

知 識 編

1. 加工原理と特徴

超音波研削は従来の砥石研削機構に、さらに超音波振動を研削方向に加えて加工する方法で、セラミックスのような硬脆材料の加工面に超音波による振動衝撃力を毎秒数万回与えながら研削加工する機構である。あたかも石工が花崗岩を槌とノミでたたきながら平面加工を行うのに似ているが、セラミックスは硬いので普通はダイヤモンド砥石を用い、その回転運動にさらに超音波振動を付加して行うのが超音波研削である。

(1) 超音波研削の原理

図1に超音波研削盤の外観写真を示す。普通のNC立軸形研削盤の中央部のコラムに超音波研削ユニットが取り付けられ、右の上部にはNC制御盤が取り付けられている。なおこの他に超音波振動のための電気エネルギーを供給する超音波発振器と、超音波加工動作を監視する超音波モニタリング装置が別に設置されている。

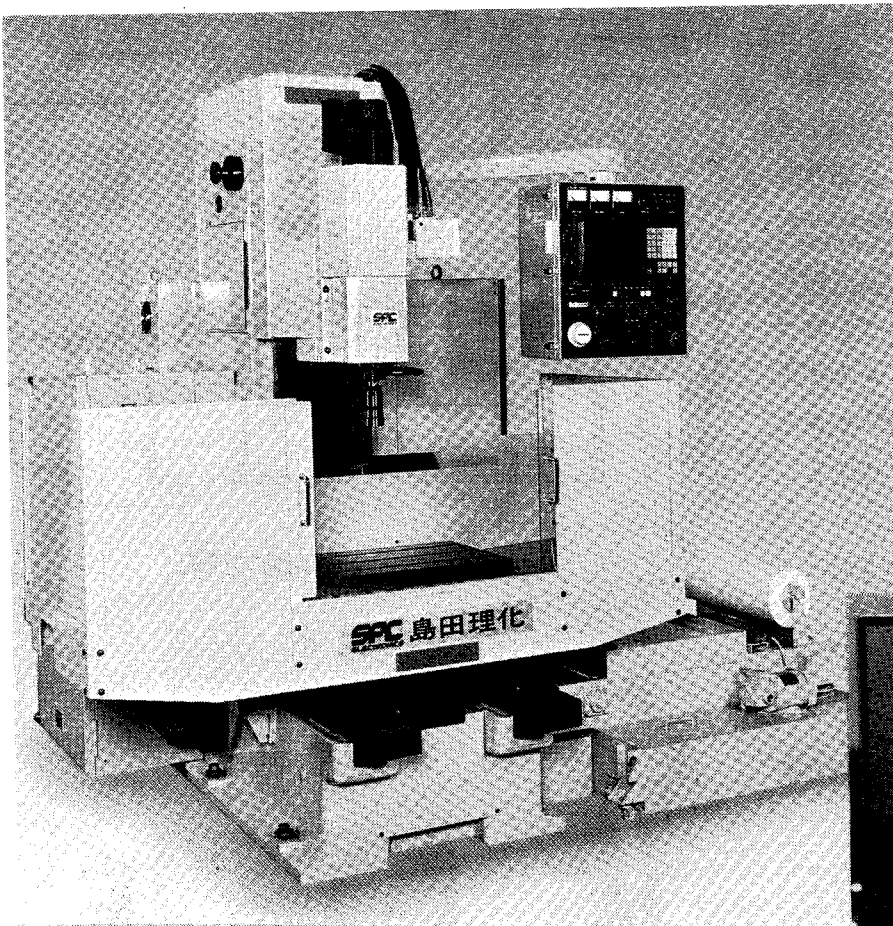


図1 超音波研削盤外観

図4に超音波研削盤の構成図を示す。図中のスピンドルユニット内部に超音波振動系が組み込まれていて、その上部のACスピンドルモータによって振動系全体が回転する。スピンドルモータの制御はサーボユニットでなされ、回転数の制御およびトルクの検出による停止操作がなされる。

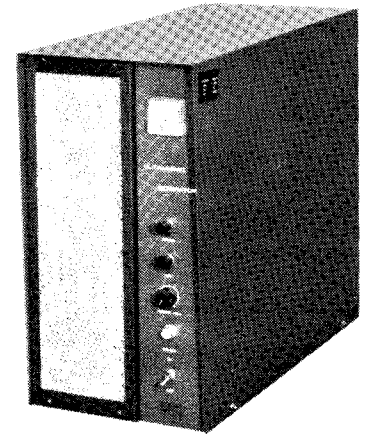


図2 超音波発振器

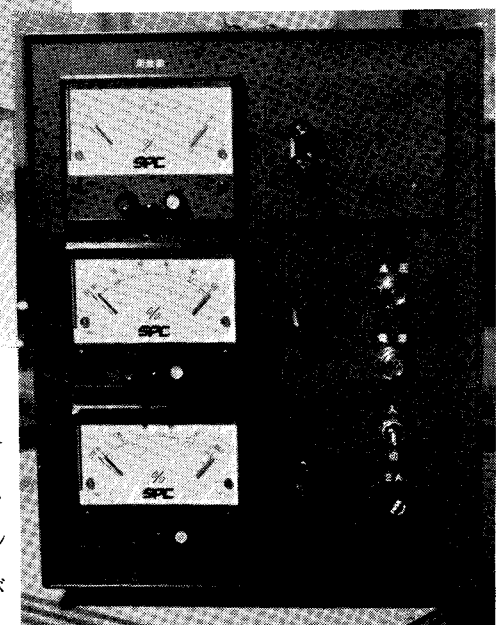


図3 モニタリング装置

スピンドルユニットはスピンドルモータを含めてZ軸を構成し、本体コラムに沿って上下運動を行う。XYテーブル上にはセラミックスなどの工作物を取り付ける加工台があり、ダイヤモンド砥石に接し、加工時にXY方向に自由移動して二次元加工を行うことができる。上下移動のZ軸制御と水平方向移動のXY制御等は一括してNC制御盤でなされ、三軸制御を行うことにより三次元加工を行うこともできる。

図4の右上二番目の超音波発振器からの超音波周波数の電気エネルギーをスピンドルユニット内のスリップリングを通して超音波振動子に通電すると、振動子は垂直方向（加工方向）に伸び縮みの振動を発生する。その振動はその下部に結合した超音波ブラスター、超音波ホーンで振動振幅が拡大されて、ホーン先端のダイヤモンド砥石に伝達される。たとえばダイヤモンド砥石として穴あけ用のコアリングツールを使用する場合には、砥石は回転研削動作をしながら同時に垂直加工方向の振動を行うことにより、その合成運動はセラミックスの工作物上で、間欠的衝撃加工力となって工作物面に斜めに加えられることになる。

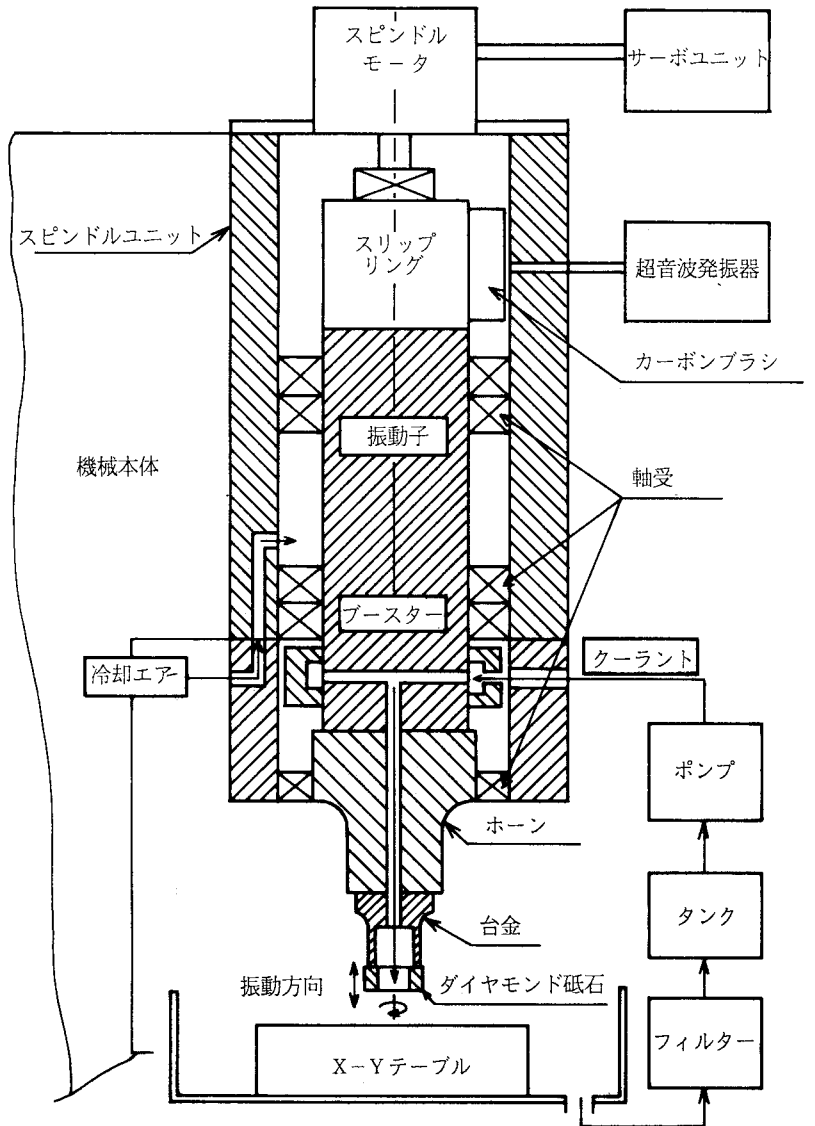


図4 超音波振動研削盤の構成

(2) 超音波研削の特徴

上記(1)で述べたように超音波研削は砥石の振動衝撃が加わった間欠研削加工である。図5に示すようなコアリング砥石で穴あけ加工を行う場合、砥石加工面上の一点をとってその運動をみってみる。外径をφ10、内径をφ8の肉圧1mmのコアリング砥石で、超音波複振幅30μm、周波数20KHz、毎分3000回転で加工を行うとすると、砥石周速度と超音波振動速度はほぼ等しくなる。したがって周速と超音波によ

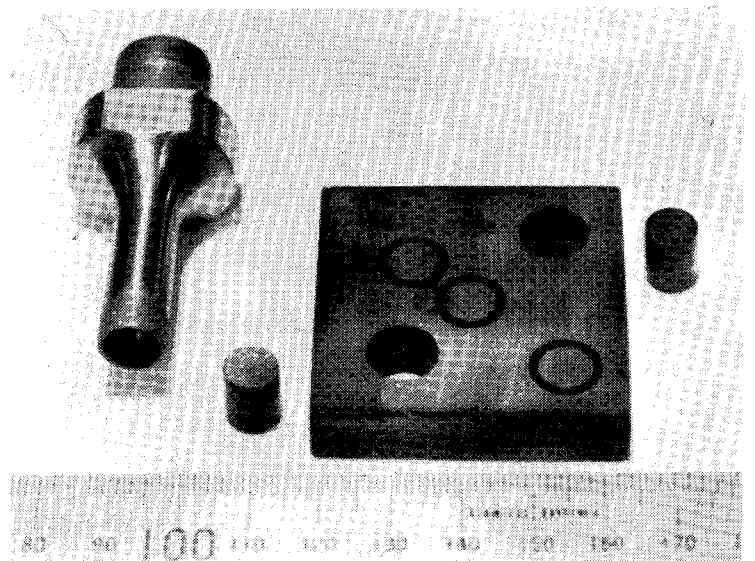


図5 コアリング砥石と加工例

る速度との合成加速度はほぼ2倍となって加工力に寄与することになる。この超音波による衝撃は砥石一回転中に400回加えられ、約70 μ mおきに衝撃が繰り返されることになる。

また逆のいいかたをすれば、砥石の先端は一回転中に400回工作物から離れる瞬間が生じることになる。この間に生じる隙間を通して、研削液の流れがよくなり、加工破砕物の排出がよく行われたりして、砥石刃先の冷却および摩擦力の低減が良好になる。したがって超音波研削は通常の研削にくらべて、加工能率が向上し、研削温度が下がる。その結果、工作物の残留応力が小さくなり、同時に砥石の寿命も伸びるなどの利点がある。そのほかに超音波衝撃によるダイヤモンド刃先の尖鋭化が砥石の切れ味をよくする利点も考えられる。

平面研削盤の ϕ 200程度の砥石の外周で超音波研削を行う場合は、砥石の径方向振動周波数を20KHzとし、複振幅10 μ m、毎分1000回転で研削をするとすれば、砥石の周速と超音波振動の速度とは一桁以上異なってくる。この条件でアルミナを溝加工したときの背分力方向の研削抵抗は、超音波振動ありのときはなしのときの40%減となる。この場合は超音波振動による衝撃破砕効果はほとんど期待できず、わずかに引掻き効果が増す程度であるが、研削抵抗が低減したのは、砥粒密度が高い刃先に対して、上記研削液の流れ、加工破砕物の排出などが良好になったことが寄与していると思われる。

2. 超音波研削装置の構造

(1) 装置の構成

一般に超音波研削装置は図.1に示す研削装置本体部分と、図.2に示す超音波発振器部分から成り立っているものが多いが、必要に応じて図3に示すようなモニタリング装置が付属する場合もある。

(2) 機械装置本体部分

超音波研削を行う機能的部分はここにほとんど集約されているが、説明の便宜上機能別にわけて述べる。

①スピンドルユニット

図4の中央の部分をスピンドルユニットといい、超音波振動を発生し、その振幅を拡大してダイヤモンド砥石に振動を伝達する機能と、回転する機能とを備えた、いわば超音波研削装置の中心部ともいうべき部分である。

超音波振動子は超音波発振器より超音波周波の電気エネルギーを受けて、縦方向に伸び縮みの振動を発生し、超音波ブースター、超音波ホーンで振動振幅を拡大して、先端のダイヤモンド砥石に縦方向の振動を与える。超音波振動を伝達し、かつ、縦方向および横方向の荷重に耐えるために、これらの超音波振動系はねじでかく接合されている。さらに回転を行うため2ヶ所の軸受でスピンドルユニットに支持され、スリップリングの上部のカップリングを通してスピンドルモータに接続されている。研削液はブースター支持部の下部に取り付けた回転シール部のジャケットから、ブースターおよびホーンの中心部を通して砥石中央穴より研削部分に供給される。この研削液は砥石の摩擦抵抗を低減し、破砕粒の排出を行うと同時に、砥石、ホーン、ブースター、の冷却も行っている。超音波振動子の冷却には、スピンドルハウジングの側面より空気を流入し、スピンドルモータの回転

に伴って排出し、放熱効果を上げるような仕組みを採用している。

超音波スピンドルは精密加工を行うため、回転軸の芯ぶれを極力低減するように製作されている。したがって砥石の取付け時に入念に芯出しを行う必要があり、新しい砥石を取り付ける時はツルーイングを行うことが望ましい。加工時も機械の許容荷重（縦、横ともに）以内で使用し十分な注意をする必要がある。

② 装置本体部

スピンドルユニットが上下動し、加工XYテーブルが前後左右に動きを行うための機構を装備した、立軸形研削盤に似た構造である。スピンドルユニットは架台のコラムに沿って上下し、その送りはZ軸制御用モータによってなされる。XYテーブルも各々に駆動モータを有し、必要に応じて更にXYテーブル上に定圧加圧装置を載置したり、回転加工台を取り付けたりして、各種加工要求に対応することがある。

セラミックスの加工で比較的要求が多いのは、穴加工、溝切り加工、平面加工などであり、三次元加工を含めてCNC制御盤で設定ができるが、砥石の切れ味の低下や加工負荷の変化に対応して能率よく加工を行うためには次に述べるモニタリング装置と連動した適応制御が必要となってくる。

研削液はXYテーブルの下部に集められ、フィルタを通してタンクに回収される。再度ポンプによって圧送され、クーラントでブースタ、ホーン砥石およびポンプ加圧時等の発熱を取り除いてから、スピンドルユニットの回転シール部のジャケットに供給される。（図4参照）

(3) モニタリング装置

超音波スピンドル内の振動系の動作を監視する装置で、超音波周波数、振動振幅、振動子電気入力等をモニタリングして、振動系の負荷状態を判断し、CNC制御盤に速度制御の指示を行い、最適加工状態を維持するための装置である。周波数、振幅、入力の三つの値は%表示のパネルメータで各々読み取ることができる。

(4) 超音波発振器

超音波振動子に供給する高周波の電気エネルギーを発生する装置で、商用交流電源を超音波周波数の高周波電力に変換する機能を果たしている。

超音波振動系は負荷の状態、たとえば研削砥石の形状、大きさ、および加工圧などの変化によりその共振周波数が増減する。この変化に追従して常に機械振動系を能率よく振動させて、砥石の先端の振幅を最大に維持しなければならない。この機能を一般に共振周波数追尾といい、ほとんどの加工用超音波発振器がこの機能を備えている。

高周波出力の最終段回路にはスイッチングトランジスタを採用しているものが多い。超音波振動子は電気ひずみ振動子のボルト締め形のものが多いから、振動子供給電圧は数100ボルトと高電圧になるので、取扱いには注意を要する。

3. 加工理論

(1) 超音波による効果

超音波による振動衝撃力がどのくらいの圧力を工作物表面に及ぼすかをみてもみる。圧力 P (dyne/cm^2) は $P = \rho c \omega a$ (3.1) で表わされる。ここに、 ρc は媒質によって決まる値で音響インピーダンスと呼ばれ、ホーン材質としてアルミニウムをとると $1.7 \times 10^6 \cdot \text{g}/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$ となる。 ω は角速度で $2\pi f$ 、振動周波数 f として 20kHz とする。 a は負荷時の振動振幅で $10 \mu\text{m}$ とすると、 P の最大値は約 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ となる。これは単位面積あたりの力であるから個々の砥粒の接触面積からみれば、おそらく ton オーダーの力が瞬時に加えられることが考えられる。この力を破砕力として利用するためには砥石の周速は ωa とほぼ等しくとらなければならない。1.(2)項で述べたように $\phi 10$ のコアリング砥石で毎分 3000 回転程度が適当な周速となる。

コアリング砥石の場合、とくに小径の穴加工になるほど砥石の強度を増すことが難しくなり、また周速を上げるにも精度などの関係から限界が出てくる。この場合超音波衝撃加工は最も能率的な加工方法といえよう。

同じような見地からダイヤモンド砥石のドレッシングにも超音波振動が利用されている。この場合はさらに砥石の回転数を下げて、超音波の衝撃力が十分に砥石の目直しをするようにすると、精度、輪郭ともに良好なドレッシングができる。

(2) キャビテーションによる効果

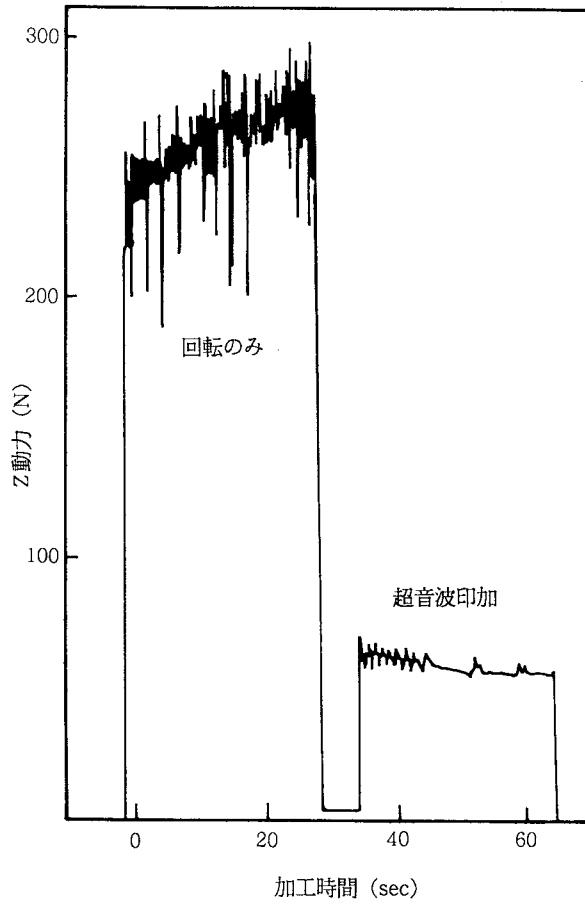
超音波振動は砥石に振動衝撃力を与える以外に研削液にも振動を伝達する。実際の研削液の流れは、砥石中心部の穴から砥石と被研削物の隙間を通して排出されるのであるが、いまおおよその目安をつけるため、超音波振動は砥石の端面から広い水中に放射されるものとして、どの程度のエネルギーが通過するかをみてもみる。音波の強さ I (W/cm^2) は $I = \frac{1}{2} \cdot \rho c \omega^2 \cdot a^2$ (3.2) で表わされる。

ここで、 ρc は水とすると、 $1.4 \times 10^5 \cdot \text{g}/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$ となる。 ω と a は(3.1)式の場合と同じ値をとって計算すると、 I は約 $200\text{W}/\text{cm}^2$ となる。通常使用される水中に超音波を放射した場合、キャビテーションを発生するのに必要な音波の強さは、 20kHz で約 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ であるから、砥石周辺の研削液の中では強烈なキャビテーションが発生していることになる。

キャビテーションは空洞現象ともいわれ、超音波の振動の正圧負圧が交番して液に加えられるとき、この負圧によって液体中に空洞が発生し、それによって生じた気泡が振動しながらつぶれるとき衝撃波を発生する。この衝撃力が研削液内部に大きな力を与え、砥石表面の加工切屑の除去を行ったり、さらに加工破砕物の排出を促進する働きを行う。したがって砥石は常時キャビテーションによるドレッシングを受けながら加工を行うという利点がある。

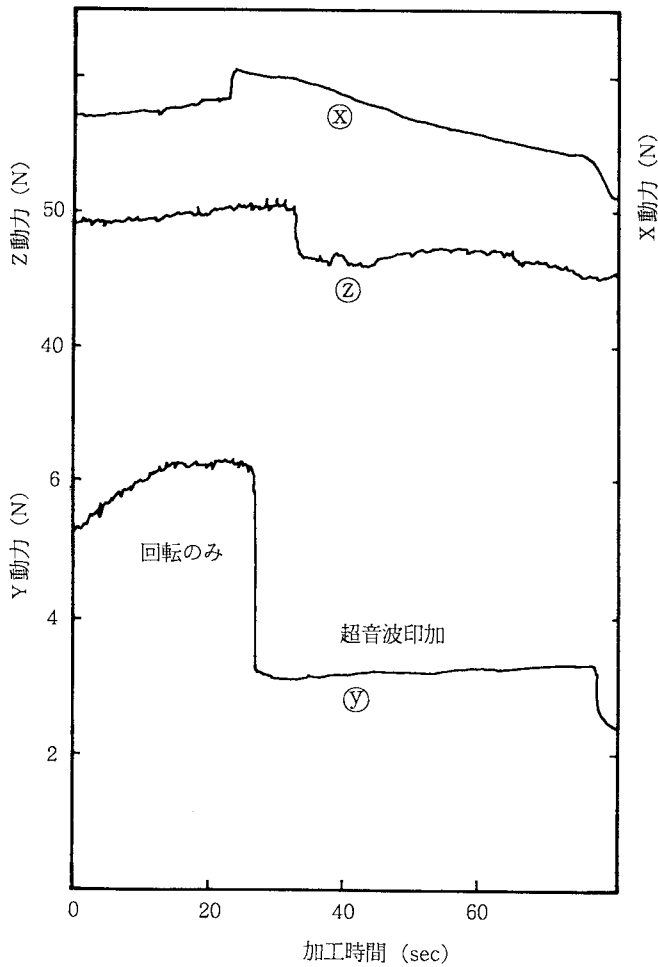
(3) 研削抵抗

今まで述べてきたように超音波研削は、砥石による研削加工に超音波の衝撃を加えた、いわばハンマリング効果を加えた研削加工である。しかもこのハンマリング効果が有効に寄与するセラミックス、ガラス等の中でも、とくに硬い炭化珪素 (SiC)、窒化珪素 (Si_3N_4)、ジルコニア等の加工に効力を発揮する。しかも砥石周速と振動速度とがほぼ等しいときに加工能率がよいので、むしろ一般研削より回転数を下げた方がよく、したがって発熱が少なく砥石の寿命も長くなる。またキャビテーション効果および振動



工作物：常圧焼結アルミナ
 工 具：SD-100-100-M (m)
 $\phi 10 \times \phi 8 \times 5H$
 回転数：3000rpm
 送り方式：オシレーション

図6 研削抵抗の低減例
 (コアリング加工)



工作物：常圧焼結アルミナ
 工 具：SD-100-100-M (m)
 $\phi 12 \times \phi 10 \times 5H$
 回転数：8000rpm
 切込み：0.3mm
 送り：Y方向へ10mm/min

図7 研削抵抗の低減例
 (ミーリング加工)

によって生じる瞬時的な隙間効果により、研削液の循環が良好になって冷却効果が上がり、かつ破碎物の排出もよくなる等の利点がある。平面研削盤のように砥石径が大きい割には振動周波数を大きくとれない場合でも（現状技術では難しい）1.(2) に述べたように同一除去量で背分力研削抵抗が40%低減するから、超音波振動の効果は明白であるといえよう。

コアリングの場合のZ軸方向の軸力をKISTLER動力計を用いて超音波振動ありなしの場合を比較すると図6のようになる。図6から超音波なしの場合序々にZ軸力が増加して270N程度まで上昇するが、超音波を印加すると65Nと約1/4に減少することがわかる。

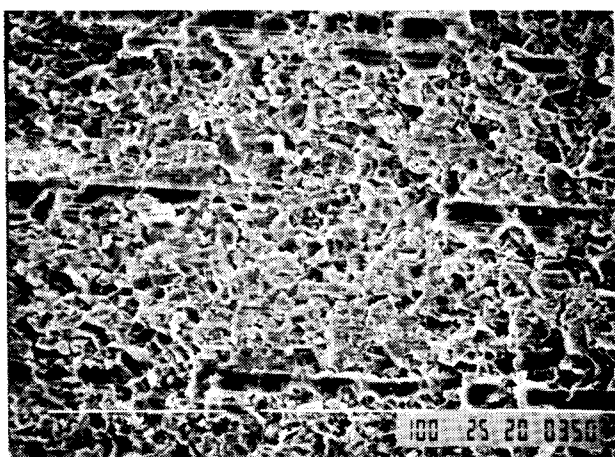
ミーリング加工の場合は図7に示すようにY軸方向（加工方向）の軸力が1/2に減少する。このデータは砥石の肉厚がうすく横送り加工に適した工具とはいえないが、横送り加工時にも超音波印加時に研削抵抗が低減するという例として示した。

(4) 研削加工面

超音波研削時の加工面にもハンマリング効果によるとみられる表面品質が得られている。純度99.4%の常圧焼結 α -アルミナ、硬度Hv1600を、粒度#100、外径3mm、内径2mmのコアリング砥石で、周速30m/minでコアリングした場合の加工面を、超音波ありなしについて、走査型顕微鏡写真で示す。

図8は研削端面の写真で、(a)は超音波研削時、(b)は一般研削時（超音波なし）の状態を示す。一般研削の写真では中央に斜めに2本の研削条痕が見られるが、超音波研削ではそのような条痕は認められない。条痕部分を拡大したのが図9(b)でアルミナの結晶粒が押しつぶされたような尖鋭な谷間が見られる。このような一般研削の場合には、塑性流動に伴う研削条痕が認められるが、超音波研削の場合には認められないので、ハンマリング効果による結晶粒界近傍での破碎がスムーズに行われているものと推定される。したがって加工変質層という面でも、超音波研削は有利に働いているといえよう。

図10はコアリング砥石外周による研削側面の状態を示したもので、前と同様(a)は超音波研削、(b)は一般研削である。この場合も一般研削時に見られる、塑性流動に起因すると考えられる研削条痕が(b)には認められるが(a)には見当たらない。部分拡大を行ったのが図11で、(b)には擦過痕がみられる。超音波振動はこの面では垂直方向に作用しているが、とくにその方向の条痕も見られない。



(a) 超音波研削

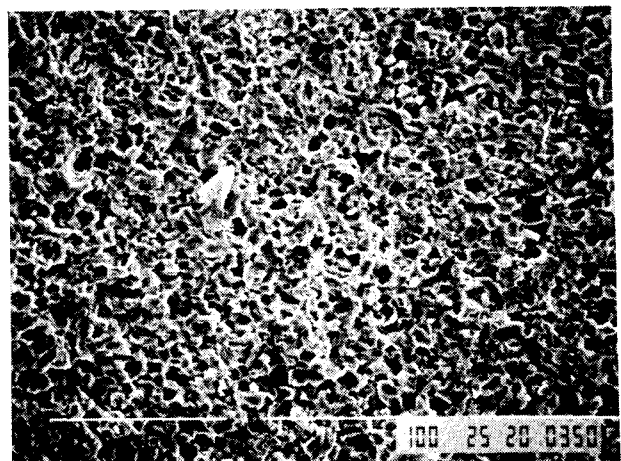
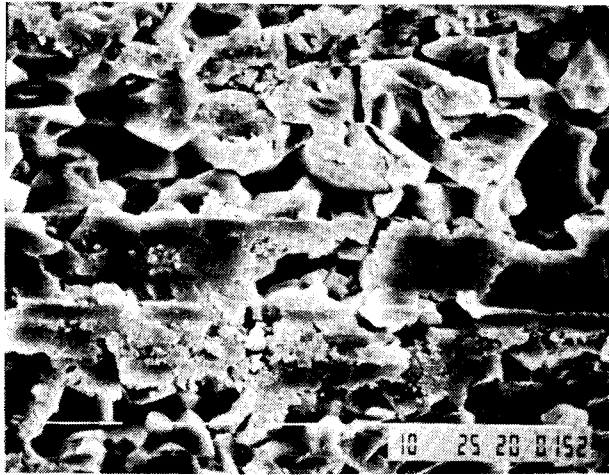
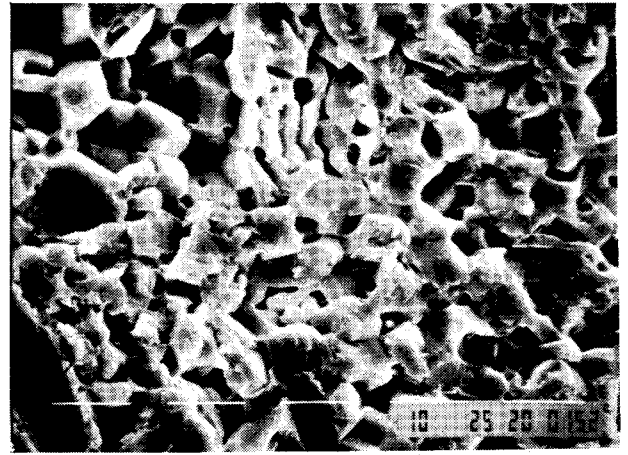


図 8

(b) 一般研削

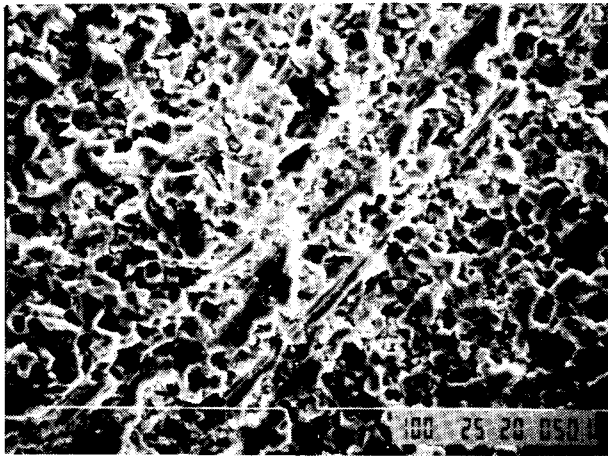


(a) 超音波研削

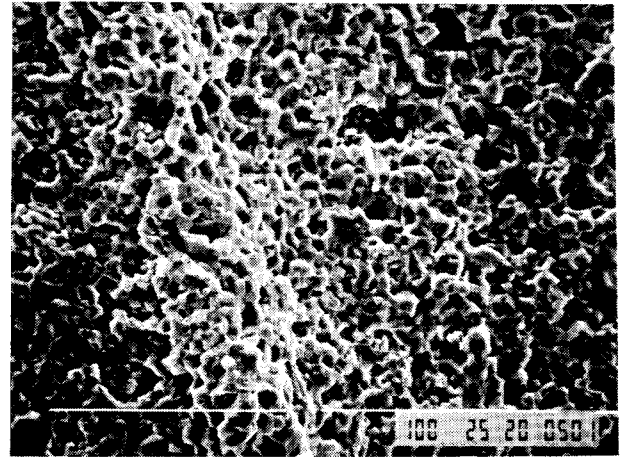


(b) 一般研削

図 9

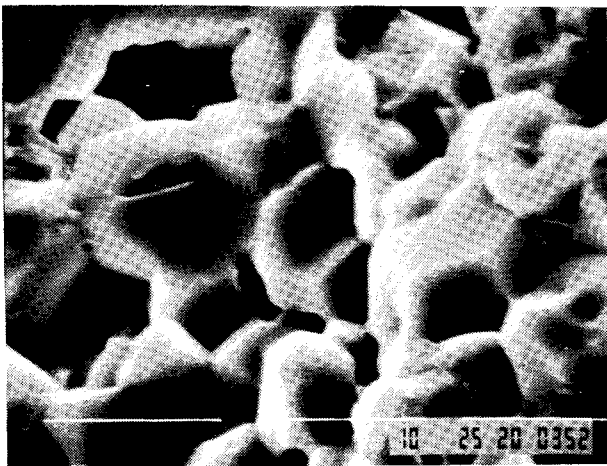


(a) 超音波研削

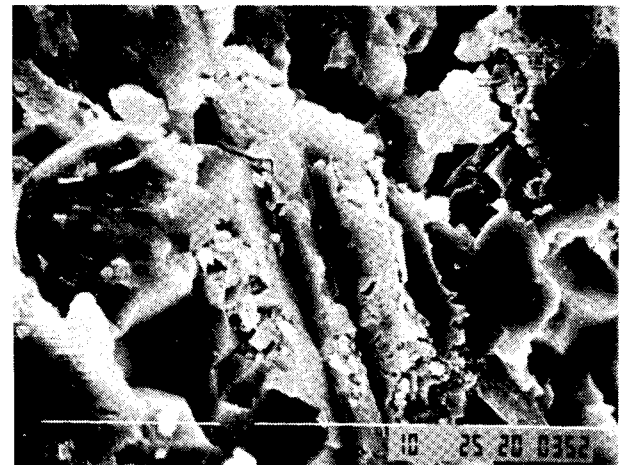


(b) 一般研削

図 10



(a) 超音波研削



(b) 一般研削

図 11

また破碎面の凹凸の様相が平均的に (a) の方が (b) より細かいように見られるが、これが超音波振動とどのような関係にあるかは結晶構造を含めてなお検討を要する問題である。

(5) 曲げ強さ

各種セラミックスの板状の試験片による曲げ強さおよび表面あらさについて、超音波研削の及ぼす効果の測定結果を示す。試供セラミックスの種類は表1に示す4種類で、試験片サイズはすべて4mm×40mm、厚さ3mmとし、その片面に0.1mmの切込みで研削加工を施したものを使用した。

研削用砥石はSD-230-100-Mで、外径30mm、内径26mmのコアリング砥石を、周波数20KHz、複振幅30μm、5000rpmで回転させながら、毎分25mmの速度で横送り加工したものと、超音波を印加しない他は同じ条件で加工したものと2種類を各試料ごとに各々作成した。

これらの試料をJIS R1601にしたがって、4点曲げ強さ σ_{b4} を測定し、超音波研削と一般研削（超音波なし）との比較を行った。また曲げ試験の際は、研削面に引っ張り応力がかかるように行った。結果を図12に示す。いずれの材料についても超音波研削を行った方が強度が高い。アルミナについては走査型電子顕微鏡による表面観察から、粒径が大きく粒界で破断しているため曲げ強さが、他の材料より低いことが確認された。

参考までに各種試料の研削加工時の曲げ試験面方向の研削抵抗 F_z を図13に示す。各種素材の靱性および脆性によって研削抵抗の低減には差が見られるが、超音波印加時の効果は明白である。この効果が曲げ強さについても寄与しているといえよう。

(6) 定圧研削

一般にアルミナは研削開始圧力が低いので、ダイヤモンド砥石は比較的長く研削能力を維持するが、窒化珪素、炭化珪素等の材料では、研削開始から

表1 各種セラミックス試料

試料	規格	Hv < GPa >	E < GPa >
Al ₂ O ₃	99%, 0.6μm	14.7	390
SiC	S S C 201	22.9	470
Si ₃ N ₄	S S N 220	15.4	280
ZrO ₂	Z201	12.3	200

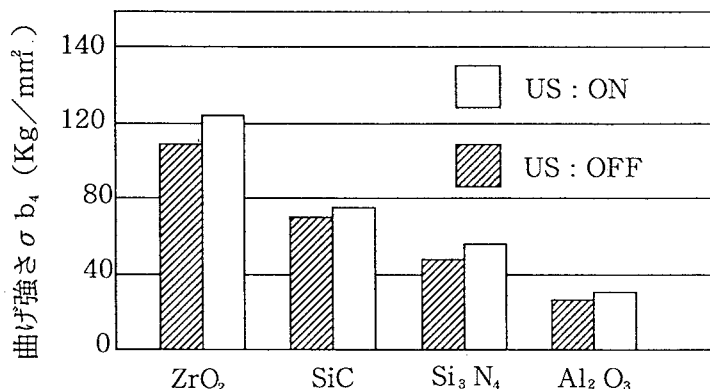


図12 各種材料の曲げ強さ

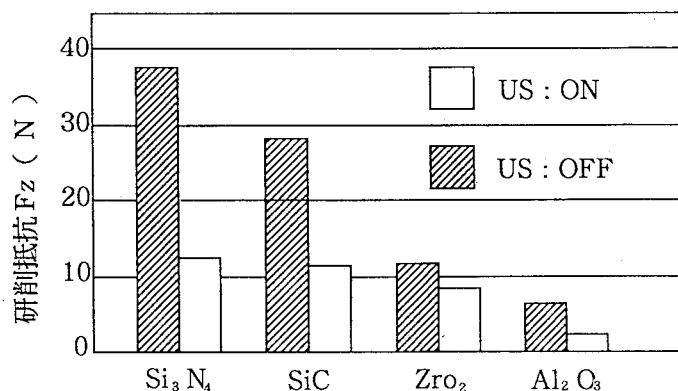


図13 各種材料の研削抵抗

わりと短時間で摩耗による接触点での面積が増え、研削圧力が低下し、ついにはすべりを行うのみで研削能力はなくなってしまう。定圧研削加工を行うと、砥石の摩耗が低減され、とくに硬い材料でも研削加工が容易になる。定圧加工用機構としては、エアージャケット駆動のダイセット上に工作物を取り付けたり、天秤式加圧機構台上に工作物を取り付けたりするものが用いられている。図14にエアージャケット駆動の定圧加工台を示す。

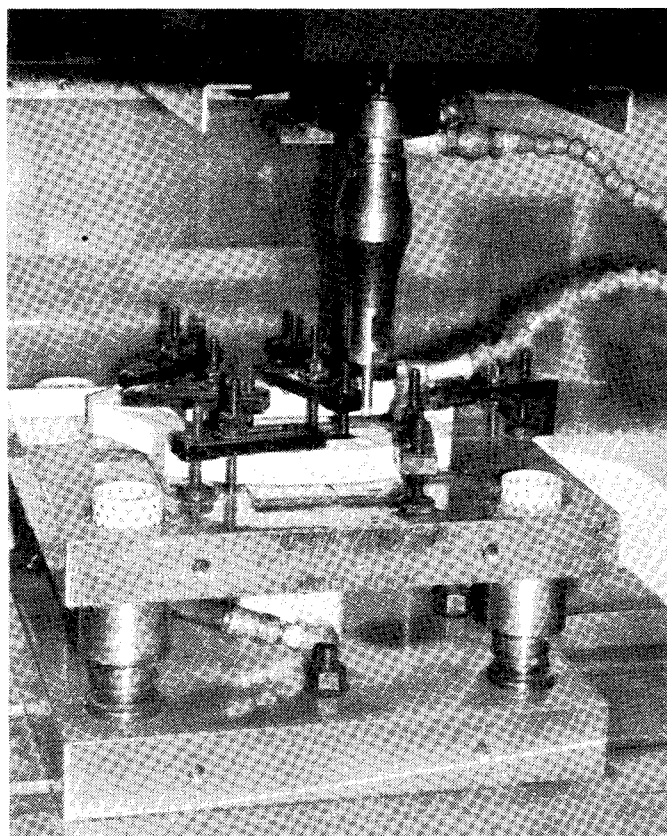


図14 定圧加工台

4. 加工方式

研削砥石は超音波振動系として作動するので、駆動周波数を決めると、その周波数で研削作業に有効な共振モードを持った砥石を製作しなければならない。したがって砥石の形状寸法には

ある程度の制約を受けるが、現在使用されている実例をもとに、いくつかの加工方式について述べる。

(1) コアリング

超音波振動周波数を20KHzとすると、コアリング工具の外径は60mm程度が最大限となり、それ以上の径では好ましくない振動モードが発生し易くなる。砥石の肉厚は薄いほど加工面積が小さくなる利点があるが、1mm前後が多い。最大加工深さは、外径が $\phi 2 \sim \phi 5\text{mm}$ で25mm、 $\phi 5 \sim \phi 10\text{mm}$ で75mm、 $\phi 10 \sim \phi 25\text{mm}$ で190mm、 $\phi 25 \sim \phi 30\text{mm}$ で75mm、 $\phi 30\text{mm}$ 以上では25mmを目安にしている。

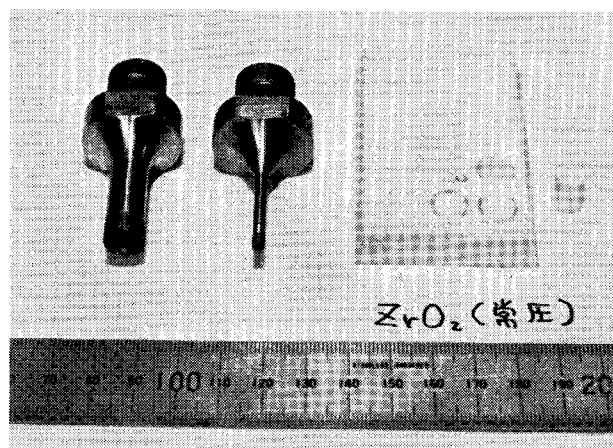


図15 コアリング工具と工作物（ジルコニア）

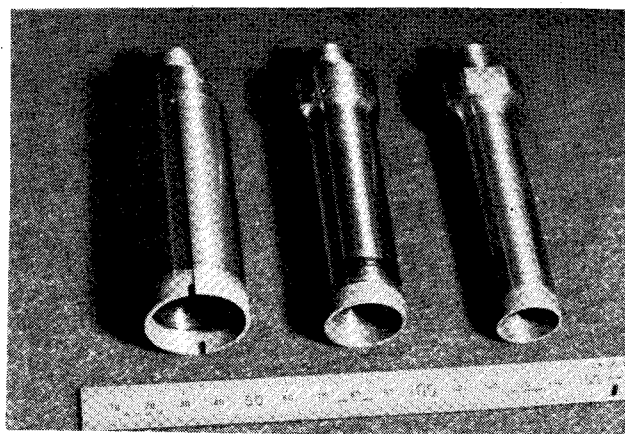


図16 コアリング工具

図15はホーン先端取付型のコアリング工具2種類と、それを用いてジルコニアを加工したサンプルを示す。超音波ホーンはあらかじめ工具形状と寸法を考慮に入れて製作しており、工具を取り付けたとき動作共振周波数範囲で振動する。図16はホーン、工具一体型で、超音波ブースタとのねじ接合部に直接取り付けるタイプで加工外径25mm以上または深穴用に用いられる。

コアリング加工では、下穴があらかじめあけられている場合を除いて、工具先端がポケットに入った状態で加工が進められるので、コアリング工具の中心部から、工具内径部分、加工端面、工具外径部分を通して流れる研削液は、砥粒間隙を通過するだけに、加工穴が深くなる程流れにくくなる。したがって研削液ポンプの吐出圧力を上げたり、工具先端部分をセグメント上にしたり、さらに深穴用ではホーン側面にも溝を切ったりして、研削液と破碎粒の排出をよくするようにしている(図16左端ホーン参照)。図17に長穴加工中の状況を示す。

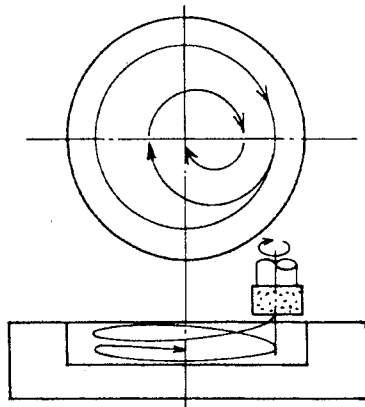


図18 ヘリカル・スパイラル加工概念図

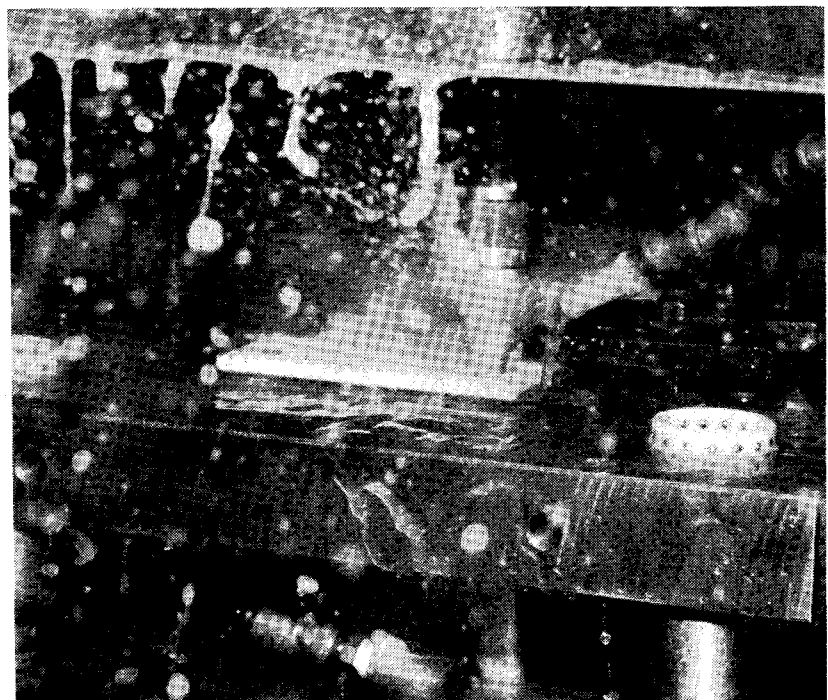


図17 長穴の加工中の状況

(2) 座ぐり穴加工

コアリング砥石の肉厚を厚くして横方向の剛性を持たせ、XYテーブルの動きを含めて、砥石端面がヘリカル・スパイラル運動をするように制御すれば、コアリング外径よりも大きい径の座ぐり穴加工が能率的に行える(図18参照)。

砥石外径のままのざぐり穴加工(Z軸方向のみ)を行うには、砥石加工端面に放射状の溝加工をして、研削液および破碎粒の排出を良好にしてやる必要がある。

またあまり加工端面積が大きいと、振動振幅が低下して加工能率が著しく下がる。これをできるだけ防止するように、砥石加工端面の放射状の溝幅を広げて接触面積を減らして振動系の負荷を最適にとることが望ましい。図19にヘリカル・スパイラル加工中の状況を示す。

(3) 内面研削

内面研削は比較的小さい径の研削工具でストロークの長い研削を行うから、超音波研削に適した加工法である。普通、砥石と工作物とは逆回転をさせる。したがって工作物回転用の治具が必要である。図20は内面研削用ダイヤモンド砥石で、外径は12mm、有効直線部分の長さは70mmである。図21はジルコニアのパイプ内面を研削している状態で、パイプ内径は19mm、砥石外径は10mmで砥石とパイプは互いに逆方向に回転している。

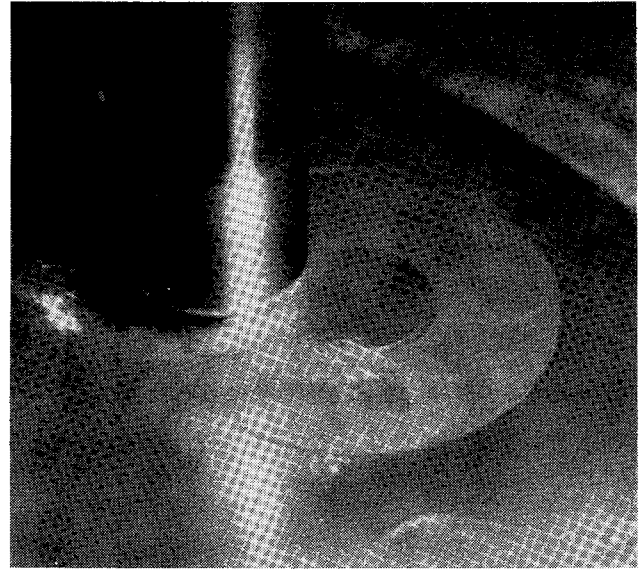


図19 ヘリカルスパイラル加工

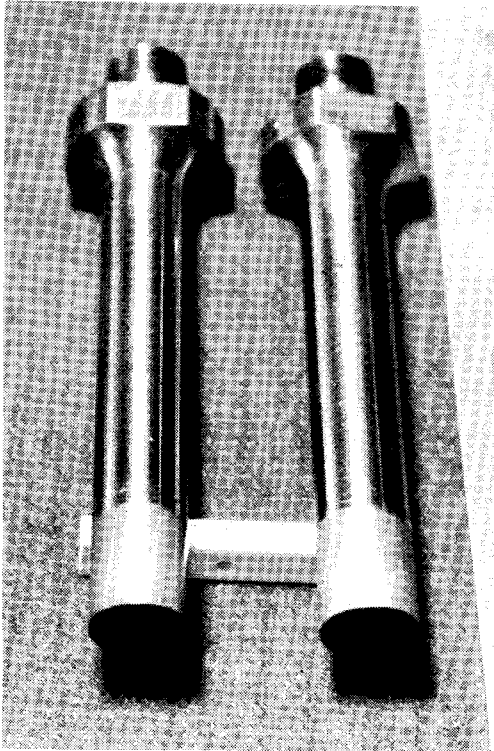


図20 内面研削用砥石

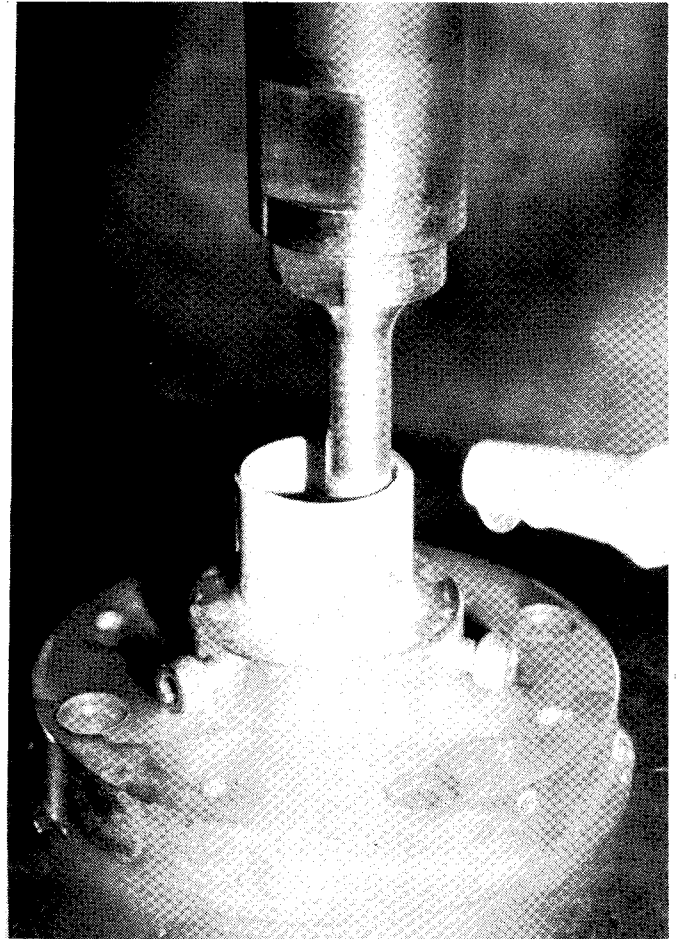


図21 ジルコニアパイプの内面研削

(4) 横送り加工

フライス盤によるミーリング加工と同様な加工がカップ砥石を用いて行える。図22に外径60mmのカップ砥石一体型のホーンを示す。砥粒はダイヤモンドでボンド材は鋳鉄である。その右手は、常圧焼結

アルミナを横送り加工したもので、60mmの溝巾の中央部2ヶ所の穴はコアリング加工したものである。

横送り加工は横送り方向の力が垂直方向よりかかるので、砥石の剛性を大きくするため、ホーン砥石一体型とした。

加工幅が狭い場合は、コアリング砥石の肉厚を厚くして用いる。図23に外径10mmで肉圧3mmのエンドミル形砥石を示す。図24は外径30mmの肉圧3mmの砥石で、横送り加工中の状況を示す。



図23

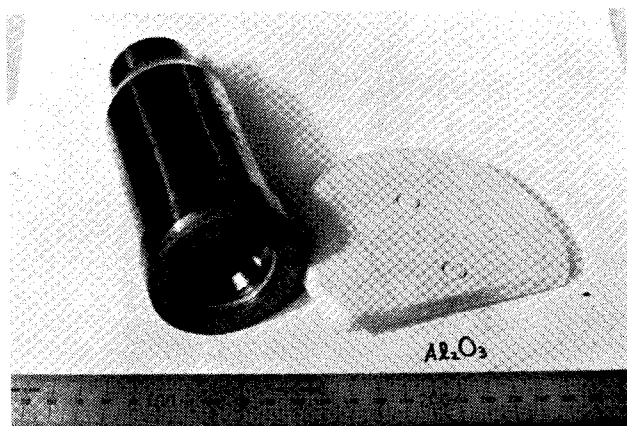


図22 カップ砥石（φ60）および
アルミナ横送り加工品

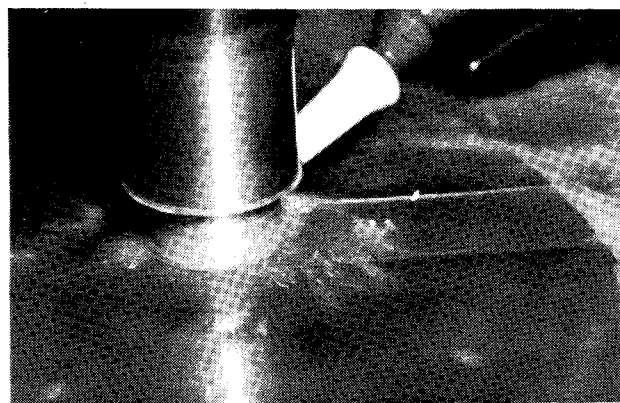


図24 外形60mm砥石による横送り加工状況

(5) 溝加工

アルミナに0.5mmの深さの溝を切ったときに同じ加工量で、超音波ありとなしの場合の研削抵抗は、主分力方向で15%減、背分力方向で40%減と超音波振動をさせた方が低減している。したがって超音波印加時には両分力の配分の割合が変化して、工作物の破壊除去のメカニズムが変わることになる。これは研削点の温度低下と、砥石の寿命の延長に利するといえる。

さらに加工速度を2倍にすると、超音波印加時には主分力、背分力ともに約2倍になる。このことは超音波振動による加工メカニズムの変化が負荷2倍までは維持できたということで、砥石の靱性の許容範囲を拡大できることに超音波の有意性があるといえよう。図25に常圧焼結窒化珪素に溝加工したものを示す。

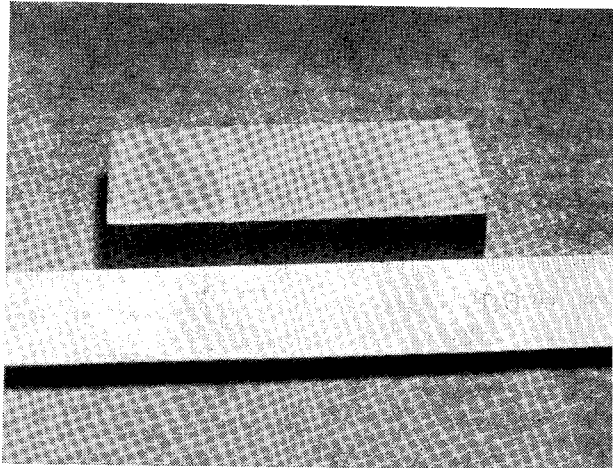


図 25 Si_3N_4 の溝加工

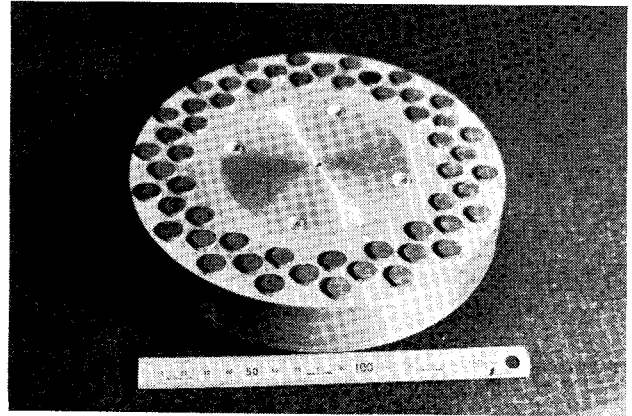


図 26 平面研磨用円板

(6) 平面研磨

図26に示すような径方向に振動する円盤にダイヤモンド砥石のペレットを周辺近くに埋め込んだ工具が平面研磨用に用いられる。この円板を回転させながら水平移動するとき、円板は径方向に伸び縮みをするから表面の砥石は、加工方向と平行な面方向に振動することになる。

図27は平面研磨の状況を示す。工作物は、定圧加圧用治具上に取り付けられ、さらに回転治具の上にセットされる。平面研磨の面積がダイヤモンドペレットの配置寸法よりはみだす場合は、研磨用円板の回転軸と工作物の回転治具の回転軸とをずらして行う。両軸の回転方向は研磨ムラが少ないように考慮すれば正逆いずれでもかまわない。

砥石の平面方向の振動により破碎粒の排出が良好になり、研削液の流れがよく、かつ砥石の目づまりが防止できる。また振動の効果としての砥石の摩擦抵抗も低減する。振動振幅を大きくすると、加工能率は上がるが、超音波振動の様相が研磨面上に現われることがある。

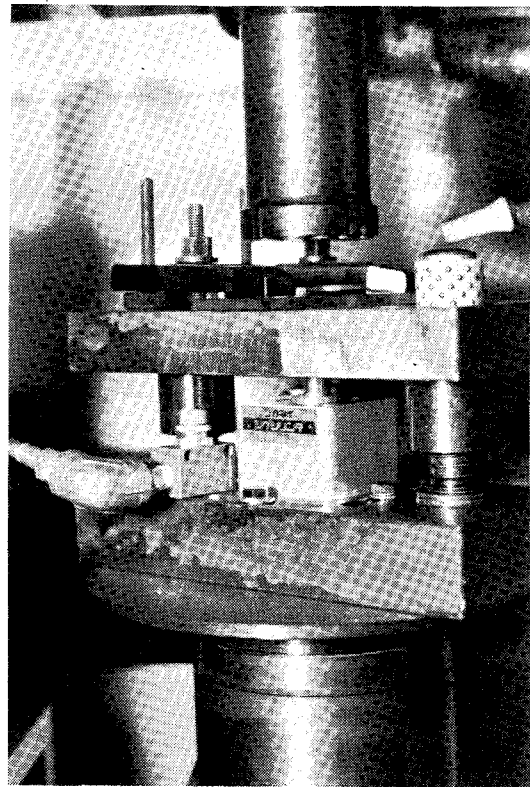


図 27 平面研磨状況

(7) 三次元加工

図 28 に三次元加工の例を示す。直径10mmのエンドミル工具を三次元制御して、アルミナを加工したものである。座ぐり加工の項で述べたヘリカル・スパイラル加工も三次元加工であるが、加工例はあまり多くない。

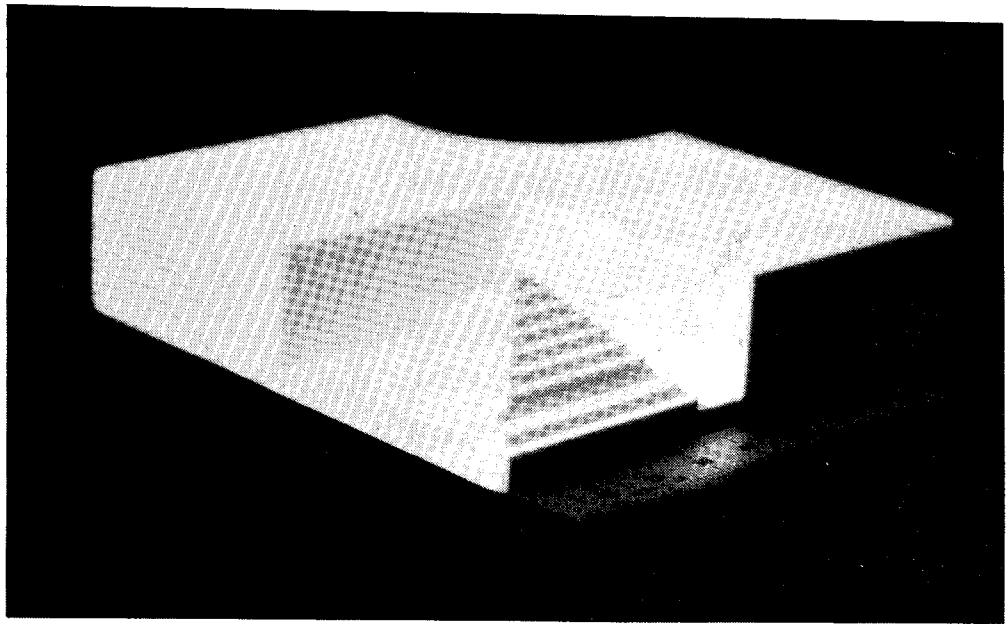


図 28 アルミナの三次元加工例

ボールエンドミルのダイヤモンド工具を用いて、半球上座ぐり加工を行った例では、直径64mmで、真球度0.03mm程度が得られている。なお工具径は12mmのものを使用した。

5. 加工特性

超音波研削加工においては、対象とするセラミックスの材質、加工条件、砥石の種類等で除去速度が異なりまた加工品質も変わってくる。したがって作業にあたっては、最適な加工条件を見つけることが重要である。セラミックスは材質および焼結条件などにより加工特性が異なってくるので、比較的材料のムラの少ないソーダガラスを試料としたコアリングのデータで一般的な加工特性について述べることにする。

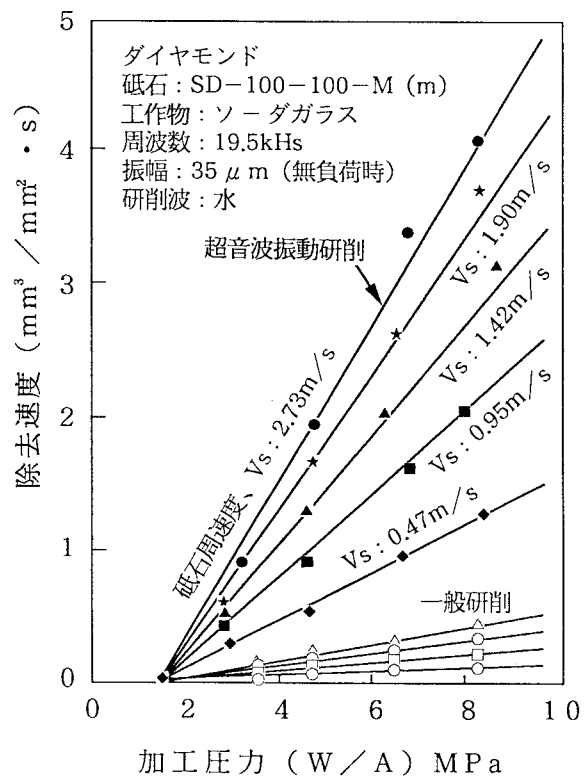


図 29 加工圧力と除去速度との関係 (海野、ファインセラミックスの高エネルギー加工、図 29~34)

(1) 加工圧力と除去速度

図29に加工圧力と除去速度との関係を示す。加工圧力が1.3MPaから加工が立ち上がり、加工圧力の増加とともに、除去速度が直線的に上昇している。この傾向は他のセラミックスでも同様で、異なっているのは、加工開始の加工圧力と直線の上昇の傾斜角度である。

図29の下部に一般研削として超音波振動を与えないで、他の加工条件は同様で加工した除去速度を示しているが、超音波研削の効果が顕著に表われていると見てよい。他のセラミックスにおいても同様な効果が見られるが、特に脆性の高い材質ほどこの傾向は著しい。

(2) 振動振幅と除去速度

図30に砥石先端の複振幅と除去速度との関係を示す。実際の加工状態では砥石先端は工作物に衝突して、その運動は正弦振動が途中で途切れたような動きとなるので無負荷時の複振幅で示してある。実際の動きのストロークは無負荷時振幅にほぼ比例するとみて差し支えない。

除去速度は振幅の増加とともに、直線的に上昇する。したがって加工能率の面からは、超音波振動系の持つ最大の能力をフルに使って振幅最大で加工するのが望ましいことになる。ただし研削液の循環や破碎物の排出が悪いときは、振幅系からみて荷が重くなるので、超音波発振器の電流計またはモニタリング装置の振動子電気入力に注意する必要がある。(モニタリング装置が付属している場合は超音波は自動停止する。)

(3) 砥石周速と除去速度

図31に砥石の周速度と除去速度との関係を示す。砥石周速が高くなるにつれて、除去速度は順次上昇するが、十分に高くなると、除去速度は一定の値に収束するような傾向が認められる。また硬度の高い工作物では、超音波研削時に砥石周速

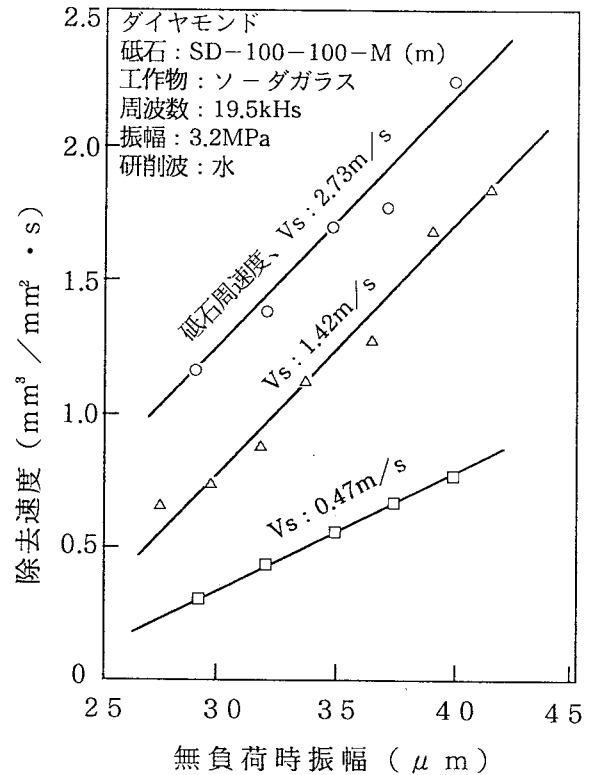


図30 無負荷時振幅と除去速度との関係

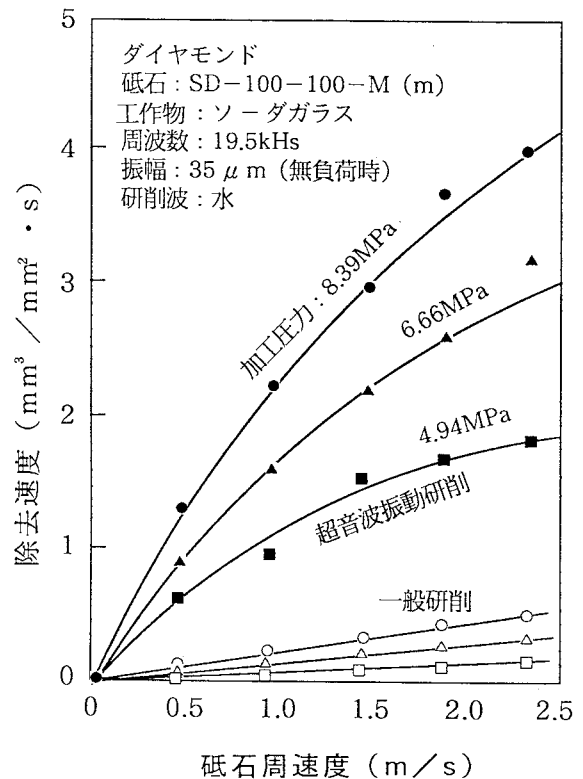


図31 砥石の周速度と除去速度との関係

の増加に伴ってある点で除去速度が最大になる場合がみられる。この場合超音波振動が与えられなければ除去速度が上昇を続けるのは図31と同様である。前にも述べた通り工作物表面に与えるから、とくに硬度の高い工作物では超音波振動速度とみあう砥石周速で最大の除去速度を示すことは充分考えられる。

比較的脆い工作物では砥石周速度による加工力が有効に作用するので、超音波による加工力との合成力がある飽和点を維持することになるのであるから、比較的硬く靱性のあるセラミックス加工の場合砥石周速をあまり高くしても、その効果はあまりないといえることになる。むしろ砥石の寿命の見地から、推奨砥石周速を提示している砥石メーカーもある。その範囲で超音波振動速度との合成力を考えて、合理的な周速で加工することが望ましい。

(4) 砥石の粒度と除去速度

図32にダイヤモンド砥石の粒度と除去速度との関係を示す。図からわかるように、粒度の高い砥石ほど、除去速度が低く、また加工圧力の増加とともに除去速度が飽和に近づく傾向がみられる。この現象は砥石の目づまりに起因し、粒度が高いダイヤモンド砥石ほど、切り屑のはげが悪く、目づまりし易いといえよう。

したがって加工能率という面からみれば、粒度の低いダイヤモンド砥石を選択する方がよいといえよう。

(5) 砥石のコンセンレーションと除去速度

図33にみられるように、コンセンレーション50の砥石は、加工圧力がある値を超えると、除去速度が急激に低下するのがわかる。これは切れ刃の目つぶれに起因するもので、コンセンレーションが低すぎると、砥粒が摩擦的の摩耗を生じ、切れ味が急激に低下するものと判断される。

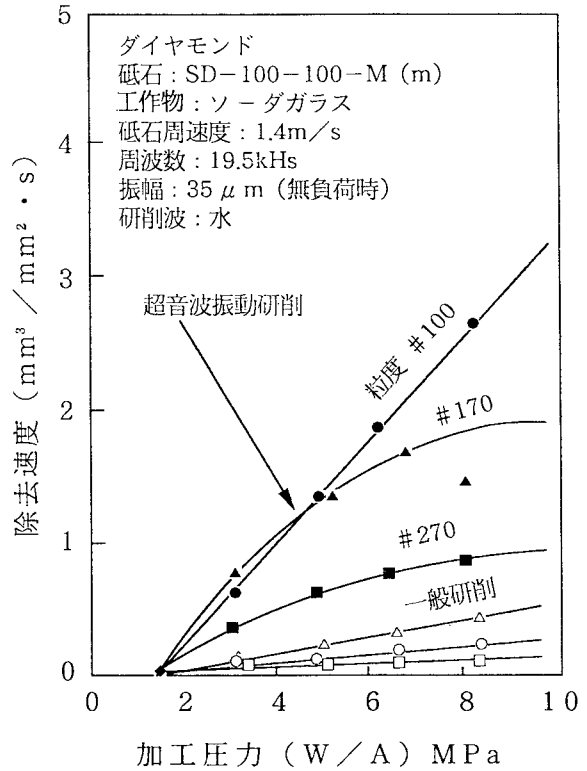


図32 砥石の粒度と除去速度との関係

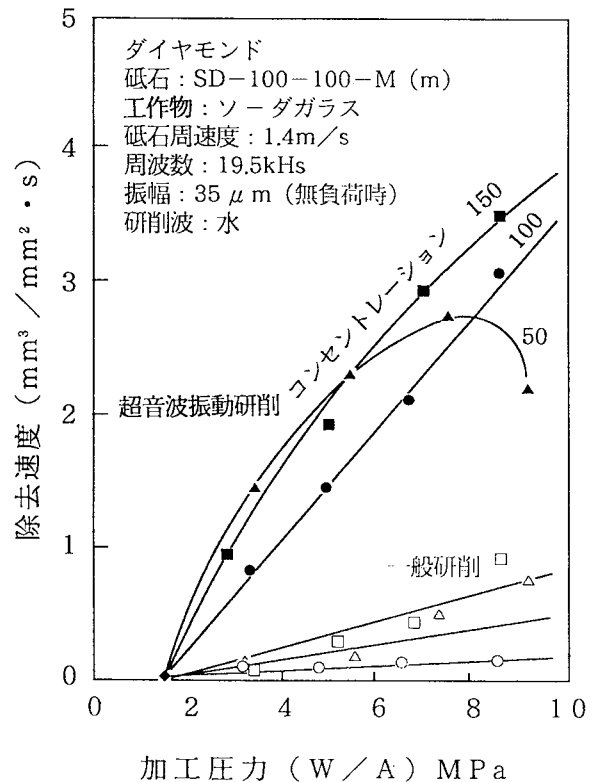


図33 砥石のコンセンレーションと除去速度との関係

またコンセンレーションが高すぎると、切り屑のはけが悪くなり、目づまりを生じ易くなるので、その限界値が存在すると考えられる。実験の範囲では、コンセンレーションが150の場合に、除去速度が最も大きくなり、また破碎粒数も当然コンセンレーションに比例するといえるので、次に述べる結合度が保持でき、かつ目づまりを起こさない範囲ではコンセンレーションの高いダイヤモンド砥石を選択することが望ましいといえる。

(6) 砥石の結合度と除去速度

図34に砥石の結合度を硬、中、軟の3種について実験した結果を示す。結合度が硬と軟の場合は、加工圧が高くなると除去速度は低下するのはわかる。

結合度軟の場合は、加工圧に対して砥粒の保持力が耐えられず、砥粒の脱落による目こぼれによって、急激に除去速度が低下すると考えられる。また結合度硬の場合は、切れ刃の目つぶれによって、徐々に除去速度が低下するのではないかと考えられる。

このような傾向はダイヤモンド砥粒の種類やセラミックスの種類との関連において吟味する必要があるが、作業目的に応じて最適結合度が存在するといえそうである。

以上の結果より、超音波研削時においては、SD-100-100-M-mを標準のダイヤモンド砥石とすればよいことがわかる。

(7) ファインセラミックスの研削特性 (海野)

ファインセラミックスの工能率機械加工

次にセラミックスの種類、すなわち加工物の材質と除去速度との関係である。この場合は、セラミックスの種類が異なると、破壊強度が異なるために研削開始圧力が変化するとともに、除去速度に差異が生じることになる。

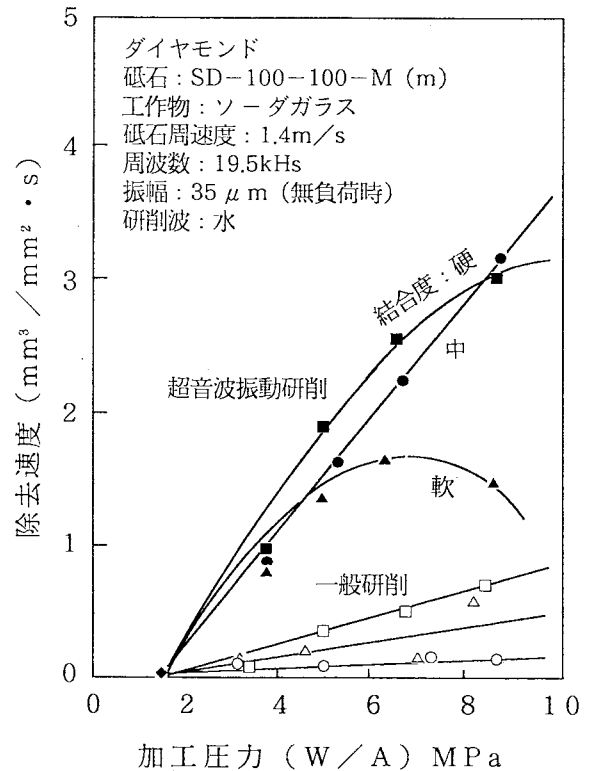


図34 砥石の結合度と除去速度との関係

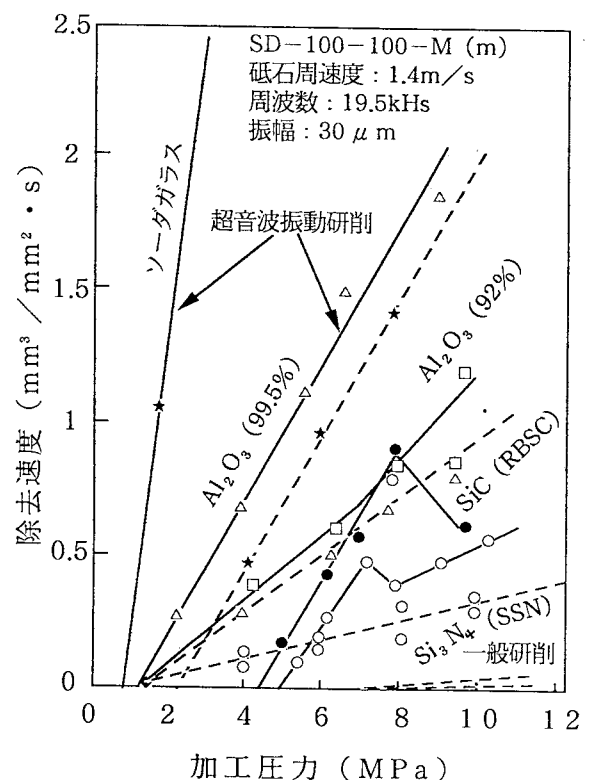


図35 各種セラミックの除去速度

図35に各種セラミックスを超音波研削した場合の加工圧力と除去速度との関係を示す。

図において、超音波を付加しない通常の研削においては、加工圧力をあげても、除去速度はほとんど高くないが、超音波研削の場合は、各種セラミックスに対し、 $0.5 \text{ mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$ から $2 \text{ mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$ という高い除去速度を示すことがわかる。そのため超音波研削は、セラミックスの加工に対し、非常に有効であるといえる。

また超音波研削時の除去速度は、工作物の材質に依存し、アルミナや炭化珪素の除去速度は高いが、それらと比較して、窒化珪素の速度は低いこと、そして超音波研削時の研削開始圧力も工作物の材質に依存し、ソーダガラスは 0.7 MPa 、アルミナは 1 MPa 、炭化珪素 (RBSC) は 4.4 MPa 、そして窒化珪素 (SSN) は 4.8 MPa であることがわかる。このように超音波研削時の研削開始圧力は、加工物の材質に依存し、窒化珪素や炭化珪素のようなセラミックスでは、 4 MPa から 5 MPa であり、ガラスやアルミナの約 1 MPa と比較して、非常に高い値を示すので、セラミックスに適用する場合には、たとえば主軸の剛性を従来のものと比較し、5倍から10倍程度高くするといったように、超音波研削装置の振動系や機械系の設計諸元を決定することが大切となる。

次にアルミナを超音波研削加工する場合の原料粉末粒径と除去速度との関係を図36に示してある。

超音波研削における材料の除去が、粒界破壊に依存すると考えれば、結晶粒径が大きいほど、切り屑が大きくなり、除去速度が高くなるといえるが、図36において、原料粉末粒径の大きなアルミナほど、除去速度が高いことがわかる。そのため一口に純度が一致のアルミナといっても、その結晶粒径によって、破壊強度が異なり除去速度に大きな差異を生じるので、注意しなければならない。

また、図37は原料粉末粒径が一定で、純度の異

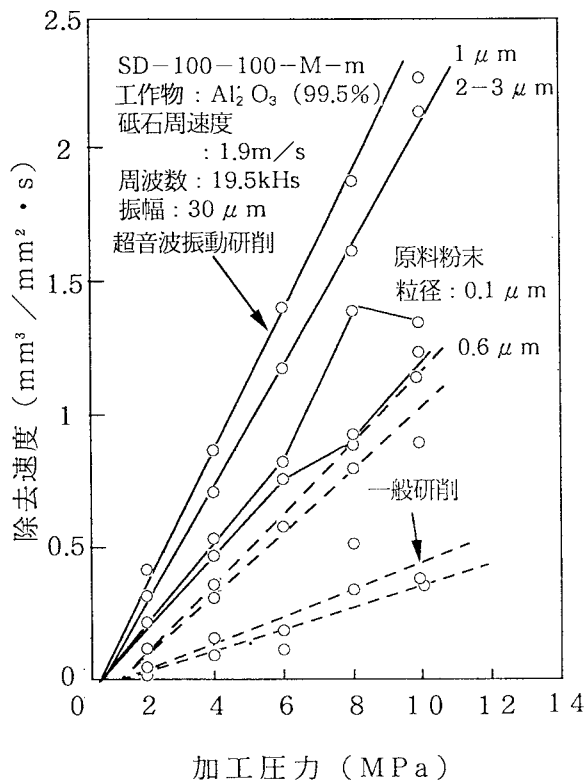


図36 アルミナの原料粉末粒径と除去速度との関係

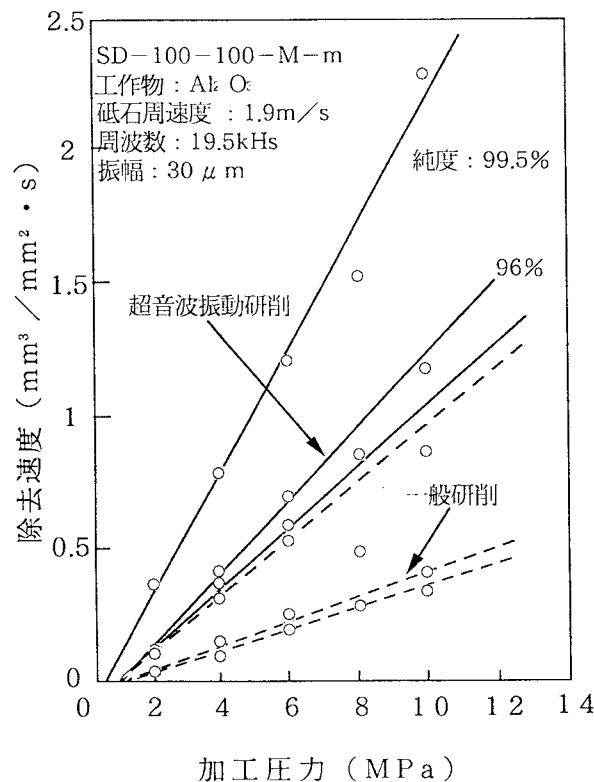


図37 アルミナの純度と除去速度

なるアルミナを超音波研削した場合の除去速度の違いを示す。

図より、純度の高いアルミナの方が、低いものと比較し、除去速度が高いことがわかる。純度の高いアルミナの方が、破壊強度が低いために、砥粒の押込みが容易であり、また結晶粒界の塑性流動によるエネルギー損失も少ないために、除去速度が高くなると推定される。

このように、セラミックスを超音波研削する場合の加工特性は、セラミックスの種類のみならず、気孔率、結晶粒径および純度などによって変化するので、セラミックスの研削にあたっては、それらの材料特性をよく吟味しておくことが大切であるといえる。

資料1. セラミックス加工速度例

加工物	加工方式	加工速度 mm/min	ダイヤモンド砥石	回転数 rpm	備考
窒 化 珪 素	HP	コアリング	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	8,000	定圧送り
		横送り	SD-220-N-125-FC φ60×φ40×3H	3,000	切込0.3mm
	S	コアリング	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	4,000	定圧送り
		溝入れ	SD-200-J-100 -MHX-5	1,000	切込0.2mm
ジ ル コ ニ ア	HI	コアリング	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	8,000	定圧送り
		横送り	SD-220-N-125-FC φ60×φ40×3H	5,000	切込0.2mm
	不明	内研	SD-100-100-M-m φ6×φ4×5H	6,000	ワーク100rpm 切込50μm
炭 化 珪 素	HP	コアリング	SD-100-100-M-m φ6×φ4×5H	8,000	定圧送り
		横送り	SD-100-125-M-m φ30×φ24×7H	6,000	切込0.1mm
	RB	コアリング	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	4,000	定圧送り
ア ル ミ ナ	コアリング	60	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	4,000	強制送り
		120			定圧送り
	横送り	5		6,000	切込1mm
	溝入れ	100	SD-200-J-100 -MHX-5	1,000	切込0.5mm
ソ ー ダ ガ ラ ス	コアリング	420	SD-100-100-M-m φ10×φ8×5H	3,600	定圧送り
	サイドカット	5	SD-600-100-M-m φ40×φ38×7H	6,000	切込0.5mm

資料 2. 超音波研削装置と必要機器

1. 超音波研削装置

(1) 用途

加工物・材料

- ・ジルコニア・窒化珪素・炭化珪素・アルミナ・フェライト
- ・圧電磁気・ルビー・サファイア・超硬合金・石英・ガラス
- ・カーボン等の複合材料・シリコン

(2) 仕様

型式 UG-2型

①機械本体

運動範囲	テーブル左右動 (X 軸)	300 mm
	テーブル前後動 (Y 軸)	200 mm
	主軸頭: 上下動 (Z 軸)	300 mm
	ブラスター端~テーブル上面	120~420 mm
	主軸中心~コラム摺動面	275 mm
テーブル	大きさ	450×270 mm
	最大積載量	150 kg
送り速度	切削送り (F4 桁直接指令)	1~999 mm/min
	早送り	8000 mm/min
本体重量	約 1 ton	
電源	φ3 AC200V	12KVA

超音波スピンドル、発振器

スピンドルモーター	回転数	100~8000 rpm
	出力	1.5 kW 連続
超音波振動系	共振周波数	20 KHz
	許容入力	250 W
	振動振幅	最大 30 μm p-p
	適用工具	φ07~φ30 メタルボンドダイヤモンド砥石 特注により最大 φ60 まで、また深穴用についても可
	動バランス	G1.0
	許容荷重	方向 100 Kg
	冷却	強制空冷方式
超音波発振器	発振方式	インバーター周波数自動チューニング
	出力	最大 250 W
	周波数	20 KHz

②制御部

NC 制御装置	FANUC SYSTEM 10M-A	(OM-A)
制御軸	同時 3 軸制御	(同時 3 軸)
設定単位	0001 mm	
基本制御機能	位置決め、直線補間、円弧補間	
送り速度オーバライド	0~200%、10%おき	
ドウェル		
リファレンス点復帰	手動・自動	
リール無ポータブルテープリーダー		(オプション)
テープ記憶長	20 m	
ワーク座標軸選択	6 個所	(1 個所)

③ モニター装置

	スピンドルモータ	負荷メータ
	超音波出力メータ	
	超音波周波数メータ	
	超音波振幅メータ	

研磨剤供給装置

経過能力	10 l/min	5 μ フィルター時
フィルターペーパー	5 μ	500 mm × 50 mm
	自動ペーパー送り機構付	(手動)
ポンプ	200 W 最大	8 kg/cm
タンク容量	130 l	

(3) 付属装置

① 定圧治具

- ・空気圧 5kg/cm²
- ・上下ストローク
- ・積載重量

(4) 付属品

- ① 各種ダイヤモンド砥石
- ② ホーン着脱用フックスパナ
- ③ 砥石着脱用片口スパナ
- ④ ホーン固定用片口スパナ

2. 必要機器

(1) 器工具

- ① ツルーイング装置 GC#80
- ② ドレッシング砥石 WA#200
- ③ バイス

(2) 測定器具

- ① ダイヤルゲージ (0.001mm)
- ② ダイヤルゲージ用マグネットスタンド
- ③ マイクロメータ
- ④ ノギス
- ⑤ 表面あらさ計

(3) 研削液シミクールS-4