研 究

快削性セラミックスの切削性能に関する研究 (第1報)*

—刃先形状と仕上げ面粗さ—

千 徳 英 一**, 藤 村 善 雄***, 佐 藤 孝 宏†

Eiichi Sentoku, Yoshio Fujimura and Takahiro Satoh: Machining of Machinable Ceramics (1st Report). —Effect of Tool Shape on Roughness of Machined Surface—

In recent years, many ceramics with various kinds of properties have appeared on the market. These ceramics are employed for a few mechanical and electronic parts. The purpose of this paper is to clarify the machining performance of machinable ceramics which have been newly developed. The machining performance of machinable ceramics is investigated and is discussed from view point of the relation between the flank wear of tool edge and the roughness of machined surface on the workpiece. The tools were K10 sintered carbide and CBN. In cutting tests by turning, the cutting speed was varied from 50 m/min to 200 m/min. The flank wear was measured by a tool makers microscope, and worn parts of the tools were observed with the SEM.

The results obtained are as follows:

- (1) In the finish cutting for machinable ceramics, the best cutting condition was obtained as cutting speed of 50 m/min, feed 0.025 mm/rev, depth of cut 0.2 mm by tool of WC sintered carbide, and these condition for CBN tool was cutting speed of 100 m/min, feed 0.025 mm/rev, depth of cut 0.1 mm.
- (2) Tool life of CBN tool was larger than WC sintered carbide.
- (3) The cutting force increased at high speed cutting.
- (4) The chamfer angle of -15° on the tool edge gives the best surface-finish and the long tool life.

(Received September 10, 1987)

I 緒 言

近年、材料開発技術の急速な進歩に伴い多種の工業材料が発表されている。ファインセラミックスは、工業材料の中でも最も他の機械材料に比べて高温特性及び硬度の点で優れていることから、耐熱、耐摩耗部品への置換が有望な材料の一つとして現在その応用範囲が広まりつつある。

このセラミックスは、物理的な特性上、精密機械部品に使用されることが多いため、その製造過程において成型焼結した後、所定の寸法、形状、表面粗さに精密機械加工する必要があること当分の間考えなければならない。

しかしながら、ファインセラミックスは、高い硬度をもつことから推測がつくように極めて難削材であり、加工法としては現在ダイヤモンド砥石による研削やラッピング加工が主流である。当然、加工能率は低い。本研究は、ホトンセラミックス社の開発した快削性セラミックス¹⁾ (マイカセラミックスとも呼び、商品名ホトパール) を、対象として砥石 (研削) による加工よりも被削材の表面に過大な応力を与えず加工能率の高い単刃によ

る切削加工を試み、工具材質と切削条件が工具の摩耗及び仕上げ面粗さに及ぼす影響について検討する。

II 実験方法

II-1 セラミックス

石川県産の陶石を原料とするマイカセラミックスは、雲母とガラスからなる複合体である。この素材は一般的な超硬合金工具やハイス工具で外径切削から穴あけ、タップたてまでの切削加工が可能な事から、快削性セラミックスと呼ばれている。陶石の湿式化学分析値²⁾ を Table 1 に示す。SiO₂, Al₂O₃, K₂O が他の成分に比べて極めて多い、この陶石に MgO, H₂BO₃などを4%~12%加えて丹念に混合し 1673 K 程度で溶融してから成形、ガラス化をへて 1473 K で結晶化する。上記から得

* 昭和62年5月本協会春季大会にて発表、昭和62年9月10日受理。

** 金沢工業高等専門学校機械工学科, 〒921 金沢市南郊野々市町扇が丘7-2。

*** 金沢工業大学機械工学科, 〒921 金沢市南郊野々市町扇が丘7-1。

† 金沢工業大学大学院機械工学科, 〒921 金沢市南郊野々市町扇が丘7-1。

Table 1 Chemical composition of pottery stone.

Composition	wt%
SiO ₂	64.13
Al ₂ O ₃	25.01
Fe ₂ O ₃	0.43
TiO ₂	0.19
CaO	0.10
MgO	0.21
K ₂ O	4.86
Na ₂ O	0.18
Total	99.23

Table 2 Physical properties of ceramics.

Hardness HS	95
Specific gravity	2.56
Coefficient of thermal expansion K ⁻¹	10.7×10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/mK	2.99

られた被削材は Table 2 に示すような物理的性質を有し、特に熱膨張係数が鋼と同じような 10.7×10^{-6} 程度で、硬度が HS95 を呈する。なお、熱伝導率はセラミックス特有な低い値を示す。

II-2 切削実験

マイカセラミックスの高エネルギーにおける仕上げ加工にあたり超硬工具 P10 程度からサーメット工具、コーティング工具、セラミックス工具等で予備実験を行った結果、工具自身の熱伝導率が超硬工具 K10 より低いため工具摩耗が著しく速いことが分かった。このため切削実験は、熱伝導率の高い住友電工製の超硬工具 K10 (H1, G10E type432), CBN 工具 (BN200) 及び焼結ダイヤモンド工具 (DA150) にて Table 3 に示すような条件で乾式切削する。

塑性変形による金属切削とクラックの伝播によるセラミックスの切削では、切削機構に大きな差異があることより従来から市販されている金属切削用の刃先形状で最適な加工ができないことが十分考えられる。そこで、最適刃先形状の決定を試みることにする。工具形状と工具摩耗及び被削材の表面粗さの関係を検討するために超硬合金工具の刃先を +5°〜−35° までダイヤモンド砥石に

Table 3 Cutting conditions.

Symbol	K10	BN200	DA150
Cutting speed m/min	50	100~200	100~150
Feed mm/rev	0.025~0.1		0.025
Depth of cut mm	0.1~0.2	0.1	0.2
Tool type	SNMA	TNGN	TPGN
Tool shape	−5, −5, 5, 5, 15, 15, 0.8	$\alpha=6, R=0.4$	
Land angle	—	35°	—
Land width mm	—	0.2	—

よる研削で変えた実験を行った。切削実験に使用した旋盤は昌運カズスーブ (9kW) で、切屑排除に掃除機を用い工作機械のスライド部へのセラミックス粒の侵入を防止した。工具の摩耗はオリンパス製の工具顕微鏡で逃げ面摩耗幅 V_B を測定し、刃先の摩耗形状は走査型電子顕微鏡 (日立 HXM-2B 型) にて観察し、被削材表面粗さは東京精密のサフコム (304B) にて測定した。逃げ面摩耗幅 V_B は30秒, 1分以後1分間隔で表面粗さ (R_{max} , R_z) は30秒, 2分以後4分間隔で測定した。また、切削3分力は圧電素子型工具動力計 (Kistler type 9257A) にウェーブメモリを介して測定をした。

III 実験結果及び考察

III-1 超硬工具による切削

セラミックスの高エネルギー仕上げ加工を目的とすることから、高い切削速度と低い送りによる加工とした。切削速度は超硬合金工具 K 種にて、加工中に刃先が赤く加熱しない程度まで上げて行った。この場合の切削速度は、 $V=50$ m/min であった。なお、刃先が赤く熱せられたまま加工を続けると工具摩耗が著しく速いことと、被削材が加熱によって破損する恐れがあるので上述の速度一定で行った。

Fig. 1 は、超硬合金工具 K10 にて付記の条件でマイカセラミックスを切削した時の逃げ面摩耗幅 V_B と切削時間 T の関係を示す。初期摩耗は送り f が大きい場合を除けば全体的に短時間で終了し、わずかな時間で比例摩耗に移行した。また、この比例部の直線の傾きはどれも小さく、マイカセラミックスの快削性が分かる。

Fig. 2 は表面粗さ R_{max} と切削時間 T の関係を示す。これらの関係において、切削時間が増加するにしたがって R_{max} が上昇する傾向にあり、切削開始より約10分〜15分で逆に低下する傾向を示す。また、それ以後で上昇する。これらの傾向は、小さい切り込み ($t=0.1$ mm) で大きな送り ($f=0.1, 0.075$ mm/rev) のときに顕著である。また、この場合の $V=50$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.2$ mm の切削3分力を測定すると

Fig. 1 Relation between cutting time and width of flank wear, Mica ceramics vs K10.

Fig. 2 Relation between cutting time and surface roughness, Mica ceramics vs K10.

切削開始時には、主分力 $F_c=8N$ 、背分力 $F_r=10N$ 、送り分力 $F_f=5N$ であり、 $V_B=0.1$ mm における切削力は、 $F_c=25N$ 、 $F_r=46N$ 、 $F_f=11N$ と 2 倍～4 倍大きくなった。切削の進行に伴って大きく背分力が増大することからも刃先が被削材に安定した形で押し付けられ切削³⁾ が良好におこなわれ、刃先の摩耗によるノーズ半径の増加などが加わって仕上げ面粗さが良くなったものと考えられる。

Photo. 1 には、本実験範囲で最も良い仕上げ面粗さの加工ができたときの刃先の SEM 像を示す。工具刃先はすくい面摩耗が顕著に現れず逃げ面摩耗が主となる。

しかし、逃げ面においても金属切削の場合に発生する引っかかり痕が見当たらない。また、仕上げ面粗さに大きく影響を与える前逃げ境界摩耗* は、写真からも理解できるように平面的に現れ、高い加工粗さが得られる可能性があることが分かる。また、この工具の逃げ面及びすくい面の拡大 SEM 像を Photo. 2 に示す。逃げ面は、先に述べたようにアブレシブ摩耗が行われたよりも、凝着摩耗が行われた様子を示す。なお、すくい面においては、刃先前方のせん断面において破壊されたセラミックスの微粒子が連続的に工具の表面に衝突したような形状

Photo. 1 SEM image of cutting edge of K10, $V=50$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.1$ mm.

* 前逃げ面境界摩耗部の粗さが被削材上に転写される。

Flank wear

Crater wear

Photo. 2 SEM image of K10 at $V=50$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.2$ mm, Chamfer degree 0° , Cutting length=1000 m.

を呈する。このため、すくい面上は硬い微粒子によってラッピングされたように、超硬合金の主成分である WC 粒子が SEM 像にて見える。このことは、セラミックスの切削機構を検討する場合に大きく役立ち、刃先前方のせん断面でクラックの不安定伝播によって細かくマイカセラミックスが破壊されることが分かる。

Photo. 3 は、 $f=0.1$ mm/rev, $t=0.1$ mm で 20 分間切削したときの刃先を示す。アセトンで 5 分間超音波洗浄した後にもかかわらず、切刃に大きくマイカセラミックスの一部が強く付着している。この付着が原因で加工表面粗さが他のものに比べて低下したのと考えられる。なお、刃先に付着する条件を加工中に見つけることが不

Photo. 3 SEM image of cutting edge of K10 $V=50$ m/min, $f=0.1$ mm/rev, $t=0.1$ mm.

可能であるため、模擬的に工具材が被削材上を滑る拡散実験(動的拡散実験)⁴⁾を行うことにする。押し付け圧力が 2MPa 程度で 1000K、30分の加熱保持にて工具とマイカセラミックスは強く溶着した。これらの実験結果から、加工中の表面粗さを低下させる原因である付着は刃先温度が 1000K 以上の場合に起こり易いことが予測できる。また、これについての詳しい検討は、後の機会に発表することにする。

III-2 CBN 工具による切削

一方、加工能率をさらに上げるために超硬合金工具より熱伝導率の高い CBN 工具を用いて高速切削を試みた。

CBN 工具の刃先形状は市販のままとし、切削速度を 50 m/min~200 m/min の範囲で変えたときの、切削速度 V と切削力 F の関係を Fig. 3 に示す。各切削については、新しい工具刃先を用い比較の時期は切削初期とした。この関係は、鋼及び合金鋼などにみられるような右下がりの傾向とはならず、その逆の高速切削側で上昇*する結果となる。これは、鋼の場合のように、切削速度の上昇に伴い切削温度が増加し、被削材を軟化させたり切屑厚さを薄くする現象が顕著ではないことを示す。つまり、刃先前方の切削時におけるせん断面において、すべり面の存在するトランプカードモデル⁵⁾が成立しないことを意味する。切削速度の増加で切削力が上昇するのは、切屑粒子径が切削速度の変化で変わらないとすると、単位時間あたりに除去される切屑の体積が多くなるためであると考えられる。

Fig. 4 には CBN 工具の逃げ面摩耗幅 V_B と切削距離 L の関係を示す。この関係において、初期摩耗は超硬工

Fig. 3 Relation between cutting speed and cutting force, CBN tool vs mica ceramics, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.2$ mm constant.

* K10においては、高速切削が不可能であるが切削速度を上げることによって、この傾向は等しい。

Fig. 4 Relation between cutting length and width of flank wear, Mica ceramics vs CBN tool.

Fig. 5 Relation between cutting length and surface roughness, Mica ceramics vs CBN tool.

具より5倍程度長く約800mまで達する。CBN 工具は、比較のために付記した超硬合金工具より、比例摩耗における傾きが小さく工具寿命が大きく延びることが分かる。なお、この実験範囲においては切削速度 V の変化に対しても傾きは変らず長い工具寿命となった。

Fig. 5 には CBN 工具における表面粗さ R_{max} と切削距離 L の関係を示す。 $V=100$ m/min, $V=200$ m/min の場合、 $L=2000$ m で最も粗さが $4\mu\text{m}$ と良くなり、それ以後は徐々に低下した。 $V=100$ m/min では、 L が約3000m で $R_{max} 6.5\mu\text{m}$ と悪くなるが約5500m 付近で $2.2\mu\text{m}$ と最も良い値を示した。これらの関係は上述したように、刃先が被削材に安定した形で押し付けられる超硬工具の場合と同様な形態で摩耗が進行するものと考えられる。また、切削中に工具の摩耗につれて表面粗さが上下することや、初期摩耗の終了が他の工具より長いことより、刃先に自生作用が発生すると考えられる。以上のことから高速切削が可能である点より、市販の CBN 工具は荒削り用に適するとも言える。

Photo. 4 には CBN 工具について、付記の条件で切削した時の刃先の SEM 像を示す。Photo. 4(1) において切削が刃先のチャンファ内で行われているのが理解でき

(1)

(2)

Photo. 4 SEM image of cutting edge of CBN tools, $V=200$ m/min and $V=100$ m/min, $t=0.1$ mm, $f=0.025$ mm/rev.

る。また、刃先のエッジ部にマイカセラミックスの一部が付着しているが、前逃げ面境界摩耗部にはマイカセラミックスの付着が量的に少ない。また、Photo. 4(2) に示すように、切削速度を変えた場合にもこの現象は顕著に発生し切削時間40分後の刃先には、大きく付着物が存在する。この場合、仕上げ面粗さに大きく影響する前逃げ面境界摩耗は、上記のものとあまり変わらず良好な切削ができるものと思われる。なお、この付着物は、切削距離の増加にしたがって堆積量が増し、仕上げ面粗さを低下させる。また、切削速度 V を大きくすると発達が速いことも実験から分かった。

Ⅲ-3 焼結ダイヤモンド工具による切削

一般的にセラミックスは、ダイヤモンド工具にて切削されていることより、ここでもダイヤモンド工具による切削を試みることにした。

Fig. 6 は、現在市販されている焼結ダイヤモンド工具 DA150 でマイカセラミックスを切削したときの摩耗進行曲線を示す。なお、参考のために CBN 工具である BN200 と超硬合金工具 K10 のデータも付記した。定常摩耗における摩耗進行曲線の傾きは、CBN 工具に比べてダイヤモンド工具の方が大きい結果となった。また、初期摩耗においては、ダイヤモンド工具の方が短時間で終了した。これらの結果は、ダイヤモンド工具で乾式切削したため切削熱でダイヤモンドがグラファイト化したためと考えるのが一般的であるが、このほかの原因

Fig. 6 Relation between cutting length and width of flank wear VB .

Fig. 7 Relation between cutting length and surface roughness. R_{max} for three different tools.

として、ダイヤモンド工具が CBN 工具に比べて初期摩耗が短時間で終了することから、大きなチャンファ角を持つ CBN 工具と正のすくい角を持つダイヤモンド工具の刃先形状に大きな違いがあるためと考えられる。

Fig. 7 には、上記工具で切削した時の切削距離 L と被削材の表面粗さ R_{max} 関係を示す。切削60分までの範囲では、ダイヤモンド工具の方が CBN 工具に比べて R_{max} で 2μ m 程度小さい安定な表面粗さ値を示す。しかし、CBN 工具のような刃先が切削時に自生作用をうけて切削の進行に連れて表面粗さが良好になると思われる現象は少ない。従って、切削初期と後期において表面粗さの変化が小さいので、焼結ダイヤモンド工具はマイカセラミックスの仕上げ切削に適すると言える。

Ⅲ-4 最適工具形状による切削

先に述べたようにダイヤモンド工具と CBN 工具では刃先形状が大きく異なり、初期摩耗に違いが見られることから、工具の刃先形状に着目してみた。セラミックスは、鋼に比べて相当硬いことからすくい角を負にした切削を考え、送りや切込みが小さいことから工具刃先のチャンファ角を変えることとした。

材質的に最も表面粗さの良好な超硬工具を用いて、工具のチャンファ角を $+5^\circ \sim -35^\circ$ まで数段階変えた実験を行った。工具チャンファ角度と切削3分力の関係を

Fig. 8 に示す。チャンファ角が負に大きくなるほど切削3分力は増加する傾向を示す。特に、背分力の増加が著しいのが分かる。刃先が負になると被削材と工具の接触が安定すると考えられ良好な切削が行われることが予測される。

Fig. 9 には切削時間 T と逃げ面摩耗幅 V_B の関係を示す。チャンファ角 0° 以外は研削した工具である。研削を施した工具は他の工具に比べて初期摩耗が大きい傾向となったが $+5^\circ$ を除けば工具寿命はほぼ同じ傾向を示した。チャンファ角 $+5^\circ$ については、先に示した切削力の関係で背分力が小さいことから理解できる。

このときのチャンファ角度と仕上げ面粗さ R_{max} の関係を片対数グラフにて描いたものを Fig. 10 に示す。チャンファ角が $-5^\circ \sim -15^\circ$ の範囲で仕上げ面が良好になる傾向を示し、マイカセラミックスに対する工具の最適形状(チャンファ角)は、上記した程度となる。なお、快削黄銅の切削実験等から R_{max} で $1.8\mu\text{m}$ 程度が使用した工作機械の限界値である。

各種工具で切削した結果、CBN 工具が最も長寿命で

Fig. 10 Relation between chamfer angle and surface roughness R_{max} , $V=50\text{ m/min}$, $f=0.025\text{ mm/rev}$, $t=0.2\text{ mm}$.

Fig. 8 Relation between chamfer angle and cutting force, $V=50\text{ m/min}$, $f=0.025\text{ mm/rev}$, $t=0.2\text{ mm}$. Sintered carbides vs mica ceramics.

Fig. 9 Relation between cutting time and width of flank wear, $V=50\text{ m/min}$, $f=0.025\text{ mm/rev}$, $t=0.2\text{ mm}$. Sintered carbides vs mica ceramics.

あることが分かった。しかし、一般に市販されている CBN 工具は鋼用に設計されているため、チャンファ角が -35° であり、マイカセラミックスに適しているとはいえない。そこで、マイカセラミックスの仕上げ面粗さは工具のチャンファ角度が $-5^\circ \sim -15^\circ$ 付近で最も良好となることから、CBN 工具の刃先のチャンファ角度を -15° に設計して切削を行い、比較検討した。切削時間 T と逃げ面摩耗幅 V_B の関係は Fig. 11 に示すようになる。比例摩耗における傾きはどちらも同程度であるが、 -35° の工具は初期摩耗が大きいのにに対して、 -15° の工具では初期摩耗はかなり小さく、従って、長い工具寿命となる。このときの切削時間 T と表面粗さ R_{max} の関係を Fig. 12 に示す。チャンファ角が -35° の工具では、表面粗さに大きなうねりが見られ不安定であるが、チャンファ角が -15° の工具ではうねりは比較的小さく

Fig. 11 Relation between cutting time and width of flank wear, $V=100\text{ m/min}$, $f=0.025\text{ mm/rev}$, $t=0.1\text{ mm}$, CBN tool BN200 vs mica ceramics.

Fig. 12 Relation between cutting length and surface roughness R_{max} , CBN tool (BN200) vs mica ceramics, $V=100$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.2$ mm.

Photo. 5 SEM image of CBN tool at $V=100$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.1$ mm, Chamfer angle -15° , CBN tool vs mica ceramics.

全体的に安定しているといえる。また、このときの刃先の SEM 像を Photo. 5 に示す。Photo. 4 と同様に、摩耗部にはマイカセラミックスの一部が付着しているが、前逃げ面境界摩耗が発達せず、良好な仕上げ面が得られる形となる。これらの実験結果は、刃先形状が -15° において、マイカセラミックスの加工面で刃先が被削材をミクロ的に掘り起こす深さが小さく、切削時に切屑を出すため必要なクラックの発生に適していることから初期摩耗が極めて小さいものと思われる。

IV 結 論

マイカセラミックスを各種の工具材料で切削し、以下のような主な結論を得た。

- (1) 実用的な最適切削条件は、工具のノーズ半径 0.8 mm の超硬工具で仕上げ切削を行った場合 $V=50$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.2$ mm の条件で $R_{max} 2 \mu\text{m}$ 程度に達した。また、CBN 工具では $V=100$ m/min, $f=0.025$ mm/rev, $t=0.1$ mm で最高 $R_{max} 2.5 \mu\text{m}$ まで達した。
- (2) CBN 工具は、超硬工具に比べてはるかに長い工具寿命となる。
- (3) 切削 3 分力は、切削速度を上げると鋼とは、逆に切削抵抗が上昇する傾向にあった。なお、切削が進行すると他の分力に比べて背分力が著しく上昇し安定な切削が可能になった。
- (4) 工具のチャンファ角を大きく負にすると仕上げ面粗さは低下するが工具寿命が延びることが分かった。また、工具チャンファ角度 $-5^\circ \sim -15^\circ$ 付近が最も良好な仕上げ面粗さが得られた。
- (5) チャンファ角 -15° の CBN 工具では、 -35° の工具に比べて初期摩耗が極めて小さく長い工具寿命となる。また、表面粗さにおいてはうねりが小さく全体的に安定した。

以上のことから、マイカセラミックスの加工における最適切削条件と刃先形状が決定できた。

終わりに本研究は、ホトンセラミックス株式会社の委託研究で行ったものの一部であり関係者に深く感謝します。また、本実験に協力した金沢工業大学機械工学科学生 木下正夫、木村豊、大久保充康君に謝意を表す。

文 献

- 1) 例えば：日経ニューマテリアル, **2-24** [6] (1986), 40.
- 2) 山名, 宮本, 七山：石川県工業試験場研究報告, **No 34** (1986), 63.
- 3) 新谷, 藤村：精密機械, **51** (1985), 105.
- 4) 千徳, 藤村, 河端：粉体および粉末冶金, **33** (1985), 40.
- 5) Milton C. Shaw: Metal Cutting principles 3rd edition, MIT, Press, (1957), 3-9.