切込み深さ $10\,000\text{ }\mu\text{m}$ とあるが、研削長さ 30 mm をこの条件で研削した場合、砥石と加工物の接触弧長さは定常に達しない。したがって図3, 6, 8などのクリープフィード領域の結果に疑問が持たれる。

(3) 図3, 8に示されている接線研削抵抗について。接線研削抵抗が負になることはありえない。水平方向研削抵抗の誤りではないか。これに関連し、

3097 ページ右欄 5 行めからの説明文に混乱がみられる。

(4) 3097 ページ左欄 図 3 において高速側では研削抵抗が一定となっているから $\varepsilon=0$ とし、式 (3) を誘導している。したがって式 (3) は実験値と一致するのは当然であり、この表現はおかしくないか。

(5) 3098 ページ左欄 4 章に関して、研削抵抗が除去量と比例関係にあるのは、図 3 によれば高速領域だけである。このことを明記する必要があるか。

〔回答〕 (1) 図に示している切込み深さは設定値である。したがって真実切込み深さに起因する研削抵抗の低下はもちろん含まれる。しかし、図 6 の $25\sim100\ \mu\text{m}$ の設定切込み量に対して静剛性と研削抵抗から計算される切残し量は静剛性の低い研削盤では $1.0\ \mu\text{m}$ 、高い研削盤では $0.8\ \mu\text{m}$ となり、設定切込み量と真実切込み深さの差はほとんどない。ところが、実際の法線研削抵抗は 4 倍の差があるので研削抵抗は平面研削盤の剛性にも関係があると考えられる。

(2) 本文中に説明した研削長さでは、ご指摘のとおり定常に達しない場合がある。したがって本研究で

は（論文中には明記していなかったが）設定切込み深さが $1250\ \mu\text{m}$ 以上の場合にはセラミックスを長手方向にセットし、研削長さを $70\ \text{mm}$ に設定して定常接触長さでの実験を行っている。

(3) 本論文において、接線研削抵抗 F_t の方向は研削送り方向と水平方向を示すことを図 2 で定義している。したがって接線研削抵抗が負の値になることもある。ご指摘のように『水平方向の研削抵抗』という表現のほうがより適切な定義であると思う。

(4) 本論文では、 ε の値を導く過程で図 3 の実験結果を使っている。ご指摘のとおり、『実験結果とも一致する』という論文中の表現は不適切であったので訂正させていただく。

(5) 図 3 は除去量一定条件での実験結果だから、研削抵抗と除去量の関係についてはわからない。また、図 5 のテーブル低速領域では切込み深さがあまりにも大きくなってしまい、特に Z' が大きい条件下では現実的でなくなるので、本実験におけるテーブル送り速度は $600\ \text{mm/min}$ 以下に設定した。