

知 識 編

1. 加工原理と特徴

超音波加工（ultrasonic machining）は超音波遊離砥粒加工とも呼ばれ、加工方向に先端が数10ミクロン（複振幅）の超音波振動をする工具が、砥粒と水との混合物（スラッジ）を介して、硬脆材料の被加工物に一定の圧力で接しながら、超音波の振動衝撃により被加工物を微細に破砕して行う加工である。

(1) 超音波加工の原理

図1に超音波加工機の構成を示す。右上部の超音波発振器の電気エネルギーにより、中央上部の超音波振動子は垂直方向の伸び縮みの振動を発生し、その下に結合した超音波ブースター、超音波ホーンで振動振幅が拡大されてその運動が先端の加工用工具に伝達される。工具先端は図左の研磨材供給装置から砥粒と水の混合液を介して、被加工物に接している。なお工具の接触圧力を一定に保つように、図下部の天秤式加圧機構を示したが、他にも上部振動子部分を加圧する機構などがある。

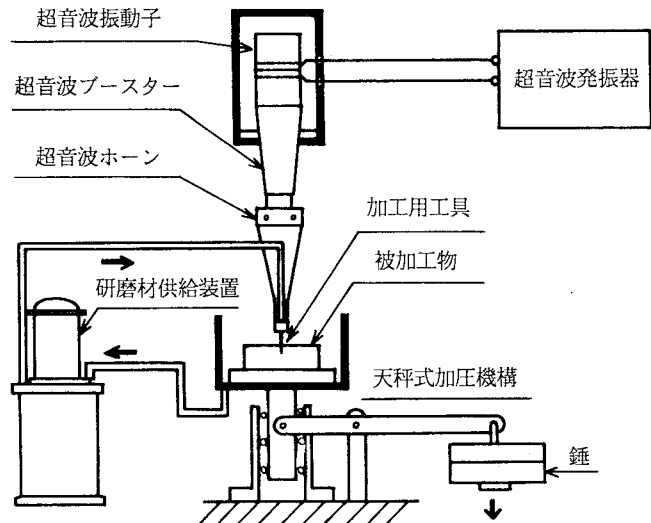


図1 超音波加工機構成図

図2は加工用工具先端部分の概念図である。加工用工具の先端は数10ミクロンの振動をしながら、中心部の孔より供給される研磨材液中の砥粒を介して、工具のもつハンマ作用力を被加工物の表面に衝撃力として与え加工を行なう。砥粒は連続的に工具中心部より供給されるので、破砕された被加工物粒子および砥粒は工具側面を通して外部に排出され、研磨材供給装置に戻る。

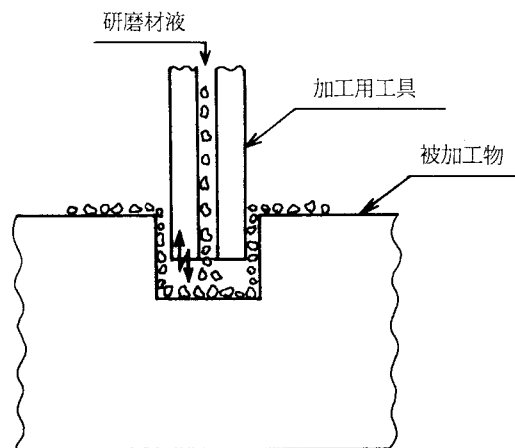


図2 加工部分詳細図

図2では工具中心部より研磨材液を供給する場合を示したが、逆に工具外周部より研磨材液を供給して、工具中心部より吸引する方法もある。要は新しい砥粒が次々と供給され、破砕された被加工物および砥粒は逐次排出されることが加工を能率的に行なうポイントとなるのである。遊離砥粒を用いることにより加工方法には色々な手法が考えられ実用されている。

いくつかの例を図3に示す。

図のaは型彫りの方法で、工具の輪郭や形状がほぼそのまま被加工物に反転加工される。bは複雑形状の貫通孔で、cはパイプ状の中空工具による打抜き加工、dは板状の刃を多数間隔をとって並べた工具で、一挙に多数の被加工物のペレットを作成することができる。eは工具または被加工物を回転させて、ダイスなどの微細孔の加工や、ラッピングの方法を示すものである。またfのようにcのパイプ中空工具を多数束ねて工具とし、多数の円形ペレットを加工することも行なわれている。gはめねじ工具に振動を与え被加工物を回転させておねじを切る方法である。hは逆におねじ工具を振動させてめねじを切る方法である。

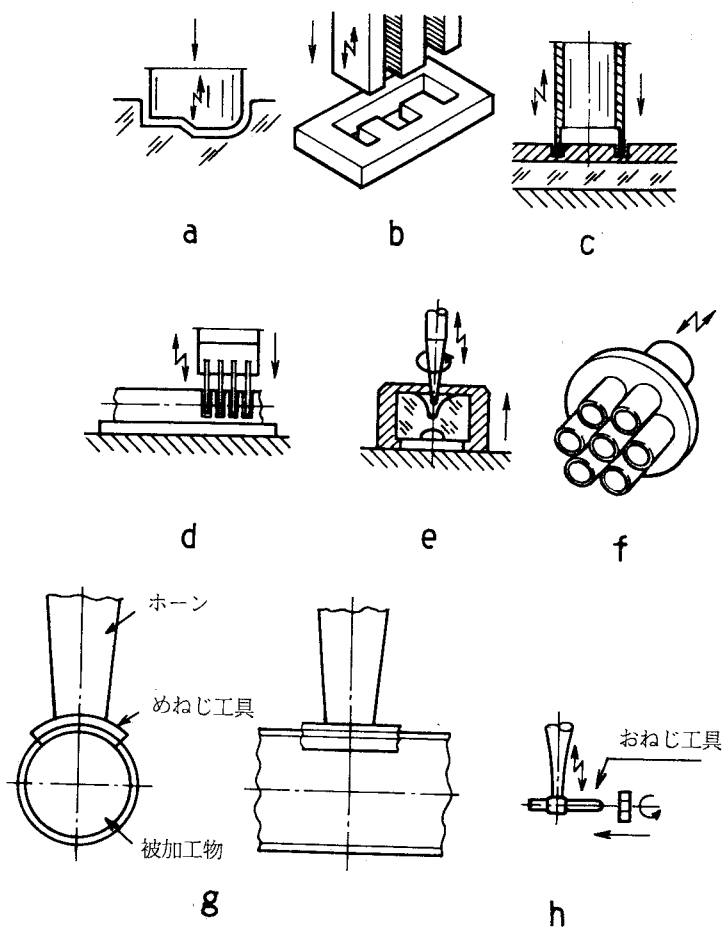


図3 超音波加工の例
(島川：超音波工学)

(2) 超音波加工の特徴

超音波加工は前に述べた例でもわかるように、一種の型押し加工である。

したがってその長所は

- ① 孔あけ、切断などの加工から複雑な彫刻まで加工用工具の形状に応じて任意の加工が行なえる。
- ② 砥粒の大きさを適当に選べば $0.1 \mu\text{m}$ の仕上げ面あらかのラッピング加工もできる。
- ③ 被加工物は電氣的に導体であっても絶縁体であっても加工ができる。

反面短所として

- ① 加工用工具を含めて機械共振系を構成するため、工具の設計製作が面倒である。
- ② 工具も砥粒によって摩耗するので、寸法、形状などの精度が変化していくことに注意せねばならない。
- ③ 金属加工に比べて、加工速度が遅い。等があげられる。

2. 加工機の構造

(1) 加工機の構成

超音波加工機は図1に示すように図中央部分の加工機部分と右上部の超音波発振器部分とに大別される。加工機部分は機械振動を発生し、被加工物を移動して加工を行う要素と、加工を行なうに必要な砥粒を供給する研磨材供給装置とからなりたっている。一般の工作機械が動力部分を内蔵し、外部からの商用電力の供給によって駆動されるのに対し、超音波加工機の場合には超音波振動系をはたらかせる電力は高周波電力であるので、この発生源を一つの構成要素として区分することが多い。

(2) 加工機部分

① 超音波振動子部

超音波振動を発生し、その振幅を拡大して先端の加工用工具を振動させる部分をいい、総称して超音波振動系または機械振動系などと呼ばれる。図4において超音波振動子は超音波発振器より高周波電力の供給を受けて上下方向に伸び縮みをする。その伸縮の周期は供給源の高周波の周期と同じである。しかも振動子の伸縮の周期は、これを構成する素材（最近ではジルコチタン酸鉛の磁器とアルミニウムとで作られた電気ひずみ振動子が多い）の寸法によって定められる共振周波数に一致している。これらの素材は機械振動損失が少ないので、共振周波数で振動させると非常に高効率で振らせることができるからである。

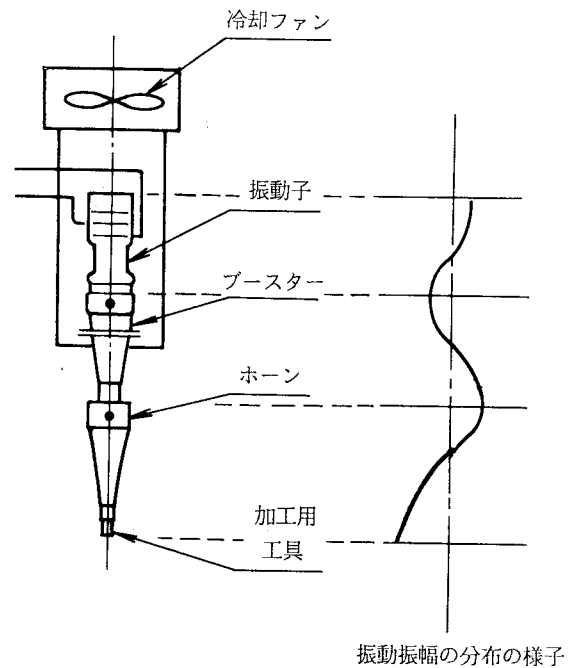


図4 超音波振動系

振動子の下部に超音波ブースター、および超音波ホーンが順に機械的に接続されている。これらもおの振動子と同じ周波数に共振がとられていて、振動子が発生する振動振幅を拡大する役目を果している。材質は振動損失が少なく、材料強度を要求されるため、アルミ合金が用いられる場合が多いが、必要に応じて熱処理した鋼材やチタン合金などが使用されている。振動子先端では数ミクロンの振幅（複振幅）が発生し、ブースター、ホーンで約10～15倍程度に拡大されて、工具先端では数10ミクロンの振れとなっている。振動子、ブースター、ホーン等はねじ接合される場合が殆どで、しかも数百ワットという大きなエネルギーを伝達するため、ねじ部の接合は当たり面がしっかり締め付けられる必要がある。

加工用工具は多くの場合ホーン先端にロー付けされる場合が多い。これは先端振幅が大きいので、交換し易いねじ接合部が疲労破壊しがちなのでロー付けする場合が多い。何本かのホーンを用意して摩耗した工具をホーン毎交換する方法がとられている。

超音波加工機に使用されている周波数は、15キロヘルツから20数キロヘルツのものが多く、これ

以上高い周波数では、加工振幅を大きくとりにくいので必然的に砥粒径が小さくなり、加工能率も低下していくことから製作されないものと思われる。15キロヘルツ以下では人間の耳の可聴音域に入るので、騒音の見地から製作が面倒になることが原因していると思われる。

② 加工機部

図5に超音波加工機と研磨材供給装置の外観図を示す。

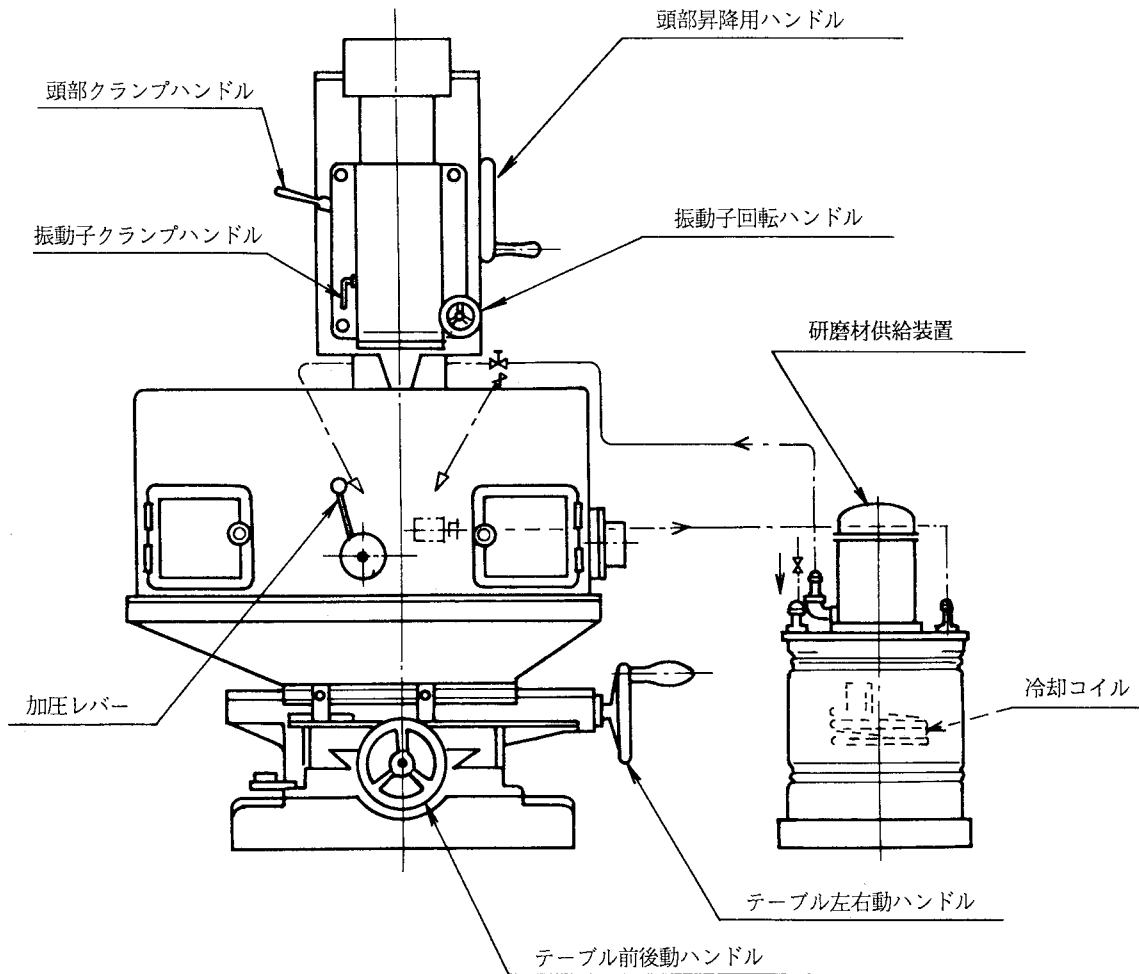


図 5 超音波加工機本体および研磨材供給装置外観図

基本構造は架台とコラムの二つのブロックから成り立っていて、機械剛性を得るため鋳鉄で堅牢に作られている場合が多い。架台の手前上部に移動テーブルがとりつけられ、更にその上加圧装置を備えた被加工物取付台がある。架台後部にコラムが設置され、コラム案内面に沿って上下できる振動子部がとりつけられていて、振動子部下端（加工用工具がとりつけられている）が被加工物に接するような構造である。

テーブル部は前後動、左右動ハンドルで工具中心線に対して前後左右に移動できるようになって

いるものが多いが、簡易型では移動機構のないものもある。

加圧装置は被加工物に所要の加圧力を与える機構で、被加工物取付用の定盤、定盤を支持するスピンドルおよびスピンドルに接続した加圧機構から成り立つ。加圧機構は天秤式、スプリング式などがあるがおのおの加圧力を調整する錘またはバネ圧力調整ねじなどの調節機構をもっている。その他加工深度直読のインジケータや加工深度信号用マイクロスイッチおよびブザーなどが取り付けられている場合が多い。被加工物取り付け用定盤は水平方向に回転する機能を有しているものもあり、円周溝加工を行なうことができる。

③ 研磨材供給装置

砥粒としての研磨材は普通水に溶きスラッジ状態で加工用工具の先端部分に供給され、加工後は回収されてタンクに戻り、再びポンプで圧送されて循環を繰り返す。研磨材は材質、粒度など種々あるが、被加工物の材質および精度により選定される。

研磨材は長時間循環を繰り返すと、砥粒が摩耗して加工能率が低下するので、時々交換する必要がある。研磨材はホーンの冷却も兼ねる場合が多く、ホーン中心部を通過する以外にホーン周辺部からも注入される場合が多い。また研磨材はポンプおよびホーン等の熱により温度が上昇するので、タンクの中に冷却水を流して冷やすことが多い。

(3) 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交換する機能を有している。

超音波加工機は負荷の状態、例えば加工用工具の形状、加工圧などの変化によりその共振周波数が変化する。そのために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、工具先端の振幅を最大に維持しなければならない。この機能を普通共振周波数追尾といい、殆どの加工機用超音波発振器がこの機能を備えている。

最終出力段は殆どがスイッチングトランジスタを採用しているものが多い。超音波振動子は前述したように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百ボルトと高電圧領域に属するものが多く、取扱いには注意を要する。

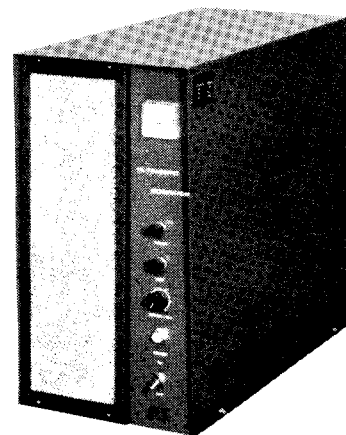


図 6

3. 加工理論

(1) 加工用工具のハンマ作用

超音波加工が、工具の超音波振動によるハンマ作用によって、砥粒が衝撃を受け、被加工物にマイクロラックを発生させ、それが衝撃のくり返しによって成長して、やがて剥離することの連続によるものと一般にいわれている。

超音波の振動がどの程度の力をもっているかを簡単に説明すると、いま工具の先端が20KHzの周波数

で、複振幅 $100 \mu\text{m}$ で振動している場合を例にとってみる。工具先端は正弦波運動をしているので、その変位を x 、角周波数を $\omega (=2\pi f)$ 、時間を t とすると

$$x = a \sin \omega t \quad \text{で表わされる。}$$

このときの速度 v は $v = dx/dt = a \omega \cos \omega t$ となり

加速度 a は $a = dx^2/dt^2 = -a \omega^2 \sin \omega t$ となる。

ここで $f = 20\text{KHz}$ 、 $a = 50 \mu\text{m}$ とおいて速度 v 、加速度 a の最大値を求めると

$$v_{\text{max}} = 6.28\text{m/sec}$$

$$a_{\text{max}} = 7.88 \cdot 10^7 \text{cm/sec}^2 = 7.88 \cdot 10^4 g \quad (g \text{ は重力加速度})$$

となり、加速度は重力の加速度の約8万倍にも達する。これによる力が砥粒を介して被加工面に加わることで加工が行なわれるのである。

単純にみれば、加工力を上げるには周波数と振幅を増せばよいといえるが、前章の超音波振動子の項で述べたように、周波数にも振幅にも実用上の限界があり、現存する加工機はおのその実用性、経済性の限界で作られているといえる。したがって、むしろ砥粒の材質および大きさ、その循環、また加工圧の大きさなど運用上の問題をさまざまに検討して、加工能率を改善しているのが実情である。次章にそれらを説明することにする。

(2) キャビテーション効果

液体中に強力な超音波が放射されると、音波の疎密波によって液体中に正圧と負圧が交番して発生する。この圧力値の変化が激しく、その加速度が先に述べた重力の数万倍ともなると、強力なキャビテーションが発生する。これは空洞現象ともいわれ、これが発生するとき衝撃波を二次的に生じる。超音波洗浄器はその効果を応用したものである。このキャビテーション効果が被加工物面上にエロージョン（壊蝕）を発生させ、加工に寄与すると考えられるが、多くの実験結果では、砥粒加工速度の1万分の1以下程度で加工においてはあまり重要な要素とはいえない。またキャビテーションによる砥粒の循環、および破碎物の排出などに効果をもたらすとも考えられるが、加工速度の向上に寄与したという明解なデータはないようである。

4. 加工特性

(1) 加工変質層

超音波加工では、工具のハンマ作用によって砥粒が衝撃を受け、被加工物にマイクロクラックを発生させ、衝撃の繰り返しによってクラックが成長してやがてチップとして剥離すると考えられている。このチップの大きさはほぼ砥粒径と同じくらいといわれているが、加工速度がはやい場合は、砥粒径より大きいチップがあらわれることもある。

島川らが加工変質層の深さについて行なった実験例は、Si単結晶の面をSiC砥粒で加工し、加工面を酸でエッチングした後、電子線回析法で回析写真をとり、それがSi単結晶の素地の回析パターンと同じになったときのエッチング深さを求めた。その結果砥粒の平均粒径 $10 \mu\text{m}$ で加工変質層の深さは $30 \mu\text{m}$ 、粒径 $30 \mu\text{m}$ で約 $40 \mu\text{m}$ 、加工底面は加工側面より変質層の深さは $5 \mu\text{m}$ 程度深くなっている。工具振幅は変質層の深さに影響をおよぼすが、加工圧の影響は少ないという結果がでている。

(2) 砥粒の交換

一般に超音波加工機では砥粒はスラッジ状にして研磨材供給用ポンプで循環させて使用するが、長時間繰り返し加工に使用しているうちに、砥粒が破碎されて、加工能率が低下する。そのため適当な時期に砥粒を新規のものと交換せねばならない。

Kaczmarek らが行った実験では、加工機出力は60W、周波数20KHz、振幅50 μm 、工具鋼の工具直径10mm、加工力300g、砥粒はSiC #120 (粒径100~120 μm) で、スラッジ濃度30%である。図7にそのときの加工速度 V と加工時間 τ の関係を示す。図からわかるように循環タンク内の砥粒量が多い方が加工速度を長時間維持できて経済性は高いが、タンクの容積およびポンプの出力に対する初期コストを考慮する必要がある。

V と τ は加工物の材質、砥粒の種類、大きさ、濃度および振幅、振動数などによって異なった値をとるので、実際に加工するときには、インジケータで加工速度を監視しながら条件を選定し、のちに加工速度がほぼ50%になるまでの加工時間 τ を交換時期とすればよい。

図8に異なった粒度の砥粒で加工した際の、加工速度と加工時間の関係を示す。図からわかるように #60 と #80 の砥粒は加工開始後、一定時間経過したのち、最大加工速度に達する。

これより加工速度を大にするための、砥粒粒度に適値が存在することがわかる。

(3) 加工速度

加工速度に影響を与える要素としては加工圧、工具の振動振幅、工具の振動周波数、砥粒の粒度、砥粒の種類、加工液、砥粒の濃度、加工面積、工具および加工物の材質、等があげられる。これらの最適値を選ぶについては、実験的に進めて実用的に問題を解決している場合が殆どである。以下に各要素毎に実験データを示しながら解説を行なう。

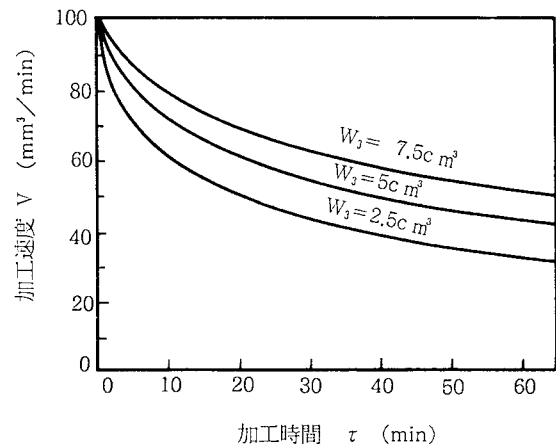


図7 循環砥粒量 (W) が異なる場合の加工時間 (τ) と加工速度 (V)

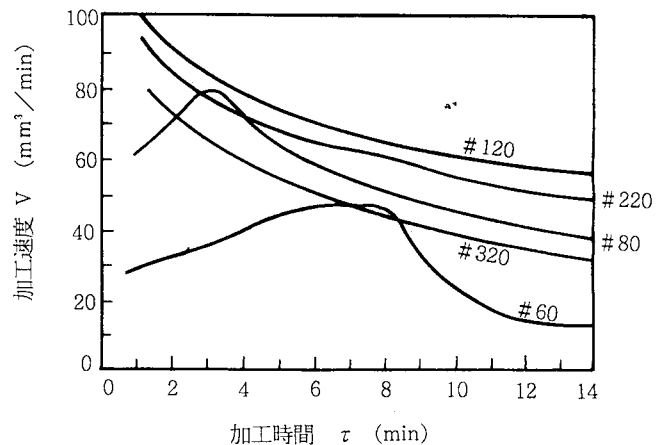


図8 砥粒粒度が異なる場合の加工時間 (τ) と加工速度 (V)

① 加工圧と加工速度

超音波加工工具が振動して、その加速度による力と最適な値の加工圧が被加工物に与えられると、その衝撃力が最大になり、加工速度も最大になる。図9に示すように加工圧がこの最適値より大きくなっても、また小さくなっても加工速度は低下する。図よりわかるように、加工面積が小さくなればなるほど、最適加工圧は大きい方に移動する。ガラス板を軟鋼丸棒工具で、その断面積を1~20m²の間で1m²ごとに変え、20種類の面積について加工を行なった際の、最大加工速度を得るに要する最適加工圧を求めた実験によると、加工面積が小さいときの加工圧はかなり大きく、加工面積が大きくなるにつれてこの値は小さくなり、5~15m²の間では約40g/m²、20m²以上では20~30g/m²となった。別なガラス加工実験でも、加工面積が5~20m²のとき、加工圧の最適値はおよそ20~50g/m²であることが確認され、最適加工圧は加工面積により最適値が変化することに留意すべきである。

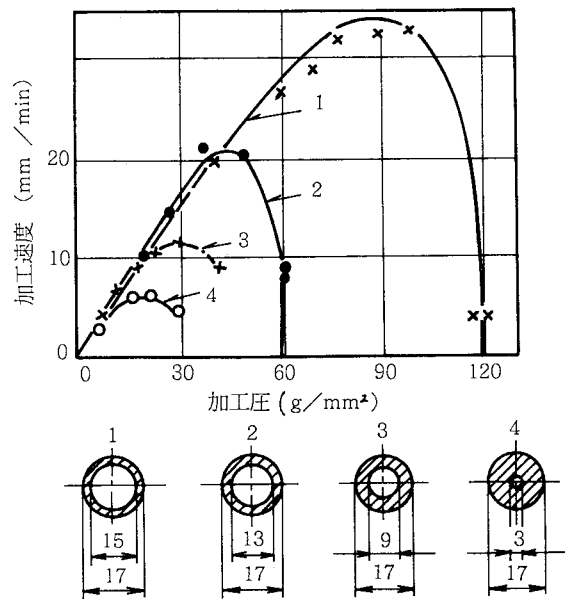


図9 加工圧と加工速度
丸棒工具の内径を変えた場合

② 工具振幅と加工速度

工具の振動加速度による力が加工衝撃力になるのであるから、その加速度を大にするには、振動周波数を高くとるか、振動振幅を大きくとればよい。しかし振動周波数を変化させることは、機械振動系が共振系であるので実際の加工機では簡単に実現できない。殆どどの加工機が一周波数で製造されているのもこの理由による。したがってここでは工具振幅と加工速度について述べることにする。

図10にGoetzeの実験結果を示す。工具の振動周波数と砥粒の粒度を一定に保ち、加工速度と工具振幅とが比例関係にあることが理解できよう。このときの工具と被加工物とは

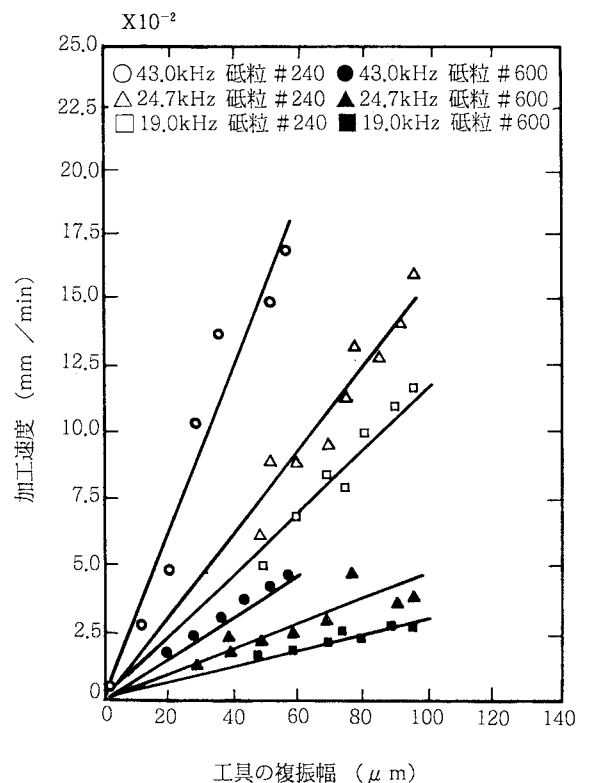


図10 工具の振巾と加工速度

工具と加工物の材質；Ketos工具鋼

工具；中実、直径3.18mm、加工圧；31g/mm²

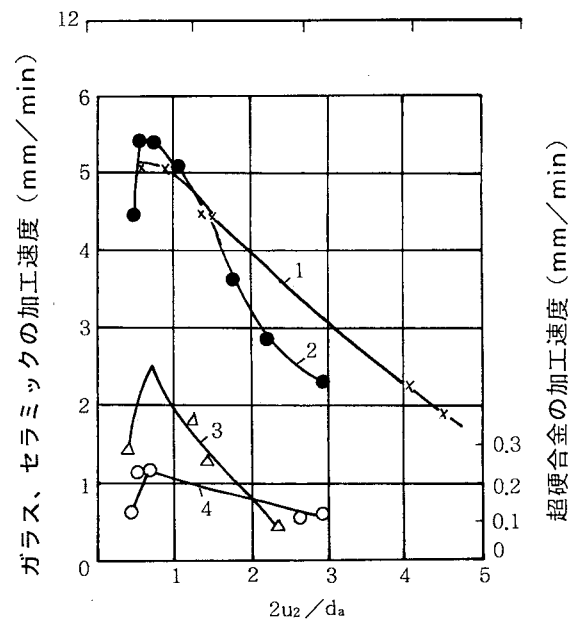
砥粒；B,C、砥粒と水の重量混合比2：5

もに工具鋼を使用し、加工圧はすべて $31\text{g}/\text{m}^2$ にしている。別の実験ではMillerが 24.7KHz で、工具直径 2.19mm で工具鋼を加工し、 $\#240$ と $\#600$ の B_4C 砥粒で、複振幅が $90\mu\text{m}$ まで振幅と加工速度が比例することを確かめている。

一般に超音波加工では工具の複振幅は $40\sim 100\mu\text{m}$ 程度であるが、硬脆材料の加工には加工の開始時と貫通時にクラックが生じ易いので、振幅を $20\mu\text{m}$ 程度に下げることが望ましい。また理論的には振幅は大きい程加工速度は向上することになるが、超音波ホーンや工具溶接部分が疲労破壊する恐れがでてくるので、 $100\mu\text{m}$ 以上の振幅を出すときは各部材料および加工処理に注意を払わなければならない。

③ 砥粒の粒度と加工速度

砥粒の加工衝撃力は工具から伝達されるのであるから、砥粒の大きさが変われば加工速度は変化する。この場合砥粒の大きさによって工具の振幅および加工圧も最適に選ぶ必要がある。図11は横軸に $2u_2/da$ をとり、(u_2 ; 片振幅即ち $2u_2$ で両振幅となる。 da ; 平均砥粒径) 縦軸に加工速度を示したものである。加工圧については、それぞれの点で最適値を得るように設定した。図中の曲線1は面積 78.5mm^2 の円柱工具で、また曲線2は面積 80mm^2 の矩形断面角棒の工具で、ともにガラスを加工した結果である。曲線3は面積 38.5mm^2 の円柱工具でセラミックスを、曲線4は外形 8mm 、内径 6mm のパイプ状工具(加工面積 22m^2)で超硬



1,2 : ガラス, 3 : セラミック, 4 : 超硬合金

図 11 砥粒の大きさと加工速度

合金をそれぞれ加工した結果である。図より $2u_2/da$ が $0.6\sim 0.8$ の範囲で最大加工速度が得られていることがわかる。このときの両振幅は平均砥粒径の $0.6\sim 0.8$ ということになるが、平均砥粒径より小さい砥粒および衝撃破砕をうけた砥粒成分とが加工に有効に寄与して、図のような傾向が得られたものと思われる。

工具振幅はホーンの疲労破壊を考慮した場合制限があるので、その近傍までは砥粒径は大きくなる程、加工速度が向上するといえる。しかし粒径が大きくなると加工表面のあらさが大きくなることも考慮に入れなければならない。普通の超音波加工では $\#150\sim 320$ のものが粗加工として使用され、 $\#600$ 以上の番手のものが仕上げ用に用いられている。セラミック加工の場合 $\#280$ でも表面あらさは約 $1\mu\text{m}$ であるので、要求加工精度と能率とを考慮して砥粒の大きさを選ぶ必要がある。

④ 砥粒の種類と加工速度

セラミックスの加工には、一般にSiC、B₄C、ダイヤモンドなどの砥粒が用いられる。ダイヤモンドは高価なので、ダイヤモンドダイスなどの同質のもの加工以外には殆ど使われない。表4.2に各種材料の超音波加工特性を示す。この中ではセラミックスはアルミナのみであるが、上のルビーの加工速度とあわせてみるとB₄Cの方が若干SiCよりも勝れていることがわかる。表1にみられるようにヌープかたさ（Knoop hardness）ではB₄Cが勝れているから、被加工物の靱性、かたさ等の比較的大きいセラミックス（例えばジルコニア、SiCなど）ではその持ち味を発揮できよう。なお表1はガラス加工を例にとったものである。

表1 各種砥粒のかたさと加工速度の関係（島川）

砥粒	相対加工速度	ヌープかたさ	ヌープかたさの比
B ₄ C	100	2,250	100
SiC	80	2,100	93
Al ₂ O ₃	72	1,650	73

表2 各種材料の超音波加工特性（楡井：セラミックス）

工作物	砥粒	加工速度 (mm/min)	加工比
ガラス	SiC : 320	6.0	150~250
チタン酸バリウム	"	6.5	70~110
フェライト	"	6.5	90~130
磁器	"	6.5	200~240
石英	"	5.5	100~140
グラファイト	"	8.4	200~300
シリコン単結晶	"	3.5	200
ルビー	"	0.6	8~12
"	B ₄ C : 280	0.8	5~7
アルミナ	SiC : 320	3.0	30~40
"	B ₄ C : 280	3.6	20~25
超硬合金G-2	"	0.2	2
" S	"	0.3	4

出力：150W，共振周波数：16kHz，工具：φ3中実丸棒（ピアノ線）

加工深さ

$$\text{加工比} = \frac{\text{加工深さ}}{\text{工具摩耗量}}$$

⑤ 砥粒の濃度と加工速度

砥粒は水または油に混合してスラッジ状にして使用される。セラミックスの場合は水による発錆はないから、もっぱら水が一般に用いられる。水に対する砥粒量が極端に少ないと、加工に寄与する砥粒数が少ないので、当然加工速度は低下する。逆に濃度が高すぎると砥粒同志がその運動を妨害しあって能率低下をまねく。

図12にガラス加工の際の砥粒濃度と加工速度の関係を示す。砥粒はSiCの#240で水に対する重量比を横軸にとって示している。図からわかるように濃度が約0.2までは、加工速度は濃度に比例して増加するが、それから濃度が2まではほぼ一定値を維持し、さらに濃度が大になると減少を始め4で加工不能になる。

この傾向は他の実験報告からも見られるが、一般的に加工速度の平坦な砥粒濃度領域は広い。但し比較的高い濃度の方でも実際に加工に寄与する砥粒は、この値よりもかなり少ないとも考えられ、さらに加工切屑が出るので見かけ濃度は増加する。したがって砥粒の水に対する混合比は、加工開始時に重量比で0.5~1.0の範囲にとっておけば有効砥粒の濃度を維持できることになる。

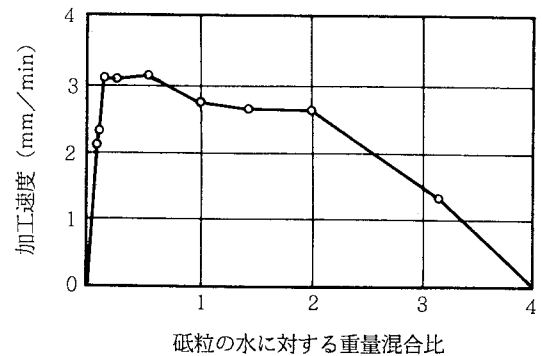


図12 加工速度におよぼす砥粒と水の重量混合比の影響
(島川：機械と工具)

加工物；ガラス

⑥ 加工面積と加工速度

超音波ホーンおよび工具を変えて加工面積が変化した場合、振動周波数は機械によって定められた範囲で大きな変動はないが、振幅の方は面積が大きくなる程低下する。これは超音波発振器からみて負荷が大きくなるからであって、精密加工を行なうために特別に作られた工具先端振幅が一定になるような定振幅制御式発振器を除いては、工具振幅は加工面積によって変化する。

一方砥粒の循環からみても加工面積が広がるにつれて砥粒の供給、排出およびチップの排出がわるくなる。このため砥粒の強制注入や強制吸引および工具の間欠的な上下揺動等の機能を付帯させた加工機もある。また工具の形状もできるだけ加工面積を小さくするようにし、たとえば円形孔加工の場合には丸棒の工具を用いずに円筒工具を使用し、かつ円筒内面にも砥粒を供給できるようにするなど種々の工夫を行なっている。

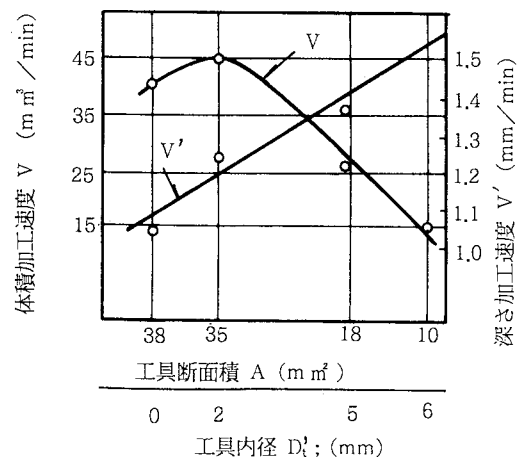


図13 パイプ状工具の断面積Aと肉厚と加工速度
(島川：超音波工学)

加工物；セラミック

工具外径；7mm

なお、振幅、砥粒の循環など加工面積以外の全てが同じにできるならば加工速度が変わらないか

ら、単位時間あたりの加工体積は加工面積に比例するのは当然である。

図13にセラミックスを加工した例を示す。円筒工具外径7mmを使用して加工を行ない、内径を6mmから段々に小さくして加工肉厚を変化させたときの加工速度と体積加工速度を示したもので、内径が0のとき加工速度は1.08mm/minで、内径6mmのときは1.55mm/minとなり約1.5倍になっているが、体積加工速度はある工具断面積で最大値を示している。これはこの加工面積による負荷状態が超音波発振器からみて最適の整合状態にあることを示している。従って工具に対して極端な重負荷（加工面積が広い）の場合は、発振器の許容最大電流までの範囲で発振器との整合を取り直す必要が出てくることもある。なお軽負荷（加工面積が小さい）の場合は発振器の出力調整を絞って、ホーンの疲労限界振幅以内で使用するよう心掛けなければならない。

⑦ 工具および被加工物の材質と加工速度

工具および被加工物の材質をかえると工具の摩耗も加工速度も変わってくる。島川の実験によると、ガラス、ステアタイトのような脆性材料に対しては、工具は軟鋼でも摩耗は少ないが、ヒスイ、メノウなどには焼入れ鋼が有効で、セラミック、ゲルマニウム、タングステンカーバイド、焼入れ鋼などにはピアノ線が軟鋼や焼き入れ鋼工具に比べて摩耗が少なく加工能率がよいとしている。一方超音波加工の長所とされている任意の形状の転写加工ができる点を生かすには、加工しやすい鋼材を使用し、精度の許す範囲で熱処理を施すのが望ましい。

工具の摩耗の程度をみる尺度として、加工比が用いられ（加工量/工具摩耗量）で表わされる。前掲の表4.2の加工比の欄を参照されたい。超音波周波数は16KHz、出力150Wで、工具にはφ3円柱のピアノ線を使用している。ガラス、磁器などの脆性材料は加工速度も大で工具摩耗量も少ない。硬脆材料のアルミナ、シリコンなどは3mm/min程度の加工速度で、超硬合金のようなかたくて靱性の高い材料はさらに一桁程度加工速度が低下する。

(4) 加工精度

① 寸法精度

寸法精度に比較的大きな影響をあたえる要素は砥粒の粒度、粒子の揃いかたと工具の摩耗である。その他に加工機本体の機械的精度も関係してくるが、ここでは砥粒と工具について述べる。

砥粒は工具と被加工物の間には入り込み、加工後通過排出される。したがって工具摩耗がなければ、砥粒の平均粒径分の加工間隙が生じることになる。工具の摩耗の比較的小さいガラスを被加工物として加工間隙を測定したのが図14である。図は厚さ3mmのガラス板を厚さ0.29mmのばね鋼で切断し、そのときの加工巾を測定したもので、加工間隙は砥粒の大きさ約100μm（#150程度）まで砥粒の大きさと直線的に増加している。この場合の砥粒の大

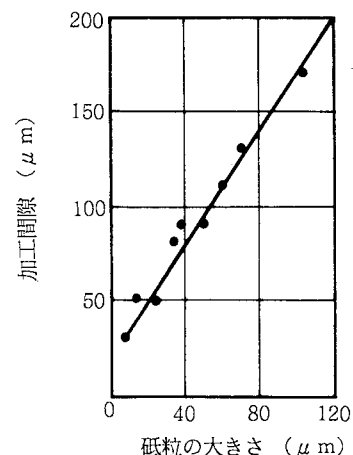


図14 ガラス加工における加工間隙（西村他：Ultrasonic Machining Part1）
工具：ばね鋼、厚さ0.29mm
砥粒：B₄CおよびSiC

きは直接測定した粒子直径の平均値であり、加工時に平均径砥粒が一層になって通過していることを示している。したがって加工径に対して工具寸法は平均砥粒径の分だけ小さく作成しておく必要がある。

次に工具の長さ方向の摩耗については図15に被加工物がセラミックスで工具材質5種類についての、加工深さと工具摩耗長さ Δt の関係を示す。

工具形状はパイプで外形7mm、内径4mm、砥粒は#120のB₄C、加工圧は15g/mm²である。図より超硬合金、高速度鋼が摩耗が少なく、他の鋼材よりも耐久性のあることがわかる。

工具の摩耗は長さ方向だけでなく肉厚方向にも生じるので、硬度と靱性の高いセラミックスを加工するときは、径方向の加工精度について考慮する必要がある。図16は硬質のセラミックスを

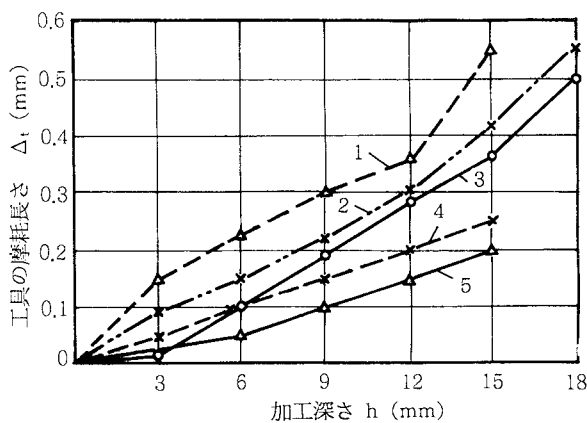


図15 加工深さ (h) と工具摩耗長さ Δt (A. I. Marakov)
 加工物：セラミック、工具寸法：パイプ状
 外径 7mm、内径 4mm、砥粒：B₄C #120、
 加工圧 15g/mm²、工具材質：1-鋼 Kh18N
 9, 2-鋼45, 3-焼もどしU8鋼, 4-高速度
 鋼R9, 5-超硬合金VK-8

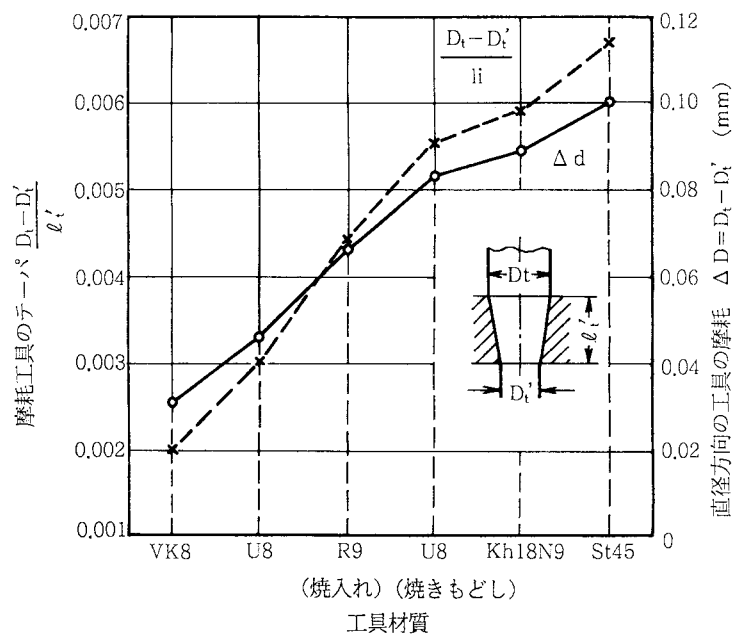


図16 硬質セラミック加工における
 工具直径の摩耗 (A. I. Marakov)

種々の鋼製工具で加工したときの、工具の径方向の摩耗とテーパを示したものである。全図4.9の長さ方向の摩耗と比べると、摩耗の機構の相違がうかがえる。長さ方向には砥粒を介して衝撃力が加わり、径方向には砥粒による磨きの作用が強いように見うけられる。

図の中で径方向の工具の摩耗は $\Delta D = D_t - D'_t$ (mm)

摩耗工具のテーパは $(D_t - D'_t) / l_t$ $l_t = 15\text{mm}$ である。

径方向の工具摩耗により許容公差内に加工ができない場合は、あらかじめ粗加工と仕上げ加工とに工具をふた通り使いわけ、砥粒も粗目と細目の2様に変えるのも精密加工の手段ではあるが、加工深さがあまり深くないときは粗加工部分と仕上げ加工部分の工具を一体に作ることも行なわれている。但しこのときは砥粒の切り換えは難しい。

また加工時に穴入口部分で被加工物の穴径が広がって、いわゆる“だれ”を生じることがあり、また加工開始時の衝撃で穴入口付近には“カケ”によるチッピングが生じ易い。穴加工の貫通時にも抜けのカケが生じ易く、これらを被加工物に直接与えないように、ガラス板のような加工容易の板を接着していわゆるサンドイッチ状に被加工物を挟んで加工することがよく用いられている。

図17に2段工具を、図18にサンドイッチ構造を示す。

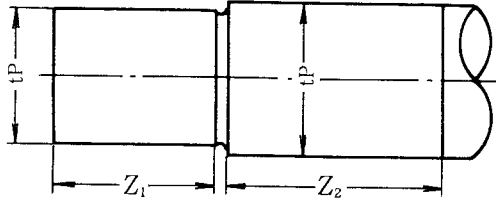


図 17 粗加工と仕上加工を同時に行う工具
(島川：超音波工学)

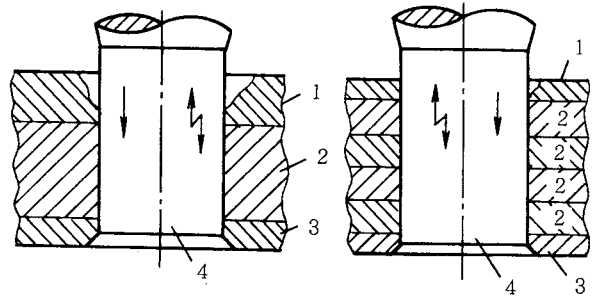


図 18 穴入口部のテーパを少くする方法
1と3は補助板、2は目的の被加工物
4は工具
(島川：超音波工学)

② 真円度

真円度の要求精度に応じて被加工物を回転させることもできる。図19にその一例を示す。板厚6mmのガラス板を油圧台にのせて回転した場合としない場合とを、軟鋼パイプの外形8mm、内径6mmの工具で加工したときの真円度で表わした。台の回転数は33rpmで、真円度は回転させた方が向上して、 $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度が得られている。回転させない場合は工具の真円度および取り付けなどにより加工穴の真円度は多少悪くなるが、被加工物を回転させることにより、これらの影響を低減することができる。

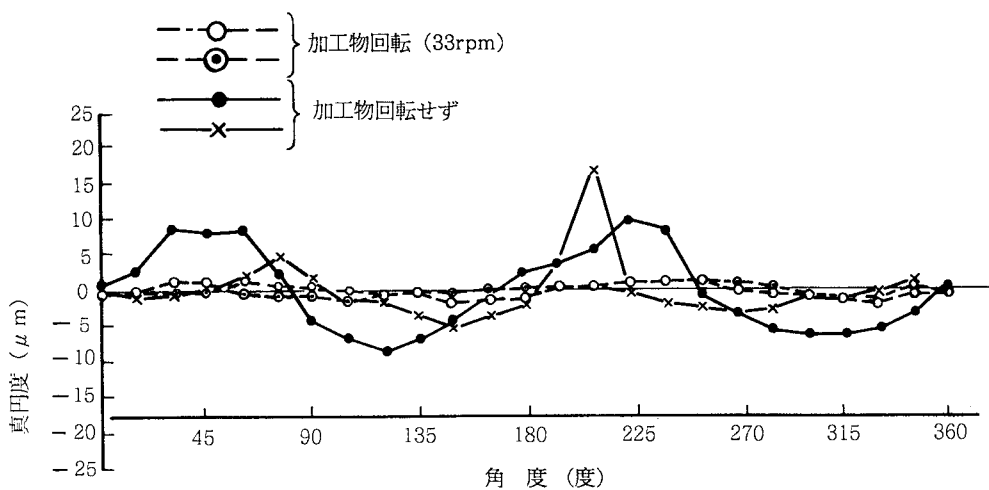
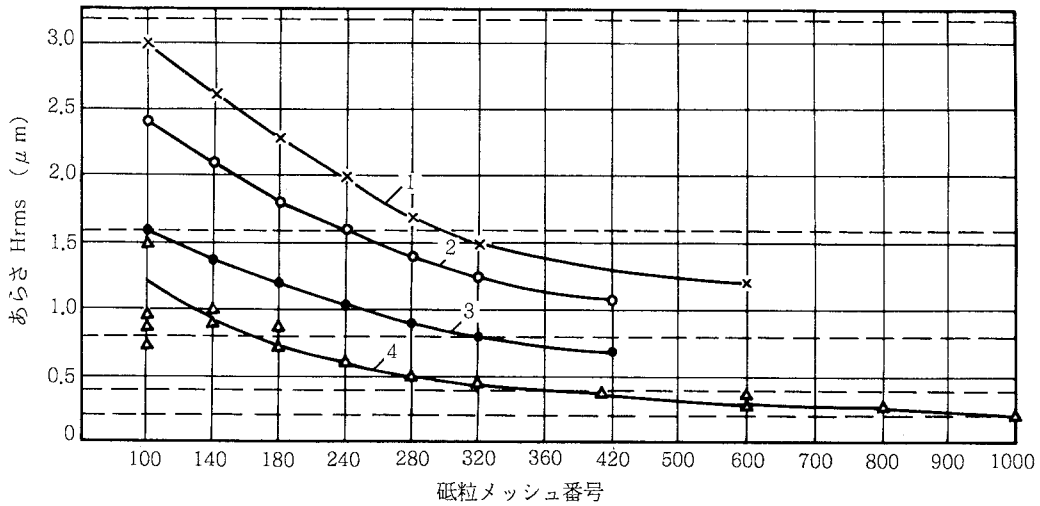


図 19 Norbide #600で加工したガラス孔の真円度 (島川：超音波工学)

③ 加工面のあらかさ

図20にガラス、シリコン、セラミックス、超硬合金などの硬さともろさの異なる材質を、B₄Cの各種のメッシュで加工したときのあらかさHrmsの値を求めたものである。図よりわかるように上記材質の順にあらかさの曲線が得られている。これは各材料の脆性の違いが大きく影響するが、砥粒もまた被加工物の脆性および靱性によって破碎され、微細化されるのもあらかさに影響を与えるものと考えられる。



砥粒：B₄C, 加工物：1- ガラス, 2- 半導体シリコン, 3- セラミック TsM-332, 4- 超硬合金

図 20 各種材質を加工したときの加工面のあらかさ (A. I. Marakov)

資料1. 超音波加工機

1. 用途

- 孔あけ ; IC基板 石英理化学器材 貴石、宝石類
- 打ぬき ; シリコン、フェライト、ガラス
- 切断 ; サファイヤ、フェライト
- ネジ加工 ; 石英、セラミックス、超硬合金
- 研磨 ; 金型、セラミックス、ダイヤモンドダイス

2. 仕様

(1) 加工装置 USM-DIB-100N

- 振動子 ; ボルト締電歪型振動子
- 共振周波数 ; 17.7KHz
- 電気入力 ; 400W連続
- 加工テーブル ; 前後行程 80mm
左右行程 140mm
- 加圧機構 ; 上下行程 30mm
加圧方式 天秤式
加圧深度指示ダイヤルインジケータ直読
加工終了表示ブザー
- 頭部行程 ; 100mm
- 据付面積 ; 460×670×1330 (mm)
- 総重量 ; 約300Kg

(2) 研磨剤供給装置

- ポンプ ; 堅型渦巻ポンプ
- ポンプ吐出量 ; 35 ℓ / min
- ポンプ揚程 ; 約2m
- モーター ; 100W200V3 φ
- 冷却水量 ; 2 ℓ / min
- 重量 ; 14Kg

(3) 超音波発振器 (ET-120S-5-2-4)

- 電源 ; 200V 単相
- 電源入力 ; 0.9KVA
- 出力 ; 400W (連続)
- 出力可変 ; 40~100%

発振方式 ; インバータ、周波数自動追尾式
発振周波数 ; 18KHz±10%
寸法 ; 巾250×奥行600×高さ485 (mm)
重量 ; 約47Kg
環境温度 ; 0～40℃

3. 附属品

足踏スイッチ
回転加工台 ; ネジ加工用
ホーン着脱工具; フックスパナ
各種ホーン ; 切断用、研磨用、円筒中空加工用、円弧切断用、心押穴加工用、ネジ加工用（粗、仕上）

4. 研磨剤

ボロンカーバイド #280
シリコンカーバイド #360

5. 接着剤

熱軟化性加工用接着剤（例；グルコールテレフタレート）

6. 加工物

アルミナ 10t50×50 (mm)
ガラス板 10t60×60 (mm)

7. その他

シリコングリース

資料2. 超音波加工機の点検

1. 日々点検

- ① 頭部コラムおよび振動子回転部の給脂は充分か。
- ② 加圧機構、テーブル可動部分の給脂は充分か。
- ③ 研磨剤の量および水は充分か。
- ④ ホーン工具の発錆および摩耗はないか。
- ⑤ 研磨剤注水ノズル、配管に異常はないか。
- ⑥ 超音波発振器の接地は確実か。

2. 3ヶ月点検

日々点検の項に加えて

- ① ホーン、ブースターのスパナ孔および振動伝達面に傷、変形などの異常はないか。
- ② 振動子冷却ファンの目詰りはないか。
- ③ 超音波発振器のエアフィルターの清掃および内部清掃
発振器取扱説明書参照

3. 故障発生時の点検

取扱説明書の動作不良のチェックポイント参照

資料3. ホーン先端の工具交換について

1. 交換時期

工具は研磨剤により、加工面および側面共に摩耗する。また保管が悪いと発錆により寸法変形する。この交換の時期は、

- ① 所要加工精度が得られないとき。とくに中空円筒工具は内外径の摩耗により精度が出ないことがある。またネジ加工工具もネジ山の形状のくずれとなる。
- ② 切断用または細孔加工用のように摩耗しても或る程度使えるが、発振器の周波数追尾範囲にはいないとき。
- ③ 工具ロー付部分が疲労破壊したとき。異音がでて、発振器の周波数調整ができないとき。などがある。

2. 交換方法

- ① ガスバーナーで工具ロー付部分を加熱し、古い工具を外す。
- ② 古い銀ローを除去して、接合面をきれいにする。
- ③ 新しい工具を、心出し治具を使用してセットし、銀ロー付する。

銀ロー材；例えば JIS-BAg-7

フラックス；例えば HANDY FLUX 低温用日本ハンディハーマン

- ④ ロー付後、余分を銀ローを拭いとる。

- ⑤ ロー付の良否を加工機にとりつけて試験する。方法は [1] 2-6 の発振器の周波数調整の項参照

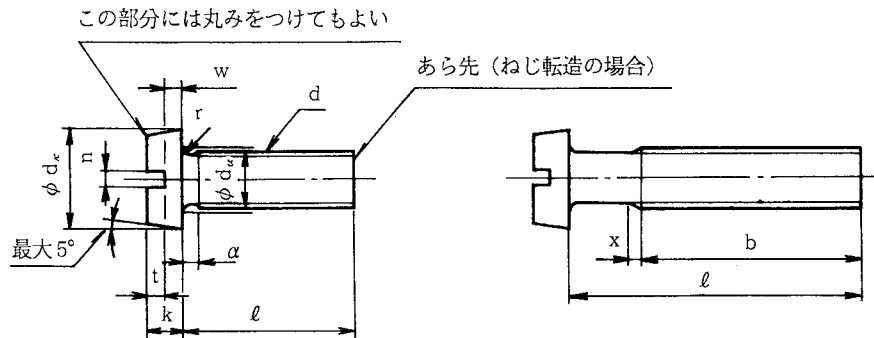
[注意] 出力は③項の指示通り最少にすること。無負荷時に過大振巾を興えると、工具およびロー付部分が疲労破壊する。

3. 交換工具について

工具スペアは課題毎に必ず予め用意しておくこと。工具加工時は添付の工具図面を参照され度い。

資料4. 超音波加工機すりわり付きチーズ小ねじの形状、寸法

すりわり付きチーズ小ねじの形状、寸法



単位mm

ねじの呼び		d	(M3. 5)	M4	M5	M6	M8	M10
ピッチ		P	0. 6	0. 7	0. 8	1	1. 25	1. 5
a	最大		1. 2	1. 4	1. 6	2	2. 5	3
b	最小		38	38	38	38	38	38
dk	最大 (基準寸法)		6	7	8. 5	10	13	16
	最小		5. 82	6. 78	8. 28	9. 78	12. 73	15. 73
d1	最大		4. 1	4. 7	5. 7	6. 8	9. 2	11. 2
k	最大 (基準寸法)		2. 4	2. 6	3. 3	3. 9	5	6
	最小		2. 25	2. 45	3. 1	3. 6	4. 7	5. 7
n	呼び (・)		1	1. 2	1. 2	1. 6	2	2. 5
	最小		1. 06	1. 26	1. 26	1. 66	2. 06	2. 56
	最大		1. 2	1. 51	1. 51	1. 91	2. 31	2. 81
r	最小		0. 1	0. 2	0. 2	0. 25	0. 4	0. 4
t	最小		1	1. 1	1. 3	1. 6	2	2. 4
w	最小		1	1. 1	1. 3	1. 6	2	2. 4
x	最大		1. 5	1. 75	2	2. 5	3. 2	3. 8
ℓ (..)	呼び長さ (基準寸法)	最小	最大					
	5	4. 7	5. 3					
	6	5. 7	6. 3					
	8	7. 7	8. 3					
	10	9. 7	10. 3					
	12	11. 6	12. 4					
	(14)	13. 6	14. 4					
	16	15. 6	16. 4					
	20	19. 6	20. 4					
	25	24. 6	25. 4					
	30	29. 6	30. 4					
	35	34. 5	35. 4					
	40	39. 5	40. 5					
	45	44. 5	45. 5					
	50	49. 5	50. 5					
	(55)	54	56					
	60	59	61					
(65)	64	66						
70	69	71						
(75)	74	76						
80	79	81						

注 (・) nの呼びは、その最小、最大を決めるときに基準寸法として用いる。

(..) l の最小・最大はJIS B 1021によっているが、少数点以下1けたに丸めている。

備考 1. ねじの呼びに括弧を付けたものは、なるべく用いない。

2. ねじの呼びに対して推奨する呼び長さ(l)は、太線の枠内とし、点線の位置より短い呼び長さのものは、注文者から指定がない限り全ねじとする。

なお、呼び長さに括弧を付けたものは、なるべく用いない。

3. ねじのない部分(円筒部)の径は、一般にほぼねじの有効径とするが、ほぼねじの呼び径にしてもよい。ただし、その直径は、ねじ外径の最大値より小でなければならない。

4. ねじ先の形状は、ねじ転造の場合はあら先、ねじ切削の場合は面取り先とし、その他のねじ先を必要とする場合は、注文者が指定する。ただし、ねじ先の形状・寸法は、原則としてDJIS B 1003(ねじ先の形状・寸法)による。