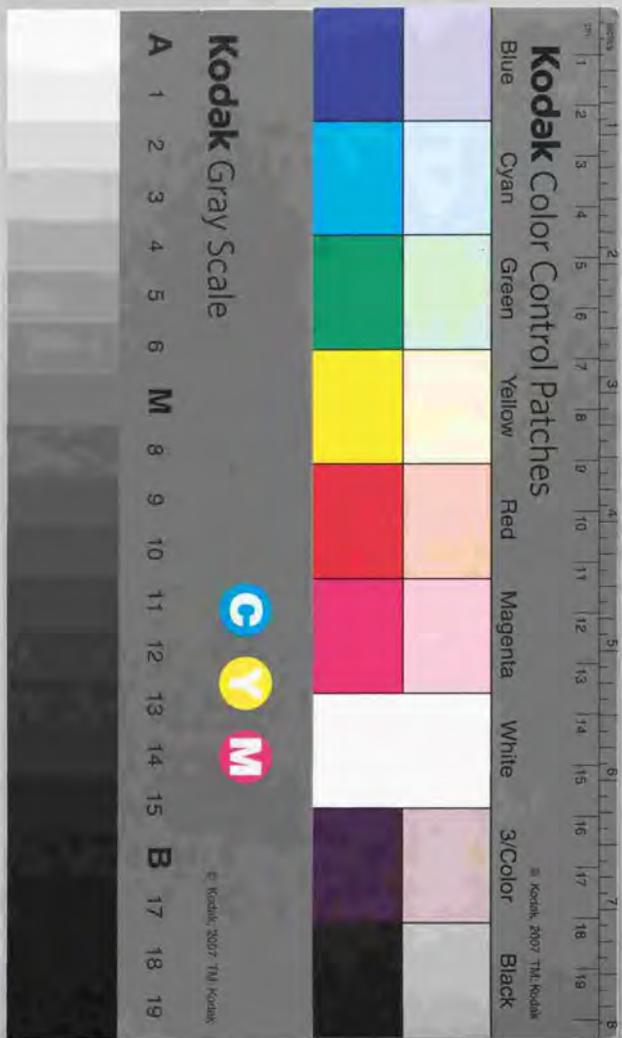


マイクロ超音波加工法の開発

江頭 俊



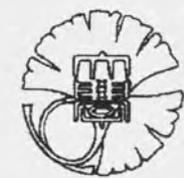
0

目次
第一章 緒言
第二章 超音波加工の原理
第三章 マイクロ超音波加工法の開発
第四章 実験結果
第五章 結論

学位論文

マイクロ超音波加工法の開発

江頭 快



東京大学

目次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	5
第2章 超音波加工概論	7
2.1 定義と歴史	7
2.2 加工メカニズム	9
2.2.1 加工メカニズムの要素	9
2.2.2 砥粒衝突による工作物除去メカニズム	12
2.3 加工機の構成	18
2.4 加工パラメータの加工特性に与える影響	23
2.4.1 加工速度と工具摩耗	23
2.4.2 加工面粗さ・加工穴形状	29
2.5 加工応用例	31
2.6 加工速度理論	34
2.7 特長と問題点	38
第3章 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工	42
3.1 緒言	42
3.2 加工方式について	42
3.3 加工機の構成	45
3.4 加工手順	53
3.5 加工パラメータと加工速度・工具摩耗率との関係	58
3.5.1 加工荷重	59
3.5.2 工具振動振幅	60
3.5.3 工具回転数	61
3.5.4 砥粒濃度	63
3.5.5 加工穴径	64
3.5.6 加工深さ	65

3. 5. 7	理論値との比較	67
3. 6	加工精度	69
3. 6. 1	真円度	69
3. 6. 2	貫通穴の形状	71
3. 6. 3	チッピング	73
3. 7	加工例	74
3. 7. 1	微細穴の加工	75
3. 7. 2	異形穴の加工	77
3. 7. 3	溝の加工	78
3. 7. 4	三次元形状の加工	82
3. 8	問題点	84
3. 9	まとめ	85
第4章	工作物加振方式によるマイクロ超音波加工	88
4. 1	緒言	88
4. 2	加工方式について	88
4. 3	加工機の構成	92
4. 4	加工手順	97
4. 5	加工パラメータと加工速度・工具摩耗率との関係	100
4. 5. 1	工作物振動振幅・加工荷重	102
4. 5. 2	工作物材質・工作物振動振幅・加工荷重	104
4. 5. 3	工具材質・工作物振動振幅・加工荷重	106
4. 5. 4	工具回転の有無・工作物振動振幅・加工荷重	106
4. 5. 5	砥粒径	109
4. 5. 6	砥粒材質	110
4. 5. 7	工具径	112
4. 5. 8	工具長さ	113
4. 5. 9	工具送り量	115
4. 5. 10	ダイヤモンド焼結体工具	118
4. 5. 11	固定砥粒方式	121
4. 5. 12	理論値との比較	123
4. 6	加工精度	124
4. 6. 1	クリアランスと真円度	124

4. 6. 2	貫通穴の形状	127
4. 6. 3	チッピング	130
4. 6. 4	加工面の状態	135
4. 6. 5	加工面粗さ	139
4. 7	加工例	141
4. 7. 1	微細穴の加工	141
4. 7. 2	深穴の加工	143
4. 7. 3	多数穴の加工	146
4. 7. 4	溝の加工	147
4. 8	まとめ	150
第5章	マイクロ超音波加工の加工メカニズム	155
5. 1	加工特性の特徴	155
5. 2	加工メカニズムの考察と検証	158
5. 2. 1	加工メカニズムの推測	158
5. 2. 2	推測された加工メカニズムと加工特性との関係	159
5. 2. 3	一般の超音波加工での延性モード加工	160
5. 2. 4	砥粒衝突の入射角度を変化させた場合	161
5. 2. 5	工具回転の効果	165
5. 3	まとめ	169
第6章	結論と展望	171
6. 1	結論	171
6. 2	展望	178
参考文献		181
本研究に関する文献・学会発表		184
謝辞		186
付録		187

第1章 緒論

1.1 本研究の背景

現在の工業界のトレンドの一つは、電子・情報通信端末などの急速な発展に示されるように、製品の小型化・高精度化である。その限られた空間に必要な機能を集約しなければならないので、それらを構成する部品はさらに小型で微細な構造が必要とされる。このような部品の製作にはマイクロ加工のテクノロジーが必要である。また、人体の内部でも活動できるようなマイクロマシンを目指す研究が盛んに行われており、図1.1 [1] のマイクロマシン市場予測に示されるように、将来大きな需要が予想される。これらマイクロマシンの製作にもマイクロ加工が必要である。

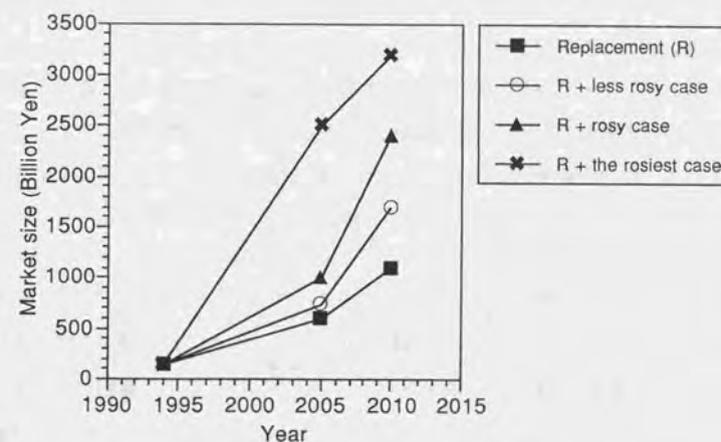


図1.1 マイクロマシン市場予測 (Hirano [1])

マイクロ加工によって創成される形状は様々なものがあるが、なかでも微細穴やキャビティの加工は、プリント基板、紡糸ノズル、インクジェットプリンタのノズル、ダイス、流体計測部品、マイクロレンズや絞りなどの光学部品等、幅広くいろいろな材料に対して行われている。

それらの様々な部品は、また様々な材料から構成されており、その中には、ガラスや半導体、セラミックスといった工業的に重要なものが含まれる。しかし、これらの材料への微細穴のような立体的形状の加工は一般に難加工の部類に入る。それらは硬くて脆いものが多く、大きな加工力の加わる切削のような機械加工法では材料の破損を生じやすく、また導電性が低いために放電加工のような電氣的な加工法を用いることができない。レーザー加工では反射や透過が大きい工作物は加工しにくく、熱衝撃によるチッピングや割れ、加工変質層などの影響が問題になる。フォトファブ리케이션は高精度かつ微細な加工が可能で量産性の高い加工法であるが、2.5次元的形状の加工が主で、高アスペクト比が得られない、適用できる材料の範囲が限られる、特別な環境やコストの高い装置が必要である、といった問題点がある。

一方、超音波加工は超音波加振された工具と遊離砥粒を用いた、機械加工でありながら硬脆材料に対して立体的な形状の加工が可能な数少ない加工法の一つである。材料の導電性も問わず、加工変質層も小さく、また特別な環境を必要とせず、加工装置も低コストである。そのため、それらの材料に対して穴あけなどの加工に多く用いられてきた。しかし、微細な寸法の工具の加工機への適切な取り付けが困難であり、図1.2のマイクロ加工体系図 [2] に示されるように、マイクロ加工への応用には限界があった。例えば、微細穴の加工では実用上内径100 μm 程度のものが限界とされており、それ以上の微細な穴の加工への応用はされていない。加工単位も数 μm であり、これはマイクロ加工の対象である穴や溝の寸法のオーダーである。一般に機械加工はマイクロ加工への応用が遅れている分野の一つであるが、その中においても、超音波加工は、ミリ

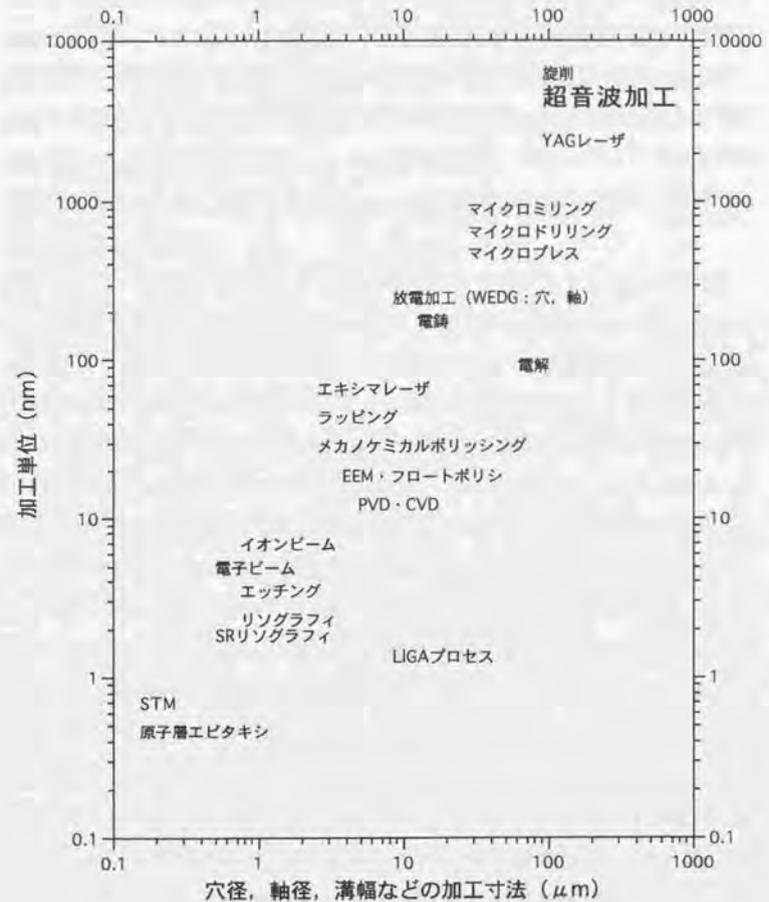


図1.2 マイクロ加工体系図 (和井田ら [2])

ング加工やドリル加工、プレス加工などの他の機械加工法と比較してマイクロ加工への応用が遅れていることがわかる。

より微細で高精度な加工が常に望まれているなかで、超音波加工の領域でもマイクロ加工への応用を進め、ニーズに応じていかななくてはならない。

1.2 本研究の目的

超音波加工のマイクロ加工への応用を妨げている大きな要因の一つは、微細な寸法を持つ工具の扱いが困難なことである。超音波加工は、工具形状および工具軌跡を工作物に転写する加工法であるので、例えば微細穴を加工する場合、その内径より小さい直径を持つマイクロ工具を製作しなければならない。マイクロ工具そのものの製作は放電加工などにより可能だが、その超音波加工機上への適切な取り付けが難しい。超音波振動子により生成された機械振動の振幅を拡大し工具まで伝達するために、加工に用いられる超音波周波数に共振周波数が合うように設計されたコーンおよびホーンが使用されるが、工具はその先端に取り付けられなければならない。一般の工作機械で工具保持に用いられるチャック等の方法では、超音波振動により加工中に工具保持にゆるみが生じるおそれがあり、またチャックの固有振動数を使用される振動の周波数にマッチングするように設計するのも難しい。したがって、主に工具はホーン先端にろう付けやはんだ付けによって固定されるが、このような方法では、寸法が小さくて扱いの容易でないマイクロ工具を偏心や傾きがないように取り付けるのは困難である。これが超音波加工のマイクロ加工への応用を阻んでいる大きな原因で、例えば、穴あけ加工の場合、実用上では直径 $100\mu\text{m}$ 以下のものは加工の対象外となっている。

本研究の目的は、この限界を超え、従来より一桁から二桁オーダーの小さい数 μm から数十 μm の加工寸法での加工が可能なマイクロ超音波加工法を開発する

ことである。加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法および、工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法を開発し、装置を試作して上述の問題点を解決するとともに、今までに報告例がない超音波加工によるマイクロ加工の加工特性を加工精度や加工速度、工具摩耗率などについて調べ、さらに微細穴や溝などの実際の加工へ応用し、その結果を示す。また、マイクロ超音波加工の加工メカニズムについても考察し、一般の超音波加工とは異なる特徴的な加工特性の原因を探る。

1.3 本論文の構成

本論文は、全6章から成り立っている。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、本研究の目指すところを示した。

第2章では、超音波加工全般について、過去の研究結果をまじえて述べる。そして、本研究のテーマであるマイクロ超音波加工法の開発の動機となった、超音波加工のマイクロ加工への応用における問題点について述べる。

第3章では、その問題点を克服した、第1のマイクロ超音波加工法である加工機上工具製作方式による加工法について述べる。そのコンセプト、加工機の構成、加工の手順を明らかにし、加工実験を行い、加工特性を調べ、加工応用例を紹介する。

第4章では、さらに微細な加工寸法でのマイクロ加工を行うために開発された第2のマイクロ超音波加工法である工作物加振方式による加工法について述べる。同じように、そのコンセプト、加工機の構成、加工の手順を明らかにし、加工実験を行い、加工特性を調べ、加工応用例を紹介する。

第5章では、マイクロ超音波加工の加工メカニズムについて考察を行い、それを検証する。マイクロ超音波加工の加工特性が一般の超音波加工とは異なる

特徴を示すことから、加工メカニズムも一般の超音波加工とは異なると考えられるからである。

第6章では、本研究の結論を述べ、それをふまえて今後の展望について述べる。

第2章 超音波加工概論

2.1 定義と歴史

「超音波加工」とは、「超音波周波数で振動している工具と工作物との間に砥粒と加工液を注入し、工作物に工具を押しつけ、工具の衝撃により砥粒が工作物を微細に破壊する加工法」と定義されている^[3]。しかし、「超音波加工」という名称の中には「振動」や「砥粒」という超音波加工に特徴的なキーワードが入っていないので、名前を聞いただけではどのような加工法が理解しにくい^[4]。そのため、「超音波機械加工」「超音波砥粒加工」「超音波破碎加工」などと呼ばれる場合もある。一方、工具を超音波加振して行うドリル加工や切削加工、研削加工、研磨加工、溶接加工なども「超音波加工」と呼ばれることがあり、今ひとつ用語法の統一がとれていない。ただ、砥石を超音波加振し穴あけを行う加工は、見方を変えれば遊離砥粒の代わりに固定砥粒を用いた超音波加工とも考えられ、定義は多少拡大して解釈する必要があるだろう。

また、「超音波加工」は英語の 'ultrasonic machining (USM)' が語源だが、英語表記の方でも ultrasonic machining が ultrasonic grinding, ultrasonic cutting, ultrasonic mechanical machining, ultrasonic dimensional machining, ultrasonic abrasive machining, slurry drilling などと呼ばれる場合があり^[5]、さらにこちらも ultrasonic machining が他の加工法を示すものとして使用されるケースがあり、用語法の整理が待たれる。

超音波加工と同じ加工現象が初めて文献に登場したのは1927年のことで、ガラス棒を超音波加振してガラスに穴あけを行ったという報告がある。国内においては、そのおよそ10年後に同じようにガラスに対する加工を行った例が報告されている^[5, 6]。これらの研究は当時それほど関心を集めなかったようで、

戦前においてはまだ超音波加工は用語としても加工法としても確立していなかった。

戦後再び超音波加工が文献に現れるのは1950年のMasonの著書においてであり、そこでは「チタン酸バリウムのような電歪振動子に金属ホーンを接着し、小端面に工具をつけて、カーボランダムのような砥粒をその先端に供給してやると、工具は強力な超音波振動をし、硬い材料に加工を行うことができる」と述べられている^[7]。実用化は、1946年頃から既に始まっていたようである^[8]。国内においては、1950年代に西村らによって、本格的な超音波加工の研究が始まった^[6]。

それから、ガラスや宝石、セラミックスや水晶といった硬脆な材料に対して加工が行えるこの新しい加工法の有用性に対して、科学者や技術者の注目が集まり、学術研究の対象となり、また加工機が商用化されて急速に機械加工法の一つとして確立していった。

しかし、その後も超音波加工に対しては様々な研究や応用が行われたものの、未だにその加工メカニズムの理論は確立されておらず、また技術的にも大きなブレイクスルーが現れなかった。そのため、現在ではほぼ成熟した「ローテク」加工法とみなされていて、最先端の加工分野ではあまり用いられていない。国内において超音波加工を専門に請け負っている企業は数社で、市場規模も数千万円程度であるという。学術研究も最近は少なく、海外の文献ではいくつか散見するものの、国内においてはこの数年超音波加工に関する研究発表はほぼ皆無といってよい。また、加工速度が遅いこと、微細な加工ができないことや工具摩耗の問題などで、以前の加工対象であった分野でも、他の加工法に置き換えられてきている。シリコンインゴットの切断に使用されていたのが内周刃砥石やワイヤソーにとって代わられたり、作業環境の改善や無人化作業を目的として遊離砥粒から固定砥粒方式の超音波加工への移行が進んでいるのはその例である。

けれども、近年、耐摩耗性・耐熱性・耐薬品性・電気絶縁性などの特長から、難加工材料である各種セラミックスに対する加工の要求が高まっており、まだ数は多いとは言えないが、それらに対する超音波加工の研究例が報告され始めている。微細な加工ができないことや工具摩耗の問題などが解決されれば、将来的にはこの分野において超音波加工が再び脚光を浴びることも十分に予想される。

2.2 加工メカニズム

2.2.1 加工メカニズムの要素

超音波加工とは、砥粒と加工液との混合物であるスラリーを用い、加工用の工具に超音波振動を加え、適当な加工荷重を与え工作物表面に押しつけて砥粒を工作物表面に押し込み、工作物を除去していく加工法である(図2.1)。

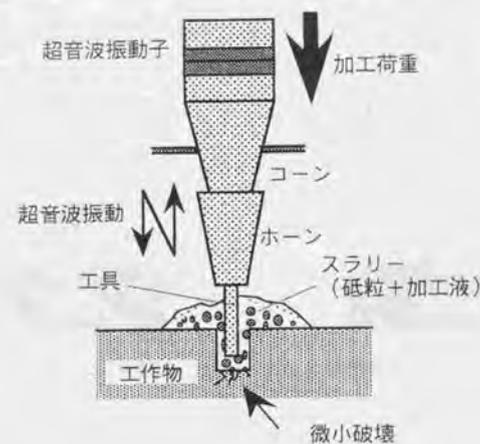
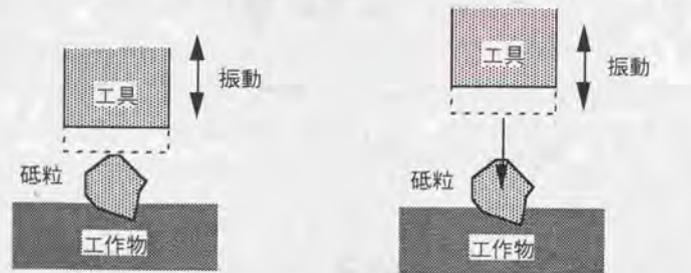


図2.1 超音波加工の原理

砥粒の寸法が小さいために一度に除去される量はわずかであるが、超音波振動により一秒間に何万回もこのサイクルが繰り返されるため、結果的に十分な加工量が得られる。また機械的な加工法であるため、金属・非金属、導体・不導体に関わらず加工が可能で、さらに全体の加工荷重が小さいので、硬脆な材料を破損させることなく加工が可能である。特にシリコンやガラス、セラミックスといった半導体や不導体で硬脆な材料は他の加工法が苦手としている材料であり、これらの加工に超音波加工が用いられることが多い。

その加工メカニズムの要素としては、次のような要素が考えられている。

- (a) 工具が砥粒を直接工作物表面に打ちこむことによる除去作用 (図2. 2 (a))
- (b) 工具の振動により加速された砥粒が、工作物表面に自由衝突することによる除去作用 (図2. 2 (b))
- (c) スラリーに超音波振動を与えることにより発生した液体中のキャビテーションによる除去作用
- (d) 砥粒や液体の化学作用による除去作用



(a) 工具による砥粒の直接打ち込み (b) 加速された砥粒による自由衝突

図2. 2 砥粒による加工メカニズム

このうち、(a)と(b)とが工作物除去作用に対してどれくらいの割合で貢献しているかについては、図2. 3に示すように、工具や工作物に段差をつけて加工を試みたいいくつかの研究が報告されている [9, 10]。工具と工作物が砥粒を介して直接接触する部分は(a)の作用、工具と工作物との間に粒径以上のギャップがある部分は(b)の作用により加工されることになる。これらの実験の結果より、加工量の大部分は(a)の工具による直接の砥粒の打ち込み作用によるものであるということが判明した。(b)の効果は全除去量の5-10%程度である [11]。

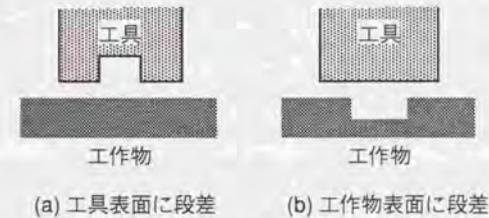


図2. 3 工具や工作物に段差をつけた加工

(c)の作用は、グラファイトのような多孔質の工作物に対しては例外的に工作物除去に大きな役割を果たしているが [12]、それ以外の多くの工作物に対しては、砥粒の循環や加工屑の排出の促進といった二次的な役割をしているに留まっていることがわかっている [5]。

(d)の作用については解明がほとんどされておらず、今後の研究が必要である。

2. 2. 2 砥粒衝突による工作物除去メカニズム

一般に、超音波加工における工作物除去メカニズムは、砥粒が工具に打ち込まれるか衝突するかして工作物表面にマイクロクラックを生成し、その伸長と交差により工作物が除去されるというように考えられている。しかし、これは脆性材料のみを工作物と仮定し、また除去は脆性破壊に基づいて行われるという考えによるものであり、延性材料に対する除去メカニズムや、砥粒径や砥粒の衝突速度が大きく変化した場合の除去メカニズムの変化などについての詳しい研究は、過去の超音波加工の研究においてほとんど行われていない。

ところで、同じ砥粒衝突による工作物除去現象であるエロージョンの研究において、その除去メカニズムはかなり明らかにされている。エロージョンの研究は、流体を用いて微粒物質を搬送するとき、搬送管の内面が微粒物質により損傷をうけるという問題の解析からはじまったものであり、この現象を積極的に応用したものが、サンドブラストや液体ホーニングなどの砥粒噴射加工である。

エロージョンは、速度を与えられた砥粒が工作物表面に自由衝突する作用によるものであるが、2. 2. 1で述べたように、超音波加工では、砥粒が直接工具に打ち込まれることによる作用の方が、砥粒の自由衝突による作用より大きい。けれども、砥粒が工作物表面に接触した後の工作物除去メカニズムはどちらでも同じなので、エロージョンの研究から導き出された結果を参考にできる。

以下に、それを述べる。

工作物除去メカニズム [13]

エロージョンにおいて、速度を与えられた砥粒のもつ運動エネルギーは、衝突時に工作物の弾性変形、塑性変形、切削作用、クラックの伸長などに消費さ

れる。これらの各作用へのエネルギー配分は、工作物材料によって異なる。

工作物は大きく脆性材料と延性材料とに分類される。図2. 4 [13]は、それらの材料に砥粒が衝突したときの工作物除去メカニズムの違いを表す。図(a)の左図に示すように、砥粒が工作物表面に対し斜めに入射して衝突した場合は、砥粒が工作物表面に切り込み、その部分に剪断破壊を起こし切りくずとして除去する(切削作用)。この場合、砥粒は研削や研磨における砥粒と同じ役目をする。また、図(a)の右図のように砥粒が表面に対し 90° に近い角度で衝突する場合は、工作物表面が塑性変形して盛り上がる(変形作用)。盛り上がるだけでは材料は除去されないが、現実には表面に対して 90° の入射角度で砥粒を衝突させても工作物は除去される。この理由の説明には、砥粒衝突の繰り返しにより工作物が塑性疲れをおこして材料が除去されるという考え[14]と、砥粒の衝突により表面が平面でなくなり、そこに衝突する別の砥粒に

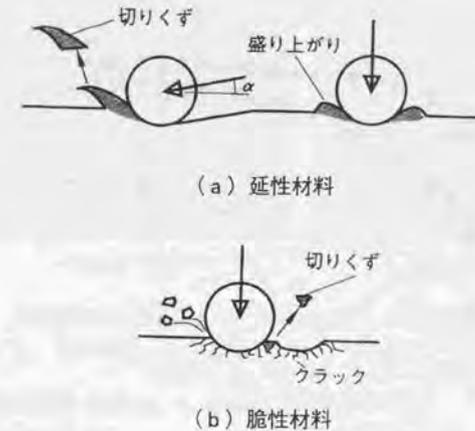


図2. 4 砥粒が衝突したときの工作物除去メカニズムの違い(生産加工の原理 [13])

としては90°より小さい角度で入射することになり、切削作用が生じるという考え [15] とがある。

延性材料の場合はこれらの切削作用と変形作用により材料が除去されるが、通常は切削作用の除去量の方が大きい。したがって、同じ条件で砥粒の入射角度を変えた場合の工作物の除去量を比較すると、切削作用の大きい入射角度の小さいところで除去量が大きくなる。

一方、脆性材料の場合は、図 (b) に示されるように、砥粒の衝突により工作物表面に脆性破壊を起こしてマイクロクラックを生じ、その伸長と交差によりその部分は切りくずとなって除去される。脆性材料の場合は切削作用より脆性破壊による除去量の方が大きいため、工作物表面に対する垂直方向の速度が大きくなると、つまり砥粒入射角度が90°に近づくにつれ除去量が増加する。

図2.5 [16] は、#120のSiC砥粒を用い、各種材料に対して砥粒入射角度を

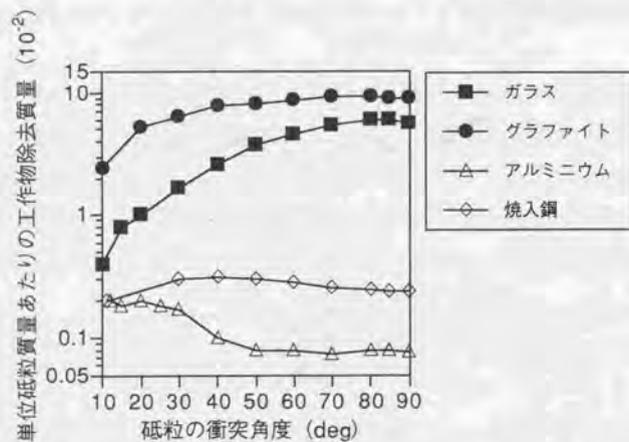
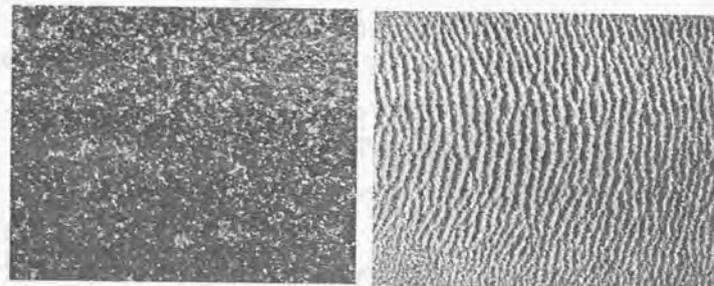


図2.5 #120のSiC砥粒によるエロージョンにおける砥粒入射角度と砥粒質量あたりの除去質量の割合の関係 (Sheldon [16])

変化させてエロージョンの実験を行ったときの、砥粒質量に対する工作物除去質量の割合を示す。アルミニウムや焼入鋼といった延性材料では、入射角度の小さいところで除去量が大きく、脆性材料のガラスやグラファイトでは射角度が90°に近づくにつれ除去量が増加していくことがわかる。また、脆性材料の除去量の最大値と、延性材料の除去量の最大値を比較すると、10倍から20倍脆性材料の除去量が多いことがわかる。

また、延性材料と脆性材料の除去メカニズムの違いは、エロージョン後の工作物表面の状態からも明らかである。図2.6 [17] に、#120 (平均粒径127μm) のSiC砥粒でエロージョンを行った後のガラスとアルミニウムの表面を示す。延性材料であるアルミニウムの表面には砥粒の切削作用によりさざ波状の模様ができるが、ガラスにはそのような模様は観察されない。



(a) ガラス (b) アルミニウム

図2.6 #120のSiC砥粒でエロージョンを行った後の表面 (Sheldonら [17])

小径な砥粒を用いた場合

エロージョンにおいて、小径な砥粒を用いると除去量の特徴が大きな違いを見せる。図2.7 [16] は、#1000 (平均粒径9μm) のSiC砥粒でエロージョン

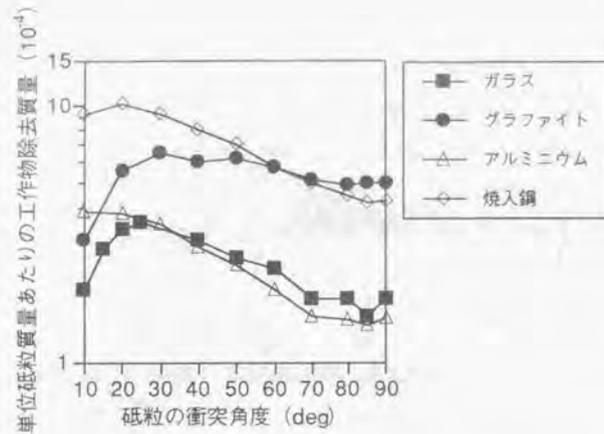


図2.7 #1000のSiC砥粒によるエロージョンにおける砥粒入射角度と砥粒質量あたりの除去質量の割合の関係 (Sheldon [16])

を行ったときの、砥粒質量に対する工作物除去質量の割合を示す。

図より、脆性材料のガラスやグラファイトの除去量が、延性材料のアルミニウムや焼入鋼の除去量と同じように、砥粒入射角度の小さいところで最大値になっていることがわかる。これは、脆性破壊より、切削による延性破壊が多く工作物除去に寄与しているためと考えられる。また、各工作物材料の除去量を比較すると、脆性材料と延性材料とで同じオーダーになっていることが示されている。これは、脆性材料においても、除去量の多い脆性破壊がほとんど生じていないためと考えられる。

また、図2.8 [17] に示されるように、エロージョン後の工作物表面の状態を観察すると、延性材料であるアルミニウムだけでなく脆性材料のガラスの表面にもさざ波状の模様ができていくことがわかる。

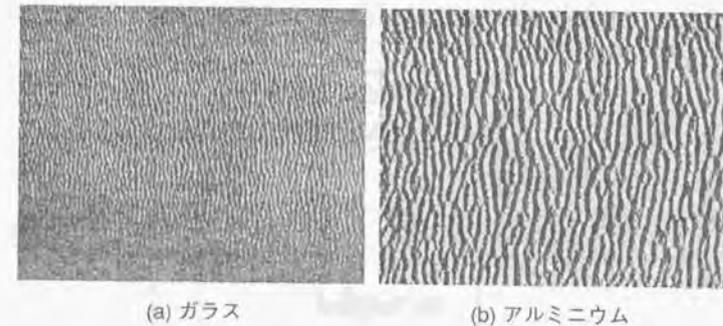


図2.8 #1000のSiC砥粒でエロージョンを行った後の表面 (Sheldonら [17])

これらの結果から、小径の砥粒の衝突による工作物除去は、脆性材料でも延性モードで行われていると結論付けられる。なお、砥粒衝突による工作物除去の脆性・延性転移の定量的な条件についてはまだ詳しくは解明されていないが、図2.9 [17] に表されるように、定性的傾向は示されている。砥粒径または衝突速度が小さくなると脆性モードから延性モードへと加工が遷移し、さらに小さくなると工作物が弾性変形するのみで工作物の除去は進まなくなると考えられている。

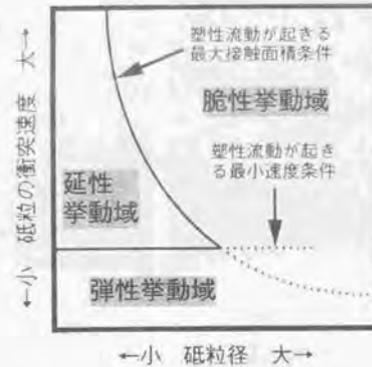


図2.9 エロージョンにおける延性・脆性転移条件 (Sheldonら [17])

2.3 加工機の構成 [5, 7, 11, 12, 14, 18-22]

基本的な超音波加工機の構成を図2.10 [7] に示す。以下に、それぞれの構成部分について述べる。

(1) 超音波発振器

超音波振動子の駆動電源である。通常15-30kHzの周波数で出力する。発振器出力を有効に利用するためには、駆動周波数を振動系の共振周波数に一致させなくてはならない。また振動系の共振周波数は加工中に工具の摩耗、加工荷重の変動、発熱、周囲の温度変化などによって、最初の値から変化する。共振周波数が駆動周波数からずれると、振動系の振動振幅が低下し、加工能率が低下して発熱も大きくなる。そのため、超音波発振器は振動系の共振周波数の変

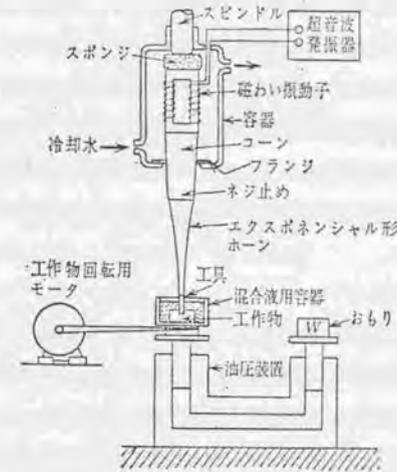


図2.10 超音波加工機の構成 (島川 [7])

化を検出し、駆動周波数をそれに合わせるように周波数自動追尾方式を採用しているものがほとんどである。

(2) 超音波振動子

超音波発振器からの出力を機械振動に変換する。振動子にはその電気機械変換方式によって磁歪型と圧電型とに分けられる。

磁歪型は、強磁性体が磁界の中におかれたとき、その磁界方向に長さが変化する磁歪現象を利用したもので、ニッケル薄板を積層したもの、フェライトやAlとFeとの合金などを材料としたものがある。磁歪型の長所は、Q値が小さく、共振周波数の帯域が比較的に広いので、コーンやホーンの形状・寸法を厳密に設

定する必要がなく製作が容易な点である。一方、その分損失が大きくなり、発熱が大きいので冷却が必要である。

圧電型は、ある種の結晶体に電界を加えると歪みを生ずる現象を利用したものである。チタン酸バリウムやPZTを材料としたピエゾ素子を用い、それを金属ブロックで挟み、ボルトで締め付けたボルト締めランジュバン型振動子が広く用いられている。Q値が大きいので、共振周波数を調整するのが難しいが、発熱が少なく電気エネルギーから振動エネルギーへの変換効率が高い。

(3) 超音波伝送コーン・ホーン

コーン・ホーンは、超音波振動子に取り付けられ、超音波振動の伝送および振動振幅の拡大を行う。超音波振動子が発生する機械振動の振幅だけでは加工に十分な振幅を得ることができないことが多いので、コーン・ホーンを用いて振幅を拡大する。振動子に直接取り付けられ、振動の節のところで支えられて加工機に固定されるのがコーンで、工具の把持の役目も持ちコーンにねじ止めに取り付けられるのがホーンである。コーン・ホーンの材料としては、機械構造用炭素鋼やステンレス鋼、ニッケルクロム鋼、チタン合金などが用いられる。

コーン・ホーンは、一般に断面が円で、図2.11にみられるように、先端に行くにつれて断面積が小さくなっていく形状になっている。これにより、太端

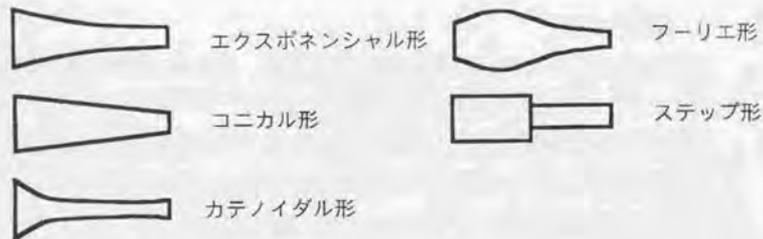


図2.11 様々なホーン形状

面に入力された振動の振幅が細端面において拡大される。断面の直径の変化は関数で表され、図に示されるようにエクスポネンシャル型、コニカル型、フーリエ型、カテノイダル型、ステップ型などがある。また、必ずしも断面は円形である必要はなく、長方形断面のホーンも用いられる。

これらのコーン・ホーン的设计は、従来振動方程式に基づいて求められていたが、最近、有限要素法を用いてより複雑な形状のものや、横方向の振動を重畳して起こせるものが設計されている。

(4) 工具

超音波加工は工具形状を転写する加工法であるので、加工形状の凹凸を反転した形状の工具が用いられる。NCによる輪郭加工の場合は、単純形状の工具で構わない。貫通穴の加工の場合は、パイプ状の工具が使用でき、加工必要量が少なくなり、またパイプを通したスラリーの循環が可能という利点がある。

また、超音波加工ではその性質上工具の摩耗が避けられないので、工具は消耗品として扱われる。工具の摩耗は、加工速度の低下や加工精度の劣化を招き、加工の効率に影響を与える。そのため、工具は摩耗しにくく、低コストの材料から製作されなければならない。延性材料は超音波加工では加工しにくい材質であるので、それらを工具材料に用いれば摩耗が小さく抑えられる。それに加えてコストや製作の容易さなどを考慮して、軟鋼やステンレス鋼、ばね鋼、ピアノ線等が用いられる。コストはかかるが、摩耗が特に問題になる場合は、ダイヤモンド焼結体も用いられる。

超音波加工では、工具は加振されるので、一般の工作機械で用いられているチャックのような把持方式では、加工中に取り付け部分がゆるむ可能性がある。したがって、工具ははんだ付けやろう付けで強固にホーンに取り付けられる。工具が小さい場合はねじ込み、はさみ込みのような方法でも固定される。またホーンと一体として成形されることもある。

(5) 加圧・送り機構

加工に必要な加工荷重を与え、その変化を捉え工具を送るのが加圧・送り機構である。加圧方式には、油圧で工作物を下から押し上げて工具に接触させる方式、スプリングで工作物を押し上げる方式、振動系をレバーの一端につり下げ工具を工作物に押し付ける天秤方式、振動系に錘を加えて工具を押しつける方式、圧縮空気や電磁力を用いた方式などがある。

いずれの場合でも、可動部の摩擦を減らし、送り感度と制動作用がよく効いた構造でないと、工作物の割れ、工具の変形などを引き起こすことになる。

(6) スラリーおよびスラリー循環装置

スラリーは、砥粒と加工液との混合物である。スラリーに使用される砥粒の材質は、アルミナ (Al_2O_3)、シリコンカーバイド (SiC)、ボロンカーバイド (B_4C)、ダイヤモンドの4種類に限られるとあってよく、それぞれ工作物材料によって使い分けられる。ダイヤモンドは他の砥粒に比べて高価であり、工具の摩耗が大きいので、ダイヤモンドダイスの加工などの限られた用途に用いられる。

加工液は加工面への砥粒の供給と加工屑の排出を行うので、低粘度のものが適しており、通常水が使われる。工作物によっては油やアルコールが使われることがある。

スラリーを循環する装置は、新しいスラリーを常に加工面に供給し、加工屑や摩耗した砥粒を排出することにより加工速度を保つことを目的とする。砥粒の供給方法は、単に工具の外側からスラリーを供給する方式、工具側面に溝を設けて加工面へスラリーを供給しやすくする方式、中空工具を用い工具の中からスラリーを吸引して循環を促進する方式などがある。

(7) 工具・工作物回転機構

超音波加工は工具を回転させる必要がないので、加工機に回転機構が備わっていないものが多い。しかし、回転による加工穴の真円度の向上、スラリー循環の促進、研磨作用の重量などを目的として、工具や工作物を回転させるロータリー超音波加工が行える加工機も開発されている。

回転運動を得るには工具を回転させる方式と工作物を回転させる方式とがある。工具を回転させる方式は、工作物に対するアラインメントが必要ないが、振動系への電力供給のために新たにブラシとスリップリングを用いる必要がある。これは高速回転の場合に接触抵抗値が不安定になり、振動子への電力供給がうまくいかない場合がある。工作物を回転させる場合はそのような心配はないが、ステージの回転中心を工具の中心軸にうまく合わせる必要がある。

2.4 加工パラメータの加工特性に与える影響

[5, 7, 11, 12, 14, 18-22]

超音波加工では、加工速度・工具摩耗・加工精度などが重要な加工特性である。これらに影響を及ぼす加工パラメータは非常に多い。以下にそれぞれの加工特性に影響を与える加工パラメータについて述べる。

2.4.1 加工速度と工具摩耗

加工速度は、単位時間あたりに除去された工作物の体積または加工された深さを示す。工具摩耗は、摩耗量や摩耗率として表される。工具摩耗率は、除去された工作物の体積に対する工具摩耗の体積の比、または加工深さに対する工具の軸方向の摩耗長さの比で表す。砥粒の立場からみれば、工作物に対しても工具に対しても同じように除去加工を行うので、単純に考えると工具摩耗率は

工作物の加工速度に対する工具の加工速度の比ともいえる。

(1) 工具・工作物材質の影響

表2.1 [22] に、代表的な工作物材料の加工速度と工具摩耗率を示す。この表からわかるように、チタン酸バリウムやアルミナなどのセラミックス、ガラス、フェライト、グラファイト、シリコンといった材料に対して加工速度が

表2.1 代表的な工作物材料の加工速度と工具摩耗率 (楡井 [22])

(加工条件) 超音波出力: 150W, 工具材質: ピアノ線, 工具径: 3mm中実

工作物	砥粒	加工速度 (mm/min)	工具摩耗率 (工具摩耗長さ /加工深さ)	加工荷重 (g/mm ²)
ガラス	SiC, #320	6.0	0.004 - 0.007	30 - 50
チタン酸 バリウム	SiC, #320	6.5	0.009 - 0.014	100
フェライト	SiC, #320	6.5	0.011 - 0.008	80 - 150
グラファイト	SiC, #320	8.4	0.003 - 0.005	230
シリコン	SiC, #320	3.5	0.005	230
ルビー	SiC, #320	0.6	0.083 - 0.125	
超硬合金	B ₄ C, #280	0.2	0.5	330
ダイヤモンド 焼結体	B ₄ C, #280	0.17	71	
ステンレス鋼 SUS304	B ₄ C, #280	0.3	0.667	250 - 280
アルミナ	SiC, #320	3.0	0.025 - 0.033	290

大きく、また工具摩耗率が小さいので、これらの材料の加工に適していることがわかる。ステンレス鋼のような延性材料では加工速度が小さくあまり効果的でない。また、ダイヤモンド焼結体に対する加工では、非常に工具摩耗率が大きくなっている。

これらの加工速度・工具摩耗に対し、工作物や工具の材質のどのような特性が影響を与えているかについて、様々な研究が行われてきている。Komaraiahらは、実験結果より、加工速度は工作物の硬さの-0.62乗に比例し、また破壊靱性値の-1.2乗に比例するという結果を得ている [23]。工具摩耗に関しては、長さ方向の摩耗長さは工具材料の硬さと破壊靱性値との積の-1.1乗に比例し、また半径方向の摩耗長さは硬さの-1.54乗に比例し、破壊靱性値との相関はないという結果を得ている [24]。この長さ方向と半径方向の摩耗の違いは、工具の加工面には砥粒が垂直に衝突するので硬さだけでなく破壊靱性値の要素も工具摩耗に影響するが、工具側面の摩耗は砥粒による研磨作用が大きく、破壊靱性値より硬さの要素が大きく影響するためと説明されている。

(2) 工具の振動振幅

工具振動振幅は加工速度や工具摩耗に大きな影響を与えるパラメータである。通常は15-150 μ mの振幅が用いられる。一般に、振幅が大きくなるにつれ加工速度も増加し、それがある値を超えると減少していく。最適な加工速度を得るためには、振幅を砥粒の中心粒径と同じに揃えることが理想的である。

振幅と加工速度との関係については、加工速度は振幅に比例して増加するという説と、振幅の2乗に比例するという説と、振幅の0.75乗に比例するという説とがあり、まだ結論は出ていない。

(3) 工具断面形状

同じ断面積をもつ工具でも、断面形状が異なると加工速度に違いがでる。同

じ断面積では、工具周囲が長いほど加工速度が上昇する。断面積に対するクリアランスが大きくなるので、スラリーの循環や加工屑の排出が促進されるからである。

(4) 振動周波数

広いレンジで振動周波数を変化させるのは、一定の共振周波数にマッチングするように製作されている一般の超音波加工機では困難である。そのため、振動周波数の影響についてはあまり研究がされていない。その中で、加工速度は周波数に比例するという報告と、その平方根に比例するという報告とがある。

(5) 加工荷重

加工荷重も加工速度や工具摩耗に大きな影響を与えるパラメータである。加工荷重の増加につれて加工速度も上昇していき、ある荷重で加工速度が最大になり、その後は減少していく。また最適加工荷重を加工面積で割った最適加工圧力は、加工面積が小さいほど大きくなる。

(6) 砥粒径・砥粒材質

加工速度は砥粒径により大きく影響を受ける。粒径が小さくなると加工速度は減少するが、特に砥粒の大きさが振動振幅より小さくなると加工速度は急激に減少する。砥粒が大きくなりすぎると、加工ギャップの中へ砥粒が入りにくくなるので加工速度は減少する。工具摩耗は、粒径が大きく、砥粒の硬度が高くなると増加する。

表2.2 [21] に、使用砥粒による加工速度の違いを示す。この表において、加工速度は、#100のB₄C砥粒を用いてソーダガラスを加工したときのものを100として表している。表より、砥粒径が大きいほど加工速度が大きくなるのがわかる。また、同じ粒度のB₄CとSiCを比較した場合、B₄Cの加工速度の方が大

表2.2 砥粒による加工速度の違い(マイクロ加工技術 [21])
(#100のB₄C砥粒でソーダガラスを加工したときの加工速度を100とする)

工作物	B ₄ C			SiC, #100	ダイヤモ ンド, 25 μ m
	#100	#220	#440		
磁器	70		14	53.5	
ソーダガラス	100	90	17	85	90
ダイス鋼 (HRC58)	2.2	2.1		1.5	
超硬合金	4.1	3.5		2.6	4.3
チタン酸バリウム	110			109	

きく、これはB₄Cの方が硬さが大きいためであると考えられる。

(7) 加工液と砥粒濃度

図2.12 [21] に、加工液の粘度と加工速度との関係を示す。図から、動粘度の小さい加工液を用いると、加工速度が大きくなるのがわかる。加工液の粘度以外にも、表面張力・密度・比熱・熱伝導率などの物理的性質が、加工速度に影響を及ぼす。しかし、実用上では、工作物が錆を生じて不具合なときや、ダイヤモンド砥粒を用いる際に砥粒の飛散を防ぐためなどで油を用いる場合以外では、ほとんどの場合加工液には水が用いられているので、加工液の特性の違いに関する研究はあまり多くない。

砥粒濃度は最適の濃度が存在する。濃度が低すぎると加工面での有効砥粒数が少なくなり、高すぎると消耗した砥粒が新しい砥粒と置換されにくくなり、いずれの場合も加工速度は低下する。工作物の硬度が高いほど濃度は低いほう

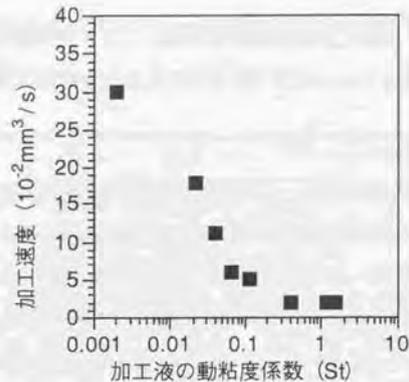


図2.12 加工液の粘度と加工速度の関係 (マイクロ加工技術 [21])

がよい。多くの場合、重量濃度にして20%から50%の濃度のものが用いられる。

(8) 砥粒の供給方法

砥粒を加工面に一様に供給できるか否かで、加工速度が大きく異なる。とくに加工深さが大きくなるほど、加工面への新しい砥粒の供給と、古い砥粒や加工屑の排出が困難になるため、加工速度が低下する。これを防ぐために、砥粒を循環させるだけでなく、工具を上下方向に動かして砥粒循環を促進したり、中空工具を用い、工具の先端から砥粒を加工面に供給することにより加工速度の低下をある程度まで防ぐことができる。特に深穴の加工の場合にはこれらの処置は欠かせない。

(9) 工具または工作物の回転数

工具または工作物を回転させることにより、砥粒の循環が促進され、加工速

度が増大する。しかし超音波加工機は回転機構を備えていないタイプが多く、工具回転数が変化したときの加工特性についてはほとんど報告例がない。

(10) その他

工具の底面の摩耗は、工具が砥粒を衝撃するときに見える砥粒の除去作用によるものであり、工具側面の摩耗は加工ギャップを砥粒が通過するときの作用による。したがって、側面の摩耗は工具に横方向の振動がある場合に大きくなる。また、側面でも底面に近い部分は砥粒と接触する時間が長いので多く摩耗し、工具はテーパ形状がつく。

2.4.2 加工面粗さ・加工穴形状

(1) 工具振動振幅

工具の振動振幅が大きくなると、砥粒の工作物表面への打ち込み深さも大きくなるので、表面粗さは増加する。また、工具に横方向の振動が生じて加工された穴の断面が大きくなる。

(2) 加工荷重

加工荷重を増加させることにより、砥粒同士の衝突作用が増して砥粒径が小さくなるので、表面粗さは向上する。また、工具の横方向の振動を抑制するので、クリアランスを小さく抑えることができる。

(3) 砥粒径

砥粒径が小さくなると、加工単位も小さくなるので、加工面粗さが小さくなり、加工面品質が向上する。また、超音波加工においては工具と加工穴とのクリアランスには1層分の砥粒が流入していると考えられているが、その大きさ

は砥粒径の中間値に影響されるという説と砥粒の最大径に影響されるという説とがある。

加工初期には粒径の小さい砥粒がクリアランスに入って行くが、加工の進行に伴い徐々に大きい粒径の砥粒が入り込んでいくので、深穴加工の場合にはテーパがつきやすい。高精度な加工の場合は使用する砥粒の粒径の均一性を考慮しなければならない。

(4) 工具の面粗さ

工具の作用面の粗さは、加工穴の底面に再生されるので、加工面粗さに影響を及ぼす。

(5) スラリーの循環

スラリーの循環が悪いと、加工面に砥粒が均一に行き渡らなくなるので、表面粗さは悪くなる。

(6) 工具または工作物の回転数

工具または工作物に回転を与えることにより、スラリーが加工面に均一に行き渡り、また研磨作用も期待され、面粗さが良好になる。また、工具穴の真円度の向上も期待できる。

(7) その他

クリアランスは、図2.13^[11]にみられるように、加工深さ（加工時間）の増加に伴い大きくなる。したがって、クリアランスを小さくするためには、最適加工荷重・工具振動振幅を用いて加工速度を増大し、加工時間を短くする必要がある。

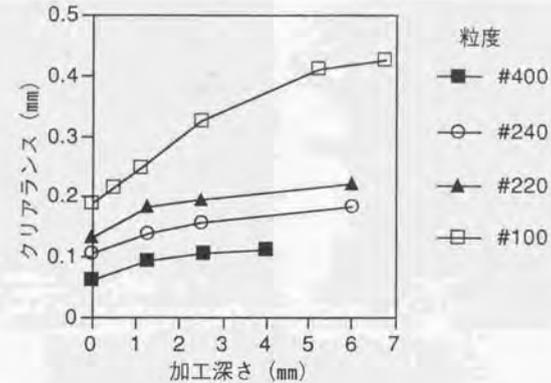


図2.13 加工深さとクリアランスの関係 (佐藤 [11])
(工作物：ガラス，砥粒：B₄C)

以上、各加工パラメータの加工特性の及ぼす影響について述べてきたが、各パラメータは独立でなく、他パラメータの影響を受けて、加工特性に及ぼす影響が変化することもある。

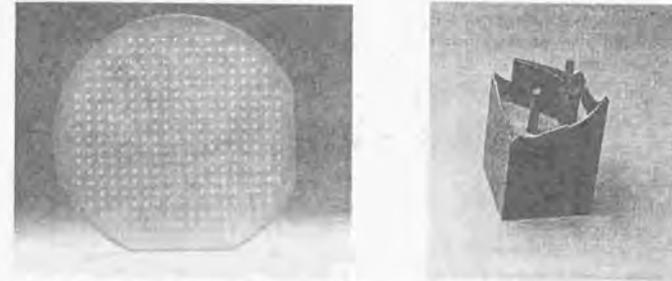
2.5 加工応用例

超音波加工は、その加工原理から、工具の回転や、工具と工作物の間に大きな相対運動を必要としないので、図2.14^[21]に表されるように多様な加工ができる。ここでは、具体的な加工例を紹介する。

・ガラス基板、アルミナ基板、グラファイト薄板に対する、数百個の穴の一括加工 (図2.15 (a) ^[25])



図2.14 超音波加工の多様性 (マイクロ加工技術 [21])



(a) バイレックスガラスへの多数穴一括加工 (b) 総型工具による窒化珪素への加工



(c) グラファイト (右側) への模様刻入 (左側が工具)



(d) CNCによる炭素繊維化合物への加工

図2.15 超音波加工の応用例 ((a) 楡井 [25], (b) および (d) Hahnら [26], (c) Gilmore [27])

- ・電子機器用ガラス基板から、マイクロモジュール基板やIC封着用ガラス板、金属皮膜抵抗基板、抵抗線巻棒などの製作
- ・ガラス器具への目盛、文字、模様などの刻入
- ・セラミック製集積回路用部品の切り出し
- ・窒化珪素への総型工具によるタービンプレードの加工 (図2.15 (b) [26])
- 1)
- ・グラフィイトへの模様の刻入 (図2.15 (c) [27])
- ・単純形状電極を用いたCNCによる炭素繊維化合物へのアクセラレーターの加工 (図2.15 (d) [26])
- ・フェライトコアへの小径穴の加工
- ・シリコンインゴットのスライシング
- ・シリコンウエハからの素子の切り出し
- ・ダイヤモンドダイスにえられた下穴に対する仕上げ加工
- ・サファイアやトラ目石などの宝石類への穴あけ
- ・油圧サーボバルブのポートの加工
- ・水晶共振器用の薄板水晶の切断

2.6 加工速度理論

加工において加工速度を予測することは重要である。その場合、一定の条件下での過去の加工データを参照するのみでは、新しい条件で加工を行うたびにまたデータを蓄積しなければならない。そこで、加工メカニズムの考察から、加工速度を各加工パラメータの関数で表そうという試みが今までにいくつか行われてきた。

(1) Shawの加工速度式 [28]

加工速度式に関する研究では、一番早いものである。Shawは、以下の加工速度式を導いた。

$$V \propto \left(d \sqrt{\frac{8Fyd}{\pi KHC(I+q)}} \right)^2 Nf$$

この式で、 V は加工速度、 d は砥粒径の中間値、 F は加工荷重、 y は工具振動振幅、 K は比例定数、 H は工作物の硬さ、 C はスラリー濃度、 q は工作物の硬さの工具の硬さに対する比、 N は加工面の砥粒数、 f は振動周波数を表す。

Shawは、工具が砥粒を直接工作物表面に打ち込むことによる除去量が、砥粒の表面への自由衝突によるものよりはるかに大きいことを理論的に示し、実験において確かめた。しかし、加工速度の値に関しては、式に実測値を代入して求める定数を含むので、定量的な予測はできず、また加工パラメータの変化による加工速度の変化の傾向も、その後の実験結果と一致しなかった。

(2) Millerの加工速度式 [8]

Millerは、加工速度式として次の式を導いた。

$$V = \frac{\Phi f d A Y x v}{q G b r \rho v (x+1)}$$

この式で、 V は加工速度、 Φ は比例定数、 f は加工荷重、 d は立方体である砥粒の一辺の長さ、 A は工具振動振幅、 Y は大気圧、 x はスラリー中の加工液の質量に対する砥粒質量の比、 v は振動周波数、 q は加工硬化容量、 G は工作物の横弾性係数、 b はBurger's vector、 r は工具半径、 ρ は砥粒の密度、 v は工作物表面にあるスラリー体積を表す。

Millerは、工作物が砥粒の衝突により塑性変形し、その部分が加工硬化してまた砥粒の衝突により工作物が除去されるという、脆性材料への加工が主な超音波加工としてはかなり特殊なケースを想定している。また、砥粒の形状を同一

寸法の立方体と仮定しており、値が不明な比例定数も導入されている。実験結果と理論式による値を比較しているが、砥粒の粒径が大きくなると加工速度も上昇するなど、加工速度変化の定性的傾向を示すに留まっている。

(3) Cookの加工速度式 [29]

Cookは、次の加工速度式を導いた。

$$V = \frac{5.9 f \sigma \sqrt{aR}}{H}$$

この式で、 V は加工速度、 f は振動周波数、 σ は加工圧力、 a は工具振動振幅、 R は砥粒径の中間値、 H は工作物の脆性破壊硬さを表す。

この式には実験により求める定数はなく、加工パラメータに数値を代入することにより加工速度を求めることができ、理論式から定量的に加工速度を求めようという試みとしては最初のものである。しかし、実験結果と比較したところ、加工速度は理論値の10%という結果になった。これは、砥粒を球形とみなし、また砥粒の衝撃により砥粒の真下の工作物表面が半球形状で除去されるというかなり簡略化した仮定をしていることに大きな原因があると思われる。また、砥粒の破碎を考慮に入れていないことや、加工中には加工面が仮定のように平面には保たれないことなどの原因も考えられる。

(4) Kainthらの加工速度式 [30]

Kainthらは、以下の6式を解くことにより、加工速度を求めた。砥粒の粒径分布や工具の硬さなどを考慮に加えており、導出がかなり複雑になっている。

$$v = \frac{2.29 N f}{(1+q)^{2/3} d_{av}} \int_x^{d_{max}} [(d-x)d] \left[1 - \left(\frac{d}{d_{av}} - 1 \right) \right]^2 dd$$

$$x_t = (x+a) - a \sin \theta$$

$$x_{av} = (x+a) - \left(\frac{a \cos \theta_s}{\pi/2 - \theta_s} \right)$$

$$\theta_s = \sin^{-1} \left(\frac{a - d_{max} + x}{a} \right)$$

$$N = \frac{C}{\left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{C}{\rho_a} \right)} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{d_{av}}{0.57 \rho_a} \right) \left(\frac{x_{av}}{\int_x^{d_{max}} d^3 \left[1 - \left(\frac{d}{d_{av}} - 1 \right) \right]^2 dd} \right)$$

$$\frac{2 \pi F}{\omega} = \frac{1.095 \pi N H}{(1+q) d_{av} \omega} \int_{\theta_s}^{\pi/2} \int_x^{d_{max}} (d^2 - dx_t) \left[1 - \left(\frac{d}{d_{av}} - 1 \right) \right]^2 dd d\theta$$

これらの式において、 V は加工速度、 N は加工面に存在する砥粒数、 f は振動周波数、 q は工作物硬さに対する工具硬さの比、 d は砥粒径、 d_{max} は砥粒最大径、 d_{av} は砥粒径の平均値、 x は振動している工具と工作物との最小間隔、 x_t はある時点における工具と工作物との間隔、 x_{av} は工具と工作物との平均間隔、 a は工具振動振幅、 θ は工具振動の位相、 θ_s は工具が砥粒に接触したときの工具振動の位相、 ρ_f はスラリーの加工液の密度、 ρ_a は砥粒の密度、 D は工具直径、 C はスラリー濃度、 F は加工荷重、 ω は角振動数を表す。

上記の式を解くと未知数がなくなり、加工速度を定量的に求めることができる。しかし、(3)のCookと同じように、砥粒は球形であるとし、砥粒の衝撃により砥粒の真下の工作物表面が半球形状で除去されるという簡略な仮定を用いており、同じように実測値は理論値より一桁オーダーが小さかった。

(5) Komaraiahらの加工速度式 [23]

Komaraiahらは、砥粒衝突による除去作用はクラックの伝播によるという現実に近いモデルを用いて、次のような加工速度式を導いた。

$$V \propto \frac{P^2 f}{N K^{2/3} \sqrt{H}}$$

この式で V は加工速度, P は加工荷重, f は振動周波数, N は加工面における砥粒数, K は破壊靱性値, H は硬さを表す。

モデルは現実に近いが, 未知の比例定数が導入されておりクラックによる除去体積を定量的に求めることができず, 各加工パラメータを変化させたときの加工速度の変化の定性的傾向を示すのみにとどまっている。その傾向は, 実験結果とよく一致している。

以上のように, 様々な加工速度式が提唱されてきた。しかし, それぞれ定量的に加工速度を求めることができない, 実測値とかけ離れているといった問題があり, 未だ加工速度式について統一された見解がない。

加工速度を理論的に求めるための大きな障害は, 実際の加工には砥粒径・砥粒形状・砥粒の破碎による変形・加工中の加工面の状態などに大きなばらつきがあることで, 一つの砥粒衝突による工作物除去量が定まった値をとらず, 確率的・統計的に求めるしかないことである。厳密に解析するには, 計算機による数値的な解析に頼らざるを得ない。

2.7 特長と問題点

超音波加工の特長としては次のようなことが挙げられる。

(1) 硬脆材料への加工が得意

硬脆材料に対して立体的形状を加工できる機械加工法は少ない。超音波加工は, そのような材料に対しての加工を得意としている。

(2) 加工できる対象が広い

超音波加工は硬度の高い砥粒を用いた機械加工なので, 加工対象の導電性の有無を問わず, またかなり硬い材料まで加工できる。

(3) 加工の多様性

2.5で述べたように, 超音波加工は多様な加工が可能である。特に多数穴の同時加工は, 加工能率の向上・加工精度の保持に有効である。

(4) 加工変質層が小さい

超音波加工は微細な砥粒により工作物を除去する加工法であり, 加工単位が小さく, また加工荷重も小さいので, 工作物の表面の残留応力や熱影響層, クラックなどの加工変質層がきわめて小さい。

(5) 加工仕上がり面が良好

仕上がり面は砥粒加工特有の平滑な加工面が得られる。面粗さは使用砥粒径にほぼ比例する。砥粒を小さくして行くことによって, 鏡面に近い加工面を得ることも可能である。

(6) その他

加工機の構造上, 危険が少なく安全性が高く, コストもそれほど高くない。また, 加工機の設置に特別な環境は必要でない。

一方, 超音波加工の問題点としては以下のようなことが挙げられる。

(1) マイクロ加工が困難

超音波加工は工具形状または工具軌跡が工作物に転写される加工法であるの

で、微細な形状を加工しようとするれば、より微細なマイクロ工具を用いなければならない。マイクロ工具そのもの製作は可能だが、その取り付けが困難である。

工具に超音波振動を伝えるためには工具はホーンに取り付けられる必要がある。ホーンは入力された超音波振動を共振により工具に伝送するもので、基本的に円筒をもとにした形状の金属であり、それに通常はんだ付けやろう付けで工具が取り付けられる。超音波振動は機械的な把持をゆるめる作用があるので、精密なチャックやマンドレルを用いて工具を把持することが困難であり、またそれらの共振周波数を加工に用いられる超音波周波数に一致するように製作するのも非常に難しい。

はんだ付けやろう付けでは、マイクロ工具を偏心や傾きがないように取り付けるのは難しく、マイクロ加工への応用に限界がある。そのため実用段階では、例えば穴あけでは直径100 μm 程度が限界とされている。今までに文献で報告されている中で超音波加工で加工された穴として最小の内径を持つものは、Morelandらの研究による内径76 μm の加工穴である^[31]。研究段階では直径40 μm の穴の加工を行った例もあるようだが、定性的・定量的な解析等は報告されていない。

(2) 工具摩耗の問題

工作物の材質・工具の材質・その他の加工条件により差はあるが、超音波加工においては工具の摩耗は避けられない。工具の摩耗は加工形状や加工精度に影響を及ぼす。工具は消耗品であり、定期的に交換する必要がある。

(3) 加工速度が小さい

放電加工やドリル加工が用いることのできる工作物に対しては、超音波加工の加工速度は比較してかなり小さい。

(4) 加工面積の制限

広くて複雑な面の加工に対しては、スラリー中の砥粒の濃度を加工面積全体にわたって均一にすることや工具の加工面を均一に振動させることが難しく、加工可能な加工面積に上限がある。

(5) 加工深さの制限

加工深さが大きくなると、スラリーの循環が悪くなり、加工屑が加工面から排出されず、新しい砥粒も到達しにくくなるので、加工速度が非常に小さくなる。

以上のように、超音波加工は特長点と問題点をそれぞれもつ。このうち、問題点(1)のマイクロ加工が困難であるという点が、本研究の大きな動機の一つである。第3章と第4章において、この問題点を解決するために開発されたマイクロ超音波加工法について述べる。

第3章 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工

3.1 緒言

第2章で述べたように、超音波加工はマイクロ加工への応用に限界があり、数十 μm のオーダーの加工寸法での超音波加工の加工例やその加工特性などは全く報告されていない。

本研究は、マイクロ超音波加工法を開発し、このオーダーの加工領域で超音波加工を行うことを目的としている。本章では、その第1の手法である加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法について述べる。

まず加工法のコンセプトについて述べる。主な特徴は、超音波加工機にワイヤ放電研削(WEDG)加工用ユニットと工具回転機構とを取り付けたことである。これにより、マイクロ超音波加工用工具の製作が加工機上で可能となった。そして、加工装置の構成と具体的な加工手順について述べる。

次に実際に加工を行い、その加工特性を加工速度・工具摩耗率・加工精度の点から調べ、その特徴を明らかにする。

最後に、本マイクロ超音波加工法の応用範囲を知るための一つの指標として、得られた加工特性をもとに試みたいいくつかの典型的加工例を示す。

3.2 加工方式について

2.7の超音波加工の問題点で述べたように、超音波加工はマイクロ工具の取り付けに困難な点がある。

そこで発想を変えて、本手法においては、マイクロ工具を製作してから加工

機に取り付けるのではなく、工具材料を加工機に取り付けてからマイクロ工具を製作するという手法を考案した。これにより、マイクロ工具の取り付けという困難な作業を必要とせずにマイクロ超音波加工を行うことができる。取り付けられる工具材料は製作される工具より大きく、扱いやすい寸法でよく、取り付けられたときに加工機に対して多少の偏心や傾きがあっても構わない。

加工機上でのマイクロ工具製作を可能にするために一般の超音波加工機をベースに以下の機構を付加した。

(a) WEDG加工用ユニット

(b) 振動子・コーン・ホーン・工具を回転させる機構

WEDG加工は、図3.1に見られるように、放電加工の一種であり、加工電極として走行する金属ワイヤを用いることと、加工点においてワイヤを保持するワイヤガイドとが特徴である [32]。

一般に放電加工においては工作物側だけでなく、加工電極側も消耗するので、加工中に電極形状が変形する。そのため、加工中の加工点(放電点)の精密な

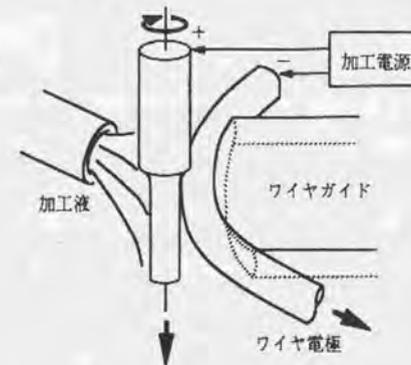


図3.1 WEDG加工の原理

位置の制御が困難である。しかし、走行するワイヤを加工電極に用いれば、消耗した部分を先に送って加工点に新しいワイヤを常に供給することができ、事実上加工点における電極消耗をゼロとみなすことができる。

また、同じようにワイヤ電極を使用するワイヤ放電加工と異なり、加工点においてワイヤをワイヤガイドで保持するので、ワイヤの振動を抑えることが可能である。

これらにより、WEDG加工は高精度で微細な放電加工が可能であり、直径 $5\mu\text{m}$ 以下の細棒の製作も可能である。

このWEDG加工用ユニットを超音波加工機に取り付け、工具材料をWEDG加工により加工すれば、超音波加工機上でのマイクロ工具の製作が可能になることになる。その際に工具材料を回転させなければならないので、工具材料と、それに接続しているホーン・コーン・振動子とを一体として回転させることができるような構造が必要とされる。

マイクロ工具が製作されたら、それを加工機から取り外すことなくそのまま超音波加工において使用できるので、マイクロ超音波加工が可能となる(図3.2)。

WEDG加工と超音波加工で同じ工具送り機構を用いるので、工具の中心軸は加工装置の送り軸と平行で、偏心がなく製作されることになる。これは、小径な工具の場合、従来の超音波加工機では取り付けに細かな調整が必要とされる作業である。

また、WEDG加工による工具製作のための回転機構であるが、これは超音波加工の際にも用いることができ、ロータリー式マイクロ超音波加工が可能である。工具を回転させることにより加工速度の上昇、真円度の向上、加工穴のエッジのチッピングの抑制などが期待される。

以上のように、本加工法は、従来の超音波加工機にない加工機上工具製作機能を持ち、マイクロ工具の工具取り付けの困難さという問題を解決するもので

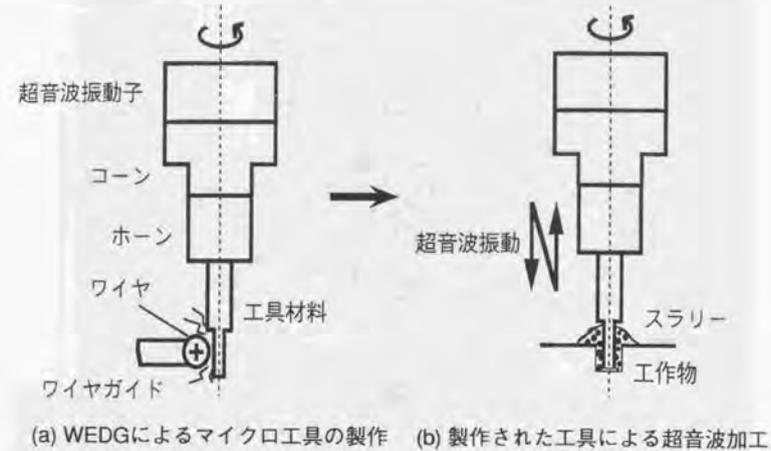


図3.2 マイクロ工具の製作とその工具を用いた超音波加工

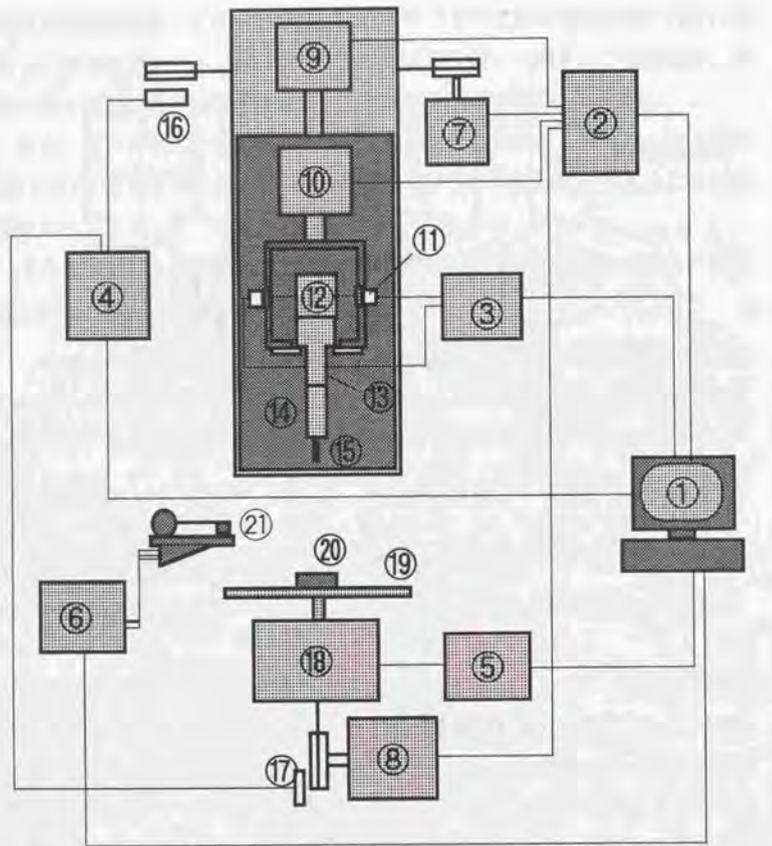
ある。

3.3 加工機の構成

図3.3に前節のコンセプトに基づいて試作された、マイクロ超音波加工装置プロトタイプA(創造科学)の構成図、図3.4にその写真を示す。写真中の番号は、構成図中の番号に一致している。以下に加工機の各部分について述べる。

(1) 駆動系

加工装置はX, Y, Z方向の三軸に加え、回転軸のC軸があり、合わせて4



- ①パーソナルコンピュータ ②モータコントローラボード ③超音波発振器
- ④XY軸測定位置表示カウンタ ⑤重量コンパレータ ⑥WEDG用電源
- ⑦X軸モータ ⑧Y軸モータ ⑨Z軸モータ ⑩C軸モータ ⑪スリップリング
- ⑫超音波振動子 ⑬コーン ⑭ホーン ⑮工具 ⑯X軸ガラススケール
- ⑰Y軸ガラススケール ⑱電子天秤 ⑲ステージ ⑳工作物 ㉑WEDG用ワイヤ

図3.3 マイクロ超音波加工装置（プロトタイプA）の構成図

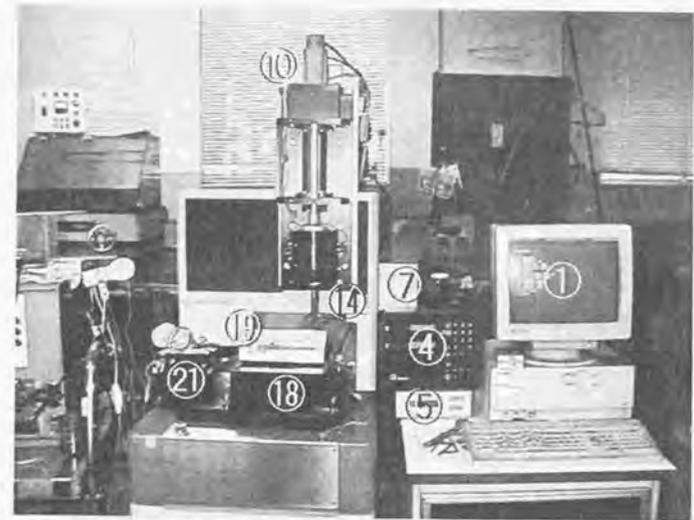


図3.4 マイクロ超音波加工装置（プロトタイプA）の写真

軸をもつ。工具側がX、Z方向に動き、ステージがY方向に動く。

X、Y、Z方向はステッピングモーターとボールねじを用いて制御されており、1パルスが0.05 μ mの送りに対応している。X軸とY軸にはガラススケールが取り付けられており、XY軸測定値表示カウンタを介し位置の座標値をフィードバックすることができる。また、C軸はサーボモーターを用いており、15~3000rpmの範囲で回転数が設定できる。また0.09°単位で回転角度の割り出しが可能である。

(2) 振動系

超音波発振器の出力周波数は40kHzである。これは通常超音波加工で使われ

る20kHz前後の周波数に比べてかなり高い。高い周波数を用いることの利点は、コーンやホーンは長さが伝達する超音波の波長に比例するので、それらの長さを短くとることができ、結果的に装置全体のサイズを小さくできることである。高精度なマイクロ加工においては、加工装置の変形による誤差を小さくするために、加工装置のサイズを小さくすることは重要である。不利な点は、コーンやホーンの製作において共振周波数を加工に用いられる超音波周波数にマッチングさせることが難しくなることである。

また、この超音波発振器は、超音波振動子の共振周波数変化に対応する振動子インピーダンス変化を検出する周波数自動追尾方式である。インピーダンスの変化に対して、ある閾値の範囲においては周波数をそれに追従させ、それを超えると出力を停止する。一度出力停止状態になると手でリセットしないと再び出力状態に復帰しない。通常の超音波加工機の場合は問題がないが、本加工機ではこの方式に少し難点がある。それは、振動子が回転機構上にあるため、発振器から振動子への出力の供給が、ブラシとスリップリングを介して行われることである。このために高速回転の場合、ブラシとスリップリングの間の接触抵抗値が不安定になることが多く、その度に振動子のインピーダンスが大きく変化したものとして超音波出力を停止してしまう。このために高速回転での超音波加工が不可能となっている。

超音波振動子のタイプはピエゾ素子を組み込んだランジュバン型振動子である(図3.5)。それにコーンが接続されている。本加工装置のコーンはステップ型コーンであるが、その振動振幅拡大比は小さく、ほとんど振幅を拡大しない。主な役目は、超音波振動子を加工装置へ固定することである。

通常の超音波加工では、コーンまでの振動振幅では加工に十分でないので、コーンに接続されるホーンにおいてさらに振幅拡大を行う。しかし、実際に加工を行ったところ、マイクロ超音波加工ではコーンの振動振幅で十分に加工が行えるので、ホーンでの振幅拡大の必要がなかった。したがって、ホーンは発

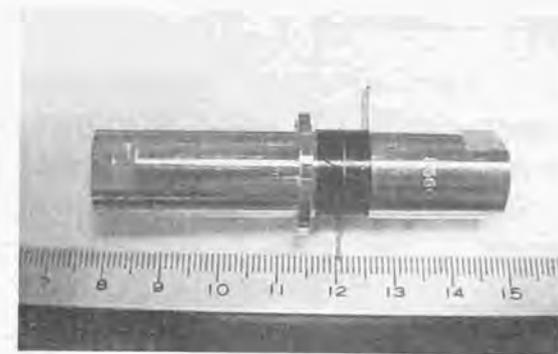


図3.5 超音波振動子

振超音波の半波長の長さの単純な円筒形状であり、振幅拡大比は1である。ホーンは、機械構造用炭素鋼S45Cを材料に製作した(付録1)。

WEDG加工前の工具材料はホーン先端の穴に差し込まれ、はんだ付けによって固定される。また、超硬合金などのはんだがつきにくい工具材料の場合は、超音波振動により接着がはがれることがあるので、はんだの上から接着剤によりさらに固定した。

次に工具振動振幅の測定を行った。図3.6(a)に工具振動振幅の測定結果を示す。測定方法は、図3.6(b)に示すように、垂直方向に工具を送り、工具と金属板の接触位置を電氣的に検出するという方式である。工具を加振しているときとしていないときの接触点のZ軸位置の差から工具振動振幅を求めた。

超音波発振器の出力に工具の振動エネルギーが比例するならば、工具振動振幅は出力の平方根に比例することになる。しかし、測定結果をみるとほぼリニアの関係にあることがわかる。この理由としては、発振器出力の振動エネル

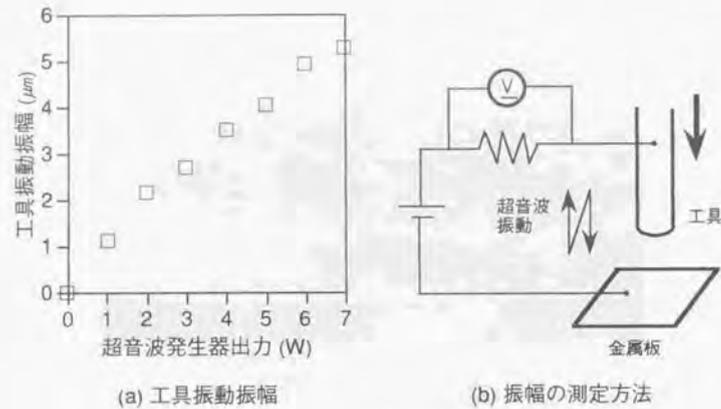


図3.6 工具振動振幅の測定

ギーへの変換効率が出力により一定でないこと、測定範囲が狭いことなどが考えられる。

工具振動振幅と超音波発生器出力がリニアの関係にあると仮定して、測定値を用いて最小自乗法により得られた振幅と出力の関係の近似式は、振動振幅を $A(\mu\text{m})$ 、出力を $P(\text{W})$ とすると $A=0.81P$ で表わされた。本章の実験の加工条件に示されている工具振動振幅は、この近似式の値を用いている。

(3) 荷重検出系

一般の超音波加工においては、荷重は油圧機構やレバーを介した天秤機構などで与えられるが、これらの方式は高精度な荷重検出・調整が難しいのでマイクロ超音波加工では用いることができない。したがって、本加工機では電子天秤EB-3200H-A（島津製作所）を用い、それにステージを搭載して荷重検出を

行うことにした。この電子天秤は、最小10mgf（約0.1mN）の検出が可能である。

電子天秤による測定荷重値は、RS232C回線を通して重量コンパレータに送られる。重量コンパレータは、ユーザによって設定された加工荷重レンジと測定値を比較して、測定値が設定荷重レンジ以上であるか・レンジ内であるか・レンジ以下であるかを判断し、それぞれの論理値をパソコンのIOボードへ送る。

(4) WEDG加工系

本加工機はWEDG加工用ユニットが取り付けられているのが特徴である（図3.7）。

加工電極である走行ワイヤは、直径100μmの黄銅である。加工によって、0-20000pFのコンデンサを使い分け、直流電源の電圧は80-120Vの範囲で変化させた。

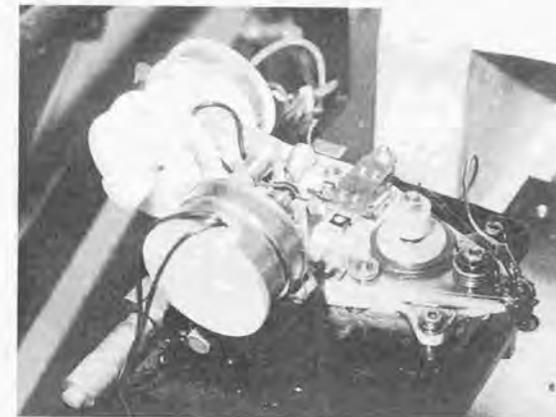


図3.7 WEDG加工用ユニット

(5) 制御系

全ての動作はパソコンPC-9821AS2 (NEC) 上で、C言語で書かれたプログラムにより制御される。

(6) 加工装置のコンプライアンス

工具とステージ（またはその上の工作物）が接触し、荷重がかかった場合の加工装置の変形量であるコンプライアンスを測定した。

ホーンに工具材料を取り付けてZ軸を送り、ステージとの接触点を検出し、その接触点からのZ軸送り量と、電子天秤により測定された荷重を求めた。接触点からのZ軸送り量が加工装置の変形量に相当する。

図3.8に、荷重と変形量との関係を示す。測定結果の近似線の傾きから、コンプライアンスは $0.026\mu\text{m}/\text{mN}$ と求められた。

超音波加工の際、実際の工具送り量はコンプライアンスの分だけ小さくなるので補正する必要がある。しかし、本章の実験で用いる最大の加工荷重である

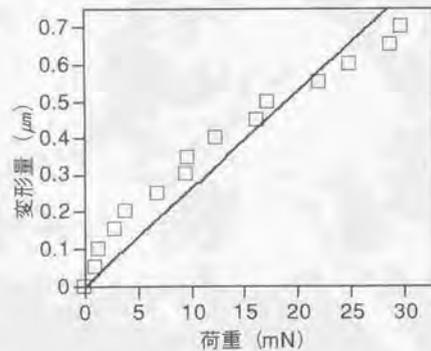


図3.8 加工装置の変形量と測定された荷重

5mNの荷重がかかった場合でも、コンプライアンスの式より加工装置の変形量は $0.13\mu\text{m}$ 程度と小さく無視できる大きさなので、補正は行わないことにする。

(7) その他

加工装置プロトタイプAには、一般の超音波加工機に取り付けられている砥粒循環装置が備わっていない。したがって、砥粒の供給・排出のための砥粒循環を行わない。その理由は、加工荷重検出が、ステージの下に置かれた電子天秤を用いて行う方式であることによる。

マイクロ超音波加工においては、加工荷重も非常に微小になる。したがって電子天秤を用いて加工荷重の検出を行うが、天秤に置かれたステージ上で砥粒循環を行うとその水流による荷重変化が加工荷重にも大きな変化を与える。そのため、砥粒循環をすることなく加工を行うことにした。

3.4 加工手順

以下に具体的な、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工の加工手順を述べる。

(1) 工具材料のホーンへの取り付け

まず最初に工具材料のホーンへの取り付けから始める。ホーン先端には工具を取り付けるための穴が開いており、そこへ工具材料を差し込む。そしてはんだ付けを行い材料を固定する。材料によっては、はんだ付けだけでは加振されるうちにはがれる可能性があるため、さらに上から接着剤により固定する。図3.9は、工具材料を取り付けたホーンである。



図3.9 工具材料を取り付けたホーン

(2) WEDG加工によるマイクロ工具の製作

次に、工具材料を取り付けたホーンを加工機上のコーンに接続し、回転駆動し、WEDG加工により微細な円筒工具に加工する

図3.10に、直径 $500\mu\text{m}$ の超硬合金棒から製作された直径 $50\mu\text{m}$ のマイクロ工具を示す。この例では製作された工具部分ともの材料部分との中心軸がずれ



工具材料：超硬合金，工具材料径： $500\mu\text{m}$ ，工具径： $50\mu\text{m}$

図3.10 WEDG加工により製作されたマイクロ工具

ているが、このように工具材料が回転軸に対して傾きや偏心があるように取り付けられていても、回転中心を軸とする工具が製作されることが特長である。

また、工具材料を一定回転させずに、静止して回転角度を割り出しながら工具側面を加工していくことにより断面が多角形のマイクロ工具の製作も可能である。このような工具は角穴等の加工に用いる。

(3) 加工パラメータの設定

(2)までに製作された工具を用いて、マイクロ超音波加工を行う。加工機の設定パラメータは、超音波発生器出力（工具振動振幅）、加工荷重、工具回転数、工具送り速度、工具送り量である。

超音波発生器の出力の範囲は $0-10\text{W}$ で、マニュアルで設定する場合はアナログ値である。パソコンから設定する場合の最小設定単位は 2.441mW である。

加工荷重の設定範囲は $0-10\text{gf}$ で、最小単位は 10mgf （約 0.1mN ）である。荷重レンジの上限値と下限値を設定する。

工具回転数は $0-3000\text{rpm}$ の範囲で設定できる。しかし、超音波加工の際は3.3の(2)で述べた理由により高速回転での加工はできない。

工具の最高送り速度は、電子天秤の応答・コンパレータとの通信などの処理時間のため、約 $2.5\mu\text{m/s}$ である。工具はZ方向に $0.05\mu\text{m}$ （1パルス）ずつ送られるが、このときに待ち時間を設けることにより工具送り速度を調整する。待ち時間は 1ms の単位で設定できる。設定された工具送り速度は、加工の進み具合により増減し、自動的に最適値になるようにプログラムされている。

工具送り量は、加工を終了する時点までに工具を送る量である。

(4) スラリーの準備

従来の超音波加工で用いられるスラリーの砥粒の大きさは、粒径数十 μm あたりのサイズが一般的だが、これはマイクロ超音波加工においては加工対象の寸

法に匹敵する大きさであり、加工に用いることはできない。加工寸法から考慮すると、スラリーにはサブミクロンの粒径を持つ砥粒を使用することが望ましい。しかし、超音波加工によく用いられるSiCやB₄Cではサブミクロンの粒径の砥粒は入手が難しい。そのため、本章の実験では超音波加工にはあまり用いられないタングステンカーバイド(WC)砥粒の、粒径中間値が0.58 μ mのものを使用した。これは加工に必要な硬さを持ち、また粒径も小さいので、マイクロ超音波加工で用いることができる。スラリーに用いる加工液には水を使用した。

(5) 超音波加工の開始

超音波加工を始める前に、まず加工点の検出を行う。ステージに工作物を固定し、マニュアル動作でZ軸を操作し、工具先端を目視により工作物の近傍まで近づける。その後、自動動作により、1 μ m/sec程度の低速で工具を送り、工具と工作物が接触したときの荷重の変化を電子天秤で検出することにより、加工開始点を求める。

次に、一度工具を引き上げ、スラリーを工作物上に滴下し、また工具を工作物近傍に戻す。そして、超音波発生器の出力をONにして加工を始める。

図3.11は、工具送り制御方法をフローチャートで示したものである。工具送りは、定速送りではなく定圧送りである。加工中は、常に加工荷重を測定することにより、工具送りの制御を行う。また、設定された工具送り速度は加工の進み具合により増減し、自動的に最適値になるようにプログラムされている。

測定荷重が設定荷重レンジより大きい場合は、工具を工具送り速度の倍の速度で引き戻し、さらに工具送り速度を小さく設定し直す。測定荷重が設定荷重レンジ内にある場合は、工具を送ることも戻すことせず、工具送り速度のみ小さく設定し直す。この状態では、順調に加工が進行している場合、測定荷重は徐々に減少していき、設定荷重レンジより小さくなっていく。設定荷重レンジ

より測定荷重が小さい場合は工具を送り、工具送り速度を大きく設定し直す。これらを繰り返すうちに、工具送り速度は最適値に近づくようになる。そして、工具が設定送り量まで送られたら、工具を引き上げ、加工を終了する。

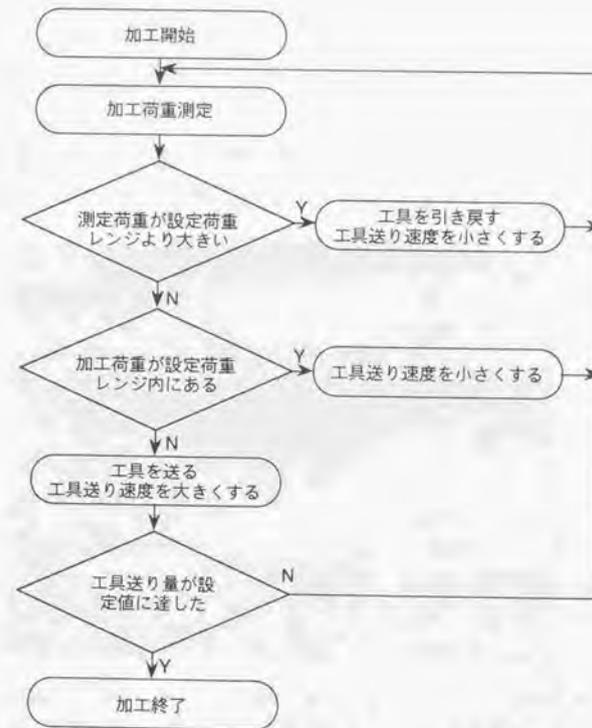
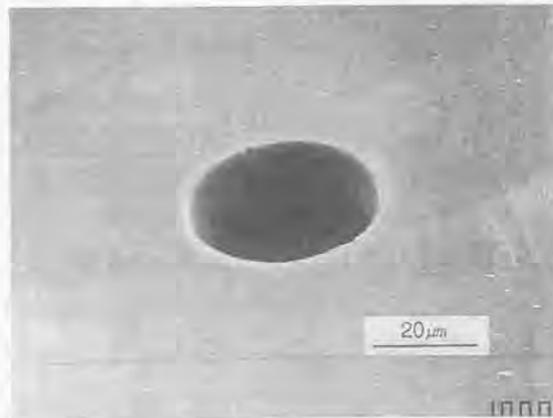


図3.11 工具送り制御方法

3.5 加工パラメータと加工速度・工具摩耗率との関係

前節までで述べた、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法の開発により、従来の超音波加工では実用上不可能とされている数十 μm オーダーの加工寸法での加工が可能になった。図3.12に、その手法を用いて行われたマイクロ超音波加工の加工例の一つを示す。加工例は石英ガラス上に加工した直径 $35\mu\text{m}$ の微細穴である。

超音波加工において、加工速度や工具摩耗率は重要な加工特性である。本節では、マイクロ超音波加工における加工速度と工具摩耗率について、各加工パ



工作物：石英ガラス 加工穴径： $35\mu\text{m}$ 深さ：約 $30\mu\text{m}$
 工具材料：超硬合金 工具回転数：200rpm 加工荷重：3 - 6 mN
 振動振幅： $0.8\mu\text{m}$ 砥粒材質：WC 砥粒径： $0.58\mu\text{m}$

図3.12 マイクロ超音波加工の微細穴加工例

ラメータとの関係を調べた。取り上げた加工パラメータは、加工荷重、工具振動振幅、工具回転数、砥粒濃度、加工穴径、そして加工深さである。

本論文においては、加工速度は加工時間あたりの加工深さを表わし、工具摩耗率は加工深さに対する工具の長手方向の摩耗長さの比を表わす。加工深さは、工具送り量と工具摩耗長さの差から求める。工具摩耗長さは、加工前と加工後の工具長さの差から求める。

3.5.1 加工荷重

図3.13は、加工荷重と加工速度・工具摩耗率との関係を示したものである。この実験においては、設定加工荷重レンジの上限と下限をとともに同じ値にとっている。図に示されている加工荷重の値はそれを表す。したがって、設定荷重レンジの範囲は0である。

加工荷重が大きくなると、砥粒打ち込みの衝撃力が増加するために、加工速

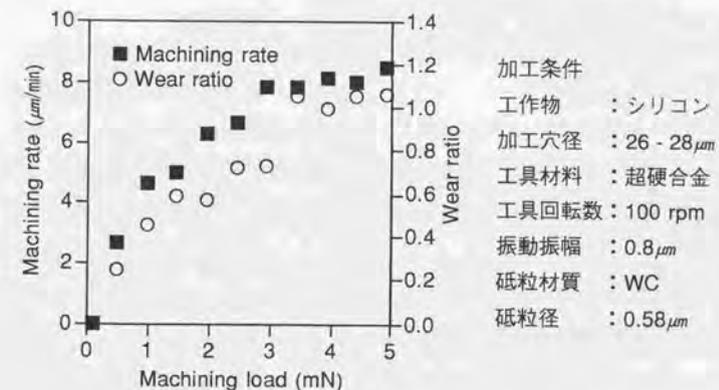


図3.13 加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係

度は上昇する。また、工具摩耗率も加工荷重の増加に伴い上昇することがわかる。そしてその割合は徐々に小さくなっていく。

加工速度・工具摩耗率がともに上昇するということは、工作物の除去量の増加の割合より工具の除去量の増加の割合が大きくなるということである。この理由としては、工作物の除去量の増加に伴い加工屑も増加し、その排出が追いつかず加工面に多く溜まるようになり、工作物表面への砥粒の打ち込み作用が弱められるためと考えられる。

3.5.2 工具振動振幅

図3.14は、工具振動振幅と加工速度・工具摩耗率との関係を示したものである。実験において実際に変化させたパラメータは超音波発生器の出力である。図において、振動振幅は3.3の(2)で求めた超音波発生器出力に対する工

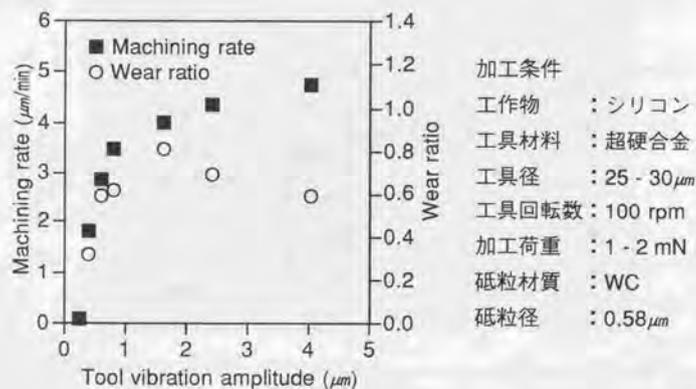


図3.14 工具振動振幅と加工速度・工具摩耗率の関係

具振動振幅の近似式による値を用いている。

振動振幅が1μm以下の領域では振幅の増加に伴い加工速度も大きく上昇していくが、1μmを超えたあたりからは加工速度の増加は緩やかになっていくことわかる。工具摩耗率も振幅の増加に伴い上昇していき、振幅が1μmを超えてからは上昇が緩やかになり、2μmを越えると若干低下する傾向をみせた。

振動振幅1μm以下の領域では加工速度・工具摩耗率ともに上昇するが、これは3.5.1の実験で加工荷重を増加させたときと同じ傾向であり、その理由も同じように考えられる。また、振幅が2μmを越えた後、加工速度が上昇しながら工具摩耗率が減少傾向をみせるのは、工具の大きい振幅がスラリをより攪拌し、砥粒の循環や加工屑の排出を促進し、それらが加工面に溜まるのを抑えるためと考えられる。

3.5.3 工具回転数

工具回転数と加工速度・工具摩耗率との関係は、一般の超音波加工の研究でもあまり報告例がない。

図3.15は、工具回転数と加工速度・工具摩耗率との関係を示したものである。工具を回転させない場合の結果も示してある。工具回転数はグラフ上で対数表示をしているため、工具を回転させない場合の結果は便宜上工具回転数5rpmのところに示している。

工具回転数は3000rpmまで上げることができるが、3.3の(2)で述べた理由により、高速回転時はブラシとスリップリングの電氣的接触が不安定になり、超音波発生器が出力を止めるので、回転数の上限は800rpmにした。

工具を回転させると、加工速度が上昇する。しかし50rpmあたりの低回転数で加工速度の上昇が止まることがわかる。それ以後は800rpmまで回転を上げて

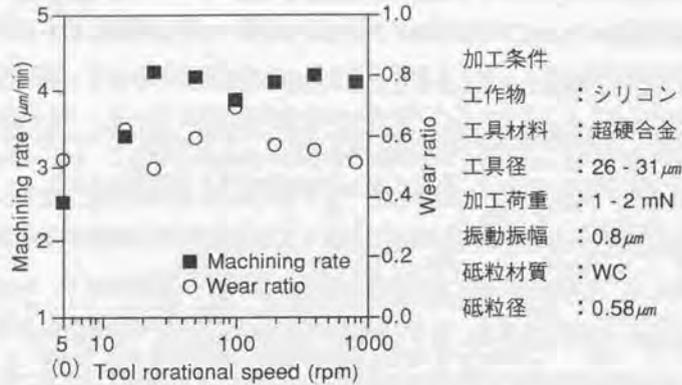


図3.15 工具回転数と加工速度・工具摩耗率の関係
(工具を回転させない場合の値は、便宜上5 rpmのところに示している)

も加工速度にはほとんど変化がなかった。結局、工具を回転させない場合と比べて加工速度はおよそ1.6倍大きくなった。

工具摩耗率は、工具回転数が増加していくと若干減少する傾向がみられるものの、ほとんど変化がなく、また工具を回転させない場合と比較しても大きな変化はみられなかった。

これらの結果より、低回転数でも回転を与えると、工具摩耗率を上昇させずに加工速度を大きくすることが可能で、効率的な加工が行えることがわかった。

3.5.1での実験および、3.5.2での実験における小さい工具振動振幅の範囲では、加工速度が上昇するにつれて工具摩耗率も上昇するという結果が得られたが、本実験では加工速度が上昇しても工具摩耗率は上昇せずに加工が行えた。この結果は、3.5.2の実験における大きい工具振動振幅の場合の傾向と似ており、その理由も同じように考えられる。本実験の場合では、回転する工具がクリアランスを広げ、さらにスラリーを攪拌するので、砥粒の循

環や加工屑の排出を促進したものと考えられる。また、加工速度そのものの上昇は、砥粒の循環や加工屑の排出が向上したことに加え、砥粒が水平方向にも力を受けることによる研磨作用の効果が重畳されたためとも考えられるが、これについては4.5.4および第5章において再び言及する。

3.5.4 砥粒濃度

図3.16は、スラリーの砥粒濃度による加工速度・工具摩耗率の変化を示したものである。砥粒濃度は重量濃度で表されている。

濃度20%あたりから急に加工速度が上昇し、その後は濃度が高くなっても加工速度に大きな変化はみられなかった。

工具摩耗率は、測定値のばらつきが大きいのが、濃度が高くなるにつれて上昇していくことがわかる。濃度が高いと、加工面に砥粒が多く溜まり、工作物への砥粒打ち込み作用が弱められて工具側の除去量の増加が少なくなるためと考

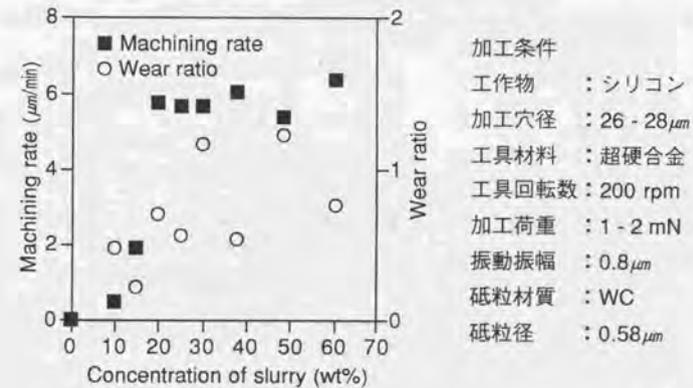


図3.16 スラリーの砥粒濃度と加工速度・工具摩耗率の関係

えられる。

したがって、20%あたりの濃度のスラリーを用いると、加工速度が大きく工具摩耗率が低い効果的な加工が行えるといえる。なぜ濃度が20%を越えると急に加工速度が上昇するのかについては理由がはっきりしておらず、今後の解明が必要である。

3.5.5 加工穴径

図3.17は、加工穴径と加工速度・工具摩耗率との関係を示したものである。加工荷重は、加工圧力が等しくなるように設定した。

加工穴径が大きいということは工具径が大きいということである。したがって、工具径が小さくなると、加工速度・工具摩耗率ともに上昇することがわかる。

工具径が小さくなると、工具体積に対するクリアランス体積の比が大きくな

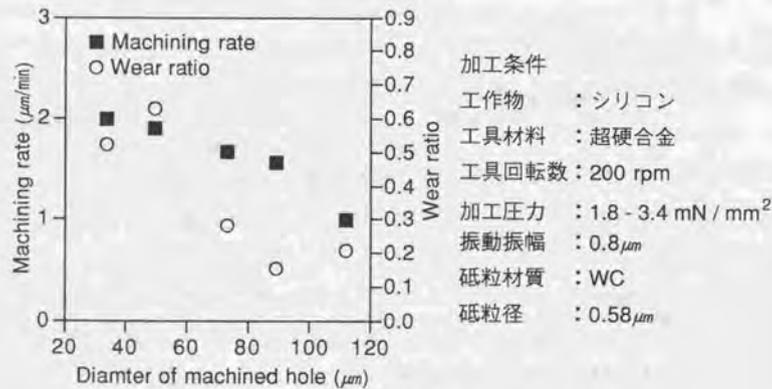


図3.17 加工穴径と加工速度・工具摩耗率の関係

る。そうすると、3.5.3で述べたように、スラリーの循環や加工屑の排出作用が向上すると考えられる。加工速度の上昇はそのためと思われるが、工具摩耗率の上昇が説明できない。したがって、他の要因が考えられる。

実際の加工においては、工具は底面のみが摩耗作用を受けるのではなく、加工中に工具の角部が丸みを帯びるようになるので、底面近くの工具周囲も摩耗作用を受ける。工具径が小さくなると、工具体積に対する工具周囲の面積の比が大きくなり、工具周囲からの摩耗作用が増大すると考えられる。その結果、工具の長手方向の摩耗長さも増加し、クリアランスが大きくなることにもかわらず、工具摩耗率が上昇すると考えられる。

3.5.6 加工深さ

図3.18は、直径40μmの穴を加工している途中での加工進行状態を、送り量・摩耗量・加工深さにより示したものである。

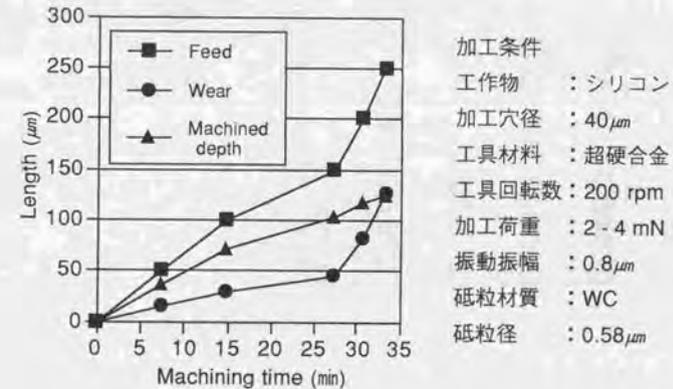


図3.18 穴加工の際の加工進行状態

その測定方法は、穴加工において、工具の垂直方向の送り量が $50\mu\text{m}$ に達する毎に工具を引き上げ、摩耗長さを計測し、また穴の中に戻して加工を再開するという方法である。合計送り量 $250\mu\text{m}$ まで測定を行った。

図3.19に、工具送り量 $50\mu\text{m}$ 毎の加工速度・工具摩耗率を示す。加工速度は送り量が $100\mu\text{m}$ を超えたあたりから低下していくことがわかる。また、工具摩耗率は送り量が $150\mu\text{m}$ を超えたあたりから急激に上昇していく。加工深さが大きくなると工具摩耗が大きくなり、工作物の除去量が減少していき、そのまま続けても工具が摩耗するばかりで加工が進まないという状態になる。この現象が起き始める深さが加工深さ限界といえる。

加工深さが大きくなると工具摩耗率が上昇するのは、加工穴が深くなると、砥粒の循環や加工屑の排出が困難になるためと考えられる。今までの実験の結果から、その状態が工具摩耗率の上昇の原因となっていると推測される。

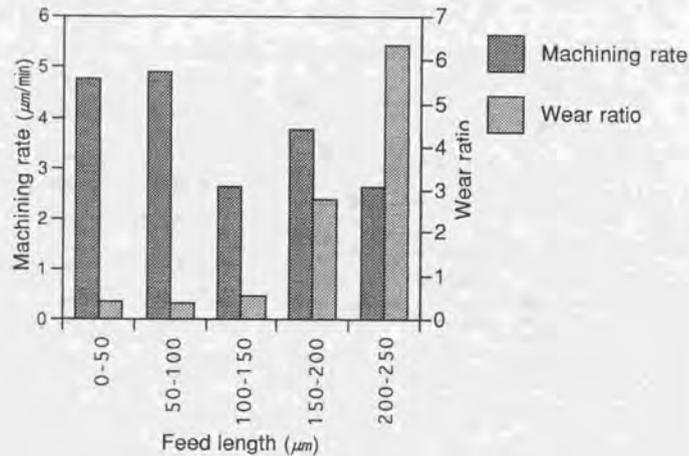


図3.19 工具送り量 $50\mu\text{m}$ 毎の加工速度・工具摩耗率

以上、3.5.1から3.5.6までの実験結果より、各加工パラメータの値が変化したときの加工速度・工具摩耗率の変化の傾向の一覧を、図3.20に示す。

加工速度	大 小	小 大	大 小
工具摩耗率	大 小	大 小	大 小
	加工荷重	工具振動振幅	工具回転数
加工速度	大 小	大 小	大 小
工具摩耗率	大 小	大 小	大 小
	砥粒濃度	加工穴径	加工深さ

図3.20 各加工パラメータの値が変化したときの加工速度・工具摩耗率の変化の傾向の一覧

3.5.7 理論値との比較

2.6において、今までに提唱されている加工速度理論式をいくつか紹介した。これらの中で、定量的に加工速度を求められるのは、(3)のCookの加工速度式^[29]および(4)のKainthらの加工速度式^[30]の二つである。これら

の式から算出された理論値は、実験値より1桁大きいという結果が得られている。本節では、(3)のCookの加工速度式

$$V = \frac{5.9f\sigma\sqrt{aR}}{H}$$

から求められる理論値を、マイクロ超音波加工の実験値と比較してみることにした。実験値として表3.1に示される実験結果を用いた。加工圧力は設定加工荷重レンジの中間値を用い、以下のそれぞれの加工パラメータの値を速度式に代入した。

$$f \text{ (振動周波数)} = 40 \times 10^3 \times 60 \text{ (min}^{-1}\text{)},$$

$$\sigma \text{ (加工圧力)} = \frac{1.5}{\pi(28/2)^2} \text{ (mN/}\mu\text{m}^2\text{)},$$

$$a \text{ (工具振動振幅)} = 0.8 \text{ (}\mu\text{m)},$$

$$R \text{ (砥粒径の中間値)} = 0.58 \text{ (}\mu\text{m)},$$

$$H \text{ (工作物の脆性破壊硬さ)} = 470 \text{ (kgf/mm}^2\text{)} = 4.6 \text{ (mN/}\mu\text{m}^2\text{)} \text{ [30]}$$

これらの値から、加工速度 $V = 5.1 \times 10^3 \text{ (}\mu\text{m/min)}$ と算出された。これは、実験値 $8.0 \text{ (}\mu\text{m/min)}$ に比較して3桁オーダーが大きい。前述のように、Cookらの検証でも理論値は実験値より大きいという結果が出ているが、オーダーの

表3.1 加工速度の実験値と加工パラメータ

加工速度	8.0 $\mu\text{m/min}$	加工荷重	1 - 2 mN
工作物	石英ガラス	工具振動振幅	0.8 μm
加工穴径	28 μm	砥粒	WC, 0.58 μm
工具材料	ピアノ線	振動周波数	40kHz

違いは1桁であった。本加工法は、理論式が用いている仮定とかなり異なる現象が起きていると言える。

3.6 加工精度

本節では、マイクロ超音波加工の加工精度について、真円度・貫通穴の形状・チッピングの観点から調べた結果を述べる。

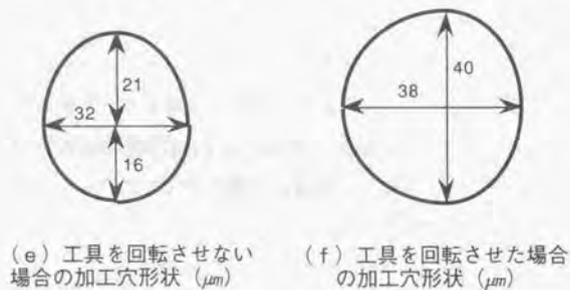
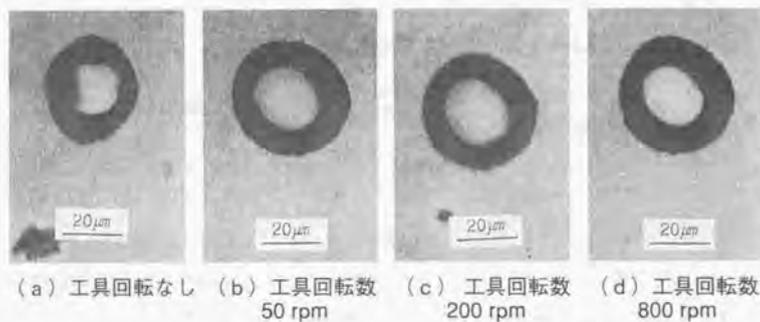
3.6.1 真円度

本章で用いている超音波加工装置プロトタイプAは、WEDG加工による工具製作のために、工具系が回転できる構造になっていることが大きな特徴であり、回転工具を用いたロータリー式マイクロ超音波加工が可能である。超音波加工は工具軌跡が転写される加工法であるので、回転工具により加工した穴の場合、工具の回転振れが加工精度に大きく影響を及ぼす。特に本加工装置では、WEDG加工によりマイクロ工具を製作し、さらにその工具を超音波加工でも回転させて加工を行うので、回転振れの影響が重畳することになる。

もし回転振れが全くなければ、WEDG加工により製作された円筒工具の断面は完全な真円であり、その工具を用いて超音波加工を行った場合、工具を回転させて加工しても、回転させずに加工しても、同じ径の丸穴が加工されることになる。実際は回転振れが全くないように加工装置を製作するのは無理であり、その振れの量を測定することが必要である。WEDG加工により製作された工具の断面形状の測定ができれば回転振れの状況が把握できるが、この測定は難しいので、工具を回転させずに加工した穴形状から工具断面形状を推定することにした。

まずWEDG加工により円筒工具を製作し、それを回転させずに超音波加工を

行った時の加工例と、回転させた時の加工例を図3. 21 (a) ~ (d) に示す。この結果から、工具を回転させずに加工した穴は卵形をしていることがわかる。また工具を回転させて加工した穴も、回転させない場合に比較すれば円に近づいているが、やはり卵形をしている。加工穴の入り口の形状を測定した値を図3. 21 (e), (f) に示す。回転数の違いによる形状の差異はみとめられな



工作物 : シリコン 工具材質 : 超硬合金
 加工荷重 : 1.5 - 2.9 mN 振動振幅 : 0.8 μm
 砥粒材質 : WC 砥粒径 : 0.58 μm

(g) 加工条件

図3. 21 工具を回転させた場合と回転させない場合の加工穴の比較

かった。

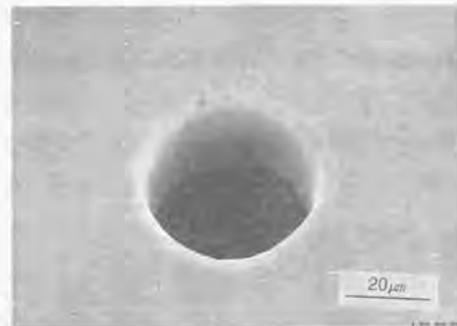
図(e)より、穴の真円度は、最小半径と最大半径の差から $2.5\mu\text{m}$ と求まる。この値は工具径を考慮するとかなり大きい値であり、回転振れが大きく、また回転の角度によって回転振れにかなりばらつきがあることを示している。図(e), (f)からもわかるように、回転振れが大きいので、工具を回転させて加工した穴は、回転させずに加工した穴に比較すると、真円度は $2.5\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ に向上しているが、断面積がかなり大きくなっている。この大きい回転振れはマイクロ加工においてはかなり問題であり、加工可能な最小寸法をかなり制限する。そのため、回転振れの大きさとばらつきを小さく抑え、加工穴の真円度を良くすることが望まれる。

3. 6. 2 貫通穴の形状

図3. 22に、厚さ $200\mu\text{m}$ のシリコンに加工した貫通穴の写真を示す。入り口側はチッピングも少なく加工されているが、出口側が割れを生じている。入り口側の径は $43-44\mu\text{m}$ であった。また出口側の径は $27\mu\text{m}$ であった。この結果から、加工した穴は、出口側の直径の大きさが入り口側の約60%となっているテーパ穴であることがわかる。この貫通穴のような深穴の加工においては、工具が半径方向にもかなり摩耗し、先端が細くなり工具にもテーパが生じるからである。

穴にテーパがつくことや穴の出口に大きな割れを生じるのは好ましくないので、これらを改善する必要がある。テーパを防ぐには次のような対策が考えられる。

(a) 工具に生じるテーパを小さくするために、摩耗しにくい工具材料を用いて工具を製作する



(a) 入り口側 加工穴径：43 - 44 μm



(b) 出口側 加工穴径：27 μm

工具材料：超硬合金 工具回転数：200 rpm 加工荷重：4 - 6 mN
 振動振幅：0.8 μm 砥粒材質：WC 砥粒径：0.58 μm
 加工時間：40min

(c) 加工条件

図3.22 厚さ200 μmのシリコンへの貫通穴の加工

(b) 貫通後もしばらく工具を送り続ける

穴の出口での割れを防ぐには、次のような対策が考えられる。

(c) 振動振幅，加工荷重を小さくして加工速度を落とし，工具送り速度を小さくする

(d) より微粒の砥粒を使用する

これらの対策を講じた貫通穴の加工実験は，4.6.2において紹介する。

3.6.3 チッピング

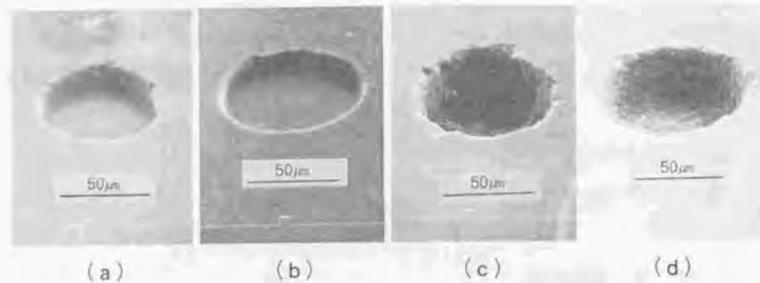
超音波加工では，加工穴の入り口にチッピングが発生することがある。そこで，加工した穴の入り口のエッジのチッピングの状態について調べた。

図3.23は，粒径0.58 μmのWC砥粒または粒径5 μmのTiC砥粒を用い，工具を回転させて加工を行った場合と回転させずに加工を行った場合との，加工穴のチッピングの違いを示している。工作物は石英ガラスである。

図の(a)と(c)，また(b)と(d)を比較することにより，小さい粒径の砥粒で加工を行えばチッピングの発生を抑えられることがわかる。小さい砥粒を用いると，加工単位が小さくなるので，チッピングも少なくなる。

また，図の(a)と(b)，また(c)と(d)を比較してもわかるように，工具を回転させることによってもチッピングの発生を少なくすることができた。工具の回転により砥粒が垂直方向だけでなく水平方向へも力を受けるので，研磨作用が働いてエッジをなめらかにするものと思われる。

したがって，加工穴のエッジのチッピングを抑制するには，粒径の小さい砥粒を用い，工具を回転させればよい。工具を回転させると，チッピングの抑制だけでなく，3.5.3の結果より加工速度も増加するので，効果的である。



- (a) 砥粒 WC, 0.58 μm , 工具回転なし
- (b) 砥粒 WC, 0.58 μm , 工具回転数 200rpm
- (c) 砥粒 TiC, 5 μm , 工具回転なし
- (d) 砥粒 TiC, 5 μm , 工具回転数 200rpm

工作物：石英ガラス 工具材料：超硬合金 工具径：61 - 65 μm
 加工荷重：4.9 - 9.8 mN 振動振幅：0.8 μm
 (e) 加工条件

図3.23 加工穴のチップング

3.7 加工例

本節では、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工の応用範囲を知るための一つの指標として、前節までに得られた加工特性をもとに試みたいいくつかの典型的加工例を示す。

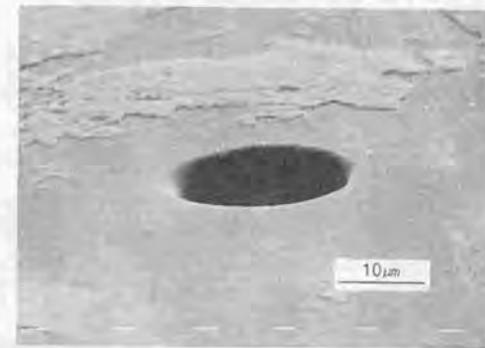
基本となる微細な丸穴の加工、丸穴以外の異形穴の加工、工具を水平方向にも移動させて行う溝の加工、それらを組み合わせた三次元形状の加工の具体例をその加工条件とともに示す。

3.7.1 微細穴の加工

図3.24は、シリコンに加工した内径20-21 μm の微細穴である。超音波加工による加工例では、今までに報告されているなかで最小径の微細穴である。

図3.25は、石英ガラスに加工した内径32-34 μm の微細穴を示す。深さは120 μm であり、加工穴の直径に対する深さの比であるアスペクト比は4を達成できた。図3.26は、アルミナに加工した内径30-35 μm の微細穴の加工例である。これら代表的な硬脆材料への加工例から、従来困難であった硬脆材料への直径数十 μm の穴加工の実用化の見通しが得られた。

3.6.1で述べたように、工具の回転振れがかなり大きいため、図3.24



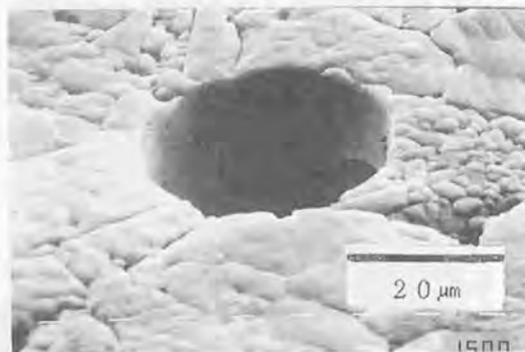
深さ：50 μm 工具材料：超硬合金 工具回転数：200 rpm
 加工荷重：0.49 - 0.98 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：WC 砥粒径：0.58 μm 加工時間：12min

図3.24 シリコンに加工した内径20 - 21 μm の微細穴



深さ：120 μm 工具材料：超硬合金 工具回転数：200 rpm
 加工荷重：0.49 - 1.5 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：WC 砥粒径：0.58 μm 加工時間：30min

図3.25 石英ガラスに加工した内径32-34 μm の微細穴



深さ：110 μm 工具材料：超硬合金 工具回転数：100 rpm
 加工荷重：1.5 - 2.9 mN 砥粒材質：ダイヤモンド
 砥粒径：0.2 μm 加工時間：30min

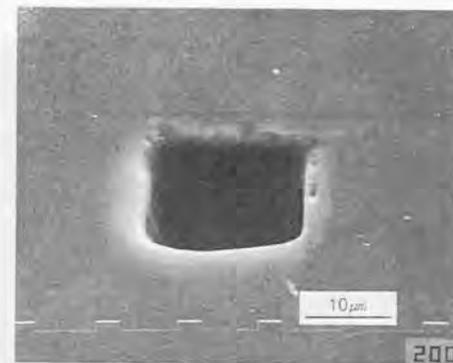
図3.26 アルミナに加工した内径30-35 μm の微細穴

の例より小径な微細穴の加工は難しい、したがって、本加工装置で加工できる微細穴の最小内径は20 μm 前後ということになる。

3.7.2 異形穴の加工

WEDG加工による工具製作を工具材料を回転させずに行い、工具回転角度を割り出しながら各側面を加工すれば、断面が円でない工具を作ることができる。そしてその工具を用い、工具を回転させずに超音波加工を行えば異形穴の加工ができる。

図3.27に、シリコンに加工した20 \times 21 μm の四角穴を示す、この例では穴の入り口のエッジのチャIPPINGが多少目立つ、この現象は3.6.3で述べた



深さ：30 μm 工具材料：超硬合金 加工荷重：0.49 - 0.98 mN
 振動振幅：0.65 μm 砥粒材質：WC 砥粒径：0.58 μm
 加工時間：20min

図3.27 シリコンに加工した20 μm \times 21 μm の四角穴

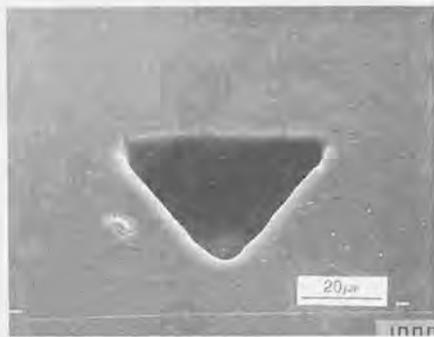
ように、工具を回転させないときに多く見られる。

図3. 28に、シリコンに加工した一辺 $50\mu\text{m}$ の三角穴を示す。図3. 29は、アルミナに加工した一辺 $70\mu\text{m}$ の三角穴の加工例である。

3. 7. 3 溝の加工

これまでに示した微細穴の加工例は、工具を垂直方向に送る以外は定位置に固定したまま加工したものが、図3. 30に示すように、工具に水平方向（X方向）の送りを加えて加工を行うことにより、溝などの加工が可能である。

その場合の工具送り方法のフローチャートを図3. 31に示す。工具は常にX方向に一定の速度で送る。その際のX方向送り量によって、工具の送り速度を変化させる。送り量は、 $0.05 - 1\mu\text{m}$ の間で $0.05\mu\text{m}$ 毎に設定できる。溝の一端が



深さ： $30\mu\text{m}$ 工具材料：超硬合金 加工荷重： $3 - 6\text{ mN}$
 振動振幅： $0.8\mu\text{m}$ 砥粒材質：WC 砥粒径： $0.58\mu\text{m}$
 加工時間：10min

図3. 28 シリコンに加工した一辺 $50\mu\text{m}$ の三角穴



深さ： $35\mu\text{m}$ 工具材料：超硬合金 加工荷重： $4.9 - 9.8\text{ mN}$
 砥粒材質：WC 砥粒径： $0.58\mu\text{m}$ 加工時間：8 min

図3. 29 アルミナに加工した一辺 $70\mu\text{m}$ の三角穴

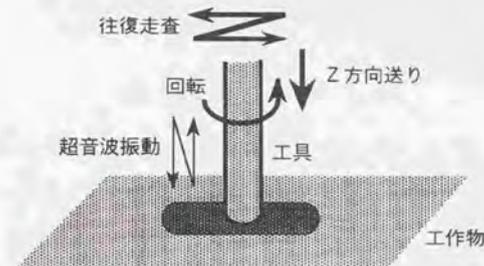


図3. 30 溝の加工方法

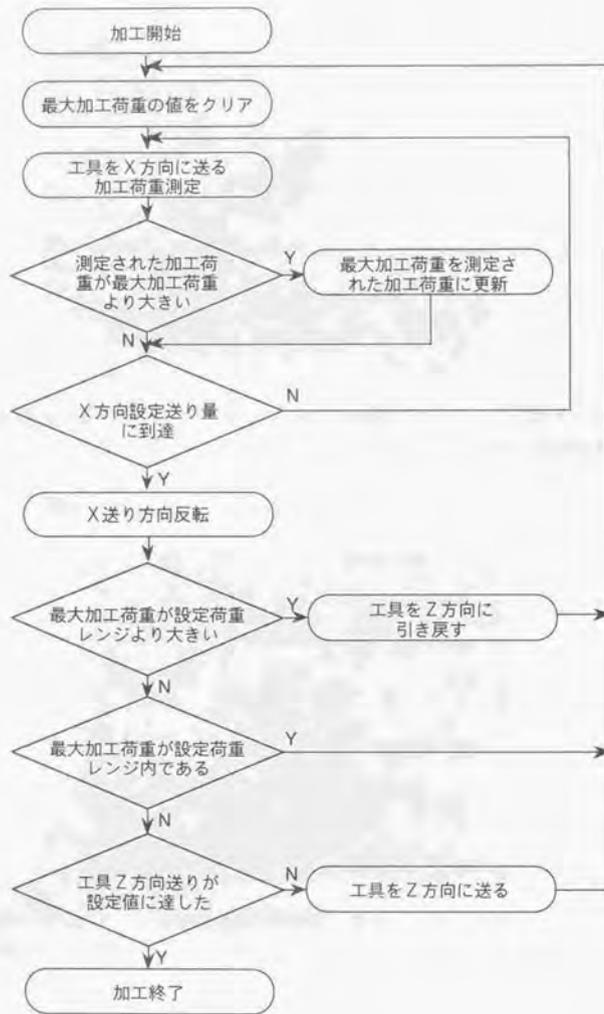


図3.31 溝加工の工具制御方法

らもう一端まで工具がX方向に移動する間、送られる毎に加工荷重を測定し、その最大値を記憶しておく。一端まで工具が移動したら、工具のX送り方向を逆転する。そのとき、加工荷重の最大値をみて、それが設定荷重レンジより大きければ工具をZ方向に引き上げ、小さければZ方向に送り込み、設定荷重レンジ内ならばそのZ位置を保ち、加工を続ける。Z方向の一回の送り量は最小送り量の0.05 μm である。

図3.32には、シリコンに加工した幅50 μm 、長さ250 μm 、深さ30 μm の溝の例を示す。図3.33には、アルミナに加工した幅35 μm 、長さ120 μm 、深さ4 μm の溝の例を示す。

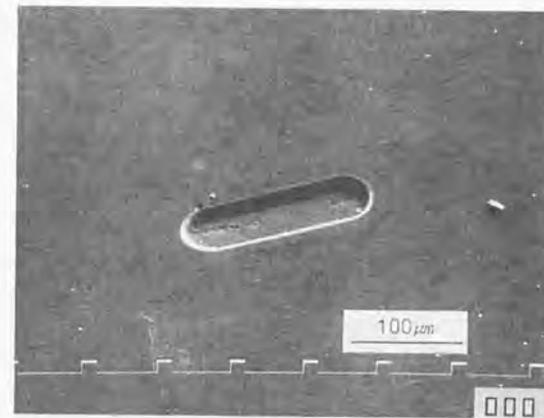
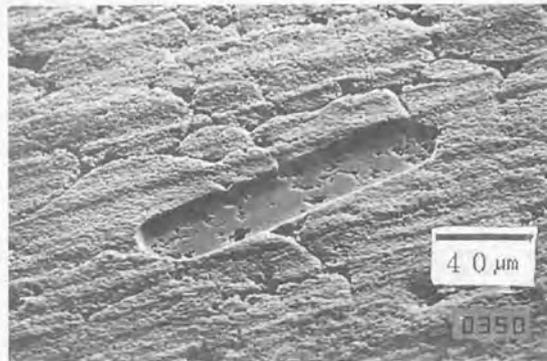


図3.32 シリコンに加工した幅50 μm 、長さ250 μm 、深さ30 μm の溝



工具材料：超硬合金 加工荷重：4.9 - 9.8 mN 砥粒材質：WC
砥粒径：0.58 μm 加工時間：23min

図3.33 アルミナに加工した幅35 μm、長さ120 μm、深さ4 μmの溝

3.7.4 三次元形状の加工

穴加工と溝加工を組み合わせると、より複雑な形状の加工が可能である。

図3.34に、シリコンに加工したマイクロタービンのチャンバーの写真を示す。中心の穴の直径は80 μmであり、ここにタービンのロータが収まる。また、わきに二つの穴があいているが、これはエアの入り口と出口である。その間のエアの通り道は、幅100 μm、深さ200 μmの溝である。

図3.35は、図3.34と同タイプのチャンバーにロータを収めたところを示す。実際に窒素ガスを通したところ、ロータが回転するのが確認された。

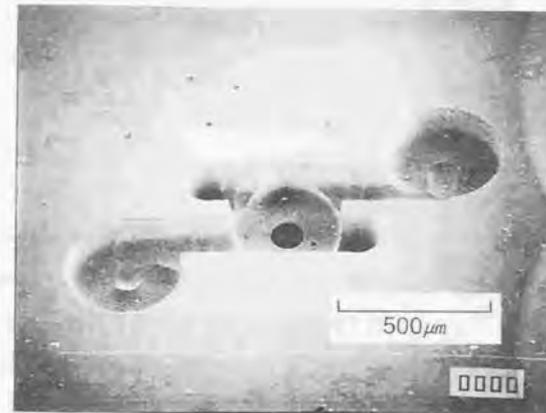


図3.34 シリコンに加工したマイクロタービンのチャンバー

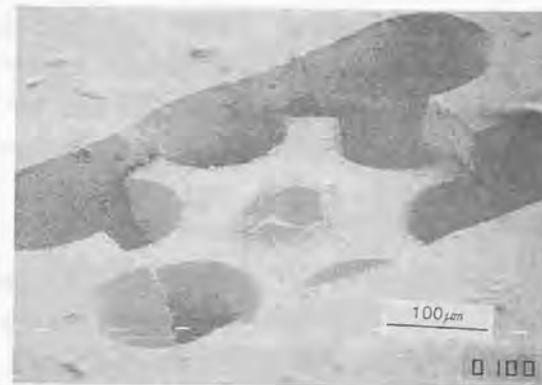


図3.35 チャンバーにロータを収めたところ

3.8 問題点

3.7.1で示したように、加工機上でWEDG加工によりマイクロ工具を製作することにより、内径 $20\mu\text{m}$ までの微細穴の加工が可能となった。しかし、WEDG加工では直径 $5\mu\text{m}$ 以下の細棒の加工が可能なので、原理的にはそれに近い内径をもつ微細穴の超音波加工が可能ははずである。それを阻んでいる主な要因は、3.6.1で述べたように、工具の回転振れが大きいことである。

本手法の加工機は、工具を製作する際に、工具材料だけでなくそれに接続されているホーン・コーン・超音波振動子までの振動系を一体として回転させる必要がある。この部分は全長 30cm ほどあり、回転させるためにはある程度以上のトルクが出るモータを用いる必要があり、軸を支えるベアリングも大きい寸法のものが要求される。それらの寸法が大きくなると、一般に回転振れの値も大きくなるので不利である。また、回転振れを抑えるには、なるべく工具をその先端に近い位置で保持しなくてはならない。しかし、本加工装置では、振動系は超音波加振されるので、振動の節であるコーンのステップ部分に取り付けられたフランジ部分のみで回転主軸に固定されている。この固定部分から工具先端までは 15cm ほどあり、これによりさらに回転振れが大きくなる。また回転角度により回転振れの量のばらつきが大きく、製作された円筒工具の断面の真円度が $2.5\mu\text{m}$ と大きい値をとってしまう。回転振れを小さくするには、加工機の構成から変更する必要がある。

また、WEDG加工をはじめマイクロ放電加工においては、加工液を流したり循環したりせずに、加工液を静止した状態で加工を行う方が有利である。加工量が小さいので、加工屑の排出より、加工液の運動による放電の乱れの方が問題になるからである。そのためには、加工液で満たされた放電加工槽を設けることが必要だが、本加工機では、構成上それが難しい。したがって、加工液を流す方式を採用しているのだが、この場合はWEDG加工においても、直径

$10\mu\text{m}$ 前後からそれ以下の小径なマイクロ工具の製作は困難になる。より微細な超音波加工を行うためには、回転振れを小さくするとともに、この問題も考慮する必要がある。

3.9 まとめ

従来の超音波加工では、例えば微細穴の加工の場合、直径 $100\mu\text{m}$ 程度が実用上は限界とされていた。そこで、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法を開発し、今までより一桁オーダーの小さい数十 μm の加工寸法で超音波加工を行うことを目指した。

加工寸法の限界は、微細な寸法のマイクロ工具の加工機への取り付けが困難であることによるものであった。その困難さを克服するために、工具材料を加工機に取り付けた後にマイクロ工具を製作するという手法を開発し、超音波加工機に工具回転機構とWEDG加工用ユニットを備えた。これにより、加工機に工具材料を取り付けた後に、WEDG加工によるマイクロ工具の製作を加工機上で行うことができた。WEDG加工の送り軸と超音波加工の送り軸は同一であるため、超音波加工の送り軸に平行で、また偏心の小さいマイクロ工具が製作された。

そのように製作されたマイクロ工具を用いて超音波加工を行った。今までに報告例のないマイクロ超音波加工の加工特性について、加工速度・工具摩耗率・加工精度に対して様々な加工パラメータとの関係を調べ、以下の結果を得た。

(a) 加工荷重・工具振動振幅（小振幅の場合）・砥粒濃度が増加するにつれ、加工速度・工具摩耗率ともに上昇する。これらが増加すると、一回の工具の工作物への打ち込みによる除去量が大きくなるので、加工速度が上昇する。また、その上昇に伴う加工屑の増加に排出作用が追いつかず、工作物への砥粒打ち込

み作用が弱められ、工作物に対する除去量の増加が工具に対する除去量の増加より小さくなり、そのために工具摩耗率も上昇したものと考えられる。

工具振動振幅が大きい場合は、加工速度が増加しながら工具摩耗率が若干低下した。工具がスラリーを攪拌し、砥粒の循環や加工屑の排出を促進したためと考えられる。

(b) 工具に回転を与えると、工具摩耗率が上昇することなく加工速度が上昇する。これは、回転する工具がクリアランスが大きくなり、さらにスラリーを攪拌するので、砥粒の循環や加工屑の排出を促進したためと考えられる。

(c) 工具径が小さくなると、加工速度・工具摩耗率ともに上昇する。クリアランスが大きくなることによるスラリーの循環作用などの向上により加工速度は上昇するが、工具体積に対する工具周囲の面積の比が大きくなり、工具周囲からの摩耗作用が増大し、結果的に長手方向の工具摩耗も増加するものと考えられる。

(d) 加工穴が深くなると、砥粒の循環や加工屑の排出が難しくなるため、工具摩耗率が急激に上昇し、加工はほとんど進まなくなる。

(e) 工具の回転振れが大きく、さらに回転角度による回転振れ量が一定でないので、製作された工具断面の真円度が $2.5\mu\text{m}$ と大きく、また工具を回転させるとクリアランスもかなり大きくなり、より小さい微細穴の加工には不利である。

(f) 微粒な砥粒を用い、工具を回転させるとチップングを抑えることができる。砥粒が微粒になると加工単位が小さくなり、また工具を回転させると研磨作用が働くためと考えられる。

次に、本加工法の応用可能性を求めるために、以下のような加工を行った。

(a) 内径 $20\mu\text{m}$ の微細穴まで加工が可能であることが確かめられた。これは、この時点では、超音波加工で加工されたものとしては最小の内径をもつ微細穴

であった。

(b) $20 \times 21\mu\text{m}$ の角穴、一辺 $50\mu\text{m}$ の三角穴などの異形穴の加工も可能であった。

(c) 工具を水平方向に往復走査しながら加工を行うことにより溝の加工が行えた。穴や溝を組み合わせるにより、より複雑な形状をもつマイクロタービンのチャンバーのような加工も行えた。

最後に、より微細な加工が行えるマイクロ超音波加工を実現するために、それを阻んでいる本手法の問題点を解析した。これらの問題点を解決する新たな超音波加工法を、第4章において提案する。

第4章 工作物加振方式によるマイクロ超音波加工

4.1 緒言

第3章で述べたように、加工機上でマイクロ工具を製作する方式のマイクロ超音波加工により、内径 $20\mu\text{m}$ までの微細穴の加工が可能となった。原理的にはさらに微細な加工寸法でのマイクロ超音波加工が可能であるが、工具の回転振れが大きいことと、WEDG加工の加工液供給方式とが原因となりそれを阻んでいた。

本章では、それらの問題を解決する、第2のマイクロ超音波加工法である工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法について述べる。

まず加工法のコンセプトについて述べる。主な特徴は、加振対象を、工具から工作物に変更したことである。これにより、前述の問題点が解決され、より微細な加工寸法での超音波加工が可能になる。そして、そのコンセプトに基づく加工装置の構成と具体的な加工手順について述べる。

次に実際に加工を行い、その加工特性を加工速度・工具摩耗率・加工精度の点から調べ、その特徴を明らかにする。

最後に、本マイクロ超音波加工法の応用範囲を知るための一つの指標として、得られた加工特性をもとに試みたいいくつかの典型的加工例を示す。

4.2 加工方式について

WEDG加工は直径 $5\mu\text{m}$ 以下の細棒の加工も可能である。したがって、それに近い内径までの微細穴の超音波加工が原理的に可能なはずである。しかし、3.

8において述べたように、 $20\mu\text{m}$ 前後より小さい内径をもつ微細穴などのマイクロ超音波加工を行うためには、以下のような問題点を解決する必要がある。

(a) 工具寸法に比べ、工具回転系を構成する部品が大きく、回転振れへの影響が大きい。

(b) 工具に振動を伝えるために、振動系は工具先端からかなり離れた位置で加工機に固定せざるを得ず、これによりさらに回転振れが大きくなる。また回転角度による回転振れのばらつきも大きく、製作された円筒工具の断面の真円度が $2.5\mu\text{m}$ と、加工寸法に比較してかなり大きい値をとるので、小径な工具の製作が難しい。

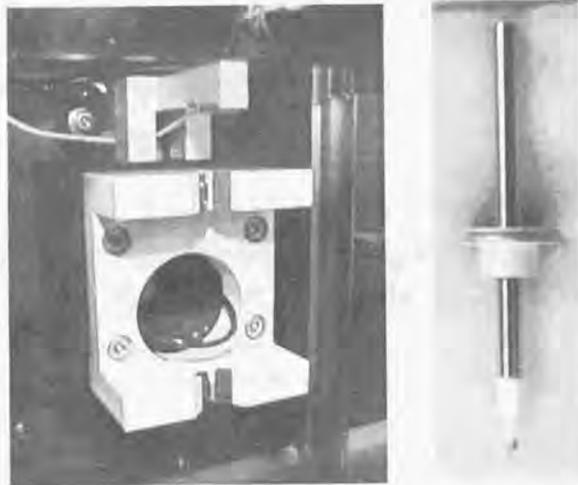
(c) WEDG加工の加工液供給方法が、微細放電加工に不向きな加工液を流す方式であるために、小径な工具の加工に不利である。

これらの問題を解決するために、工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法を考案、装置を試作することにした。

本手法は、工具を加振する従来の超音波加工の方式とは異なり、工作物を加振するものである。これにより、工具径は、工具を超音波振動子・コーンに接続されたホーンに、はんだ付けで取り付けなければならないという大きな制約を受けることなく、他の工作機械と同じように自由な設計が可能になる。そのため、より高い工具回転精度をもつスピンドルシステムを用いることができる。そのシステムの選択にあたり、本手法では、マイクロ工具をWEDG加工で製作することを考え、WEDG加工用ユニットが搭載された微細放電加工機MG-ED71^[33]（松下電器産業）に使用されているものと同じシステムを超音波加工装置に組み込むことにした。

このシステムは、V形軸受、マンドレル、DCモータ、Oリング、鋼球、銅球受けから構成されている。図4.1に、V形軸受とマンドレルの写真を示す。

V形軸受は、精密にポリシングしたSiCをV字上に配置したものである。マ



(a) V形軸受 (b) マンドレル

図4.1 微細放電加工機MG-ED71のスピンドルシステム

ンドレルは先端部分のセラミックスにキャピラリが設けてあり、この部分で線材の加工材をガイドする。軸受に取り付けられたマンドレルは、Oリングを介してDCモータにより回転駆動される。マンドレルへの電気的接触は、マンドレルの上端から、鋼球を介して鋼球受けと行われる。

この軸受は滑り軸受であり、V字に配置されたセラミックス部分とマンドレルの軸の形状を精密に製作することにより回転精度の向上を図っており、その回転振れは $0.5\mu\text{m}$ 以下になるように作られている。これにより、前記(a)および(b)の問題が解決される。

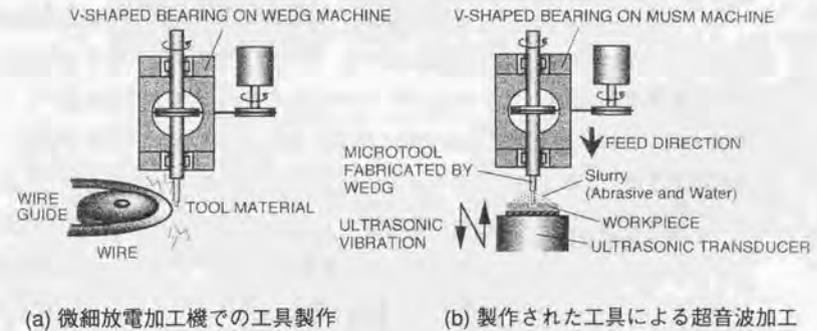
また、このシステムの大きな利点は、マンドレルを軸受からはずし、別の軸受にとりつけても、軸の偏心や傾きが生じずに回転精度が保たれるように精密

に製作されていることである。これにより、(c)の問題が解決できる。つまり、WEDG加工によるマイクロ工具の製作を、微細放電加工機上で行うのである(図4.2(a))。この加工機は加工槽を持ち、加工液非循環方式であるので、WEDG加工の能力を十分に引き出すことができ、直径 $5\mu\text{m}$ 以下の細棒の製作も可能である。そして、工具製作後にマンドレルを工具を保持したまま放電加工機から取り外し、超音波加工装置の軸受に取り付け、超音波加工を行う(図4.2(b))。マンドレルを取り外しても回転精度が保たれるので、工具の回転振れを小さく抑えることができる。

以上のように、工具のかわりに工作物を加振する方式の採用により、より小径なマイクロ工具の製作と、その超音波加工での使用が可能になる。

超音波加工において工作物を加振するという例は、過去に限部らによる研究[34]、Langenによる研究[35]がある。

限部らは、工具と工作物の両方を超音波加振する重畳超音波加工を試み、工具のみを加振させた場合に比べ、加工速度が2-4倍近く上昇したと報告してい



(a) 微細放電加工機での工具製作 (b) 製作された工具による超音波加工

図4.2 マイクロ工具の製作とその工具を用いた超音波加工

る。この研究は加工速度の上昇を目的としたもので、マイクロ加工への応用は意識していない。

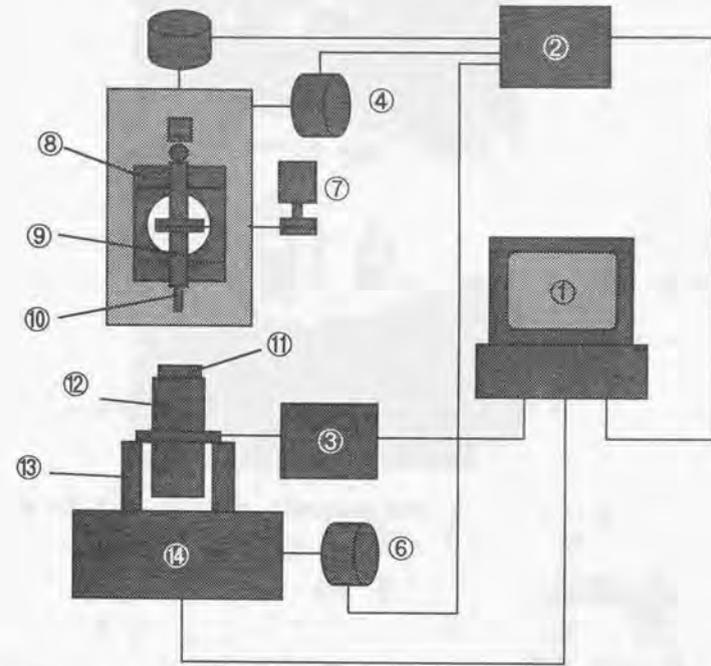
Langenによる研究は、工具製作にWEDG加工を用いたもので、本方式に類似している。ステンレス鋼で直径 $85\mu\text{m}$ の工具を製作し、厚さ $200\mu\text{m}$ のシリコンに直径約 $100\mu\text{m}$ の貫通穴を加工した。この方式ではさらに小さい寸法でのマイクロ加工が可能であったが、その追求はされていない。

4.3 加工機の構成

図4.3に、本手法に基づいて試作されたマイクロ超音波加工装置プロトタイプBの構成図、図4.4にその写真を示す。本体部分には、第3章で用いた加工装置プロトタイプAを使用している。写真中の番号は、構成図中の番号に一致している。以下に、加工装置の各部分について述べる。

(1) 工具系

4.2で述べたように、工具回転のためのスピンドルシステムは微細放電加工機で用いられているものを使用している。このシステムを用いる大きな利点は、回転精度が向上することであるが、それに加えてマンドレルの取りはずし・再度の取り付けにより生じる軸の偏心や傾きがきわめて小さいことである。WEDG加工後、工具を保持したマンドレルを加工機から取り外すことができるので、超音波加工に用いる前に、顕微鏡による工具製作後の工具形状の測定なども可能になった。プロトタイプAの加工装置では、ホーンとコーンとの接続はM6のねじによるため、一度ホーンを取り外して再び取り付けられた場合のずれが大きく、そのようなことはできなかった。また、マンドレルを複数使用すれば、超音波加工と並行してWEDG加工による工具製作が可能となるので、作業能率の向上も期待できる。



- ①パーソナルコンピュータ ②モーターコントローラボード ③超音波発生器
- ④X軸モータ ⑤Y軸モータ ⑥Z軸モータ ⑦DCモータ ⑧V形軸受
- ⑨マンドレル ⑩工具 ⑪工作物 ⑫超音波振動子 ⑬振動子ホルダー
- ⑭電子天秤

図4.3 マイクロ超音波加工装置（プロトタイプB）の加工装置構成図

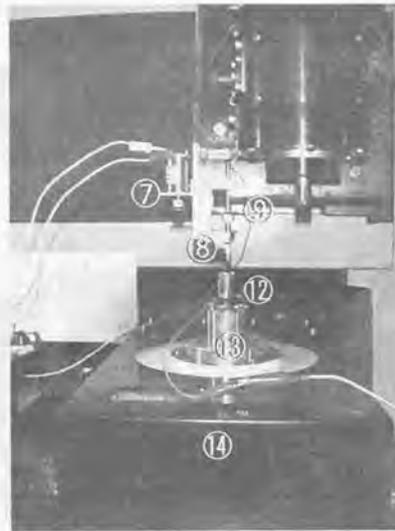


図4.4 マイクロ超音波加工装置（プロトタイプB）の写真

工具系の各部品はジュラルミン板（付録2）に取り付けられ、さらにそれが加工装置プロトタイプAの加工ヘッドのベッド部分に固定されている。

マンドレルの先端のセラミックス部分に設けられたキャピラリは内径 $300\mu\text{m}$ であり、直径 $300\mu\text{m}$ の線材の工具材料を保持しガイドする。マンドレルへの電気的接触はマンドレル先端で銅球を介して行われる。回転駆動は、DCモータによりOリングを介して行われる。DCモータは、5V用で、マンドレルを取り付けた場合、およそ3000rpmの回転速度でマンドレルを駆動する。しかし、サーボ機能がないので、回転数の制御はできない。また、一定電圧を与えていても、Oリングの張力、プーリや軸受との摩擦、工作物からの力などの変化により、回転数が変化することは否めない。

(2) 振動系・荷重検出系

本手法では、振動系が工作物を固定する役割をもつ。工作物は、超音波振動子の一端に直接両面粘着テープで固定されて加振される。第3章での実験より、マイクロ超音波加工においては、求められる超音波振動の振幅が振動子が発生する振動振幅で十分であり、コーン・ホーンが必要ないことがわかった。そのため、それらを省き振動子だけの構成にしてある。加工装置プロトタイプAをベースにしているので加工装置全体の寸法は変化がないが、主要な部分の構成はよりシンプルで小さい構造になった。振動子はプロトタイプAに使用されているものとタイプで（図3.5）、その共振周波数は40kHzである。超音波発生器は、プロトタイプAのものを用いた。

振動子はホルダー（付録3）に固定され、電子天秤の上に置かれる。天秤への固定は特にしていない。電子天秤は、第3章で用いられたものよりさらに1桁小さい感度を持つ、EB-432H（島津製作所）を用いた。最小目盛は1mgf（約 $10\mu\text{N}$ ）である。

工作物を粘着テープで固定するので、超音波振動がテープで減衰することがなく確実に工作物に伝達されているかどうかを確かめることが必要である。そこで、ガラス板を粘着テープで振動子の一端に固定し、振動子に出力を与え、ガラス板の表面における振動振幅を測定することにした。振動子を電子天秤の上に置き、マンドレルに工具をセットし、ガラス板の表面に向けてゆっくり下ろしていき、荷重を検出することにより工具とガラス版表面の接触位置を求めた。ガラス板を加振した場合としない場合の接触位置の差から振幅を測定した結果を、図3.6の測定結果とともに図4.5に示す。この結果より、同じ超音波発生器の出力に対し、ホーンに取り付けられた工具を加振した場合とほぼ同じ振幅でガラス板も振動していることがわかり、振動が減衰することなく確実に伝達していることが確かめられた。したがって、本章でも、図3.6から

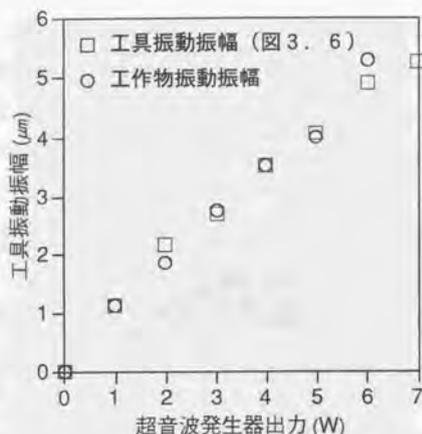


図4.5 振動振幅の測定

求められた超音波発生器の出力 P (W) と超音波振動振幅 A (μm) の関係式 $A = 0.81P$ を使用することにする。

また、加工は工作物表面にスラリーを滴下して行うが、本加工方式は工作物加振方式によるため、スラリー全体を加振することになる。これにより、スラリー中の砥粒の循環や、加工屑排出の促進などが期待できる。一方、超音波振動により加工液の乾燥が早くなるので、加工時間が長くなる場合は、加工途中でスラリーに加工液を補給する必要がある。また、大きい振幅の振動ではスラリーが飛散してしまうので、小さめの振幅で加振しなければならない。

(3) 駆動系・制御系

加工装置プロトタイプBは加工装置プロトタイプAをベースとしており、X、Y、Z軸の移動と位置決めに関しては3.3の(1)および(5)に述べられ

ているものと同じである。別にマンドレルを駆動するDCモータがあるので、C軸の機能は使用されないことになる。

制御系も同じプログラムが使用できる。DCモータの駆動および停止だけは、マニュアルで行う。

(4) WEDG加工系

加工装置プロトタイプAに組み込まれたWEDG加工用ユニットがあるので、加工装置プロトタイプB上でもWEDG加工による工具の製作が可能だが、前述のように加工液を流す方式であるので、直径 $10\mu\text{m}$ 以下の小径の工具の製作には不向きで実際には使用しない。工具の製作は微細放電加工機で行う。

(5) 加工装置のコンプライアンス

加工装置プロトタイプBにおいても、3.3の(6)で行った測定と同じようにしてコンプライアンスを求めた。図4.6に、加工装置の変形量と測定された荷重とを示す。測定結果の近似線の傾きから、コンプライアンスは $0.029\mu\text{m}/\text{mN}$ と求められた。本章の実験では最大 20mN の加工荷重を用いるが、その場合でもコンプライアンスの式より加工装置の変形量は $0.6\mu\text{m}$ と小さいので、工具送り量の補正は行わないこととする。

4.4 加工手順

以下に具体的な、工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法の加工手順について述べる。

(1) 工具材料のマンドレルへの取り付け

まず、線材の工具材料の一端をニッケルパイプに通し、かしめて固定する。

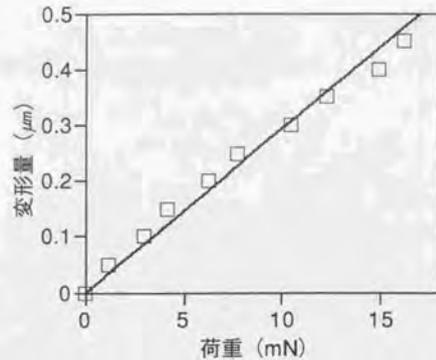


図4.6 加工装置の変形量と測定された荷重

次に、工具材料とパイプのセットをマンドレルの軸の中に通し、工具材料のもう一端がマンドレル先端のセラミックス部分のキャピラリからのぞくように長さを調節し、マンドレルの軸部分にあるねじを締めてパイプを固定する。キャピラリが工具材料の先端をガイドして、回転振れを抑える構造になっている。図4.7に、材料を取り付けたマンドレルの断面図を示す。

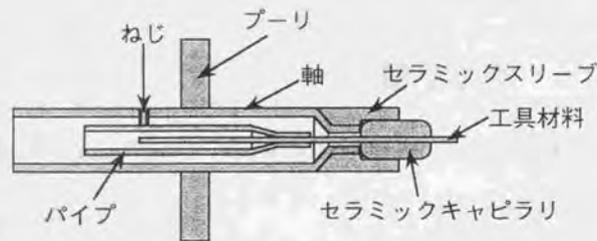


図4.7 工具材料を取り付けたマンドレルの断面図

本研究ではダイヤモンド焼結体のような、線材以外の工具材料も使用する。この場合の材料のマンドレルへの取り付け方法は、4.5.10および4.5.11で述べる。

(2) WEDG加工によるマイクロ工具の製作

WEDG加工は、微細放電加工機上で行う。直径5μm以下の小径な工具の製作も可能である。図4.8に、微細放電加工機で製作された、直径7μm、その直径部分の長さが120μmのタングステン工具を示す。

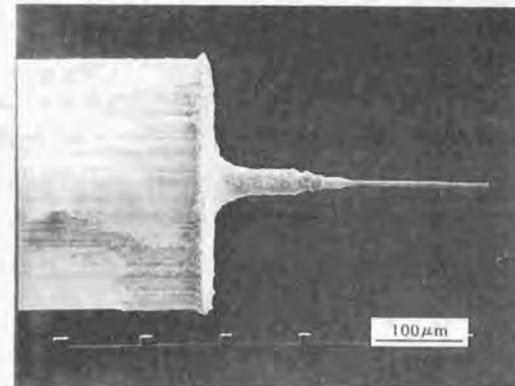


図4.8 微細放電加工機で加工したタングステン工具

(3) 加工パラメータの設定

加工パラメータは、加工荷重の設定可能レンジが0-1gfで最小単位が1mgf (約10μN) であり、工具回転数の設定がないこと以外は、3.4の(3)に述べられているものと同じである。

(4) スラリーの準備

第3章では、スラリーの砥粒として粒径 $0.58\mu\text{m}$ のWC砥粒を用いたが、加工穴径の寸法が $10\mu\text{m}$ 以下の領域になると、クリアランスやチップングの大きさを考慮するとより微粒な砥粒が望ましい。そこで、特記ない限り、本章の実験にはダイヤモンド砥粒の粒径中間値 $0.2\mu\text{m}$ のものを用いた。その粒径分布は $0-0.25\mu\text{m}$ の範囲にある。加工液には水を用いた。

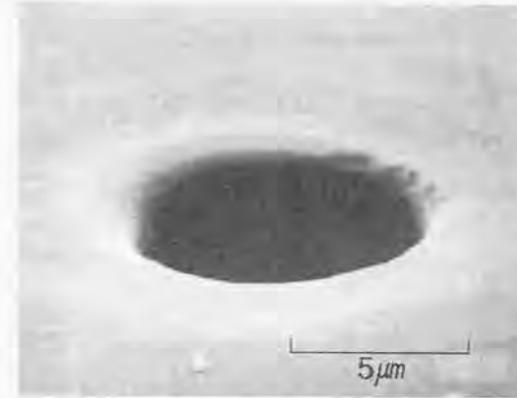
(5) 超音波加工の開始

まず工作物を超音波振動子の一端に両面粘着テープで固定する。粘着テープは、強力両面粘着テープNW-K10（ニチバン）を用いた。このテープは薄いので、加工終了後にテープを剥がしやすいように3枚重ねて用いることにした。この方式ではあまり大きくて重い工作物は振動させることができないが、2cm角で厚さ0.2mmのシリコン板や、1cm角で厚さ5mmのアルミナ片などを問題なく加振できることを確認した。

その他の超音波加工の開始手順は、3.4の(4)に述べられているものと同様である。異なる点は、工具がより小径になるので、加工開始位置を検出するときの工具送り速度を、およそ $0.5\mu\text{m/s}$ とさらに低速にしたことである。

4.5 加工パラメータと加工速度・工具摩耗率との関係

工作物加振方式によるマイクロ超音波加工により、加工機上工具製作によるマイクロ超音波加工では不可能であった $20\mu\text{m}$ 以下の加工寸法での超音波加工が可能になった。図4.9に、この手法を用いて行われたマイクロ超音波加工の



工作物：石英ガラス	加工穴径： $9\mu\text{m}$	深さ： $20\mu\text{m}$
工具材料：タングステン	工具径： $7\mu\text{m}$	加工荷重： $0.1-0.2\text{mN}$
振動振幅： $0.6\mu\text{m}$	砥粒材質：ダイヤモンド	
砥粒径： $0.2\mu\text{m}$	加工時間： 6.5min	

図4.9 工作物加振方式によるマイクロ超音波加工の加工例

加工例の一つを示す。加工例は石英ガラスに加工された、内径 $9\mu\text{m}$ 、深さ $20\mu\text{m}$ の微細穴である。

本節では、未だ報告例のない $10\mu\text{m}$ 前後の加工寸法でのマイクロ超音波加工の加工特性のうち、加工速度と工具摩耗率における各加工パラメータとの関係について調べた。取り上げた加工パラメータは、工作物振動振幅、加工荷重、工作物材質、工具材質、工具回転の有無、砥粒径、砥粒材質、工具径、工具長さ、そして工具送り量である。加工速度と工具摩耗率の定義は、3.5で述べたものと同じである。

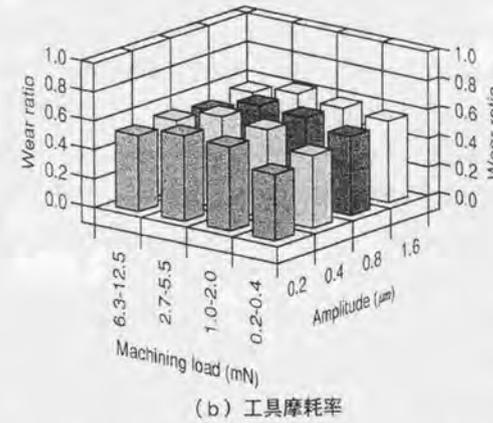
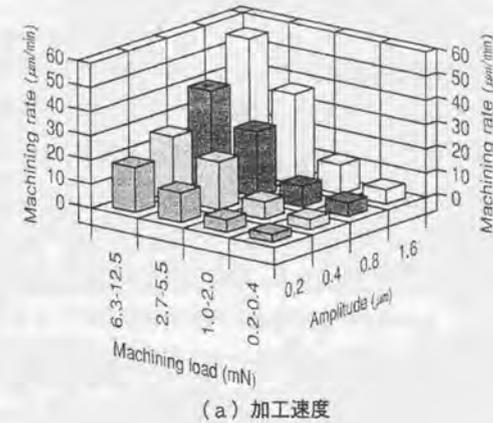
また、工具材料としてダイヤモンド焼結体を用いた場合、固定砥粒工具を用いた場合の加工速度と工具摩耗率についても調べた。

4. 5. 1 工作物振動振幅・加工荷重

図4. 10は、工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係を示す。振動振幅を変化させる場合、実際に変化させるパラメータは超音波発生器の出力である。振動振幅は、3. 3の(2)および4. 3の(2)で求めた超音波発生器出力に対する工具振動振幅の近似式による値を用いている。

図(a)から、振動振幅または加工荷重が増加すると、砥粒打ち込みの際の衝撃力が增大するために、加工速度が上昇することがわかる。図(b)より、工具摩耗率は異なる振動振幅・加工荷重に対し、はっきりとした増減の傾向をみせず、全ての値が0.45-0.65の範囲に収まっていることがわかる。これらの結果から、大きい振動振幅・加工荷重を用いれば、工具摩耗率が大きく変化せずに加工速度の大きい効率的な加工がおこなえることがわかる。

3. 5. 1および3. 5. 2の実験からは、振動振幅や加工荷重が増加し加工速度が上昇すると工具摩耗率も上昇するという結果が得られたが、本実験においては工具摩耗率は大きく変化せず、そのような傾向はみられなかった。3. 5. 1および3. 5. 2では、加工速度の上昇による工具摩耗率の上昇は、工作物の除去量が増えて砥粒の循環や加工屑の排出の機能が悪くなり、加工面への砥粒の打ち込み作用が弱められるためと考えられた。本実験が3. 5. 1および3. 5. 2の実験と異なる点は、工作物加振であるためにスラリーも超音波加振されていることである。超音波加振による砥粒の攪拌作用やキャビテーションの発生などが砥粒の循環や加工屑の排出を促進するため、それらが加工面に溜まるのを防ぎ、加工速度が上昇しても工具摩耗率がそれほど上昇しない効果を与えたものと考えられる。



工作物：ソーダガラス 工具材料：超硬合金 工具径：10.5μm
 工具送り量：35μm 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2μm

(c) 加工条件

図4. 10 工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係

4. 5. 2 工作物材質・工作物振動振幅・加工荷重

図4. 11は、工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係を、ソーダガラス・シリコン・ステンレス鋼を工作物として用いて求めたものである。図(c)および(d)において、加工荷重は設定荷重レンジの中間値 m で示している。設定荷重レンジは $m \pm m/3$ である。

図(a)より、どの工作物も振動振幅が増加するにつれて加工速度が上昇していくことがわかる。図(b)より、振動振幅が増加しても、工具摩耗率はそれほど上昇せず、ソーダガラスでは若干減少する傾向さえみられた。したがって、この加工条件の範囲では、振幅を大きくすると加工速度が大きく、工具摩耗率が高くならずに加工が行えることがわかる。

図(c)から、加工荷重が増加するにつれ、どの材料も加工速度が上昇することがわかる。本実験で設定された加工荷重の範囲の上限は、工具の折損が起きやすくなる高加重にもかかわらず、その加工速度の上昇の割合が小さくなる現象は確認されなかった。加工速度に関しては、工具の折損が起らない範囲で加工荷重を大きくするのが有利と考えられる。図(d)から、工具摩耗率は、どの工作物の場合でも加工荷重が増加の影響がはっきりみられず、ほぼ同じ値を示していることがわかる。この点からも工具の折損が起らない範囲で加工荷重を大きくすることが良いと考えられる。

これらの結果から、どの工作物においても、異なる振動振幅・加工荷重における加工速度・工具摩耗率の変化の傾向は4. 5. 1の結果と類似しており、その理由も同じように考えられる。

工作物材質に関しては、ソーダガラスとシリコンはほぼ同じ加工速度を示すが、工具摩耗率はソーダガラスの方が小さく、効率的な加工が行えることを示している。ステンレス鋼は加工速度が低くて工具摩耗率が大きく、ソーダガラスやシリコンに比較すると加工の効率は低い。

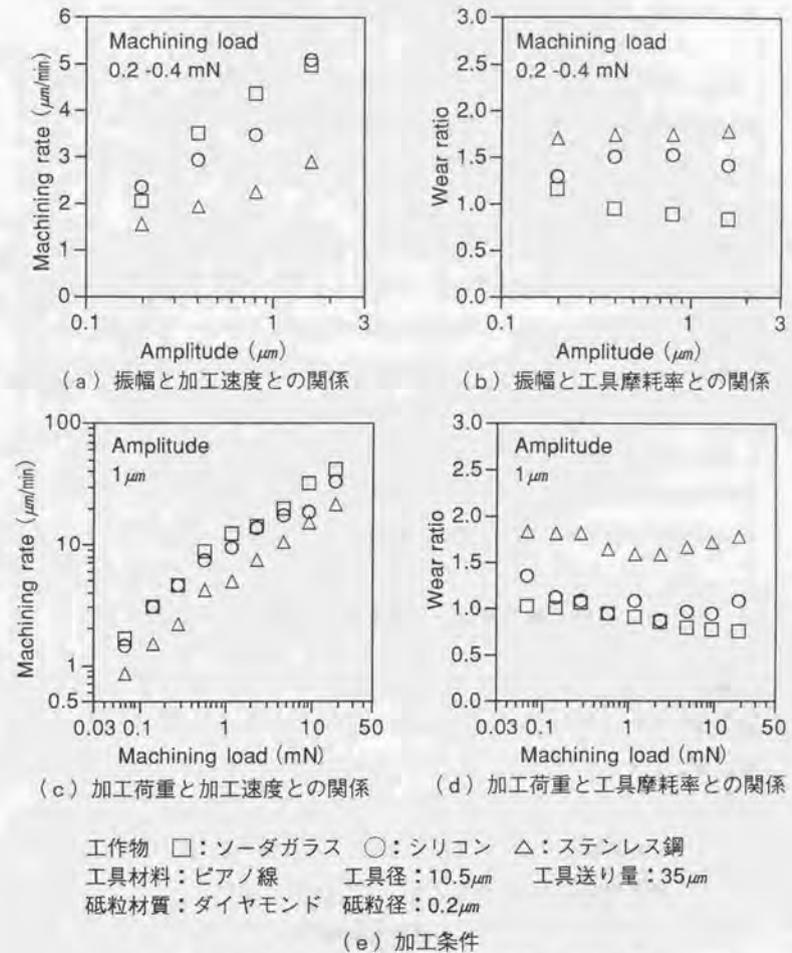


図4. 11 工作物材質・工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係

4. 5. 3 工具材質・工作物振動振幅・加工荷重

図4. 12は、工具材料として超硬合金およびピアノ線を用いた場合の、工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係を示している。図(C)および(d)において、加工荷重は設定荷重レンジの中間値 m で示している。設定荷重レンジは $m \pm m/3$ である。

加工速度は振動振幅・加工荷重を増加させた場合、超硬合金・ピアノ線ともに上昇していき、その値はほぼ同じであることがわかる。工具摩耗率に関しては、超硬合金がピアノ線よりも常に小さい値を示しており、工具材料としてより優れていることがわかる。超硬合金はピアノ線と比較すると延性は小さいが、硬さが大きいので、工具摩耗率が小さいものと考えられる。

また、振動振幅・加工荷重が増加するにつれて加工速度は上昇するが、工具摩耗率にはほとんど変化がなく、この点に関しては4. 5. 1および4. 5. 2の結果ともほぼ一致しており、その理由も同様に考えられる。

4. 5. 4 工具回転の有無・工作物振動振幅・加工荷重

図4. 13は、工具を回転させた場合とさせない場合について、工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係を示したものである。工具の回転数はおよそ3000rpmである。図(C)および(d)において、加工荷重は設定荷重レンジの中間値 m で示している。設定荷重レンジは $m \pm m/3$ である。

図より、振動振幅・加工荷重の大小にかかわらず、工具回転の有無は加工速度・工具摩耗率にほとんど影響を与えないことがわかる。3. 5. 3で調べた結果では、工具を回転させると工具摩耗率はあまり変化がないが、加工速度は上昇することが確かめられた。しかし、本実験ではそれとは異なる結果が出ている。この理由については、次のように考えられる。

加工装置プロトタイプAでは、工具の回転振れが大きく、回転する工具がク

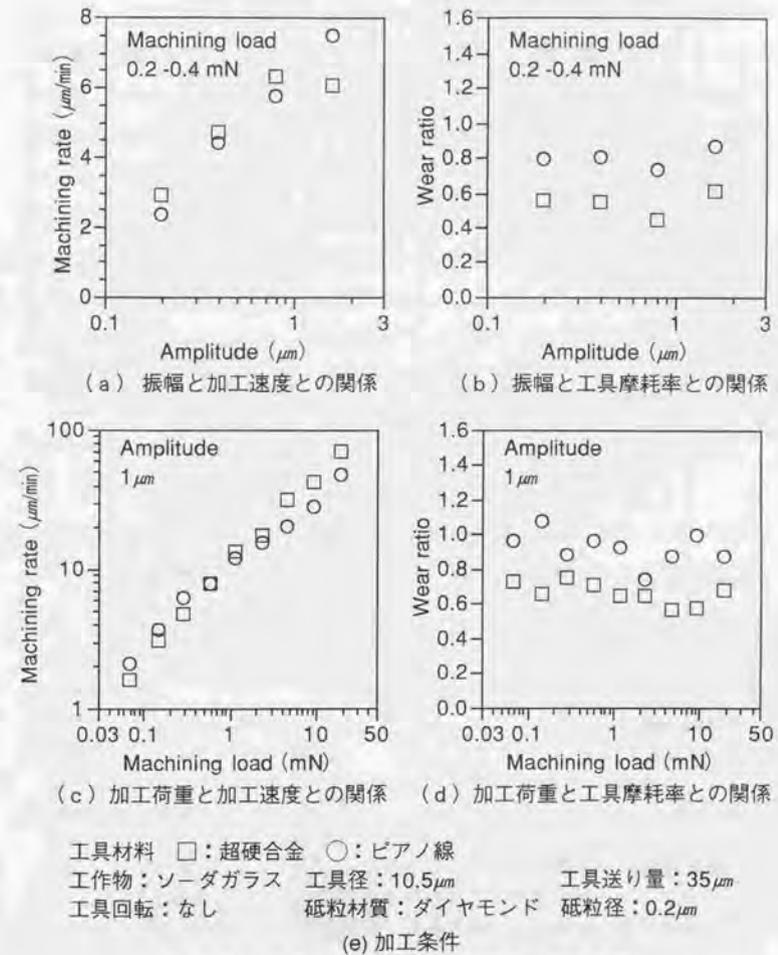
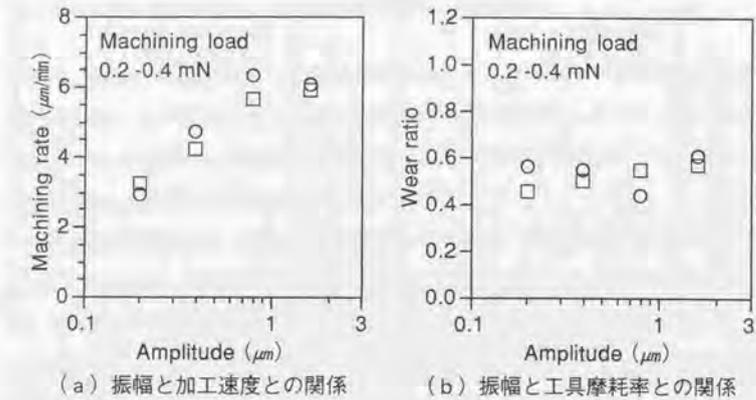
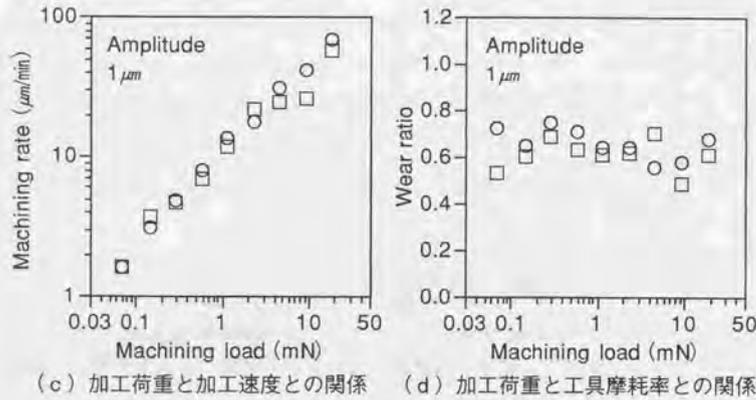


図4. 12 工具材料・工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係



(a) 振幅と加工速度との関係 (b) 振幅と工具摩耗率との関係



(c) 加工荷重と加工速度との関係 (d) 加工荷重と工具摩耗率との関係

工具回転 □:回転あり ○:回転なし
 工作物:ソーダガラス 工具材料:超硬合金 工具径:10.5 μm
 工具送り量:35 μm 砥粒材質:ダイヤモンド 砥粒径:0.2 μm

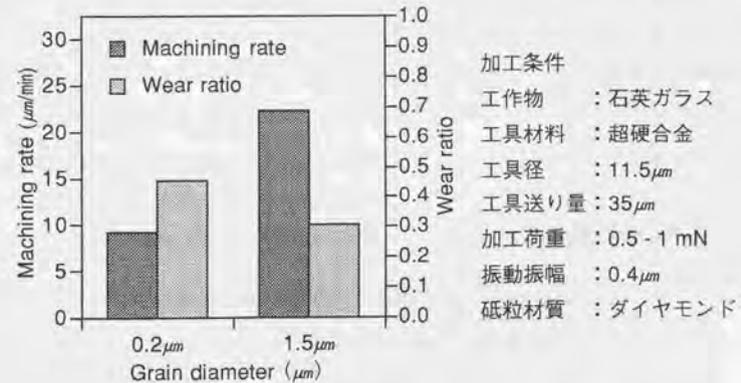
(e) 加工条件

図4.13 工具回転の有無・工作物振動振幅・加工荷重と加工速度・工具摩耗率の関係

リアランスを大きくし、さらにスラリーを攪拌するので砥粒の循環や加工屑の排出が促進され、工具摩耗率が大きくならず加工速度が上昇したのと考えられた。しかし、加工装置プロトタイプBでは、工具の回転振れが小さいので工具を回転させてもクリアランスほとんど大きくなり、またスラリーが加振されているので攪拌作用もすでに働いている。そのため、クリアランスが大きくなることおよび工具回転がもたらす攪拌作用による砥粒の循環や加工屑の排出の促進効果の増加が小さいので、工具を回転させても加工速度は変化せず、その結果工具摩耗率の変化もほとんどなかったものと考えられる。また、加工速度の変化がないことから、工具回転により発生する砥粒の研磨作用による除去量の増加はかなり小さいことも推測できる。

4.5.5 砥粒径

図4.14は、砥粒径と加工速度・工具摩耗率の関係、粒径の異なる2種類のダイヤモンド砥粒を用いて調べたものである。粒径中間値0.2 μm 、粒径分布



加工条件
 工作物 : 石英ガラス
 工具材料 : 超硬合金
 工具径 : 11.5 μm
 工具送り量 : 35 μm
 加工荷重 : 0.5 - 1 mN
 振動振幅 : 0.4 μm
 砥粒材質 : ダイヤモンド

図4.14 砥粒径と加工速度・工具摩耗率の関係

0-0.25 μm の砥粒と、粒径中間値1.5 μm 、粒径分布1-2 μm の砥粒を用いた。

図より、粒径1.5 μm の砥粒は、0.2 μm の砥粒と比較して、加工速度が2倍以上大きく、また工具摩耗率は3割程度小さかった。この結果より、加工速度・工具摩耗率に関しては、砥粒径が大きい方が優れていることがわかる。したがって、粒径の大きい砥粒を用いると効率の高い加工が行える。

粒径が大きくなると加工速度が上昇することは、2.4.1の(6)で述べたように、過去の多くの研究の結果と一致する。図の結果から工具摩耗長さの速度を求めると、粒径0.2 μm では4.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、粒径1.5 μm では6.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ となり、こちらも、粒径が大きくなると工具摩耗量が増加するという今までの報告例と一致する。

しかし、工具摩耗率に関しては報告例がなく、その砥粒径との関係は解明されていない。工具摩耗率は工作物の除去速度に対する工具の除去速度の比であるから、工作物と工具材質の組み合わせが同じならば、変化はないはずで、原因は何か他のものに求められる。考えられる理由は、砥粒が大きくなると、工具体積に対するクリアランスが大きくなり、砥粒の循環や加工屑の排出が促進されることである。今までの実験結果からも、砥粒の循環や加工屑の排出が促進される条件では、工具摩耗率の低下が確認されており、本実験において砥粒が大きくなることによる工具摩耗率の低下はクリアランスの増大のためと考えられる。

4.5.6 砥粒材質

図4.15は、砥粒材質と加工速度・工具摩耗率の関係を、ダイヤモンド・WC・シリカの各砥粒を用いて調べた結果を示したものである。砥粒径の違いの影響を少なくするため、粒径中間値が0.5-0.6 μm の範囲にあるものを用いた。それぞれの粒径中間値はダイヤモンド砥粒が0.5 μm 、WC砥粒が0.58 μm 、シリカ

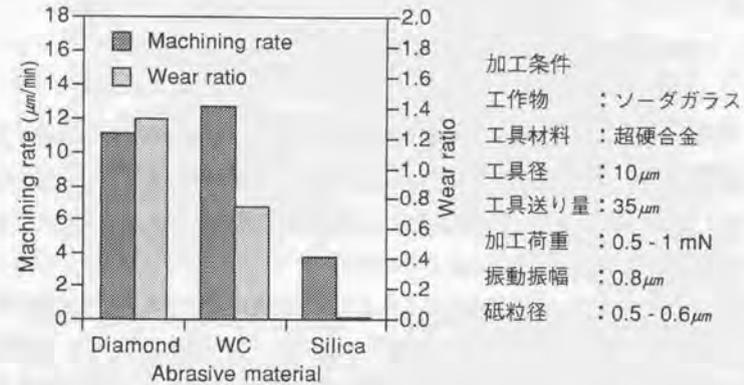


図4.15 砥粒材質と加工速度・工具摩耗率の関係

砥粒が0.5 μm である。

工具材料には超硬合金を用いており、ダイヤモンド・WC・シリカは、工具材料より硬さがそれぞれ大きいもの・同程度のもの・小さいものである。これらの硬さの違いは工具摩耗率の違いに顕著に表れている。ダイヤモンド砥粒はWC砥粒に比べ、およそ2倍の工具摩耗率を示した。一方、シリカ砥粒では工具はほとんど摩耗しなかった。

加工速度は、WC砥粒が最も大きい値を示し、シリカ砥粒の3倍であり、ダイヤモンド砥粒より大きいことがわかった。

また、図には記載されていないが、シリカ砥粒を用いて石英ガラスやシリコンの加工を試みたところ、加工はほとんど進まなかった。

これらの結果から、加工速度を大きく、工具摩耗率を小さくするためには、工作物を加工するのに十分な硬さを持ち、工具材質より硬くない砥粒を用いれば理想的であると考えられる。しかし、現実にはそのような砥粒でサブミクロ

ン以下の粒径のものが入手可能であるのはかなり少ない。

4. 5. 7 工具径

図4. 16は、工具径と加工速度・工具摩耗率の関係を調べたものである。工具径が小さくなるにつれ、加工速度が低下し、工具摩耗率が大きく上昇していくことがわかる。特に、工具径が $5.5\mu\text{m}$ の場合は工具摩耗率が4と、工具送り量の5分の4の長さが摩耗したことを示す。

3. 5. 5では、工具径が小さくなると加工速度が上昇するという結果が得られたが、本実験の結果はそれとは異なっている。この理由としては、本実験では3. 5. 5で用いた工具径より小径の工具を用いており、工具摩耗率もより大きくなるので、その結果加工速度が抑えられたものと考えられる。

工具摩耗率が上昇する理由は、3. 5. 5で述べたように、工具径が小さくなると工具体積に対する工具周囲の面積の比が大きくなり、工具周囲からの摩耗作用が増大するためと考えられる。

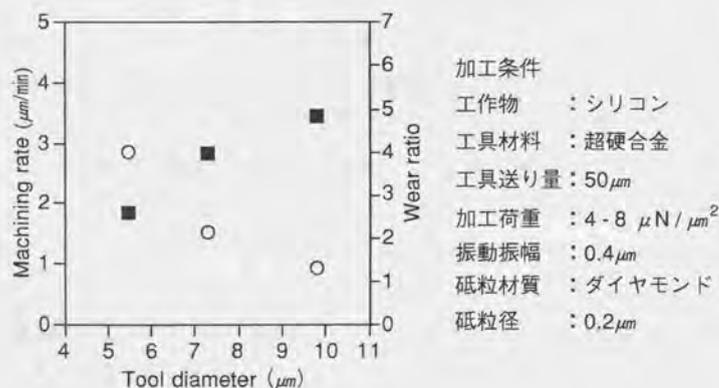


図4. 16 工具径と加工速度・工具摩耗率の関係

工具径が小さくなるにつれて工具摩耗率が上昇することは、小径工具を用いるマイクロ超音波加工においては大きな問題である。これだけ工具摩耗が大きいと、製作した工具は一つの穴を加工しただけで短くなり使えなくなってしまう。また、加工中に工具が短くなるので、深穴の加工が難しくなる。したがって工具摩耗率の改善が必要であり、その一つの解決法は4. 5. 10で述べる。

4. 5. 8 工具長さ

図4. 17は、工具長さとの加工速度・工具摩耗率の関係を示している。工具長さは、 $44\mu\text{m}$ 、 $88\mu\text{m}$ 、 $211\mu\text{m}$ の場合について調べた。工具が長くなると、加工速度が低下する傾向をみせた。工具摩耗率も若干低下している。

図4. 18は、この実験において加工された3つの穴の写真とその内径とを示す。この結果から、工具が長くなると加工穴の内径が大きくなるのがわかる。これは工具が長いと回転振れが大きくなるためと考えられる。

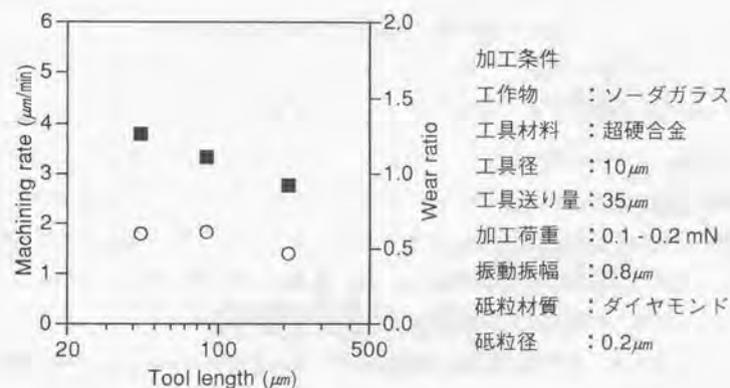


図4. 17 工具長さとの加工速度・工具摩耗率の関係

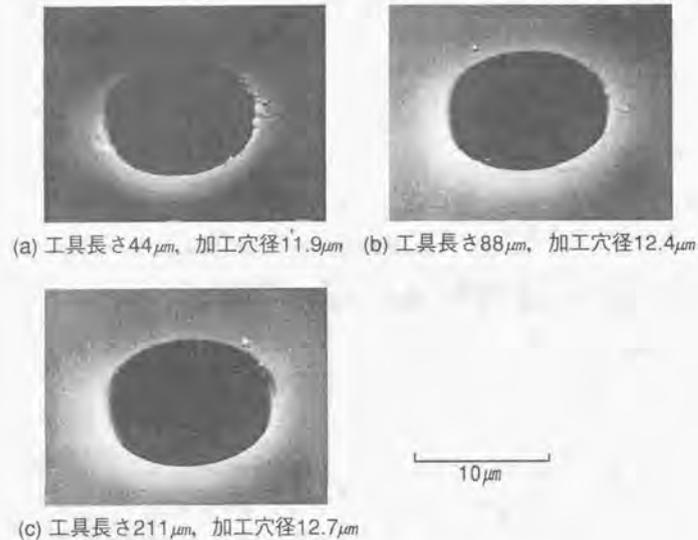


図4.18 異なる長さの工具による加工例

工具が長くなると加工速度が低下することの理由の一つとして、回転振れにより加工穴の断面積が増加し、加工深さあたりの加工体積が増加し、加工深さ速度である加工速度が低下することが考えられる。しかし、低下の割合は断面積が増加する割合より大きく、他の要因も考慮しなくてはならない。その要因としては、工具が振れることにより、加工荷重により工具にたわみが生じやすく、工作物への砥粒打ち込み作用が弱くなることが考えられる。

工具摩耗率の低下は、工具の回転振れが大きくなり、4.5.4での実験結果と同じくクリアランスが増加するので、砥粒の循環や加工屑の排出が促進されるためと考えられる。しかし、本実験ではクリアランスの増加量は小さいので、その促進される割合はあまり小さくなく、したがって工具摩耗率の低下も

わずかであったと考えられる。

4.5.9 工具送り量

工具送り量が異なる場合の、加工速度・工具摩耗率を求めた。直径 $8.7\mu\text{m}$ の工具を用い、工具送り量が $15\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ の場合について調べた。工具長さはほぼ同じものを用いた。その結果を図4.19に示す。加工深さが深くなるにつれ、工具摩耗率が増加していく。加工速度も、割合は小さいが、若干増加している。

異なる工具送り量での加工速度・工具摩耗率をより詳しく知るために、これらの実験を同一の工具を用いて連続で行ったものと仮定して、各加工深さの範囲での加工速度・工具摩耗率を求めたものを示したのが、図4.20である。この図より、工具摩耗率は加工深さが大きくなるにつれて上昇していくが、加工速度は上昇したのち一定値になることがわかる。この実験結果は図3.19と比

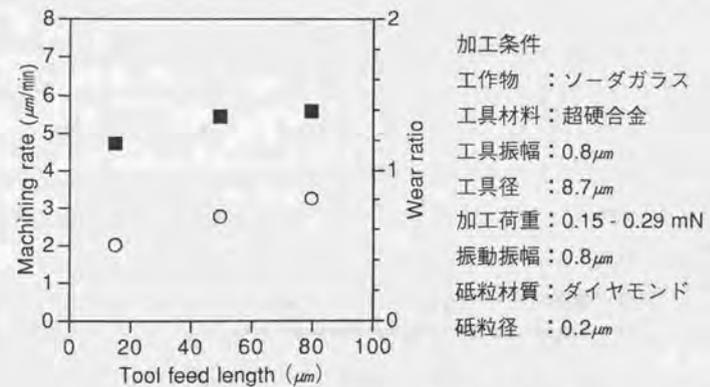


図4.19 工具送り量と加工速度・工具摩耗率の関係

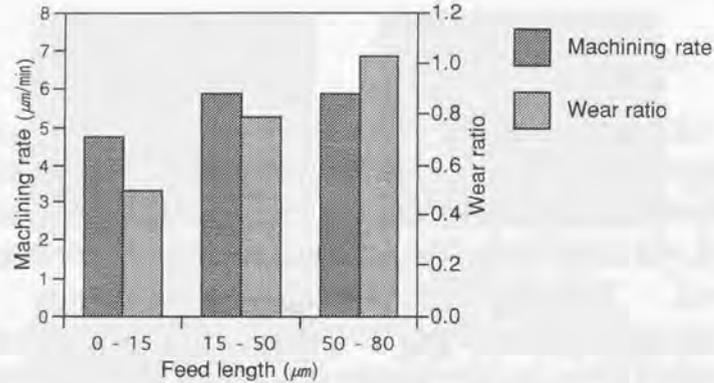


図4.20 加工深さによる加工速度・工具摩耗率の違い

較できる。図3.19の実験においては、加工深さが大きくなると工具摩耗率が急激に上昇したが、本実験ではその上昇の割合は小さい。図3.19の実験では加工穴の内径が40μmで加工深さが125μmであり、本実験の工具送り量80μmの場合では加工穴径が10.7μm、加工深さが44μmである。加工穴のアスペクト比を比較すると、図3.19の実験より本実験の方が大きく、相対的にはより深い穴であるわけだが、工具摩耗率の急激な増加はみられなかった。そのため、図3.19では加工深さが大きくなると急上昇した工具摩耗率のために加工速度も低下したが、本実験ではその低下もみられなかった。

工具摩耗率の急激な上昇がみられないのは、加工深さが大きくなっても砥粒の循環や加工屑の排出がそれほど悪化していないためと考えられる。本手法では工具の回転振れが小さいためにクリアランスも小さく、その点は逆に不利と考えられるが、工具摩耗率は大きく上昇しない。その理由としては、工具加振方式と工作物加振方式の違いが考えられる。工作物加振方式では、スラリーも

超音波加振され、キャビテーションの発生などにより砥粒の循環や加工屑の排出を促進し、加工深さが大きくなっても工具摩耗率を急激に増加させない効果を与えていると考えられる。

以上、4.5.1から4.5.9までの実験結果のうち、数値で表される各加工パラメータが変化したときの加工速度・工具摩耗率の変化の傾向の一覧を、図4.21に示す。

加工速度	大	↑	↑	↑
	小	↓	↓	↓
工具摩耗率	大	→	→	↓
	小	→	→	↑
		加工荷重	工作物振動振幅	砥粒径
加工速度	大	↑	↑	→
	小	↓	↓	→
工具摩耗率	大	→	→	↑
	小	→	→	↓
		工具径	工具長さ	加工深さ

図4.21 数値で表される各加工パラメータが変化したときの加工速度・工具摩耗率の変化の傾向の一覧

4. 5. 10 ダイヤモンド焼結体工具

前節までの実験結果から、マイクロ超音波加工では工具径や砥粒径が小さくなるにしたがって工具摩耗率が上昇する傾向があることがわかった。さらに、砥粒にダイヤモンドを使用していることも工具摩耗率をより大きなものになっている。工具摩耗が大きいと、工具寿命が短く、深穴の加工が困難であるという問題が生じるので、対策が必要である。

そこで、本節では工具材料としてダイヤモンドを用いることを試み、その場合の加工速度と工具摩耗率を他の工具材料と比較することにした。ダイヤモンドは非常に硬く、耐摩耗性に優れるので工具摩耗率が大きく改善されることが期待される。工具材料はWEDG加工で成形できなくてはならないので、ダイヤモンドの中でも、焼結バインダに金属を使用しているために導電性のあるダイヤモンド焼結体を用いることにした。ダイヤモンド焼結体は、単結晶のものに比べ、劈開性がないという利点もある。

ダイヤモンド焼結体は線材ではないので、マンドレルへの取り付け方が異なる。それを図4. 22に示す。使用されたダイヤモンド焼結体は、直径6cm、厚さ1mmの超合金プレートの上に、粒径 $0.3\mu\text{m}$ の微粒ダイヤモンド粉末をバインダ金属と混合し、高温高压で焼結して厚さ0.6mmの層を形成したものである。それをワイヤ放電加工で直径1.5mmに切り出して用いた。WEDG加工によるマイクロ工具の製作のためには、この段階でなるべく小さい直径に切り出しておくこと加工量が少なくなるので有利だが、ワイヤ放電加工および、切り出し後のマンドレルへの取り付けの際の扱い易さを考慮して、この直径を選んだ。

次にマンドレルの先端に切り出した焼結体を取り付けるが、マンドレルの先端はセラミックスであるので、この部分に取り付けると焼結体がマンドレルの軸と絶縁されることになる。そのため、先端のセラミックス部分を金属棒に置き換えて軸に差し込み、その金属棒の先端に焼結体を接着剤によって固定した。

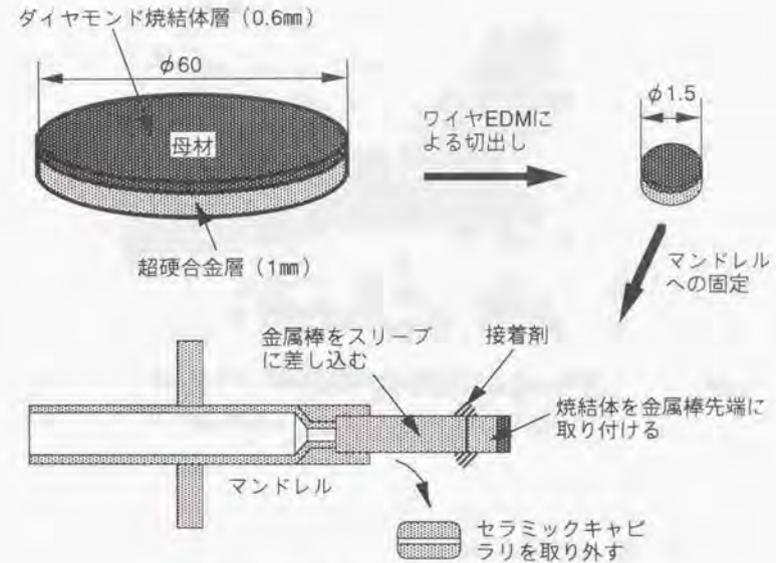


図4. 22 ダイヤモンド焼結体材料の使用法

そして、WEDG加工によりマイクロ工具に製作する。図4. 23は、直径 $20\mu\text{m}$ 、その直径部分の長さが $250\mu\text{m}$ に製作された工具の例である。このように準備されたダイヤモンド焼結体工具を用いてマイクロ超音波加工を行い、加工速度と工具摩耗率を調べた。

図4. 24は、超合金工具との、加工速度・工具摩耗率の比較を表している。超合金工具の工具摩耗率が0.74であるのに対し、ダイヤモンド工具の工具摩耗率は0.01と非常に小さく、工具摩耗がきわめて少ないことを示している。これにより、工具寿命の大幅な改善や、多数穴の連続加工、より深い微細穴の加工が行えることが期待できる。

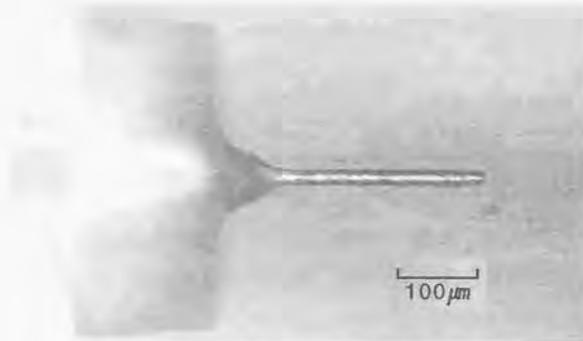


図4.23 ダイヤモンド焼結体のマイクロ工具

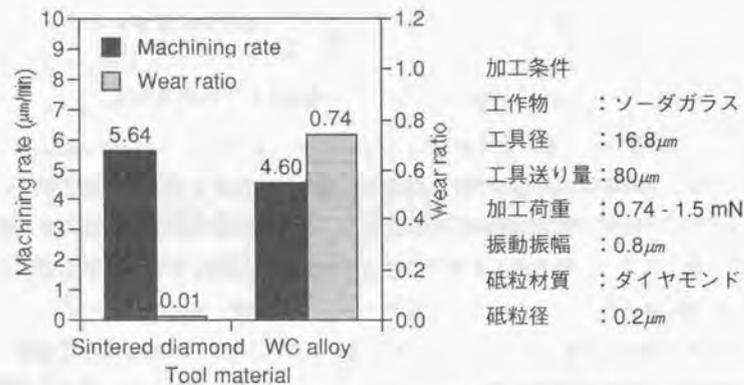


図4.24 ダイヤモンド焼結体工具と超合金工具の加工速度・工具摩耗率の比較

加工速度も上昇することが確かめられた。これは、今まで工具の摩耗に使われていたエネルギーが、工作物の除去に向けられたためと思われる。

なお、ダイヤモンド焼結体は放電加工による成形性はよいが、超合金などに比較すると靱性が低く、工具径が15 μm以下になると急に脆くなる傾向があり、超音波加工に用いることができなかった。これを改善するには、焼結の際にバインダ金属の割合を増やしたり、WC粉末などを加えて焼結体の靱性を向上させる必要がある。

4.5.11 固定砥粒方式

一般の超音波加工では、遊離砥粒方式の超音波加工から砥石を用いた固定砥粒方式へ移行する動きがある。そこで、本研究でも固定砥粒方式によるマイクロ超音波加工を試みた。

工具材料として用いたのは、粒径0.5 μm以下の微粒ダイヤモンド砥粒を使用したメタルボンドダイヤモンド砥石（ノリタケダイヤ）である。ボンド材はブロンズである。図4.25にその写真を示す。製造された時点での寸法は、長さ8 cm、直径5 mmであり、砥粒集中度は、高めにしてある。

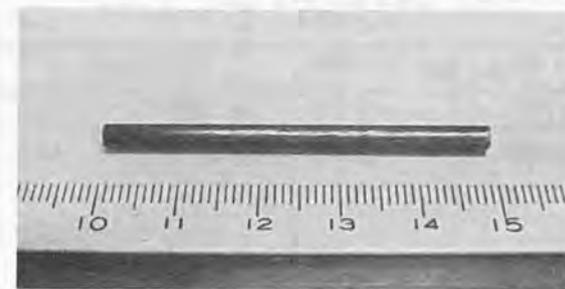


図4.25 メタルボンドダイヤモンド砥石

この砥石を旋削によりマンドレル先端のセラミックス部分と同じ径にし、そのセラミックス部分の代わりにマンドレルに取り付け、WEDG加工により小径工具に加工した。しかし、材料の内部応力が大きく、 $20\mu\text{m}$ 以下の径に加工すると曲がりが生じやすく、小径の工具の製作ができなかった。

小径の工具が製作できないので、とりあえず直径 $25\mu\text{m}$ の工具を作り、それを用いて超音波加工を行った。表4.1に、その加工条件と加工結果を示す。

この結果より、加工速度が $0.76\mu\text{m}/\text{min}$ と小さく、また工具摩耗率も0.79と高く、効率の低い加工であることが確認された。工具摩耗率は超硬合金などを工具材料として用いたときの遊離砥粒方式の場合と同じオーダーにあるが、加工速度がきわめて小さい。

工具摩耗率が大きいのは、砥粒の集中度が高いためにボンド材の結合力が弱く、荷重が加わることにより砥粒が剥離しやすかったこと、落ちた砥粒との作用により摩耗が大きくなったことなどが考えられる。集中度を低くし、ボンド材の強度を上げれば摩耗が少なくなると思われるが、その分加工速度がさらに低下することが考えられる。現時点では、マイクロ超音波加工においては固定

表4.1 直径 $25\mu\text{m}$ のメタルボンド砥石による
マイクロ超音波加工の加工条件・加工結果

加工条件		加工結果	
工作物	ソーダガラス	加工時間	55min
振動振幅	$1\mu\text{m}$	加工深さ	$42\mu\text{m}$
加工荷重	2 - 4 mN	工具摩耗長さ	$33\mu\text{m}$
加工液	水	加工速度	$0.76\mu\text{m}/\text{min}$
工具送り量	$75\mu\text{m}$	工具摩耗率	0.79

砥粒方式は不向きのものである。

4.5.12 理論値との比較

3.5.7において、2.6の(3)のCookの加工速度式^[29]を用いて理論値と実験値を比較した。そこで、本加工法による実験値も比較してみることにした。実験値として、図4.11(a)の実験において表4.2に示される加工パラメータの場合の加工速度の値を用いた。3.5.7で行ったものと同じように計算すると、加工速度式から加工速度は $4.3 \times 10^3 (\mu\text{m}/\text{min})$ と算出された。これは実験値 $4.4 (\mu\text{m}/\text{min})$ のほぼ1000倍であり、3.5.7の場合と同じように実験値は理論値より3桁オーダーが小さいことがわかった。工具加振の場合でも、工作物加振の場合でも、マイクロ超音波加工は理論式の仮定からかなり異なる現象が起きているようである。

表4.2 加工速度の実験値と加工パラメータ

加工速度	$4.4\mu\text{m}/\text{min}$	加工荷重	0.2 - 0.4 mN
工作物	ソーダガラス	工具振動振幅	$0.8\mu\text{m}$
工具材料	ピアノ線	砥粒	ダイヤモンド, $0.2\mu\text{m}$
工具径	$10.5\mu\text{m}$	振動周波数	40kHz

4.6 加工精度

4.6.1 クリアランスと真円度

超音波加工において、クリアランスの大きさは加工寸法に影響を与えるので重要な要素である。そこで砥粒径とクリアランスの関係を調べることにした。

2.4.2の(3)で述べたように、クリアランスの大きさは砥粒の中心粒径が影響するのか、最大粒径が影響するのかまだはっきりしていない。これは、一般に砥粒はある程度の粒径分布を持つものであり、その分布の仕方も一様でなく、また砥粒の形状も定まっておらず、定量的に砥粒径とクリアランスとの関係を求めるのが難しかったためであると考えられる。そこで、本実験では、図4.26^[36]に示される粒径 $0.5\mu\text{m}$ のシリカ砥粒(宇部日東化成)を用いて加工を行った。図からもわかるように、この砥粒は球状で、粒径も非常によく揃っているの、砥粒径とクリアランスの関係が求めやすいものと考えられる。

また、同時に工具の回転精度についても調べた。工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法の開発の大きな目的の一つは、工具システムの回転精度の向上であり、どの程度改善されたかを調べる。

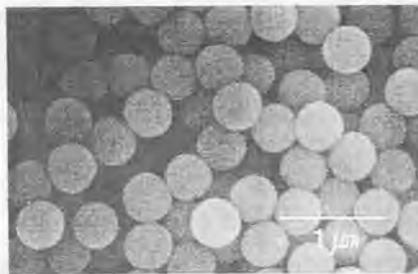
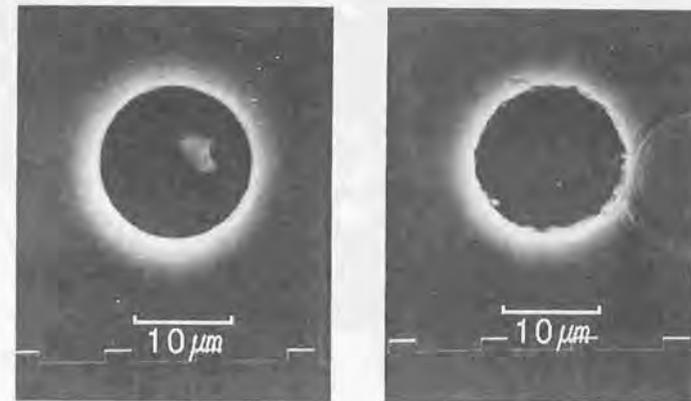


図4.26 粒径 $0.5\mu\text{m}$ のシリカ砥粒(宇部日東化成^[36])

図4.27は、図4.26のシリカ砥粒を用いて、工具を回転させて加工した穴と回転させずに加工した穴とを示す。4.5.8で述べたように、工具が長くなるとそれによる回転振れの影響が出てくるので、工具長さを $50\mu\text{m}$ と工具径の3倍程度に短くして加工を行った。加工深さは $5\mu\text{m}$ 以下である。

工具径が $15.5\mu\text{m}$ で、図(b)の工具を回転させずに加工された穴の内径が $17.3\pm 0.3\mu\text{m}$ であることから、直径の差は $1.8\mu\text{m}\pm 0.3\mu\text{m}$ で、クリアランスは $1\mu\text{m}$ 程度ということになる。砥粒の粒径が $0.5\mu\text{m}$ なので、クリアランスはおおよそ砥粒径の2倍であり、クリアランスと砥粒径との関係が求められた。2.4.2



(a) 工具回転あり
加工穴径： $17.6\pm 0.05\mu\text{m}$

(b) 工具回転なし
加工穴径： $17.3\pm 0.3\mu\text{m}$

工作物：ソーダガラス 工具材料：超硬合金 工具径： $15.5\mu\text{m}$
 工具送り量： $5\mu\text{m}$ 以下 加工荷重： $0.5 - 1\text{mN}$ 振動振幅： $0.8\mu\text{m}$
 砥粒材質：シリカ 砥粒径： $0.5\mu\text{m}$

(c) 加工条件

図4.27 工具回転の有無と加工穴形状の関係

の(3)で述べたように、従来クリアランスの部分には砥粒1層分が流入していると考えられていたが、本実験の結果より、2層分の砥粒が流入していることが判明した。

図4.28は4.5.9の実験において工具送り量を変化させて加工された穴の写真とその内径を示したものである。この図より、工具送り量は加工穴径に影響を及ぼしていないことがわかる。2.4.2の(3)において、従来の超音

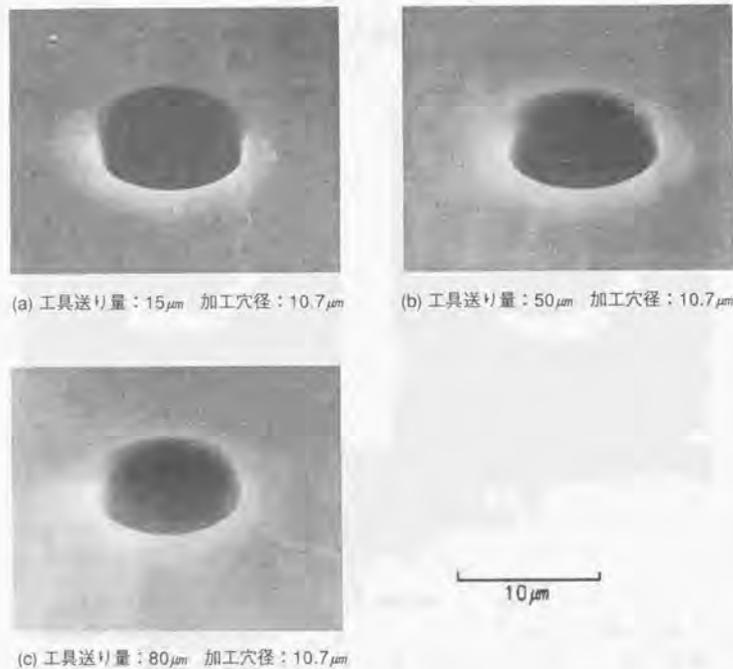


図4.28 異なる工具送り量で加工した微細穴

波加工においては、加工初期には粒径の小さい砥粒がクリアランスに入っていくが、加工の進行に伴い徐々に大きい粒径の砥粒が入り込んでいくので、深穴加工の場合には加工穴径が大きくなると考えられていることを述べたが、本実験においてはそのような傾向ははっきりみられなかった。使用した砥粒の粒径分布の幅が0-0.25 μm と小さいので、加工穴径が大きくなることがあまり目立たないためと考えられる。

また、図4.27の結果より、工具を回転させた場合とさせない場合の加工穴の内径の差が小さく、また穴の真円度は工具を回転させた場合で0.05 μm 、させない場合でも0.3 μm と非常に小さい値であることがわかる。これは工具回転振れが小さく、また回転角度による振れの量のばらつきも小さく、回転精度が高いことを示している。3.6.1で述べたように、加工装置プロトタイプAでは、工具を回転させた場合とさせない場合での加工穴の内径の差が大きく、また工具を回転させた場合の真円度が1 μm 、回転させない場合が2.5 μm であったのに比べ、大幅に回転精度が改善されたことがわかる。このことは、工作物加振方式がもたらした工具システムの自由な設計可能性により、高精度な工具回転が実現できるスピンドルシステムを使用することができたためである。また、図4.27の(a)と(b)とを比較すると、工具を回転させると、研磨作用が働いて穴のエッジがなめらかになることもわかる。

4.6.2 貫通穴の形状

3.6.2において貫通穴を加工したが、加工穴の大きいテーパと穴の出口側の割れが問題であった。テーパを防ぐために、以下の対策が考えられた。

- (a) 工具に生じるテーパを小さくするために、摩耗しにくい工具材料を用いて工具を製作する
- (b) 貫通後もしばらく工具を送り続ける

また、穴の出口での割れを防ぐために、以下の対策が考えられた。

(c) 振動振幅、加工荷重を小さくして加工速度を落とし、工具送り速度を小さくする

(d) より微粒の砥粒を使用する

これらに対応して、以下の具体的な対策をとり、同じく厚さ $200\mu\text{m}$ のシリコンに対して貫通穴の加工を行うことにした。

(a) 工具材料としてダイヤモンド焼結体を用いる

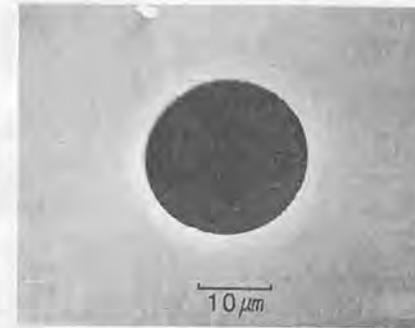
(b) 貫通後も数十 μm そのまま工具を送り続ける

(c) 加工荷重を $4\text{--}6\text{mN}$ から $0.5\text{--}1\text{mN}$ に、振動振幅を $0.8\mu\text{m}$ から $0.6\mu\text{m}$ に小さくする

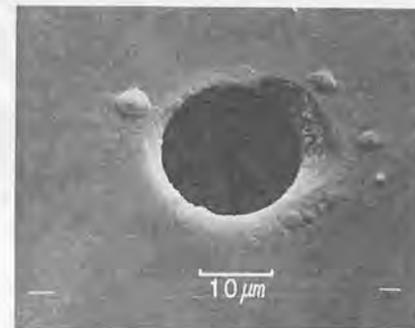
(d) 砥粒を粒径 $0.58\mu\text{m}$ のものから、粒径 $0.2\mu\text{m}$ のものにする

図4.29は、これらの対策のもとに加工された貫通穴の写真を示す。その入り口の径は $25\mu\text{m}$ で、出口の内径は $20\mu\text{m}$ であった。3.6.2での加工例のテーパと、本実験の加工例のテーパの比較を図4.30に示す。3.6.2での加工穴の入り口の径が $43\text{--}44\mu\text{m}$ で出口の内径が $27\mu\text{m}$ であったことと比較して、アスペクト比がより向上しながら加工穴のテーパをかなり小さく抑えられたことがわかる。また、図4.29(b)より、穴の出口側の割れも小さくなっていることもわかる。

以上の結果から、深い貫通穴加工の場合のテーパや出口の割れを抑えるための、本実験における対策が効果的であったことが確認された。



(a) 入り口側 加工穴径： $25\mu\text{m}$



(b) 出口側 加工穴径： $20\mu\text{m}$

工作物：シリコン	工具材料：ダイヤモンド焼結体	工具径： $20.5\mu\text{m}$
工具送り量： $220\mu\text{m}$	加工荷重： $0.5\text{--}1\text{mN}$	振動振幅： $0.6\mu\text{m}$
砥粒材質：ダイヤモンド	砥粒径： $0.2\mu\text{m}$	加工時間： 60min

(c) 加工条件

図4.29 厚さ $200\mu\text{m}$ のシリコンに加工した貫通穴

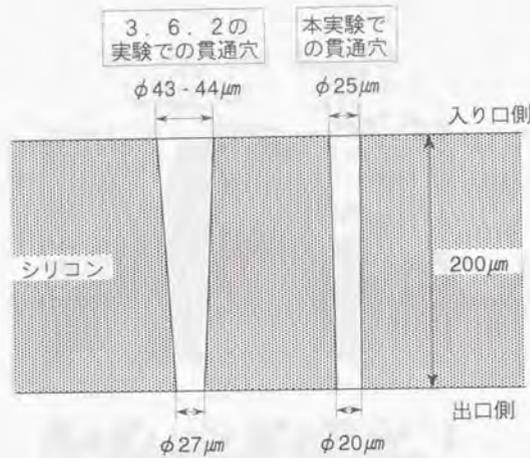


図4.30 貫通穴のテーパの比較

4.6.3 チッピング

3.6.3では、砥粒の粒径および工具回転の有無とチッピングの関係を調べたが、本節では工作物材質・工具振動振幅・加工荷重・工具回転の有無とチッピングの関係を調べる。

図4.31, 図4.32, 図4.33は、それぞれソーダガラス、シリコン、ステンレス鋼に対して様々な加工条件で加工した微細穴の写真を示している。

ソーダガラスはチッピングが少なく、工具を回転させない場合、工具振動振幅や加工荷重が大きい場合でもほとんど外観に変わりはない。したがって、4.5.2の結果とから、チッピングの発生を考慮にいれることなく振動振幅や加工荷重を大きく設定して加工が行える材料であることがわかる。

シリコンは、ソーダガラスと比べると全体的にチッピングが目立つ。また、

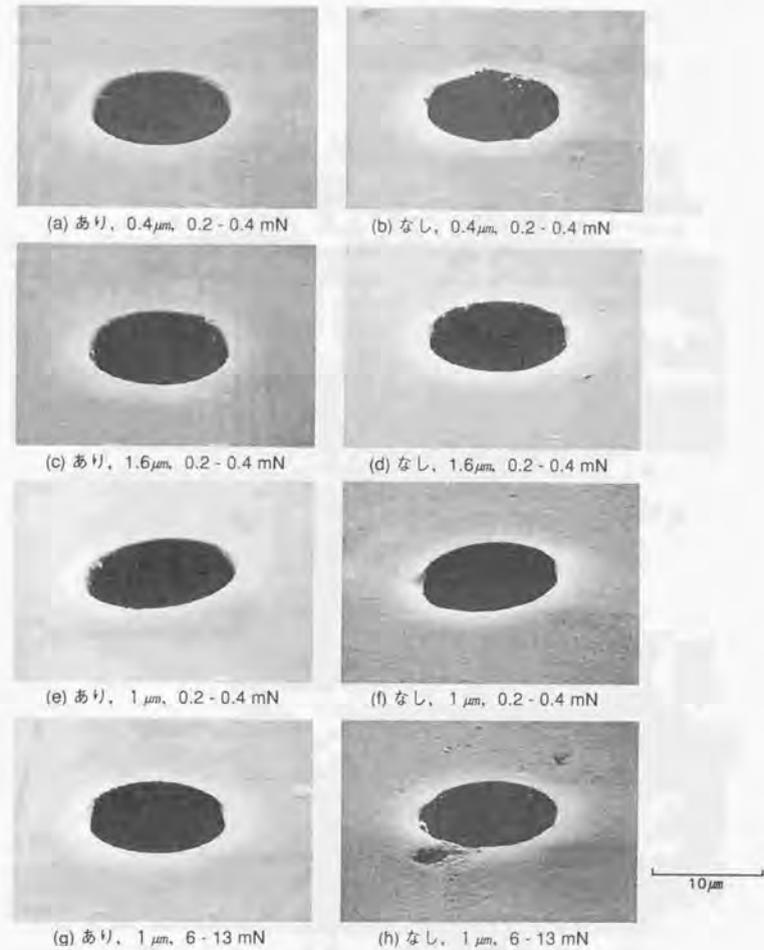


図4.31 様々な加工条件でソーダガラスに加工した微細穴
(左から、工具回転の有無、工具振動振幅、加工荷重を表す。共通加工条件は、工具材料：超硬合金、工具径：10.5 μm、砥粒材質：ダイヤモンド、砥粒径：0.2 μm)

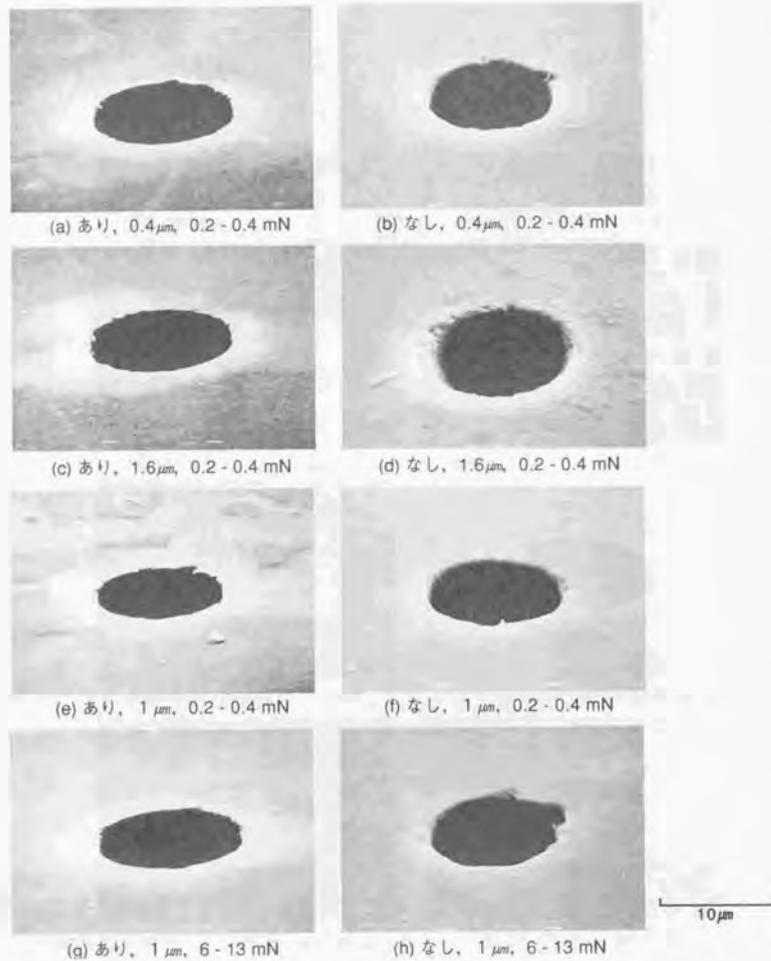


図4.32 様々な加工条件でシリコンに加工した微細穴
(左から, 工具回転の有無, 工具振動振幅, 加工荷重を表す. 共通加工条件は, 工具材料: 超硬合金, 工具径: $10.5\mu\text{m}$, 砥粒材質: ダイヤモンド, 砥粒径: $0.2\mu\text{m}$)

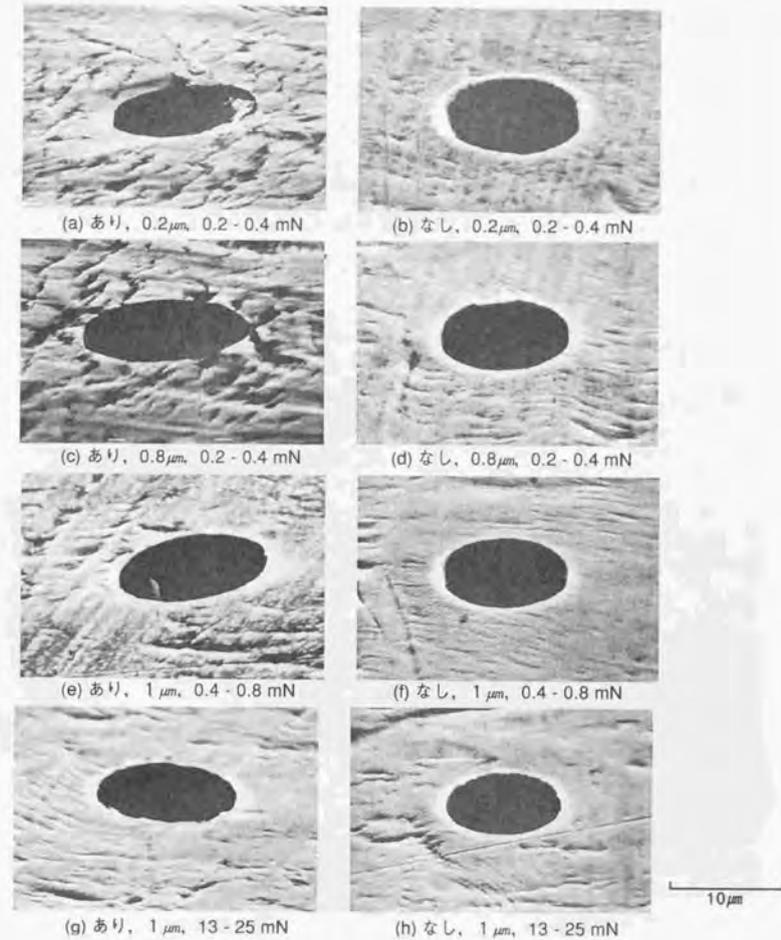
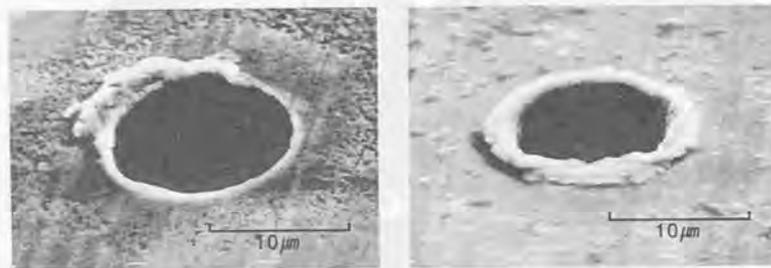


図4.33 様々な加工条件でステンレス鋼に加工した微細穴
(左から, 工具回転の有無, 工具振動振幅, 加工荷重を表す. 共通加工条件は, 工具材料: 超硬合金, 工具径: $10.5\mu\text{m}$, 砥粒材質: ダイヤモンド, 砥粒径: $0.2\mu\text{m}$)

工具を回転させた場合では工具振動振幅・加工荷重が大きい場合でもそれほど外観は変わらないが、工具を回転させない場合では工具振動振幅・加工荷重が大きくなるとチップングも大きくなる。シリコンの場合では、チップングの発生を抑えるために工具を回転させるとよいことがわかる。

延性材料であるステンレス鋼では、工具回転の有無や工具振動振幅・加工荷重の大小にかかわらずチップングは発生しない。したがって、加工の効率のみを考えて、工具振動振幅・加工荷重を大きく設定して加工を行うと良いと考えられる。

延性材料でも、より延性が大きい銅のような工作物では、図4.34に見られるように、加工穴のエッジには返りが生じる。



(a) 工具回転あり

(b) 工具回転なし

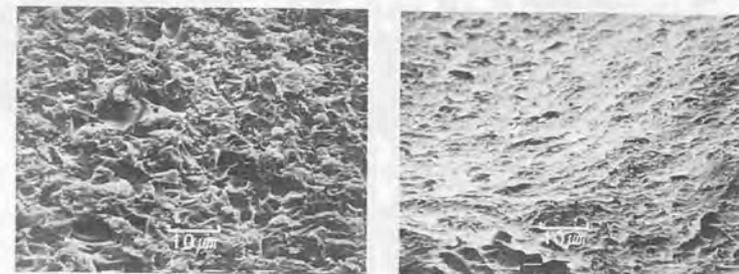
工具材料：超硬合金 工具径：10.5 μm 加工荷重：0.2 - 0.4 mN
振動振幅：0.4 μm 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm

(c) 加工条件

図4.34 銅の加工例

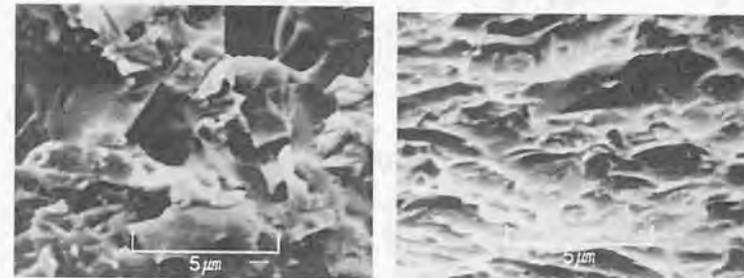
4.6.4 加工面の状態

一般に、ガラスなどの脆性材料に超音波加工を行う場合、スラリー中の砥粒が工作物表面にマイクロクラックを生じ、その伸長と交差により工作物を除去すると考えられている。図4.35は、一般の超音波加工機により、砥粒として#240のSiC砥粒を用いて石英ガラスに対して加工した穴の、側面と底面を示す。図より、加工面にはクラックにより生じた鋭いエッジや貝殻状の割れが存



(a) 底面

(b) 側面



(c) 底面拡大図

(d) 側面拡大図

図4.35 一般の超音波加工機により、#240のSiC砥粒を用いて加工した石英ガラスの穴の表面

在することが確認できる。それは特に底面に顕著である。図4.36には、同じく#240のSiC砥粒を用いて黄銅に対して加工した穴の底面を示す、ガラスの加工面のような鋭いエッジや割れは存在していないことがわかる。

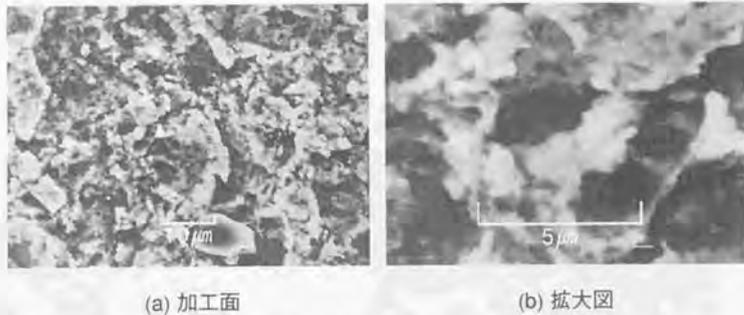


図4.36 一般の超音波加工機により、#240のSiC砥粒を用いて加工した黄銅の穴の表面

次に、マイクロ超音波加工により加工した穴の加工面の観察を行った。図4.37に、粒径中間値 $0.2\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を用い、石英ガラス上に工具を回転させて加工した穴と回転させずに加工した穴との側面と底面とを示す。

穴の表面には図4.35で確認されたような鋭いエッジは存在せず、穴の底面(図(c), (d))には波のような模様があり、鏡面である加工されていない表面に比べると粗さが大きいことがわかる。また、工具を回転させない場合は、回転させた場合と比較して、表面のうねりが大きい。穴の側面(図(e), (f))は底面に比べてなめらかである。工具を回転させない場合は、垂直方向に縞模様があることがわかる。

次に、粒径中間値 $5\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を用いて加工した穴の加工面を図4.38に示す。低倍率の写真(図(a) (b))からは、一見加工面にクラックが生じているように見えるが、高倍率で観察すると(図(c) ~ (f))、

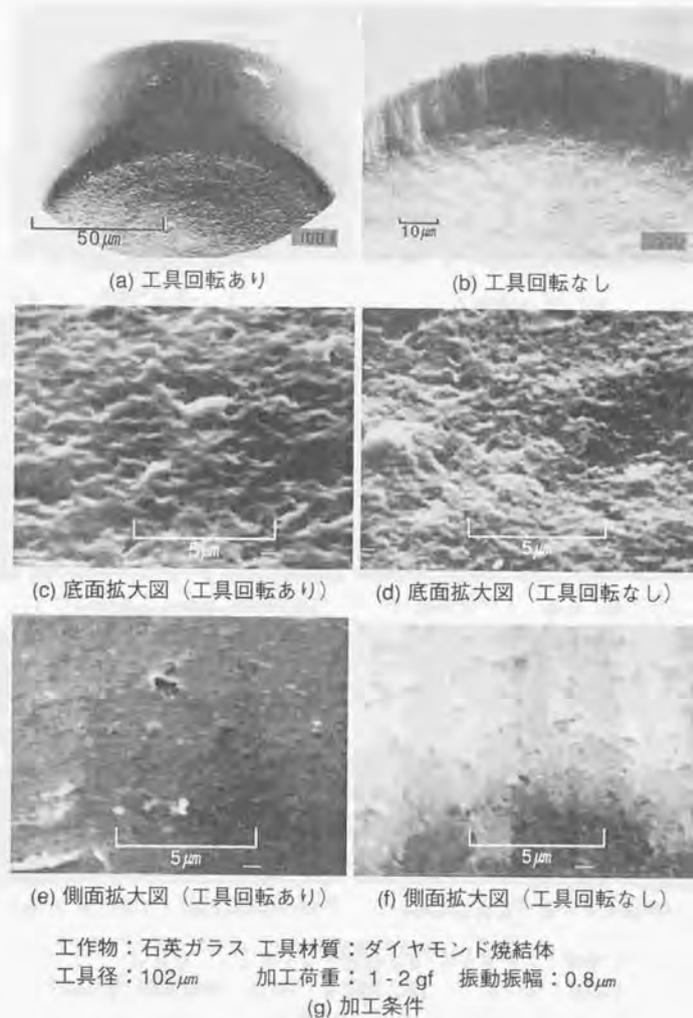
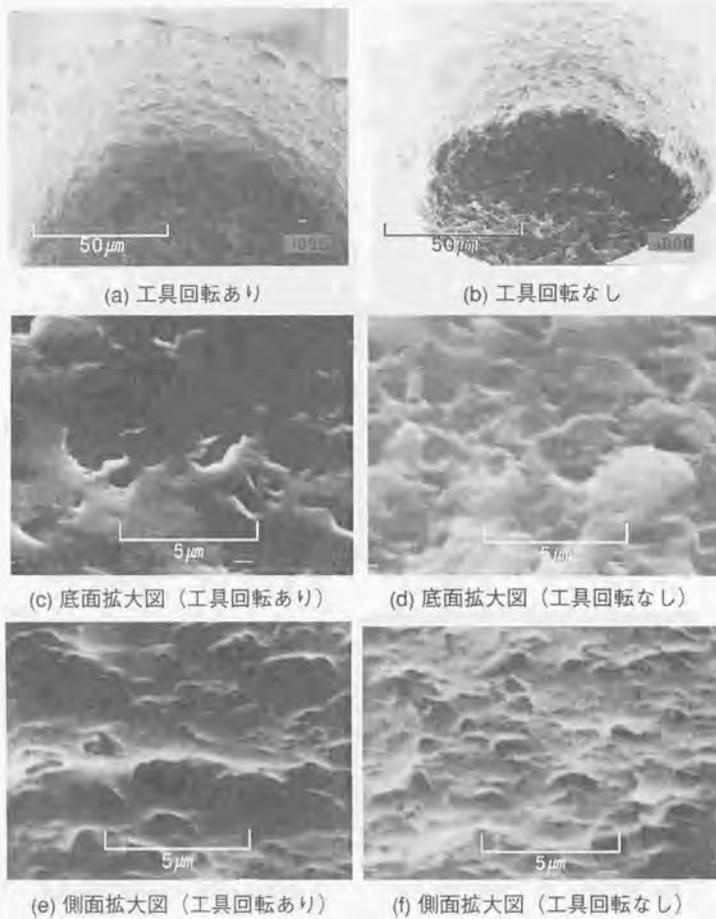


図4.37 粒径中間値 $0.2\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒で加工した穴の加工表面



(a) 工具回転あり (b) 工具回転なし
(c) 底面拡大図 (工具回転あり) (d) 底面拡大図 (工具回転なし)
(e) 側面拡大図 (工具回転あり) (f) 側面拡大図 (工具回転なし)
工作物：石英ガラス 工具材質：ダイヤモンド焼結体
工具径：102 μm 加工荷重：1-2 gf 振動振幅：0.8 μm
(g) 加工条件

図4.38 粒径中間値5 μm のダイヤモンド砥粒で加工した穴の加工表面

加工面にはクラックによる鋭いエッジや割れは存在せず、図4.37でみたような波のような模様が確認できる。工具を回転させて加工した穴の側面（図(e)）には、横方向の縞模様があることがわかる。

マイクロ超音波加工としては、使用砥粒の粒径が5 μm であるというのはかなり大きい値であるが、それでも図4.35でみたような脆性破壊によるクラックは加工面には確認できなかった。

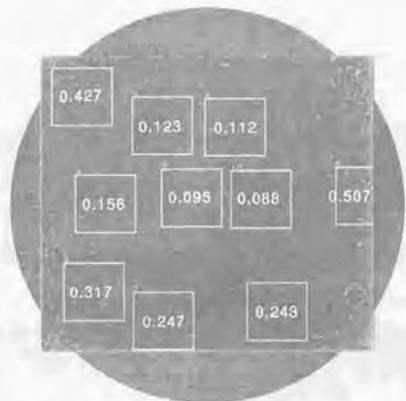
これらの加工面の観察から、マイクロ超音波加工の加工面は一般の超音波加工のそれとは異なる特徴があることがわかり、加工において別のメカニズムが働いていることが予想される。

4.6.5 加工面粗さ

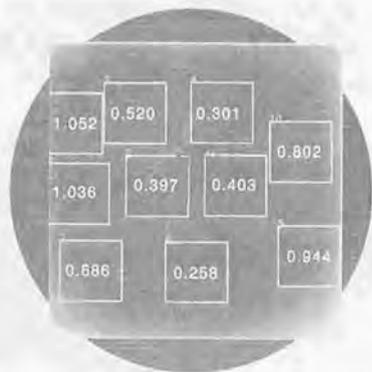
図4.39に、図4.37の加工穴の底面の表面粗さを測定したものを示す。表面粗さは、レーザー走査顕微鏡において加工表面の形状を測定したデータを用いて計算した。図において、底面の写真と円とが重なっているが、円の大きさと位置は、実際の底面とほぼ一致している。写真中の四角枠は表面粗さを求めた範囲を表し、その中の数字はその部分の表面粗さRa (μm) を表している。

工具を回転させて加工した穴（図4.37(a)）の底面の粗さの平均Raは0.234 μm で、工具を回転させずに加工した穴（図4.37(b)）の0.633 μm に比較して良好であることがわかる。どちらの穴も、穴の周辺部より中心部の方が表面粗さが良く、最小の粗さ値は工具を回転させた加工穴の中心部の0.088 μm であった。

工具を回転させることによる加工面粗さの向上は、工具回転により研磨作用が働くためと思われるが、用いた砥粒の粒径が0.2 μm の微粒であることを考えると、ラッピングやポリシングの加工結果と比較してそれほど小さい値ではない。



(a) 工具回転あり, 単位 μm , 平均 $Ra=0.234\mu\text{m}$



(b) 工具回転なし, 単位 μm , 平均 $Ra=0.633\mu\text{m}$

図4.39 図4.37の加工穴の底面の表面粗さ Ra (μm)

図4.40は, 図4.37で工具を回転させて加工した穴の底面円の直径に沿った断面プロファイルである。うねり成分は除いていない。この図からも, 穴の周辺部より中心部の方が表面粗さが良いことがわかる。

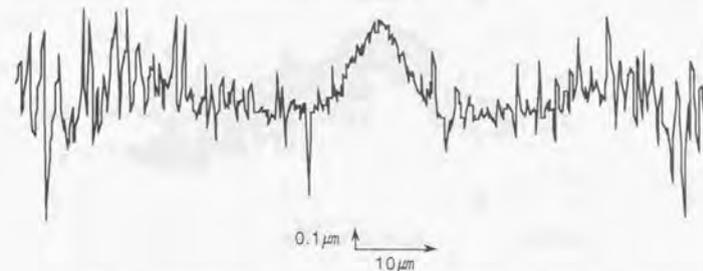


図4.40 図4.37の加工穴(工具回転あり)の底面円の直径に沿った断面プロファイル

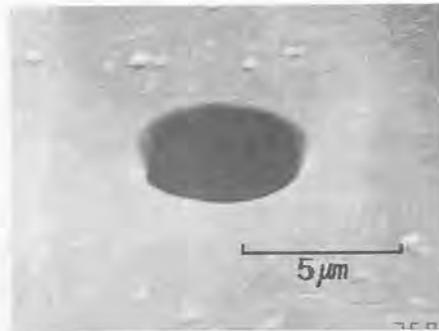
4.7 加工例

4.7.1 微細穴の加工

微細穴の加工には, 微小径の工具が必要である。その中でも直径 $5\mu\text{m}$ 以下のものとなると, 工具に用いることのできる材料は限られてくる。引き抜きで作られた線材は残留内部応力が大きく, 小径の工具に加工すると反りを生じやすい。焼結で作られた線材は原料が微粒子でないと小径工具に加工できず, また靱性の低いものが多いのでマイクロ超音波加工の小さな加工荷重にも耐えられない場合がある。したがって, かなり材料の選択の幅は限られてくる。これらを考慮して, 本節の微細穴の加工用の工具材料には, サブミクロン砥粒から作られた超硬合金(住友電工)を用いた。この材料はWEDG加工による小径工具への加工性が良く, また靱性もあるので, 超音波加工の加工荷重に耐えることができる。

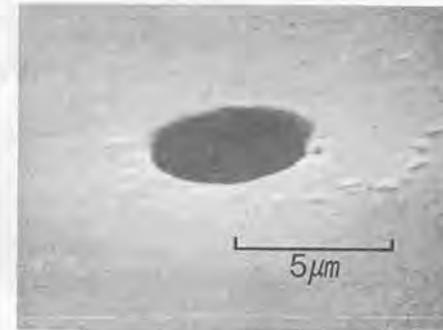
図4.41は、石英ガラスに加工した内径 $5\mu\text{m}$ の微細穴の加工例である。深さは $10\mu\text{m}$ 、加工時間は4min、用いた工具の直径は $4\mu\text{m}$ である。図4.42は、シリコンに加工した同じく内径 $5\mu\text{m}$ の微細穴の加工例である。深さは $6\mu\text{m}$ である。これらは、3.7.1で加工した微細穴よりさらに小さい内径を持ち、現在超音波加工の加工例としては最小の内径をもつものである。

これらの加工例より、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法では困難であった内径 $20\mu\text{m}$ 以下の微細穴の加工が可能となり、最小内径 $5\mu\text{m}$ まで可能であることが確かめられた。これ以上小さい内径の微細穴の加工のためには、より小径な微細工具を製作しなければならないが、本研究で用いた工具の直径は $4\mu\text{m}$ とWEDG加工の加工限界に近付いており、それ以外の加工法で工具を製作する必要がある。



深さ： $10\mu\text{m}$ 工具材料：超硬合金 工具径： $4\mu\text{m}$
加工荷重： $29 - 59\mu\text{N}$ 振動振幅： $0.4\mu\text{m}$ 砥粒材質：ダイヤモンド
砥粒径： $0.2\mu\text{m}$ 加工時間：4min

図4.41 石英ガラスに加工した内径 $5\mu\text{m}$ の微細穴



深さ： $6\mu\text{m}$ 工具材料：超硬合金 工具径： $4\mu\text{m}$
加工荷重： $29 - 59\mu\text{N}$ 振動振幅： $0.25\mu\text{m}$ 砥粒材質：ダイヤモンド
砥粒径： $0.2\mu\text{m}$

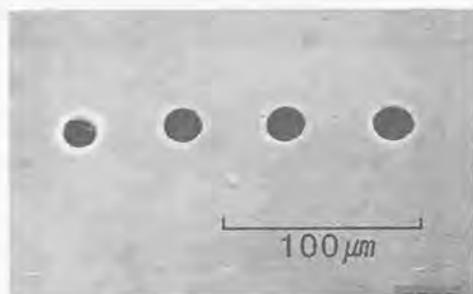
図4.42 シリコンに加工した内径 $5\mu\text{m}$ の微細穴

4.7.2 深穴の加工

深穴の加工には、長い工具を製作する必要があることはもちろん、工具摩耗が小さくなくてはならない。工具摩耗が大きいと、加工中に工具が短くなり、加工深さが小さくなるからである。そのため、工具材料にダイヤモンド焼結体を用いて深穴の加工を試みた。

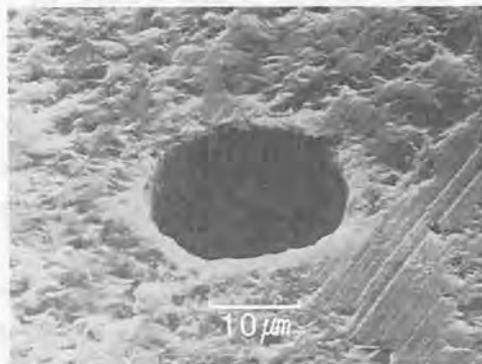
図4.43は、厚さ $150\mu\text{m}$ のソーダガラスに対して、内径 $21\mu\text{m}$ の貫通穴の連続加工を行った例である。超硬合金工具の場合、この内径では5以上のアスペクト比を得るのは困難であり、深穴加工の場合では穴を一つ加工すると工具が短くなるので製作し直す必要があった。図の例では7以上のアスペクト比をもつ複数の穴を、同一工具で加工している。

図4.44は、SiCに対して、内径 $23\mu\text{m}$ 、深さ $110\mu\text{m}$ の深穴の加工を行った例で



加工穴径：21 μm 工具材料：ダイヤモンド焼結体
 工具径：18 μm 加工荷重：0.5 - 1 mN 振動振幅：0.6 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.5 μm 加工時間：20min (平均)

図4.43 厚さ150 μm のソーダガラスへの貫通深穴の連続加工



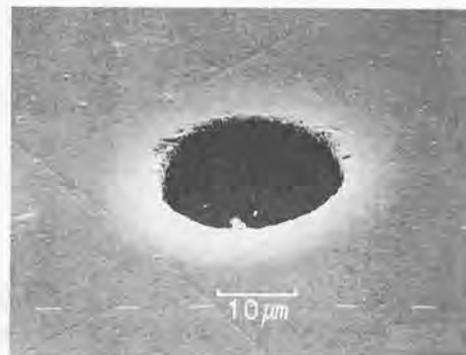
深さ：110 μm 工具材料：ダイヤモンド焼結体
 工具径：18 μm 加工荷重：0.5 - 1 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm 加工時間：24min

図4.44 SiCに加工した内径23 μm の深穴

ある。セラミックスの加工の場合は工具摩耗率が大きく深穴の加工は困難であるが、ダイヤモンド焼結体を工具材料に用いることによりその問題を解決できた。

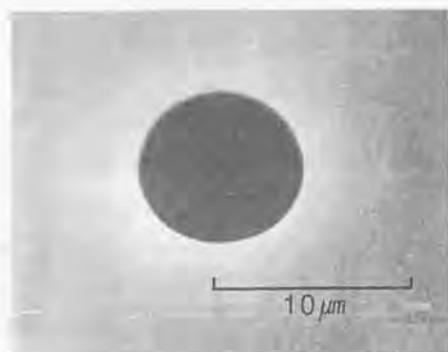
図4.45は、アクリルに対して同じく内径23 μm 、深さ110 μm の深穴の加工を行った例である。アクリルのようなプラスチックに対しても加工が行えることがわかる。アクリルの加工の場合、粒径の中間値が0.2 μm のダイヤモンド砥粒では加工が進行しなかったため、この加工においては中間値が0.6 μm のものを用いた。

なお、4.5.10で述べたように、ダイヤモンド焼結体は直径15 μm より小さくなると急に脆くなる傾向があるので、それ以上小さい内径の深穴の加工はできない。そのため、その加工寸法では超硬合金工具を用いて加工を行う。図4.46は、超硬合金工具を用いシリコンに加工した微細深穴の加工例を示す。その



深さ：110 μm 工具材料：ダイヤモンド焼結体
 工具径：18 μm 加工荷重：1 - 2 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.6 μm 加工時間：6 min

図4.45 アクリルに加工した内径23 μm の深穴



深さ：37 μm 工具材料：超硬合金 工具径：7.5 μm
 加工荷重：0.1 - 0.2 mN 振動振幅：0.6 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm 加工時間：21min

図4.46 シリコンに加工した内径9 μm の深穴

内径は9 μm 、深さは37 μm である。工具送り量150 μm に対して工具摩耗113 μm と大きかったが、内径10 μm 以下の微細穴で、4以上のアスペクト比を達成することができた。

4.7.3 多数穴の加工

多数穴の加工の場合も、加工の効率を考慮すると工具交換・製作の頻度を少なくするために工具摩耗の小さい条件が望ましい。工具摩耗が小さければ、工具寿命が長くなり、同一工具で多数の穴の加工ができる。そこで、工具材料としてダイヤモンド焼結体を用いて加工を行った。

図4.47は、シリコンに対する、同一工具による多数穴の連続加工の例である。穴の内径は平均で22 μm 、深さは10 μm である。一つの穴あたりの加工時間は



加工穴径：22 μm 深さ：10 μm 工具材料：ダイヤモンド焼結体
 工具径：20 μm 加工荷重：0.5 - 1mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm 加工時間：2.6 min (平均)

図4.47 シリコンに対する同一工具による連続多数穴加工

2.6minであった。総計の加工深さ480 μm に対し、工具摩耗は4 μm とわずかで、この加工例においてもダイヤモンド焼結体の有用性が確認された。

4.7.4 溝の加工

本加工法でも溝の加工を試みた。本実験では、3.7.3の工具送りアルゴリズムとは異なる方法を用いた。そのフローチャートを図4.48に示す。

工具は水平方向(X方向)に送られて溝となる部分を走査するが、本方法ではX方向に工具が送られるたびに測定された加工荷重と設定荷重レンジを比較する。測定荷重が設定荷重レンジ内かまたは上回ったときにX方向への送りを止め、測定荷重が設定荷重レンジ以下になるまで待つ。設定荷重レンジ以下になったら、X方向への送りを再開する。工具が溝の一端からもう一端へ到達す

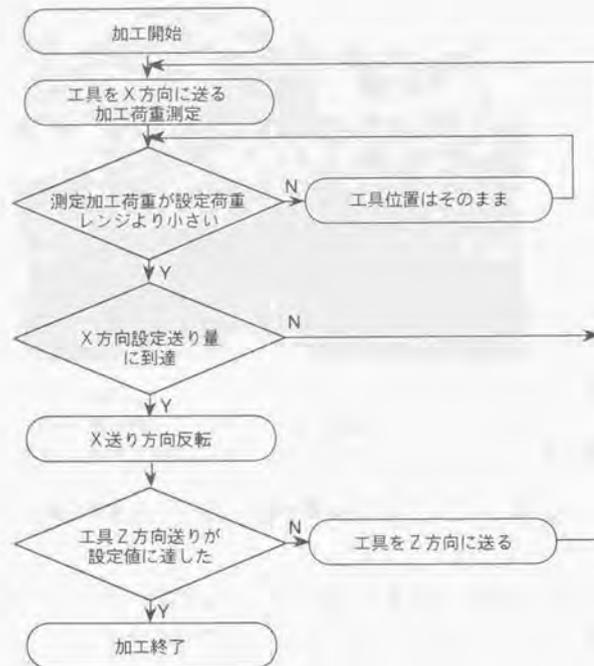


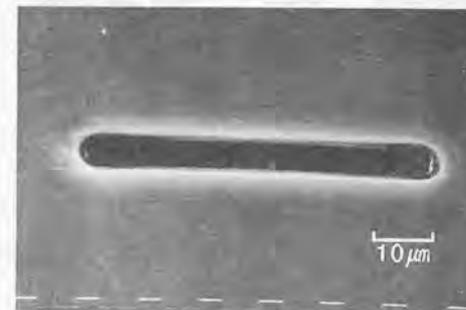
図4.48 溝加工の工具制御方法

ると、X送り方向を切り替える。このとき、Z方向へも送る。そのZ方向送り量は $0.05\mu\text{m}$ である。本方法は、3.7.3で用いたものに比較して高速な加工が行える。3.7.3の手法では、同じ工具Z位置でのX方向送り走査中に、一部分でも設定荷重レンジより小さくない加工荷重を検出する部分（山の部分）があると、そのZ位置は再び溝の一端からもう一端まで工具をX方向に走査し直さなくてはならないが、本手法では山の部分を集中的に加工することができ、無駄なX方向走査がなくなるからである。

図4.49に、ソーダガラスに加工した幅 $7.7\mu\text{m}$ 、長さ $56\mu\text{m}$ 、深さ $18\mu\text{m}$ の溝の加工例を示す。これは、超音波加工で加工されたものとしては、最小の幅を持つ溝加工例である。

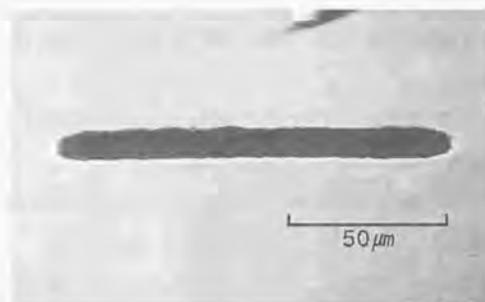
図4.50は、石英ガラスに加工した幅 $21.5\mu\text{m}$ 、長さ $120\mu\text{m}$ 、深さ $95\mu\text{m}$ の深溝の例である。この例では、5近いアスペクト比を達成している。溝の場合でも、工具にダイヤモンド焼結体を用いることによりアスペクト比の高い形状が加工できることが確認された。

図4.51は、アルミナに加工した幅 $24\mu\text{m}$ 、長さ $125\mu\text{m}$ 、深さ $42\mu\text{m}$ の溝の例である。この加工例では、加工中に工具が折れたために、工具摩耗長さから溝の深さを求めることができなかった。そのため、レーザー走査顕微鏡により3次元形状を測定し、深さを求めた。



工具材料：超硬合金 工具径： $7\mu\text{m}$
 加工荷重： $0.2-0.4\text{ mN}$ 振動振幅： $0.8\mu\text{m}$ 砥粒材質：シリカ
 砥粒径： $0.5\mu\text{m}$ 加工時間： 55 min

図4.49 ソーダガラスに加工した幅 $7.7\mu\text{m}$ 、長さ $56\mu\text{m}$ 、深さ $18\mu\text{m}$ の溝



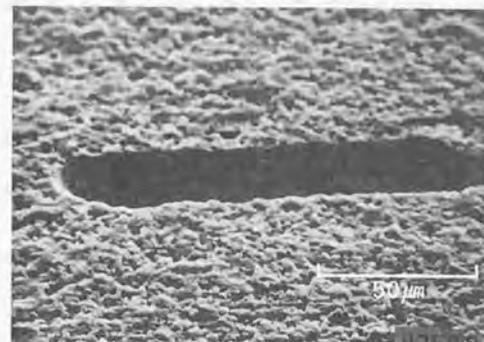
工具材料：ダイヤモンド焼結体 工具径：19 μm
 加工荷重：0.5 - 1 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm 加工時間：100 min

図4.50 石英ガラスに加工した幅21.5 μm、長さ120 μm、深さ95 μmの深溝

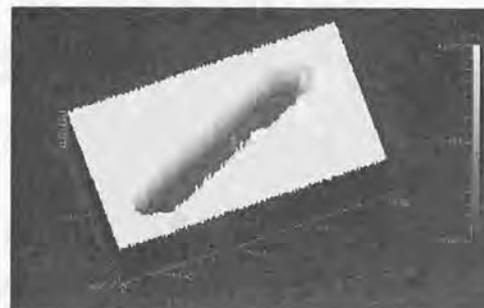
4.8 まとめ

第3章で述べた加工機上工具製作によるマイクロ超音波加工により、内径20 μmまでの微細穴の加工が可能になった。放電加工では直径5 μm以下のマイクロ工具の製作ができるので、それを用いればより微細な寸法でのマイクロ超音波加工が行えるはずであるが、工具のスピンドルシステムの回転精度が低く、また放電加工の加工液循環方式が微細放電加工に不向きな方式であり、内径20 μm以下の微細穴の加工が行えるマイクロ工具の製作が不可能であった。

そこで、それらの問題を解決するために工作物加振方式のマイクロ超音波加工法を新たに開発した。本方式では工具を加振する必要がないので、工具を超音波振動子・コーン・ホーンのユニットに接続しなければならないという制約がなくなった。これにより高い回転精度を持つスピンドルシステムを採用する



(a) SEM写真



(b) レーザ走査顕微鏡による三次元形状測定

工具材料：ダイヤモンド焼結体 工具径：19 μm
 加工荷重：0.5 - 1 mN 振動振幅：1 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm 加工時間：140 min

(c) 加工条件

図4.51 アルミナに加工した幅24 μm、長さ125 μm、深さ42 μmの溝

ことができた。そのシステムとして、微細放電加工機に用いられているものを採用して超音波加工装置を試作した。このシステムは主にV形軸受とマンドレルとで構成されており、工具材料を保持したマンドレルを軸受から一度はずして再び取り付けても回転の精度が保たれるという利点がある。工具を微細放電加工機上で製作し、超音波加工装置の軸受に取り付けることにより、より微細なマイクロ工具を超音波加工で用いることができるようになった。

次に加工実験を行い、今までに報告例のない工具加振方式の超音波加工と、第3章で求めることのできなかつたより微細な加工寸法でのマイクロ超音波加工との加工特性を求めるために、各加工パラメータと加工速度・工具摩耗率との関係、加工精度について調べ、以下の結果を得た。

(a) 振動振幅・加工荷重が増加すると加工速度も上昇するが、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工と比較して、加工速度の上昇の割合に対する工具摩耗率の増加の割合は小さかった。これは、工作物加振によるスラリーの攪拌作用やキャビテーション作用などが加工屑の排出やスラリー循環を促進し、工具摩耗率の増加を抑えているためと考えられた。

(b) 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工の場合と異なり、加工速度・工具摩耗率において工具回転の有無の影響ははっきり表れなかった。これは、高回転精度のスピンドルシステムの採用により、工具の回転振れがきわめて小さく、工具を回転させることによるクリアランスの増加がほとんどなく、加工速度・工具摩耗率に与える影響が小さいためと考えられた。さらに、スラリーが加振されているのですでに攪拌作用が働いており、工具回転による攪拌作用の効果の増加の影響が少ないことも考えられた。

(c) 工作物材質・工具材質・砥粒材質が異なると、それぞれ加工速度・工具摩耗率も異なる。本実験で使用した材質の中では、ソーダガラス・超硬合金・WCがそれぞれ加工速度を大きく、工具摩耗率を小さくできる材質であった。

(d) 砥粒径が大きくなると加工速度が上昇するが、工具摩耗率は減少する。これは、クリアランスの増加によるものと考えられた。

(e) 工具径が小さくなると、工具摩耗率が上昇し、摩耗長さが加工深さ以上になるほどの大きい工具摩耗率を示す。この大きい工具摩耗率のため、加工速度は低下した。

(f) 工具長さが大きくなると加工速度・工具摩耗率ともに低下する。工具が長くなると回転振れが大きくなり加工体積が増加することや、工具のたわみが大きくなることにより加工速度が低下するものと考えられた。工具摩耗率の低下はクリアランスの増加によるものと考えられるが、その低下の割合は小さい。

(g) 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工と比較して、加工深さが大きくなっても、工具摩耗率の上昇の割合は小さく、加工速度も低下しなかった。これも、(a)と同じく工作物加振による効果であると言える。

(h) 工具摩耗率を小さく抑えるために、工具材料としてダイヤモンド焼結体を用いることが非常に有効であることがわかった。工具寿命の大幅な伸長、より深い穴の加工、加工速度の上昇などが期待できる。一方、固定砥粒方式のマイクロ超音波加工は加工速度が小さく工具摩耗率が大きく、効率が悪いことがわかった。

(i) スピンドルシステムの回転精度が高く、回転振れも小さいので、加工穴の真円度は工具を回転させた場合で $0.05\mu\text{m}$ 、回転させない場合でも $0.3\mu\text{m}$ と良好で、また工具を回転させたときのクリアランス増加量も小さかった。工具と加工穴とのクリアランスは、およそ砥粒2層分であることがわかった。

(j) チッピングは、ソーダガラスやステンレス鋼ではほとんど発生しない。シリコンでは、工具を回転させると大きい加工荷重や振動振幅でもチッピングの発生を抑えることができた。

(k) 加工面の観察を行った結果、一般の超音波加工での加工面に見られるような脆性破壊による鋭いエッジや貝殻状の割れがみられず、波のような模様

みられることがわかった。加工面粗さは工具を回転させると向上し、加工穴の底面の中心部は周辺部と比較して良好であることが確かめられた。

次に、本加工法の応用可能性を求めるために、以下のような加工を実現した。

(a) 微細穴の加工においては、石英ガラスやシリコンに対し、超音波加工では初めて内径 $5\mu\text{m}$ までの加工が行えた。

(b) 耐摩耗性に特に優れたダイヤモンド焼結体を工具材料として用いることにより、工具寿命が大幅に伸び、より深い穴や溝の加工、同一工具による多数穴の加工などが可能となった。この結果、加工法としての有用性が非常に高まった。

第5章 マイクロ超音波加工の加工メカニズム

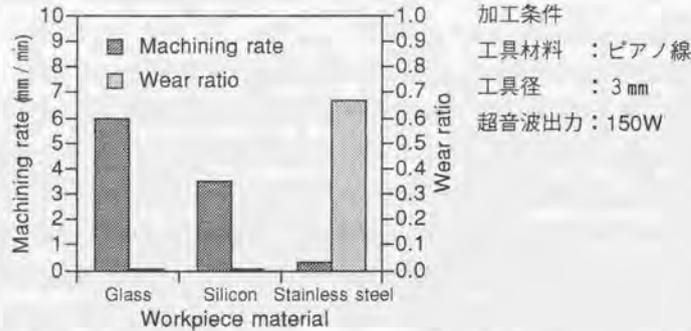
第3章、第4章において、マイクロ超音波加工の加工特性を調べた。その加工特性は、一般の超音波加工機による加工での特性と比較して、いくつか異なる特徴があった。例えば、超音波加工では脆性材料の加工速度は延性材料のそれより大きい。一般の超音波加工ではその差が十倍から数十倍であるのに対し、マイクロ超音波加工では数倍程度である。また、マイクロ超音波加工の加工面は、一般の超音波加工の加工面に見られる脆性破壊による割れが見られない。これらの特徴の相違の要因として、加工メカニズムの違いが考えられる。

マイクロ超音波加工は、一般の超音波加工と比較して、使用する砥粒の粒径や工具径、加工荷重、振動振幅などがきわめて小さいという特徴がある。これらが、一般の超音波加工とは何か異なる加工メカニズムが働く要因になっており、マイクロ超音波加工の特徴的な加工特性に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、本章ではマイクロ超音波加工の加工メカニズムについて考察し、その検証を行う。

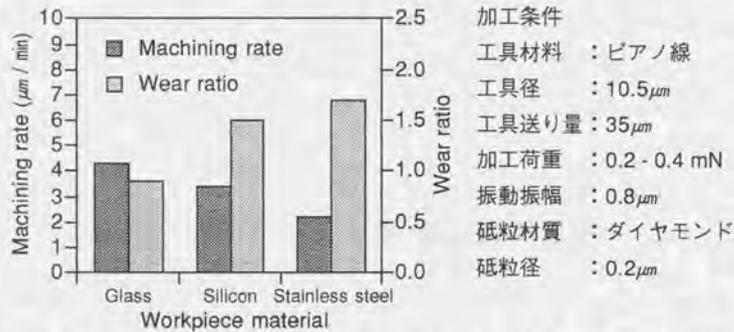
5.1 加工特性の特徴

(1) 加工速度・工具摩耗率

図5.1は、工具材料にピアノ線を用い、ソーダガラス、シリコンおよびステンレス鋼を加工した場合の、一般の超音波加工における加工速度・工具摩耗率と、マイクロ超音波加工における加工速度・工具摩耗率を比較したものである。一般の超音波加工のデータは、表2.1^[22]より、またマイクロ超音波加工のデータは図4.11から抜粋した。



(a) 一般の超音波加工における加工速度・工具摩耗率
(表 2. 1 より, 楡井 [22])



(b) マイクロ超音波加工における加工速度・工具摩耗率 (図 4. 11 より)

図 5. 1 一般の超音波加工およびマイクロ超音波加工における加工速度・工具摩耗率の比較

図より、一般の超音波加工では、脆性材料であるガラスやシリコンの加工速度は、延性材料のステンレス鋼に対して10倍から20倍であることがわかる。しかし、マイクロ超音波加工では、ガラスやシリコンの加工速度はステンレス鋼に対して大きい、その割合は2倍程度である。マイクロ超音波加工においては、脆性材料の加工速度は延性材料のそれより大きい、一般の超音波加工と比較すると、その差はかなり小さいことがわかる。

また、一般に超音波加工は脆性材料に比較して延性材料の加工速度がきわめて小さいので、工具を延性材料で製作し、脆性材料の工作物を加工することが行われる。したがって、図 (a) で示されるように、工具にピアノ線、工作物にガラスやシリコンを用いた場合、工具摩耗率は0.005前後であり、ステンレス鋼を加工した場合の工具摩耗率0.667と比較してきわめて小さい。しかし、図 (b) に示されるように、マイクロ超音波加工では、同じく工具材料にピアノ線、工作物にガラスやシリコンを用いた場合、工具摩耗率は1-1.5と大きいことがわかる。また、ステンレス鋼を加工した場合の工具摩耗率は1.7前後であり、これと比較しても、それほど小さい値ではない。これらの結果は、延性材料と脆性材料の加工速度の差があまり大きくないために、延性材料の工具と脆性材料の工作物との組み合わせでも工具摩耗率を低く抑えられないことが原因と考えられる。

また、3. 5. 7および4. 5. 12において、加工速度の理論値と実験値を比較した。その結果、一般の超音波加工では実験値は理論値より1桁オーダーが小さいが、マイクロ超音波加工では3桁もオーダーが小さいこともわかった。これは理論式が用いている仮定と大きく異なる要因があるためと考えられる。

(2) 加工面の状態

4. 6. 4において、一般の超音波加工の加工面と、マイクロ超音波加工の加工面を観察し比較した。その結果、脆性材料であるガラスに加工した場合、

一般の超音波加工では加工面に脆性破壊による貝殻状割れや鋭いエッジが観察されるが、マイクロ超音波加工の加工面ではそれらは確認されず、波のような模様が見られた。マイクロ超音波加工では、一般の超音波加工で考えられているような脆性破壊が起きてないように見える。

このようなマイクロ超音波加工における加工特性の特徴の理由は、一般の超音波加工とは異なる加工メカニズムに起因するものと思われる。マイクロ超音波加工が一般の超音波加工と大きく異なる点は、マイクロ超音波加工では小径な工具を用いるために、砥粒径が極めて小さく、また振動振幅も小さいことである（加工荷重も異なるが、加工圧力でみると大きな相違はない）。これらが異なる加工メカニズムの原因になっていると考えられ、それを次節において考察する。

5. 2 加工メカニズムの考察

5. 2. 1 加工メカニズムの推測

前節でマイクロ超音波加工の加工特性の特徴を検討し、一般の超音波加工と比較して次のような特徴があることがわかった。

- (a) 脆性材料と延性材料との加工速度の差が大きい
- (b) 工具摩耗率が大きく、脆性材料の加工の場合と、延性材料の加工の場合との差が小さい
- (c) 理論値と比較して、加工速度が非常に小さい
- (d) 加工面に、脆性破壊特有の鋭いエッジや貝殻状割れが見られない
- (e) 加工穴の底面に、波のような模様ができる

このような特徴は、マイクロ超音波加工特有の加工メカニズムに起因していると思われる、この考察には砥粒衝突による材料除去のメカニズムを考慮する必

要がある。

2. 2. 1で述べたように、超音波加工では、エロージョンの場合のような砥粒の自由衝突による除去の割合は小さい。しかし、工具によって砥粒が押されて工作物に衝突するのも、慣性によって砥粒が工作物に衝突するのも、衝突したあとの工作物除去メカニズムは同じである。そこで、2. 2. 2で述べたエロージョンの研究を参考にマイクロ超音波加工の加工メカニズムについて考察する。

2. 2. 2で述べたように、エロージョンにおいては、粒径9 μm 程度の小径の砥粒を用いた場合、脆性材料の除去量と延性材料の除去量とはおおよそ同じオーダーになり、また脆性材料でも延性材料と同じように砥粒の入射角度が小さいところで除去量が最大になることが確認されている。これは、粒径が小さくなると脆性材料でも脆性破壊がおきずに、延性モードで除去が行われているためと説明されている。この結果から、超音波加工で脆性材料を加工する場合でも、数 μm からサブミクロンの小さい粒径の砥粒を用いるマイクロ超音波加工では、一般の超音波加工のように脆性破壊が生じず、延性モードで加工が行われていると考えられる。

5. 2. 2 推測された加工メカニズムと加工特性との関係

マイクロ超音波加工においては、脆性材料に対しても延性モードで加工が行われているものと推測され、これにより、5. 2. 1で述べた、(a)から(e)のマイクロ超音波加工の特徴的な加工特性の説明が可能である。

脆性材料でも衝突した砥粒質量あたりの除去量の小さい延性モードで加工されるので、延性材料に比較して加工速度があまり大きくないことが説明できる。そのため、延性材料の工具を用いて脆性材料を加工しても両者に対する加工速度の差が大きいので、一般の超音波加工と比較して工具摩耗率が大きく、

また脆性材料の加工の場合と延性材料の加工の場合の工具摩耗率の差が大きくないことも説明できる。さらに、脆性破壊を前提としている理論式から算出される理論値と比較した場合、実際の加工速度が非常に小さいことも理由づけられる。また、加工面には鋭いエッジや貝殻状割れがみられず、波のような模様が見られるのは、加工が延性モードで行われ、脆性破壊が起らず、加工面が塑性変形を受け、塑性流動が起きたためと考えられる。

なお、図2.9 [17] に表されるように、砥粒径がさらに小さくなると工作物が弾性変形するのみで塑性変形も起らない。4.7.2の実験において、アクリルはガラスやシリコン、セラミックスなどの材料と異なり、粒径の中間値 $0.2\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒では加工が進まないことを述べたが、アクリルは弾性限界が大きいためこの粒径の砥粒では延性変形領域に達しないためと考えられる。

5.2.3 一般の超音波加工での延性モード加工

今まで、エロージョンの研究をもとに、マイクロ超音波加工の加工メカニズムを推測してきたが、2.2.2で述べた加工メカニズムの転移の要因の例としては、砥粒径の違いのみが挙げられていた。しかし、図2.9 [17] に示されるように、砥粒の粒径が大きくても、その衝突速度（超音波加工においては、加工荷重や振動振幅）が小さければ脆性破壊が起らず、延性モードで工作物が除去されると考えられる。そこで、脆性破壊による除去が中心である一般の超音波加工に近い条件で加工を行い、振動振幅を変化させた場合、加工メカニズムに起因する加工特性の相違が表れるかどうか確かめた。

加工装置プロトタイプAを用い、ダイヤモンド砥粒の粒径中間値 $40\sim 50\mu\text{m}$ のものを使用し、 $0.5\sim 1\text{N}$ の加工荷重を加えた。これらは、一般の超音波加工の加工条件の範囲である。工具振動振幅として、 $6.5\mu\text{m}$ と $0.8\mu\text{m}$ を

選び、穴加工を行い、加工面を比較した。

図5.2に、加工面の状態を示す。図(a)の振動振幅が $6.5\mu\text{m}$ の場合では、加工面に鋭いエッジが観察され、脆性破壊が生じていることがわかる。振動振幅が $6.5\mu\text{m}$ というのは一般の超音波加工においてはあまり大きくない値であるが、砥粒径および加工荷重が大きいため脆性破壊が生じた。一方、図(b)の振動振幅が $0.8\mu\text{m}$ の場合では、そのようなエッジは観察されなかった。砥粒径や加工荷重が大きくても、一般の超音波加工と比較してかなり振動振幅が小さいため、脆性破壊が生じずに延性モードで加工が進んだものと考えられる。

以上の結果から、一般の超音波加工でも、加工条件によっては延性モードで加工が行われるものが推測される。

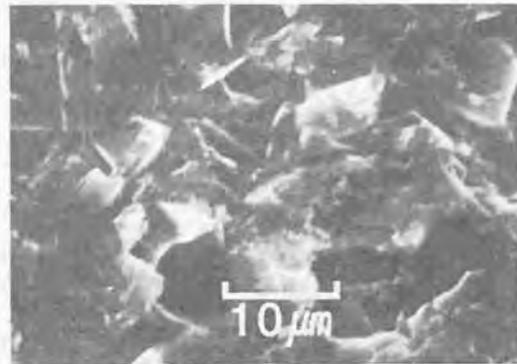
5.2.4 砥粒衝突の入射角度を変化させた場合

超音波加工では砥粒が垂直に入射するので、延性モード加工であるマイクロ超音波加工においても、工作物除去作用は切削作用より変形作用が大きく、加工穴の底面には塑性流動による模様が観察される。

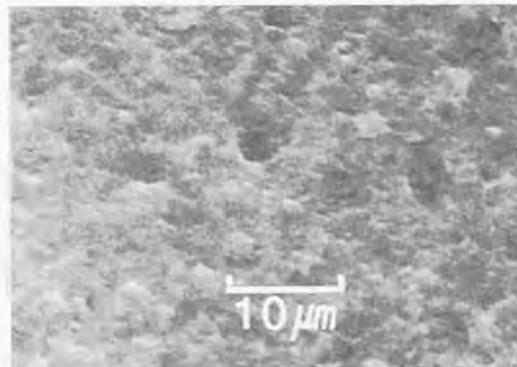
もし砥粒の工作物に対する入射角度を小さくとることができれば、切削作用が大きくなって研磨の働きが強くなり、加工面がなめらかになると考えられる。そこで、次のような実験を行った。

図5.3に、実験で用いた工具の形状を示す。円筒工具の先端を、軸方向と 45° で交わる斜面で切った形状である。これを用いて加工を行うと、加工面に対して砥粒は 45° の入射角度で衝突するので、切削作用が多く働くものと考えられる。斜面が摩耗しないように工具材料にはダイヤモンド焼結体を用い、加工した穴の斜面が観察しやすいように工具は回転させずに加工を行った。

はじめは工作物表面は工具の軸方向に垂直なので、砥粒は 90° で入射するが、工具が徐々に送り込まれて加工穴に斜面が形成され始めると、その面に対する



(a) 工具振動振幅 $6.5\mu\text{m}$



(b) 工具振動振幅 $0.8\mu\text{m}$

工具材料：ピアノ線 工具径： $500\mu\text{m}$ 工具回転：なし
 加工荷重： $0.5 - 1\text{N}$ 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径： $40 - 50\mu\text{m}$

(c) 加工条件

図5.2 一般の超音波加工に近い加工条件で工具振動振幅を変化させた場合の石英ガラスの加工面の違い

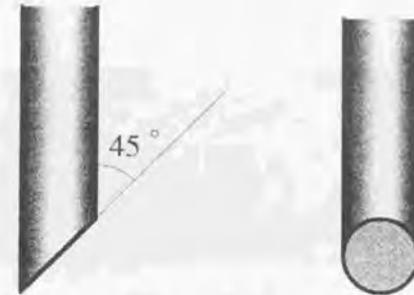


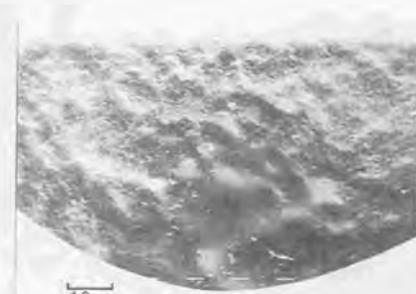
図5.3 先端を軸方向に 45° の角度をもつ斜面で切った工具

砥粒の入射角度は 45° に近づいていく。

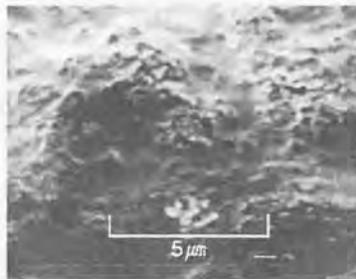
図5.4 (a)は、加工した穴の斜面部分、図(b)は斜面の入り口部分の拡大図、図(c)は中腹部分の拡大図を表す。工具を回転させないので加工面のうねりは大きい。

図(b)においては砥粒が 90° に近い角度で入射しているため、砥粒衝突による変形作用により表面は荒れているが、図(c)においては、そのような荒れや図4.37や図4.38で示された塑性流動による模様も観察されず、非常になめらかに研磨されていることがわかる。この結果は、砥粒が 45° の入射角度で衝突し、切削作用を起こし、研磨作用が大きく働いたためと思われる。

以上の結果から、マイクロ超音波加工でも砥粒の入射角度を小さくとることができれば、工作物除去における研磨作用の割合が大きくなり、加工面が非常になめらかになることが確認された。



(a) 加工穴の斜面



(b) 斜面の入り口部分拡大図



(c) 斜面の中腹部分拡大図

工作物：石英ガラス 工具材質：ダイヤモンド焼結体
 加工荷重：10 - 20 mN 振動振幅：0.8 μm
 砥粒材質：ダイヤモンド 砥粒径：0.2 μm
 (d) 加工条件

図5.4 図5.3に示された形状の工具による加工穴

5.2.5 工具回転の効果

2.2.2で述べたように、砥粒衝突による延性的な材料除去には変形作用と切削作用がある。超音波加工は砥粒が工作物表面に対して垂直に衝突するので変形作用が中心と考えられるが、マイクロ超音波加工においては工具を回転させて加工が行えるので、その影響で切削作用が生じる可能性もある。

図5.5 [37]は、一般の超音波加工で、工作物を回転させて加工した場合の加工面の状態である。回転方向にスクラッチが存在し、砥粒による切削作用が働いていることが確認できる。

しかし、図4.37や図4.38にみられるように、マイクロ超音波加工による加工穴の底面にはそのような切削痕はみられず、工具回転により生じる砥粒による切削の影響ははっきり表れていない。そこで、マイクロ超音波加工での砥粒による切削作用(研磨作用)を確かめるために、これらの穴を加工したときの加工条件とはほぼ同じ条件下で、工作物を加振させずに加工を行った。

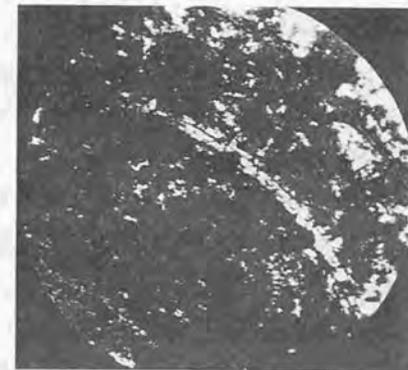


図5.5 一般の超音波加工機により工作物を回転させて加工したときの加工面 (Komaraiahら [37])

その結果、工具は加工時間10minでわずかに $0.4\mu\text{m}$ しか送りこまれず、加工量はきわめて少なかった。図5.6は加工した工作物表面を示す。加工量は少ないが、加工面には回転方向に砥粒による切削痕が存在し、切削作用が働いていることが確認された。

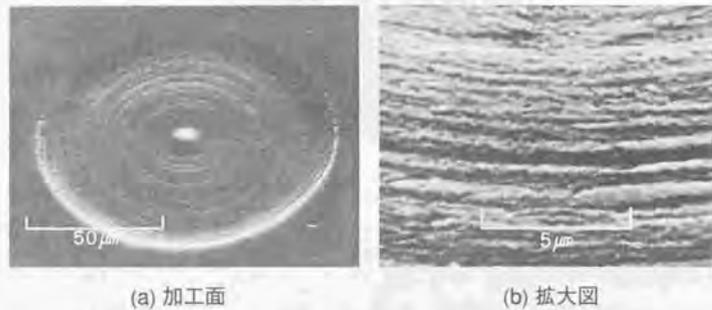


図5.6 工作物を加振させずに加工を行った場合の加工面

次に、同じ条件下で、工作物を加振させ、工具を回転させた場合とさせない場合とで加工を行った。図5.7はその加工の進行状態を示している。ダイヤモンド焼結体を工具材料に用いており工具摩耗が少ないので、工具送り量は加工深さにほぼ等しい。図5.6の加工例の場合と比較すると、工作物を加振しない場合は加工時間10minでわずかに $0.4\mu\text{m}$ しか送りこまれなかったのに対し、加振した場合はおよそ $100\mu\text{m}$ 送り込まれている。また、工具を回転させた場合はほぼ一定の速度で工具が送り込まれているのに対し、回転させない場合は送り速度（加工速度）が徐々に小さくなっていくことがわかる。

これらの結果から、工具回転が砥粒の切削作用を起こすが、その材料除去量はわずかで、除去量の大部分は工具の打ち込みによる砥粒衝突が起こす変形作用によるものと思われる。このことは、図4.13において、工具を回転させた

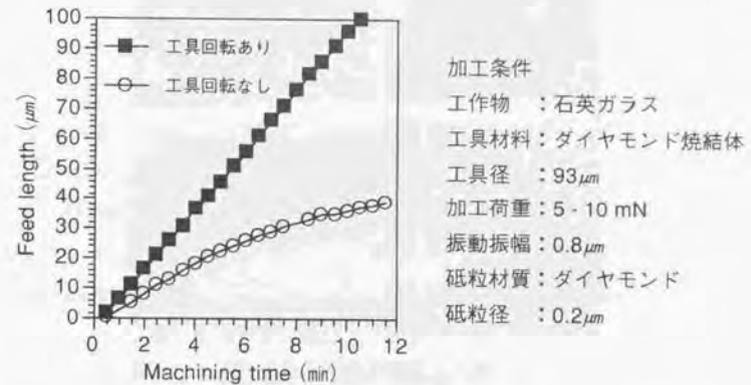


図5.7 加工進行状態

場合とさせない場合との加工速度に差がないことから確かめられる。一方、図5.7の結果では加工速度に明らかな差がある。これは、図5.7の加工条件では工具径と砥粒径の差が大きく、加工中に砥粒の加工面での分布が偏り、工具表面が均一な平面でない形状になり、加工が加工面で等しく行われなくなることによって原因があると考えられる。これは、図4.37において工具を回転させない場合の加工底面のうねりが大きいことから推測できる。工具を回転させると、これらの偏りや不均一がなくなり、加工面で等しく加工が進み、加工速度が大きくなり、また加工が進むにつれて加工速度が小さくなることを抑える効果を与えていると考えられる。

加工穴の側面においては、砥粒が垂直方向には衝突しないので、切削作用が多く働き、表面が研磨されると考えられる。図4.37からもわかるように、穴の側面は底面に比べてなめらかである。また、加工に使用した後の工具の表面を観察することによってもそれが確かめられる。図5.8に、加工に使用した

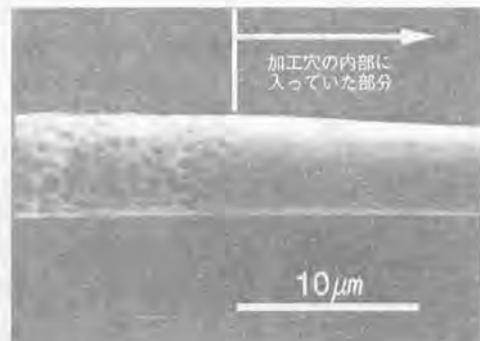


図5.8 加工に使用した後のタングステン工具

後のタングステン工具の側面を示す。工具の左半分は穴の内部に入っていない部分であり、WEDG加工による放電痕が残っている。右半分の内部に入っていた部分は砥粒で研磨されてなめらかになっていることがわかる。

以上から、工具回転による効果は次のようにまとめられる。

- (a) 研磨作用を起こすが、それによる工作物除去量はわずかである。
- (b) 砥粒が偏在しないようにし、工具の加工面を均一な平面にする。その結果、工具径が砥粒径よりかなり大きい場合でも、加工面のうねりを防ぎ、加工速度の低下を防ぐ。
- (c) 加工穴の側面や工具の側面に与える切削作用は顕著であり、表面は研磨される。

5.3 まとめ

本章では、マイクロ超音波加工における加工メカニズムを考察した。超音波加工の加工メカニズムは脆性破壊に基づくものと考えられているが、マイクロ超音波加工における加工特性は、一般の超音波加工の加工特性とは次のような異なる点があった。

- (a) 脆性材料と延性材料との加工速度の差が大きい
- (b) 工具摩耗率が大きい
- (c) 理論値と比較して、加工速度が非常に小さい
- (d) 加工面に、脆性破壊特有の鋭いエッジや貝殻割れがみられない
- (e) 加工穴の底面に、波のような模様ができる

これらの理由を加工メカニズムの違いに求めた。加工メカニズムを推測するには工作物への砥粒衝突による除去メカニズムから考察する必要があるが、超音波加工ではこれに関する研究は少なく、同じ砥粒衝突による工作物除去現象であるエロージョンにおける研究から考察した。砥粒径や砥粒の衝突速度が小さくなると、脆性材料に対しても延性モードで除去が行われることがわかっており、微粒な砥粒と微小な振動振幅で加工を行うマイクロ超音波加工においても、加工は延性モードで行われていると考えられた。

その結果、上述の(a)から(e)のマイクロ超音波加工に特徴的な加工特性の理由が説明できるようになった。脆性材料でも衝突した砥粒質量あたりの除去量の小さい延性モードで加工されるので、延性材料に比較して加工速度があまり大きくないことが説明できる。そのため、延性材料の工具を用いて脆性材料を加工しても両者に対する加工速度の差が大きいので、一般の超音波加工と比較して工具摩耗率が大きく、また脆性材料の加工の場合と延性材料の加工の場合の工具摩耗率の差が大きいことも説明できる。さらに、脆性破壊を前提としている理論式から算出される理論値と比較した場合、実際の加工

速度が非常に小さいことも理由づけられる。また、加工面には鋭いエッジや貝殻状割れがみられず、波のような模様が見られるのは、加工が延性モードで行われ、脆性破壊が起こらず、加工面が塑性変形をうけ、塑性流動が起きたためと考えられた。

次に、一般の超音波加工に近い条件で加工を行い、加工面に脆性破壊が生じることを確かめた。そして同じ条件で工具の振動振幅を小さくして加工を行うと、加工面には脆性破壊が起きた痕は認められなかった。これにより、一般の超音波加工の条件でも振動振幅を小さくとれば、脆性破壊が起こらずに加工が進むと推測された。

また、端面が斜面になっている工具を用いて加工を行った結果、砥粒が工作物に低い角度で衝突するようになり、研磨作用が大きくなることも確かめられた。

工具回転の効果についても考察した。加工面の観察や、工具および工作物を加振をせずに加工を行った実験結果より、工具回転による砥粒の切削作用による除去量は小さいことが分かった。加工穴の側面や工具の側面には切削作用が多く働き、表面が研磨されてなめらかになることが確認された。

第6章 結論と展望

6.1 結論

超音波加工は、硬脆材料へ立体的形状の機械的加工が可能な数少ない加工法の一つであるが、微細穴の加工の場合、内径100 μm 程度が実用上は限界とされてきた。本研究では、それより一桁から二桁オーダの小さい加工寸法での超音波加工を行うために、マイクロ超音波加工法の開発を目的とした。

加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法

(1) 加工法について

従来の超音波加工において加工寸法の下限を制限していたものは、マイクロ工具の加工機へ適切な取り付けが困難なことであった。そのため、第1のマイクロ超音波加工法として、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法を考案、一般の超音波加工機にWEDG加工用ユニットと工具回転機構とを備えた加工装置を試作した。これは、マイクロ工具の取り付けが困難ならば、加工機上でマイクロ工具を製作しようというコンセプトに基づいている。

この加工装置に工具材料を取り付け、WEDG加工によりマイクロ工具に製作することにより、超音波加工機上に、偏心や傾きがなくマイクロ工具が取り付けられている状態になる。そしてその工具を用いて超音波加工を行う。そして、次のような結果が得られた。

(2) 加工特性

今までに報告例がない、マイクロ超音波加工での加工特性を求めた。加工速度・

工具摩耗率・加工精度と各加工パラメータとの関係を調べ、以下のことが明らかになった

(a) 加工荷重・工具振動振幅(小振幅の場合)・砥粒濃度が増加するにつれ、加工速度・工具摩耗率ともに上昇する。これらが増加すると、一回の工具の工作物への打ち込みによる除去量が大きくなるので、加工速度が上昇する。また、その上昇に伴う加工屑の増加に排出作用が追いつかず、工作物への砥粒打ち込み作用が弱められ、工作物に対する除去量の増加が工具に対する除去量の増加より小さくなり、そのために工具摩耗率も上昇したものと考えられる。

工具振動振幅が大きい場合は、加工速度が増加しながら工具摩耗率が若干低下した。工具がスラリーを攪拌し、砥粒の循環や加工屑の排出を促進したためと考えられる。

(b) 工具に回転を与えると、工具摩耗率が上昇することなく加工速度が上昇する。これは、回転する工具がクリアランスを大きくし、さらにスラリーを攪拌するので、砥粒の循環や加工屑の排出を促進したためと考えられる。

(c) 工具径が小さくなると、加工速度・工具摩耗率ともに上昇する。クリアランスが大きくなることによるスラリーの循環作用などの向上により加工速度は上昇するが、工具体積に対する工具周囲の面積の比が大きくなり、工具周囲からの摩耗作用が増大し、結果的に長手方向の工具摩耗も増加するものと考えられる。

(d) 加工穴が深くなると、砥粒の循環や加工屑の排出が難しくなるため、工具摩耗率が急激に上昇し、加工はほとんど進まなくなる。

(e) 工具の回転振れが大きく、さらに回転角度による回転振れ量が一定でないので、製作された工具断面の真円度が $2.5\mu\text{m}$ と大きく、また工具を回転させるとクリアランスもかなり大きくなり、より小さい微細穴の加工には不利である。

(f) 微粒な砥粒を用い、工具を回転させるとチッピングを抑えることができ

る。砥粒が微粒になると加工単位が小さくなり、また工具を回転させると研磨作用が働くためと考えられる。

(3) 加工応用例

次に、本加工法の応用可能性を求めめるために、以下のような加工を行った。

(a) 内径 $20\mu\text{m}$ の微細穴まで加工が可能であることが確かめられた。これは、この時点では、超音波加工で加工されたものとしては最小の内径をもつ微細穴であった。

(b) $20 \times 21\mu\text{m}$ の角穴、一辺 $50\mu\text{m}$ の三角穴などの異形穴の加工も可能であった。

(c) 工具を水平方向に往復走査しながら加工を行うことにより溝の加工が行えた。穴や溝を組み合わせることにより、より複雑な形状をもつマイクロタービンのチャンパーのような加工も行えた。

工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法

(1) 加工法について

前述のように、加工機上工具方式によるマイクロ超音波加工法は一通りの成果を収めたが、原理的にはさらに微細な加工寸法でのマイクロ超音波加工が行えるものと考えられた。それを阻んでいたものは、加工装置の工具の回転振れが大きいことと、WEDG加工における加工液循環方式とであった。回転振れが大きいと製作できるマイクロ工具の径の下限が大きくなる。また、WEDG加工は加工液非循環方式の方が加工精度が高い。そのため、第2のマイクロ超音波加工法として、工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法を考案、加工装置を試作した。

この方式は、今までの工具を加振する超音波加工とは異なり、工作物を加振

するものである。これにより、工具側は、振動子・コーン・ホーンを組み込まなければならないという制約がなくなるので、自由な設計が可能になった。そして、工具システムとして、WEDG加工機能と加工槽をもつ微細放電加工機に使用されているものと同タイプのもので選別した。このシステムは回転精度が高いので回転振れが小さく、工具材料を保持したマンドレルを軸受から取り外すことができ、再び取り付けても回転精度が保たれる。微細放電加工機は加工液非循環方式であるので直径 $5\mu\text{m}$ 以下のマイクロ工具が製作できる。微細放電加工機でWEDG加工によりマイクロ工具を製作し、マンドレルで保持したままマイクロ超音波加工装置に取り付けることにより、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工法より微細なマイクロ工具を用いて超音波加工が行えるようになり、次の結果が得られた。

(2) 加工特性

加工機上工具製作方式のマイクロ超音波加工では不可能であった、内径 $10\mu\text{m}$ 程度の微細穴の加工を行い、その加工特性を求めた。加工速度・工具摩耗率・加工精度と各加工パラメータとの関係を調べ、以下のことが明らかになった。

(a) 振動振幅・加工荷重が増加すると加工速度も上昇するが、加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工と比較して、加工速度の上昇の割合に対する工具摩耗率の増加の割合は小さかった。これは、工作物加振によるスラリーの攪拌作用やキャビテーション作用などが加工屑の排出やスラリー循環を促進し、工具摩耗率の増加を抑えているためと考えられた。

(b) 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工の場合と異なり、加工速度・工具摩耗率において工具回転の有無の影響ははっきり表れなかった。これは、高回転精度のスピンシステムを採用により、工具の回転振れがきわめて小さく、工具を回転させることによるクリアランスの増加がほとんどなく、加工速度・工具摩耗率に与える影響が小さいためと考えられた。さらに、スラ

リーが加振されているのですでに攪拌作用が働いており、工具回転による攪拌作用の効果の増加の影響が少ないことも考えられた。

(c) 工作物材質・工具材質・砥粒材質が異なると、それぞれ加工速度・工具摩耗率も異なる。本実験で使用した材質の中では、ソーダガラス・超硬合金・WCがそれぞれ加工速度を大きく、工具摩耗率を小さくできる材質であった。

(d) 砥粒径が大きくなると加工速度が上昇するが、工具摩耗率は減少する。これは、クリアランスの増加によるものと考えられた。

(e) 工具径が小さくなると、工具摩耗率が上昇し、摩耗長さが加工深さ以上になるほどの大きい工具摩耗率を示す。この大きい工具摩耗率のため、加工速度は低下した。

(f) 工具長さが大きくなると加工速度・工具摩耗率ともに低下する。工具が長くなると回転振れが大きくなり加工体積が増加することや、工具のたわみが大きくなることにより加工速度が低下するものと考えられた。工具摩耗率の低下はクリアランスの増加によるものと考えられるが、その低下の割合は小さい。

(g) 加工機上工具製作方式によるマイクロ超音波加工と比較して、加工深さが大きくなっても、工具摩耗率の上昇の割合は小さく、加工速度も低下しなかった。これも、(a)と同じく工作物加振による効果であると言える。

(h) 工具摩耗率を小さく抑えるために、工具材料としてダイヤモンド焼結体を用いることが非常に有効であることがわかった。工具寿命の大幅な伸長、より深い穴の加工、加工速度の上昇などが期待できる。一方、固定砥粒方式のマイクロ超音波加工は加工速度が小さく工具摩耗率が大きく、効率が悪いことがわかった。

(i) スピンシステムの高回転精度が高く、回転振れも小さいので、加工穴の真円度は工具を回転させた場合で $0.05\mu\text{m}$ 、回転させない場合でも $0.3\mu\text{m}$ と良好で、また工具を回転させたときのクリアランス増加量も小さかった。工具と加工穴とのクリアランスは、およそ砥粒2層分であることがわかった。

(j) チッピングは、ソーダガラスやステンレス鋼ではほとんど発生しない。シリコンでは、工具を回転させると大きい加工荷重や振動振幅でもチッピングの発生を抑えることができた。

(k) 加工面の観察を行った結果、一般の超音波加工での加工面に見られるような脆性破壊による鋭いエッジや貝殻状の割れがみられず、波のような模様が見られることがわかった。加工面粗さは工具を回転させると向上し、加工穴の底面の中心部は周辺部と比較して良好であることが確かめられた。

(3) 加工応用例

次に、本加工法の応用可能性を求めするために、以下のような加工を実現した。

(a) 微細穴の加工においては、石英ガラスやシリコンに対し、超音波加工では初めて内径 $5\mu\text{m}$ までの加工が行えた。

(b) 耐摩耗性に特に優れたダイヤモンド焼結体を工具材料として用いることにより、工具寿命が大幅に伸び、より深い穴や溝の加工、同一工具による多数穴の加工などが可能となった。この結果、加工法としての有用性が非常に高まった。

マイクロ超音波加工の加工メカニズムの考察

最後に、マイクロ超音波加工の加工メカニズムについて考察した。超音波加工の加工メカニズムは脆性破壊に基づくものと考えられているが、マイクロ超音波加工における加工特性は、一般の超音波加工の加工特性とは次のような異なる点があった。

- (a) 脆性材料と延性材料との加工速度の差が大きい
- (b) 工具摩耗率が大きい
- (c) 理論値と比較して、加工速度が非常に小さい

(d) 加工面に、脆性破壊特有の鋭いエッジや貝殻状割れがみられない

(e) 加工穴の底面に、波のような模様ができる

これらの理由を加工メカニズムの違いに求めた。加工メカニズムを推測するには工作物への砥粒衝突による除去メカニズムから考察する必要があるが、超音波加工ではこれに関する研究は少なく、同じ砥粒衝突による工作物除去現象であるエロージョンにおける研究から考察した。砥粒径や砥粒の衝突速度が小さくなると、脆性材料に対しても延性モードで除去が行われることがわかっており、微粒な砥粒と微小な振動振幅で加工を行うマイクロ超音波加工においても、加工は延性モードで行われていると考えられた。

その結果、上述の(a)から(e)のマイクロ超音波加工に特徴的な加工特性の理由が説明できるようになった。脆性材料でも衝突した砥粒質量あたりの除去量の小さい延性モードで加工されるので、延性材料と比較して加工速度があまり大きくないことが説明できる。そのため、延性材料の工具を用いて脆性材料を加工しても両者に対する加工速度の差が大きくないので、一般の超音波加工と比較して工具摩耗率が大きく、また脆性材料の加工の場合と延性材料の加工の場合の工具摩耗率の差が大きくないことも説明できる。さらに、脆性破壊を前提としている理論式から算出される理論値と比較した場合、実際の加工速度が非常に小さいことも理由づけられる。また、加工面には鋭いエッジや貝殻状割れがみられず、波のような模様が見られるのは、加工が延性モードで行われ、脆性破壊が起こらず、加工面が塑性変形をうけ、塑性流動が起きたためと考えられた。

次に、一般の超音波加工に近い条件で加工を行い、加工面に脆性破壊が生じることを確かめた。そして同じ条件で工具の振動振幅を小さくして加工を行うと、加工面には脆性破壊が起きた痕は認められなかった。これにより、一般の超音波加工の条件でも振動振幅を小さくすれば、脆性破壊が起こらずに加工が進むと推測された。

また、端面が斜面になっている工具を用いて加工を行った結果、砥粒が工作物に低い角度で衝突するようになり、研磨作用が大きくなることも確かめられた。

工具回転の効果についても考察した。加工面の観察や、工具および工作物を加振をせずに加工を行った実験結果より、工具回転による砥粒の切削作用による除去量は小さいことが分かった。加工穴の側面や工具の側面には切削作用が多く働き、表面が研磨されてなめらかになることが確認された。

以上、一般の超音波加工より一桁から二桁オーダーの小さい加工寸法でのマイクロ加工を行うことを目的としたマイクロ超音波加工法の開発は、十分な結果をもって達せられた。これにより、セラミックスやガラス、半導体をはじめ、様々な材料に対しての微細穴などの加工の可能性が広がり、将来の加工現場での応用が期待される。

6. 2 展望

本研究をさらに発展させ、より微細で高精度な、またより高能率な加工を実現するには、次のような対応、あるいは展開が考えられる。

(1) より微細なマイクロ加工への応用

より微細なマイクロ加工を行うためには、より微細なマイクロ工具を製作しなければならない。本研究で加工された微細穴の最小内径は $5\mu\text{m}$ であり、直径 $4\mu\text{m}$ の工具を用いた。これはWEDG加工で製作できる寸法の限界に近いために、より微細な工具を製作するならば、電解加工やイオンビーム加工などの他の加工法を用いなければならない。その他、より微細な荷重が検出できる電子天秤が必要である。

(2) 対象工作物の大型化

マイクロ超音波加工装置プロトタイプBは、使用している振動子の端面の面積が小さいために、加振できる工作物の寸法や重量に限界がある。より大きい端面をもつ振動子とより高出力な駆動電源を用いることにより、対象工作物の大型化が図れるものと考えられる。

(3) 工具摩耗率の改善

本研究においても、耐摩耗性に優れたダイヤモンド焼結体を用いることにより工具摩耗率に大きな改善が見られたが、さらに改善することも可能である。WCやアルミナやシリカ砥粒を用いることができ、ダイヤモンド砥粒を用いる必要のない加工条件では、工具摩耗率をさらに小さくできる可能性がある。

(4) 加工対象の拡大

マイクロ超音波加工では、ガラス、シリコン、セラミックスなどの硬脆材料だけでなく、金属やプラスチックでも、ある程度以下の弾性限界と破壊靱性値を示すものならば加工が可能であり、加工対象の幅が広い。これにより、均質な材料のみならず、様々な材料から構成された複合材料に対しても加工が行えることが期待できる。

(5) 工具・工作物同時加振

工具加振方式の加工精度で満足できる場合では、工具と工作物をともに加振することにより、加工速度の向上が期待できる。加工の現場において直径 $100\mu\text{m}$ 前後の穴加工の需要は多く、この程度の加工寸法ならば、最適な加工条件を選択することも加え、かなりの高速加工が可能で既存の加工法にも匹敵できると考えられる。したがって、部品加工への適用も不可能ではない。

(6) 他加工法への超音波振動援用

放電加工において、工具や工作物を加振すると堆積した加工屑の排出が促進されて、加工速度の上昇やより高いアスペクト比が期待できる。加工装置プロトタイプAでは、ステージに加工槽を取り付けることにより、超音波振動援用放電加工が行える。

また、ドリルやエンドミル形状の工具をWEDG加工により製作すれば、超音波振動援用マイクロドリル加工やエンドミル加工が容易に行うことができると考えられる。

参考文献

- [1] HIRANO. T., Japanese activities in micromachining, MST News, 13, (1995) 19
- [2] 和井田徹, 岡野啓作, 研削によるマイクロ形状創成, 精密工学会誌, 61, 10 (1995) 1365-1368
- [3] 砥粒加工用語集, 砥粒加工, 2, 9 (1965) 498
- [4] 増沢隆久, マイクロ超音波加工法=脆性材料のマイクロ三次元形状加工 (第1回) =, 超音波TECHNO, 8, 9 (1996) 28-32
- [5] THOE. T. B., ASPINWALL. D. K., WISE M. L. H., Review on ultrasonic machining, International journal of machine tools & manufacture, 38, 4 (1998) 239-255
- [6] NISHIMURA. G., JIMBO. Y., SHIMAKAWA. S., Ultrasonic Machining (Part I), Journal of the faculty of engineering, University of Tokyo, 24, 3 (1954) 65-100
- [7] 島川正憲, 強力超音波応用, 日刊工業新聞社, (1970)
- [8] MILLER. G. E., Special Theory of Ultrasonic Machining, Journal of applied physics, 28, 2 (1956) 149-156
- [9] KHAIRY. A. B. E., Assessment of some dynamic parameters for the ultrasonic machining process, Wear, 137 (1990) 187-198
- [10] SOUNDARARAJAN. V., RADHAKRISHMAN. V., An experimental investigation on the basic mechanisms involved in ultrasonic machining, International journal of machine tool design & research, 26, 3 (1986) 307-321
- [11] 佐藤敏一, 特殊加工, 養賢堂, (1981)
- [12] KREMER D., SALEH S. M., GHABRIAL S. R., MOISAN A., The state of the art of ultrasonic machining, Annals of the CIRP, 30, 1 (1981) 107-110
- [13] 日本機械学会編, 生産加工の原理, 日刊工業新聞社, (1998)
- [14] セラミック加工ハンドブック編集委員会編, セラミック加工ハンドブック, 建設産業調査会, (1987)

- [15] FINNIE. I., Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3 (1960) 87-103
- [16] SHELDON. G. L., Similarities and differences in the erosion behavior of materials, *Transaction of ASME journal of basic engineering*, 92 (1970) 619-626
- [17] SHELDON. G. L., FINNIE I., On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting, *Transaction of ASME journal of engineering for industry*, 88 (1966) 387-392
- [18] 日本電子機械工業会編, 超音波工学, コロナ社, (1993)
- [19] 精密工学会編, 新版精密工作便覧, コロナ社, (1992)
- [20] 実吉純一, 菊地喜充, 熊本乙彦監修, 超音波技術便覧(新訂版), 日刊工業新聞社, (1983)
- [21] マイクロ加工技術編集会編, マイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, (1977)
- [22] 楡井耕次, 超音波加工機によるセラミックスの加工, *機械と工具*, 32, 5 (1988) 49-56
- [23] KOMARAI AH. M., REDDY. P. N., Study on the influence of workpiece properties in ultrasonic machining, *International journal of machine tools & manufacture*, 33, 3 (1993) 495-505
- [24] KOMARAI AH. M., REDDY. P. N., Relative performance of tool materials in ultrasonic machining, *Wear*, 161 (1993) 1-10
- [25] 楡井耕次, 超音波砥粒加工30年の歩み, *超音波TECHNO*, 10, 4 (1998) 24-30
- [26] HAHN. R., SCHULZE. P., Effective application for ultrasonic machining of glass and ceramics, *American ceramic society bulletin*, 72, 8 (1993) 102-106
- [27] GILMORE. R., Ultrasonic machining: a case study, *Journal of materials processing technology*, 28 (1991) 139-148
- [28] SHAW. M. C., Ultrasonic grinding, *Microtecnic*, 10, 6 (1956) 257-265

- [29] COOK. N. H., *Manufacturing analysis*, Addison-wesley publishing company, (1966)
- [30] KAINTH. G. S., NANDY. A., SINGH. K., On the mechanics of material removal in ultrasonic machining, *International journal of machine tool design & research*, 19 (1979) 33-41
- [31] MORELAND M. A., Ultrasonic machining -Book chapter: Ceramics and glasses, *ASM International, Engineering Material Handbook Vol.4*, Schneider and Samuel J., (1991)
- [32] 増沢隆久, 藤野正俊, ワイヤ放電研削による細軸加工とその応用, *生産研究*, 37, 11 (1985) 29-34
- [33] 佐藤健夫, 水谷武, 河田耕一, 微細穴放電加工機, *National Technical Report*, 31, 5 (1985) 725-733
- [34] 隈部淳一郎, 西尾彰文, 三輪雅良, 伊藤勲, 尾野幹也, 重畳超音波加工, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 689-690
- [35] LANGEN. H. H., A study on micromachining-microassembly, 東京大学学位論文, (1994)
- [36] 宇部日東化成資料, (1998)
- [37] KOMARAI AH. M., MANAN. M. A., REDDY. P. N., VICTOR. S., Investigation of surface roughness and accuracy in ultrasonic machining, *Precision engineering*, 10, 2 (1988) 59-65

本研究に関する文献・学会発表

学術雑誌等

- (1) 増沢隆久, 江頭 快, 孫夕慶, マイクロ超音波加工 = 脆性材料のマイクロ三次元形状加工 (第2回) =, 超音波TECHNO (Ultrasonic Technology), 8, 10 (1996) 43-45
- (2) EGASHIRA. K., MASUZAWA. T., FUJINO. M., SUN. X. Q., Application of USM to Micromachining by On-the-machine Tool Fabrication, International Journal of Electrical Machining, 2 (1997) 31-36
- (3) 江頭 快, 増沢隆久, 超音波加工のマイクロマシニングへの応用, 生産研究, 49, 9 (1997) 389-394
- (4) 江頭 快, 増沢隆久, マイクロ超音波加工-内径5ミクロンの穴加工-, 超音波TECHNO (Ultrasonic Technology), 10, 5 (1998) 2-7
- (5) EGASHIRA. K., MASUZAWA. T., Microultrasonic machining by the application of workpiece vibration, Annals of the CIRP, 48, 1 (1999) (accepted)

学会発表等

- (1) SUN. X. Q., MASUZAWA. T., FUJINO. M., EGASHIRA. K., Micro-USM of Brittle Materials, Proceedings of ASIAN ELECTRICAL-MACHINING SYMPOSIUM '95 and ANNUAL MEETING OF JSEME, (1995) 31-35
- (2) 江頭 快, 増沢隆久, 藤野正俊, 孫夕慶, 微細超音波加工, 電気加工学会全国大会&アジア電気加工シンポジウム'95講演論文集, (1995) 141-142
- (3) EGASHIRA. K., MASUZAWA. T., FUJINO. M., SUN. X. Q., Micro-USM Technique by Fabricating Microtools on the Machine, Proceedings of the 3rd FRANCE-JAPAN CONGRESS & 1st EUROPE-ASIA CONGRESS on MECHATRONICS, (1996) 509-512
- (4) 江頭 快, 増沢隆久, 藤野正俊, マイクロ超音波加工の研究 -高精度工具回転機構および工作物側振動によるマイクロ超音波加工法-, 1997年度精密工学会春季大会学術公演論文集, (1997) 159-160
- (5) 江頭 快, 増沢隆久, 藤野正俊, マイクロ超音波加工による微細穴の加

工, 1997年度精密工学会秋季大会学術公演論文集, (1997) 23

(6) EGASHIRA. K., MASUZAWA. T., FUJINO. M., Micro ultrasonic machining method by precise tool rotation and workpiece vibration, Proceedings of international conference on precision engineering, (1997) 543-546

(7) 江頭 快, 増沢隆久, ダイヤモンド焼結体工具によるマイクロ超音波加工, 1998年度精密工学会秋季大会学術公演論文集, (1998) 161

(8) 梶山康弘, 江頭 快, 増沢隆久, 藤野正俊, 工作物加振方式によるマイクロ超音波加工の加工特性, 電気加工学会全国大会(1998)講演論文集, (1998) 29-30

受賞

学会発表等2は, 電気加工学会全国大会賞を受賞

謝辞

本論文の研究を進めるにあたり、指導教官の増沢隆久教授には、博士課程の五年間終始適切で親身な御指導と御教示を頂き、心より感謝の意を表します。

樋口俊郎教授、藤田博之教授、須賀唯知教授、川勝英樹助教授には、本論文を御審査いただくなかで、様々な御助言と御指導をいただき、厚くお礼申し上げます。

藤野正俊助手、孫夕慶客員研究員、梶山康弘受託研究員、日本工業大学の河村勝君には、研究を行う上で色々と御協力いただき、深く感謝いたします。

日本工業大学酒井茂紀教授、東京農工大学國枝正典助教授、大阪府立産業技術総合研究所増井清徳氏には、研究に関して有益な御助言をいただき、深謝いたします。

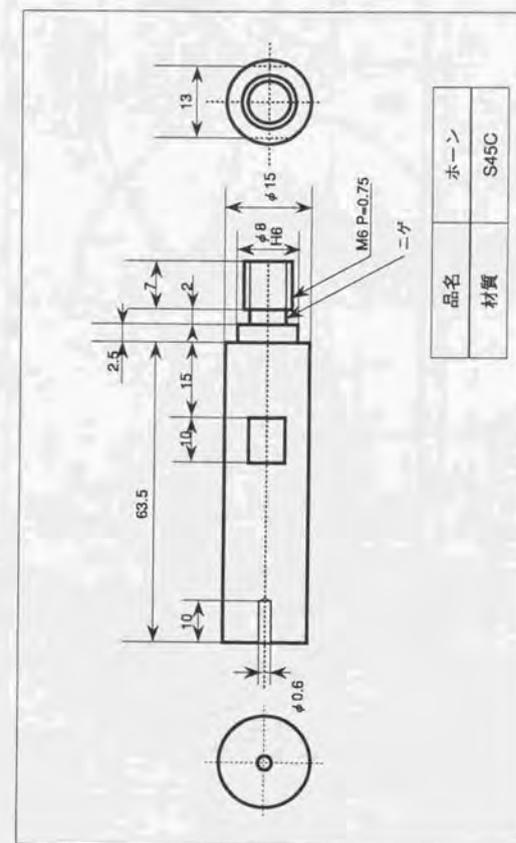
生産技術研究所試作工場、(株)創造科学、松下電器産業(株)、新東プレーター(株)、ノリタケダイヤ(株)、東名ダイヤモンド工業(株)、レーザーテック(株)、住友化学工業(株)、Admatechs Co., Ltd.の皆様には、様々な御協力をいただき、深く謝意を表します。

最後に、生産技術研究所第2部増沢研究室の皆様には、研究室で学生生活を送るうえでいろいろお世話になり、感謝の意を表します。

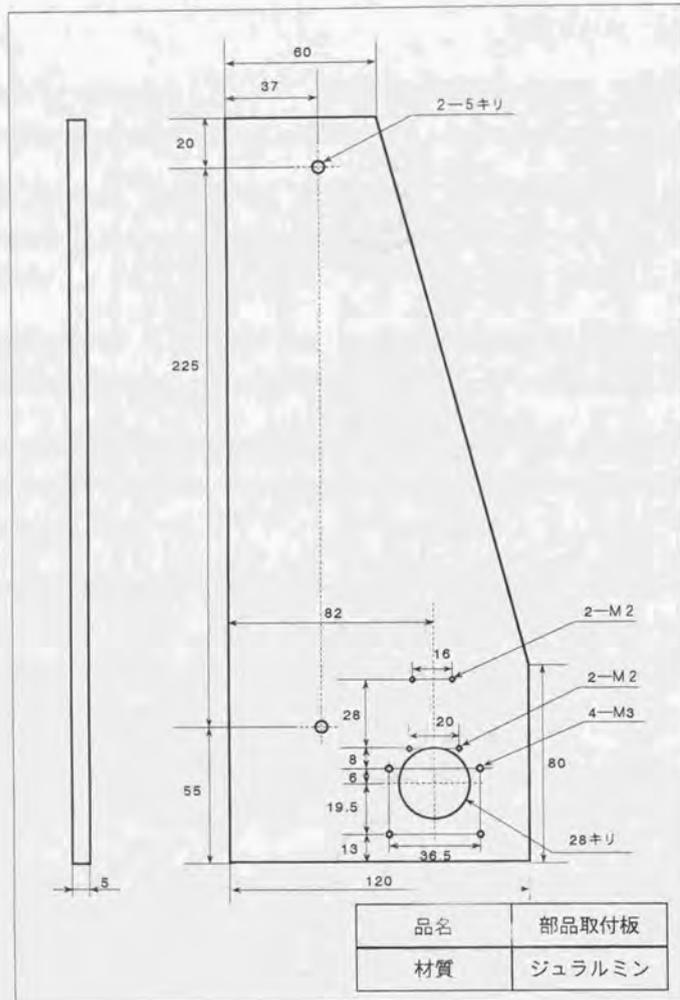
平成10年12月

付録

付録1 ホーン図面



付録2 部品取付板図面



付録3 振動子ホルダー図面

