研 究

ファインセラミックスのホーニング加工*

—ダイヤモンド砥粒のじん性が切削性能に及ぼす影響—

上 田 隆 司** 花 見 真 司*** 山 本 明**

Effective Machining of Fine Ceramics by Honing
—Influence of Toughness of Diamond Grain
on Honing Performance—

Takashi UEDA, Shinji HANAMI
and Akira YAMAMOTO

Influence on honing performance is investigated about grain's toughness and operating conditions such as honing speed, crosshatch angle and honing fluid. Workpieces are three types of ceramics sintered under atmospheric pressure, that is, silicon nitride Si_3N_4 , silicon carbide SiC and alumina Al_2O_3 . Moreover, some discussions are had to confirm how effective the honing operation is for machining of ceramics. The results are as follows. Influence of grain's toughness on its cutting ability

is a little for Al_2O_3 with good machinability. But, for SiC and Si_3N_4 with poor machinability, diamond grains having high toughness should be used. In order to restrain the wear of cutting grains, the honing speed and the stone pressure should be decreased. The large crosshatch angle makes it possible to obtain high productivity, because the cutting edges collide against cutting tracks with a large angle. The characteristic and the temperature of the honing fluid are important factors to use diamond sticks effectively.

Key words: ceramic honing, silicon nitride, silicon carbide, alumina, diamond grain's toughness, honing performance, honing fluid, specific cutting force.

1. 緒 言

近年、新しく開発されたファインセラミックスはダイヤモンド砥石を用いた研削加工によって機械加工される場合が多い(1)~(6)、緻密に焼結された Si_3N_4 や SiC の加工に対しては生産性、経済性などの点で多くの問題点をもっている。また、砥粒切れ刃が断続的に加工表面に高速で衝突するため、表面には微小なクラックが残るといわれている。

これに対し、ホーニング加工では、その切削速度が低速であることからダイヤモンド砥粒に悪影響を及ぼす発熱が小さいこと、回転速度と往復速度の比を変えることによって加工条痕に対する切れ刃の衝突角を変化できること、などによって加工能率を大きく向上させることも可能と考えられる。ところで、この切削方式で加工が行われるためには、砥粒切れ刃が加工物に食い込まなければならない。この量は砥石押付け力、切れ刃数、切れ刃形状のほか、砥粒と加工物の硬度差やじん性の違いに依存する。

* 原稿受付 昭和59年1月30日。昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和58年10月14日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町1-1)

*** 大阪大学基礎工学部

そこで本研究では、ダイヤモンド砥粒のじん性が切削性能に及ぼす影響を調べるとともに、ホーニング加工の有効性について考察してみた。また、ホーニング速度、交差角、加工液といった加工条件の影響についても検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 加工材料、ダイヤモンド砥石、加工液

加工材料には緻密で複雑な形状物を製造可能な常圧焼結法によって焼結されたアルミナ、窒化けい素、炭化けい素(長さ100mm、外径47mm、肉厚11mmの円筒形状、日本特殊陶業(株)製)を使用した。メーカーより提供を受けた特性値を表1に示す。密度、曲げ強さ、破壊じん性、硬度などは文献(7)(8)にあるものと差がないことから、これらの材料はセラミックスとして適切な性質を

Table 1 Characteristics of ceramics used

Type of ceramic		Si_3N_4	SiC	Al_2O_3
Density	g/cm ³	3.26	3.12	3.7
Bending strength	R. T.	736	441	343
	1200°C	392	441	—
Fracture toughness K_{IC}	N/mm ^{3/2}	191	152	122
Hardness HRA		91	95	87
Elastic modulus	10 ⁴ MPa	32	43	—
Thermal conductivity	R. T. 10 W/m·K	1.26	5.73	1.84
Thermal expansion coefficient	10 ⁻⁶ /°C	3.81	4.6	7.9
Thermal shock resistance	ΔT °C	480	280	180

Table 2 Synthetic diamond grain

Diamond grain	Grain size designation	Toughness
MBS 70-T	60/80	65
MBS-T	60/80	53
EBG	60/80	8

Fig. 1 Shape of synthetic diamond grains

備えているものと判断できる。

使用した人造ダイヤモンドは表2に示すじん性の異なる3種類の砥粒で、その形状は図1のようである。表2のじん性はボールミル法で測定しており、この値が大きいほどじん性が高い。EBGは天然ダイヤモンドに近いじん性を持ち、これらの中で最も小さい値を示す。また、図1に見るように、細長い破片状で鋭い切れ刃をもっている。一方、MBS 70-Tはブロック状の形状をしており、じん性値は大きい。これらの砥粒を用いて砥粒密度0.2 mg/mm²、長さ50 mm、幅3 mmのニッケル電着砥石（瑞穂研磨砥石(株)製）を作った。以後、これらの砥石をそれぞれMBS 70-T 砥石、MBS-T 砥石、EBG 砥石と呼ぶことにする。

セラミックス加工に適切な加工液に関してはいまだ定

説がないため、本研究では日本グリース(株)製のソリュ—ブル系(JIS W 2, サンライト MC-10), およびソリュ—ジョン系(旧 JIS W 3 相当, サンクール GF-100)の2種類の研削液を用いてみた。W 2は40倍, W 3は50倍の希釈液とし、冷却装置で液温を一定に保った。加工に使用した液は化学実験用濾紙で濾過し、切りくず、砥粒粉を完全に除去した。

2.2 実験装置, 実験条件

実験は文献9)と同様の装置を用いて、一定圧力を加えた1本の砥石で加工材料の円筒外面を仕上げる方法で行った。この方法によれば、砥石に作用する切削抵抗を正確に測定できるだけでなく、生産機では4~6本必要とする砥石を1本ですますことができ、それだけ広範囲の条件で実験することができる。切削抵抗接線分力 $\bar{F}_t$ は砥石ホルダ部分に装置した弾性リングで切削抵抗回転方向成分 F_{ti} およびストローク方向成分 F_{ts} を測定し、 $\bar{F} = \sqrt{F_{ti}^2 + F_{ts}^2}$ で求めた。切削量は加工前後の加工材料の直径変化量を電気マイクロメータで、また、砥石作業面のプロファイルは作業面に接触させた電気マイクロメータピックアップを一定速度で移動させて測定した¹⁰⁾。

実験条件はホーニング速度 $\bar{V}=30\sim90$ m/min, 交差角 $2\theta=5\sim30^\circ$, ストローク $S=70$ mmであり、オーバーラン a は加工物端のチップングを防ぐため炭素鋼など金属加工の場合に比べて10 mmと小さくしてある。

3. 実験結果

3.1 砥粒じん性の影響

図2はホーニング速度 $\bar{V}=90$ m/minにおける加工例で、砥粒のじん性値が大きく異なる2つの砥石を比較している。 τ は加工時間、 δR は加工材料半径減少量、 $\bar{F}$ は切削抵抗接線分力である。 Al_2O_3 ではいずれの砥石もす

Fig. 2 Influence of toughness of diamond grain
 $\bar{V}=90$ m/min, $2\theta=5^\circ$, $P_n=890$ kPa, W 3 (20°C)
 ○; MBS 70-T, ●; EBG

Table 3 Machinability of ceramics

Ceramic type	Diamond grain	Honing conditions			Results			
		P_n kPa	$\bar{V}$ m/min	2θ deg	Measured		Calculated	
					$\bar{F}$ N	$d(\delta R)/d\tau$ 10^{-5} mm/s	k_s MPa	$\bar{d}$ 10^{-3} μ m
Si ₃ N ₄	MBS 70-T	840	90	5	15.0	6.8	22 400	13.8
	EBG	840	90	5	12.0	4.0	30 700	8.1
	MBS 70-T	950	30	20	20.0	4.3	15 900	26.4
	EBG	950	30	20	16.0	3.9	14 000	23.9
SiC	MBS 70-T	940	90	5	22.0	3.3	67 700	6.7
	EBG	940	90	5	24.0	2.5	97 500	5.1
	MBS 70-T	670	60	5	14.0	2.7	35 100	8.2
	EBG	670	60	5	19.5	2.8	47 200	8.5
	MBS 70-T	880	30	20	25.5	1.5	58 000	9.2
	EBG	880	30	20	26.0	1.3	66 700	8.2
Al ₂ O ₃	MBS 70-T	890	90	5	16.5	37.5	4 610	73.8
	EBG	890	90	5	14.0	25.0	5 940	48.6
	MBS 70-T	860	30	20	18.0	26.7	2 410	156.4
	EBG	860	30	20	30.0	31.7	3 380	185.4

くれた切削性を示すが、砥粒じん性の大きい MBS 70-T 砥石の方がまざっている。これに比べ、ほかの 2 つの材料では被削性が悪く、 δR は約 1/10 に低下している。Si₃N₄ のとき、MBS 70-T 砥石は加工が進行しても切れ味は低下せず、コンスタントに切削している。しかし、砥粒じん性の小さい EBG 砥石では加工初期によく切削しているものの、加工進行と共に切れ味が低下してしまう。硬度が最も高い SiC になると、いずれの砥石も加工直後から切れ味が低下してしまい、切削がほとんど行われていない。

これらの結果から、 δR の傾き、すなわち加工材料半径減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ と切削抵抗 $\bar{F}$ を求め、文献(11)における式(11)、(19)に代入して比切削抵抗 k_s 、および切込み深さ $\bar{d}$ を求めてみた。その結果を表 3 に示す。 P_n は砥石圧力、 $\bar{V}$ はホーニング速度、 2θ は交差角である。 $\bar{d}$ は切削量を一般的な形で表した値とみなすことができ、 k_s は加工材料を切削するために必要な単位面積当たりの力である。寸法効果をもつ k_s は切込み深さが同一のもとで比較されるべきであるが、ここでは同一加工条件で加工した場合の値を比較することにする。被削性の悪い材料ほど、また切れ味の悪い砥石ほど $\bar{F}$ は大きく、 $d(\delta R)/d\tau$ は小さくなるから、前述の式(11)、(19)にみるように k_s は大きくなり、同時に $\bar{d}$ は小さくなる。したがって、 k_s や $\bar{d}$ は加工材料の被削性や砥石の切削性の比較尺度となる。

表 3 において、 $\bar{d}$ は Al₂O₃、Si₃N₄、SiC の順に小さくなり、 k_s はこの順に大きくなっている。特に、SiC は Al₂O₃ に比べ値が 1 けた以上異なっており、被削性が

非常に悪いことがわかる。また、これら k_s の値は研削加工の場合(12)~(14)に比べるとはるかに小さく、セラミックス加工にホーニングが有利な手段であることが推察できる。

砥粒のじん性の影響をみると Si₃N₄ の場合、 $\bar{V}=90$ m/min と高速のとき、MBS 70-T 砥石の方が $\bar{d}$ が大きく k_s が小さいことから、じん性の大きい砥粒が有利といえる。しかし、 $\bar{V}=30$ m/min と低速になると両者の差はほとんどなくなる。SiC でも MBS 70-T 砥石の方が切れ味はよいが、全体的に $\bar{d}$ が小さく加工はあまり行われていない。しかし、 $P_n=670$ kPa と砥

石圧力が小さくなると k_s が小さくなることから、この材料に対しては砥粒切れ刃の消失を抑えるために P_n を小さく設定するなど加工条件の工夫が必要といえる。Al₂O₃ になるといずれの砥石も切れ味がよいが、MBS 70-T の方がすぐれていることがわかる。

3.2 砥石作業面，加工物仕上面

図 3 は Al₂O₃ を加工したときの砥石作業面プロフィールの変化を追ったものである。砥粒じん性の低い EBG 砥石では加工初期に砥粒が大きく脱落し、以後細かい破砕が進んでいる。これに対し、砥粒じん性の高い MBS 70-T 砥石では初期に少し破砕する砥粒はあるが、以後

Fig. 3 Change of profile of stick surface as honing proceeds
 $\bar{V}=90$ m/min, $2\theta=5^\circ$, $P_n=890$ kPa, W 3

After honing After grinding After turning
Fig. 4 Comparison of work surface machined by various methods

Table 4 Influence of crosshatch angle

2θ deg	Results			
	Measured		Calculated	
	$\bar{F}$ N	$d(\delta R)/d\tau$ 10^{-5} mm/s	k_s MPa	$\bar{d}$ 10^{-3} μ m
5	9.5	6.5	5 020	38.9
10	9.5	7.5	4 370	45.0
20	9.5	7.5	4 340	45.8
30	7.5	8.8	2 970	53.8

$\bar{V}=30$ m/min, $P_n=610$ kPa, W 3, Al_2O_3 , MBS-T

Table 5 Influence of honing speed

$\bar{V}$ m/min	Results			
	Measured		Calculated	
	$\bar{F}$ N	$d(\delta R)/d\tau$ 10^{-5} mm/s	k_s MPa	$\bar{d}$ 10^{-3} μ m
30	15.0	3.5	14 700	21.0
50	12.5	2.6	27 800	9.3
70	14.0	3.8	30 000	9.6
90	18.0	2.3	82 602	4.5

$P_n=970$ kPa, $2\theta=5^\circ$, W 3 (1° C), Si_3N_4 , MBS-T

はほとんど変化しておらず、砥粒が十分働いていることがわかる。なお、被削性の悪い SiC になると、EBG 砥石では加工初期に多数の砥粒が脱落して失われてしまい、加工はほとんど行われなくなってしまう。

図 4 はホーニング加工後、研削加工後、旋削加工後の Si_3N_4 の表面を比較している。研削加工面や旋削加工面にはそれぞれ砥粒及びバイトによる平行な切削条痕が入っているのに対し、ホーニング加工面にはこの加工法特有のクロスハッチ状の切削条痕が付いている。

3.3 交差角, 切削速度の影響

表 3 の結果では、いずれの砥石でも交差角が大きく切削速度が低速の場合に切削性のはるかによくなっている。そこで、これらの影響を詳しく調べてみた。

表 4 は交差角 2θ を $5\sim 30^\circ$ に変化させた結果である。

2θ が大きくなるに従い $\bar{d}$ が大きく k_s が小さくなっており、砥石の切削性が大きく向上している。これは 2θ を大きくするほど加工条痕に対する砥粒の衝突角が大きくなり、加工物表面突起が破壊しやすくなるためと考えることができる。

表 5 はホーニング速度の影響を調べた結果である。一般に炭素鋼などの金属加工では、ダイヤモンドやボラズンといった超砥粒砥石の切削性

能を十分引き出すためには、少なくとも 60 m/min 以上の高速で使用するべきであるといわれている¹⁰⁾。しかし、表 5 より硬度が高く難加工材料であるセラミックスに対しては、砥粒の摩耗を極力抑えるために低速で加工すべきであることがわかる。

3.4 加工液の影響

セラミックスは熱的、化学的に安定であり、また、ホーニング加工は研削加工に比べて低速加工であるため発熱量も少ない。したがって、加工液の主な働きは、砥粒切れ刃の逃げ面と加工表面との摩擦の低減、砥粒切れ刃の冷却、および切りくずの除去が考えられる。これらのうち、先の 2 つに関してはセラミックス表面と加工液の親和性（ぬれ）などの影響も考えなければならないが、ここでは 2 種類の加工液を用い、加工液が切削性能にどの程度影響を及ぼすかを調べてみた。

図 5 はその加工例であり、液温を 25°C 、および 1°C と一定に保ち、液温の切削性能への影響も合わせて調べている。(a) は SiC を加工して W 2 と W 3 の働きを比較している。W 2 の δR の傾きのはるかに大きくなっているが、次第に飽和する傾向にあり、加工が進むと砥石の切れ味は低下している。(b) は Si_3N_4 を W 3 で加工した場合の液温の影響を調べているが、 1°C における δR の傾きのはるかに大きく、冷却した効果がよく現れている。

3.1 節と同様、これらの実験結果から δR の傾き（すなわち、 $d(\delta R)/d\tau$ ）と $\bar{F}$ を求め、比切削抵抗 k_s 、切込み深さ $\bar{d}$ を求めた結果を表 6 に示す。 k_s が小さく、 $\bar{d}$ が大きいほど加工に大きく寄与していると判断する。表より明らかなように、 Si_3N_4 の加工には W 3 を冷却して用いるか、W 2 を室温で用いるのが有利である。これに対し、SiC は W 2 を室温で用いればよく、W 3 を冷却して用いても Si_3N_4 の場合ほど効果はない。

4. 結 言

Si_3N_4 , SiC, Al_2O_3 といったファインセラミックス

Fig. 5 Influence of coolant
 $\bar{V} = 30$ m/min, $2\theta = 20^\circ$

Table 6 Influence of coolant

Ceramic type	Coolant	Temp. °C	P_n kPa	Results			
				Measured		Calculated	
				$\bar{F}$ N	$d(\Delta R)/d\tau$ 10^{-5} mm/s	k_s MPa	$\bar{d}$ 10^{-3} μm
Si ₃ N ₄	Solution type (W 3)	25	830	16.0	2.71	20 200	16.6
		1	830	15.0	3.21	16 000	19.6
		25	1 200	21.0	1.92	37 500	11.7
		1	1 200	21.5	3.83	19 300	23.3
	Soluble type (W 2)	25	850	17.5	2.75	21 800	16.8
		1	850	16.0	1.63	33 600	9.9
SiC	W 3	25	850	25.5	1.17	74 300	7.2
		1	850	22.5	1.13	67 900	6.9
	W 2	25	820	23.0	2.17	36 100	13.3
		1	820	25.0	2.46	34 600	15.1

$\bar{V} = 30$ m/min, $2\theta = 20^\circ$, MBS-T

をホーニング加工し、ダイヤモンド砥粒のじん性がその切削性に及ぼす影響を調べるとともに、ホーニング速度、交差角といった加工条件や加工液などの影響についても検討した。得られた結果は次のようである。

- (1) ホーニングはセラミックス加工に有効な手段であり、じん性の高いダイヤモンド砥粒が適する。

- (2) ホーニング速度や砥石圧力を抑え、交差角を大きくして加工すべきである。

- (3) 加工液の影響は大きく、十分考慮する必要がある。

終わりに、本研究に協力された本学4年生の平野聡君に感謝する。

参考文献

- 1) M. V. Swain, R. M. Latanision and A. R. C. Westwood: Further Studies on Environment-Sensitive Hardness and Machinability of Al₂O₃, J. Amer. Ceram. Soc., **58**, 9-10, (1975) 372.
- 2) 奥田 博, 伊藤 正治: セラミックスの加工技術について, 日本機械学会誌, **85**, 761 (1982) 408.
- 3) 今中 治: 硬脆材料の基本的特性とその加工技術, 機械と工具, **6** (1983) 26.
- 4) 辻郷康生, 真崎 繁: セラミックス研削におけるダイヤモンド砥石の選択, 機械と工具, **6** (1983) 57.
- 5) 伊藤正治: 難削性セラミックスの精密加工, 砥粒加工研究会会報, **26**, 10 (1982) 1.
- 6) 今中 治: セラミックスの表面仕上げ法・除去加工法の進歩, 砥粒加工研究会会報, **25**, 1 (1981) 8.
- 7) 今中 治, 鳴瀬則彦: ファインセラミックス利用技術集成, サイエンスフォーラム (1982) 39.
- 8) 上垣外修己: ニューセラミックス, 日本機械学会誌, **85**, 769 (1982) 1398.
- 9) 上田隆司, 山本 明: ホーニング加工の高能率化 (第1報), 精密機械, **46**, 7 (1980) 818.
- 10) 上田隆司, 山本 明: ホーニング加工の高能率化 (第4報), 精機学会昭和57年度関西地方定期学術講演会論文集 (1982) 1.
- 11) 上田隆司, 山本 明: ホーニング機構に関する一考察, 精密機械, **48**, 11 (1982) 1514.
- 12) 田中芳雄, 井戸 守: セラミックスの機械加工における材料除去機構, 機械と工具, **6** (1983) 33.
- 13) 富森 紘: セラミックスの研削加工, 関西砥粒加工研究会第174回研究会資料 (1982).
- 14) 喜田義宏, 井戸 守: セラミックスの研削, 昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1983) 57.