

難加工材のハイブリッド加工技術に関する研究

(快削性ガラスセラミックスの超音波振動切削性能)

機械金属部 機械研究室

松隈 博

高強度で耐食性に優れたセラミックスは構造用部品として実用化が図られているが、一般の工業用材料に比べると、硬脆性材料であるため容易に加工出来ない欠点がある。現在、加工方法としては研削加工が主流となっているが、加工能率が極めて悪く生産性に劣る。そこで加工性の良い快削性ガラスセラミックスが注目されつつあるが、その被削性についての切削特性が明らかにされておらず、まだ生産現場での普及が充分でないのが現状である。本研究は快削性ガラスセラミックスに対して、超音波振動エネルギーをアシストした高精度、高能率化に向けてのハイブリッド切削加工技術の確立を目的とする。実験結果から比較的に切り込みの大きい切削領域では切削抵抗の減少および長手方向の仕上げ面粗さの向上に対して、超音波振動切削の効果を見ることが出来た。

1. はじめに

構造用セラミックスは耐熱性、耐摩耗性、耐蝕性等の優れた特性から自動車、工作機械、電機機械、航空宇宙産業等の先端技術分野への応用が進められている。しかしながら、セラミックスは一般の工業材料に比べると硬度が高く、しかも脆性材料であるためで切削しにくいという難削材特有の欠点があり、加工能率が低い。これが、加工コスト高を招きセラミックスの普及を阻害している要因の一つでもある。最近このような問題を解決するため従来の切削工具（超硬）でも比較的容易に加工の出来る、快削性ガラスセラミックスが注目されるように成って来た。今回その被削性についての実験を従来の慣用切削方法と超音波振動をアシストさせたハイブリッド切削加工方法の比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 被削材及び使用工具材種

被削材は快削性ガラスセラミックスの $100\phi\times 150\text{mm}$ の丸棒でその化学成分及び物理的機械的性質を表1に示す。

実験に使用した工具材種は、比較的容易に加工できると言うことから超硬チップK68を選定した。

チップ形状はポジティブタイプでTPGA110208(TP-42)160408である。チップの固定には前掘り角12度の超音波振動切削用スローアウェイチップ対応剣バイト形チップホルダーを使用した。

表1 被削材の物理的機械的性質及び化学成分

項 目		標準値
かさ密度 g/cm^3		2.5
熱膨張係数 ℃^{-1} ($\times 10^{-7}$)	20~300℃	90
	20~700℃	115
熱伝導率 $\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{℃}$		0.004
比熱 $\text{cal/g}\cdot\text{℃}$		0.18
最高使用温度 ℃	酸化雰囲気	1000
	還元雰囲気	800
ビッカース硬度 Kg/mm^2		230
曲げ強度 Kg/cm^2	RT	1000
	1000℃	—
圧縮強度 Kg/cm^2		3500
ヤング率 10^3Kg/cm^2		6.7
成分 (%)	SiO_2	46
	MgO	17
	Al_2O_3	16
	K_2O	10
	B_2O_3	7
	F	4

2.2 実験条件

実験に使用した超音波振動切削装置は多賀電機(株)製の超音波発振器(Sonic impulse SB-150)とバイトホルダー(BD型)及び外周加工用保持台から構成されている。これらの装置を大隈鉄工所(株)製LS-800実用高速旋盤(主軸電動機7.5KW、無断变速機付き)の刃物台上に佐藤マシナリー(株)製AST-ZM型フライス工具動力計といっしょに固定して、バイト刃先に振動を負荷させて両センター支持による長手切削加工を乾式切削にて行った。なお切削加工における工具の摩耗測定には津上製作所(株)製L-2型工具顕微鏡を用いて、一定の切削時間毎に摩耗量の測定を行った。写真1は超音波振動切削実験装置の外観を示す。

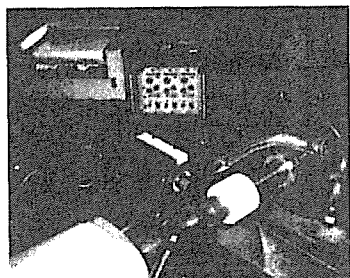


写真1 超音波振動切削
実験装置



写真2 円周粗さ
測定装置

なお超音波振動切削で注意を要することとして、振動切削が可能な臨界速度の設定があり、被削材の切削速度をバイトの振動速度よりも低くする必要がある。すなわち臨界速度は $V(m/min) = 2 \times \pi \times F(KHz) \times \lambda(\mu m)$ で表される。今回使用した工具の共振周波数は19.5KHz、振動振幅30 μm で臨界速度Vは220m/minとなる。これ以上の切削速度で加工をすれば慣用切削になり超音波振動付加の効果がなくなる。また理想的な振動切削を行うにはバイト刃先の振動方向と被削材の切削方向とを一致させる必要があり、そのためには工具傾斜角の補正が大切でこれらが不適正であれば、バイト刃先が被削材に激しく衝突して仕上げ面粗さを著しく阻害する原因ともなる。今回はこれまでの

試験結果から工具傾斜角を15度として前記項目を検討することとした。切削面の粗さの測定には小坂研究所製三次元粗さ測定器SE-3ARを使用して、軸方向及び円周方向のRz、Rmaxを用いて慣用切削及び超音波振動切削による加工精度の違いを求めた。写真2はサーフコーダーにセットされた円周粗さ測定装置(ZRM-200)を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 工具寿命

今回快削性ガラスセラミックスを切削するに当たり被削材と切削工具材種の適合性から超硬工具K₁₀を選んだ。理由としては被削材の熱伝導率が0.004Cal/cm.Cec℃で炭素鋼や鋳鉄等の約1/30から1/20と極めて低いため熱伝導率の低いセラミックス工具、サーメット工具等では切削熱の上昇が著しいこと、あるいは親和性との関連から工具寿命が著しく短いという結果からである。図1から図4は快削性ガラスセラミックスを超硬工具を用いて、切削速度30m/minから150m/min、切り込み0.25mm、送り0.05mm/revでの切削領域で切り刃ノーズ部の工具摩進状態を求めたものである。工具摩耗は切削時間の経過に従い増大しているものの、ファインセラミックスや一般の工業材料に比較すると切削時間60分経過しても摩耗量はわずかに0.1mmを越える程度である。また、両者を比較するといずれの切削速度域でも慣用切削が摩耗進行速度が遅い。工具の摩耗の原因としては供試材中のSiO₂等を含む酸化物系介在物が工具摩耗面に付着して、これが工具と反応して工具を軟化させ、その耐摩耗性を損なうものと考えられる。また一方では工具刃先に超音波振動を負荷させることで被削材中の介在物間との摩擦回数が更に増大して摩耗進行をますます早めるものと考えられる。図5は逃げ面摩耗基準の工具寿命(T)と切削速度(V)との関係を求めたV-T線図である。この図5から超音波振動切削方法と慣用切削方法の違いによって両者に工具寿命に差が生じている

ことが判明した。いずれの切削速度領域においても慣用切削の方が超音波振動切削よりも工具寿命が長い。

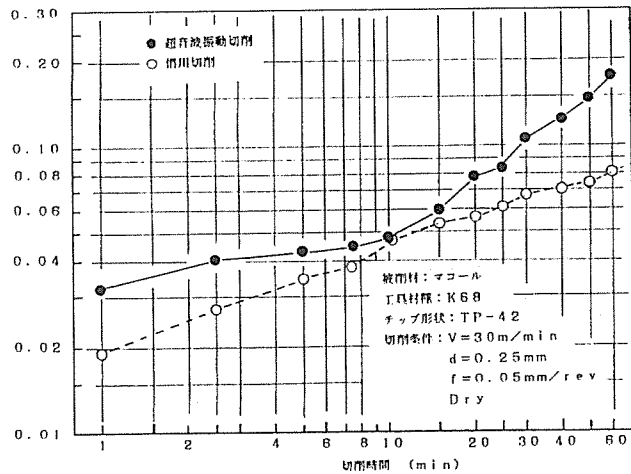


図1 工具摩耗経過曲線

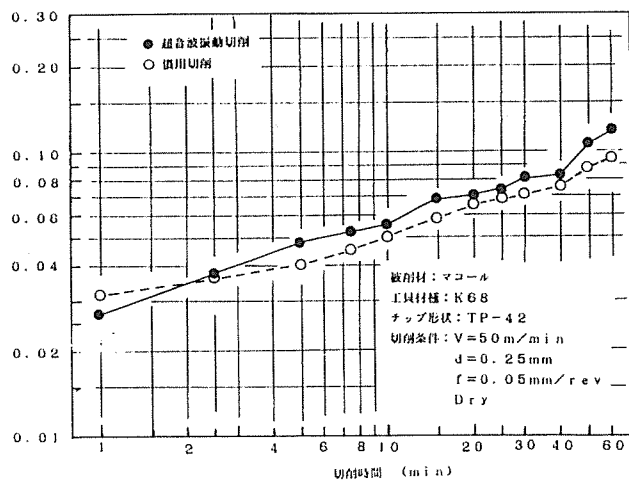


図2 工具摩耗経過曲線

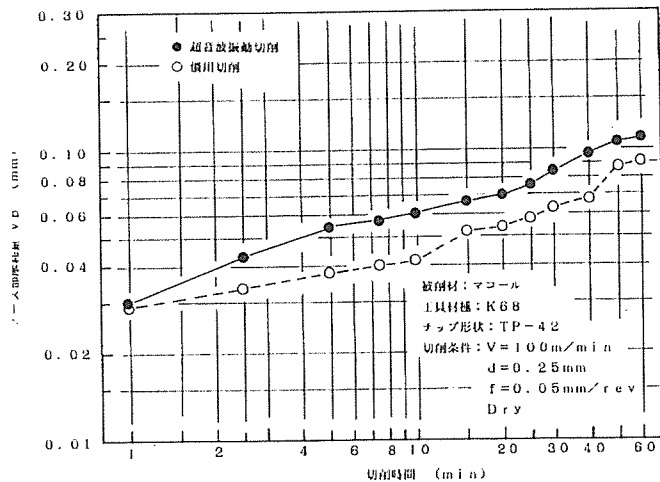


図3 工具摩耗経過曲線

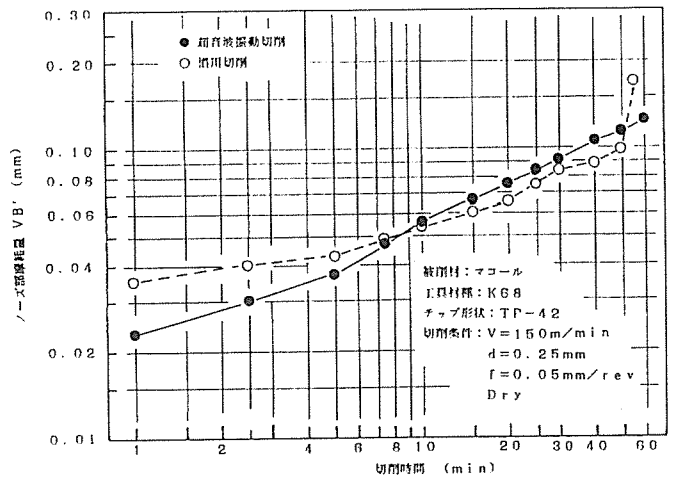


図4 工具摩耗経過曲線

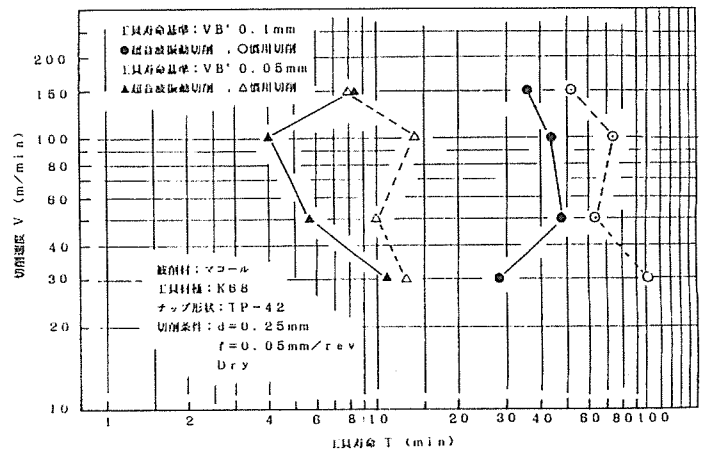
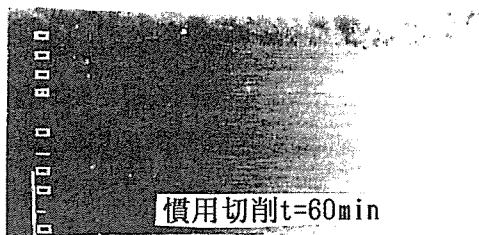


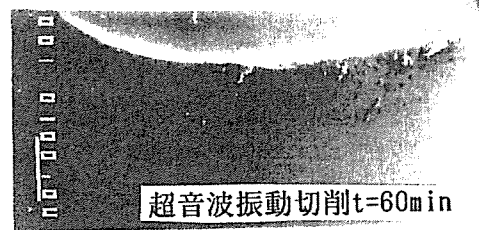
図5 工具寿命曲線 (V-T線図)

写真3から写真6は超音波振動切削と慣用切削の切削終了時の工具摩耗形態を示す。いずれの切削域においても切れ刃線稜にチッピングの発生が少なく、切削初期から切削終了時まで各切削方法とも普通にみられる正常摩耗を示すが、慣用切削方法では梨面の摩耗状態に対して、超音波振動切削の方は摩耗面が光沢をなし内部へ進行している。掘削面には摩耗痕の発生が観測されなかった。

図6から図9はそれぞれの切削条件下におけるバイト刃先のノーズ部逃げ面摩耗の進行状態にともなって切削抵抗(主分力、背分力)がどのように変化していくかを経過曲線にて求めたものである。図6から図9でも判るように切削時間の経過すなわち工具摩耗の進行にともなって切削抵抗は両切削方法とも徐々に上昇する傾向にあるが、特に背分力に関し



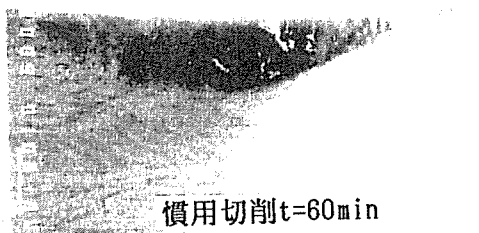
慣用切削 $t=60\text{min}$



超音波振動切削 $t=60\text{min}$

$v=30\text{m/min}, d=0.25\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev}$

写真3 工具摩耗状態



慣用切削 $t=60\text{min}$



超音波振動切削 $t=60\text{min}$

$v=50\text{m/min}, d=0.25\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev}$

写真4 工具摩耗状態



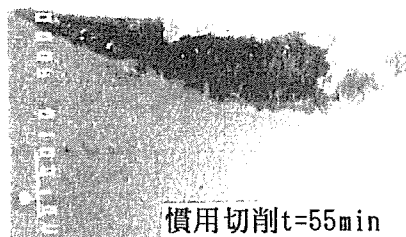
慣用切削 $t=60\text{min}$



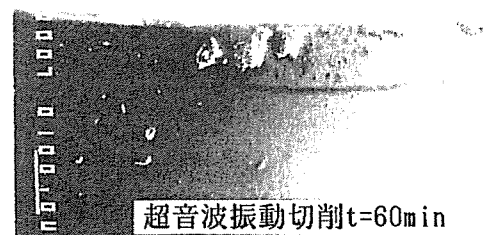
超音波振動切削 $t=60\text{min}$

$v=100\text{m/min}, d=0.25\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev}$

写真5 工具摩耗状態



慣用切削 $t=55\text{min}$



超音波振動切削 $t=60\text{min}$

$v=150\text{m/min}, d=0.25\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev}$

写真6 工具摩耗状態

その増加傾向が極めて著しく現れ抵抗値は主分力より高い。主分力の大きさを比較すると超音波振動切削では慣用切削の抵抗値より減少効果が見られ背分力に関しては逆効果が観察される。切削対抗の変動は切削過程中に切れ刃陵が被削材間の摩擦によるすり減りによる単純な摩耗の進行だけではなく、チッピングなどの微細な欠損の他にその以上の欠損によって生じたことが原因とも考えられる。また図8に見られる切削抵抗の減少については短時間の間に切れ刃部の線陵が大きな欠落により所定の切り屑除去量を行っていないことが影響したものと推察される。

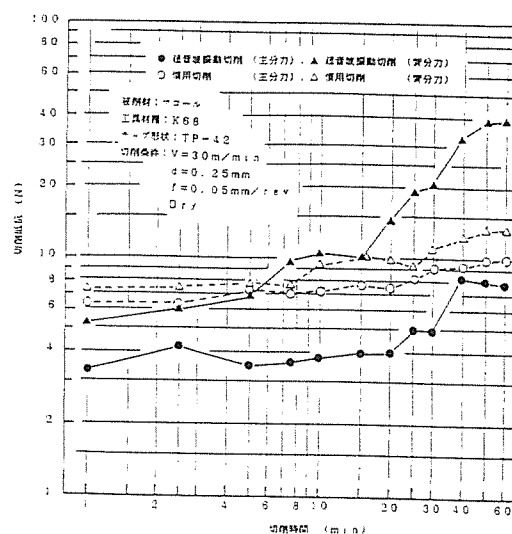


図6 切削抵抗の推移

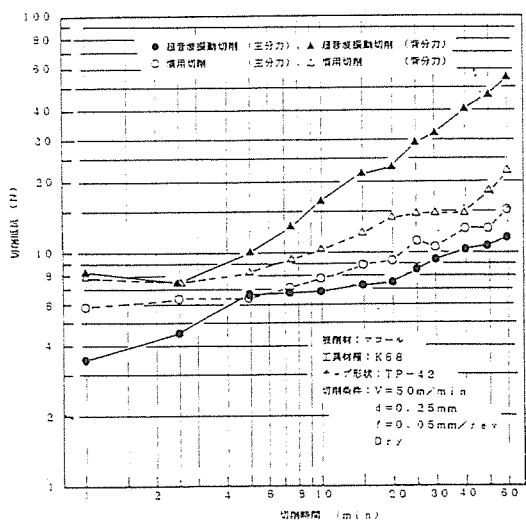


図7 切削抵抗の推移

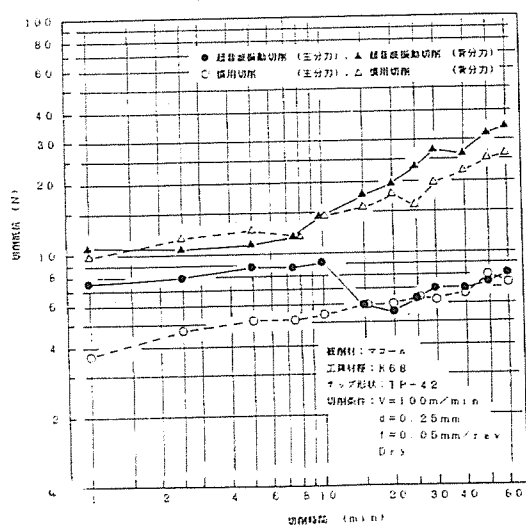


図8 切削抵抗の推移

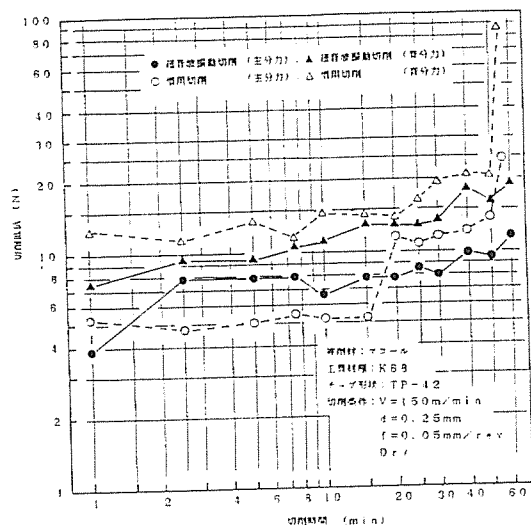


図9 切削抵抗の推移

図10から図13は快削性ガラスセラミックスを切削したときの粗さの変化を求めたもので仕上げ面粗さに関しては工具摩耗の進行にともなって徐々に増加する傾向にあるが、超音波振動切削の方が粗さの変動が激しく測定値も高い。仕上げ面形状を記録してみると、いずれの切削条件下に於いても凹凸の激しいみだれた形状で成形されているのが観察されせつさく理論粗さ $R_{max} = f^2 / 8r$ ($f: 0.05 \text{ mm/rev}$, $r: 0.8 \text{ mm}$) よりの計算値 $0.4 \mu\text{m}$ より大きな数値を示す。このように仕上げ面粗さが変化する原因としては、セラミックス特有の切り屑の生成機構が金属に比べて脆性破壊によることと、切れ刃ノーズ部の摩耗形態が時間の経過に従って微妙に変化することによりノーズ形状が微妙に変化していくことによるものと考えられる。

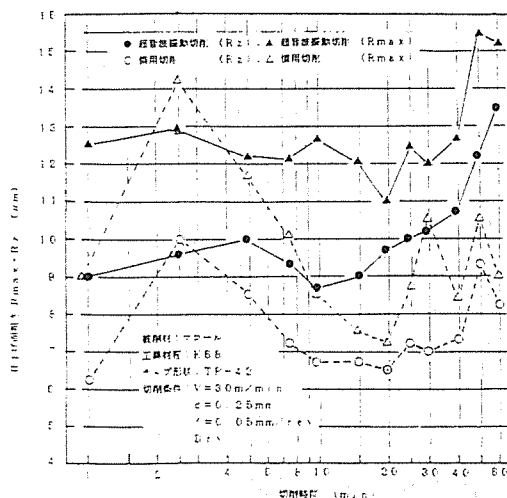


図10 仕上げ面粗さの推移

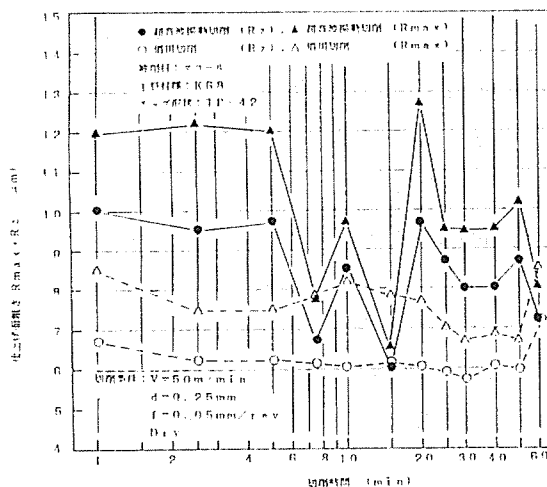


図11 仕上げ面粗さの推移

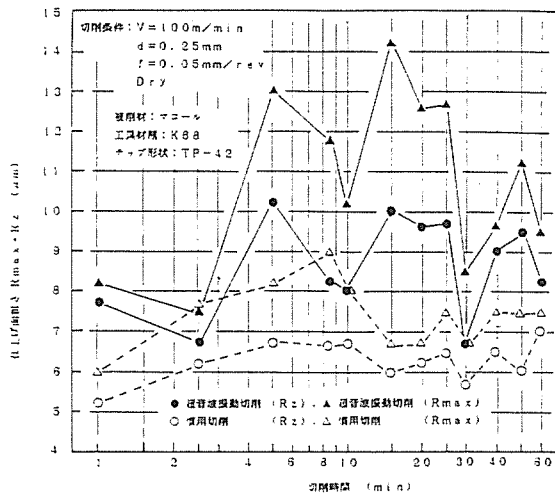


図12 仕上げ面粗さの推移

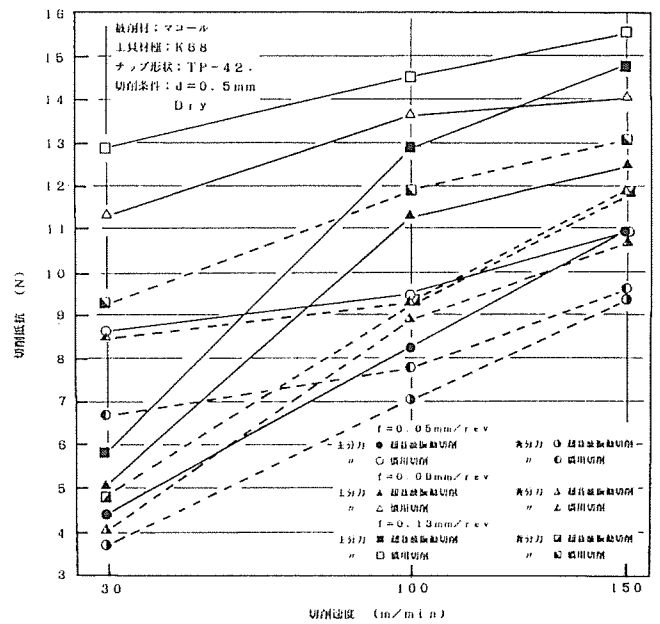


図14 切削抵抗の推移

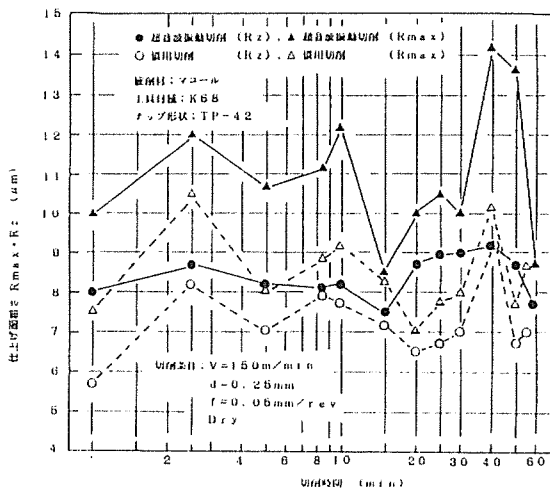


図13 仕上げ面粗さの推移

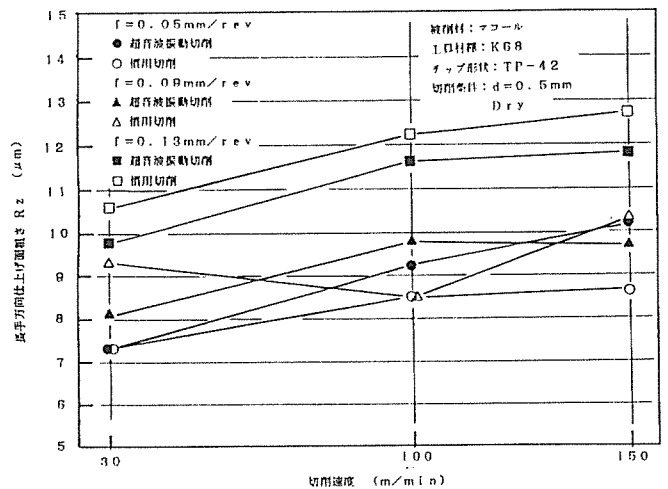


図15 仕上げ面粗さの推移

図14から図16は切削速度を30m/minから150m/min、切り込み0.5mm、工具傾斜角15度を一定として送りを変化させて超音波振動切削方法と慣用切削方法の比較を切削抵抗および仕上げ面粗さからを観察したもので、切削速度の増加及び送り量を増すごとに主分力および背分力は増大する。超音波振動切削の方が切削抵抗は小さな値を示す。仕上げ面粗さでは図15、図16からも判るが如く送り量の小さい0.05mm/revが長手方向および円周方向とも良く、送りを増すに従って大きくなる傾向にあり、また切削速度にも多少の影響がみられるが送り量ほどの効果はない。全般的に長手方向に関しては超音波に効果がみられ、円周方向では慣用切削に仕上げ面粗さの向上効果が見ら

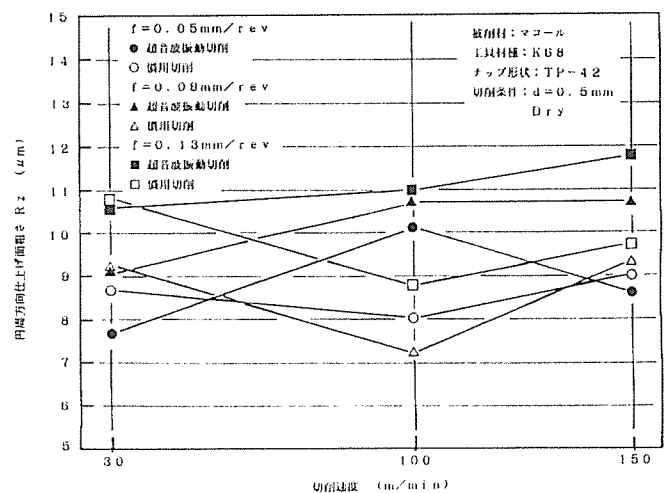
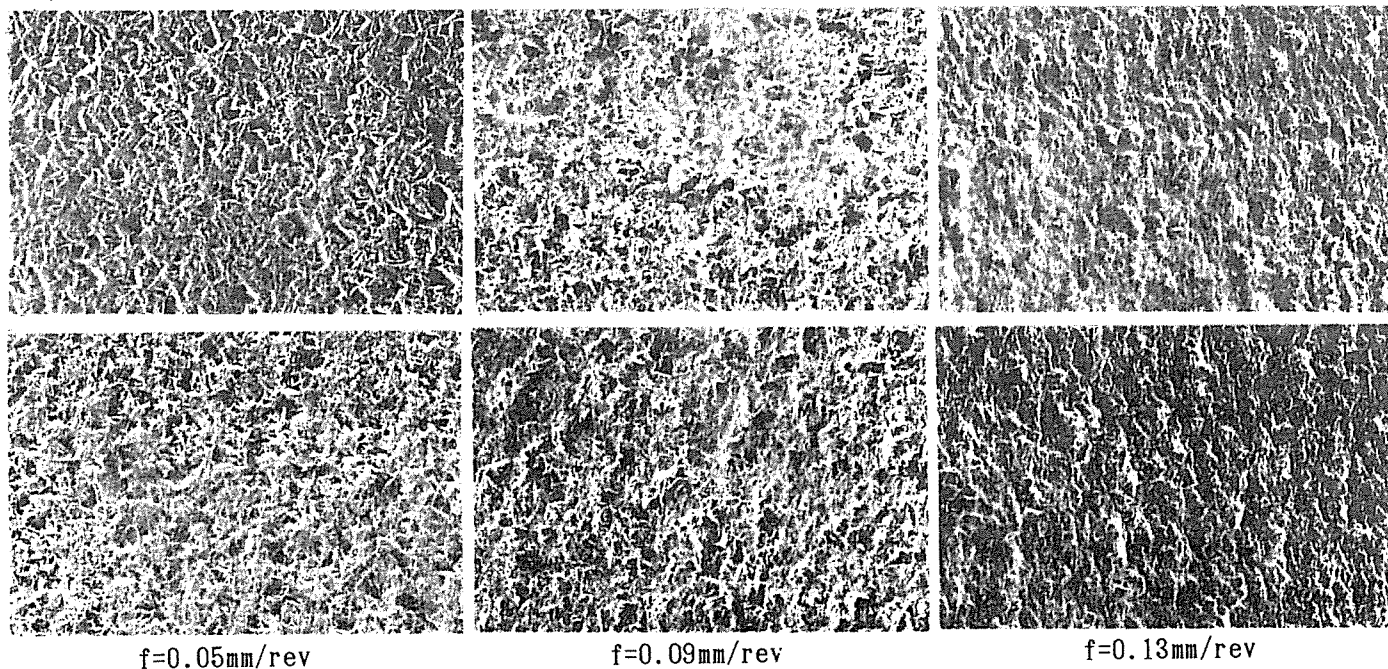


図16 仕上げ面粗さの推移

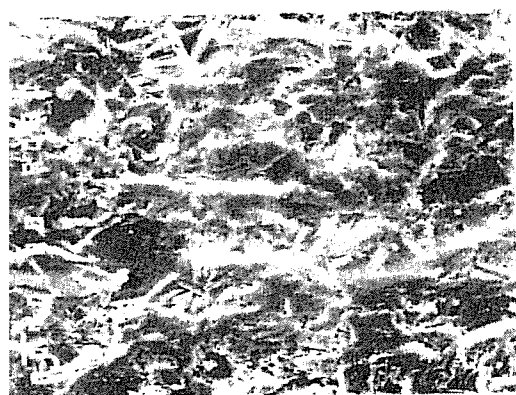
れる。写真7から写真9は切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ 、切り込み 0.5mm 、を一定として送り量を変化させたときの仕上げ面の加工状態を現したもので、超音波振動切削においては送り量が増すに従って加工面にびびり面が写真7からも判る如く鮮明に観察されるようになりそのびびり間隔は切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ ($1.666\text{m}/\text{sec}$) と工具の共振周波数 19.5KHz に関連しており計算値 $1666\text{mm} \div 19500 = 0.085\text{mm}$ とほぼ同じであることが判った。また写真8の加工面状態からも判るように加工面の凹凸が激しく金属切削におけるような塑性変形は見られなくて破壊面で構成されている。

写真9は切り屑状態を示したもので快削性ガラスセラミックスの切削加工面は切削方向に対して微小破壊、あるいは極めて大きな破壊の繰り返し作用により切り屑を生成して加工面を形成する。切り屑破面の写真からも判るように切り屑は不連続の亀裂型をなしており送りの小さい領域では組織内の雲母結晶のへき開性に関連して、剪断型に近い切り屑をなし、送りが大きくなると雲母結晶の切り屑形成への参加が少なくなり主として亀裂型切り屑を排出するものと考えられる。



$v=100\text{m}/\text{min}, d=0.5\text{mm}$

写真7 各種切削方法による加工面状況 (上段：慣用切削，下段：超音波振動切削)



$v=100\text{m}/\text{min}, d=0.5\text{mm}, f=0.13\text{mm}/\text{rev}$

写真8 超音波振動切削加工面状態



$v=100\text{m}/\text{min}, d=0.5\text{mm}, f=0.09\text{mm}/\text{rev}$

写真9 切り屑形状及び切り屑破断面

5. おわりに

快削性ガラスセラミックスの被削性について超音波振動切削及び慣用切削の性能評価の実験を行った結果は次のようになる。

- (1) 切り込み及び送りの小さい領域での切削抵抗は切削時間の経過にともない増大する傾向にある。超音波振動切削の効果は切り屑除去域が大きくなるほど慣用切削の抵抗値より低い。
- (2) 超硬工具K種を用いて工具摩耗の進行を比較すると、超音波振動切削が慣用切削よりも摩耗が大きく現れる。しかしその摩耗量は60分切削しても0.1mmをわずかに超える程度のものである。
- (3) 超音波切削と慣用切削の仕上げ面粗さの優劣を比較すると、円周方向よりも長手切削方向に超音波振動切削の効果が見られるし、円周方向の粗さには慣用切削の方が優位である。

参考文献

1. セラミックス加工ハンドブック（基礎から応用事例まで），建設産業調査会
2. ファインセラミックス（高脆性材料の精密機械加工），マシニスト出版（株）
3. 松隈博：難加工材のハイブリッド加工技術に関する研究（仮焼結セラミックスの超音波振動切削性能）佐賀県工業技術センター報告1993
4. 松隈博：難加工材のハイブリッド加工技術に関する研究（完全焼結セラミックスの超音波振動切削性能）佐賀県工業技術センター報告1994