

ぜい性材料の精密加工における加工条件と評価技術の確立

——ラッピング加工による加工条件と表面形状等について——

藤原 和徳・大柴 勝彦・上野 正雄

Machining Conditions and Evaluation in Precision Machining for Brittle Materials

——Lapping Conditions, and Characteristics of Grinding Surface——

Kazunori FUJIHARA, Katuhiko OSHIBA and Masao UENO

要 約

現在、県内企業で行われているセラミックスの加工は、加工精度の要求がますます高くなり、それらを満たすために試行錯誤を繰り返しながら行っているのが実状である。

そこで、県内企業で多く使用されている両面ラッピング加工機を用いて、基本的加工条件の検討をGC砥粒により行った。

- (1) GC砥粒を用いてアルミナセラミックスのラッピング加工を行う場合、砥粒濃度を10%以上にすることにより、表面粗さの向上が図れた。
- (2) 加工面のSEM観察結果から、加工の形態としては砥粒平均径が4 μm 以下でしかも砥粒濃度が高いほどぜい性破壊から塑性活動による加工が支配的となる。
- (3) 表面粗さの波形成分の解析から、砥粒平均径が小さく砥粒濃度が高くなると表面粗さのうねり成分が減少することが確認できた。

1. 緒 言

近年、ぜい性材料（セラミックス等）は精密機器、電子機器等の主要部品として広く使用され、その使用状況は年々増加しており、平成4年度に実施した『機械加工に係わる実態調査』¹⁾の結果からも山梨県内の中小企業において、ぜい性材料の加工に関心の高いことが伺える。

しかし、ぜい性材料は、一般に硬くて脆い性質から加工には困難を伴うが、一方要求加工精度は高くなるばかりである。現在、県内企業では要求加工精度を満たすために試行錯誤を繰り返しながら行っているのが実状であり、関連業からは、高精度の仕上げ面を能率的に得る方法、さらに鏡面加工技術を確立していくための基礎データ及び表面観察に基づく評価技術を強く要望されている。

そこで本研究は、ぜい性材料の仕上げ加工を行うための技術的条件を確立する一助として両面ラッピング加工機を用い、様々な粒径について砥粒濃度を変え加工を行ったときの加工量と表面粗さ等について検討を行った。

2. 実験方法及び加工条件

2-1 実験方法

本実験に用いたアルミナセラミックス (Al_2O_3) は一般に市販されている材料を使用し、 $15 \times 15 \times 5 \text{ mm}$ に切り出し、表面粗さは3 $\mu\text{m Ra}$ に仕上げ実験試料とした。その特性

を表1に示す。砥粒としてはGC砥粒 (SiC) を用い、砥粒平均径としては30 (#400), 14 (#800), 8 (#1500), 4 (#3000), 2 (#6000) 及び1.2 μm (#8000) の6種類を用いた。

また、これら砥粒を5, 10及び30vol%の砥粒濃度とするため水道水と防錆剤とで調整した。

表1 アルミナセラミックスの特性

含有率 (%)	99.5~99.9
密度 (g/cm^3)	3.9~4.0
硬度 (MPa)	176~186
破壊靱性 ($\text{MN/m}^{3/2}$)	3.5~4.5
弾性率 (GPa)	2.9~3.9
粒 径 (μm)	1~10
見かけ気孔率 (%)	<1

実験の方法としては、ホフマン型遊星方式ラッピング盤 (2 way : 鋳鉄ラップ) を使用し、加工量及び表面粗さを中心に加工実験を行った。図1に加工実験の流れを示す。

各砥粒とも加工量は、ラッピング加工を行う前の試料の厚さと30分間加工後の試料の厚さ及び60分間加工後の試料の厚さを測定し単位時間当たりの加工量を算出した。また、

60分間加工後の試料表面を接触式表面粗さ計及び非接触式三次元表面粗さ計にてほぼ試料の中央を2カ所測定し、表面粗さ及び表面粗さの波形成分の解析を行った。なお走査型電子顕微鏡にて60分間加工後の表面観察も併せて行った。

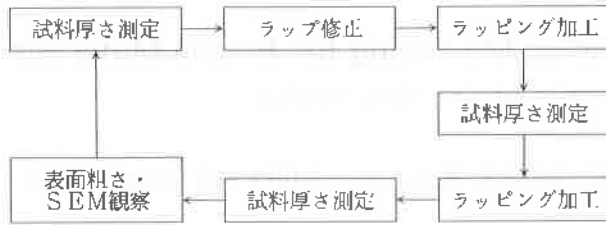


図1 ラッピング加工実験の流れ

2-2 加工条件の設定

砥粒供給量、加工時間及び試料公転数による表面粗さと加工量の変化の検討を行い、本実験の加工条件を以下のように設定した。

砥粒供給量を決定するため、平均径 $30\mu\text{m}$ の砥粒を用いて、砥粒の供給量を5、10及び $15\text{ml}/\text{min}$ に増加させ加工を行った結果、加工量に大きな変化は認められなかったため砥粒供給量は中央値の $10\text{ml}/\text{min}$ とした。また加工時間と表面粗さの関係を図2に示す。加工時間の決定方法として、通常の加工方法であると、表面粗さが一定(図2)になった時間が分かりづらい。そこで、あらかじめ試料表面を砥粒平均径 $4\mu\text{m}$ で仕上げ、その後大きい砥粒平均径 30 及び $8\mu\text{m}$ で10分毎に40分間加工を行い、その都度表面粗さを測定し加工時間の決定を行った。砥粒平均径 $30\mu\text{m}$ の場合加工開始10分間で、また砥粒平均径 $8\mu\text{m}$ の場合は約20~30分間で表面粗さの値に変化が認められなくなった(図2)ため加工時間を30分間とした。

さらに、砥粒平均径 $4\mu\text{m}$ 、砥粒濃度10%及び砥粒供給量 $10\text{ml}/\text{min}$ の条件で行った場合の試料の公転数と加工量の関係を図3に示す。加工量は、試料公転数が26($11\text{m}/\text{min}$)から41($17\text{m}/\text{min}$)回転に速度が増すと急激な増加を示すが、それ以降はあまり大きな増加は示さない。

また、表面粗さは試料の公転数が速くなるに従い若干の減少傾向を示すが大きな変化は認められなかったため、試料の公転数を41回転とした。

3. 結果及び考察

3-1 砥粒平均径及び砥粒濃度と加工量

前実験の結果から砥粒の供給量を $10\text{ml}/\text{min}$ 、試料公転数を41回転とし、砥粒平均径 $30\mu\text{m}$ から $1.2\mu\text{m}$ まで6段階にわたり加工を行った場合の各砥粒平均径における加工量を図4に示す。

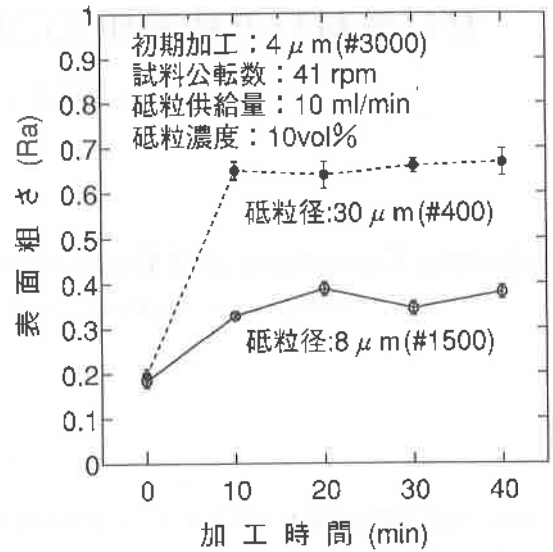


図2 加工時間と表面粗さの関係

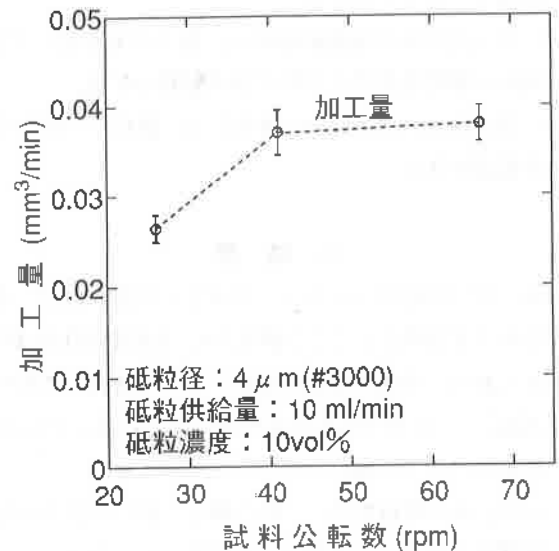


図3 試料公転数と加工量の関係

砥粒平均径が小さくなるに従い加工量は減少し、砥粒平均径が2及び $1.2\mu\text{m}$ になると $0.02\text{ml}/\text{min}$ 以下となり、試料の除去は極端に少なくなる。また、砥粒濃度を変えた場合の加工量は、砥粒平均径が $30\sim 14\mu\text{m}$ では、砥粒濃度5%が最大値を示し10%、30%の順で小さくなり、砥粒濃度が低いほど加工量は大きくなる傾向を示したが、砥粒平均径が $8\mu\text{m}$ 以下の条件では砥粒濃度の差は余りない。

図から加工量を砥粒平均径 $30\sim 14\mu\text{m}$ 、 $14\sim 4\mu\text{m}$ 及び $4\sim 1.2\mu\text{m}$ の3段階に分けることができる。

砥粒平均径が $30\sim 14\mu\text{m}$ の場合は、比較的大きな径であり、加工に作用する砥粒数は少なく、そのため各砥粒の受け持つ平均圧力は大きく、砥粒がセラミックスへ食い込む量が大きくなり加工量も大きくなる。砥粒濃度が高い場

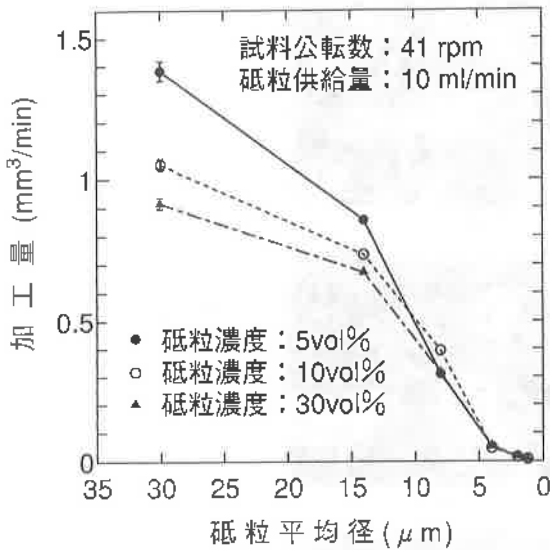


図4 平均砥粒径と加工量の関係

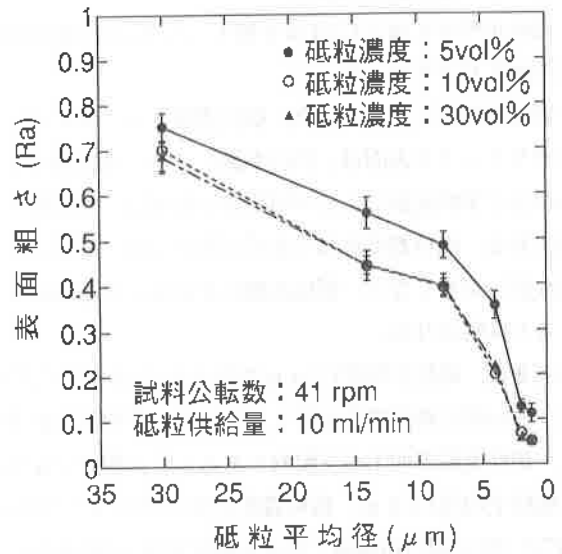


図5 砥粒平均径と表面粗さの関係

合には砥粒同士の干渉³⁾による影響で加工量が小さくなったと考えられる。

また、砥粒平均径が14~4 μmの場合、加工量が急激に減少しているが、これは、砥粒平均径が小さくなるに従い砥粒の受け持つ平均圧力が小さくなり、亀裂を発生させる以前に砥粒がすべり運動を起こし塑性流動が優先的に生じ²⁾ていると推察される。

砥粒平均径が4~1.2 μmになると加工量はさらに減少するが、大きな変化は認められなくなる。これは、前述の平均圧力がさらに小さくなり、除去深さは砥粒が食い込む量以上とならず塑性流動が支配的²⁾となったためと推察される。

3-2 砥粒平均径及び砥粒濃度と表面粗さ

砥粒平均径30 μmから1.2 μmまで6段階の加工を行ったときの表面粗さの変化を図5に示す。

砥粒濃度10及び30%で加工を行った場合、ほとんど同じ表面粗さで加工が進行し、砥粒平均径が小さくなるに従い表面粗さは小さくなり1.2 μmの砥粒平均径で0.05 μm Raを示した。

しかし、砥粒濃度5%の場合、砥粒濃度10、30%のときと比較し表面粗さは、全般的に0.1 μm程度大きい値を示し、砥粒平均径1.2 μmで約0.1 μm Raと2倍の値となり、砥粒濃度が低いと表面粗さが大きくなることが明らかとなった。これは、同じ大きさの砥粒平均径を用いて砥粒濃度を変えて加工を行ったとき、砥粒濃度が低い方が砥粒数が少ないため、各砥粒が試料に働く圧力が高くなり、ぜい性破壊が起こりやすくなる。

また、砥粒濃度が10及び30%の場合に表面粗さが5%と比較し値が小さくなるのは、各砥粒の試料に働く圧力が低

いので、砥粒の食い込み量が少なくなり表面粗さが小さくなることと、砥粒濃度が高いために、砥粒同士の干渉によるものと考えられる。

このように、表面粗さの向上を図る場合には、ぜい性破壊から塑性流動の加工形態で行わなければならない。そのためには、砥粒平均径の小さいもので、砥粒濃度を10%以上にし加工表面に作用する砥粒数を多くする必要がある。

3-3 表面粗さの波形成分の解析

各砥粒で加工を行ったときの表面粗さの波形成分の解析を行った結果を図6に示す。

解析結果の横軸は、表面粗さ曲線の波長を、また縦軸は、その振幅を表している。

砥粒平均径4、2及び1.2 μmの砥粒を用いて、砥粒濃度5、10及び30%で加工した場合、砥粒平均径が小さくなるに従い長い波長の振幅が小さくなり、加工表面が平坦化されていくことが確認できる。また、砥粒濃度が高くなるに従い、長い波長の振幅が小さくなる傾向が認められた。この結果から高い砥粒濃度で加工すると、うねり成分が減少し平面度の向上が確認できる。

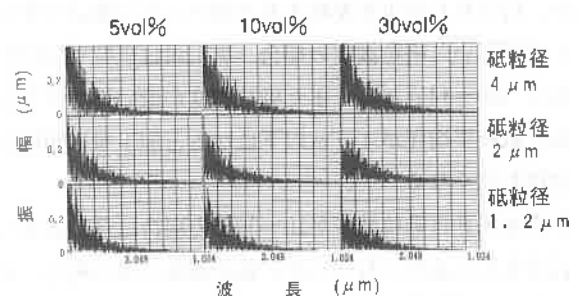


図6 表面粗さの波形解析

3-4 加工表面の観察

砥粒平均径4及び1.2 μm で加工した場合のSEM観察結果を図7及び8に示す。

砥粒平均径4 μm の場合、砥粒濃度5% (a) で加工したセラミックス表面は、凹凸が激しくぜい性破壊による凹み部分と塑性流動による平坦化された部分とが混在した状態である。砥粒濃度が高くなるに従い (図7-b, c) 平坦な部分が多くなり、塑性流動による加工が中心になってくると推察される。

図8は、砥粒平均径1.2 μm で加工した場合を示すが、図7と同様に砥粒濃度が高くなるに従い平坦部分が多くなり、塑性流動の加工が支配的であることが確認できる。

砥粒平均径1.2 μm 、砥粒濃度10%で加工した加工面のAFM (原子間力顕微鏡) による測定結果を図9に示す。(a)の測定場所は、図8 (10Vol%) の平坦な部分と溝部分の両方が含まれる場所を測定した結果であり、図中の細いすじは、砥粒がランダムに走った跡と考えられる。また、溝の深さは約400nm程度であること、表面粗さは約70nm Raであることも同図の断面曲線から確認できた。

(b)は(a)の中央平坦部を拡大した図であるが、100nm以下の溝部分と平坦部分とで構成され、測定面全面に微少な突起物が無数確認できる。

(c)は加工表面の平坦部分をさらに拡大した時の図であるが数10nmの表面うねりに加えて、10nm以下の極めて微少な突起が確認できる。この微少な突起が生成された原因として、アルミナセラミックスを焼結する際に微量のMgO、Fe₂O₃等が添加されることが考えられる⁹⁾。このような添加物が加えられるとAl₂O₃の粒界領域にMgAl₂O₄ (スピネル) の偏析が起き粒界の硬化が現れる場合のあることが報告⁹⁾されている。本実験の場合とはMgOの含有量が異なるが、もし同様な現象が起きたと考えるとこの粒界が硬化した部分が、ラッピング加工の際に微少な突起として残ったものと推察される。

4. 結 言

アルミナセラミックスのラッピング加工について検討を行い、得られた結果を要約すると次のことが確認できた。

- 1) 今回用いた砥粒濃度の場合、加工量は砥粒平均径が大きく (30~14 μm)、また砥粒濃度が低いほど大きくなる。砥粒平均径が4 μm 以下になると加工量に明確な差は現れなくなる。
 - 2) 表面粗さは砥粒濃度が10~30%の場合には、顕著な差はほとんど認められないが、砥粒濃度5%の場合、前者と比較し全体的に大きい表面粗さを示す。
- 表面粗さを向上させたい場合、砥粒濃度を10~30%に

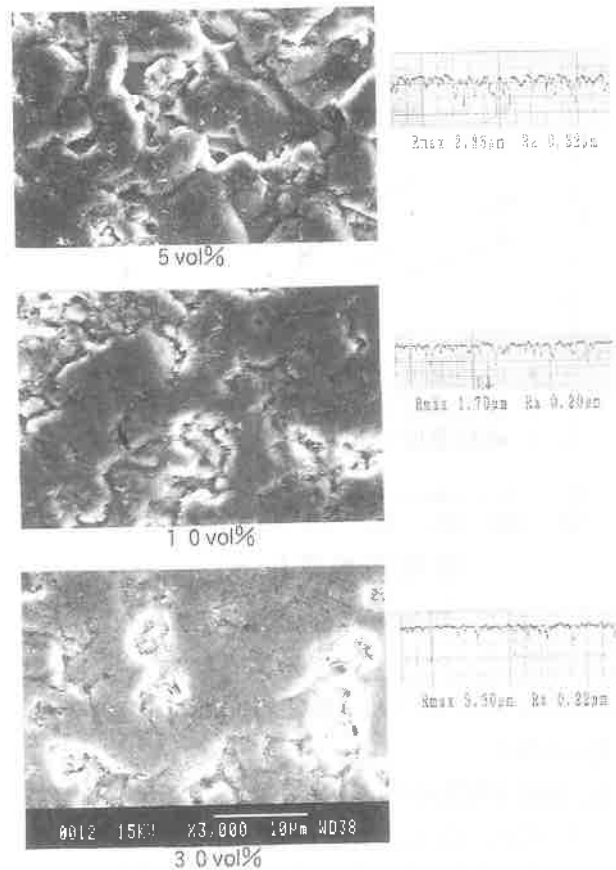


図7 加工面のSEM観察 (砥粒平均径4 μm)

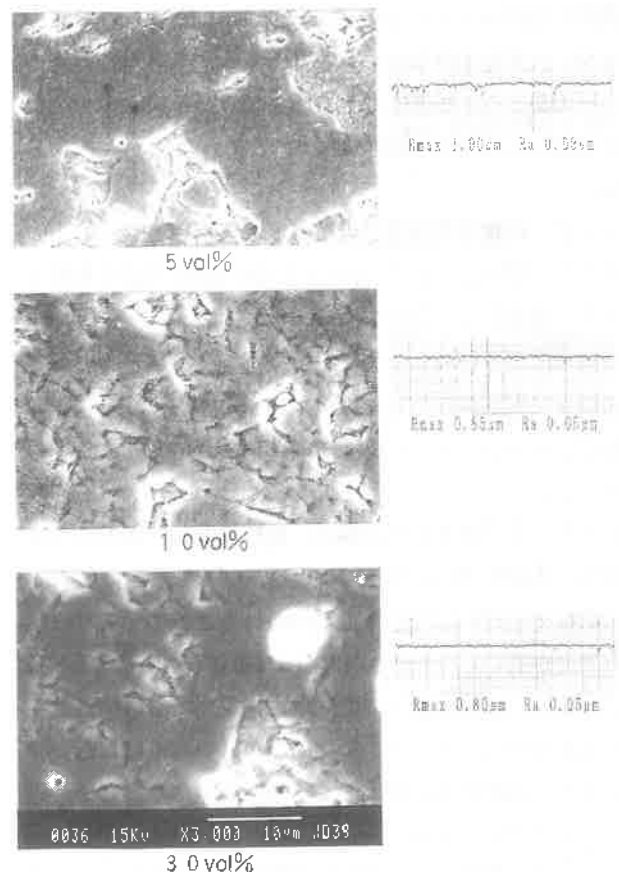
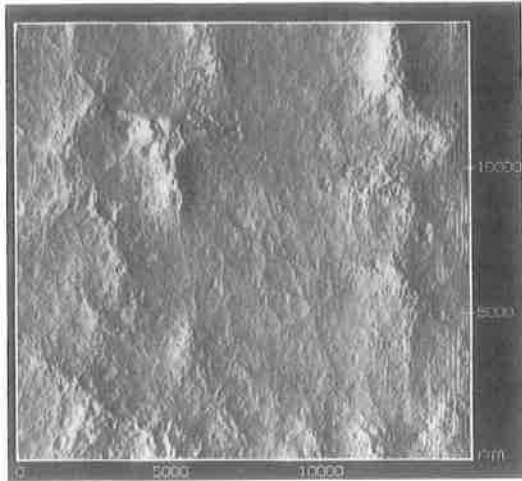
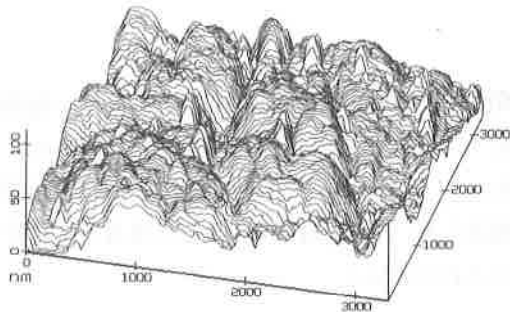


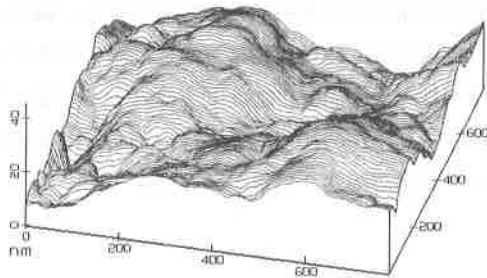
図8 加工面のSEM観察 (砥粒平均径1.2 μm)



(a) 砥粒平均径 $1.2\mu\text{m}$ による加工面



(b) (a)の中央部分の拡大



(c) 砥粒平均径 $1.2\mu\text{m}$ による加工面

図9 加工面のAFM観察(砥粒平均径 $1.2\mu\text{m}$)

調整する必要がある。

- 3) 表面粗さの波形成分の解析から砥粒平均径が小さく、砥粒濃度が高くなると表面粗さのうねり成分が減少する。
- 4) 加工表面のSEM観察結果から、加工の形態としては、砥粒平均径が $4\mu\text{m}$ 以下で、しかも砥粒濃度が高いほどぜい性破壊から塑性流動による加工が支配的となる。

最後に、本実験を行うに当たり、山梨大学工学部機械システム工学科吉岡助教授にご助言をいただき、またAFMの測定を行うに当たり同科岡田教授、走査型電子顕微鏡観察を行うに当たり当センター機械金属科にご協力を頂きました。ここに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 藤原和徳, 大柴勝彦, 岩間貴司, 佐野正明: 山梨県内企業における機械加工の実態調査報告, 山梨県工業技術センター研究報告, 7, 130 (1993)
- 2) 杉田忠彰: セラミックスの機械加工, 養賢堂, 146
- 3) 今中 治: 無機材料の精密加工方(7), 機械の研究, 19, No.11 (1967), 71
- 4) 日本セメント(株): 技術データから
- 5) ニューセラミックス懇話会編: ニューセラミックス(材料とその応用) 日刊工業新聞社, 48