

小径穴超音波加工の
高能率化に関する研究

田中 信一

2008年 博士論文

横浜国立大学

横浜国立大学附属図書館



11656184

寄贈者：田中信一

11656184
小径穴超音波加工の高効率化に関する研究

37751
1A

小径穴超音波加工の
高能率化に関する研究

田中 信一

2005年 9月

横浜国立大学附属図書館



11656184

横浜国立大学

序章

1

第1章 緒言

1.1 超音波加工の歴史

- 1.1.1 超音波加工の始まり 2
- 1.1.2 1950年代の超音波加工 2
- 1.1.3 1960年代の超音波加工 2
- 1.1.4 1970年代の超音波加工 3
- 1.1.5 1980年代の超音波加工 3
- 1.1.6 1990年代の超音波加工 3
- 1.1.7 今日の超音波加工 3

図表 5

1.2 超音波加工装置の概要

- 1.2.1 超音波加工装置について 9
- 1.2.2 超音波発振器について 9
- 1.2.3 振動子について 9
- 1.2.4 振動系について 9
- 1.2.5 加工装置について 10
- 1.2.6 操作盤について 10
- 1.2.7 スラリー供給装置について 10

図表 11

1.3 超音波加工特性

- 1.3.1 超音波加工の原理について 12
- 1.3.2 工具の振動振幅について 12
- 1.3.3 砥粒の種類と粒度について 12
- 1.3.4 スラリーの濃度と加工液について 13
- 1.3.5 加工圧について 13
- 1.3.6 加工面積について 14
- 1.3.7 振動周波数について 14
- 1.3.8 スラリーの供給方法について 14
- 1.3.9 加工精度について 15
- 1.3.10 被削材の保持方法について 15
- 1.3.11 接着剤について 16
- 1.3.12 良好な加工結果を得るための加工技術 16
- 1.3.13 工具小径化によって起こること 17

1.4	本研究の目的	
1.4.1	研究に至った経緯	19
1.4.2	研究目的	19
1.4.3	将来的な見通し	20
	図表	21
1.5	本論文の構成	30
1.6	第1章の総括	33

第2章 実験方法

2.1	GA型超音波加工機および付属装置について	
2.1.1	GA型超音波加工機について	34
2.1.2	レーザ変位計について	35
2.1.3	スラリー温度管理について	35
2.1.4	スラリー供給状態および流速について	35
2.1.5	加工圧について	35
2.2	工具について	
2.2.1	焼結ダイヤモンド工具について	35
2.2.2	超音波ねじり振動研削装置について	36
2.2.3	工具形状について	37
2.3	超音波加工用振動系について	37
2.4	加工力測定用治具について	38
2.5	圧電セラミックスについて	
2.5.1	応答速度測定について	39
2.5.2	出力電圧と負荷圧力の関係について	39
2.6	形状測定について	40
2.7	その他の加工条件について	40
2.8	第2章の総括	40
	図表	41

第3章 加工圧の影響について

3.1	脆性破壊のメカニズムについて	56
3.2	槌打ち作用とポンピング作用について	57
3.3	加工圧の影響について	
3.3.1	工具直径1mmのときについて	57
3.3.2	工具直径1mmのときの加工速さとの関係について	58
3.3.3	工具直径0.7mm, 0.5mmのときの加工速さとの関係について	59
3.3.4	工具直径0.3mmのときについて	59
3.3.5	全工具直径での最適加工圧について	60

3.4 第3章の総括	62
図表	63
第4章 スラリーの影響について	
4.1 スラリー流速の影響について	
4.1.1 工具直径1mmのとき	70
4.1.2 工具小径化とスラリー流速の関係	71
4.2 スラリー温度の影響について	73
4.3 第4章の総括	74
図表	75
第5章 工具先端形状の影響について	
5.1 面取り角度と加工速さの関係	83
5.2 面取り角度とチップングの大きさの関係	83
5.3 加工時間と加工穴径の関係	84
5.4 第5章の総括	84
図表	85
第6章 工具材質別超音波加工特性について	
6.1 超硬工具における工具摩耗とその加工穴への影響について	87
6.2 PCD工具における工具摩耗とその加工穴への影響について	88
6.3 工具材質が及ぼす種々の影響について	
6.3.1 加工圧について	88
6.3.2 加工速さについて	89
6.3.3 工具摩耗について	89
6.4 第6章の総括	90
図表	91
第7章 加工力測定について	
7.1 過去の加工力測定について	96
7.2 ソーダガラスと石英ガラスの加工特性比較	
7.2.1 加工速さについて	96
7.2.2 最適加工圧について	97
7.2.3 工具摩耗量について	97
7.2.4 加工速さ変化について	97
7.3 加工力変化について	
7.3.1 無負荷時の状態について	99
7.3.2 1周期での変化について	99
7.3.3 中期間(3000周期)での変化について	100

7.3.4	長期間（加工全体）での変化について	100
7.3.5	最大加工力について	102
7.4	第7章の総括	102
	図表	103
第8章 工具直下に発生するキャビテーションの影響について		
8.1	キャビテーションとは	114
8.2	工具先端の状態	
8.2.1	かい食による影響について	115
8.2.2	摩耗による影響について	116
8.3	キャビテーション痕について	
8.3.1	実験条件および手順について	116
8.3.2	工具直径 4.9mm のとき	117
8.3.3	工具直径 3.0mm のとき	118
8.3.4	工具直径 1.5mm のとき	118
8.3.5	工具直径 1.0mm のとき	119
8.4	加工面の状態について	119
8.5	第8章の総括	121
	図表	122
第9章 微細穴超音波加工への展望		
9.1	加工圧について	137
9.2	振動系について	137
9.3	スラリーについて	138
9.4	第9章の総括	138
	図表	139
第10章 結論		
10.1	まとめ	140
10.2	今後の研究課題	142
終章		
		143
本論文に関する研究論文		
本論文に関する技術解説		
学会発表		
本研究と関わりのある共同研究		
謝辞		

序章

電子部品や半導体関連の部材、バイオ関連部品等の素材として、例えばガラス、陶磁器、貴石（ひすい・水晶、ルビー・サファイヤ・ダイヤモンド）等の非金属材料、炭化タングステン、フェライト、アルミナセラミックス、チタン酸バリウムなどの焼結材料、またシリコン等金属結晶の硬度が高く、脆性の大きい物質を総称して一般に硬質脆性材料と呼ばれている。

硬質脆性材料の加工方法には、切削、研削、研磨、あるいはレーザ、電子ビーム、イオンビーム等の応用、さらにはエッチング、放電、ブラスト、超音波等があり、被加工物の物性、形状、数量、加工精度、加工効率等によりその加工方法が選択されている。

それら多くの加工方法の中で、素材の脆性を利用した破砕加工法のひとつとして遊離砥粒を用いた超音波加工法がある。近年は、加工形状の微細化と高精度化への要求が強くなり、その中にはたとえば直径 0.1~0.3mm の微細穴加工領域への対応をも求められている。

超音波加工においては、様々な加工条件の変動や工具材質などにより、加工精度、加工効率などが影響を受ける。しかしながら、直径 1.0mm 以下の超音波加工に関する基礎的な研究は極めて少なく、またその際の工具材質の相違による加工への影響などについての研究も少ない。

そこで、微細領域におけるさまざまな加工特性を確かなものとするために、ソーダガラス、石英ガラスを被削材として、工具直径 1.0mm 以下の小径穴超音波加工に関する研究をおこなった。

超音波加工の加工効率に影響を与える要因の一部を変えたとき、工具材質および工具形状を変えたときに、加工速度がどのように影響を受けるものかを詳しく調べた。また、本研究で明らかにできた従来の超音波加工の領域ではそれほど問題視されず、影響が考えられていなかった要因についても考察した。

本研究は、工具材質の優劣や加工現象の立入った考察などから、実用的生産性向上のための手がかりが多く得られることによる工業的意味合いが非常に大きく、微細穴の超音波加工を実現するための基礎的研究として充分役立つものと期待できる。

第1章 緒言

1.1 超音波加工の歴史

1.1.1 超音波加工の始まり

強力な超音波振動を各種の加工へ応用する技術の中で、遊離砥粒を用いる加工法を超音波砥粒加工、超音波破碎加工、あるいは超音波機械加工と様々な呼び方があるが、超音波加工がもっとも広くかつ一般的に使われている。本研究では、以下超音波加工 (ultrasonic machining) と呼ぶことにする。

超音波加工の原理は1927年に発見され¹⁾、日本では1938年にガラス棒に超音波振動を与え、ガラス板に穴あけしたことが報告されている²⁾。しかし、今日のような加工機が開発されたのは第2次世界大戦後^{3) 4)}であり、日本では1952年頃より学術的研究が開始され、1953年に最初の研究発表がおこなわれた^{5)~7)}。

当時は、生産技術開発の主流が大量かつ高速生産を目指していたのに対して、超音波加工は脆性材料への微細加工という特殊な技術として検討された⁸⁾。

1.1.2 1950年代の超音波加工

工業的に実用化されたのは1955年以降であり⁹⁾、線引き用ダイヤモンドダイスの製造に応用され、工業生産分野に大量に全世界的規模で用いられた。日本における技術革新の波に乗って、強力超音波の基礎技術およびその応用技術が急速に開発された。

また、1955年から1965年にかけて、日本の輸出商品の花形であったトランジスタラジオの部品、小型バリアブルコンデンサの構成部品、高誘電率セラミックス円板の加工等に超音波加工が用いられた¹⁰⁾。

1.1.3 1960年代の超音波加工

1965年頃から約10年間多く活用されたものとして、半導体製造装置の各種治具用部材である石英ガラスに対する加工であった。それは当時の各半導体製造工程に多く使用されていた消耗品であった。

同じ頃から、板状シリコンに対する加工も始まった。シリコンウェハのダイシング加工、シリコン製の拡散ボードの加工、半導体製造装置ドライエッチング装置用プラズマ電極加工等である。この電極に用いられた8インチのシリコン円盤に対する穴径0.8mm、穴数1700個の加工例を図1.1に示す。これは穴あけ加工を複数回に分けて多軸工具による超音波をおこなっている。半導体関係の技術開発のテンポは大変早く、プラズマ電極に対しては新しい要求が次々と出てきている。穴径の小径化、穴数の増大、穴径およびピッチ精度の向上、素材がシリコンから炭化ケイ素等のファインセラミックス分野まで広がっている。

1960年代後半より、パイレックス (米国製) の商品名で呼ばれる硼珪酸ガラス (硬質ガラス) への加工が始まった。硼珪酸ガラスは高温に使用可能な安定したガラス材料として、理化学分野、電子部品分野、センサ関連分野等非常に広範囲に使用されている。

1.1.4 1970年代の超音波加工

1970年頃より、熱伝導の良いこと、絶縁性の良いことから、多用されているのがアルミナ基板である。その穴あけ、溝入れ、成形加工等に超音波加工が利用されてきた。1980年代に入るとレーザ加工が実用化され、特にYAGレーザ加工は、アルミナ基板の加工には大変適した加工法で、超音波加工に比べてその加工速さは数十倍速く、加工面は溶けて滑らかな面に仕上がる。反面、加工変質層が大きいこと、また加工した穴のふちが盛り上がる等の問題点がある。そこで、高い信頼性を要求される分野、例えば宇宙衛星用に搭載する通信機、光通信用海底ケーブル中継器用のアルミナ基板等の穴あけ、成形加工に超音波加工が多用されてきた。

1.1.5 1980年代の超音波加工

1980年代には自動車の燃料節約策としてセラミックスエンジンの開発が計画され、それに適するセラミックが開発された。チッ化ケイ素(Si_3N_4)、炭化ケイ素(SiC)、チッ化アルミニウム(AlN)、サイアロン(SiAlON)、アルミナ(Al_2O_3)、ジルコニア(ZrO_2)等はその代表的なもので、従来のセラミックと区別してファインセラミックと称している。

このファインセラミックは、比較的硬度も高く靱性が大きいため、超音波加工の加工速さが遅い。チッ化ケイ素に至っては、ソーダガラスに比べて加工時間が数十倍かかるという問題点もある。また、素材についても加工性が表層と芯部で異なる素材、あるいはそれらの積層材等、加工内容が多様化してきている¹¹⁾。

1.1.6 1990年代の超音波加工

1990年にセラミックの自動車用エンジンの試作機の完成予定が、素材の使用途中でのクラックの発生、その信頼性の確認方法が難しいため中止になった。この結果、各セラミックメーカーは他の分野への用途開発を図り、半導体製造装置の機構部品類、ドライエッチング装置用電極、自動車エンジン用部品、宇宙衛星用センサ容器等広範囲での利用が広まった。

1990年代に入って圧力センサ用基板として、初めは3インチのオリフラ付きのパイレックス円板に、細穴を多数あける加工に超音波が用いられた。特に自動車のエアフローセンサ用に、耐震性の向上、小型、軽量化の要求に応ずるものとして半導体圧力センサが評価された。それは現在の主流となり、大きな市場の一つになっている。他に各種産業用として圧力センサの需要があり、微圧、高圧の測定用、高精度測定用等種々の目的に応じる圧力センサがこの方式で製作されている。

1.1.7 今日の超音波加工

1955年頃から今日に至るまで継続して超音波加工が用いられている分野のひとつに線引き用ダイヤモンドダイス加工がある⁸⁾。線引き用ダイスは、ワイヤを引き抜くことにより細線を作る工具である。近年、超LSIやパワ素子に代表される半導体素子の用途の広がりにより、素子を接続する金線、それらの素子と金属端子間とを接続す

るアルミ線の需要が急増した。これらのサイズは、例えば、金・アルミ・銅線が $25\mu\text{m}$ 、パウデバイスでアルミ線が $0.1\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$ などである。これら細線の製造にダイヤモンドダイスが使われている。

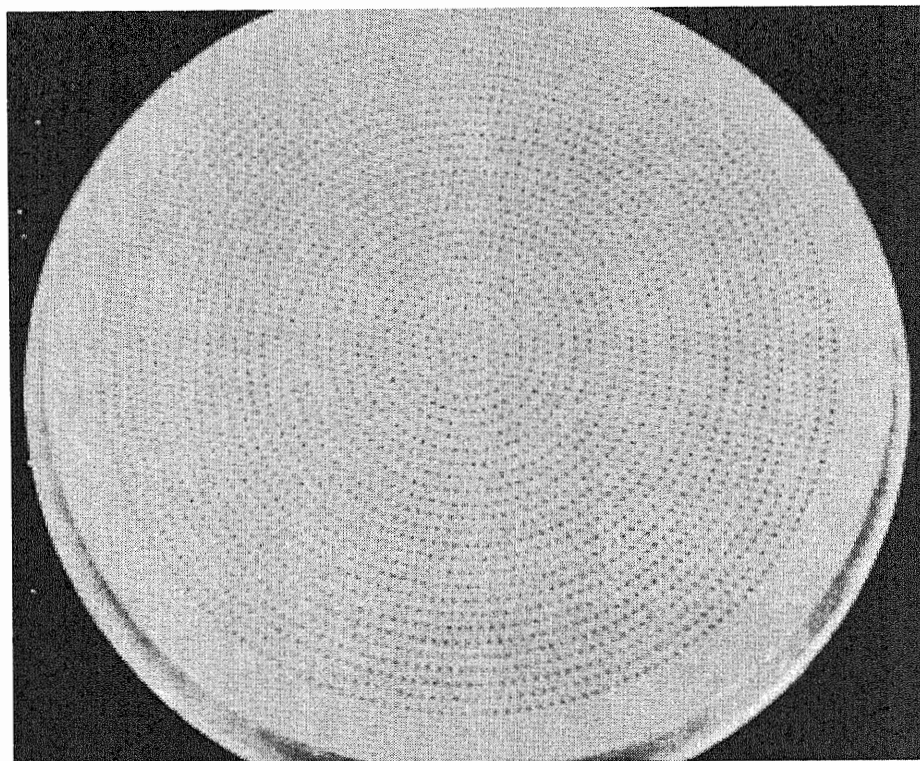
近代工業の始まりの頃つまりワイヤの需要が生まれた頃は、高温で穴を打ち抜いた錬鉄板の線引き用ダイスが用いられ、使用中に穴が大きくなると叩き直して穴を小さくし、再び穴をあけ直していた。錬鉄は、その後タングステンカーバイドに代わったが、小径の加工が難しく、同時に摩耗しやすいという欠点があった。そこで高速で細線を引き抜く用途にダイヤモンドダイスが登場した。これにより、100倍近くの生産性向上が実現した。ダイスの価格も次第に低下し、超音波加工装置の需要もダイスの製造業者だけでなく、ダイス再生に用いる使用者にも拡大した。

超音波加工では、工具が摩耗するという欠点は避けられないが、ダイス加工ではその欠点を逆に利用することで、高精度な複雑な断面形状をもったテーパ状穴を作り出すことができ、最終的にはサブミクロンにまで達する穴径精度を得るに至る。図 1.2 に線引き用ダイヤモンドダイスの加工前後の形状寸法例を示す。

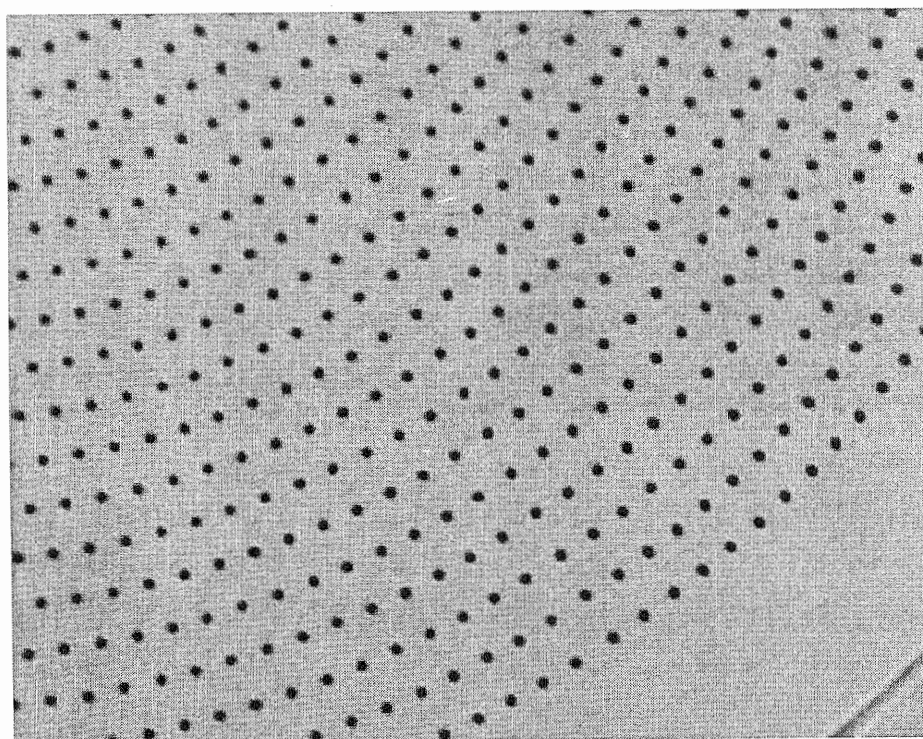
穴径の拡大は、ダイヤモンドパウダーのサイズを順次小さくしながら合計5つの段階を経て、最終寸法 $1.000\pm 0.001\text{mm}$ に至っている。最終工程では、焼入れ硬化した鋼線を使用し穴径精度を得ている。

今日では、DNA 解析等のバイオ関連分野、太陽電池等のエネルギー関連分野、繊維等の紡績関連分野にソーダガラス、石英ガラス、シリコン、フェライト、アルミナセラミックス、ルビー、サファイア、炭化ケイ素、チッ化ケイ素、ジルコニア、ダイヤモンド等の様々な脆性材料が使われており、その形状や加工寸法の高精度化と微細化への要求が強くなり、たとえば直径 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ の微細穴領域への対応が求められている。これらの市場が求める微細加工例を表 1.1 に示す。

これらの加工は、従来どおりの加工の延長線上と捉えることが困難である。加工面積が小さくなると、当然のことながら工具断面積も小さくなる。すると、より小径化した工具が必要となるだけでなく、その工具を用いたときの加工条件、加工環境がわかっていないと対応できない。しかしながら小径化した工具を用いたときの加工現象は明らかになっておらず、また良好な仕上げや最も効率のいい加工条件すらわかっていないため、手探りの状態で加工しているのが現状である。



全体図



拡大図

図 1.1 シリコン円盤への超音波加工

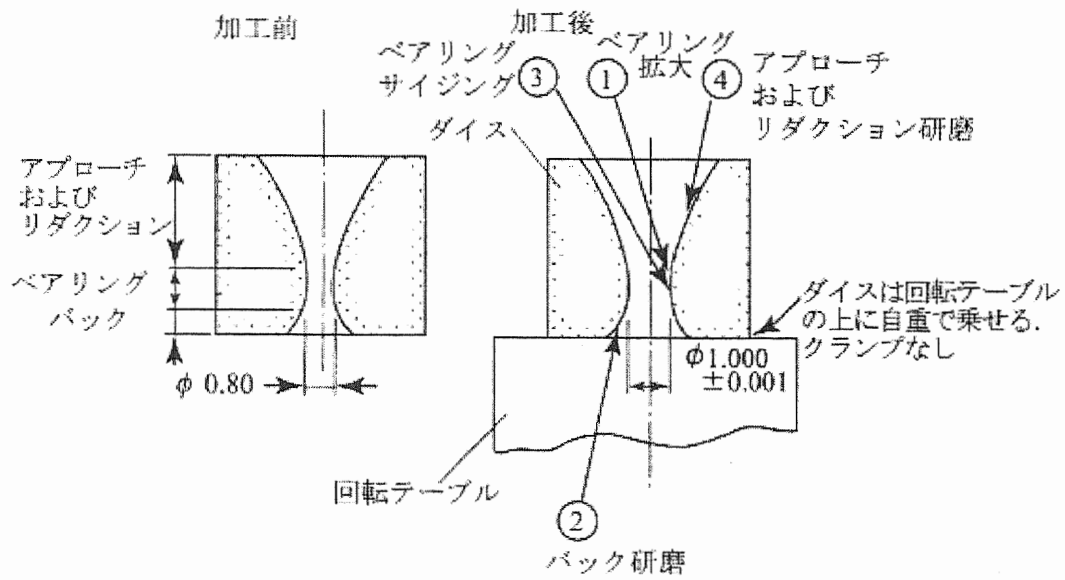


図 1.2 線引き用ダイヤモンドダイスの加工前後の形状寸法
(ダイヤモンドダイスの再生加工)

表 1.1 市場が求める微細加工例

材料	寸法	加工穴数	加工穴径	適用分野
シリコンセラミックス	$\phi 200 \times 2$	24,000	$\phi 0.15 \sim 0.2$	半導体検査用
シリコンセラミックス	$\phi 200 \times 5$	1,000~2,000	$\phi 0.2 \sim 0.3$	プラズマエッチング用電極
硬質ガラスセラミックス	$\phi 100 \times 1 \sim 2$	500~600		センサ用基板
窒化珪素	$\phi 200 \times 0.2$	300~400	$\phi 0.05$	LSI検査用
アルミナジルコニア	各種形状 厚さ0.5~3	1~3	$\phi 0.1 \sim 0.2$	電子機器用気孔部品
窒化アルミ	$\phi 200 \times 2$	1,000~2,000	$\phi 0.1$	ノズル

参考文献

- 1) R. W. Wood and A. L. Loomis: The physical and Biological Effects of High - frequency Sound - waves of Great Intensity, Phil. Mag. S. 7, 4, 22(1927)417-436
- 2) 木下正雄, 吉岡勝哉:水晶共進板による強い超音波の発生, 応用物理学会誌, 7, 2(1938)74-76
- 3) A. S. Cohen:New Method Machines, J. Metals (1951)216-217
- 4) W. P. Mason and R. F. Wick:A Barium Titanate Transducer Capable of Large Motion at an Ultrasonic Frequency, J. Acoust. Soc. Amer. 23, 2(1951)209-214
- 5) 西村太郎:超音波による硬質材料の加工について(I), 電気通信連合大会論文集 169(1953)
- 6) 谷口紀男, 杉長介:超音波彫刻機について(第1報), 精機学会山梨地方講演会(1953)
- 7) 西村源六郎, 島川正憲:磁歪振動を利用せる超音波加工法に関する研究(第1報), 精機学会 20周年記念学術講演会(1953)
- 8) 超音波応用加工, 日本塑性加工学会, (2004).
- 9) 島川正憲:超音波工学(-理論と実際-), 工業調査会, (1975)
- 10) 奥出顕造, 楡井耕次:超音波砥流加工 30年の歩み, 日本工業出版「超音波 TECHNO」, 第10巻第4号
- 11) 楡井耕次:セラミックスの超音波加工, FINE CERAMICS REPORT, 19, 8(2001)196.

1.2 超音波加工装置の概要

1.2.1 超音波加工装置について

超音波加工装置の外観を図 1.3 に示す。超音波加工装置は、超音波発振器、超音波振動子を含んだ超音波振動系、加工装置、操作盤、スラリー供給装置で構成されている。以下に各々の部分について説明する。

1.2.2 超音波発振器について

振動子に高周波電力を供給する電力源で、駆動周波数 15~30kHz、出力は数 kWh を上限とした半導体回路から構成されている。発振器出力を効率よく利用するために、駆動周波数を機械振動系の共振周波数に一致させることが必要である。振動系の共振周波数は、加工中に工具の摩耗、負荷の変動および発熱などにより変化する。その共振周波数から駆動周波数が離れると、振動系の振動振幅は低下し加工能率も低下する。そこで、振動系の共振周波数を電氣的に検出し、その検出電圧を発振器に帰還した周波数自動追尾方式を採用している。

1.2.3 振動子について

ニッケル、クロム、コバルトなどの合金または鉄は強磁性体であり、外部から磁界を加えると寸法が変化する。この現象を磁歪現象という。通常、磁歪材料に超音波振動を発生させるには、バイアス用直流磁界に重畳した高周波交流磁界を印加して、材料、形状、寸法などで決まる共振周波数で駆動する。

ニッケル振動子は、素材の磁氣的損失が大きいいため水冷の不便さがある。しかし機械的 Q が小さいので、ホーンおよび工具などの設計製作を含め使いやすい。

磁歪振動子に巻かれたコイルに発振器からの高周波電流を流して磁歪変換素子に強力な縦振動共振を発生させる。磁歪振動子の振動振幅は、おおむね数 $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ と小さく、そのままでは能率的な加工作業に適さないが、コーンおよびホーンによって加工に必要な大きさにまで拡大する。

加工装置の主要な部分である振動子部には、超音波振動（機械振動）の発生源である磁歪振動子とそれに結合されたコーンが振動子ケースに納められており、そのコーン先端に工具を結合したホーン（振動伝達工具）をネジ結合する。

1.2.4 振動系について

磁歪振動子とコーン、ならびに工具を接合したホーンは、それぞれ適用超音波の振動数（周波数）において、半波長共振体となるようにその寸法形状を定めてあり、それらが一体として適用周波数で共振する機械振動系を構成するように機械的に強固に結合されている。

工具加工端面の振動振幅は加工目的によって相違するが、通常は $50\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ 前後で最大で $100\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ である。それ以上の振幅では、ホーンおよび工具の内部応力が大きくなり、疲労破壊を起こす場合がある。また工具の振動は、工具の軸芯と平行な縦振動成分のみが理想であるが、加工中に座屈による曲げ、横ぶれあるいはねじり振動などを

誘発することがある。この現象により、加工精度の低下、チッピングの発生、あるいは加工速さの低下などを生ずる場合がある。そのためホーン形状の選択は、製作容易なステップ形や円錐形に比べて、エクスポテンシャル形のほうが、総合的な加工特性に好結果をもたらすことが多い。ホーンおよび工具の材質は、工具をロー付けするために鋼材（SK材）、ステンレス鋼が多く用いられる。

同一の加工目的に対しても、ホーン、工具の寸法形状の選択によっては、最終的に得ようとする工具の振動振幅に大きな差異が生ずる。したがって、この超音波加工上最も大切なことは、一定の加工目的に対してもっとも大きな工具の振動振幅が得られるようなホーンと工具の選択・設計・製作である。無論、一定の作業速度を維持できる最低の工具振動振幅の大きさは存在し、一般的に加工速度は工具の振動振幅に比例する。

1.2.5 加工装置について

加工装置のなかで重要な機構の一つとして加圧機構がある。小型装置では、被削材を下から上に押し上げて工具に接触させる油圧式が多く、大型装置では振動系をレバーの一端に吊り下げ、工具を被削材に押し付ける天秤式を採用したものが多い。これらの加圧機構では、その加工送り機構の摩擦抵抗を極力小さくし、加工送りの感度を良くすることが重要である。

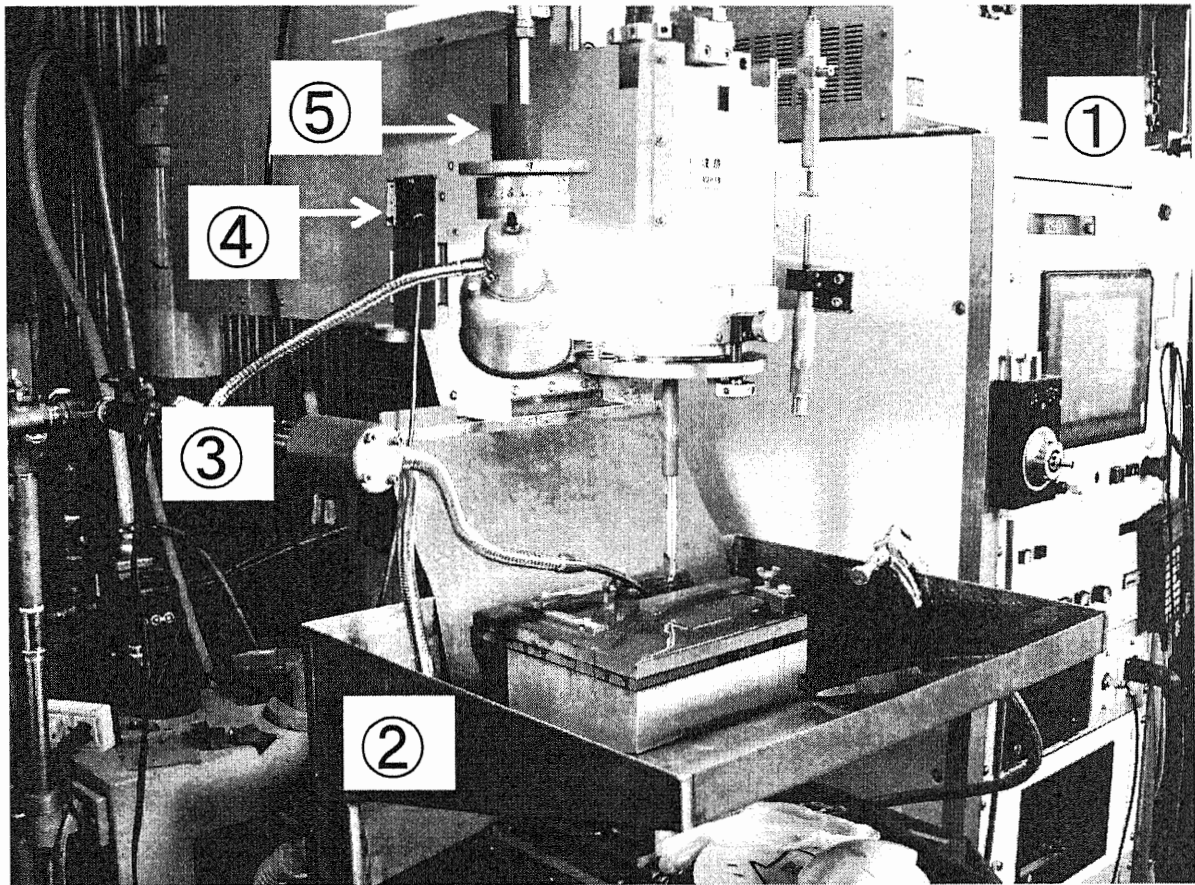
通常は加工台に固定した被削材の加工面に対し、工具軸芯が垂直に位置することが要求される。工具はホーン端にロー付けされ、かつホーンは振動の腹の位置でネジ結合によりコーン端に取り付けられるために、振動系の軸心に対して調整する必要があるからである。

1.2.6 操作盤について

操作盤は、各種加工条件設定の入力、XYステージの位置の表示、加工深さの表示、超音波出力電力の設定をするものであり、加工中はそのときの状態が表示される。

1.2.7 スラリー供給装置について

加工液を遊離砥粒と混合した液体（以下スラリーとする）を常に加工面に供給し、それを循環して自動的に供給する装置で、ポンプの吐出量は毎分10～20l程度である。ポンプは渦巻き式が多く、羽根材料は鋼材、容器材質はステンレス鋼が用いられる。なお、始動時に砥粒の混合を促進するため、循環系にバイアスを設け、あらかじめ混合が十分に終わってから後に加工を開始する必要がある。



①：発振器

②：スラリー受け

③：スラリー供給用配管

④：レーザ変位計

⑤：加工圧用重り

図 1.3 GA 型超音波加工機（平衡天秤型加圧方式）

1.3 超音波加工特性

1.3.1 超音波加工の原理について

超音波加工の原理を図 1.4 (概観および加工部拡大) に示す。超音波発振器より高周波電力を振動子に供給し、振動振幅数 μm の超音波振動を発生させ、振動子に結合するコーンおよびホーンで加工に必要な数十 μm の振幅に拡大して先端の工具に伝達する。工具を適当な圧力で被削材に押し当て、スラリーを加工面に供給すると、砥粒には超音波振動の衝撃力が伝達され、被削材に衝突して微細な破砕を起こし、工具の形状に対応した破砕加工をおこなう。被削材には工具加工端面と同形状の雌雄対応したくぼみが生ずる。工具は毎秒数万回の振動をする。1回の破砕量は微細でも、振動の繰り返しの積み重ねにより、実用的な加工速さが得られる。

工具と被削材の間には、使用砥粒の平均粒径に相当する加工クリアランスが生ずる。スラリーは、そのクリアランスを利用して加工面への砥粒の供給と、切りくずおよび加工済み砥粒の排出運搬を同時におこなう。

1.3.2 工具の振動振幅について

加工速さに最も大きな影響を与える要因で、加工速さが工具の振動振幅と比例関係にあるとすれば、振動振幅の倍数に比例するとみなされる。つまり、振動振幅が倍になれば、加工速さも倍になると考えられる。しかし実際の加工では、加工速さに影響を及ぼす他の要因が多く、振幅の倍数までは増えない。図 1.5 に同一工具による工具振幅と加工速さの関係を示す¹⁾。

この図から、加工深さが浅いところでは、工具先端振幅にかかわらずほとんど同じ時間で加工できる。しかし、加工深さが深くなると、振動振幅の影響が大きくなってくる。しかも、加工速さは振動振幅の倍数にまで増えないことがわかる。

1.3.3 砥粒の種類と粒度について

一般的な超音波加工に用いられる砥粒は、酸化アルミニウム (Al_2O_3)、シリコンカーバイド (SiC)、ボロンカーバイド (B_4C)、ダイヤモンドなどがあり、その硬度は列記の順に硬くなる。超音波加工に使用する砥粒とダイヤモンドに対する相対的加工力を表 1.2 に示す¹⁾。

酸化アルミニウムはシリコン、ガリウムヒ素などの素材で残留クラックが問題となる加工に使用される。シリコンカーバイドはガラス、石英ガラス、フェライト、圧電セラミックスなどの加工に使用される。ボロンカーバイドは、サファイア、ファインセラミックス、焼入れ鋼、超硬合金などの加工に使用される。ダイヤモンド砥粒は、ダイヤモンドの加工およびごく一部の特殊な加工に用いられるほかは、経済的な理由でほとんど使用されない。

加工速さは、砥粒の粒度 (大きさ) に影響される度合いが高い。実際の加工では、中心粒径が $70\mu\text{m}$ 以内では粒度と加工速さはほぼ比例するが、それ以上の大きな砥粒では、逆に加工速さが低下する場合もある。

1.3.4 スラリーの濃度と加工液について

スラリーはおもに加工面への新しい砥粒の供給と切りくずの排出をおこなうので、低粘度の液体が適しているが、普通は水を使用する。被削材により水が使用できない場合には、低粘度の油、アルコールなどが使用される。

スラリーの混合比は、重量比で1:3~1:5が適当であるが、混合比が1:10以上になると加工速度は急激に低下する。また、実際の加工ではスラリーを循環して使用するので、加工が進むにつれて砥粒も破砕され、粒径が小さくなってゆく。それにつれて加工速度も低下するが、砥粒の交換時期は生産性と経済性の両面から決められる²⁾。

1.3.5 加工圧について

加工圧も加工速度にかかわる大きな要素の一つで、工具の振動振幅、加工面積、砥粒、被削材の材質などに関連して、加工速度を最大にする最適加工圧が存在する。

加工圧の大きさは主に被削材材質と加工中の工具の振動振幅の大きさによってそれぞれに適した範囲があり、同一加工装置においては加工面積が大となるにしたがって、加工圧の絶対値は大きくなるが、加工断面単位面積当たりの最適加工圧は小さくなる。

これは同一加工装置において、工具断面積を大とするにしたがって、ホーンの速度変成比(振動振幅拡大の割合)を小さくする必要があり、一般的にはこのような場合、工具振動振幅も低下するため、加工断面単位面積当たりの最適加工圧もまた小さくなる。さらに、装置の加工能力に対して加工面積が比較的小さい場合には当然ホーン直径が細くなる。最適加工圧の範囲が狭くなる傾向にある。

加工圧を一定以上に大きくすると、振動系自身の振動振幅の低下を招き、加工速度が低下する。また、極めて脆い材料や割れやすい形状のものの加工に際しては、被削材自身の破損防止の見地からも、加工圧の設定は重要な要素の一つとなる。このような場合は、多少加工速度が低下しても、最適加工圧よりも小さな範囲で加工しなければならない場合もある。

図1.6に加工圧と加工速度の関係を示す³⁾。この図から、最適加工圧は加工面積が小さいほど大きいほうへ移行することがわかる。また、最適加工圧は工具振幅が大きいほど、被削材の硬度が高くなるほど大きくなる^{3)~6)}。

1.3.6 加工面積について

加工面積と加工速さは他の加工条件が同じであれば、反比例の関係にある。振動子入力がある場合、加工面積が増すと工具の振動振幅は減少すると同時に、加工面の砥粒の新陳代謝が悪くなるので、加工速さは低下する。加工工具面積と加工速さ及び加工量を図 1.7 に示す¹⁾。

この図の実線は加工速さを示すが、点線の加工量（加工面積×加工深さ）では最大値を示す工具面積がある。このことは、超音波加工では小径の穴あけ、小物部品の切り出しなどを多数個同時加工でおこなうほうが高能率であることを示すものであり、量産加工時によく採用される手法である。しかし、超音波加工機の振動子入力を一定とした場合、加工最大寸法には限界がある。

1.3.7 振動周波数について

超音波加工では工具の振動振幅が加工能率を大きく左右することはすでに述べたが、振動子入力（発振器出力）にはおのずから限界があり、またコーン、ホーンなどの振動系の設計製作の容易さなどから総合的にみて、振動周波数は 15～30kHz の範囲が多く実用されている。特に低い周波数では、ホーンの横断寸法が大きくとれ、したがってホーン先端の工具寸法も大きくとれるために、多数個同時加工への設計自由度が広がるから、多用途の加工機には可聴音限界の 15kHz 近傍の周波数がよく用いられる。

1.3.8 スラリーの供給方法について

スラリーを加工面に一様に供給できるか否かで、加工速さは大きく異なる。大面積の加工や多数個同時加工の場合、特にスラリーの供給が問題となり、加工能率および加工精度が大きく左右される。また、加工深さが深くなるほどスラリーの加工面への新陳代謝が悪くなり加工速度が低下することがある。

この対策のひとつとして、工具または被削材を工具の軸方向に上下運動させ、新しいスラリーを加工面に供給する揺動機構を利用してスラリーの供給を良好に保つ方法がある。さらに、スラリーを加工面に強制的に供給するために、ホーンおよび工具の中心穴よりスラリーを吸引による循環方式と、逆にホーンおよび工具の中心穴よりスラリーを押し出す圧出方式の 2 つがある。実際には吸引循環方式が多く利用されている。吸引循環方式を図 1.8 に示す¹⁾。

これはスラリー供給装置より加工面に供給されたスラリーが、工具およびホーンの中心穴を溯上して、ホーンのノード部（振動節部）より供給装置に回流するように、ポンプの強制循環装置回路で構成されている。これにより、常に加工面に新しいスラリーの供給ができ、加工形状、加工深さにほとんど関係なく、加工速さをほぼ一定に維持することができる。例としてチッ化ケイ素の吸引加工の有無による加工特性を図 1.9 に示す¹⁾。この図から、80 分加工したときで約 4 倍の加工深さに差が生じることがわかる。

1.3.9 加工精度について

加工精度を左右する要因は、工具の精度とその摩耗量、砥粒の粒径とその粒度分布、加工機の精度、被削材の材質などが上げられる。工具、砥粒、加工機および被削材が決まれば、砥粒の破碎状況、工具の摩耗などが加工時間の経過とともに変化し、加工クリアランスの変動と加工工具入り口と出口に寸法差が生ずる。

通常の超音波加工で得られる加工精度は $\pm 0.05\text{mm}$ ～ $\pm 0.1\text{mm}$ 程度であるが、さらに精度を上げるためには、使用する砥粒径を小さくすると同時に工具の振動振幅も下げ、2次、3次の仕上げ加工をおこなう。最終の3次仕上げ加工では、砥粒径は $10\mu\text{m}$ 程度が適当で、仕上がり精度は $\pm 0.01\text{mm}$ までが期待できる。

粒度は、要求される仕上がり面粗さと精度によって選択するが、加工速さの点からは、一般に工具先端の振動振幅の大きさ程度の粒径が最も効率的である。砥粒径が振動振幅よりも大のとき、砥粒の動きが鈍くなり、新しい砥粒が工具先端に供給されにくくなる。同時に工具先端に存在する砥粒は、超音波振動により破碎され続け、粒径が小さくなるか、または平均化し、さらに加工に作用する砥粒も摩耗し、加工効率が低下する。

砥粒径が振動振幅よりも小さいとき、超音波振動により一時的に工具直下の圧力が上がるため、砥粒が工具周辺に押しやられてしまい、加工に作用する砥粒が少なくなり、また、工具先端に発生するキャビテーションの影響もあって加工効率が低下する。

砥粒は、工具側面と被削材側面に生じるクリアランスを通過して、工具先端に達する。被加工寸法は、工具寸法よりも大となることは明らかである。このことを考え、精度の高い加工には、最初に加工速さの速い粗い砥粒で加工し、仕上げに細かい砥粒を用いて必要な寸法精度を出す。

スラリーは工具の加工先端部（工具の加工刃先部分）の全周囲から加工中、絶えず一様に十分に工具の加工先端部に循環するように供給する。特に加工最初には、必ず工具の加工先端部と被加工面を離しておき、被加工面に十分にスラリーを供給してから加工をはじめ。特に複雑に入り組んだ工具の場合、工具刃先部分全てにスラリーが行き渡る前に加工を始めると、スラリー供給の最も悪い部分、つまり最も加工速さの遅い部分でしか加工が進まなくなる。

1.3.10 被削材の保持方法について

超音波加工において、被削材の保持方法は加工条件の選定と同じくらい重要である。工具の振動によって被削材が振動するような状態であると、加工精度が低下し、被削材にクラック・チップング等が発生しやすくなる。被削材は、加工中に工具の超音波振動と加工に伴う加工送り以外の工具および被削材間の相対運動を生じてはならない。

小さな素材や焼結材料のような欠けやすく脆い材料、あるいは不安定な座りの悪い形をした材料は、加工中に素材自身が振動したり動き出したりすることが多く、素材の割れやカケの原因となる。

原則として、被削材は接着剤（樹脂系）で確実に充分質量のある台に直接接着固定

する。例えば薄い板ガラスのような場合には、加工される部分あるいは素材全体の裏面に厚さ 3~5mm 程度の板ガラスなどの台に、確実に隙間や空洞がないように、あたかもその下支えガラスと一体のもののように接着し、加工圧や工具振動に対する素材自身の補強と被削材の見かけの質量を増すような手段を講じた後、加工台に機械的方法でクランプする。被削材の保持方法の一例を図 1.10 に示す⁷⁾。

1.3.11 接着剤について

被削材の固定接着には、セラックを主成分とした超音波加工用接着剤を用いることが多い。被削材の接着固定には、接着剤の強さと加工に伴う超音波などに対する引っ張り強さ、作業性の点などからセラック系の接着剤が最も使いやすい。

接着剤は被削材と下貼りガラスの両面にこすり付け、接着面や隙間に気泡を残さないように上から前面均等に押し付け自然冷却する。接着状態を図 1.11 および図 1.12 に示す⁷⁾。

貫通加工の際には、特に下貼りガラスとの接着面にゴミなどを残さないように、また小さな気泡などを接着剤中に残さないようになるべく接着剤層の厚みが薄くなるように接着する。接着面に付着していたゴミなどによって接着剤層が厚くなったり、気泡が残ったりしておくとう加工貫通時にその部分でチッピングやカケを生ずる原因となる。接着剤層の厚みは、条件がよい場合には 0.02mm 程度にまで薄くすることができる。

接着剤の主成分であるセラックは、熱硬化性天然樹脂であるため、長時間高温で加熱すると熱硬化してしまい、後で剥がす時に困難な場合がある。また、加熱して接着することから、余り熱膨張係数の異なる材料との接着は避けた方が好ましい。特に長い材料や大きな板材に接着後、湾曲したり材料割れの原因となったりする。

1.3.12 良好な加工結果を得るための加工技術

被削材は必ず固定し、加工始めは振幅を小さくして加工する。被削材を確実に固定しないままで大きな振幅の出ている工具をいきなり被削材に押し付けたり、工具を予め被削材に押し当てておいて、発振器を起動・超音波振動を印加し、最初から大きな振幅で加工したりすることは好ましくない。

それは往々にして被削材の横滑りを起こして被削面を傷つけたり、砥粒が被加工面に充分に行き渡っていない場合には、工具が直接被加工面を打撃し、被削材の割れやカケの原因となったりする。

特に欠けやすい材料の場合、加工始めは振幅、加工圧ともに小さめにし、ある程度加工が進んだところで規定の加工条件に戻し、装置の最大能力を発揮させるようにした方が好結果を得る。貫通加工の場合、加工貫通時も同様の注意が必要である。この場合、予め似た素材の下貼り素材に被削材を接着しておき、その下貼り素材にまで充分深く加工貫通するようにすれば、貫通時の割れやカケの被害はきわめてわずかなものとなる。

加工終了後、被削材に深く食い込んだ工具を抜くには、小さな振動を工具に与えて

において、被削材から抜き去るようにすれば、被削材を傷めるようなことがなく深く食い込んだ工具もスムーズに抜き取ることができる。

十分に質量のある中実な被削材でない限り、被加工面の裏側に隙間や空間が生ずるような固定方法は避ける。それはしばしば工具の振動に伴い被削材自身をも振動させる原因となり、加工速さの低下、工具の食いつき、あるいは被削材の割れなどを生ずる。被削材の形によっては、それ自身が工具振動数と関連した振動を生ずることもある。

例えば、円板状被削材の中心や同心円状位置に対称的に加工を行う場合、往々にして被削材自身が工具加工端面を被駆動点とした径方向の共振現象を生じ（図 1.13）、工具の食いつきやカケの原因ともなる⁷⁾。その場合には、円板状被削材の裏面に不定形の厚板ガラスなどを貼り付けて、共振条件を避けるようにする。

1.3.13 工具小径化によって起こること

現時点で工具小径化について学術的、工業的に公表されている事例はかなり少ない。そこで業務としておこなっている小径穴超音波加工事例に基づいて、工具を小径化した超音波加工によって起こることを私信により述べる。

小径工具を用いるときは、通常よりも加工圧を大きくする必要がある。これは砥粒に与える槌打ち作用の効果を大きくすることである。槌打ち作用とは、超音波振動による工具の衝撃力によって、砥粒を被削材に打ちつけて微細に破砕する作用である⁸⁾。小径工具において加工圧を大きくする理由については後述する。

加工入口、出口（貫通時）には加工圧を下げる、または振幅を小さくする。これは加工入口では工具がヨコすべりなどを生じ、そのまま加工が進むことにより、加工穴が楕円になることを防ぐと同時に、加工入口側および出口側でのチッピングを抑えることを目的としている。

被削材加工途中の振幅も従来の加工よりも小さくしている。振幅を大きくしすぎると、純粋な縦振動以外の成分が発生し、工具先端部分がループを描くような振動や、工具軸方向に対して斜めの振動がみられることがある。この状態では、加工穴が楕円になったり、加工が途中で止まったりする。

加工中に揺動制御をかけ、スラリーの出入りを良くし、同時に切りくずの排出をほぼ強制的に行う。通常の超音波加工では、自然とポンピング作用が働き、スラリーの循環が行われるが、小径穴超音波加工では思うように作用せず、加工に対して工具先端面でのスラリーの入れ替えが追いつかないことが多い。揺動は頻繁におこなう。ポンピング作用とは、工具振動によるピストン運動により、スラリーを流動させ、加工部から切りくずを排除し、同時にこれに伴ってスラリーを循環させる作用である⁸⁾。

工具先端面と被削面のクリアランスと、工具外周部と加工穴側面とのクリアランスを一定に保つために、加工速さを規制する。工具先端面と被削面のクリアランスを保つのは、工具端面が被削材に直接接触することを防ぐためである。加工圧が大きすぎ、被削材が順当に加工される速さよりも工具の降下速さが速いと、工具先端と被削材の加工面が接触したり、または工具が被削材に食い込み、大きなクラックを生じたり、

座屈によって工具が折損したりする。

加工切込み速さを自然の成り行きの状態にしておくと、被削材入口の工具外周部と加工穴側面とのクリアランスよりも、工具先端付近での工具外周部と加工穴側面とのクリアランスが小さくなり、加工に作用する砥粒が工具先端に供給されにくい状態が生じる。この場合、工具側面の摩耗（アブレイブ摩耗）が促進され、工具が先細りになり、加工が停滞する。また、加工穴の途中で砥粒が工具によってこすられる状態となり、被削材中に工具径方向への大きなクラックが発生することがある。

通常は被削材を下貼りガラスに接着するが、小径穴加工の場合に接着せず機械的に下貼りガラスや加工台に圧着し、直接クランプすることもある。接着剤を用いると、加工後に下貼りガラスから剥がす時に、接着剤が加工穴に入り込み、取れなくなることがある。有機溶剤等に漬けておくと取れる場合もあるが、被削材へ影響を与えることがあり、十分に注意が必要となる。

1.4 研究目的

1.4.1 研究に至った経緯

電子機器、光学機器など各種機器の急速な発展に伴って、超精密加工技術やマイクロ加工技術もますます高精度化に向かっている。脆性材料に対して比較的小さいエネルギーで大きい割れを発生させ、発熱も殆どない効率的な加工を行うことができる超音波加工においても例外ではなく、高精度化と高能率化および他の加工技術との差別化や高付加価値化が要求されている。

ここでいう差別化とは、超音波加工の特徴のひとつである複数工具を用いた同時加工により、1箇所あたりの加工時間を大幅に削減することである。また、高付加価値化とは、加工に伴う発熱が殆ど発生しないゆえ、被削材内部の加工変質層が非常に小さいことを有効に利用し、加工後の品質低下を抑えることである。超音波加工において加工技術が向上することは、少しでも加工時間を短縮するという加工効率の向上と高品質加工が可能となることを意味する。

超音波加工全体を見渡したときに、工具の長寿命化という問題も存在する。超音波加工の特性上、砥粒の食いつきによる工具摩耗は避けることができない。加工時間が長くなると、工具摩耗量が多くなり工具変形がすすみ、加工が停滞しやすくなる。これによりさらに加工時間が長くなるという悪循環に陥る。

工具摩耗がみられるときには、工具を交換する、あるいは工具先端の摩耗した部分を研磨によって切り落とす作業が必要である。この作業をおこなった後、再度加工し始める前に、工具先端のバリ取り、工具の被削材に対する位置出しおよび加工テーブル面との垂直出しをおこなう必要があり、これが全工程からみたときに本来の加工時間以上に時間がかかる場合も多い。

従来は工具材質として、超硬合金、ハイスやステンレス鋼などを用いていた。小径穴加工（特に直径0.3mm以下）のときは、工具摩耗が激しく2穴加工するのが限界であった。工具全長は17mmであるが、座屈による折損や、工具自身の曲げ共振などの関係から、細径部の長さは1.9mm程度しかとることができない。表面をコーティングした工具を検討したが、砥粒によるアブレイブ摩耗や食いつきによる摩耗により同工具を用いることを断念した経緯もある。

以上のことから、超音波加工技術の向上と耐摩耗性のある工具の開発が必要不可欠であった。加工技術の向上のためには、加工圧（工具押し込み力）、スラリー流速、スラリー温度、スラリーの供給状態、工具先端振幅等がどのように加工に影響しているかを調べる必要がある。また、耐摩耗性のある工具の開発については、工具交換、先端研磨等に要する時間の短縮や研磨工程の排除を念頭に置き、同一工具で数多くの加工が可能となるように考慮する必要がある。

1.4.2 研究目的

本研究では、超音波加工に影響を及ぼす要因として、(1)適用周波数 (2)超音波出力（工具先端の振動振幅）(3)工具材質 (4)工具の形状と材質 (5)被削材の材質 (6)砥粒の種類と混合濃度 (7)加工液の種類などの種類があげられ、すでに報告され

ている。本研究では種々の加工条件のうち、加工圧、スラリー流速、スラリー温度などの加工条件、また、工具直径、工具先端形状、工具材質を変化させ、それらが加工効率にどのように影響を及ぼすかを調べた。これにより、従来は作業者の経験やカンに頼っていた部分を学術的に解明する。その結果から本加工技術の向上が期待される。

本研究成果により、産業界から要望の強い直径0.3mm以下の超音波加工が実現でき、1本の工具で複数穴の加工が可能となる。これは、加工時間の大幅な短縮、工具交換頻度の低下により、加工工程の短縮も見込める。また、加工に適した条件（加工圧、加工切込み速さ規制、揺動制御、スラリー流速や供給方法などのパラメータ）は他の超音波加工事例の指針ともなることが期待できる。

他の業種でもその工程に超音波加工を取り入れているところが多く、超音波加工分野のみならず、多くの技術の現場でも役立つ研究であろうと考える。

1.4.3 将来的な見通し

将来的な見通しとして、各種センサ等に用いられるサファイア、半導体製造装置に用いられる炭化ケイ素、ソーラ発電用等部品に用いられるアルミナセラミックス、DNA解析用石英ガラスなどの小径、微細超音波加工の需要がますます伸びてくることは明らかである。これらの被削材は、一般的に硬度が高いため高精度の加工が難しい。

さらに、加工後の品質にも注意が必要となる。部品内部に大きなクラックが発生・残留していると、そのクラックが部品の精度・性能を落とすことになり、一部品の精度低下が装置全体の性能を大きく左右することもある。これはクラックにより、部品表面・内部の電子移動速度が落ちることが考えられる。このような諸問題にも対応できるように、脆性破砕により発生するクラックの少ない高品質な小径穴超音波加工技術を確立しておく必要がある。

図1.3の超音波加工機を用い、クラックを抑えた加工をおこなった一例を説明する⁹⁾。加工条件を表1.3に示す。加工前工具形状を図1.14に、工具寸法を図1.15に、加工後の加工穴入口の状態を図1.16に、加工穴を横から見た状態を図1.17にそれぞれ示す。

図1.16からわかるように、穴入り口のエッジ部分にチッピングがほとんどみられずきれいに仕上がっている。加工穴入り口の大きさは $\phi 0.6\text{mm}$ である。

図1.17を見ると、工具形状がきれいに転写され、脆性加工にもかかわらず、穴径方向（写真では左右方向）への大きなクラックがみられない。従来の超音波加工機では、加工速さや切り込み深さ等の細かい制御が難しかったが、GA型超音波加工機を用いることでこのような加工が可能となった。

加工のポイントは、本加工機の特徴でもある加工切込み速さ制御にある。工具側面とそれに対向する被削材との間に生ずる工具側面方向の加工クリアランスを調整することができ、砥粒の循環が良好に持続可能な状態を作り出すことができるからである。砥粒の循環が悪ければ、加工穴の途中で工具の径方向に大きなクラックが発生したり、加工面にタテキズ様な凹凸面が発生したりする。また加工穴入り口で大きなチッピングが発生することもある。

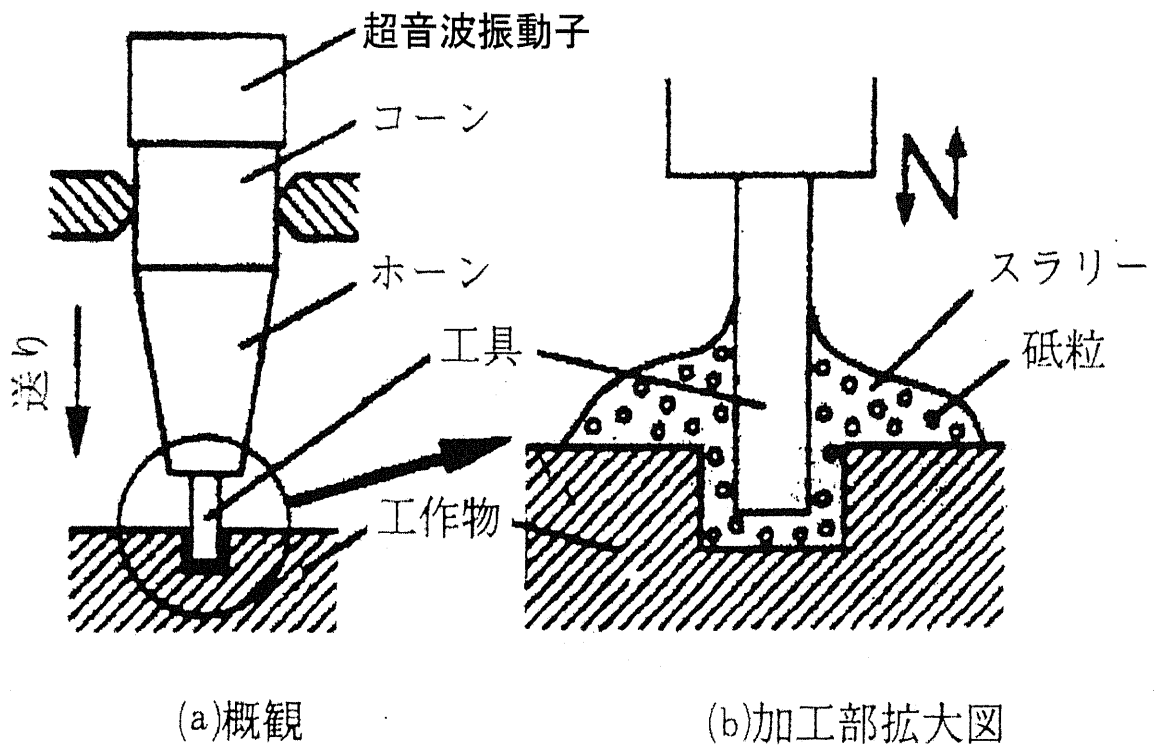


図 1.4 超音波加工原理

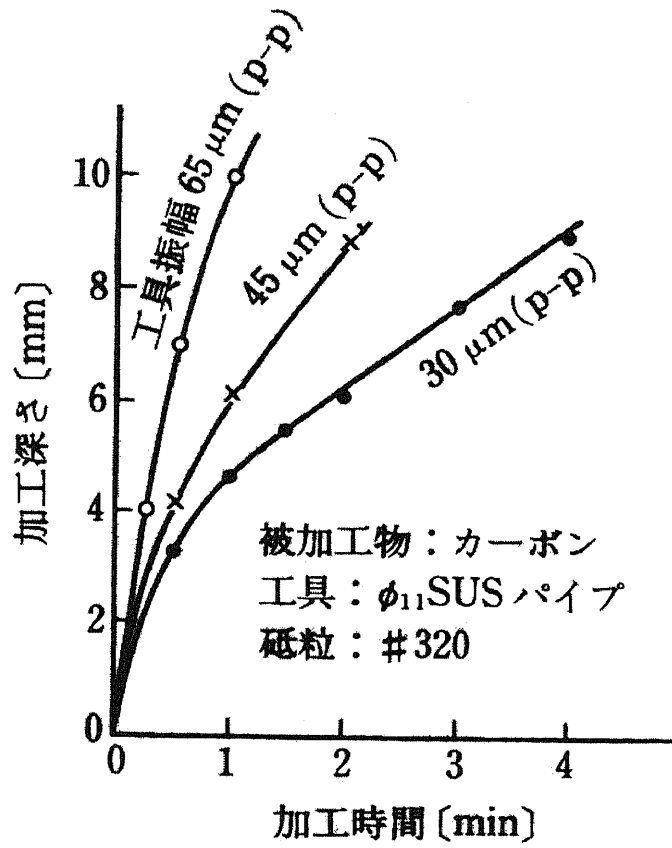


図 1.5 振動振幅と加工速さ

表 1.2 超音波加工に使用する砥粒

砥粒	硬度(ヌープ)	ダイヤモンドに対する相対的加工力
ダイヤモンド	8200~8500	1
ボロンカーバイト(B ₄ C)	2800	0.5~0.6
シリコンカーバイト(SiC)	2500	0.25~0.45
酸化アルミニウム(Al ₂ O ₃)	2100	0.14~0.16

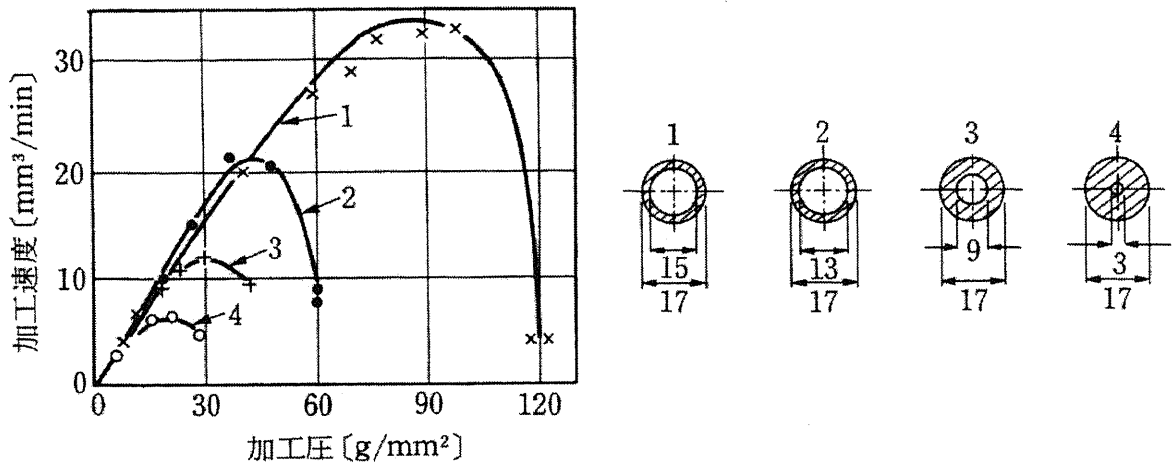


図 1.6 加工圧と加工速度

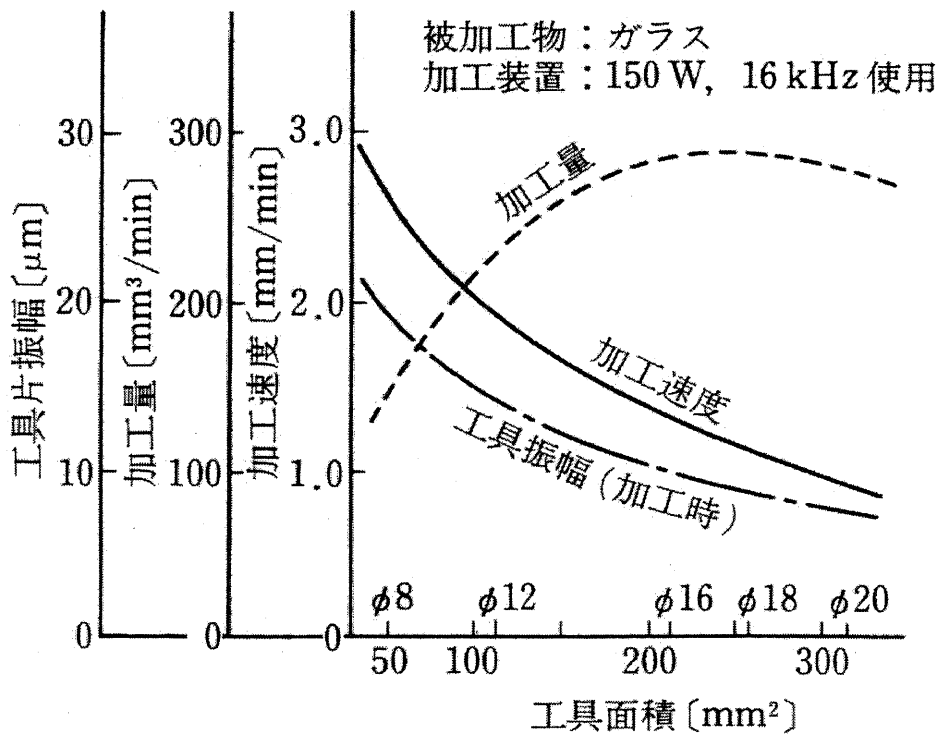


図 1.7 工具面積と加工速さ及び加工量

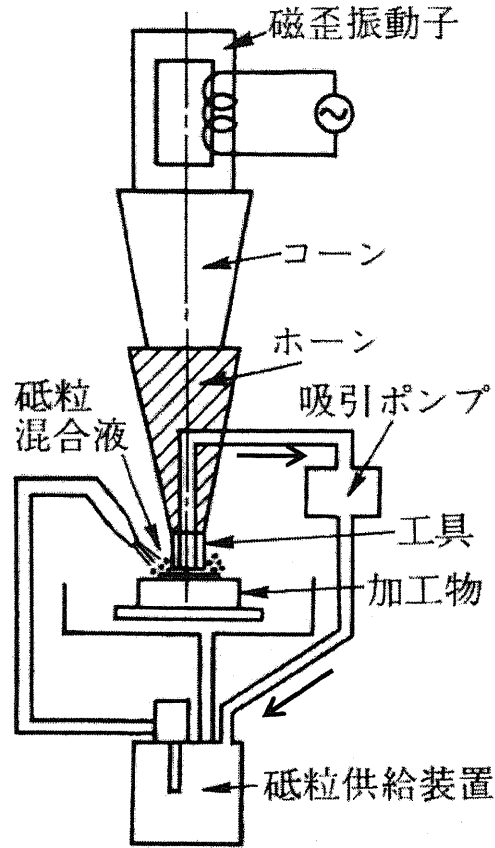


図 1.8 吸引循環方式

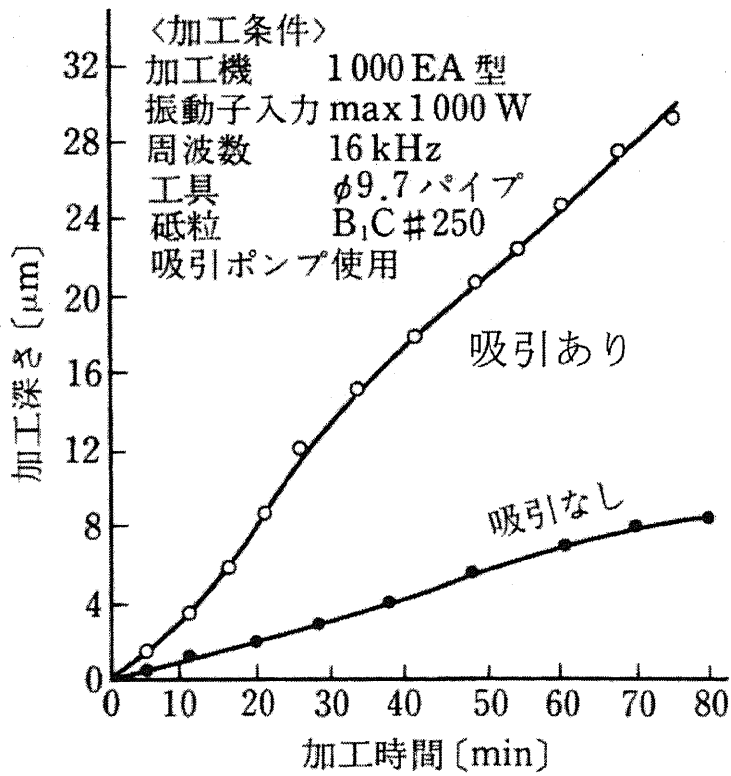
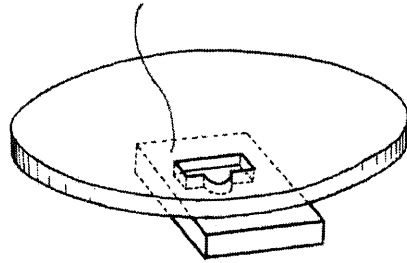


図 1.9 吸引加工特性

加工部分の裏側に厚板ガラスを接着する。



小さな被削材はガラス板等に接着する。

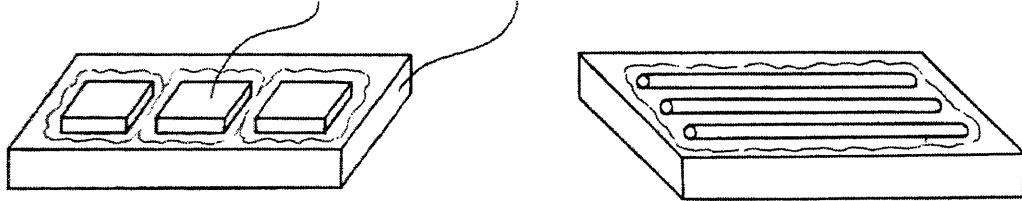


図 1.10 被削材保持方法例 1

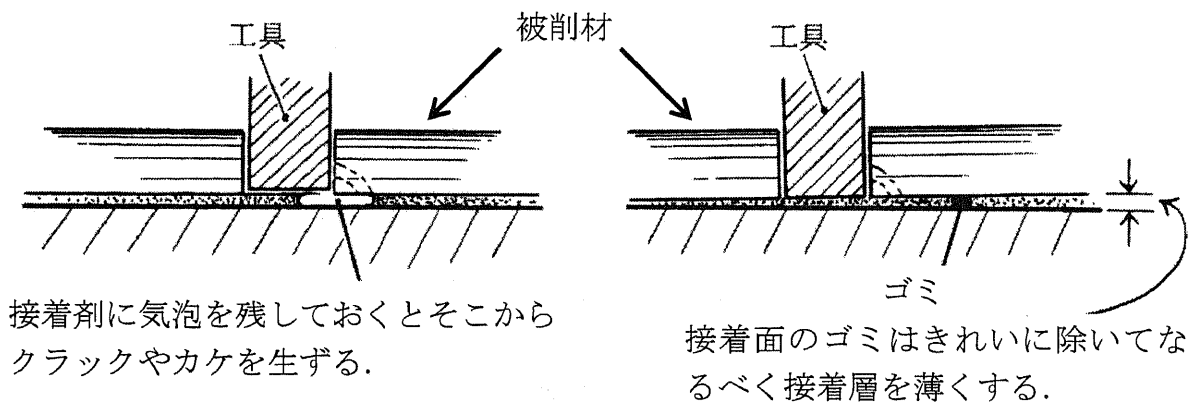
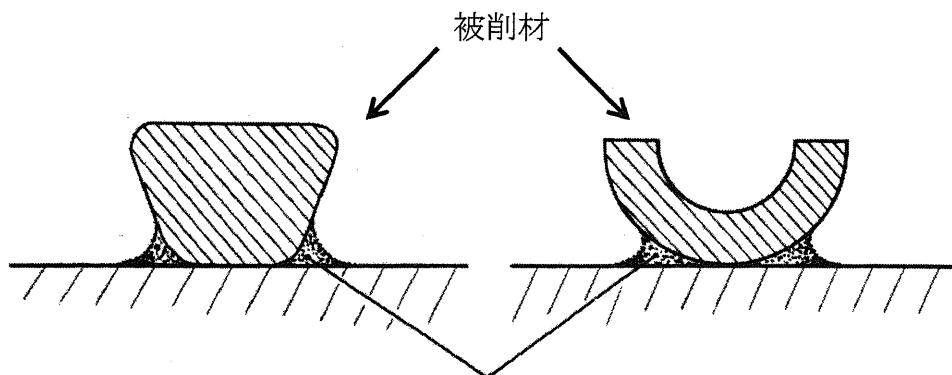


図 1.11 接着状態 1



接着剤を充分流し込んで安定に固定する。

図 1.12 接着状態 2

工具とともに被削材も振動する場合がある。

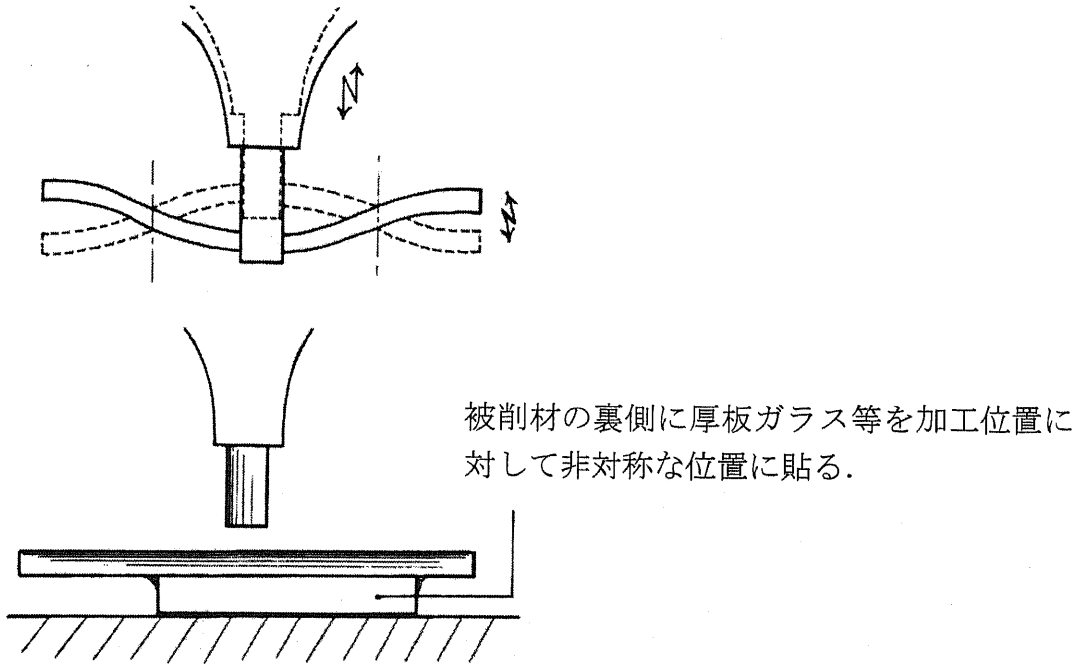


図 1.13 被削材の共振現象

表 1.3 加工条件

工具材質	PCD φ 1.0mm × l 17.5mm
被削材	ソーダガラス
砥粒	ボロンカーバイト (B ₄ C) #1200 中心粒径3 ± 0.5μm 加工液との混合比 23~25%
加工液	水道水
無負荷時の工具端振幅	約5μm _{p-p}

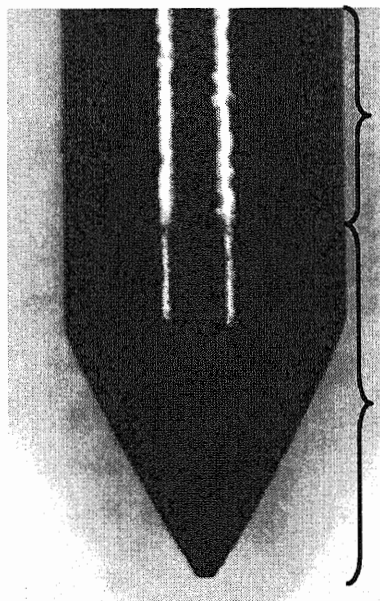


図 1.14 加工前工具形状

超硬
シャンク部

PCD部

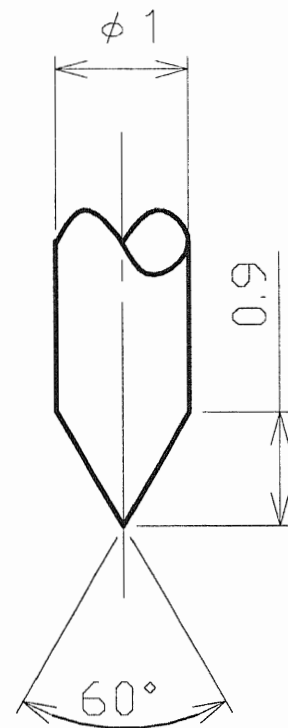


図 1.15 工具寸法

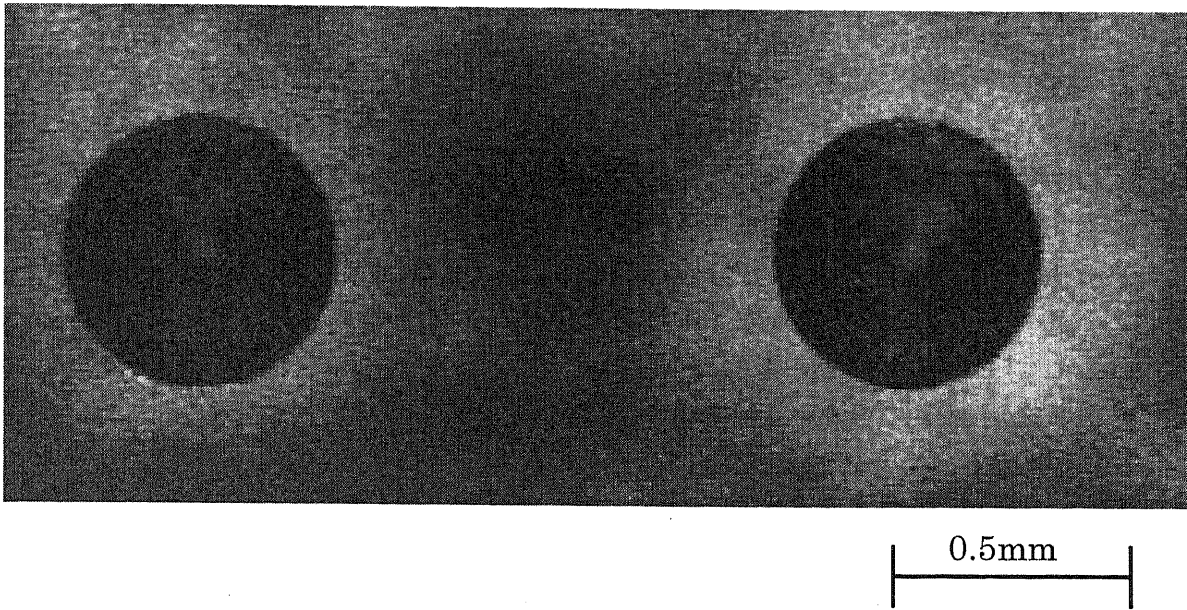


図 1.16 加工穴入口の状態

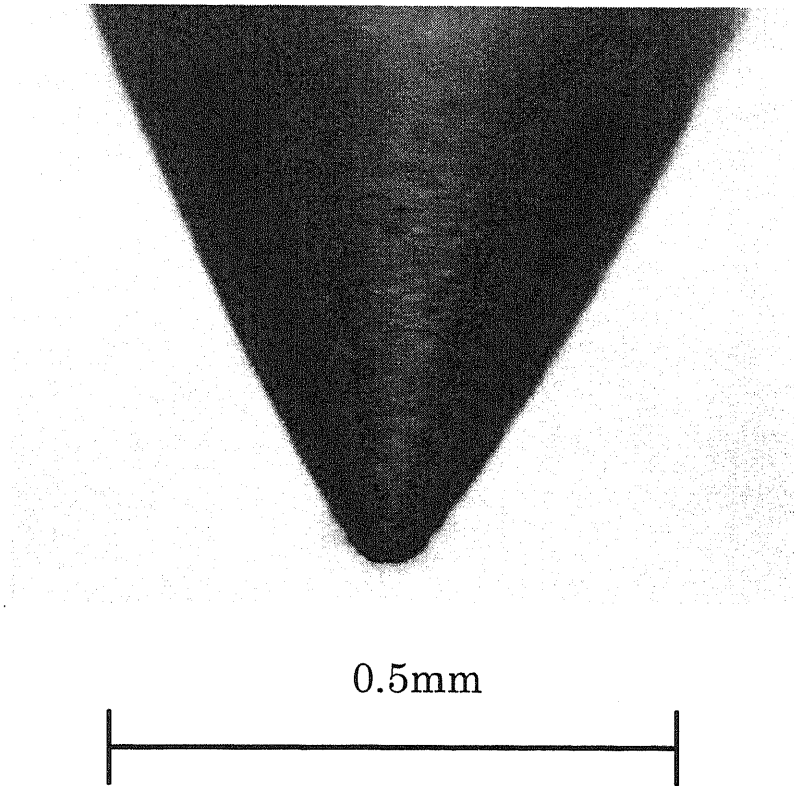


図 1.17 加工穴を横から見た状態

参考文献

- 1) 日本電子機械工業会:超音波工学, コロナ社, (1993)
- 2) 島川正憲:超音波工学(-理論と実際-), 工業調査会, (1975)
- 3) 楡井耕次:セラミックスの超音波加工, FINE CERAMICS REPORT, 19, 8(2001)196.
- 4) D. Blanck: Influence of working conditions on the rate of stock removal in ultrasonic drilling, Microtecnic 16, 5(1962) 189.
- 5) T. B. Thoe, D. K. Aspinwall and M. L. H. Wise: Review on ultrasonic machining, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 38 4(1998) 239.
- 6) V. F Kazantsev: Improving the output and accuracy of ultrasonic machining, Machines and Tooling, 37, 4(1966)33.
- 7) 日本電子工業株式会社: 超音波加工の手引き
- 8) 西村源六郎: 振動工学, 誠文堂新光社, (1969).
- 9) 田中信一: NC 超音波加工機と微細加工の実際, ツールエンジニア, 46, 2(2005)
94

1.5 本論文の構成

本論文は、焼結ダイヤモンド（PCD）工具を用いた小径穴超音波加工において、加工の高能率化を実現するための諸問題を取り上げ、超音波加工の加工効率に影響を与える加工圧、スラリー流速・温度等の要因を変えたとき、加工精度に影響を与える工具材質および工具形状を変えたときに、加工速度がどのように変化するかを実験的に解明したものである。また、従来の超音波加工の領域ではその影響が考えられていなかった要因についても考察した。

全10章で構成されており、以下にその概要を示す。

第1章 緒言

1.1 超音波加工の歴史として、1950年から今日まで、その時代に主にどのような工業分野でどのような素材に対して超音波加工が利用されてきたのかを述べている。

1.2 超音波加工装置の概要として、超音波加工装置の構成および各部の説明をしている。

1.3 超音波加工特性として、超音波加工の原理から実際に工業的に超音波加工を施すときの加工特性について詳しく述べている。また、従来の小径穴超音波加工において実際に起こった事柄、対策についても述べている。

1.4 本研究の目的として、研究に至った経緯、研究目的、今後需要が伸びてくると予想される微細穴加工の見通しや、それに対応するための具体的な加工例を示している。

第2章 実験方法

2.1 GA型超音波加工機および付属装置についてとして、本研究で用いた超音波加工機およびその周辺の研究環境について述べている。

2.2 工具についてとして、本研究で用いたPCD工具についての説明、および工具を小径化するための超音波ねじり振動研削装置、同装置を用いて成形した工具形状について述べている。

2.3 超音波加工振動系についてとして、本研究で用いた振動系の特徴、導入のいきさつを述べている。

2.4 加工力測定用治具についてとして、加工力を測定するため、加工台への超音波振動の伝播の極めて少ない治具について述べている。

2.5 圧電セラミックスについてとして、加工力を測定するために用いた圧力センサの特性評価および校正について述べている。

その他に、形状測定に用いた測定装置、被削材、加工液、振動振幅等の加工条件について述べている。

第3章 加工圧の影響について

3.1 脆性破壊のメカニズムについてとして、一般的な脆性破壊とはどういうことなのか、加工単位が異なるとどのようなことが考えられるかについて、過去の論文の内容も含めて述べている。

3.2 槌打ち作用とポンピング作用についてとして、超音波加工に大きな影響を与える2つの作用について述べている。

3.3 加工圧の影響についてとして、工具直径 1.0mm から 0.3mm に変化させたときの加工圧と加工速さの関係を述べている。

第4章 スラリーの影響について

4.1 スラリ一流速の影響についてとして、工具直径 1.0mm から 0.3mm に変化させたときの加工速さとスラリ一流速の関係を述べている。また、そのとき用いた工具の摩耗の状態についても考察している。

4.2 スラリー温度の影響についてとして、スラリー温度が超音波加工にどのように影響を与えているかを述べている。

第5章 工具先端形状の影響について

5.1 面取り角度と加工速さの関係として、面取り角度を変え、さらに加工深さを変えて加工したときに、それが加工速さにどのように影響を与えているかについて述べている。

5.2 面取り角度とチップングの大きさの関係として、面取り角度によって、加工穴のチップングがどれだけ大きくなるかについて述べている。

5.3 加工時間と加工穴径の関係として、面取り角度を変えることによる加工時間の増大が、結果として加工穴径にどのように影響を与えているかについて述べている。

第6章 工具材質別超音波加工特性について

6.1 超硬工具における工具摩耗とその加工穴への影響についてとして、超硬工具を用いて超音波加工をおこなったときの工具摩耗量、および工具摩耗による加工穴の変形について述べている。

6.2 PCD 工具における工具摩耗とその加工穴への影響についてとして、PCD 工具を用いて超音波加工をおこなったときの工具摩耗量、および工具摩耗による加工穴の変形について述べている。

6.3 工具材質が及ぼす種々の影響についてとして、工具直径を 1.0mm から 0.3mm に変化させ、工具材質が異なったときの加工圧の違いや加工速さの違い、さらに加工後の工具摩耗状態について述べている。

第7章 加工力測定について

- 7.1 過去の加工力測定についてとして、過去におこなわれた研究内容を述べている。
- 7.2 ソーダガラスと石英ガラスの加工特性比較として、加工速さ、最適加工圧、工具摩耗量、1穴加工中の微妙な加工速さの変化について、被削材別に述べている。
- 7.3 加工力変化についてとして、超音波振動1周期から加工全体までの加工力の変化および最大加工力について述べている。

第8章 工具直下に発生するキャビテーションの影響について

- 8.1 キャビテーションとはとして、キャビテーションの説明を述べている。
- 8.2 工具先端の状態として、キャビテーションによるかい食の影響、実際に超音波加工をおこなったときの工具摩耗による影響について述べている。
- 8.3 キャビテーション痕についてとして、工具直径を4.9mmから1.0mmまで変化させたときの工具先端のキャビテーションによる被削材への影響について述べている。
- 8.4 加工面の状態についてとして、工具直径を5mmから0.3mmまで変化させたときの加工面の面粗さから、キャビテーションと超音波振動によるポンピング作用が加工面にどのように影響を与えているかについて述べている。

第9章 微細穴超音波加工への展望

- 9.1 加工圧についてとして、微細穴超音波加工をおこなう場合の加工圧の設定およびその制御について述べている。
- 9.2 振動系についてとして、工具長さやその形状、振動振幅について述べている。
- 9.3 スラリーについてとして、微細穴超音波加工でのスラリー供給方法について述べている。

第10章 結論

- 10.1 まとめとして、本研究で得られた成果を各章ごとにまとめた。
- 10.2 今後の研究課題として、残された研究課題について述べている。

以上全10章にて構成されている。

1.6 第1章の総括

第1章 緒言をまとめると次のようになる。

1927年に発見され、1950年代から工業的に実用化され、今日に至るまでその時代の社会の要求を満足することができるような硬質脆性材料に対して、超音波加工が多用されてきた。時の移り変わりとともに、材料およびそれらに対する加工内容が多様化している。その形状や加工寸法の高精度化と微細化への要求が非常に強く、例えば直径0.1mmから0.3mmの微細穴領域への対応が求められている。

これらの加工に対しては、従来どおりの加工の延長と捕らえることが難しく、小径化した工具を用いたときの加工現象が明らかになっていない。さらに、高精度な加工をおこなう場合の加工条件や加工環境がわかっていない。よって、作業者が手探りの状態で加工しているのが現状である。そこで、私信により公表されている事例が少ない工具小径化によって起こることについて説明した。

高精度化と高能率化および他の加工技術との差別化や高付加価値化を実現するため、現時点における問題点を提起し、それを解決するためには何を明らかにする必要があるかという研究に至った経緯を述べた。加工条件（加工圧、スラリ流速・温度）工具直径、工具先端形状、工具材質等の超音波加工に影響を及ぼす要因と小径穴加工領域での超音波加工現象を明らかにすることを研究目的とする。

第2章 実験方法

2.1 GA型超音波加工機および付属装置について

2.1.1 GA型超音波加工機について

本研究は図1.3に示したものと同一の超音波加工機を用いた。本加工機は、硬質脆性材料への任意形状の加工をおこなうことが可能である。本加工機の仕様および性能を表2.1に示す。本仕様は、おもに複合パイプ状工具によってセラミックス素材からの肉厚パイプ状、円柱状形態の切り出し、あるいは穴加工を目的としたNC自動化タイプの超音波加工機であり、微細形状加工にも対応可能である。

同加工機の基本的特徴を以下に示す。

- (1) 硬質脆性材料の精密加工に向いている。ガラス、貴石、宝石、陶磁器、半導体、焼結材料のように硬くて脆い材料の穴あけ、切り抜き、切断、彫刻などの加工に好適である。
- (2) 異形加工も容易である。工具を回転する必要が無いため、工具断面形状そのままの異形穴の精密加工も熟練を要せずにできる。
- (3) 加工精度が高く、きれいな仕上がり面が得られる。加工精度は主に工具の寸法精度と使用砥粒により決まるが、5/100~10/100程度に保つことは比較的容易である。
- (4) 工具材には軟鋼、硬鋼、ステンレス鋼、焼き入れ鋼など普通の鋼材でよく、高価な特殊材料を必要としない。
- (5) 取扱操作は非常に簡単で初心者でも操作できる。

さらに、NC制御により以下に述べる性能も有している。

- (1) 加工送り[工具の送り込み:Z軸]機構に高感度な平衡天秤型加圧方式を採用している。加工に好適、残留クラックの小さい均質な加工面を創生できる。
- (2) 工具の送り込みに送り込み速さ制御機構を採用している。自然な成り行き加工と送り込み速さ規制加工の両用が可能である。これは加工出入口のチッピング減少に有効である。
- (3) 加工深さ定寸機構付きで、最小読み取り1/1000mmである。工具長手方向摩耗量を逐次キャンセルし、工具端の実質切り込み深さを常に一定に維持できる。
- (4) 振動子入力パワを常時計測表示する。加工条件設定が容易である。
- (5) 加工送りストローク最大100mmであり、砥粒吸引型ポンプとの併用により深穴加工が可能である。
- (6) 加工テーブルのX-Y送りは、Z軸の動きと連動可能でNC可されている。
- (7) 振動子入力パワの調整、砥粒供給、吸引のタイミング等をZ軸の動きと連動している。様々な加工工程のプログラムをプリセット可能とし、熟練作業者と同等の最高の加工条件を設定することが容易である。

よって、研究目的を達成するに十分な機能および性能である。

2.1.2 レーザ変位計について

加工時間経過に対する加工切込み深さ変化を調べるため、レーザ変位計センサ（キーエンス製：LB-60）をこの加工機に取り付けた。応答時間 20mS に設定したときの分解能は 40 μ m である。レーザの反射板は、普通の鉄板に乳白色の塗装を施したものを用了。反射板に粗さが多少みられることと外部からの光の反射の影響もあって、測定結果には多少の誤差がみられた。

加工中は振動系のみが上下（Z 軸方向）に移動するため、センサと振動系の相対距離を測定し、PC カード型データ収集システム・オシロスコープタイプ（キーエンス製：NR-350）にて振動系の移動量つまり加工切込み深さを測定した。

2.1.3 スラリー温度管理について

スラリーの温度管理の概略を図 2.1 に示す。スラリーの供給用タンクをそれよりもひと回り大きいステンレス製の容器に入れ、その容器内を水道水で満たした。室温よりも低温側では、容器の中に氷を入れ間接的にスラリー温度を下げた。室温よりも高温側では、投げ込み型電気ヒータおよびヒータを制御できる温度センサによりその外側容器の水道水を加熱することで間接的に温度を上げた。

2.1.4 スラリー供給状態および流速について

スラリーはノズルからの吐出液が、工具先端に直接かからないように供給した。スラリーが被削材に供給される地点と、工具との間隔を約 20mm とした。そのスラリー供給の様子を図 2.2 に示す。また、被削材上に 2 枚の樹脂性のジャマ板を平行に置き、その間にスラリーを供給することで、スラリーの流れが一方向になるようにした。

スラリー流速は図 2.3 のような近似的モデルで考えた。W=50mm, h=1.0mm になるようにスラリー供給配管バルブを操作し、流量を制御した。また、単位時間当たり供給されるスラリーの量をビーカーで計量し、これによりスラリー流速=流量/流路断面積で求めた。

2.1.5 加工圧について

加工圧は、図 1.3 に示す加工用重りの増減により調整した。

2.2 工具について

2.2.1 焼結ダイヤモンド工具について

1.4.1 の研究に至った経緯で触れたことだが、従来から超音波加工に用いられていた工具材の多くは、ステンレス鋼、超合金等であるが、工具摩耗が大きく、工具としての寿命が短い。工具の長寿命という課題をクリアするには、焼結ダイヤモンド（以下 PCD）工具を用いるとよいことが報告されており、本研究においても確認している¹⁾。PCD 工具の小径化・微細化の成形方法^{2) 3)}、および PCD 工具を用いた超音波加工の報告もある⁴⁾。

それらをまとめると次のような内容である。

直径 0.3mm 以下の硬質脆性材料の穴あけ加工に使用されている微小径工具は、電着による棒状ダイヤモンド工具が多い。それは摩耗により短寿命であるが故、ライン上での量産には不向きで、大量生産向けの長寿命工具の開発が急務である。寿命の観点から PCD 工具が最適であるが、直径 0.3mm 以下のものは実現していない。そこで直径 0.3mm 以下の PCD 工具を用いた超音波加工を実現するために、まず研削抵抗を小さく抑えることができる超音波ねじり振動研削装置を用いた。ダイヤモンドホイールによる円筒トラバース研削により PCD 小径工具を実現した。超音波ねじり振動研削装置については後述する。

被削材としての PCD 工具の寸法を図 2.4 に示す。これはエレメントシックス製で直径 1.0mm、長さ 16mm の棒状超硬合金材の先端に直径 1.0mm、長さ 1.0mm の焼結ダイヤモンドが接合されているものである。なお、本研究もこの PCD 工具を用いた。

同装置を用いることにより、直径 1.0mm の PCD 工具を最終的には直径 0.075mm にまで微細径とすることが可能となった。その工具を図 2.5 に示す。このときの製作時間は約 16 時間であり、効率的加工がおこなわれたとは言にくい。

また、同装置により工具材質が PCD、超硬合金、ステンレス鋼のものを工具直径 0.2mm に加工し、ソーダガラスに対して超音波加工を施した。そのときの工具写真を図 2.6 に示す。PCD 工具で 40 穴、ステンレス鋼、超硬合金でそれぞれ 3 穴加工したときの摩耗状態を示している。その結果、PCD 工具は超硬合金工具およびステンレス鋼工具に比べて、摩耗長さの比較で約 200 倍の寿命であり、摩耗形状を考慮し、重量比で考えるとさらに寿命の比は大きくなる可能性があり、充分実用に耐えうるとしている。材質別工具先端部摩耗量の比較を図 2.7 に示す。

同装置を用いた研削方式による工具小径化以外にも、超音波振動研削⁵⁾や放電加工^{6)~9)}によって工具径を微細化する方式もある。さらにここでは詳細は述べないが、平成 14 年度および 15 年度に東京都産業技術研究所との共同研究によって、同工具を最終的に直径 15 μ m にまで微細化した実績がある。

2.2.2 超音波ねじり振動研削装置について

本研究の小径工具は、全て超音波ねじり振動研削装置を用いて製作した。超音波ねじり振動研削装置の概観を図 2.8 に、装置構成図を図 2.9 に示す。また、ダイヤモンドホイールを用いた超音波ねじり振動のイメージを図 2.10 に示す。本装置は平成 11 年度東京都地域産業集積活性化研究開発費等補助事業によって小玉ら^{2)~4)}によって開発されたものである。

レビン社製の卓上小型旋盤の刃物台に、超音波ねじり振動をするグライディングアタッチメントを装着したものである^{10)~12)}。超音波共振周波数は 18.3kHz、最大出力 50W、無負荷時ホイール振幅は約 40 μ m_{p-p}である。研削用ダイヤモンドホイールは、外径 30mm、内径 24mm、厚さ 3mm で、半波長共振ホーンの先端に接合されている。ホイールは、粒度#400 のビトリファイドボンドのダイヤモンドホイールを用いた。

研削方法は、被削材片持ちのトラバース研削であり、ホイールの送りは手動である。また、変形や折損を防ぎ、研削状態を把握するために、顕微鏡で加工点を観察しながら乾式による研削をおこなった。実際のPCD工具の切削に際して、同工具の保持には超合金側をコレットチャックによっておこない、コレットチャックからの突き出し長さは常に7mm一定とした。

被削材とホイールの回転外周速度は、それぞれ約3.45m/min, 73.5m/minが良好な研削効率が得られる速度であるという報告がある⁴⁾¹²⁾が、実際は研削の状況をみながら、その都度回転外周速度を変えた。

1回の切り込み量は約5 μ mであるが、被削材の直径が0.4mm程度になると被削材先端の振れが大きくなるため、それ以降の切り込み量は、被削材の変形を観察しながら極微量ずつの切り込みにした。仕上りの直径寸法は、顕微鏡中のスケールおよびデジタルマイクロメータによって確認した。同装置を用いて製作した工具例を図2.11に示す。細径部直径0.3mm, ストレート長2.0mmである。本研究では、工具直径0.3mmまでの小径化については、同超音波ねじり振動装置によりおこなった。

2.2.3 工具形状について

工具を小径化したときの工具形状（例えば直径0.3mmのとき）を図2.12に示す。太径部直径と細径部の接続部分は、断面変化が緩やかになるように大きなR曲線で接続した。これは実際に超音波加工で用いられている工具形状である。他の工具直径、他の工具材質についても同様の形状にした。製作時間は1本あたり約8時間である。

加工が進むにつれて、工具先端のエッジが摩耗し丸みを帯びてくる。そこで、工具端摩耗による影響を調べるために、工具端面に面取りを施したPCD工具を用意し加工実験をおこなった。工具端面の面取りの有無およびその面取り角度によって、加工速度に違いが生ずるかを調べた。

面取りの定義および面取りした工具の一例を図2.13に示す。製作した工具の面取り角度の値を表2.1に示す。面取りをつけていない工具は $\theta=90^\circ$ とした。加工を繰り返していくと、工具先端のエッジは丸みを帯びたまま長手方向に摩耗が進み、工具長さが短くなる。摩耗が進んでも工具先端は鋭角にはならない。そこで面取り部分の軸方向の長さは最大0.15mmとした。

2.3 超音波加工用振動系について

本研究に用いた振動系の共振周波数は25kHzで統一した。図1.4で示されるコーンは、材質S45C、直径18mmの半波長ストレート丸棒タイプを用いた。振動振幅拡大はしていない。

超音波加工装置においては、超音波加工用工具を超音波加工用ホーンに取り付けるための手段として、ロー付けが一般に用いられている。しかしながら、このロー付け手段は、その取り扱いが極めて面倒であるという致命的欠点がある。すなわち、超音波加工を繰り返していくと、工具先端部は摩耗し、加工能率が低下または工具が短くなって加工が停滞することから、ある程度工具が摩耗すると交換している。ところが、

工具の固定方法がロー付けの場合，その交換作業に手間がかかる．そこでロー付け手段に代わる工具固定機構として，工具の着脱を容易にする目的から割締め手法¹³⁾を用いた．この割締め手段によるホーンを図 2.14 に示す．このホーンは SUS304L 材を用いて製作した．

図に示すように，ホーンに工具の後端部を挿入するために穴，およびこの穴を二分割する割溝を設けてある．この割溝の溝面に対して，直行方向の 1 個のボルトによって工具を固定するものであるので，ロー付け手段に比べれば遥かに工具の交換作業性はよい．

ボルト 1 個で十分に工具が結合されるように，工具挿入部を 2 分割するような具合に奥行長が異なる形状に工作してある．これにより，保持部材によって工具がホーン挿入部に保持された際，工具には超音波の伝達が阻害されることのない程度にホーンに密接して保持されている．そして工具とホーン間の一体的結合が可能となり，超音波加工が能率よくおこなわれ，また工具交換作業はスムーズにできる．

2.4 加工力測定用治具について

通常の超音波加工では，被削材を加工台に直接機械的手法（例えばクランプするなど）で固定している．この状態では，砥粒に与えられた振動エネルギーは，穿孔エネルギーとして加工に費やされる以外に，その一部は被削材を通して加工台に伝えられ，散逸する場合も考えられる．そこでエネルギーの散逸を可能な限り減らすことができるように，超音波彫刻機における振動勢力散逸防止方式¹⁴⁾を改良した支持方法¹⁵⁾による治具を製作した．その治具を図 2.15 に，ロー付け組み図を図 2.16 にそれぞれ示す．

材質 SUS304L で製作した柱状反射体はフランジを有し，真ちゅうスリーブおよび材質 SUS304L で製作した固定枠にロー付けによって保持され，その側面および底面の部分は空気に接している．

この方式の場合，参考文献¹⁴⁾によると，柱状反射体の長さを l ，反射体中の音波の波長を λ とすると，被削材の厚みが振動系の波長に比べて充分小さいとき，

$$l = \frac{\lambda}{4}(2n+1) \quad (n \text{ は整数}) \cdots (1)$$

の場合，反射体上端部（加工物を乗せる面）からみた音響インピーダンス Z は，

$$Z = j \infty \cdots (2)$$

となる．これにより上端部の受ける振動エネルギーは反射体内部に伝播せず，専ら加工のみに有効に費やされることになり，加工能力および能率を著しく増大することができる．

加工力を測定するために，後述する圧電セラミックスを反射体の上端部に瞬間接着剤を用いて密に固着した．さらに圧電セラミックスの上に，被削材を同接着剤により密に固着した．

よって，接着層での振動エネルギーの伝送損失は考えられるものの，被削材を加工する振動エネルギーのほとんどを圧電セラミックスで検知することができる．

2.5 圧電セラミックスについて

2.5.1 応答速度測定について

加工力測定で用いた圧電セラミックス（以下圧力センサとする）を用いるにあたりその特性を調べた。センサの形状は、 $\square 30\text{mm}$ 、厚さ 1mm 、電極が端から取り出してある。プレジジョンインピーダンスアナライザ（HP 製：4294A）により、共振周波数を測定したところ、 $1.35 \pm 0.03\text{MHz}$ であった。

さらにセンサの応答速度を調べる目的で、2.4 で述べた加工力測定用治具にセンサを瞬間接着剤で固着し、被削材面上よりベアリング用の鋼球を自由落下運動させ、センサに衝撃力を与えた。2.1.2 で述べた PC カード型データ収集システム・オシロスコープタイプにて、センサからの出力電圧をセンサの歪みが自然に回復するまで記録した。

鋼球の質量 4.079g 、センサからの距離 41mm の条件で、自由落下運動させたときのセンサの応答を図 2.17 に示す。オシロスコープのサンプリング周波数は 25MHz とした。このときのセンサの応答周期は 0.12msec （約 8.3kHz ）であった。この実験は、各センサについて 10 回繰り返し、再現性を確認した。

本研究で用いる超音波加工振動系の共振周波数は 25kHz であるから、オシロスコープのサンプリング周波数を 500kHz （1 周期中で 20 点測定）にすることで充分対応でき、加工力の変化も記録できる。

2.5.2 出力電圧と負荷圧力の関係について

センサに圧力を加えたときの負荷と出力電圧の関係を調べる目的で、次のような実験をおこなった。

コンプレッションゲージ（置針式）を用いてセンサの校正をおこなった。一定の力で止まるストッパーをゲージに取り付け、センサの上に静かに置き、短時間（結果的に約 2msec ）で負荷を加えたのち、ゲージを取り外した。このときのセンサからの出力電圧をオシロスコープで記録し、負荷と出力電圧の関係を求めた。負荷（センサに対する圧縮）に対して正の電圧が得られるようにした。

20N の負荷をかけたときの時間に対する出力電圧の変化を図 2.18 に示す。 1.1msec から 3.1msec の負荷がかかっている間は、徐々に出力電圧が上がり、ゲージを取り外した瞬間から、センサの復元力により出力電圧が下がる。そして、正の出力電圧とほぼ同じだけの負の出力電圧が検出される。このとき、約 3.6msec のところに小さな山がみられるが、これは接着層による影響と考えられる。最終的には元の状態に戻る。この実験は各センサについて、各負荷で 30 回繰り返した。

一連の実験より、これらの関係とセンサの負荷に対する出力電圧の関係式から求まる計算値を比較したものを図 2.19 に示す。電極からの配線の都合上、センサの形状は計算で用いる理想形状と多少異なるため、実験値は計算値よりも多少高めになった。以後の加工力の測定では、この実験値からもとまる関係式を用いることとした。

圧力センサで検知した超音波加工による被削材の抵抗成分は、センサからの出力電圧としてオシロスコープにより計測される。この計測された出力電圧を力に置き換え、

本研究ではそれを加工力と定義する。

2.6 形状測定について

加工穴形状および工具形状は、走査型電子顕微鏡および三次元測定機（ミットヨ製：QVPAK Ver. 1.401）でおこなった。

加工穴底面の形状については、表面粗さ形状測定機（東京精密：サーフコム 550AD，ミットヨ製：SurfTest SJ-401 Ver2.1）にておこなった。

加工穴の大きさは、各加工穴の外周部上において、チッピングも含めて約 100 箇所を測定し、最小自乗法により加工穴径を求めた。

2.7 その他加工条件について

被削材はソーダガラス，石英ガラスの2種類とした。

加工液は水道水とした。使用した砥粒は B_4C の#600（中心粒径 $9.6\mu\text{m}$ ），加工液との混合比は23～25%とした。スラリーをゲージつきビーカにとり，1日放置して砥粒を沈殿させ，その体積比をもって混合比とした。

無負荷時の工具先端振幅は約 $10\mu\text{m}_{p-p}$ とした。これは各加工実験前に無負荷時に工具先端振幅を顕微鏡で確認した。

加工深さは1.0mm，1.2mm，1.5mmとそれぞれの状況によって変化させた。また加工穴数は，各条件下で5または10穴とした。

2.8 第2章の総括

第2章 実験方法をまとめると次のようになる。

本研究に用いた超音波加工機の性能および特徴，加工切込み深さ変化を調べるレーザ変位計，スラリー温度管理，スラリー供給状態および流速，加工圧について説明した。また，過去におこなわれた研究内容にも触れた上で，本研究に用いたPCD工具の関連事項について説明した。

本研究に用いた共振周波数は25kHzとし，工具交換作業性がよく，超音波の伝達が阻害されることのない程度に工具が保持される割締め手法を用いたホーンについて説明した。

砥粒に与えられた振動エネルギーを可能な限り穿孔エネルギーとして加工に費やし，そのときの加工力を測定することができる加工力測定用治具の形状を述べた。この治具と同時に用いる加工力測定用の圧力センサ自身の特性を調べた。センサ自身の共振周波数は $1.35\pm 0.03\text{MHz}$ であった。出力電圧と負荷圧力の関係から，負荷圧力に対して出力電圧はほぼ比例関係にある。

その他に，形状測定に用いた測定機器，加工条件について述べた。

表 2.1 超音波加工機の仕様および性能

1. 加工装置			
①振動子	ニッケル磁歪水冷タイプ 入力 500W 共振周波数 16kHzまたは25kHz	⑧砥粒供給装置	壺型渦巻きポンプ、連続循環式 タンク液量：16ℓ 吐出量 24ℓ/min [50Hz] 32ℓ/min [60Hz] 揚程：3m [50Hz]・4m [60Hz] 【オプション】 【砥粒液吐出“ON”“OFF”用電磁弁〔空圧併用〕を設ける】
②加工送り	[Z軸微動] 平衡天秤式 最小設定単位：1/1000mm ストローク：100mm 切り込み速さの規制制御機構組み込み ※1 工具進入時あるいは貫通時のチッピング低減と被削面も均質化等のため	⑨振動子冷却装置	クーラント別置き 発振器出力回路とインターロック付設
③加工圧	加圧用おもり付加による	2. 制御操作部	
④アーム上下動	[Z軸粗動] 電動機駆動による ストローク：400mm以上	①発振器	出力：500W 周波数：16kHzあるいは25kHz 発振周波数自動追尾
⑥加工台	SUS厚板製 マグネット吸着可 工作物の設置有効範囲：200×200mm ※2 工具の位置決め用に加工台上の基準位置に設けたL型の突き当てと工具間には、タッチセンサ機能[突き当てに工具が接触すると電子音を吹鳴]を装備	②超音波電力計	[発振器出力測定装置]
⑥X-Yテーブル	各軸パルスモータ駆動 移動量 X [左右方向] 400mm Y [前後方向] 250mm	③Z軸制御	切り込み深さ寸機構、深さ設定表示、切り込み速さの制御等
⑦θ軸	工作物ならびにX-Y送り方向に対するホーン工具の向き[θ軸]の補正用 θ軸の補正は、振動子の回転とX-Yテーブル下のθテーブルの微調整によりおこなう 【オプション】 【θ軸の補正には、ホーン太端側面に基準面を設けておき、θ軸の調整、位置の検出をレーザーセンサにておこなう】	④X-Y軸送り量、設定表示、NCコントローラ等	上記をラック組み込み一体化
		3. 電源	3φ 200V 50/60Hz ※3 振動子冷却装置クーラント用 [100V、13A]の電源は含まない
		大きさ	加工装置：幅910、奥行1,580、高2,330 (n) 重量780kg 制御盤：幅570、奥行630、高1600 (mm) 重量180kg

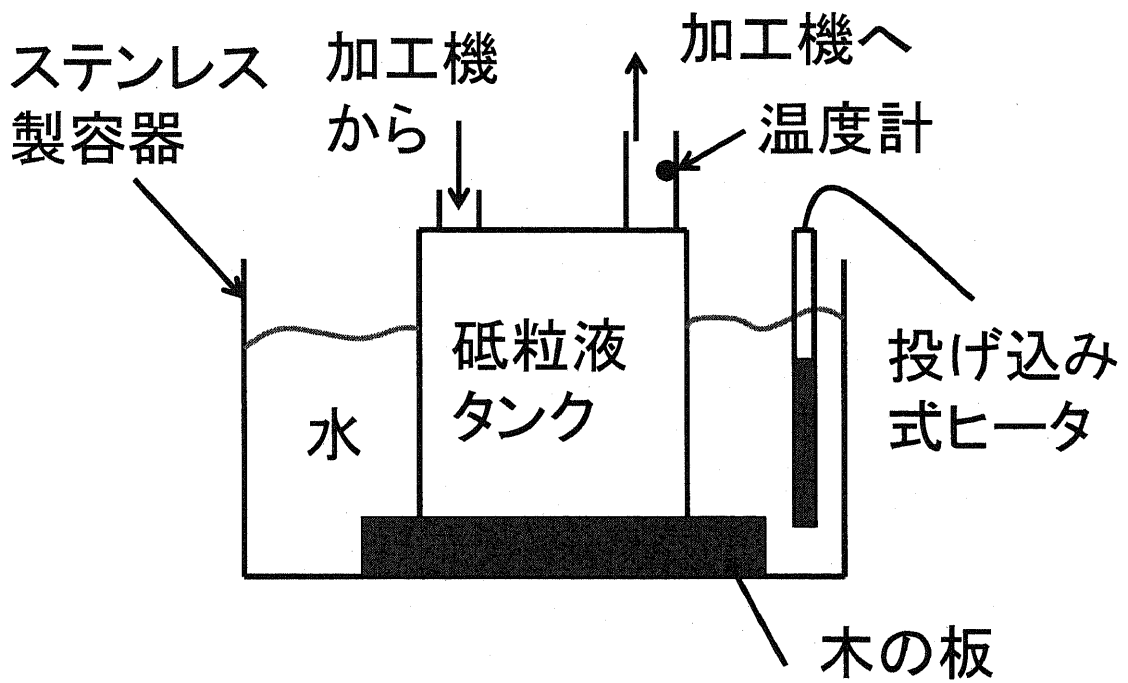


図 2.1 スラリー温度管理の概略

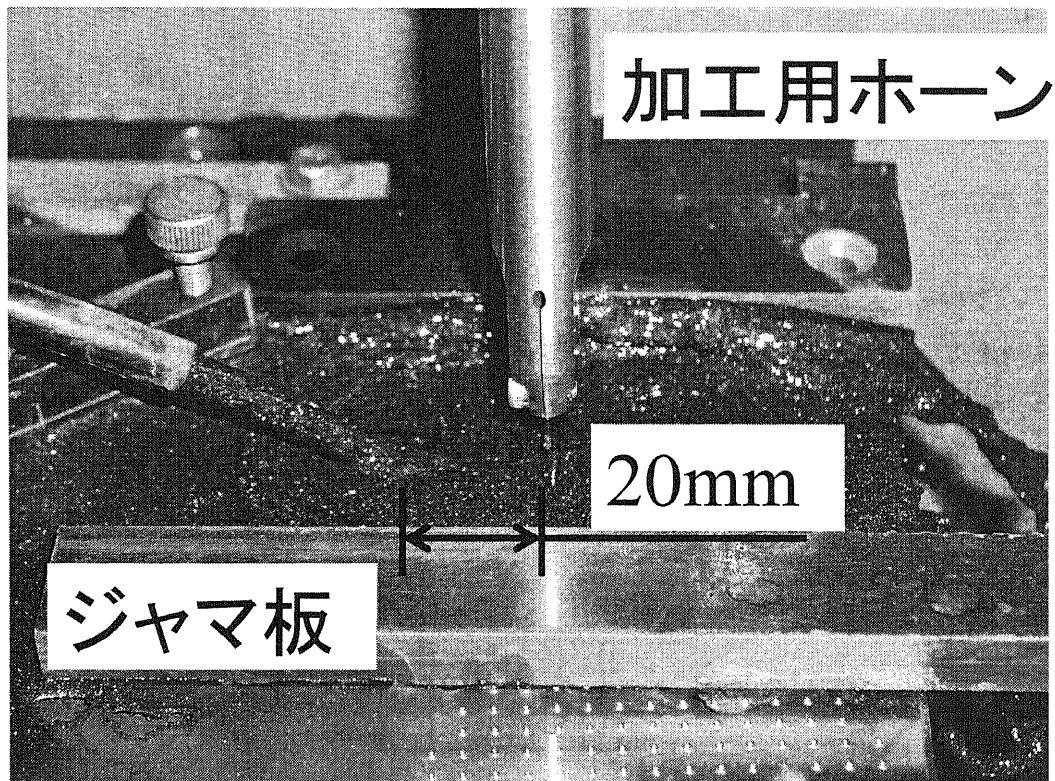


図 2.2 スラリー供給の様子

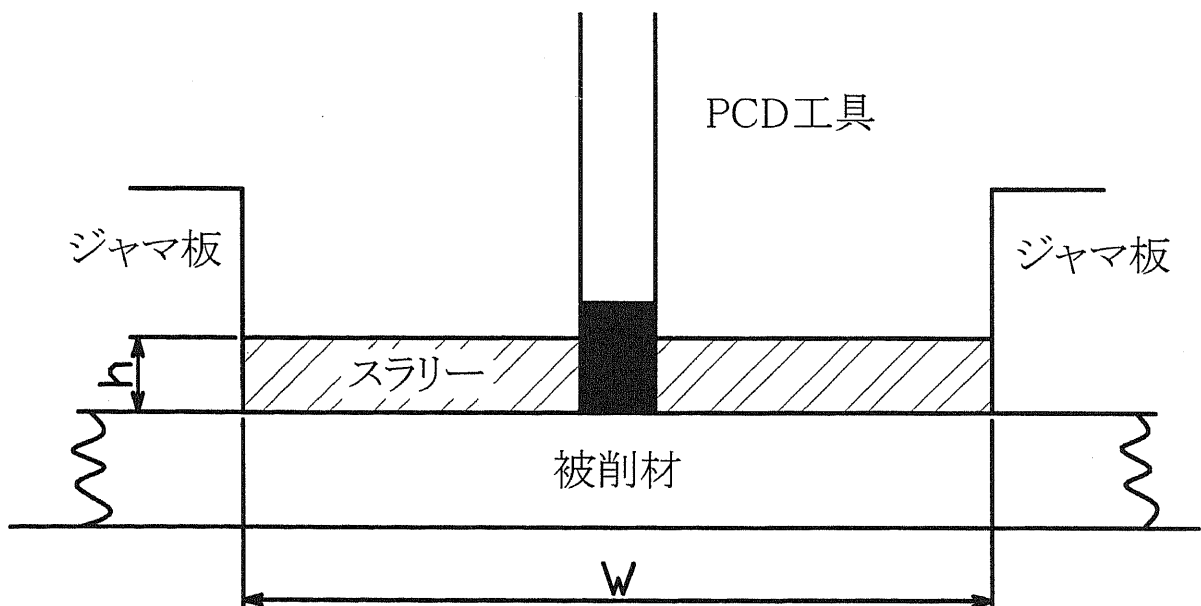


図 2.3 スラリー流速を求める近似的モデル

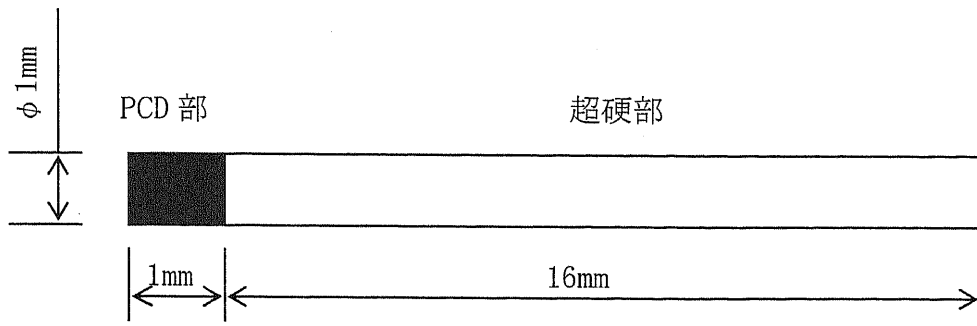


図 2.4 PCD 工具寸法

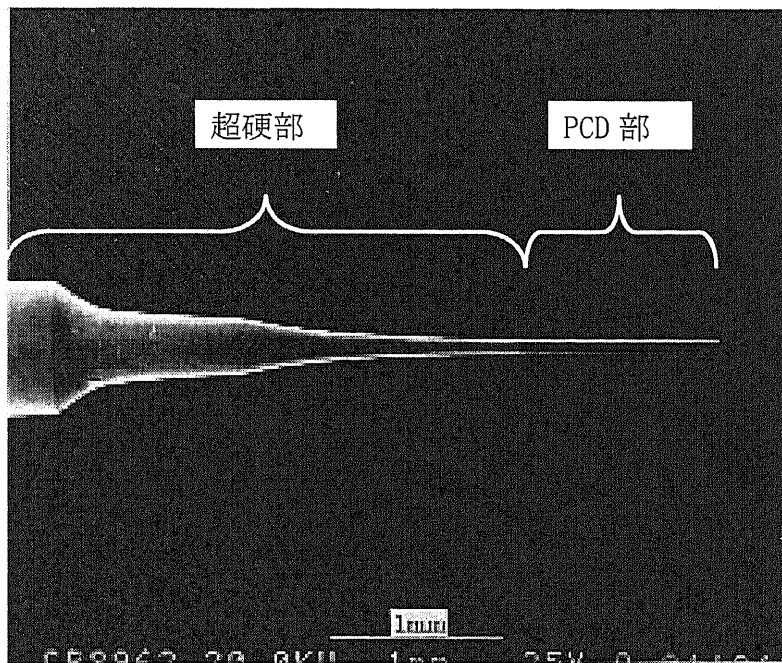


図 2.5 先端部直径 0.075mm の PCD 工具

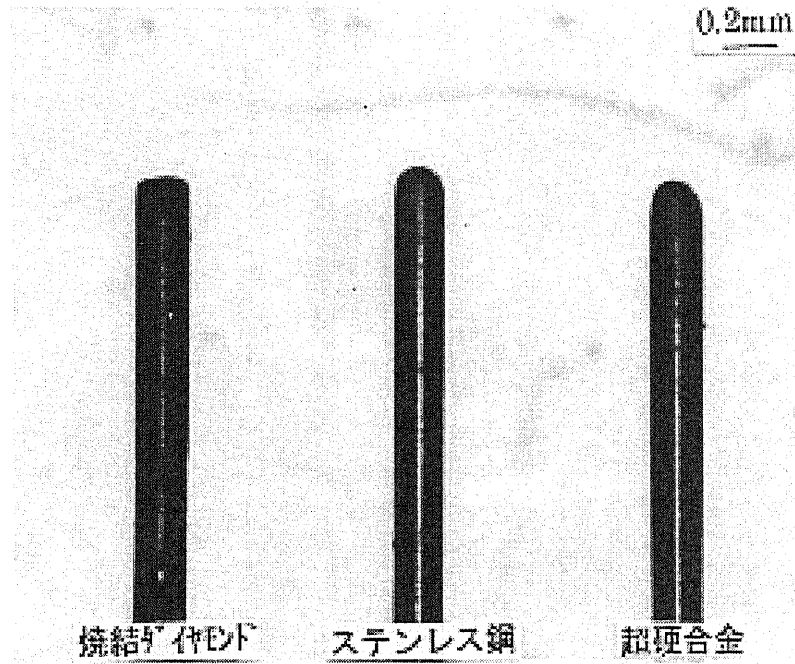


図 2.6 超音波加工をおこなった後の摩耗状態の比較

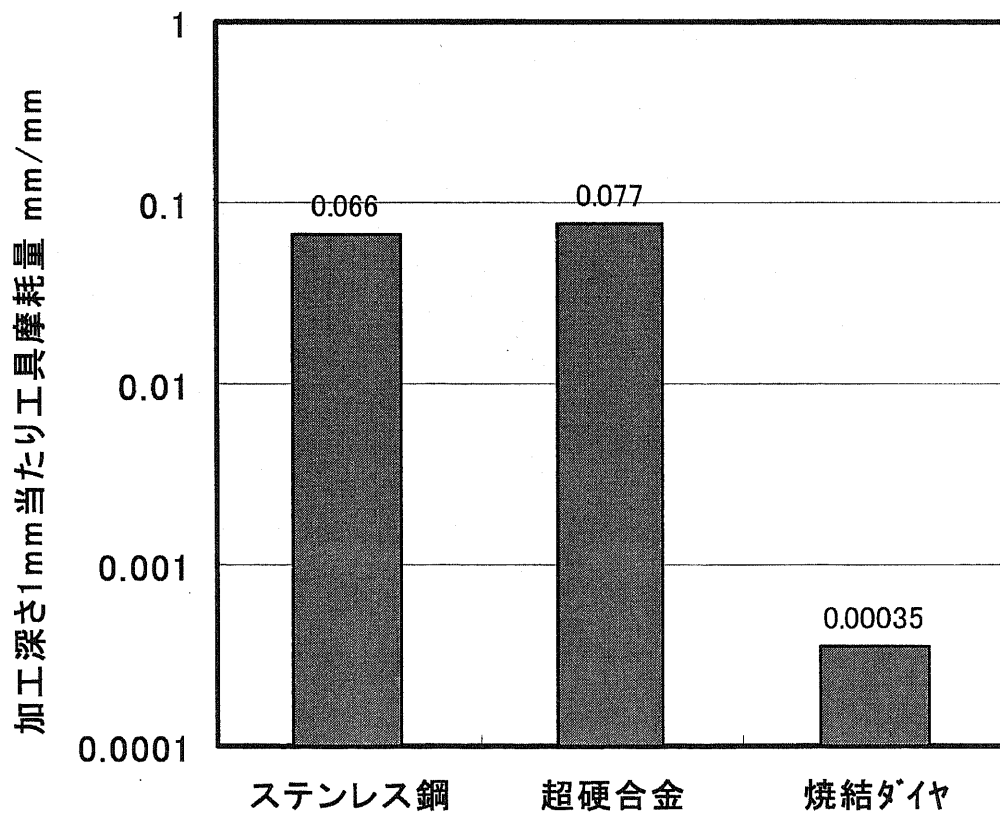


図 2.7 材料別工具先端部の摩耗量の比較

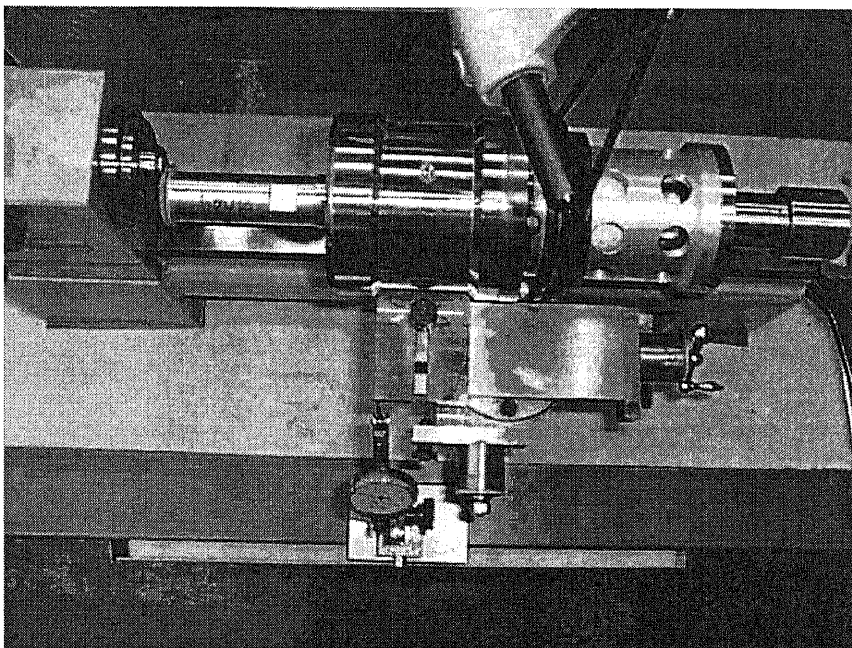
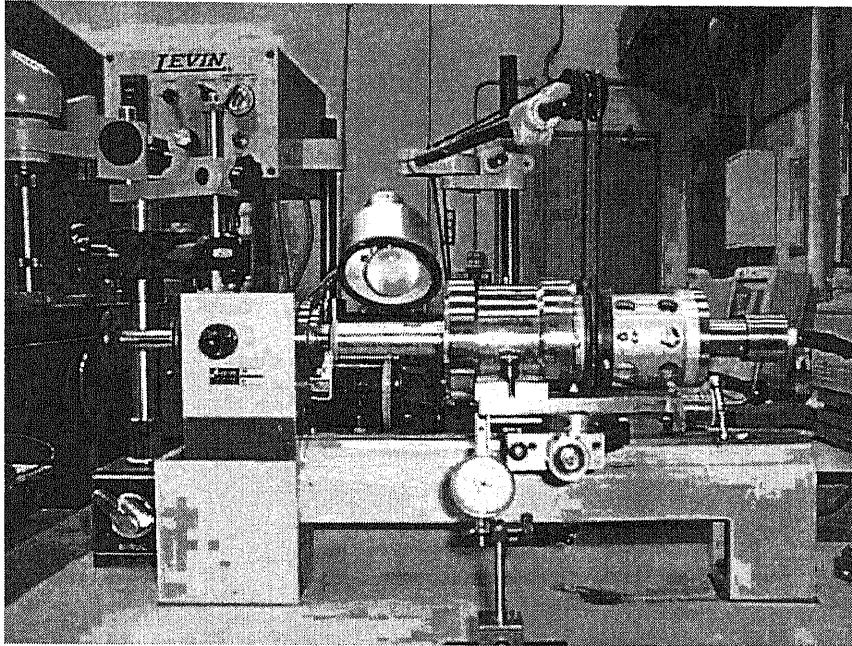


図 2.8 超音波ねじり振動研削装置概観

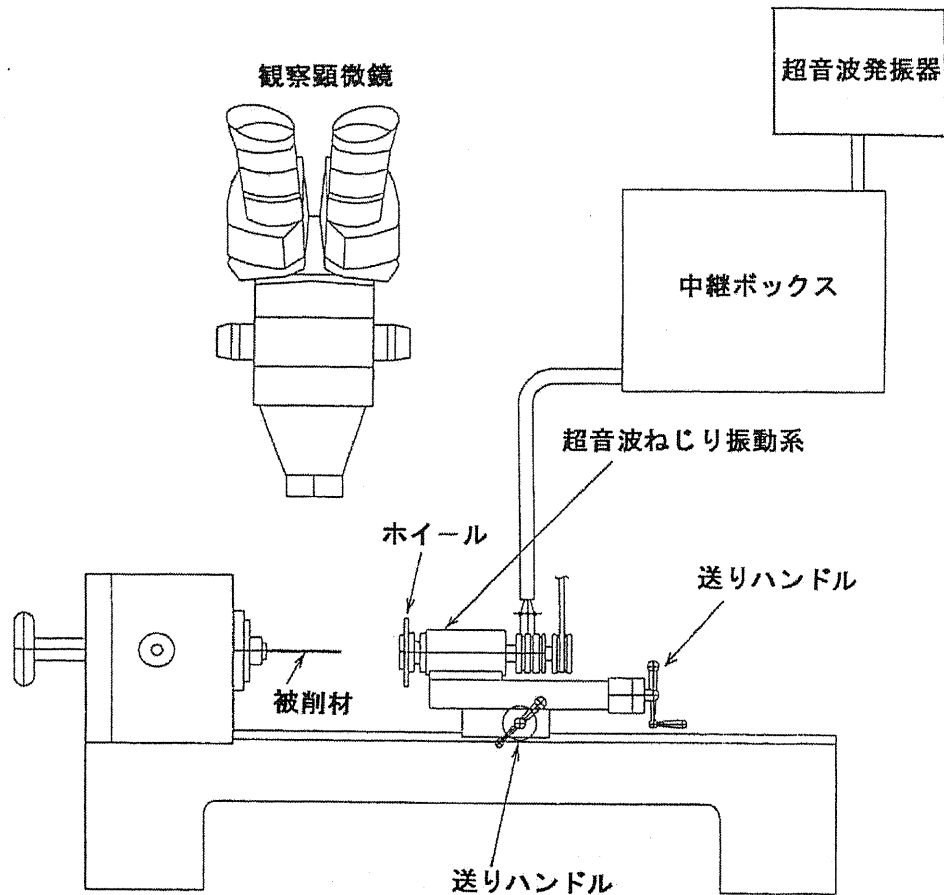


図 2.9 超音波ねじり振動研削装置概略

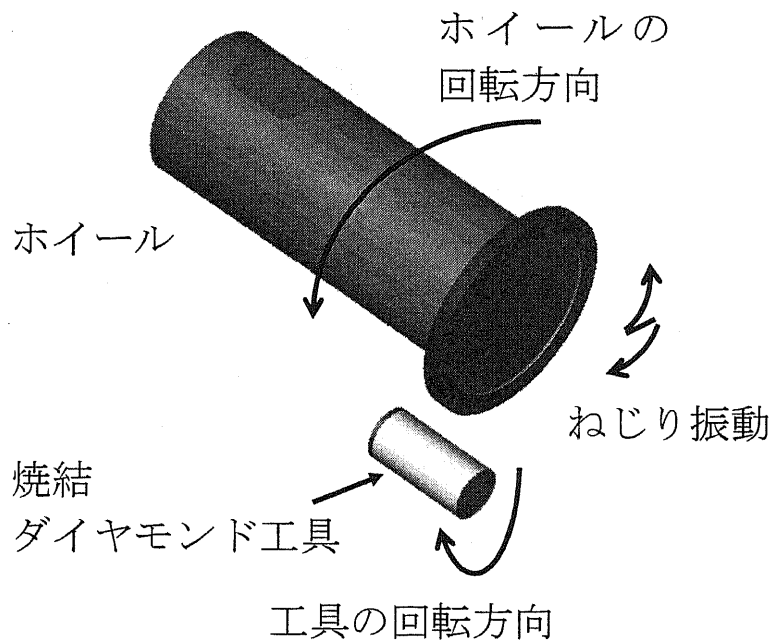


図 2.10 超音波ねじり振動のイメージ図

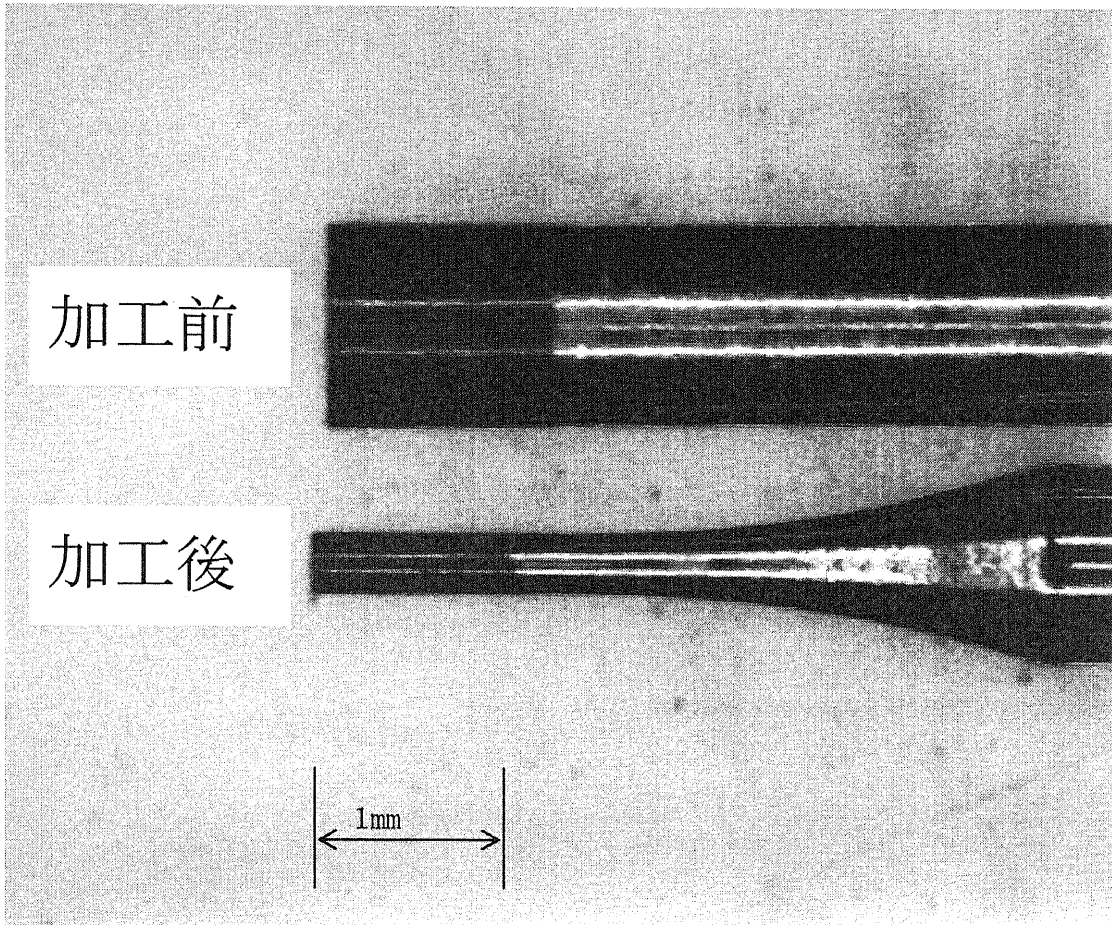


図 2.11 超音波ねじり振動装置を用いた工具への研削加工例

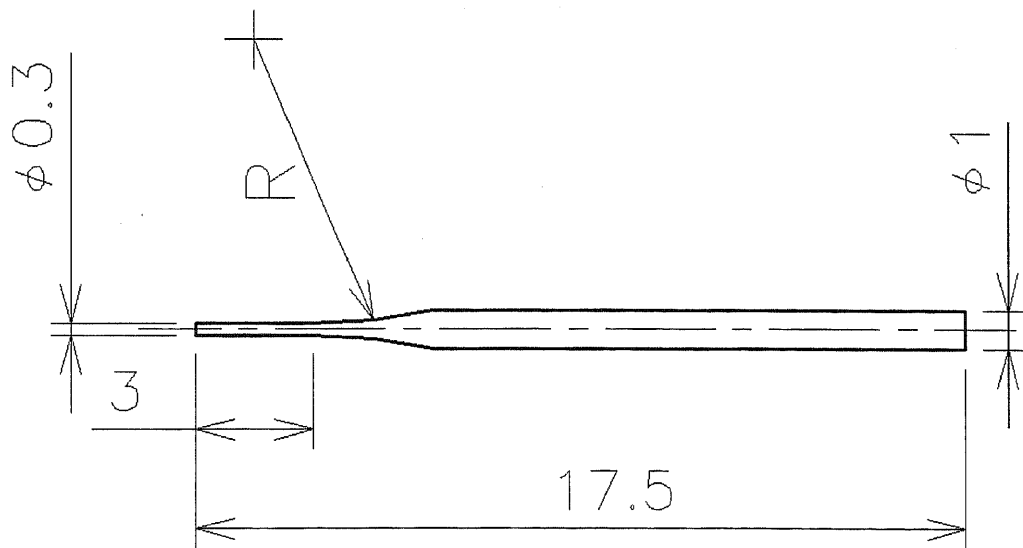


図 2.12 工具形状

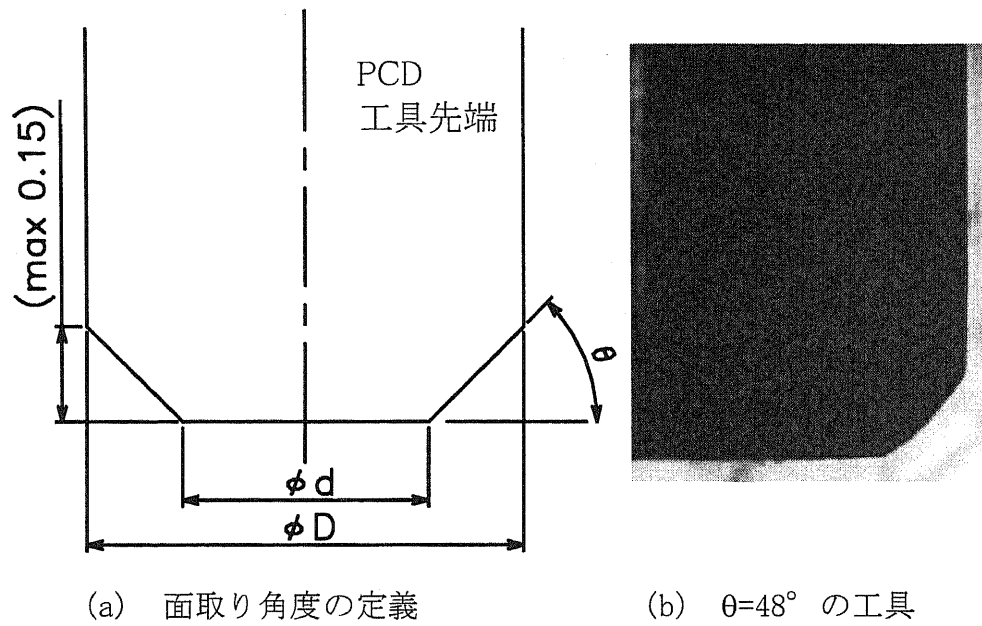


図 2.13 面取りを施した工具

表 2.1 工具形状

面取り角度 θ°	ϕd
29	0.8
48	0.7
56	0.8
90	1.0

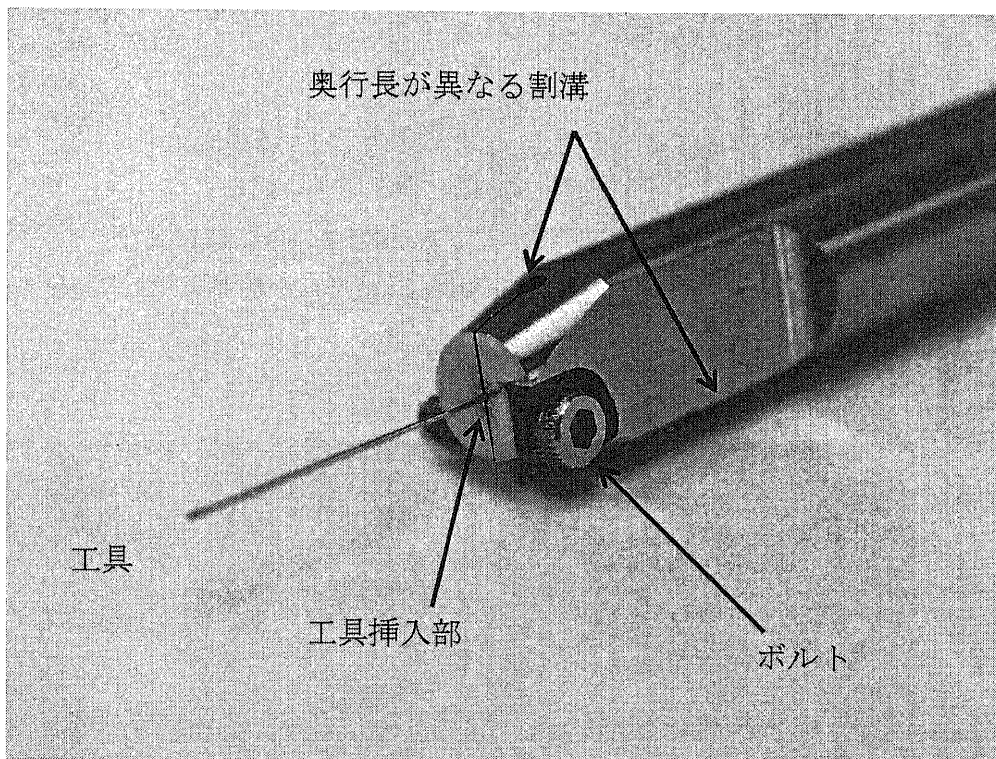
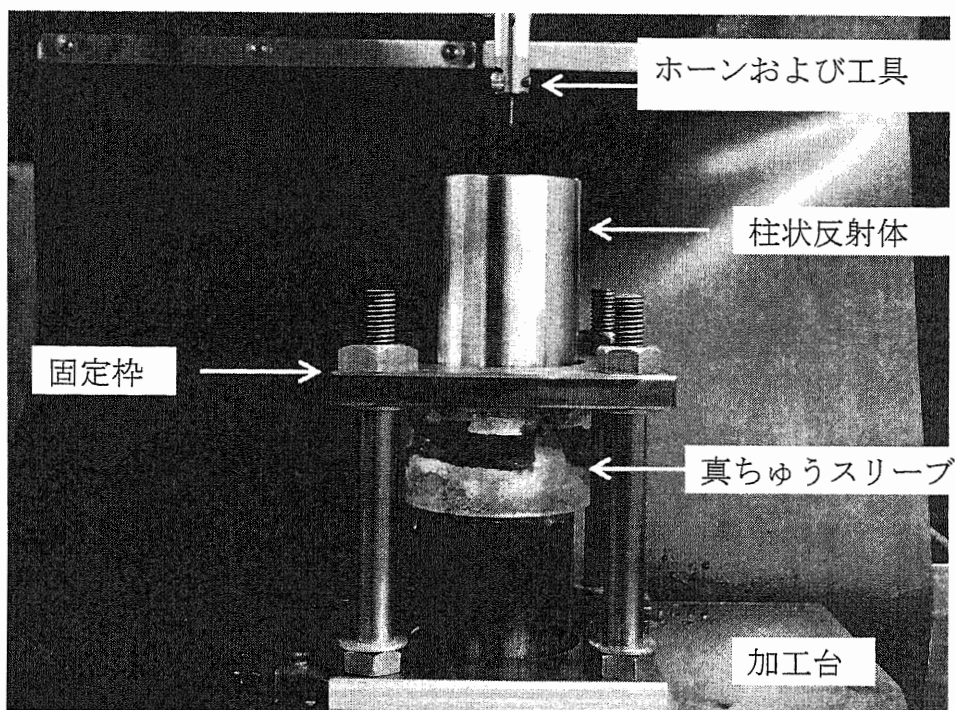
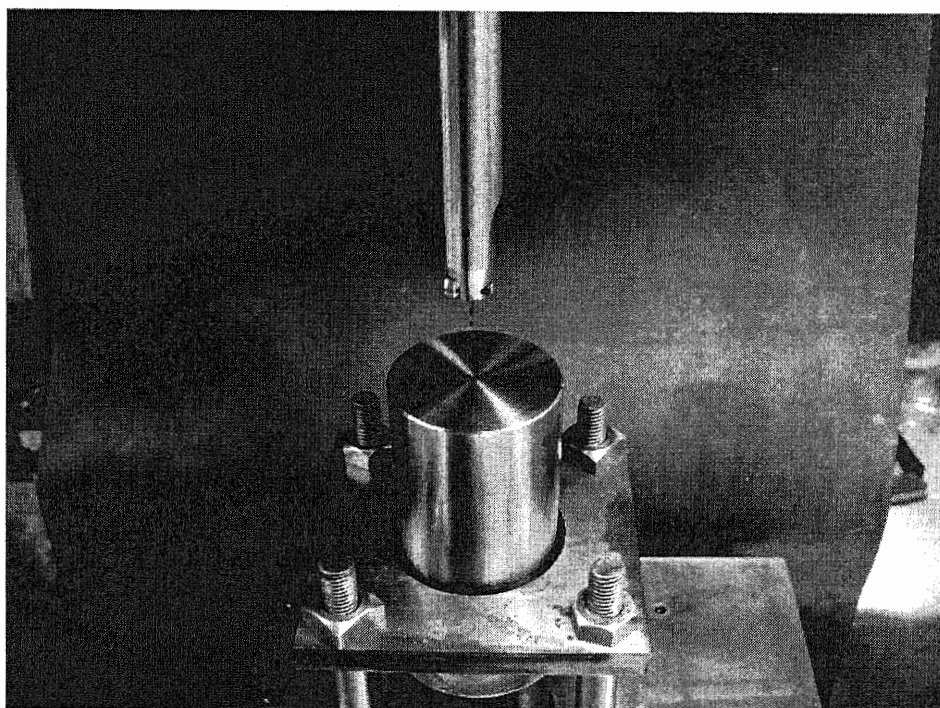


図 2.14 割締めホーン



治具を横から見た状態



治具を上から見た状態

図 2.15 加工力測定用治具

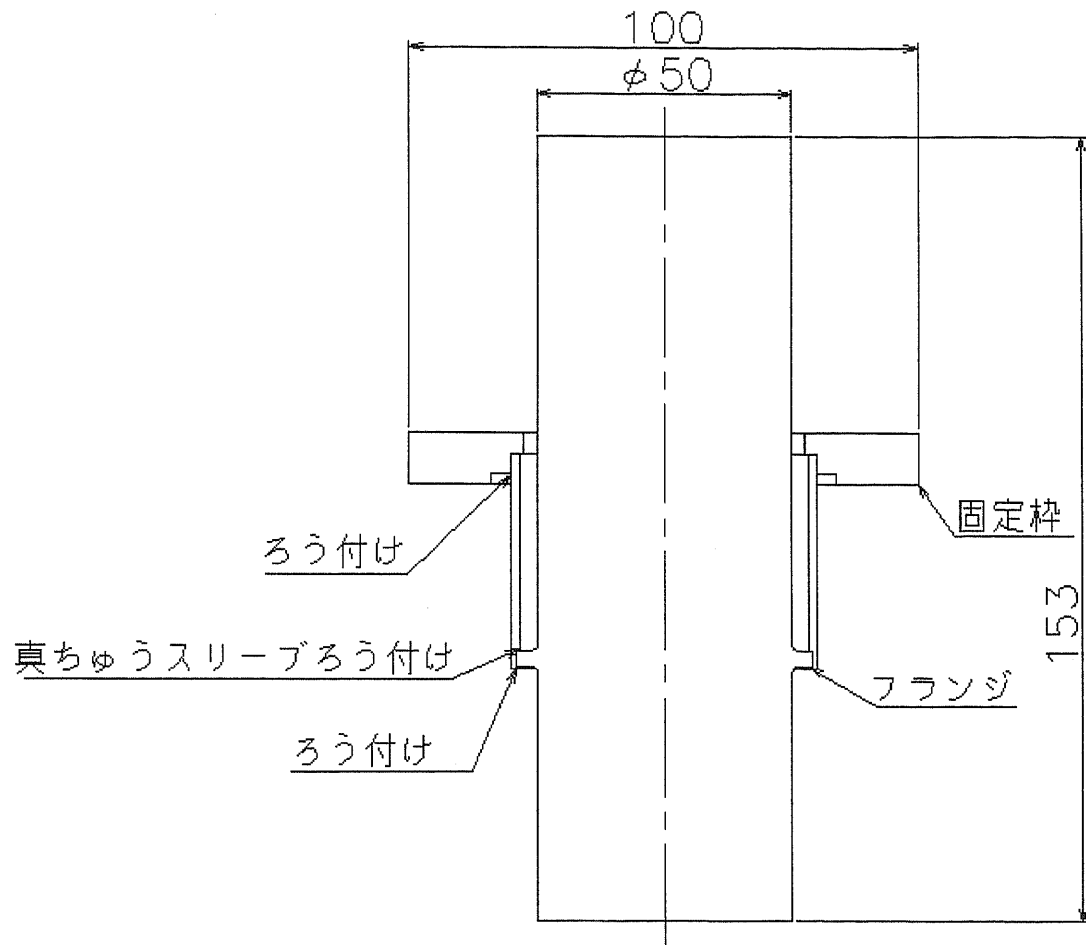


図 2.16 加工力測定用冶具ロー付け組図

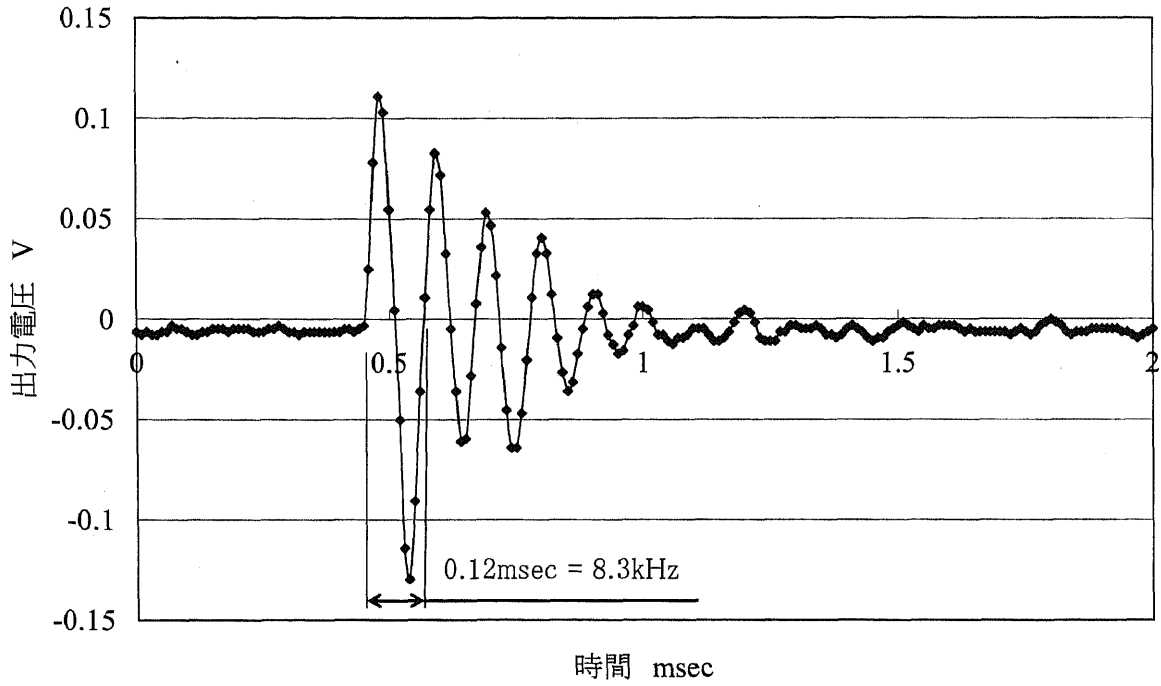


図 2.17 センサの応答速度

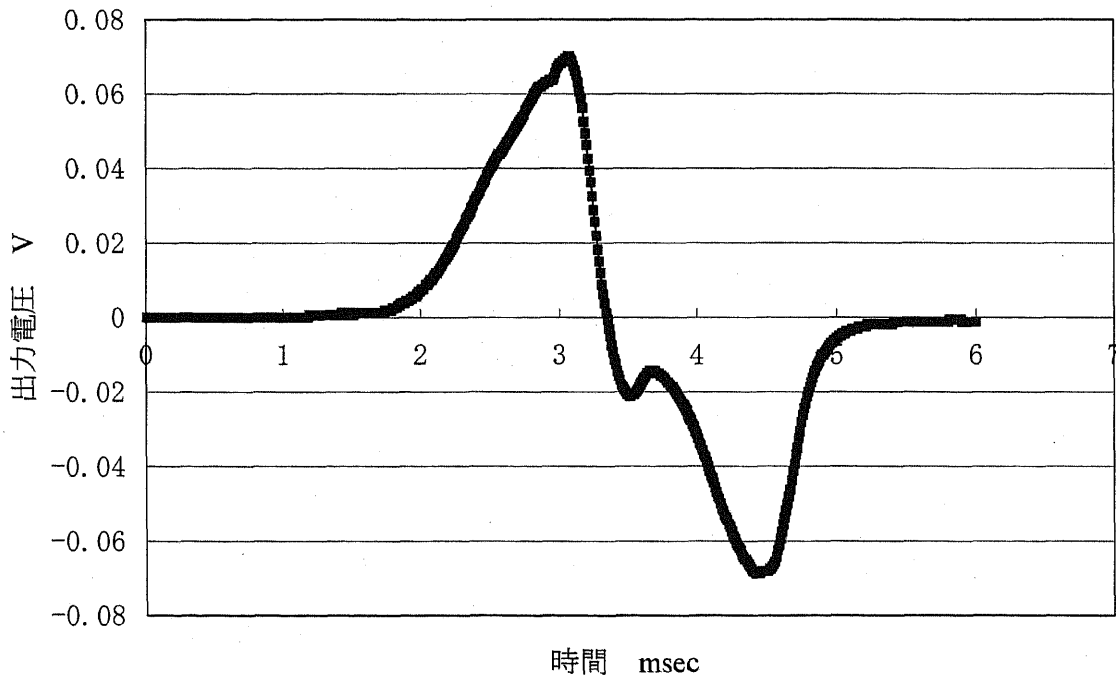


図 2.18 20Nを負荷したときの時間に対する出力電圧の変化

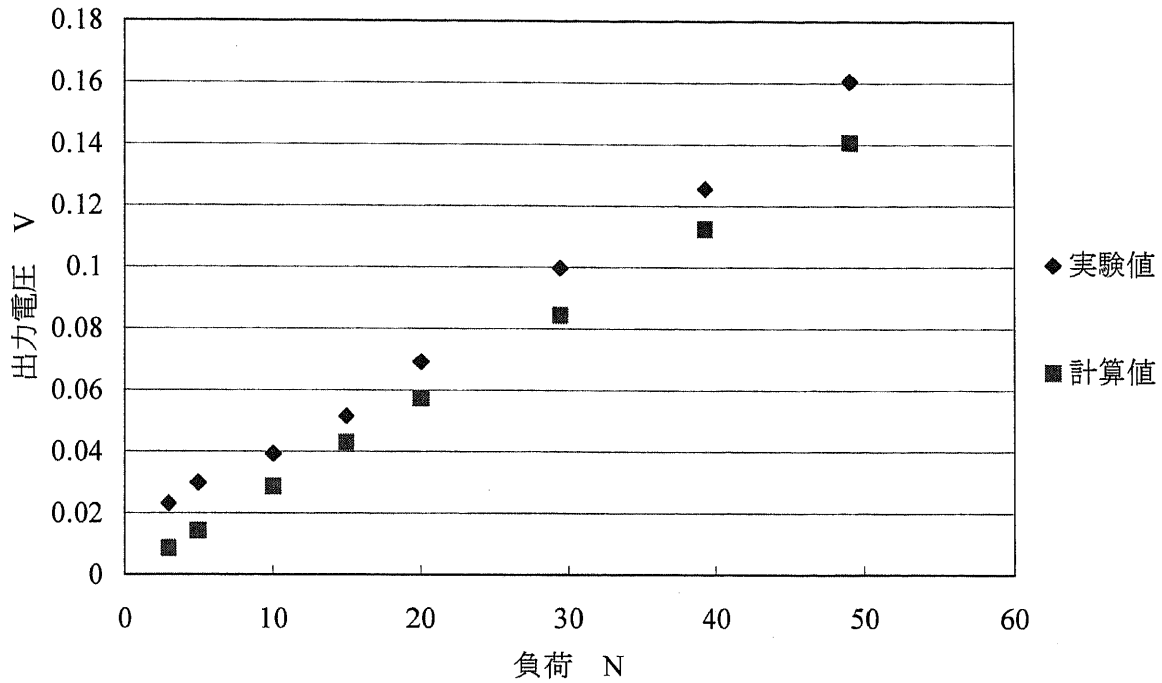


図 2.19 負荷と出力電圧の関係

出力電圧と外部からの負荷の関係は、以下の式から求めた。

$$V = \frac{F \times g_{33} \times t}{A} \dots (3)$$

ここで、V：出力電圧，F：負荷， g_{33} ：電圧出力係数，t：センサの厚さ，A：断面積である。（富士セラミックス製品カタログ参照）

参考文献

- 1) 田中信一他：小径穴超音波加工に関する研究（第1報：種々の加工条件が加工速さに与える影響），砥粒加工学会誌，48, 6（2004）324.
- 2) 横沢毅, 長谷川徳慶, 小玉満, 田中信一, 山崎学, 和井田徹：焼結ダイヤモンド工具の超音波研削加工特性, 2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001)119.
- 3) 横沢毅, 高木純一郎, 小玉満, 田中信一, 山崎学, 和井田徹：焼結ダイヤモンド工具の効率的研削加工の検討, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2002)601.
- 4) 小玉満, 横沢毅：マイクロドリル素材の研削加工, NEW DIAMOND, 17, 3 (2000) 28.
- 5) 鬼鞍宏猷：超音波振動を応用したマイクロ加工技術（超音波振動研削による微小径ドリルの製作と穴あけ）, 精密工学会九州支部 2000 年度精密生産加工技術講習会資料, (2000)28.
- 6) 和田紀彦, 正木健：微細ダイヤモンド工具を用いたマイクロ研削法の開発, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2002)360.
- 7) K. Egashira : Development Microultrasonic Machining Methods, Mem. School. B. O. S. T. Kinki University No. 7 (2000)1.
- 8) K. Egashira, T. Masuzawa: Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, Annals of the CIRP, 48, 1(1999)131.
- 9) 江頭快, 水谷勝己：超音波振動切削によるガラスの微細穴加工, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2002)592.
- 10) 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.
- 11) 和井田徹, 岡野啓作, 須藤徹也, 水野潤：機械技術研究所所報, 52 (1998)3.
- 12) 横沢毅, 西岡孝夫, 小玉満, 山崎学, 和井田徹：超音波ねじり振動を用いた焼結ダイヤモンド工具の円筒研削, 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000)299.
- 13) 楡井耕次：超音波加工装置, 実公平 6-21641.
- 14) 杉長介：超音波彫刻機における振動勢力散逸防止方式, 特公昭 31-4849.
- 15) 島川正憲：超音波工学(-理論と実際-), 工業調査会, (1975).

第3章 加工圧の影響について

3.1 脆性破壊のメカニズムについて

脆性材料の典型的なものとして、ガラスが考えられる。そしてガラスの破壊に至る過程をみるに、必ず引張破壊の形で破壊に至る¹⁾。これについては、過去に一般的な文献が多くあり^{2)~5)}、実験によっても確かめられている^{4), 6)~9)}。

ただし、狭い領域（ミクロンの程度）に荷重が集中してかかるような場合には、ガラスといえども常温下において塑性変形や破壊が局部的に起こりうる¹⁾。従って、それらを含めるとガラスの破壊現象は上述のごとく単純ではないと考えられる。

近年では、江頭¹⁰⁾が WEDG（ワイヤ放電研削）¹¹⁾でマイクロ加工用工具の製作をおこなった。工具製作とその取り扱いが困難であるという点を克服し、大きな脆性破壊が生じない加工法を選択することにより、脆性材料の微細穴加工に適用できることがわかってきた。

それによると次のような内容である。

脆性材料に超音波加工をおこなう場合、超音波加工では脆性破壊で生じたマイクロクラックによる材料除去に基づくものと考えられている。しかし、脆性材料の切削において切込み深さを小さくすると、塑性変形を伴う破壊である延性モードでの加工になり、また研削の分野でも同様の結果が報告されている¹²⁾。

石英ガラスに加工した穴の底面を比較すると、一般の超音波加工での加工面は、シャープなエッジがみられ、脆性破壊による材料除去の特徴がみられる。一方、マイクロ工具を用いたときの超音波加工での加工面は、そのような脆性破壊の特徴がみられず、波状の模様が残されていた。よって、超音波加工においても、サブミクロンの粒径の砥粒を使用し、超音波振動の振幅も微小な場合には、加工モードが脆性から延性に遷移すると予想される¹³⁾¹⁴⁾。

本研究では、使用する砥粒と工具先端振幅の大きさを考えると、ほとんどが脆性破壊の領域であると考えられる。超音波加工における脆性破壊についてまとめると次のようになる。

脆性材料などには、その素材の中に何らかの弱い部分があり、それを起点にして、本来の理論的強度において破壊に要する外力に達する前に破壊が起こる¹⁾。

砥粒は軸芯方向に振動する工具と被削材との間に入り込み、その砥粒によって被削材は破砕される。そのとき、砥粒も衝撃を受け、破砕されるので、砥粒自身も鋭い角を持っている。

砥粒を鋭い半径の小さい工具と見なせば、比較的小さい力で被削材に食入って割れを生ずる。このときの割れは、被削材表面に対してほぼ垂直な面内に存在する縦割れと、被削材表面に対して斜めまたはほぼ平行な面内に存在する円錐割れの2つが考えられる^{1), 15)~17)}。この様子を図3.1に示す。

これらの割れは材料に対して砥粒の押し込み負荷中よりは、おもに除荷後に発生し成長する。割れによる脆性破壊の進行過程は、ほとんどその物質の音速に近い速さで進展されてゆくものである。

実際の加工メカニズムは次のように考えられる。砥粒が被削材に食入り、除荷され

るときに割れが発生する。被削材内部の結合力の弱い部分(脆性亀裂)を起点にして、被削材中の音速に近い速さで割れが進行する。複数の割れによって囲まれた領域で破砕が起こり、その部分が被削材から取り除かれる。これが繰り返されて加工が進む。

3.2 槌打ち作用とポンピング作用について

超音波加工に際して、工具と被削材の間に一定の静圧力を加えねばならない。この静圧力を加工圧(被削材に対する単位面積当たりの工具の押し込み力)とする。超音波の振動伝播と適当な加工圧との均衡を保つことによって、衝突振動に基づく工具の衝撃力により砥粒を被削材にたたきこんで、被削材を微細に破砕する作用を槌打ち作用と呼ぶ。

工具振動によるピストン運動は、スラリーを流動させ、加工部から切りくずを排除し、同時にこれに伴ってスラリーを循環交代させる作用のことをポンピング作用と呼ぶ。ポンピング作用は、工具の振動振幅(振動変位量)に関係をもつ。振動振幅が大きければ、ポンピング作用によって循環するスラリー量は多くなる。

3.3 加工圧の影響について

3.3.1 工具直径1mmのときについて

超音波加工では、加工圧の大小により加工速さが左右される。加工圧が小さいと、被削材がほとんど破砕されないため、加工が進まない。また、加工圧が大きすぎても、工具先端に砥粒が供給されにくくなり、加工がおそくなる傾向がみられる。

そこで、加工圧をそれぞれ5.60MPa、8.14MPaにしたときの、加工時間の経過による加工深さの変化を調べた。スラリー温度20°C、スラリー流速50m/min、被削材への加工切込み深さ1.2mmとした。そのときの加工時間と加工深さの関係を図3.2に示す。

図中の点にばらつきがあるのは次の理由による。工具の振動により、被削材への加工が進むと、工具先端が被削材中へ進入するため、振動系が被削材の方に移動する。さらに、工具先端においては砥粒、切りくずの出入りがある。すると、振動系がわずかながら上下に移動する。レーザ変位計は、加工による被削材への進入分と振動系のわずかな移動変位分とを合わせて測定しているものと考えられる。

加工深さ0.2mmまでは、加工圧によらず約2secで加工される。それよりも加工深さが深いところでは、時間に対してほぼ直線的に加工が進む。この傾きを加工速さ(mm/sec)とする。この直線的な傾きが最も大きいところ、つまり加工時間が最短になるときの加工圧を最適加工圧とする。

加工圧が5.60MPaのとき加工時間は49秒、加工圧が8.14MPaのとき加工時間は30秒となり、加工圧を1.4倍にすることで、加工時間が約0.6倍になった。加工圧によって、加工時間が異なることがわかった。

加工する速さが加工深さに対して一様ではなく、また加工圧の大きさによって加工速さの様子が異なるのは、工具と被削材の間に存在する加工に有効な砥粒数が加工進行とともに変動するためと考えられる。

加工の初期には、砥粒を含んだスラリーの工具直下への循環が十分に行われるので、加工が早く進む。さらに加工が進んで穴が深くなると、新しい砥粒の工具端面直下への供給循環がわるくなるとともに、破碎された砥粒および切りくずの排出がおこなわれ難くなる。よって、加工の初期に比べて加工速度が遅くなる。このような経過をたどって加工が進んでいく。切込みが深くなると加工初期に比べて、加工速度の傾きが小さくなった状態となる。

この傾向は他の直径の工具でも同様であった。工具直径が小さくなくても、加工深さ 0.2mm までは、加工圧によらず約 2sec で加工された。加工深さが 0.2mm よりも深いところで加工圧の影響が表れてくる。

加工が進行すると工具先端部において摩耗が生ずる。加工圧の大小による工具長手方向の摩耗量の違いはほとんどみられず、1 穴あたりの工具摩耗量は約 0.3 μ m であった。この摩耗量は加工深さに対してほとんど無視できる大きさであり、加工時間に対する加工深さの変化を考えるのにはほとんど影響がない値と考える。

3.3.2 工具直径 1mm のときの加工速度との関係について

次に、スラリー流速を 36m/min, 50m/min とし、加工圧を 5.60MPa から 12.45MPa までそれぞれ変化させたときの加工速度の変化を図 3.3 に示す。同一条件で 10 回加工をおこない、加工時間を測定し、10 回の平均値を加工速度とした。それぞれの加工時間のばらつきは、各加工圧において約 5 秒以内である。

スラリー流速が 36m/min のとき、最適加工圧は 10.60MPa、スラリー流速が 50m/min のとき、最適加工圧は 8.14MPa である。このことから、加工速度が最大となる最適加工圧が存在し、その値はスラリー流速によって異なることがわかる。

最適加工圧の存在は、工具端における工具の槌打ち作用と、主にスラリーのポンピング作用の 2 つの要因によるものであると考えられる。

工具先端の変位量（振動振幅）は、加工中には、工具先端に負荷がかかる。西村¹⁸⁾によると、加工中は無負荷時に比べて振幅は小さくなり、それに伴って工具の変位量に影響されるポンピング作用の効果も変わってくるとしている。本研究では、加工中の工具先端振幅の変化を調べるには至っておらず、また振動系の質量などに比べ加工抵抗が小さいことから、振幅の減少は小さなものと考えられる。

加工圧が小さいときには、加工中における工具先端の変位量の低下は少ないので、ポンピング作用は活発におこなわれる。しかし加工圧が小さいということは、衝撃力が小さいということであるから、被削材を破碎するための十分なエネルギーを被削材に与えさせることができず、槌打ち作用の効果が小さくなり加工速度は遅くなる。

加工圧が大きいときには、工具先端の衝撃力が大きくなり、砥粒の被削材に対する槌打ち作用を大きくすることになる。しかし、工具先端に負荷がかかること becoming ため、加工圧が小さいときと比べて工具先端の変位量は小さくなり、ポンピング作用効果が小さくなる。すると、排除されない切りくずが砥粒の動作を妨げることになり加工速度は遅くなる。

さらに加工圧が大きくなると、砥粒が介在するにもかかわらず、工具が被削材に殆

ど直接接触する状態に近くなる場合が考えられる。この状態では、砥粒による加工はある限度以上には進まなくなり、加工が停滞する。

以上のことから、槌打ち作用とポンピング作用の両方の効果を満足させることができる加工圧が最適加工圧であり、そのときの加工圧において加工速さが最も速くなる。また、スラリー流速もポンピング作用に影響を与え、最適加工圧を左右する。

スラリー流速はポンピング作用に影響を与えると考えられるが、最適加工圧がスラリー流速に左右される明確な原因は、今のところわかっていない。

3.3.3 工具直径 0.7mm, 0.5mm のときの加工速さとの関係について

工具直径 0.7mm, 0.5mm のときの加工速さとの関係を図 3.4, 図 3.5 にそれぞれ示す。それぞれの工具直径において、加工速さが最大となる最適加工圧が存在し、その値はスラリー流速によっても変化する。

工具直径 0.7mm のとき、スラリー流速 43m/min では、加工圧が 11.5MPa で加工速さが 0.005mm/sec である。加工圧を上げていくと、16.6MPa までは徐々に加工速さが速くなり、最大で 0.014mm/sec になる。それ以上加工圧を上げると、逆に加工速さは遅くなる。

工具直径 0.5mm のとき、スラリー流速 33m/min では、加工圧が 22.4MPa で加工速さが 0.003mm/sec である。加工圧を上げていくと、33.0MPa までは徐々に加工速さが速くなり、最大で 0.013mm/sec になる。それ以上加工圧を上げると、逆に加工速さは低下する。

3.3.4 工具直径 0.3mm のときについて

工具直径 0.3mm, スラリー流速 18m/min, 30m/min, 48m/min のときの加工圧と加工速さの関係を図 3.6 に示す。

スラリー流速 18m/min では、加工圧が 62.4MPa で加工速さが 0.006mm/sec である。加工圧を上げていくと、83.2MPa までは徐々に加工速さが速くなり、最大で 0.0125mm/sec になる。それ以上加工圧を上げると、逆に加工速さは遅くなる。

一方、スラリー流速 48m/min では、加工圧が 62.4MPa で加工速さが 0.002mm/sec である。加工圧を上げていくと、80.5MPa までは徐々に加工速さが速くなり、最大で 0.007mm/sec になるが、スラリー流速 18m/min のときにおける加工速さの 56% でしかない。

スラリー流速が 18m/min から速くなるにつれて、最適加工圧における加工速さは遅くなっていく。またその最適加工圧の値は、徐々に小さくなっている。

3.3.5 全工具直径での最適加工圧について

3.3.2 から 3.3.4 において、最適加工圧が存在し、それはスラリ流速の影響を受けることを示し、他の工具直径においても同様であることを述べた。工具直径が小さくなると、加工圧の絶対値は小さくなっていくが、工具の単位面積あたりで考えると、加工圧は大きくなっていく。工具直径と最適加工圧、工具断面積比の関係を図 3.7 に示す。

横軸に工具直径、左縦軸に最適加工圧、右縦軸に工具直径 1.0mm を 1 としたときの工具断面積比を示している。この図から、工具断面積が直径 1mm のときから 1/2, 1/4, 1/10 と小さくなると、最適加工圧は 2 倍、4 倍、10 倍となる。

工具直径 0.3mm のとき、最適加工圧は約 80MPa であり、さらに加工圧を増すと、約 100MPa のときに工具が細径部で折損した。このことと、図 3.7 の結果から、工具直径が 0.2mm 以下のときには、加工圧用重りだけの状態で加工するのではなく、工具の切込み速さに適当な規制をかけないと、工具が折損することが予想される。

中心粒径の等しい砥粒を使用しているため、加工穴径は各工具径に対してそれぞれ約 0.08mm 大きくなる。径方向のクリアランス（隙間）は各工具径においてほぼ同じである。工具直径が大きいほど、超音波振動による軸芯方向のクリアランス部分の移動量（体積変化）が大きくなる。しかし、ポンピングによるスラリー量で考えたとき、工具直径が小さいほど、そのスラリー量は少なくなると考えられる。

そこで、ポンピング量を工具直径で比較するために、図 3.8 に示すモデルで考えた。スラリーは、工具と加工穴のクリアランスを通過して工具直下へ流入する。このクリアランスは上述したように、各工具径においてほぼ同じ 0.08mm であるから、工具半径を d とすると加工穴半径 D は、 $D=d+0.04$ という関係になる。また、工具先端の振動振幅を 0.01mm とした。工具直下でポンピングによって変化する体積 V は加工穴底面の面積×振動振幅とした。スラリーが流入するクリアランスの面積を S とする。1 回のポンピングで出入りすることができるであろうスラリーの割合（スラリー流入面積に対するポンピングによる体積変化をポンピング率とする）を計算で求めた。その値を表 3.1 に示す。

ポンピング率が大きいということは、クリアランス面積に対するポンピングによる体積変化が大きいということだから、工具直下でのスラリー循環が良好におこなわれているということを意味する。一方、ポンピング率が小さいということは、クリアランス面積に対するポンピングによる体積変化が小さいということだから、工具直下でのスラリー循環が悪いということを意味する。ポンピング率を見ると、工具直径が 1mm から 0.3mm になると約 0.38 倍と非常に小さくなる。このことから、工具小径化すると、いかに工具直下でのスラリーの循環が悪くなっているかがわかる。

加工穴で流出入するスラリー量が少なくなると、工具直下において、切りくずが多くなり、また砥粒が停滞しやすくなることから、被削材に何度も打ちつけられる砥粒の粒径が平均化される。つまり、砥粒粒径が小さくなり、そしてその場における砥粒分布の幅が狭くなってゆく。すると、工具直下での単位面積あたりに働く砥粒数が多くなり、槌打ち作用としての面圧が小さくなる。面圧が小さくなれば、除去量が少な

くなり、加工速度が遅くなる。

粒径の小さな砥粒で速い加工速度を確保するためには、加工圧を上げざるを得なくなる。これが図3.7のような工具断面積と最適加工圧の関係の原因であろうと考えられる。超音波加工による加工前後では、工具の超音波振動によって砥粒が破碎され、中心粒径が小さくなると報告されている^{19) 20)}。また、一般的に小さな中心粒径の砥粒のとき、大きな加工圧で加工をおこなうと、加工速度を速くすることができる。

工具直径1.0mmと0.3mmを用いたときの最適加工圧、最適流速における加工穴底面中心部の写真を図3.9に示す。どちらもスケールは同じである。

工具直径1.0mmのとき、典型的なガラスの脆性破壊である、クラックの積み重ねに起因する貝殻状の割れによる破碎痕が加工穴底面に多くみられる。その破碎痕が加工穴底面全域に分布し、粗さは比較的均一であった。

工具直径0.3mmのとき、破碎痕はほんの一部にみられるものの、底面の凹凸が小さい状態であった。粒径の小さな砥粒に大きな力がかかり、1回あたりの除去量が工具直径1.0mmのときとは多少異なったために、このような底面になったと考えられる。

従来の超音波加工において、作業者の経験とカンにより、ある程度およびある範囲内を目安として、時々刻々と変化する加工深さに応じて加工用おもりにて加工圧を調整してきた。それは、小径穴超音波加工においても例外ではなかった。しかし今後は、本研究結果から、工具直径1.0mmを基準にして、その工具断面積に応じて加工圧を変化させることが高能率加工につながるようになると思われる。

3.4 第3章の総括

第3章 加工圧の影響についてをまとめると次のようになる。

超音波加工では、加工圧の大小により加工速度が左右される。工具直径1mmの場合、加工圧を1.4倍にすることで加工時間が約0.6倍になった。加工圧によって、加工時間が異なることがわかった。

次に、スラリー流速と加工圧をそれぞれ変化させた。スラリー流速が36m/minのとき、最適加工圧は10.60MPa、スラリー流速が50m/minのときの、最適加工圧は8.14MPaである。このことから、加工速度が最大となる最適加工圧が存在し、その値はスラリー流速によって異なることがわかった。

最適加工圧が存在し、それはスラリー流速の影響を受けることを示し、他の工具直径においても同様であることを述べた。工具直径が小さくなると、加工圧の絶対値は小さくなっていくが、工具の単位面積あたりで考えると、加工圧は大きくなっていく。工具断面積が直径1mmのときから1/2、1/4、1/10と小さくなると、最適加工圧は2倍、4倍、10倍となる。

工具直径1.0mmおよび0.3mmの加工穴底面の状態、ポンピングによるスラリー量の計算から、工具が小径化すると、被削材に何度も打ちつけられる砥粒の粒径が平均化される。つまり、砥粒粒径が小さくなり、そしてその場における砥粒分布の幅が狭くなってゆく。すると、工具直下での単位面積あたりに働く砥粒数が多くなり、槌打ち作用としての面圧が小さくなる。面圧が小さくなれば、除去量が少なくなり、加工速度が遅くなる。故に粒径の小さな砥粒で速い加工速度を確保するためには、加工圧を上げざるを得なくなる、との結論に至った。

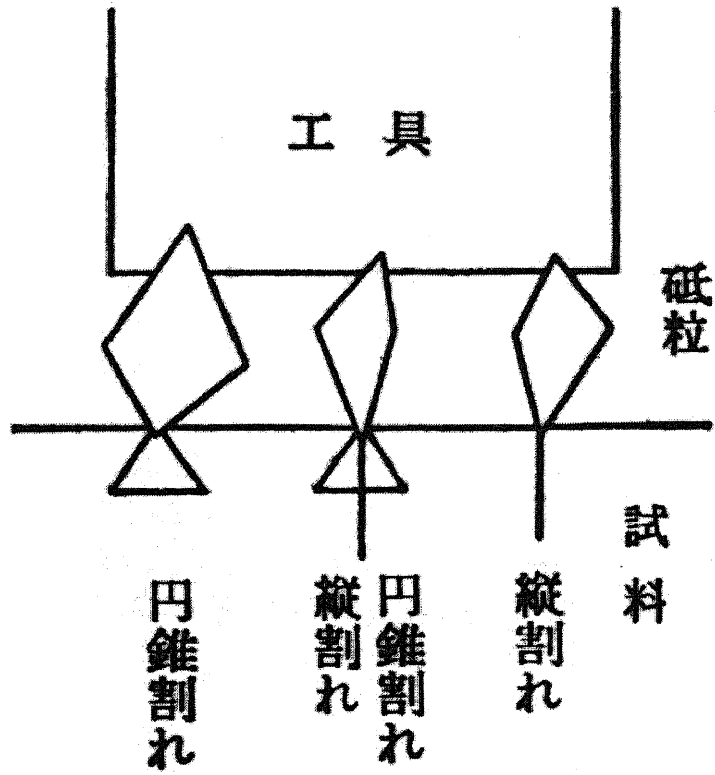


図 3.1 脆性破壊における割れの様子

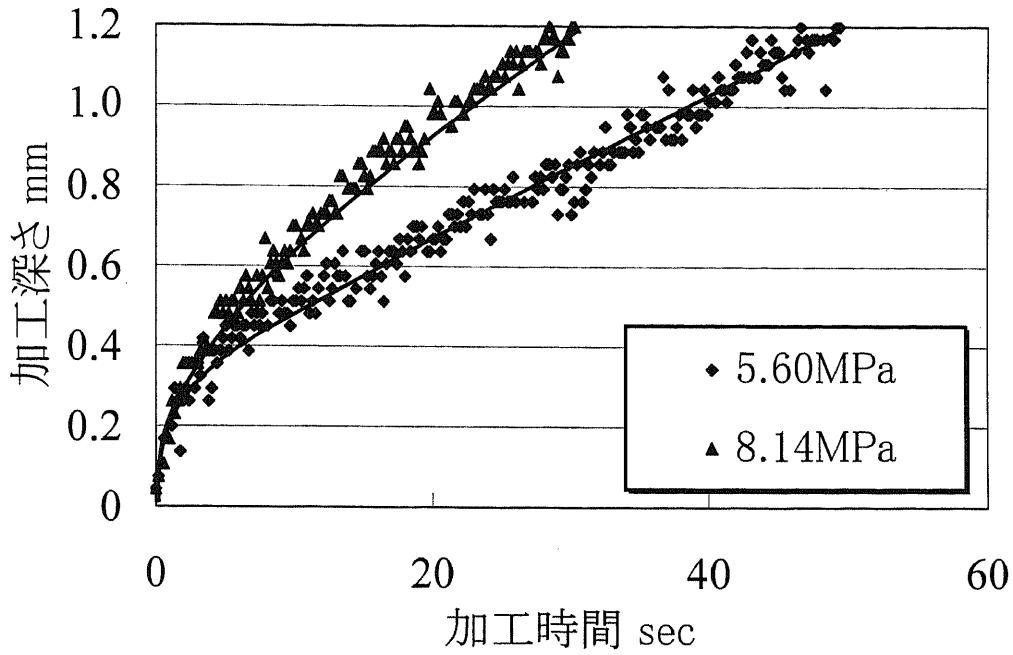


図 3.2 工具直径 1mm のときの加工時間と加工深さの関係

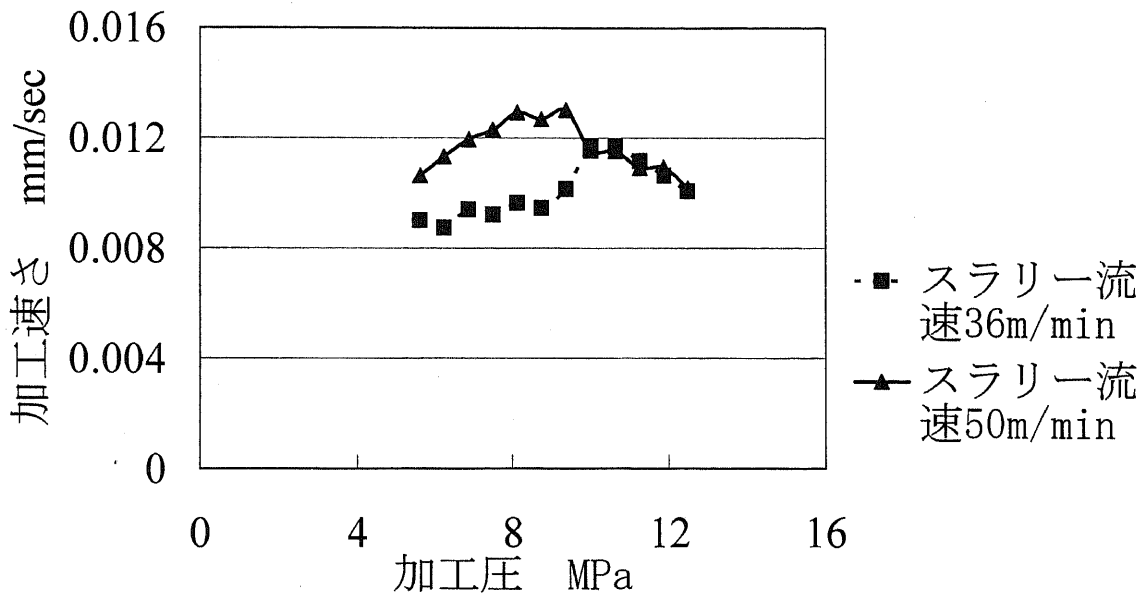


図 3.3 工具直径 1mm のときの加工圧と加工速さの関係

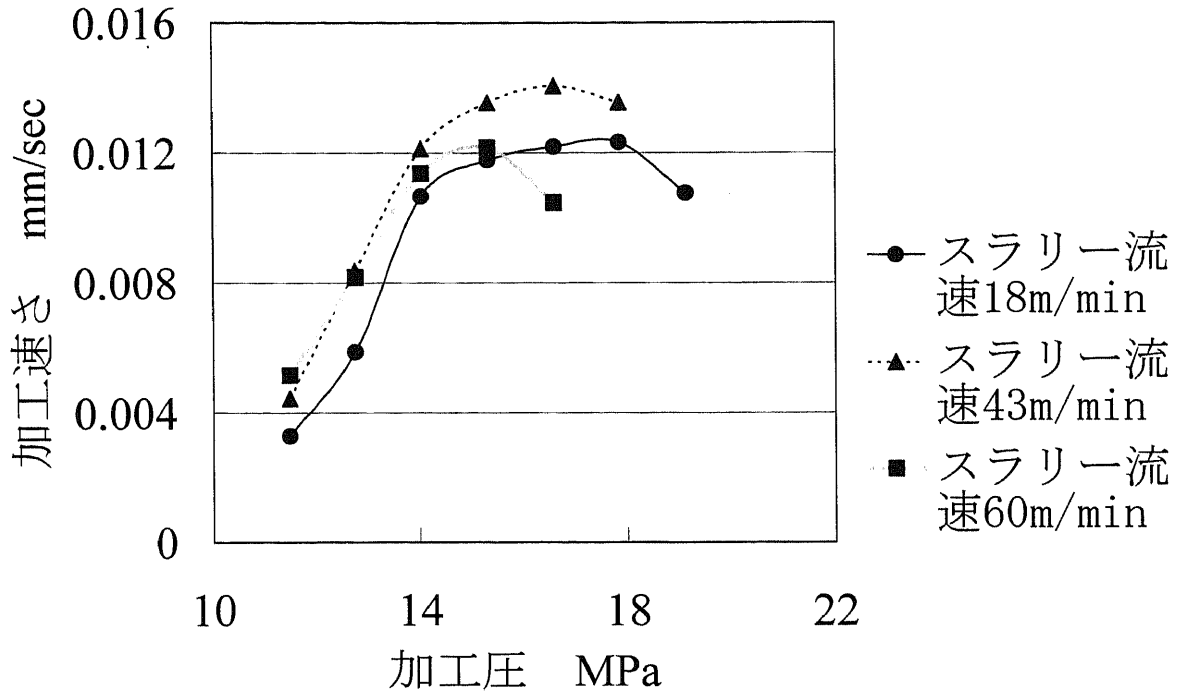


図 3.4 工具直径 0.7mm のときの加工圧と加工速さの関係

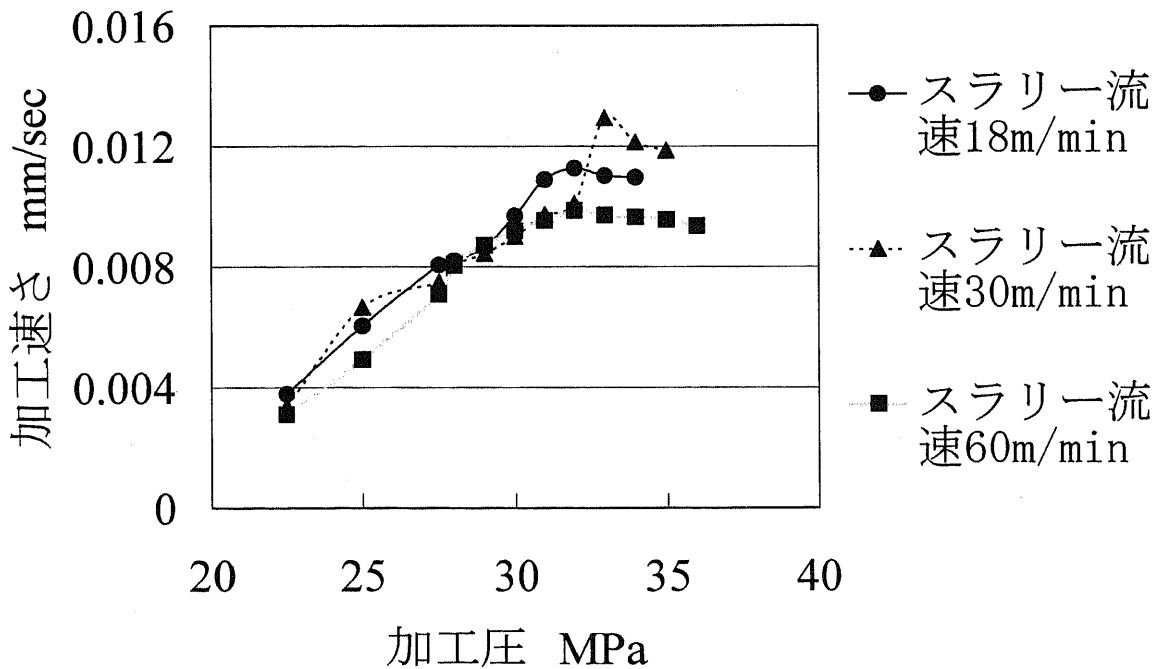


図 3.5 工具直径 0.5mm のときの加工圧と加工速さの関係

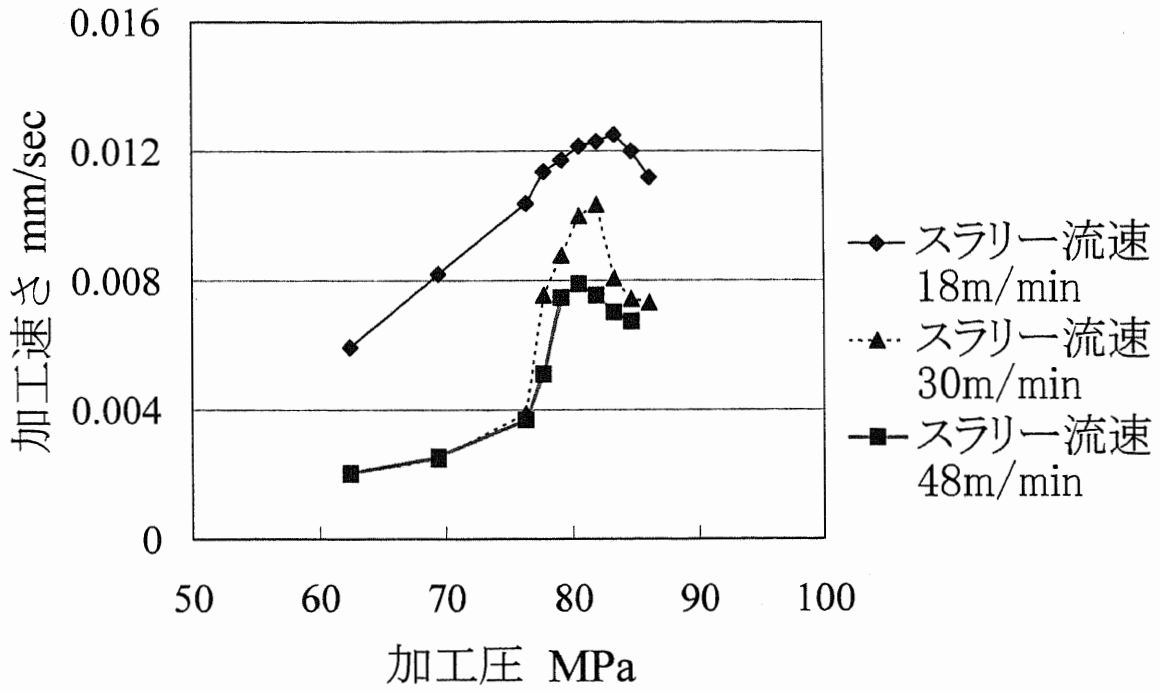


図 3.6 工具直径 0.3mm のときの加工圧と加工速さの関係

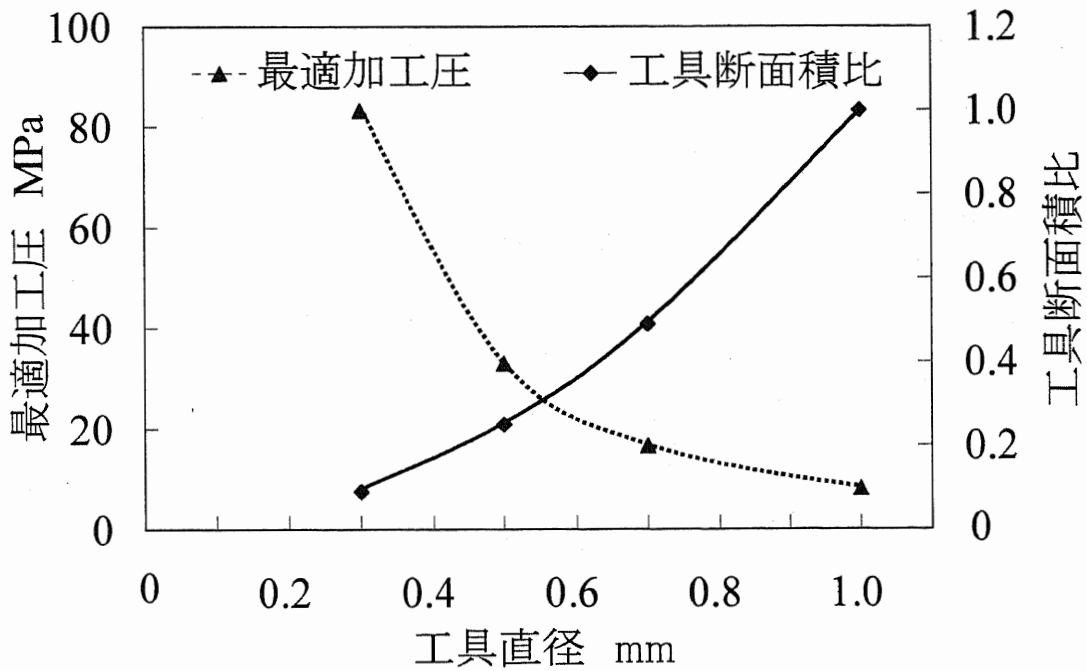


図 3.7 工具直径と最適加工圧, 工具断面積比の関係

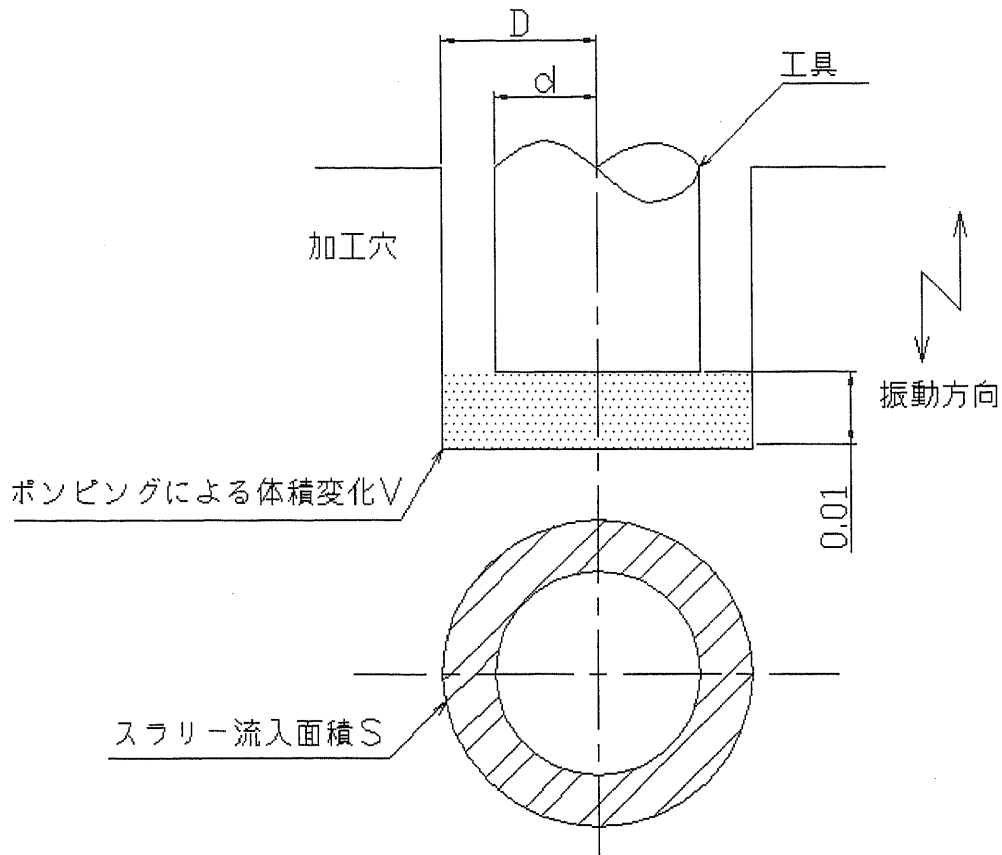
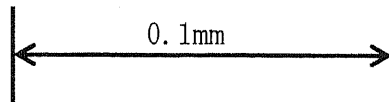
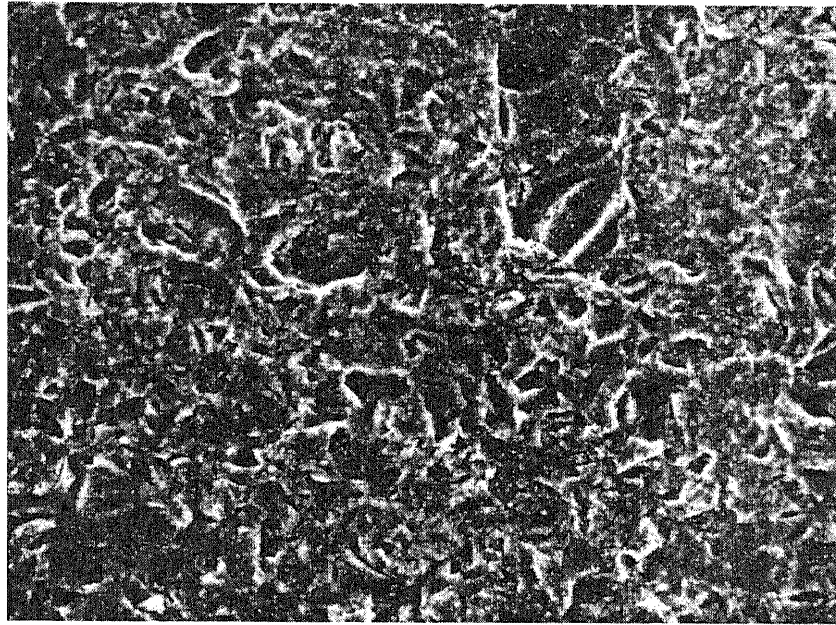


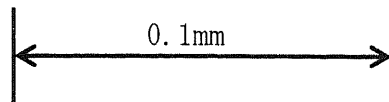
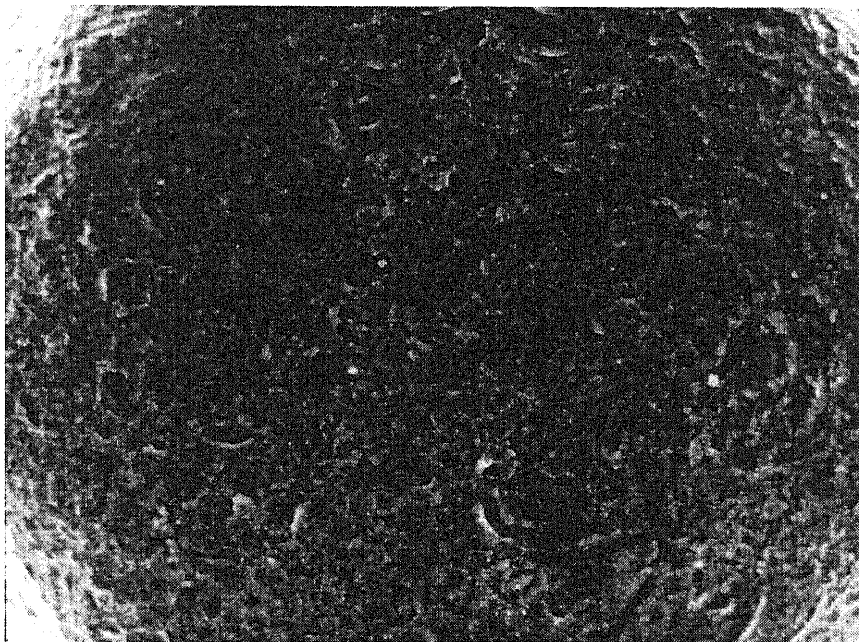
図 3.8 ポンピング率のモデル図

表 3.1 各工具直径におけるポンピング率の変化

工具直径D (mm)	1	0.7	0.5	0.3
工具の面積 (mm ²)	0.785	0.385	0.196	0.071
底面の面積 (mm ²)	0.916	0.478	0.264	0.113
ポンピングによって変化する体積V (mm ³)	0.009	0.005	0.003	0.001
スラリー流入面積S (mm ²)	0.131	0.093	0.068	0.043
ポンピング率 (V/S)	0.070	0.051	0.039	0.027



(a) 工具直径 1.0mm のとき



(b) 工具直径 0.3mm のとき

図 3.9 加工穴底面中心部

参考文献

- 1) 谷口紀男：脆性材料の衝撃破砕加工法，誠文堂新光社，(1959)。
- 2) C. J. Phillips: Glass, The miracle maker, Pitman Pub. Corp.
- 3) Haward: The Strength of Plastic & Glass, London Cleaver Hume Press.
- 4) G. W. Morley: Properties of Glass, Clearendon Press.
- 5) A. J. Holland & W. E. S. Turner: J. Soc. Glass Tech.
- 6) W. Weibull: Ingenieur Vetenskaps Akad. Handl. 149(1938).
- 7) C. F. Poncelet: Metals & Technology Apr. 1944.
- 8) F. W. Preston: J. Soc. Glass Tech, 10(1923) 236.
- 9) C. V. Raman: Nature 103(1919) 113.
- 10) 江頭快: WEDG により製作されたマイクロ工具を用いた脆性材料の微細穴加工，電気加工技術，25, 79(2001) 9.
- 11) 増沢隆久，藤野雅俊：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.
- 12) 谷泰弘：延性モード加工，生産研究，43, 11(1991) 472.
- 13) K. Egashira, T. Masuzawa: Study on Material Removal Mechanism in Microultrasonic Machining, Proceedings of ICPMT 2000, (2000) 739.
- 14) 江頭快, 水谷勝己：超音波振動切削によるガラスの微細穴加工，2002 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，(2002)592.
- 15) 吉岡正人, 澤哲郎：ガラス表面への押し込みによるクラック形成過程の動的観察（硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究, 第 1 報），精密工学会誌，60, 8(1994)1154.
- 16) 吉岡正人, 室井邦雄：ガラス表面への引っかきによるクラック形成過程の動的観察（硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究, 第 2 報），精密工学会誌，60, 9(1994)1274.
- 17) 吉岡正人, 澤哲郎, 室井邦雄：圧子形状による押し込みクラック形成機構の相違（硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究, 第 3 報），精密工学会誌，61, 4(1995)566.
- 18) 西村源六郎：振動工学，誠文堂新光社，(1969)。
- 19) 斎藤修, 庄司克雄, 厨川常元：超音波型彫り加工における加工の停滞現象について（超音波加工に関する研究, 第 1 報），砥粒加工学会誌，42, 12(1998)514.
- 20) 斎藤修, 厨川常元, 庄司克雄：超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動（超音波加工に関する研究, 第 2 報），砥粒加工学会誌，44, 4(2000)169.

第4章 スラリーの影響について

4.1 スラリー流速の影響について

4.1.1 工具直径1mmのとき

3.3 加工圧の影響についての章において最適加工圧が存在することを示した。そこでさらにスラリー流速を変化させ、そのときの最適加工圧における加工速さがどのように変化するかを調べた。スラリー流速を変えるごとに工具先端面を修正して平面を出し、エッジの摩耗による影響が少なくなるようにした。スラリー温度は約20°Cにした。

また、ある程度先端の摩耗が進んだ状態の工具を用いても同様の実験をおこなった。これは、端面の摩耗変形による加工速さへの影響を調べるためである。

スラリー流速と、その流速における最適加工圧での加工速さの関係を図4.1に、摩耗が進んだ状態の工具の場合を図4.2にそれぞれ示す。

先端を研磨した工具では、スラリー流速50m/minのときが最も加工速さが速い。加工速さは、スラリー流速60m/minでの加工速さの1.24倍である。これは次のようにスラリーの挙動で説明できる。ノズルから供給されたスラリーは、初めに工具に接した部分から、工具先端へ供給される。また、工具に対してノズルから供給される部分の反対側（工具に対してスラリー供給点の裏側）では、スラリーが渦を作る。この渦により、スラリーが工具周辺から回り込んで供給される。スラリー流速50m/minのとき、スラリーがバランスよく工具先端に供給される。

スラリー流速が小さいところではノズル側からはスラリーが供給されるが、工具の反対側から回り込むスラリーの供給が滞り、加工速さが遅くなる。

スラリー流速が大きいところでは、スラリーが工具の反対側には回り込むが、工具先端側に移動しようとする前に、スラリーのはやい流れによって供給側とは反対側の方に押し流されてしまい、工具先端に十分にスラリーが供給されにくくなり、加工速さが遅くなる。

図4.2からわかるように、摩耗が進んだ工具は、工具先端のエッジが丸みを帯びている。さらに、ダイヤモンド部分とシャンク（超硬）部分との接合部が摩耗し、くびれができています。

工具側面の摩耗については、砥粒によるアブレシブ摩耗である。超音波振動により、砥粒が加工面である工具直下へ向かって供給される。その際、砥粒は工具側面に沿って引きずられながら移動する。硬さが B_4C 砥粒よりも小さい超硬シャンクは、この物理的接触により摩耗を生ずる。このくびれにおいて、砥粒と接する時間がより長いPCDに近い側での摩耗量が大きい。

PCD工具の硬さは B_4C 砥粒よりも大きいため、アブレシブ摩耗による工具側面の摩耗はほとんどみられない。

工具長手方向の摩耗については、超音波振動によって砥粒に与える衝撃力により、砥粒が工具側にも進入することによるものである。摩耗のしやすさは、工具材質（特に硬さと破壊靱性）によって異なる。

超音波振動によりエネルギーが砥粒に与えられるとき、PCD工具は非常に硬いため、

衝撃力を与えられた砥粒は工具にほとんど進入することなく反発され、加工のためにそのエネルギーの大部分を消費する。ゆえに長手方向の摩耗量が少なく、また加工効率も高い。

工具先端のエッジについては、バレル加工におけるエッジ部分の各法線方向からの力による押しつぶし効果と同様なものと考えられる。押しつぶし効果のイメージ図を図4.3に示す。工具側面におけるアブレイブ摩耗と長手方向における砥粒の侵入による摩耗の両方により、エッジが摩耗し丸みを帯びてくる。

この工具で同様の実験をおこなった結果、加工速度が最大となるスラリー流速は摩耗する前と同じ50m/minであるが、工具先端を平らに研磨した工具に比べて、加工速度は1.28倍になる。

第5章において改めて説明するが、工具端面に面取りを施したPCD工具を用いて加工すると加工速度が遅くなる。これは、工具端面が摩耗すると加工速度が遅くなることを意味する。しかし、図4.1では、先端が摩耗した工具の方が、加工速度が速くなっている。これは、ダイヤモンド部分とシャンク部分の接合部付近の摩耗（くびれ）が原因であり、摩耗する前と比較して、スラリーの流出入と切りくずの排出がより容易になったために、加工速度が速くなったものと考えられる¹⁾。

4.1.2 工具小径化とスラリー流速の関係

超音波加工において、スラリー供給状態が加工速度に影響をおよぼす。4.1.1において得られた結果をもとに、各工具直径におけるスラリー流速とそのときの最適加工圧での加工速度の関係を図4.4に示す。加工速度が最大となるスラリー流速が存在し、その流速は工具直径によって異なることがわかる。加工圧は工具直径に反比例する関係があるが、最大加工速度は、工具直径によらず約0.012mm/secである。

スラリー流速によって加工速度が異なる理由を工具直径0.5mmのときで考えてみる。スラリー流速18m/min、30m/min、48m/minのときにおける工具周辺のスラリー流れの状態を図4.5に示す。

スラリー流速が遅いとき、工具のスラリー供給側に定常波が発生する。これにより、工具周辺において、加工穴へのスラリー流入圧力の不均一が生ずる。このとき工具は、スラリー供給側と反対側が著しく摩耗する。加工穴へのスラリー供給は、スラリー供給側の反対側で盛んにおこなわれていると考えられる。

スラリー流速を速くしていくとその波が消える。このときのスラリー流速において加工速度が最も速くなる。このとき工具のスラリー供給側と反対側での摩耗は、形状を見る限りほぼ同じである。

さらに、スラリー流速を速くしていくと、工具後方に流線²⁾が発達し、その流線によって仕切られた外側の主流と内側の著しく乱れた後流が形成される。このとき、工具周囲ではスラリー供給側とその反対側において、スラリーの加工穴への流入圧力に差を生ずる。流速を速くするにつれて、スラリー流入圧力の不均一が著しくなり、加工速度は低下する。このとき工具は、スラリー供給側が著しく摩耗する。加工穴へのスラリー供給は、スラリー供給側で盛んにおこなわれていると考えられる。

実験から得られた各工具直径における最適スラリー流速を図4.6示す。横軸に工具直径、縦軸に最適スラリー流速を示している。

図4.6から、工具直径が小さくなると最適スラリー流速が遅くなる理由は次のように考えられる。工具直径が小さくなると、流線が比較的遅いスラリー流速でも発生しやすくなり、後流によってスラリー供給が妨げられやすくなる。そこで、スラリー流速を遅くすることで、流線を生じにくくすることができるようになる。工具に対してスラリー供給側から加工穴へ流入出するスラリーと、その反対側から加工穴へ流入出するスラリーのバランスのとれたところがスラリー最適流速となる。

実験当初は次のように考え、投稿論文にも同様の記述をした³⁾。工具直径が0.3mmより小さくなると、最適スラリー流速はある値に収束していくと考えられる。スラリー流速が遅くなりすぎると、つまりスラリーが殆ど滞留するような状態になると、加工に使用される砥粒に限られ、加工で破碎された砥粒が多く存在することになる。また、排出されずに溜まる切りくずが増えてくるため、加工が遅くなってくる。よってそれらを解消するためにも、ある程度のスラリー流速は必要である。

しかし、その後の追加実験によって工具直径が0.3mmより小さくなると、上述の内容が当てはまらないことがわかった。このときの加工条件を表4.1に示す。このときの工具は、東京都立産業技術研究所との共同研究によって製作したものである。

スラリー流速を図4.5(b)のような状態に設定して加工し、砥粒を他の実験よりも細かい#1000を用いたにもかかわらず、工具側のスラリーによるアブレイブ摩耗が激しくなり、工具自身の摩耗量が大きくなった。加工前の工具の状態を図4.7に、加工後の工具の状態を図4.8にそれぞれ示す。

工具の折損を防ぐことを目的に、加工切込み速さを規制し、かつ揺動制御をおこなったため、結果としてスラリーと接触している時間が長くなったことも影響していると考えられる。

よって、工具直径0.3mmより小さくなったときには、砥粒をポンプによる供給方法から、筆付けによる供給方法に代え、揺動制御をおこなうことでポンピング効果を促進させる方法をとることが望ましいと考えられる。

従来の超音波加工では、スラリーが加工に作用している工具に対して可能な限り均一に供給されている状態にするという極めて抽象的な表現をしてきた。研究成果から、工具周辺でのスラリーによる流線の発生状態を考慮に入れたスラリー流速に設定し、供給状態を維持させるという、具体的なスラリー供給方法が確立できると思われる。

4.2 スラリー温度の影響について

加工液には、水道水を用いており、水温が下がると粘度が増す。超音波加工においては、スラリーの粘度が上がると加工が停滞する。

スラリーの粘性が大きくなることは、スラリーの流動性を低下させ、ポンピング作用の抵抗成分として影響を与える。しかし、適度な粘性を持っていることは、切りくずや砥粒の運搬には必要であり、加工中において工具直下で砥粒が存在しないという空洞現象の発生を防ぐ意味からも必要である。

スラリー温度の違いによる最適加工圧での加工速さの変化を図4.9に示す。スラリー流速は48m/min、温度を変えるごとに工具先端面を平らに研削修正した。

スラリー温度を15°Cから上げていくと、粘度の低下により加工速さは速くなり、約22°Cで最大となる。水温が15°Cから22°Cに上昇すると、水の粘度は約16%小さくなる⁴⁾。最適加工圧における加工速さが最も速いのは22°Cのときで、15°Cのときの1.87倍である。さらに温度を上げていくと加工速さがわずかに変化する。これはキャビテーションの影響と考えられる。キャビテーションについては後述する。(第8章参照)

通常の水中のキャビテーションの発生強度が最も大きい温度は約48°Cである⁵⁾。スラリー温度を上げていくと、ポンピング作用は変わらないが、キャビテーションの発生は盛んになる。すると、工具直下において、キャビテーションの気泡によって砥粒が押しつけられ、砥粒の分散分布の様子が変化し、加工速さが遅くなっていくものと考えられる。

夏場と冬場では、加工時間に大きな差が生じていることを作業者は感じてはいたが、その問題を改めて取り上げて改善しようとはしなかった。研究成果から、冬場のようにスラリー温度が20°Cを下回っていると、加工速さが遅くなる。そこで、スラリー温度管理をすることが高能率加工につながるということが明らかとなった。

4.3 第4章の総括

第4章 スラリーの影響についてをまとめると次のようになる。

スラリー流速を変化させ、最適加工圧における加工速さの変化を調べた。また、ある程度先端の摩耗が進んだ状態の工具を用いても同様の実験をおこなった。

先端を研磨した工具では、スラリー流速 50m/min のときが最も加工速さが速い。加工速さは、スラリー流速 60m/min での加工速さの 1.24 倍である。摩耗が進んだ工具は、工具先端のエッジが丸みを帯びている。さらに、ダイヤモンド部分とシャンク(超硬)部分との接合部が摩耗し、くびれができています。加工速さが最大となるスラリー流速は摩耗する前と同じ 50m/min であるが、工具先端を平らに研磨した工具に比べて、加工速さは 1.28 倍になる。ダイヤモンド部分とシャンク部分の接合部付近の摩耗(くびれ)が原因であり、摩耗する前と比較して、スラリーの流出入と切りくずの排出がより容易になったために、加工速さが速くなったものと考えられる。

各工具直径において加工速さが最大となるスラリー流速が存在し、工具直径が小さくなると最適スラリー流速が遅くなる。

スラリー温度の違いによる最適加工圧での加工速さの変化を調べた。スラリー温度を 15°C から上げていくと、粘度の低下により加工速さは速くなり、約 22°C で最大となる。水温が 15°C から 22°C に上昇すると、水の粘度は約 16% 小さくなる。最適加工圧における加工速さが最も速いのは 22°C のときで、15°C のときの 1.87 倍である。さらに温度を上げていくと加工速さがわずかに変化する。これはキャビテーションの影響と考えられる。

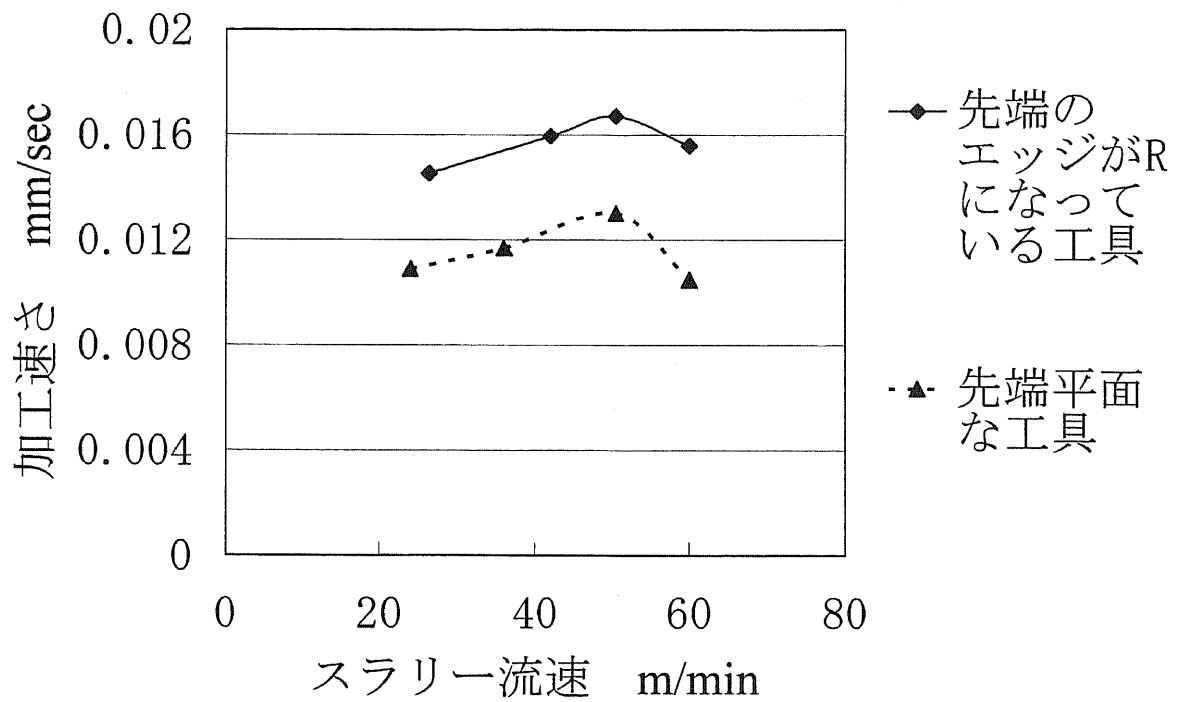


図 4.1 スラリー流速と加工速度の関係

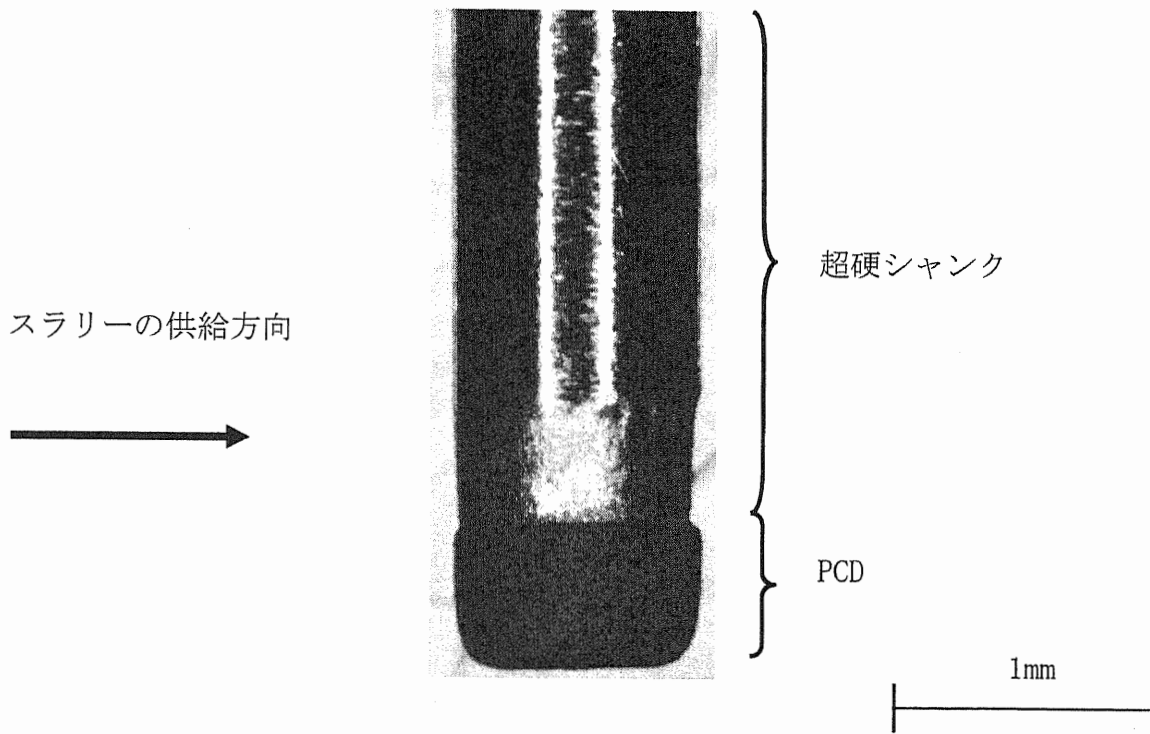


図 4.2 摩耗した工具

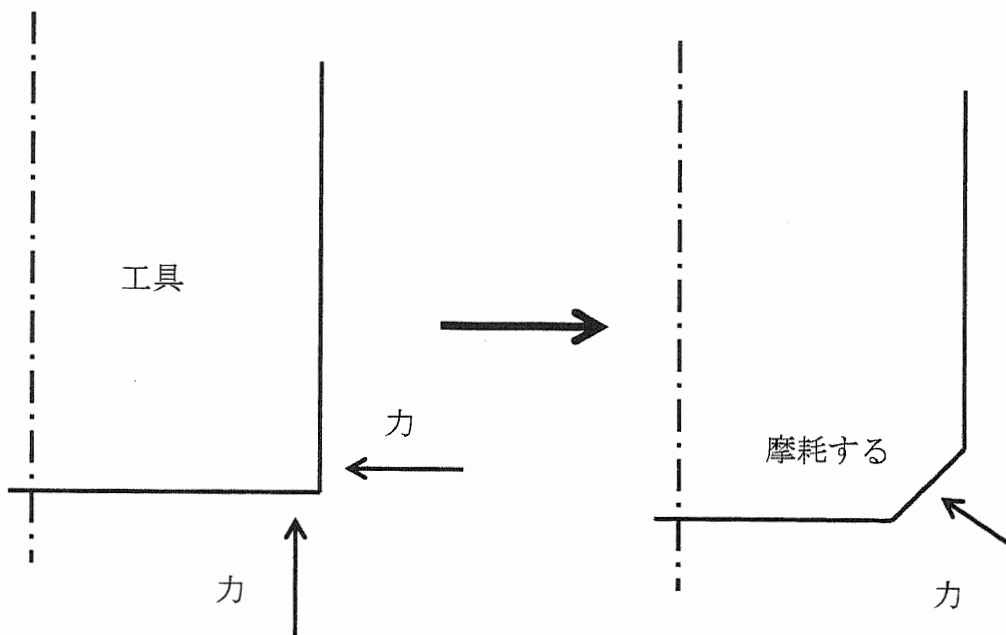


図 4.3 エッジ部の押しつぶし効果イメージ図

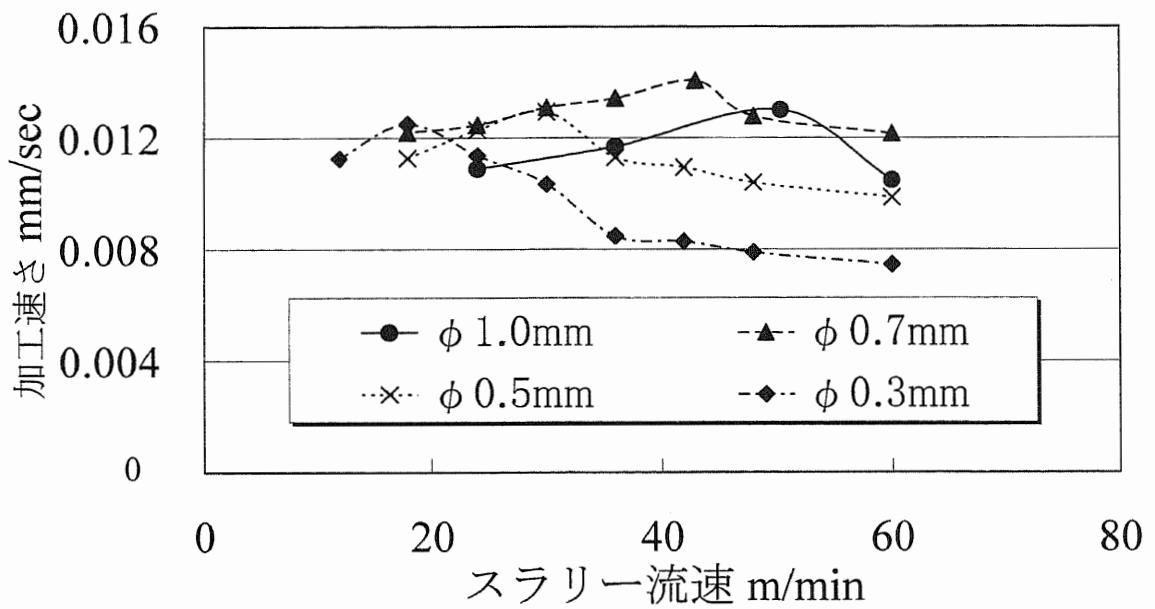
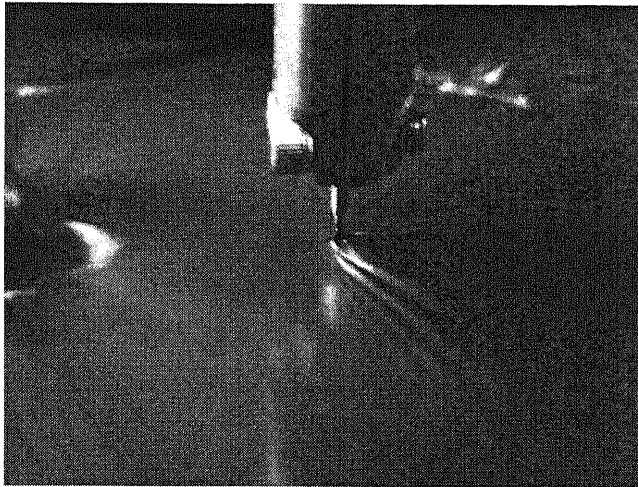


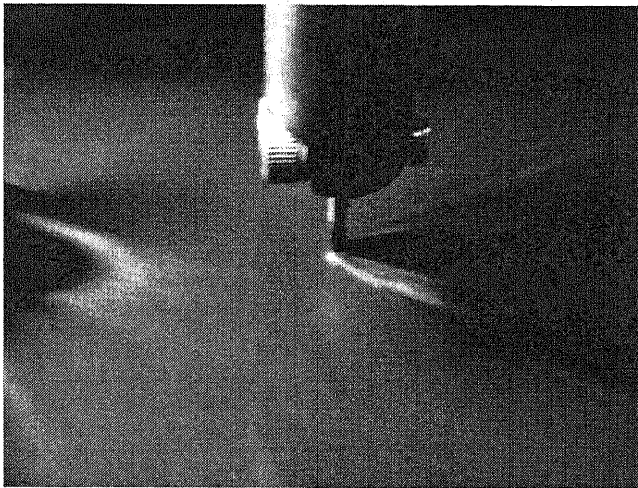
図 4.4 工具直径別スラリー流速と加工速さの関係



(a) スラリー流速 18m/min



(b) スラリー流速 30m/min



(c) スラリー流速 48m/min

図 4.5 工具周辺のスラリーの状態

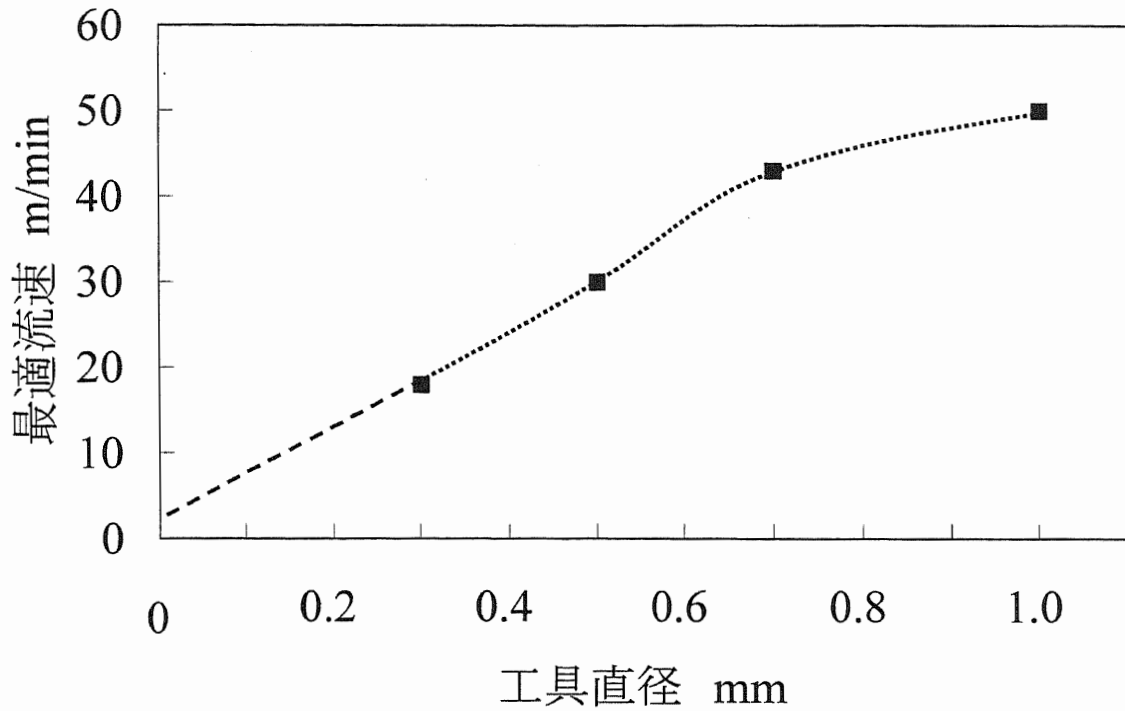


図 4.6 工具直径と最適スラリー流速の関係

表 4.1 実験条件

工具先端部分	PCD $\phi 0.181\text{mm} \times l 1.072\text{mm}$
被削材	ソーダガラス
砥粒	B_4C #1000 中心粒径 $4.5 \pm 0.5\mu\text{m}$ ポンプで供給
加工液	水道水
無負荷時の工具端振幅	$5\mu\text{m}_{\text{p-p}}$
加工荷重	154MPa
加工速度規制	1mm/sec
揺動制御	あり

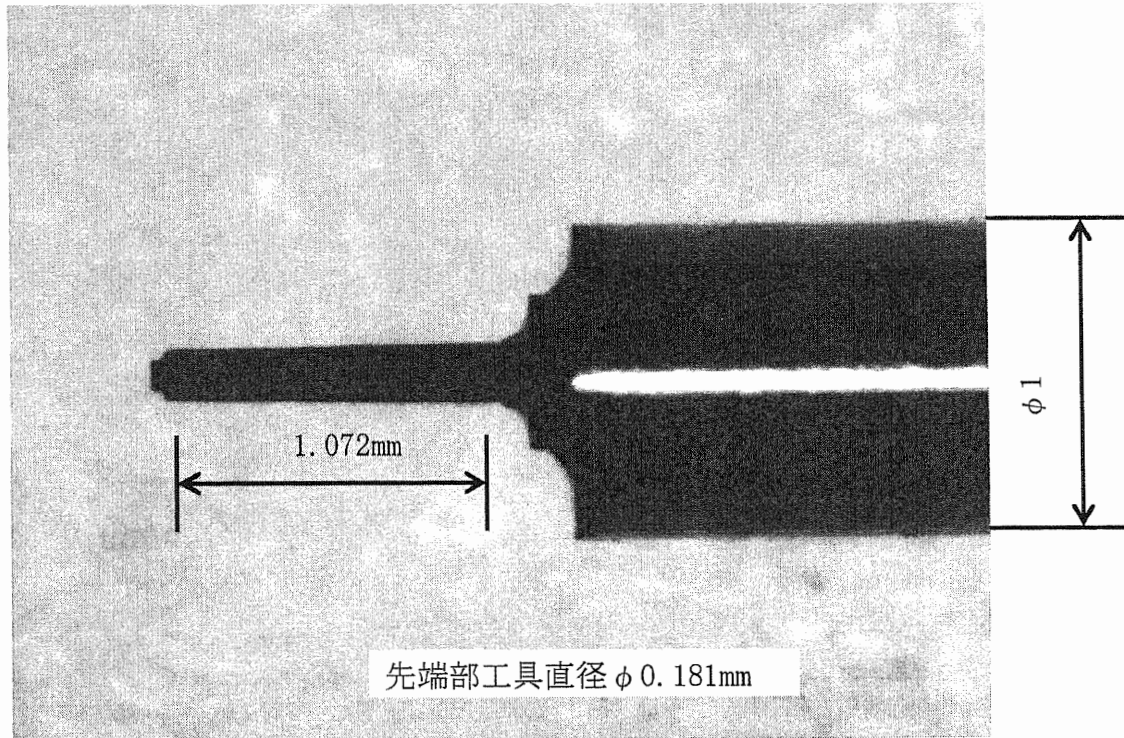


図 4.7 加工前の工具写真

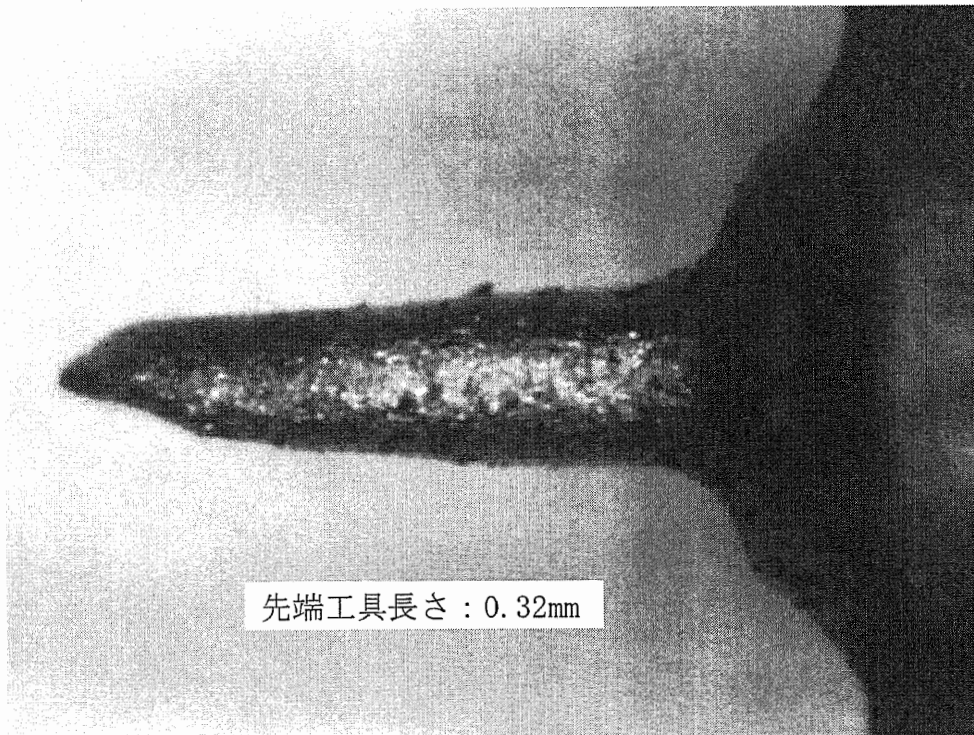


図 4.8 加工後の工具写真

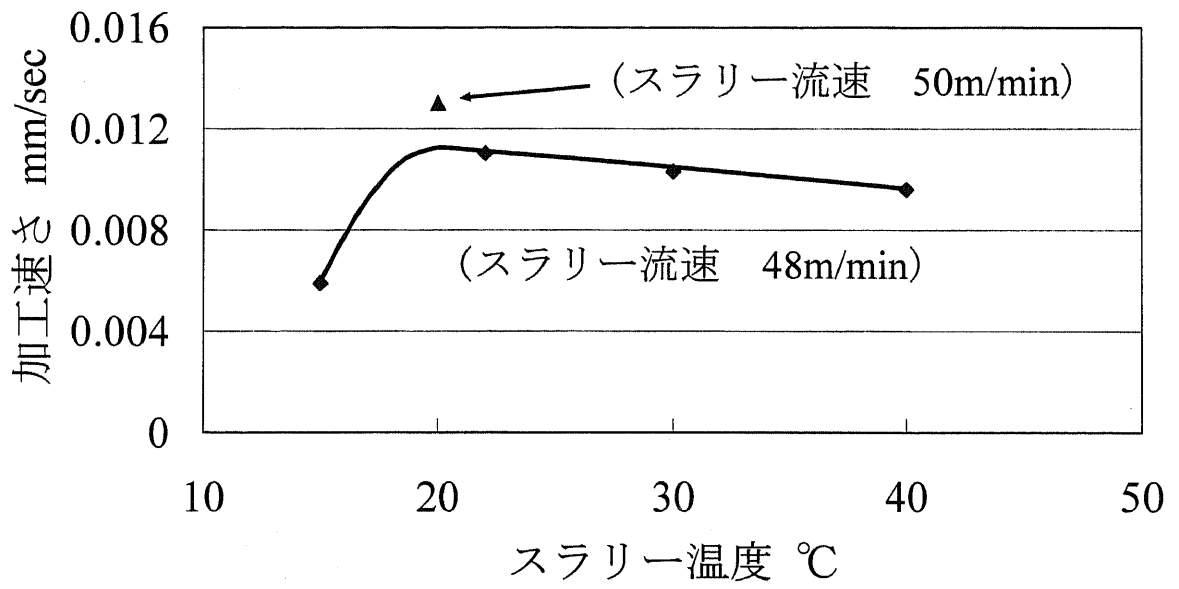


図 4.9 スラリー温度と加工速さの関係

参考文献

- 1) 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, (1968).
- 2) 今井功: 流体力学, 岩波書店, (1995).
- 3) 田中信一他: 小径穴超音波加工に関する研究 (第1報: 種々の加工条件が加工速さに与える影響), 砥粒加工学会誌, 48, 6 (2004) 324
- 4) 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社, (1965).
- 5) 島川正憲: 超音波工学(-理論と実際-), 工業調査会, (1975).

第5章 工具先端形状の影響について

5.1 面取り角度と加工速さの関係

加工が進むにつれて工具先端のエッジ部分が摩耗してくることから、工具面取り角度によって加工速さがどのように変化するかを調べた。これは2.2.3 工具形状についての章で示した工具を用いた。

加工圧は8.14MPa、スラリ流速は48m/min、スラリ温度は約22℃である。

工具面取り角度と加工速さの関係を図5.1に示す。加工深さは0.5mm, 0.75mm, 1.0mm, 1.5mmとした。

面取りをつけていない工具($\theta=90^\circ$)では、加工深さによって加工速さが大きく変化することはなく、ほぼ一定の加工速さで加工できる。

面取り角度をつけた工具では、いずれも加工深さが深くなると加工速さが遅くなる。加工深さ0.5mmと1.5mmを比べると、加工深さ1.5mmのとき、加工速さが約半分になる。

通常の超音波加工においては、ホーン工具等の振動系はその軸芯と平行な方向に振動している。つまり、工具先端の被削材と平行な面に対し、法線方向となる向きの振動により、砥粒が被削材を破碎し、加工してゆく。したがって、工具の面取りをすると、工具先端の平面部分の面積が小さくなる。面取りをした部分でも加工は進んでいくが、面取りしていない部分に比べて、単位面積あたりの縦方向振動勢力が小さくなる。加工において、工具先端部分と傾斜面部分でのクリアランスが異なり、粒径の大きな砥粒が工具先端に供給されにくくなると考えられる。

加工深さが深くなるほど加工速さに対する面取りそのものの影響が大きくなる。これは、工具先端のエッジが加工によって摩耗すると加工速さが遅くなることを意味する。工具面取り角度では、加工速さにそれほど違いがない。

安定した加工速さを確保するためには、工具のエッジが摩耗しにくい工具を用いるか、または加工を何回かおこなうたびに工具端面をたとえば研削修正し、可能な限り平面状となした工具で加工をおこなうことが望ましい。

5.2 面取り角度とチップングの大きさの関係

面取り角度がチップングの大きさにどのような影響を与えているかを調べた。面取り角度とチップングの大きさの関係を図5.2に示す。図の縦軸は、加工穴中心から、加工穴外周部に存在する最も大きなチップングまでの距離から工具半径の差を計算したものである。この値が大きいということは、加工品質に影響を与えることから、加工の高精度化を考えたときに憂慮すべき問題であるといえる。面取りしていない工具のときは、チップング自身の大きさが小さくなるが、加工深さが深くなると、大きなチップングが発生しやすい傾向にある。

面取りしている工具を用いると、加工深さに関わらず120 μ m以上の大きなチップングが発生する。超音波加工においては、被加工穴径は使用工具径よりも少なくとも砥粒中心径の2倍程度は大きくなることを考えると、この図から砥粒中心粒径の10倍以上の大きなチップングが発生していることになる。

5.3 加工時間と加工穴径の関係について

加工時間と工具径に対する加工穴径の割合の関係を図 5.3 に示す。加工時間は、加工深さ 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm, 1.5mm にそれぞれ達するまでに加工に要した時間である。縦軸の加工穴径/工具直径は、用いた工具直径に数 μm の差が生じていたため、工具直径に対する加工穴径の大きさを比較した。この値が大きくなると、加工穴径も大きくなっていることを意味する。

全体的に、加工深さが深くなると加工時間は長くなる。すると工具側面において、出入りする砥粒液の総量は増え、被削材と砥粒が接する時間が長くなり、加工穴径は大きくなる。

面取りしていない工具では、加工時間が長くなっても加工穴径はそれほど大きくなる。面取りした工具では、加工時間の増大に伴って、加工穴径が大きくなる。

以上のことから、超音波加工時に生ずるチップングも含めた加工穴径の大きさは、加工時間、工具面取り角度により大きく影響を受けることがいえる。

5.4 第5章の総括

第5章 工具先端形状の影響についてをまとめると次のようになる。

工具面取り角度によって加工速さがどのように変化するかを調べた。面取りをつけていない工具では、加工深さによって加工速さが大きく変化することはなく、ほぼ一定の加工速さで加工できる。面取り角度をつけた工具では、いずれも加工深さが深くなると加工速さが遅くなる。加工深さ 0.5mm と 1.5mm を比べると、加工深さ 1.5mm のとき、加工速さが約半分になる。

面取り角度がチップングの大きさにどのような影響を与えているかを調べた。面取りしていない工具のときは、チップング自身の大きさが小さくなるが、加工深さが深くなると、大きなチップングが発生しやすい傾向にある。

面取りしている工具を用いると、加工深さに関わらず 120 μm 以上の大きなチップングが発生する。超音波加工においては、被加工穴径は使用工具径よりも少なくとも砥粒中心径の 2 倍程度は大きくなることを考えると、砥粒中心粒径の 10 倍以上の大きなチップングが発生していることになる。

加工時間と工具径に対する加工穴径の割合の関係を調べた。全体的に、加工深さが深くなると加工時間は長くなる。すると工具側面において、出入りする砥粒液の総量は増え、被削材と砥粒が接する時間が長くなり、加工穴径は大きくなる。

面取りしていない工具では、加工時間が長くなっても加工穴径はそれほど大きくなる。面取りした工具では、加工時間の増大に伴って、加工穴径が大きくなる。

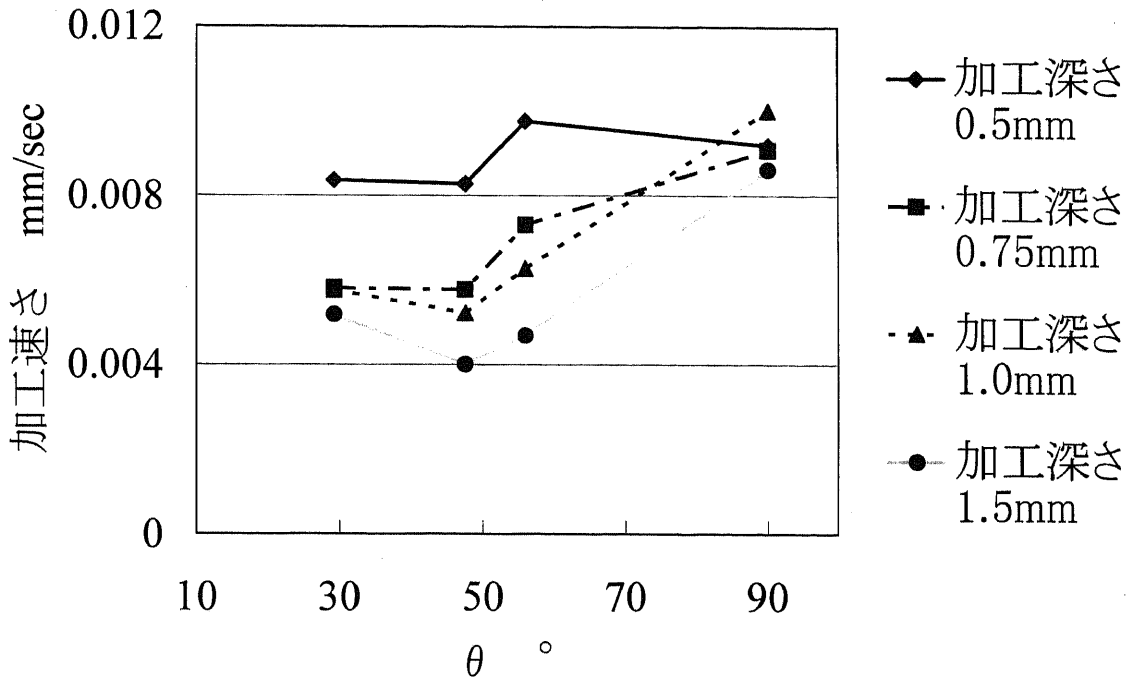


図 5.1 面取り角度と加工速度の関係

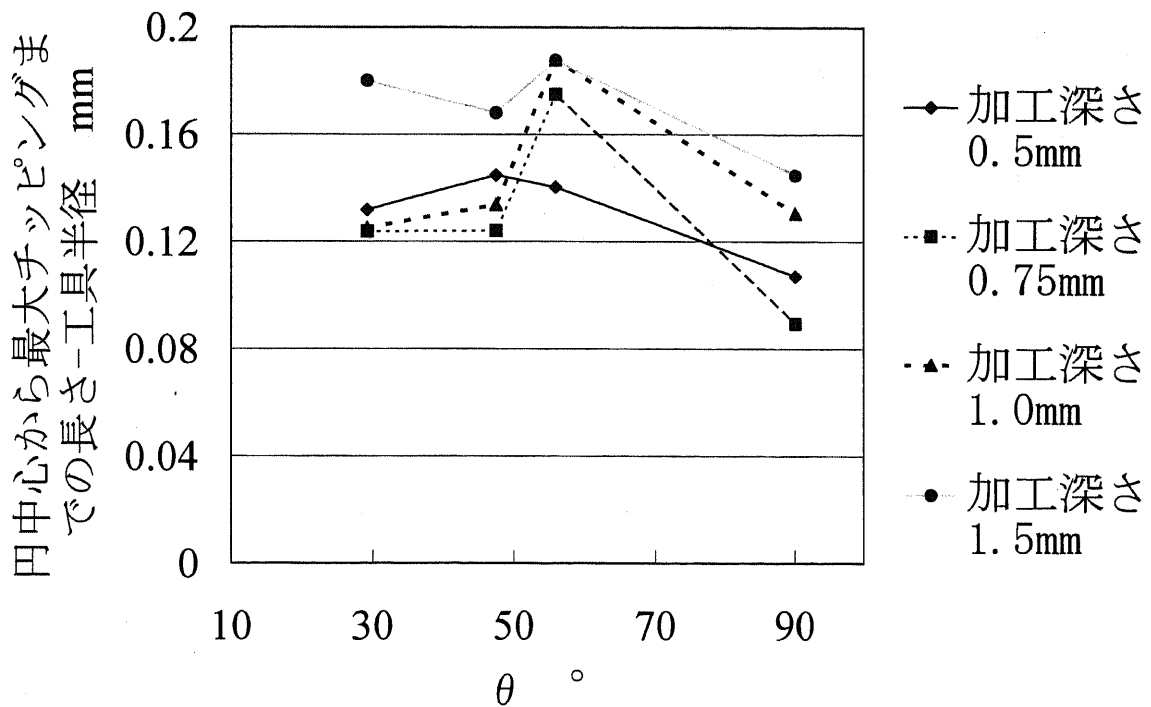


図 5.2 面取り角度とチップングの大きさの関係

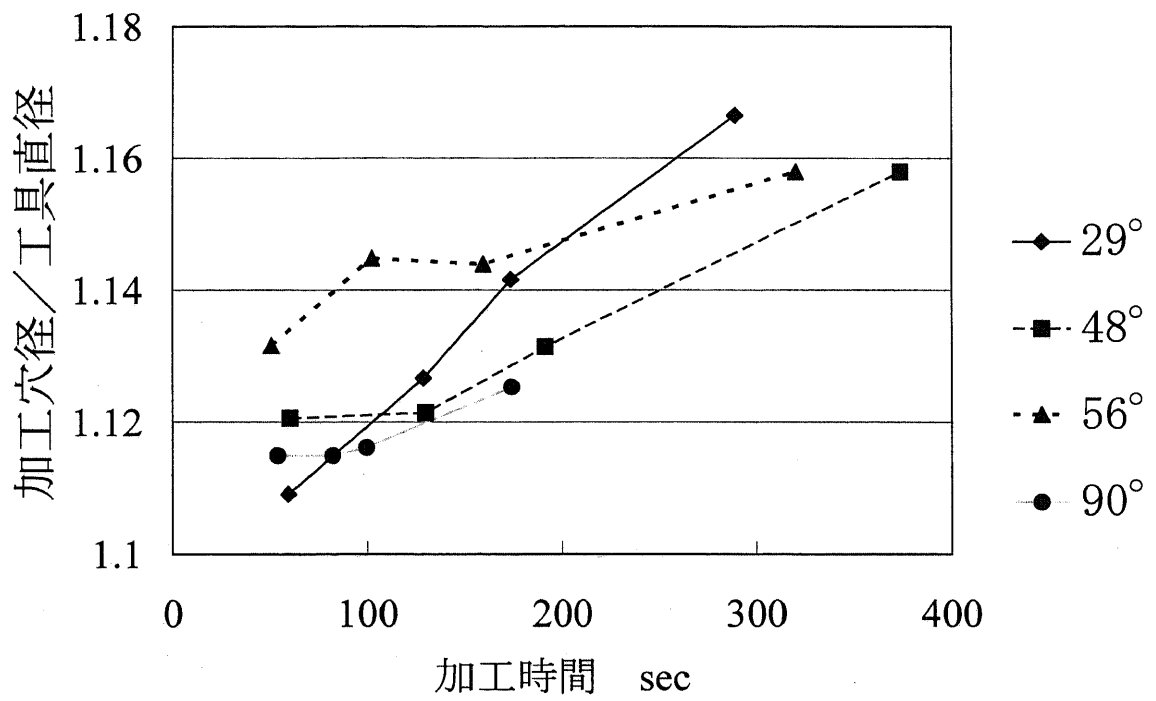


図 5.3 加工時間と 加工穴径/工具直径 の関係

第6章 工具材質別超音波加工特性について

6.1 超硬工具における工具摩耗とその加工穴への影響について

超音波加工には工具材質として超硬合金材も用いられるが、工具摩耗量が多いだけでなく、摩耗による工具の形状変化も著しい。そのため、同一工具を用いて加工を繰り返していくと、加工穴の形状変化が大きくなる。

そこで、直径 1.0mm の超硬工具を用いたときの加工圧による加工速さの変化、工具摩耗量および工具摩耗による加工穴形状の変化を調べた。スラリー流速 48m/min、スラリー温度約 20℃、加工深さ 1.2mm とした。加工圧を 7.4MPa、9.1MPa のときの加工穴数と加工速さの関係を図 6.1 に示す。

超硬工具の場合、加工速さが最も速くなる最適加工圧は 7.4MPa であった。このとき、加工穴数 5 穴目までは加工速さにそれほど変化なく加工できたが、それ以降になると加工速さがどんどん遅くなっていった。これは、加工が進行すると工具先端部において摩耗による変形が生ずるからである。そして 20 穴加工後は、加工がほとんど進まなくなった。

加工圧 9.1MPa のときは、6 穴目まで徐々に加工速さが遅くなり、いったん加工速さが元に戻るものの、10 穴までしか加工できなかつた。11 穴目では途中で加工が止まってしまった。これも工具先端部の変形が原因であると考えられる。

途中で加工が止まった理由については、次のように考えられる。超音波加工では、工具先端の被削材と平行な面の縦振動 (5.1 章参照) により、砥粒が被削材を破碎し、加工してゆく。したがって、工具先端の平面部分の面積が小さくなると、単位面積あたりの縦方向振動成分が小さくなる。

また、工具先端部分と変形による傾斜部分でのクリアランスが異なり、径の大きな砥粒が工具先端に供給されにくくなると考えられることから、加工速さが非常に遅くなるか、止まってしまう。加工圧の大小による工具長手方向の摩耗量に違いはほとんどなく、1 穴あたりの工具摩耗量は約 23 μ m であった。

実際の加工現場においては、工具先端が変形しても加工できる場合がある。これは使用する砥粒と工具先端の振幅に関係があると思われる、これについては今後の課題である。

加工圧が 7.4MPa のときの加工穴 (1 穴目、20 穴目) それぞれの断面形状を図 6.2 にそれぞれ示す。写真撮影の際、焦点位置を穴の手前の面に合わせている。また、20 穴加工後の工具外観を図 6.3 に示す。

1 穴目は工具先端のエッジの摩耗が少ないため、加工穴の底面は平面に近かった。しかし、加工穴数が増えるにしたがって工具先端の摩耗が進み、20 穴加工後では加工穴が先細りになる。

20 穴加工後の工具形状から、加工による工具先端の変形の他に、砥粒が供給される側の側面の摩耗も激しいことがわかる。工具側面が流されたスラリーの衝突により削られるために、このような形状になると考えられる。

6.2 PCD 工具における工具摩耗とその加工穴への影響について

PCD 工具を用いたときの加工穴形状を調べた。PCD 工具においては、加工圧の大小による工具長手方向の摩耗量の違いは超硬工具同様にほとんどみられないが、1 穴あたりの工具摩耗量は約 $0.3\mu\text{m}$ と超硬工具の約 $1/77$ であった。

加工圧が 10.5MPa のときの加工穴（1 穴目、20 穴目）それぞれの断面形状を図 6.4 に示す。写真撮影の際、焦点位置を穴の手前の面に合わせている。加工穴側面のカケは、写真撮影のために加工穴を超音波で分断したときにできたものである。

加工穴側面にスジ状の盛り上がった線がみられる。この線は超硬工具のときにもみられるが、超硬工具は砥粒によって工具側も摩耗する故か、PCD 工具のときほど大きくはなく、数も少なかった。このスジ状の盛り上がりは、超音波加工中に生ずるが、その生成メカニズムはわからない。

加工穴底面は、エッジが多少丸みを帯びてはいるものの、超硬工具のときのように先端が先細りになるようなことはなかった。このことから、超硬工具よりも PCD 工具の方が、工具摩耗量が少なく、形状的には安定した加工が期待できる。

次に、工具直径が 1.027mm の PCD 工具を用いて上記条件で連続 110 穴加工をおこない、加工穴寸法の再現性を調べた。各加工穴について被削材表面から深さ 0.1mm 、 0.3mm 、 0.5mm 、 1.0mm 、 1.5mm のところの穴径を測定した。その結果を図 6.5 に示す。

加工深さ 0.1mm 、 0.3mm においては、加工寸法はほぼ一定であった。 0.5mm になると 110 穴目では 1 穴目よりも約 $20\mu\text{m}$ ほど加工穴直径が小さくなる。加工深さ 1.0mm になると、110 穴目のときには 1 穴目よりも $55\mu\text{m}$ 、加工深さ 1.5mm になると、 $75\mu\text{m}$ 加工穴直径が小さくなる。

超音波加工では、工具形状がほぼそのまま被削材に転写されることから、工具先端部から摩耗が進んでいくことがわかる。PCD 工具では、超硬工具のような大きな形状変化を伴う摩耗はみられない。

6.3 工具材質が及ぼす種々の影響について

6.3.1 加工圧について

PCD 工具と SUS304 工具を用い、工具を小径化したときの最適加工圧について比較した。工具材質別の各工具直径と最適加工圧の関係を図 6.6 に示す。

工具直径が小さくなるにしたがい、最適加工圧は大きくなっていく。PCD 工具の場合、工具直径 1.0mm のときの最適加工圧は 8.1MPa 、工具直径 0.3mm のときは 83.2MPa である。SUS304 工具の場合、工具直径 1.0mm のときの最適加工圧は 6.9MPa 、工具直径 0.3mm のときは 55.5MPa である。

直径 1.0mm から工具断面積が $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/10$ になると、工具材質で多少の差はあるものの、最適加工圧は約 2 倍、約 4 倍、約 10 倍となる。

工具直径が小さくなると工具材質によって最適加工圧に差が生ずる明らかな理由はわからないが、次のようなことも考えられる。

超音波加工は、工具と被削材の間に入った砥粒を工具が被削材に打ち込むことによって被削材が破壊されるというものであるが、同時に砥粒も破碎される。工具材質の

ビッカース硬さ（PCD 工具は 8000, SUS304 工具は 200）から、PCD 工具は SUS304 工具の約 40 倍の硬さをもつ。ということは、それだけ砥粒も破碎されやすくなる。3.3.5 において、工具直径 0.3mm のときの加工穴底面の状態から、砥粒の粒径が平均化されたと考えた。SUS304 工具の場合、この平均化される砥粒の粒径が PCD 工具のときよりも多少大きい可能性もある。砥粒の粒径が大きければ、加工に要する加工圧は小さくても済むからである。

また、6.3.3 工具摩耗についての章でも触れることだが、砥粒の作用は工具摩耗量にも関係している。工具の硬さが小さいとそれだけ工具側への砥粒の進入が容易になることから、砥粒が工具により破碎されるよりも工具の摩耗に作用すれば、それだけ砥粒の中心粒径は大きい状態となる。

6.3.2 加工速さについて

次に、工具材質別の加工速さと工具摩耗量の関係を図 6.7 に示す。加工速さの値は、PCD 工具のときは 10 穴加工の平均値、SUS304 工具のときは 5 穴加工の平均値をとっている。また、スラリー流速は、全ての工具直径において 48m/min で一定とした。

図 6.7 から、どの工具直径においても、PCD 工具の加工速さは SUS304 工具の約 2 倍である。これは工具の硬さの違いによるもので、工具の硬さが小さいと、工具が砥粒に与えるエネルギーの一部が工具の変形摩耗に費やされる。そのため、加工に使われるエネルギーが減り、加工速さが遅くなる。

6.3.3 工具摩耗について

次に、工具材質別の工具直径と工具長手方向の摩耗量の関係を図 6.8 に示す。6.3.2 の実験で用いた工具を測定した。工具摩耗量は、加工深さ 1mm 相当のときに工具長手方向でどれだけ摩耗したかを示す。

SUS304 工具の摩耗量は、直径 1.0mm で約 $24\mu\text{m}/1$ 穴、直径 0.3mm で $110\mu\text{m}/1$ 穴である。PCD 工具のときの摩耗量は直径 1.0mm で約 $0.2\mu\text{m}/1$ 穴と SUS304 工具の $1/120$ 、直径 0.3mm で $0.4\mu\text{m}/1$ 穴と SUS304 工具の $1/275$ である。

超音波加工に用いた直径 0.3mm の工具の状態について、5 穴加工後の SUS304 工具、50 穴加工後の PCD 工具を図 6.9 に示す。SUS304 工具は 5 穴加工で先端が半球形状になった。

PCD 工具は先端エッジ部の摩耗と PCD 部と超硬シャンク部の接合部が摩耗し、くびれができています。工具側面のくびれの摩耗については、砥粒によるアブレシブ摩耗である。硬さが B_4C 砥粒よりも小さい超硬シャンクは、この物理的接触により摩耗を生ずる。このくびれにおいて、砥粒と接する時間がより長い PCD に近い側での摩耗量が大きい。

工具長手方向の摩耗は、工具の超音波振動によって砥粒に与える衝撃力と近似な衝撃を砥粒から工具端が受けることによる結果と考えられる。工具摩耗量の点から考えると、小径穴加工での超音波加工では PCD 工具がより適している。

6.4 第6章の総括

第6章 工具材質別超音波加工特性についてをまとめると次のようになる。

直径1.0mmの超硬工具を用いたときの加工圧による加工速さの変化、工具摩耗量および工具摩耗による加工穴形状の変化を調べた。超硬工具の場合、加工速さが最も速くなる最適加工圧は7.4MPaであった。加工穴数5穴目までは加工速さにそれほど変化なく加工できたが、それ以降になると加工速さがどんどん遅くなっていった。これは、加工が進行すると工具先端部において摩耗による変形が生ずるからである。そして20穴加工後は、加工がほとんど進まなくなった。

加工圧9.1MPaのときは、6穴目まで徐々に加工速さが遅くなり、いったん加工速さが元に戻るものの、10穴までしか加工できなかった。これも工具先端部の変形が原因であると考えられる。

また、加工穴の断面形状から、1穴目は工具先端のエッジの摩耗が少ないため、加工穴の底面は平面に近かった。しかし、加工穴数が増えるにしたがって工具先端の摩耗が進み、20穴加工後では加工穴が先細りになる。

20穴加工後の工具形状から、加工による工具先端の変形の他に、砥粒が供給される側の側面の摩耗も激しいことがわかる。工具側面が流されたスラリーの衝突により削られるために、このような形状になると考えられる。

PCD工具を用いたときの加工穴形状を調べた。PCD工具においては、加工圧の大小による工具長手方向の摩耗量の違いは超硬工具同様にほとんどみられないが、1穴あたりの工具摩耗量は約0.3 μm と超硬工具の約1/77であった。

加工穴の断面形状から、加工穴底面は、エッジが多少丸みを帯びてはいるものの、超硬工具のときのように先端が先細りになるようなことはなかった。このことから、超硬工具よりもPCD工具の方が、工具摩耗量が少なく、形状的には安定した加工が期待できる。

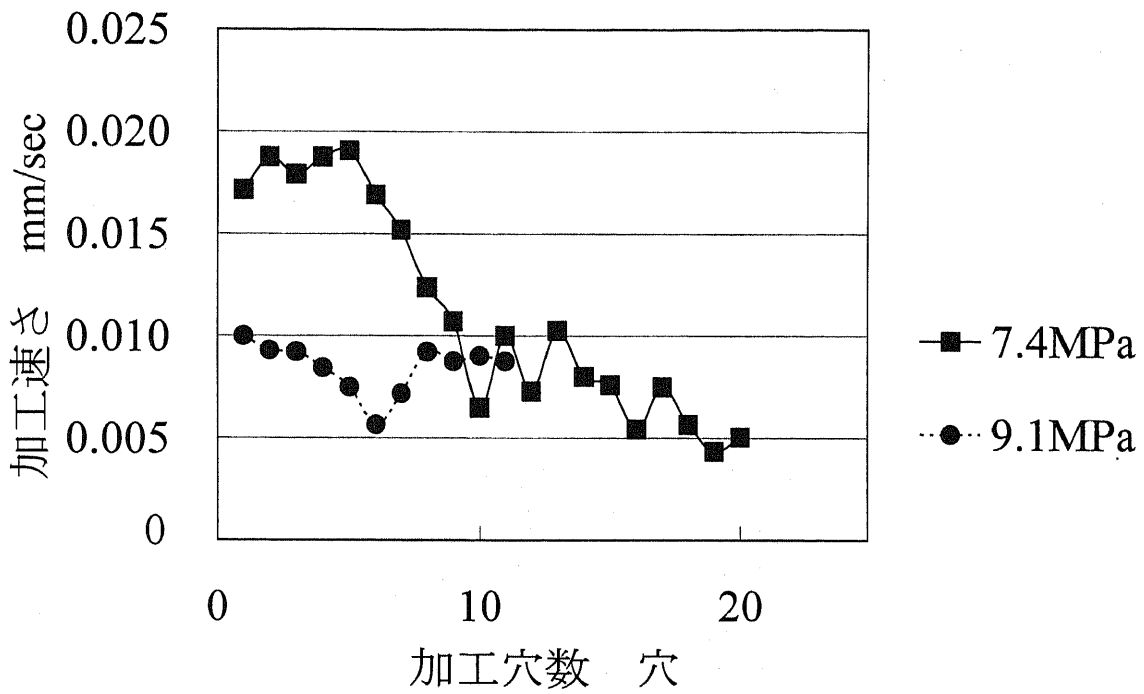


図 6.1 加工穴数と加工速度の関係

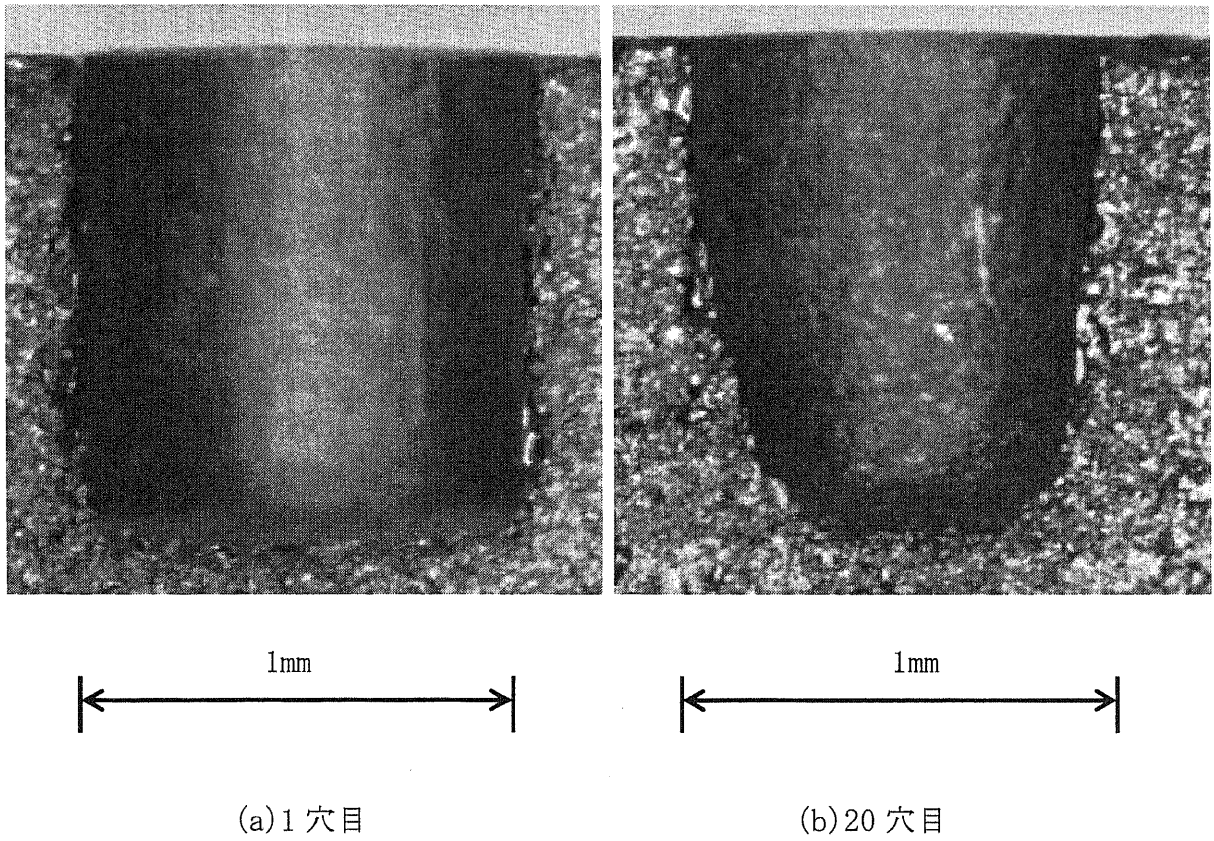


図 6.2 加工穴の断面形状

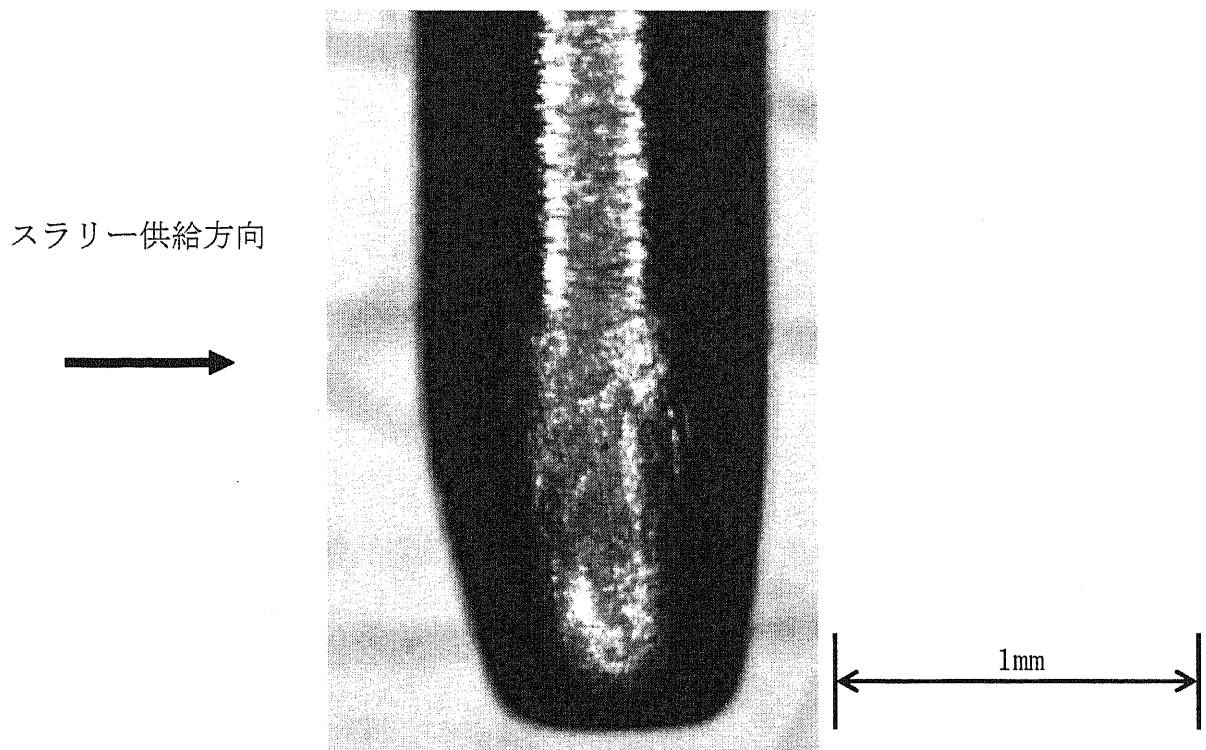


図 6.3 20 穴加工後の工具形状

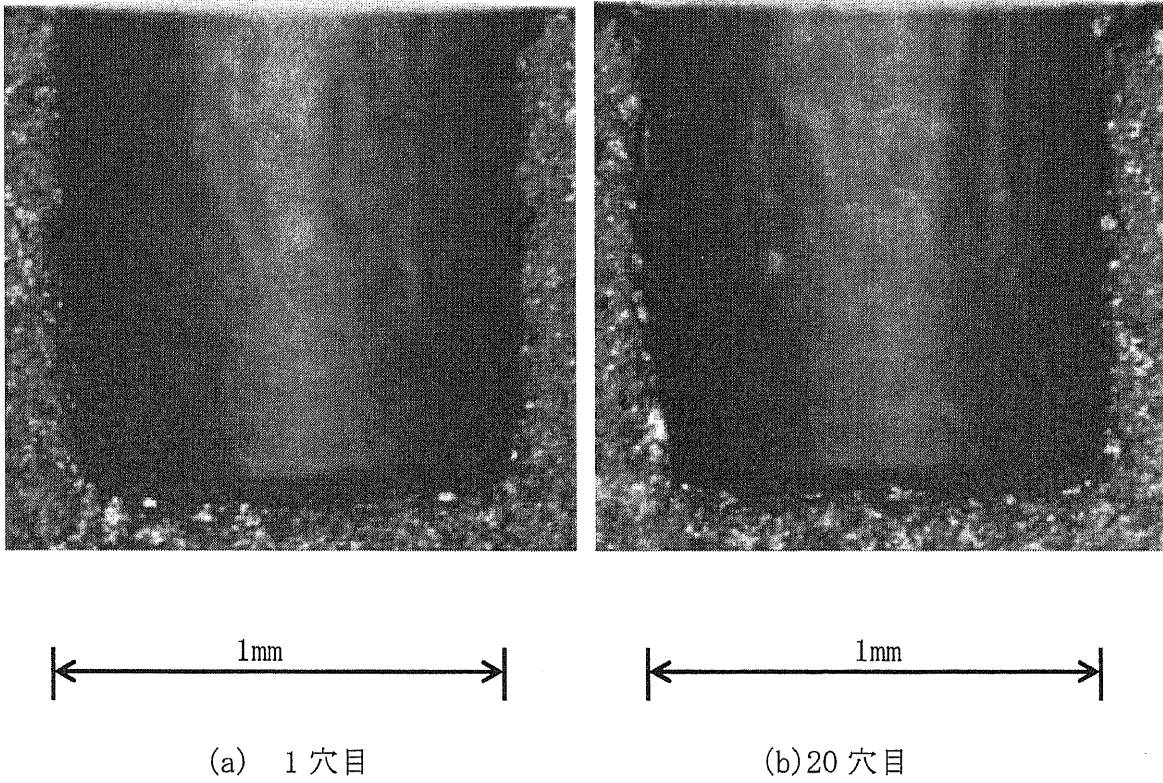


図 6.4 加工穴の断面形状

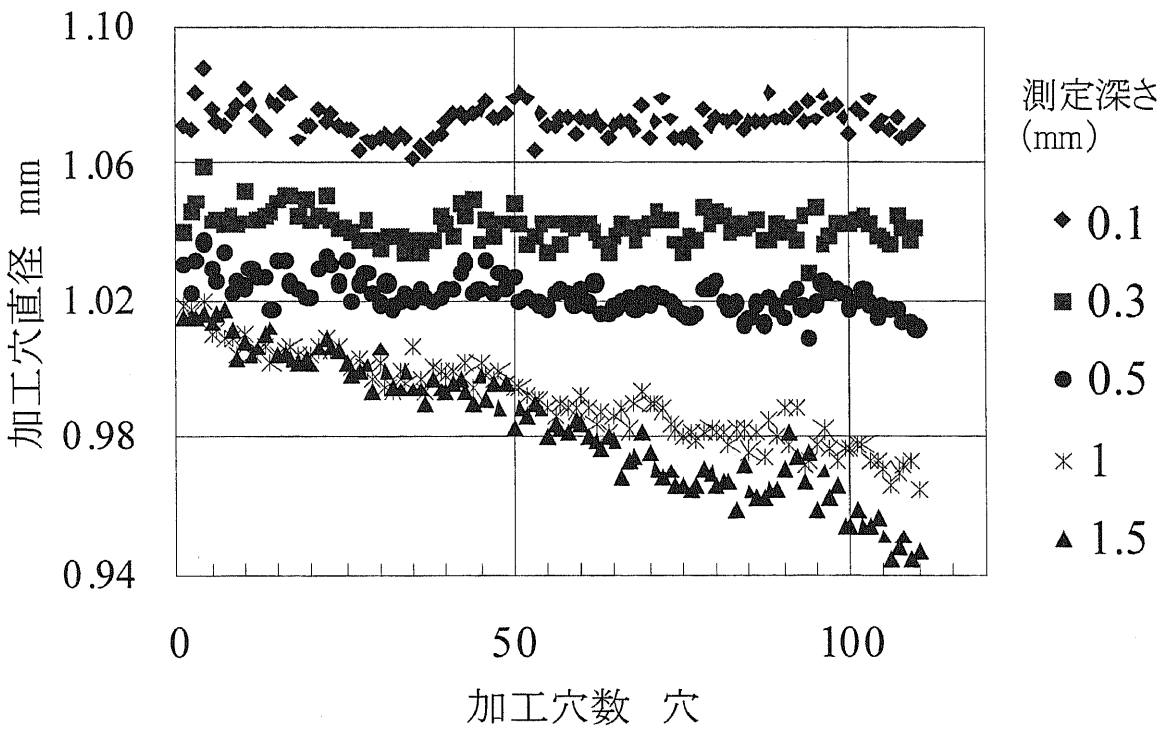


図 6.5 加工穴数と加工穴径の関係

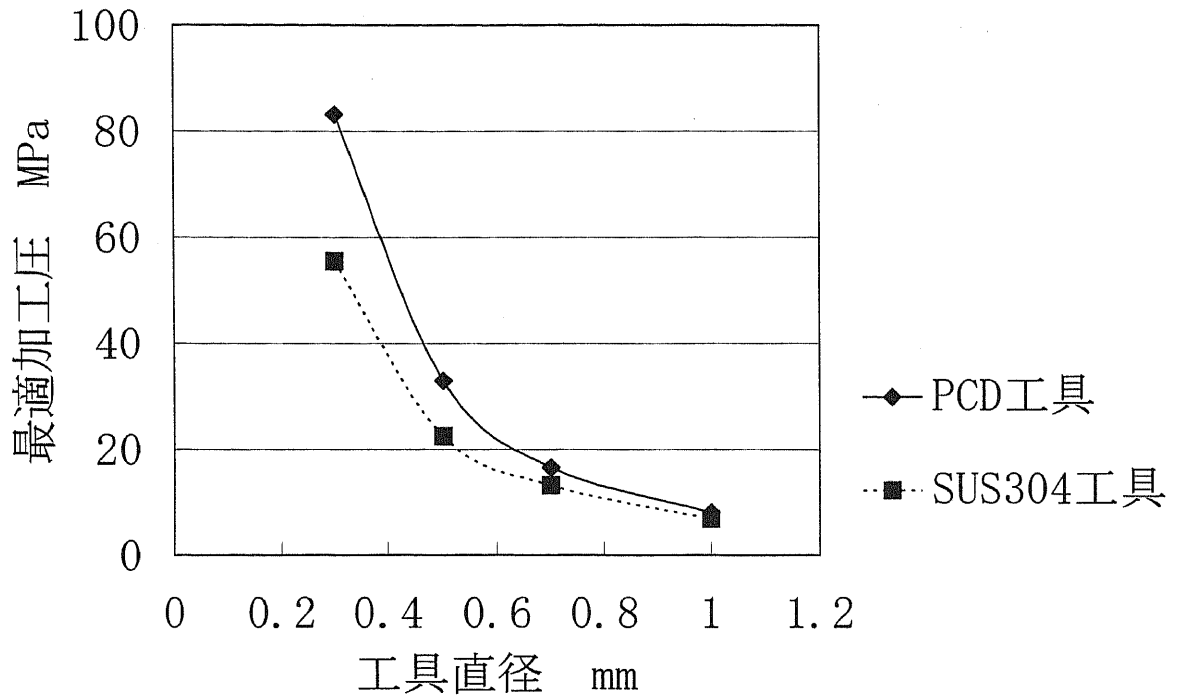


図 6.6 工具材質別の工具直径と最適加工圧の関係

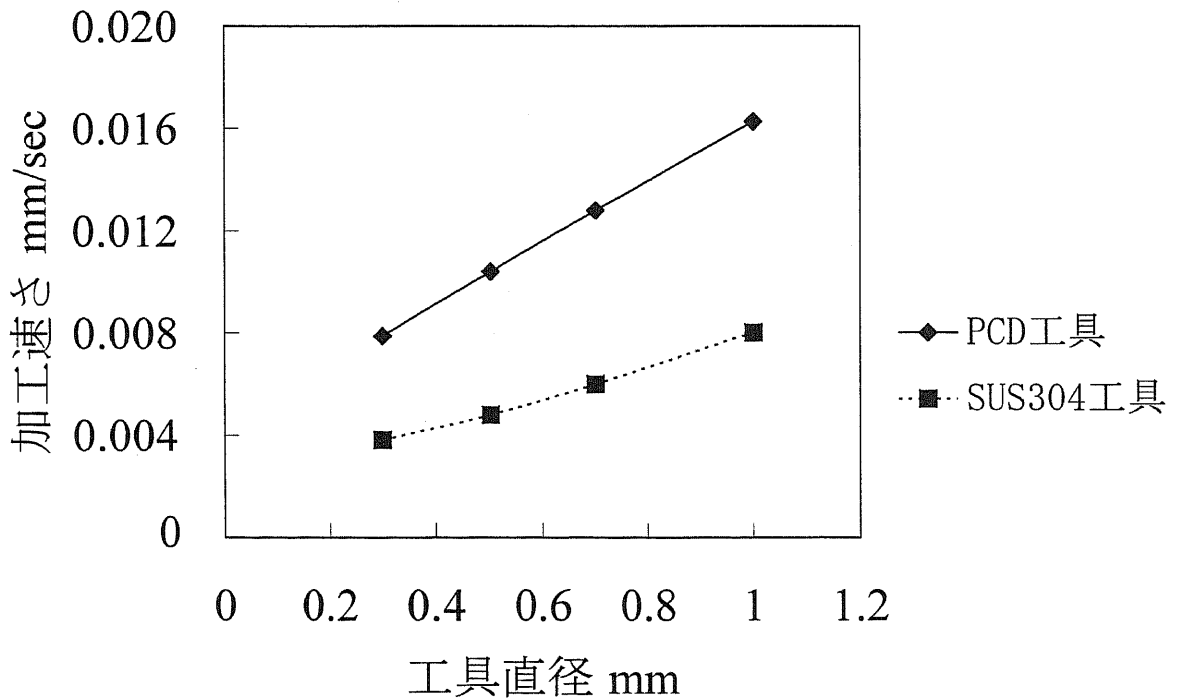


図 6.7 工具材質別の工具直径と加工速度の関係

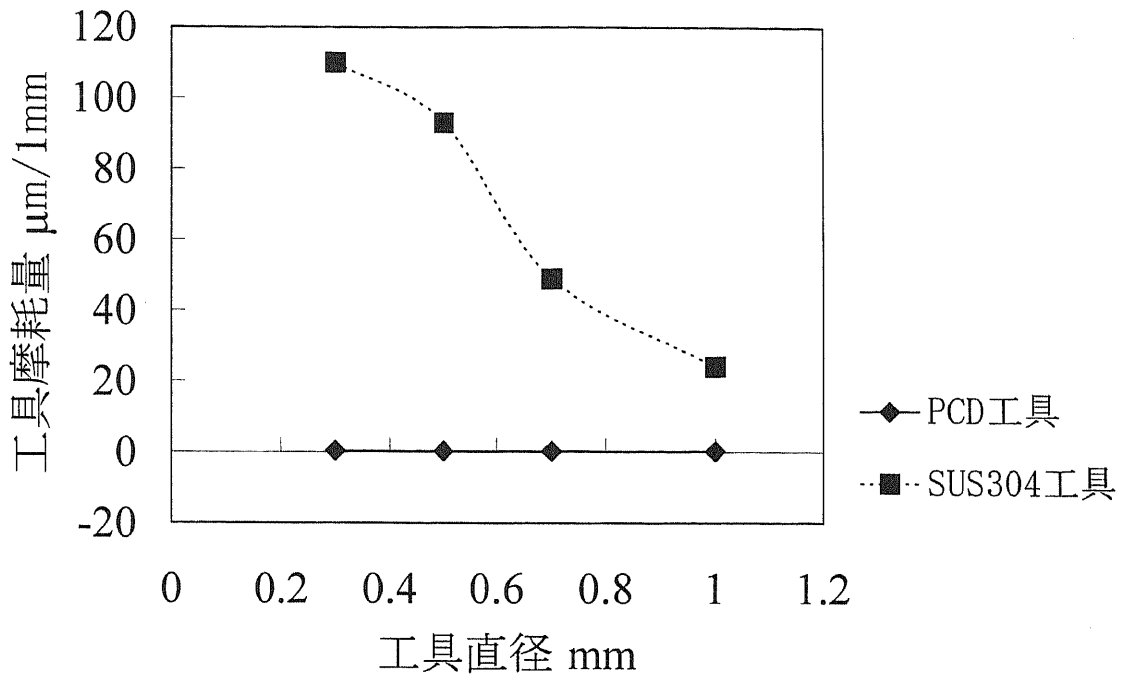


図 6.8 工具材質別の工具直径と工具摩耗量の関係

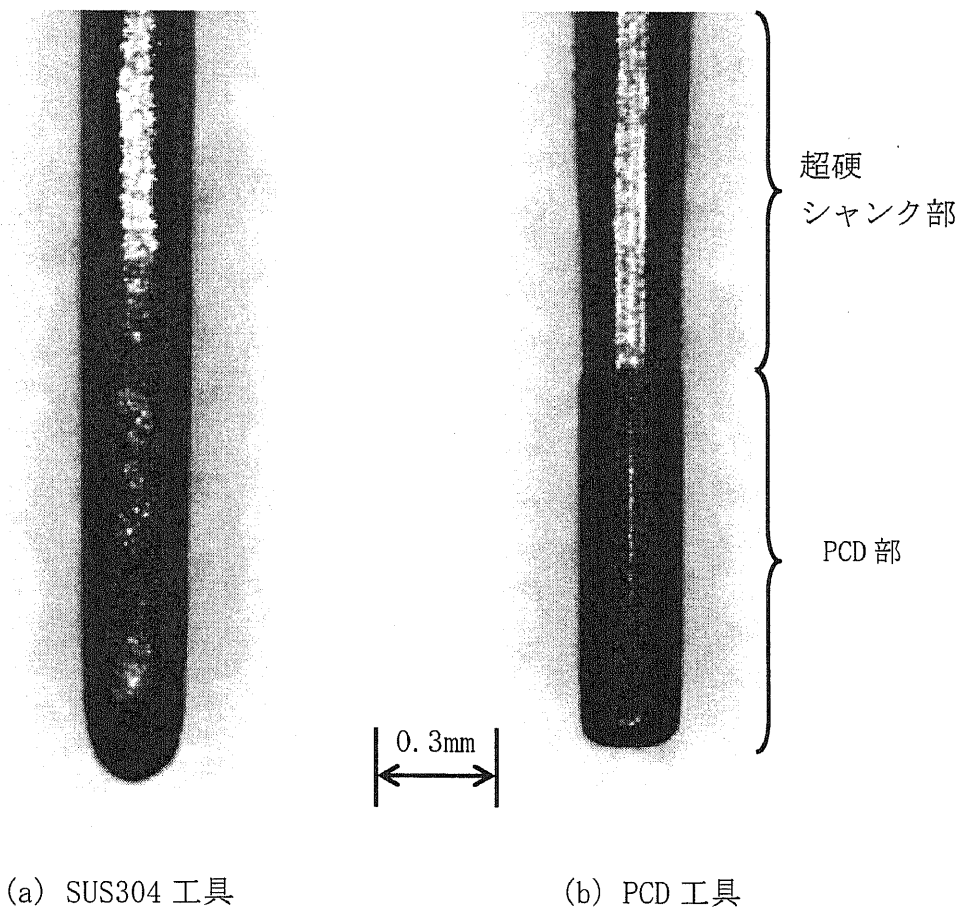


図 6.9 加工後の工具先端部

第7章 加工力測定について

7.1 過去の加工力測定研究について

ここまでの研究は、加工速さの変化を除いてほとんどが加工結果からわかる事柄について論じており、加工中の現象についてはあまり触れてこなかった。現在の技術で加工現象をリアルタイムに観測することはかなり困難である。加工中の様々な状況の変化を測定し、その結果を積み重ね、加工後の状態を調べることにより加工中の現象を推量してきた。

加工中の変化についての研究には、例えば次のようなものがみられる。森¹⁾は、超音波加工時の機械的負荷について、特殊な高周波電力計²⁾を使用して、切削時の振動子自由インピーダンスを測定し、工具先端の切削負荷を電気音響工学的に求めた。谷口³⁾は、 piezoエレメントを使用し、加工力を測定した。両者ともにそれは連続した加工経過の中の一時的な力を測定したもので、超音波加工における全体の加工力の変化については論じていない。

ここでは、被削材としてソーダガラスと石英ガラス、工具としてPCD工具を用い、工具と被削材との間に働く力について圧電セラミックス（以下圧力センサ）を利用して、超音波加工における加工中の加工力変化を測定し、脆性材料の破壊現象を解明する一助としておこなった。また、被削材に対する超音波加工特性を比較・検討した。

7.2 被削材の加工特性比較

7.2.1 加工速さについて

超音波加工では、加工圧の大小により加工時間が左右されることは述べてきた。加工速さが最大となる（加工時間が最も短くなる）最適加工圧が存在し（3.3章参照）、工具断面積が1.0mmから1/2, 1/4, 1/10と小さくなると、最適加工圧は2倍, 4倍, 10倍となる。各工具径において、スラリー流速（4.1章参照）、スラリー温度（4.2章参照）も加工速さに影響を与えることがわかっている。被削材がかわっても、スラリー流速、スラリー温度の条件は同じにした。

加工液には水道水を用いており、水温が下がると粘度が増す。これはスラリーの流動性を低下させ、ポンピング作用（3.2章参照）の抵抗成分として影響を与える。スラリー温度が約22℃より高くなると、キャビテーションの発生が盛んになり、加工速さに影響を与える。このことから、スラリー温度は約20℃とした。

スラリー流速を変えることによって、スラリーの工具先端部への供給状態が変わり、各工具径に応じて加工速さが最大となる最適スラリー流速が存在する。スラリー流速によっては、工具に対してスラリー供給側とその反対側において、加工穴へのスラリー流入圧力に差が生じ、加工速さが低下する。このことから、各工具径で最適スラリー流速になるように調整した。

加工深さ1.2mmを加工するのに要する時間を計測し、各工具径および被削材ごとに最適加工圧での加工速さを求めた。その結果を図7.1に示す。

被削材が石英ガラスの場合、工具直径1.0mmのときの加工速さは0.008mm/sec、工具直径0.3mmのときは0.006mm/secと0.75倍になる。一方ソーダガラスの場合、工

具直径 1.0mm のときの加工速さは 0.015mm/sec, 工具直径 0.3mm のときは 0.012mm/sec と 0.8 倍になる。

加工速さは、工具が小径化するにつれて遅くなる。これは工具が小径化すると、被削材の破砕に作用するのに十分な大きさの砥粒が、工具直下の加工クリアランスに供給されにくくなり、工具先端での砥粒径が平均化されることが原因であろうと考えられる。(3.3.4 章参照)

全工具直径においても、加工速さはソーダガラスの約 0.5 倍と小さくなっている。石英ガラス(640Hv)はソーダガラス(435Hv)のビッカース硬さで約 1.47 倍であり、最適加工圧のもとでも、加工速さは被削材の硬さに影響を受けることがわかる。

7.2.2 最適加工圧について

被削材別の工具直径と最適加工圧の関係を図 7.2 に示す。工具直径 1.0mm のとき、最適加工圧はソーダガラスで 9.73MPa, 石英ガラスで 10MPa とほとんど差がないものの、工具直径 0.3mm のとき、最適加工圧はソーダガラスで 80.47MPa, 石英ガラスで 86.02MPa と差がみられる。工具直径を小径化すると、被削材の硬さの影響が最適加工圧に現れてきたと考えられる。被削材が硬ければ、それだけ加工に要するエネルギーが必要となる訳である。

7.2.3 工具摩耗量について

ソーダガラスに比べて石英ガラスのほうが硬いことから、砥粒自身も破砕あるいは摩耗しやすいと思われる。そのようなもとでは、工具への砥粒の食い込みに対する摩耗が減少する。被削材別工具直径と深さ 1mm 加工したときの工具摩耗量の関係を図 7.3 に示す。

これは 10 穴加工したときの平均値をとっている。ソーダガラスに比べて石英ガラスのほうが硬いことから、砥粒自身も破砕されやすいと思われる。全体的に見ると、石英ガラスを加工したときのほうが、工具自身の砥粒による摩耗は少ないようである。

工具直径 1.0mm のとき、ポンピングによる体積変化が大きいことにより、工具直下へのスラリー循環が順調におこなわれるため、被削材による工具摩耗量に違いがみられない。

工具直径 0.3mm での工具摩耗量は、ソーダガラス 0.4 μ m/1mm に対して、石英ガラス 0.26 μ m/1mm と 0.75 倍になる。工具直径が小径化すると、砥粒径が平均化されること、砥粒自身もソーダガラスを加工したときよりも石英ガラスを加工したときの方が破砕されやすいという 2 つのことが考えられるため、工具摩耗量は石英ガラスを加工したときの方が少なく、摩耗量に差がみられると考えられる。

7.2.4 加工速さ変化について

1 穴加工中の加工時間経過による加工深さ変化について、工具直径 1.0mm のときを図 7.4 に、0.3mm のときを図 7.5 にそれぞれ示す。図中の近似曲線は表計算ソフトの切片 0 とした 6 次の多項式を用いた。別の事例において、より高性能なレーザ変位計

を用い加工深さ変化を調べたものでは、条件により図のような傾向を示していることから、近似曲線は妥当と判断した。工具直径 1.0mm のときのサンプリング周波数は 500Hz、工具直径 0.3mm のときのサンプリング周波数は 50Hz とした。そのため、工具直径 1.0mm のほうで測定点が多い。この実験では、時間経過による加工深さの傾向を調べることが目的である。

工具直径 1.0mm のとき、加工深さ 0.3mm まではどちらの被削材も同じ速さで加工が進む。これは工具直下の加工クリアランスへの砥粒供給が良好におこなわれているからである。それ以降では、ソーダガラスはほぼ一定の速さ 0.015mm/sec で加工が進む。加工の初期よりは、スラリー循環が悪いものの、比較的砥粒が工具直下に供給され続けているからと考えられる。

一方、石英ガラスでは、0.3mm から 0.8mm までの加工速さは 0.005mm/sec、それ以降では 0.003mm/sec と加工深さが深くなるにつれて遅くなる。加工速さの傾きが変化するのは、加工がある一定の速さで進む状態と、スラリー循環のための工具側面のクリアランスが生成されるまでの待機状態の2種類が交互に現れていると考えられるが、現時点で確認するための手段はない。

工具直径 0.3mm のとき、どちらの加工においても加工速さが加工深さによって、何度か変化していることがわかる。石英ガラスでは、加工深さ 0.5mm 以降での加工速さにあまり変化がないように見える。工具直径が小さいが故に、スラリー循環が悪いことが影響して、加工速さと工具側面のクリアランス生成の速さがほぼ同程度であると考えられる。

通常の超音波加工において、ある程度の工具側面のクリアランスを維持したままの状態では加工しないと、加工が停滞することがある⁴⁾。加工圧と加工深さの関係のイメージを図 7.6 に示す。適当な加工圧で加工すると、工具先端までスラリー循環が可能なクリアランスを生成しながら加工が進む。しかし、切込み深さに比べて加工圧が大きすぎると、工具側面のクリアランス生成が不十分となり、が工具先端にいくにつれて小さくなり、いずれ加工が停滞する。

また、超音波加工の現象をよく観察すると、加工が定常状態で進行する期間と加工がほとんど進まないクリアランス生成期の2種類がみられる。そのときのイメージ図を図 7.7 に示す。これは極端な例であることを予め断っておく。

図中のAの期間は、超音波加工が順調に進行している定常状態である。このときは、スラリー循環に必要な工具側面におけるクリアランスが十分であるため、ほぼ一定の速さで加工される。

しかし、あるときから加工がほとんど進まなくなる状態になる。これがBのクリアランス生成期と考えられる。スラリー循環に必要な工具側面のクリアランスが特に工具先端部において小さいことが原因であることが多い。この期間は、工具先端付近においてクリアランスを生成しており、次の定常状態となるための準備をしていると考えられる。被削材の硬さの値が大きいときによくみられる傾向である。

Bの状態を抜けると、またAの定常状態となり、ある一定の速さで加工が進む。しかし、加工速さそのものをみると、最初のAの期間よりも次のAの期間では、加工速

さが遅くなることが多い。これは、工具側面のクリアランスが生成されても、加工深さが深くなるにつれて、加工に作用する比較的粒径の大きな砥粒が工具先端に到達しにくくなることが影響していると思われる。

以上のことから、図7.4および7.5を考えると、被削材がソーダガラスで、工具直径が1.0mmのときにはほぼ定常状態で加工されている。しかし、それ以外のときには、程度の差はあるものの定常状態とクリアランス生成期がみられ、またその定常状態も加工深さが深くなると、加工速度が遅くなっている。

私信だが、加工速度が遅くとも工具側面のクリアランス一定の状態で作られたとき、結果として加工側面の粗さが良好になる傾向にある。

7.3 加工力変化について

7.3.1 無負荷時の状態について

前述した圧力センサおよび治具を用い、被削材を加工したときの加工力変化を調べた。振動系の共振周波数25kHzに対して圧力センサから取り出す信号（オシロスコープ側）のサンプリング周波数は250kHzとした。

被削材面上から工具端を離れた状態で、スラリーを供給しただけの加工力変化の状態を図7.8に示す。横軸は時間経過、縦軸は加工力を示す。スラリーを供給しただけの噴射圧力の状態で、すでに最大50Nの力がかかっている。加工力の大きい部分を見ると、 $21\mu\text{sec}$ (=47.5kHz)の周期的な波があるように見える。これはポンプの影響と考えられるが、明確なところは不明である。以後の加工実験では、スラリーを供給したまま加工し加工力測定をおこなうため、スラリーそのものによる影響も含めて、加工全体として加工力を扱うことにする。

7.3.2 1周期での変化について

工具直径1.0mm、加工深さ0.1mmのときの加工力変化を図7.9に示す。加工力が正になっているところは、工具または砥粒が被削材を押し込んでいるところである。

図中で負の加工力がみられるところは、脆性破壊が起きているか、または圧力センサが弾性変形のように圧縮された分だけ戻ろうとする復元力による変形成分であると考えられる。

また、25kHzの周期で測定された山の部分は、振動系の超音波振動を正確に測定しており、この部分で1周期の中で工具が最も砥粒を押し込み、被削材に近づいている圧縮圧力が最大となっている、つまり加工力（被削材への衝撃力）が最大となっているところである。

加工力が大きくなっている部分の左側にみられる小さなピークは、接着剤の影響と考えられる。この部分は、工具が徐々に被削材に接近している期間だが、接着層（センサと治具、またはセンサと被削材）の間での加工力の反射が起こり、一時的な圧縮圧力として検知したと思われる。

7.3.3 中期間（3000周期）の変化について

図7.9のような加工力変化の時間軸を圧縮し、加工深さ0.1mmおよび0.2mmのときの長時間の加工力の変化を図7.10、図7.11にそれぞれ示す。これは、オシロスコープの画面を複写したものである。横軸1目盛が500周期(=0.02sec)を示す。

これらの図から、加工力の最大値にも周期的変動があることがわかる。これは脆性破壊が一定の速さで継続して起こるのではないことを意味する。被削材がほとんど破碎されずに、その内部においてクラックの発生が蓄積されつづけていけば、その間は被削材の抵抗成分として大きな加工力が測定されると思われる。この間は加工が停滞している加工停滞期と言えよう。

その期間が過ぎると、一気に破壊が進行するため、本来工具が砥粒を押し込む部分が既に破壊され、または切りくずの状態となっており、抵抗成分として大きな加工力が測定されないと考えられる。この間は被削材が除去されている加工進行期と言えよう。

加工深さ0.2mm付近における加工進行期と加工停滞期の加工力の変化を同位相にして図7.12に示す。

加工停滞期は、大きな圧縮の加工力が測定されるのは前述のとおりである。加工進行期の被削材が除去されている間は、加工力全体が小さくなる。内部のクラックが十分に成長しており、破碎に足るに十分な加工力で除去できる状態にあると思われる。そのため、圧縮および引張の加工力が全体的に小さくなり、引張の加工力が測定される時間が長くなっている。

加工深さ0.4mmのときの加工力変化を図7.13に示す。このときは加工力がほぼ一定で、クラックの蓄積と除去がほぼ同時に行われている定常状態と考えられる。

今までの超音波加工では、被削材内部にクラックを発生させ、複数のクラックで囲まれた領域で破碎が起こり、その部分を被削材から取り除く加工法であるという程度しかわからなかった。しかし本研究から、内部にクラックが蓄積される期間と、破碎される期間が交互に現れるような場合と、クラックの蓄積と破碎がほぼ同時進行しているような場合の2種類の状況が混在していることがわかった。

以上のような加工力の変化は、他の直径の工具や、石英ガラスの場合でも同様であった。

7.3.4 長期間（加工全体）での変化について

各加工深さにおける最も加工力の大きい値を取り出し、工具が被削材被削材面上にあるときから、加工深さ1.0mmまでの加工力の変化を調べた。被削材がソーダガラス、工具直径1.0mmのときの加工力の変化を図7.14に示す。これは、センサを変えて2回実験をおこなった。

加工が始まる前、つまり工具が被削材被削材面上で発振しているときで既に約60Nの力がかかっている。スラリーのみで最大50Nの力がかかっていた図7.8を考えると、工具の振動によって約10Nの力が生じていることになる。

加工が始まると加工力は急激に増加し、加工深さ0.1mmで300Nを超える。そして

加工深さ 0.2mm で加工力最大の 390N となる。それ以降は、加工力の増減はあるものの、加工力が徐々に減少し、加工深さ 1.0mm のときは 200N になる。

加工の初期の段階では、加工面でのスラリーの循環が良好であるから、比較的粒径の大きい加工に作用する砥粒が、加工穴にどんどん流入し、クラックを蓄積・発達させて加工が進行する。この間は加工力が大きくなり、加工速度が速い。

それ以降では、砥粒は工具と加工穴側面のクリアランスを通過して工具直下のクリアランスに達するため、スラリーの循環が次第に悪くなり、砥粒自身も破碎・摩耗することから、加工力が小さくなる。

図 7.4 の加工時間に対する加工深さのグラフと、図 7.14 の加工力変化のグラフを重ねた加工力と加工深さの関係を図 7.15 に示す。加工時間 5 秒の加工深さ 0.2mm までの間は、加工速度が徐々に速くなり同時に加工力が大きくなる。それ以降の加工深さ 0.7mm までは、加工力が徐々に減少し続けるが、その間の加工速度はほぼ一定である。加工深さ 0.7mm 以降で、加工力は大きく減少し、それに伴って加工速度が遅くなる。

時間に対して加工力の変化が小さければ、加工速度の傾きはほぼ一定であるが、加工力の変化が大きければ、加工速度の傾きに変化がみられる。

被削材がソーダガラス、工具直径 0.3mm のときの加工時間に対する加工力と加工深さの関係を図 7.16 に示す。加工深さ 0.1mm で最大加工力 263N をとる。工具直径 1.0mm のときは、加工深さに対する加工力の減少の程度は小さかった。しかし、工具直径 0.3mm のときは、加工力が急激に小さくなり、加工深さ 0.4mm 以降で 150N、加工深さ 1mm の時には 130N になる。

工具直径が小さくなると、工具直下での加工クリアランスへのスラリー循環がおこなわれにくくなり、砥粒の粒径が平均化される。すると被削材を破碎するための力が小さくなるため、加工力も小さくなると考えられる。

被削材が石英ガラス、工具直径 1.0mm のときの加工時間に対する加工力と加工深さ変化の関係を図 7.17 に示す。加工力は加工深さ 0.14mm で最大 402N になる。ソーダガラスの場合、加工が進むにつれて加工力は徐々に減少したが、石英ガラスでは加工が始まると加工力が急激に減少し、加工深さ 0.4mm 以降では 150N から 200N の間をとる。これは、被削材の硬さの違いによるものと考えられる。

被削材が石英ガラスのとき、工具直径 0.7mm および 0.5mm のときも同様に、加工力の急激な減少がみられた。

被削材が石英ガラス、工具直径 0.3mm のときの加工時間に対する加工力と加工深さ変化の関係を図 7.18 に示す。加工深さ 0.19mm で 280N に達した後、加工深さ 0.4mm で加工力が 137N に減少する。

全ての工具直径、被削材で共通することだが、加工終了時の加工力は、その工具直径における最大加工力の半分かそれ以下になる。

ソーダガラスでの加工力減少の主な要因は、スラリー循環の影響によるものと考えられる。一方、石英ガラスでの加工力減少の主な要因は、スラリー循環の影響よりも被削材の硬さの影響によるものと考えられる。

7.3.5 最大加工力について

工具直径と最適加工圧時の最大加工力の関係を図 7.19 に示す。どの工具径においても、石英ガラスでの最大加工力は、ソーダガラスのそれを上回っている。

単位面積当たりで考えると、工具断面積が直径 1.0mm のときから 1/2, 1/4, 1/10 と小さくなると、最適加工圧は 2 倍, 4 倍, 10 倍となった。加工力を同じように考えると、最適加工圧のように、工具断面積が直径 1.0mm のときから 1/2, 1/4, 1/10 と小さくなると、最大加工力は 1.8 倍, 3.2 倍, 7.5 倍となり、加工圧のように反比例関係にある。

7.4 第7章の総括

第7章 加工力測定についてをまとめると次のようになる。

加工速度は被削材が石英ガラスの場合、工具直径 0.3mm のときは工具直径 1.0mm のときの 0.75 倍になる。一方ソーダガラスの場合、工具直径 0.3mm のときは工具直径 1.0mm のときの 0.8 倍になる。加工速度は、工具が小径化するにつれて遅くなる。全工具直径においても、石英ガラスの加工速度はソーダガラスのその約 0.5 倍と小さくなり、最適加工圧のもとでも加工速度は被削材の硬さに影響を受けることがわかる。

工具直径 0.3mm での工具摩耗量は、ソーダガラスに対して、石英ガラスは 0.75 倍になる。工具直径が小径化すると、砥粒径が平均化されること、砥粒自身もソーダガラスを加工したときよりも石英ガラスを加工したときの方が破砕されやすいことを考えると、工具摩耗量は石英ガラスを加工したときの方が減少することも考えられる。

25kHz の周期で測定された山の部分は、振動系の超音波振動を正確に測定しており、この部分で 1 周期の中で工具が最も砥粒を押し込み、被削材に近づいている圧縮圧力が最大となる、つまり、加工力（被削材への衝撃力）が最大となっている。

中期間（3000 周期）の変化では、加工力の最大値にも周期的変動があることがわかる。これは脆性破壊が一定の速度で継続して起こるのではないことを意味する。加工が停滞している加工停滞期と被削材が除去されている加工進行期がある。加工停滞期は、被削材内部においてクラックの発生が蓄積され、その間は被削材の抵抗成分として大きな加工力が測定される。その期間が過ぎると、加工進行期に入り、一気に破壊が進行するため、本来工具が砥粒を押し込む部分が既に破壊され、または切りくずの状態となっており、抵抗成分として大きな加工力が測定されないと考えられる。

長期間（加工全体）では、工具の振動によって約 10N の力が生じる。工具直径 1.0mm のときでは、加工が始まると加工力は急激に増加し、加工深さ 0.1mm で 300N を超える。そして加工深さ 0.2mm で加工力最大の 390N となる。それ以降は、加工力の増減はあるものの、加工力が徐々に減少し、加工深さ 1.0mm のときは 200N になる。

全ての工具直径、被削材で共通することだが、加工終了時の加工力は、その工具直径における最大加工力の半分かそれ以下になる。ソーダガラスでの加工力減少の主な要因は、スラリー循環の影響によるものと考えられる。一方、石英ガラスでの加工力減少の主な要因は、スラリー循環の影響よりも被削材の硬さの影響によるものと考えられる。

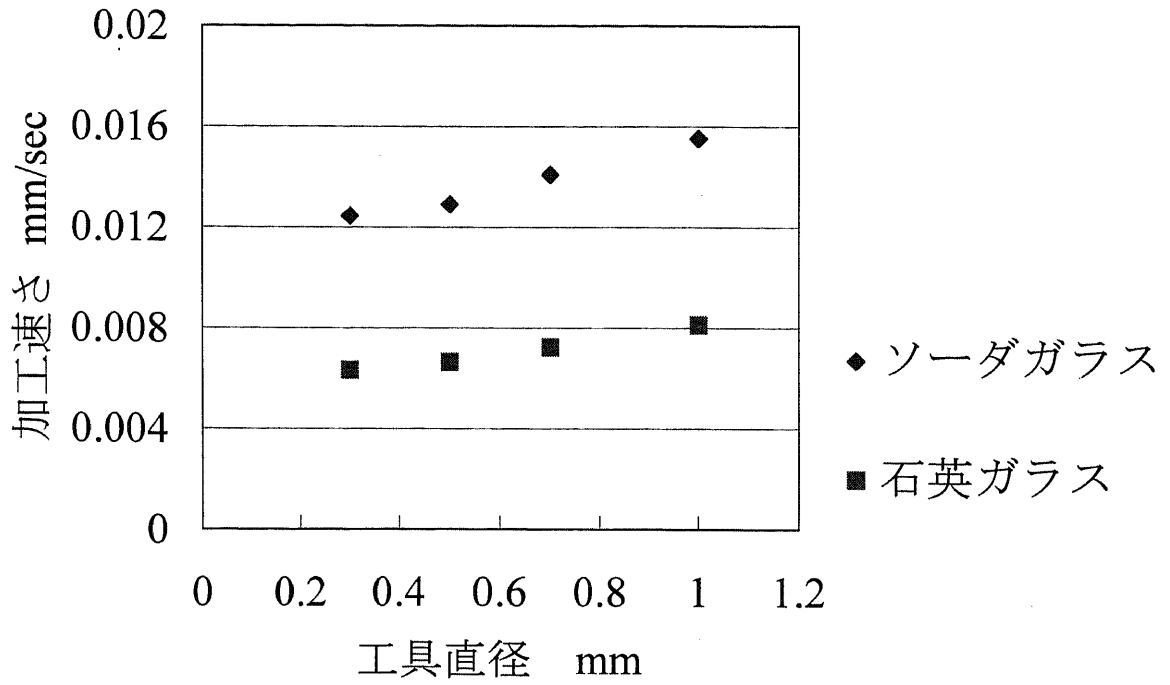


図 7.1 工具直径と加工速さの関係

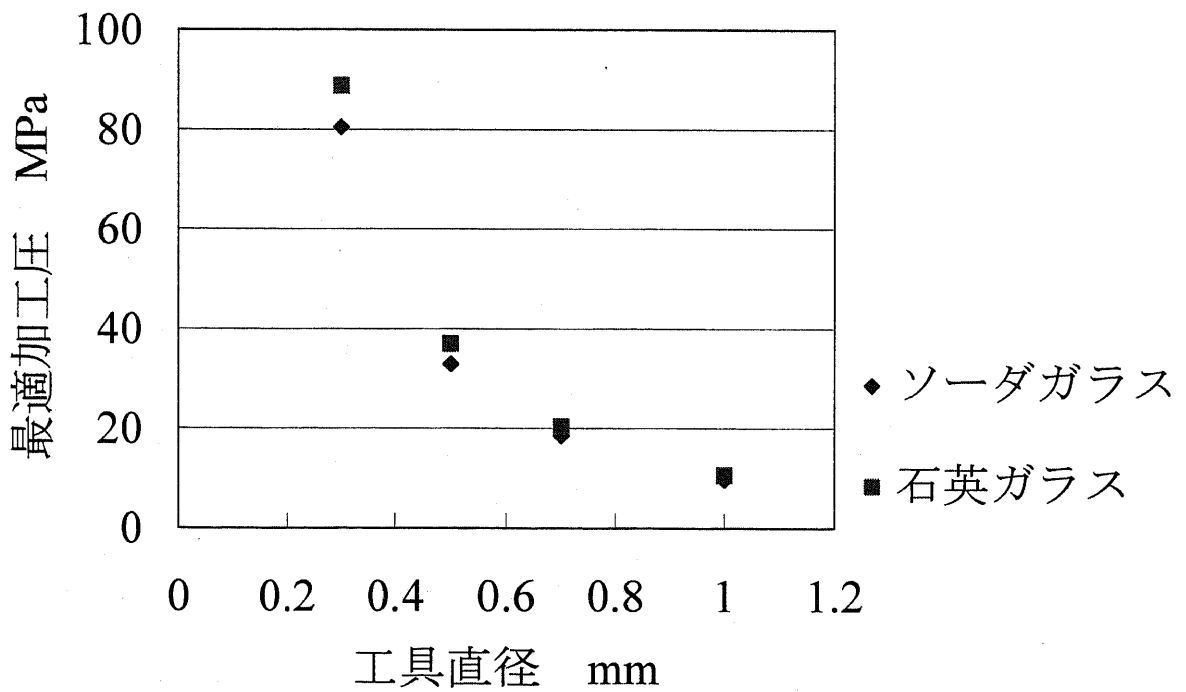


図 7.2 工具直径と最適加工圧の関係

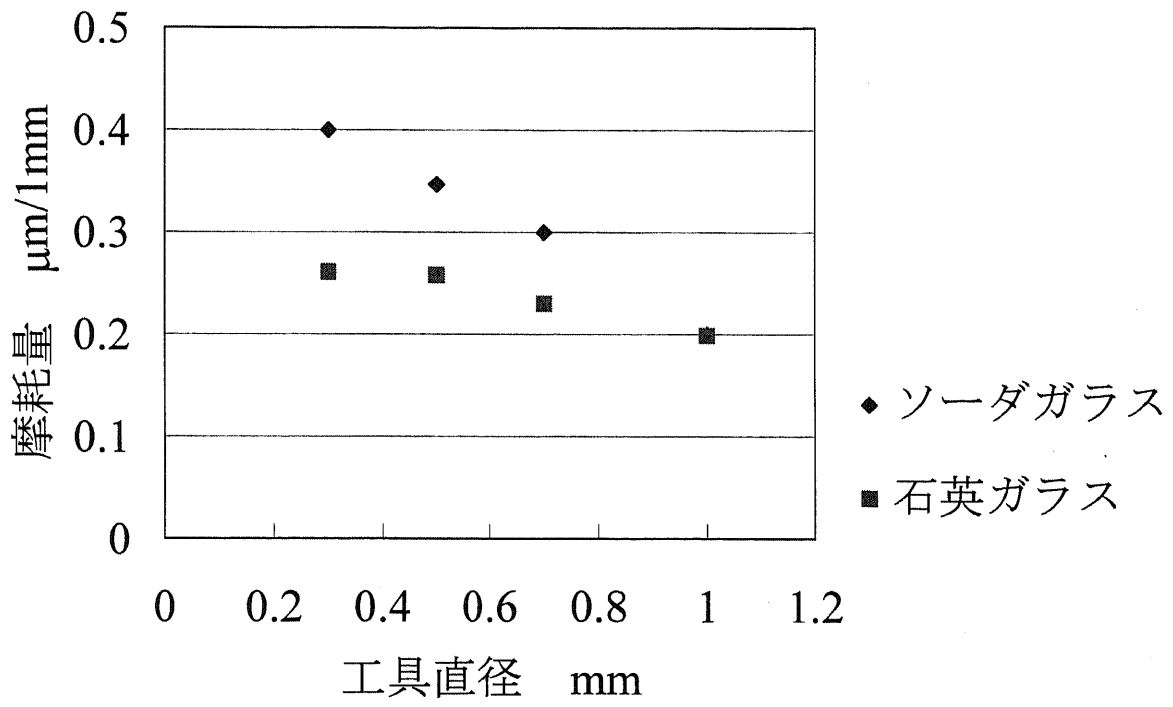


図 7.3 工具直径と工具摩耗量の関係

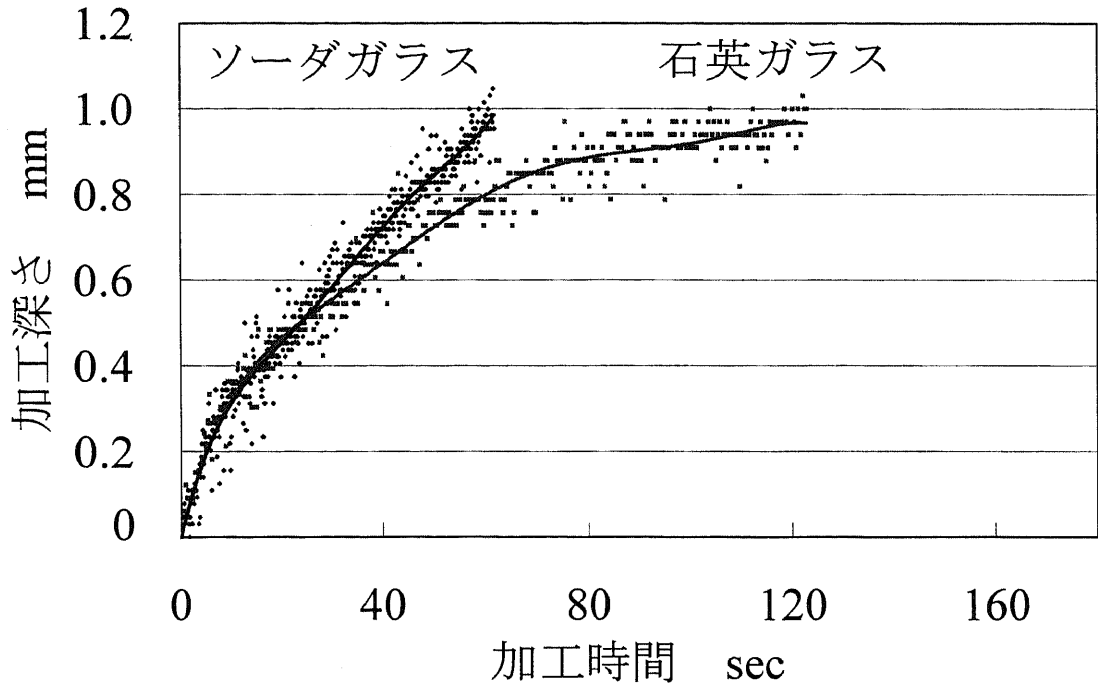


図 7.4 工具直径 1.0mm のときの加工深さ変化

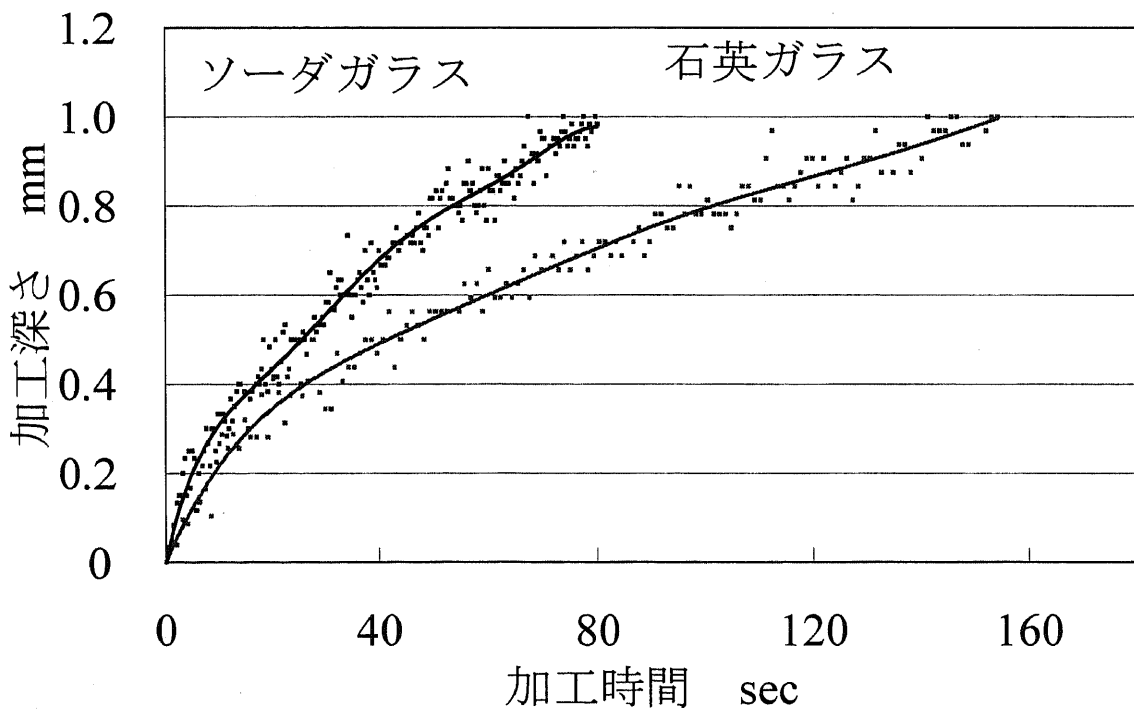


図 7.5 工具直径 0.3mm のときの加工深さ変化

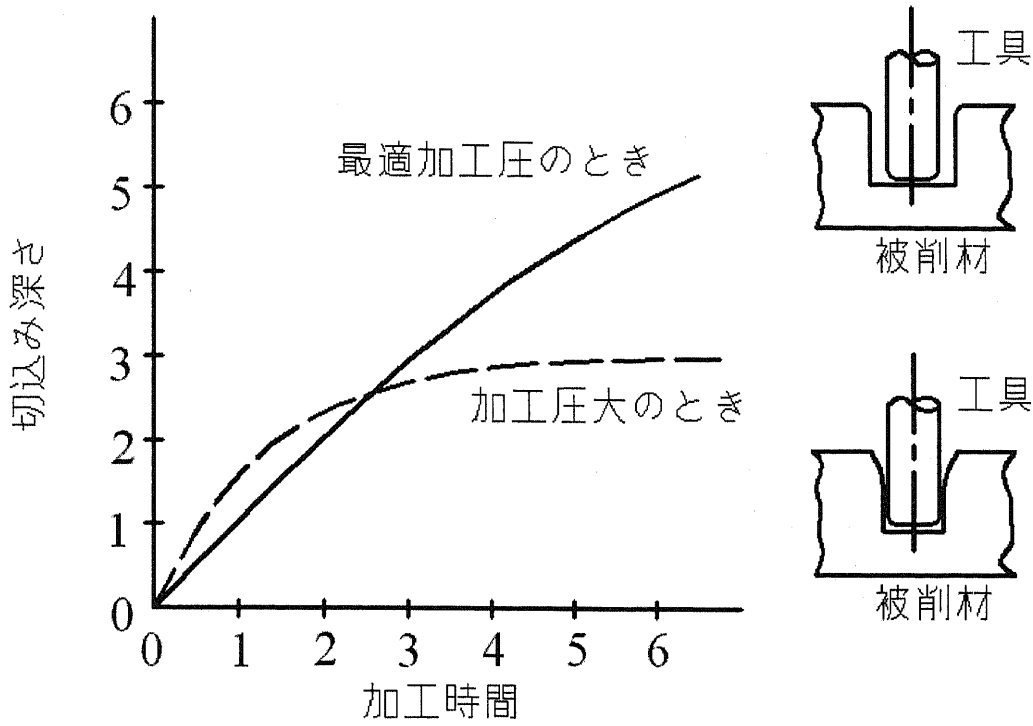


図 7.6 加工圧と加工深さのイメージ図

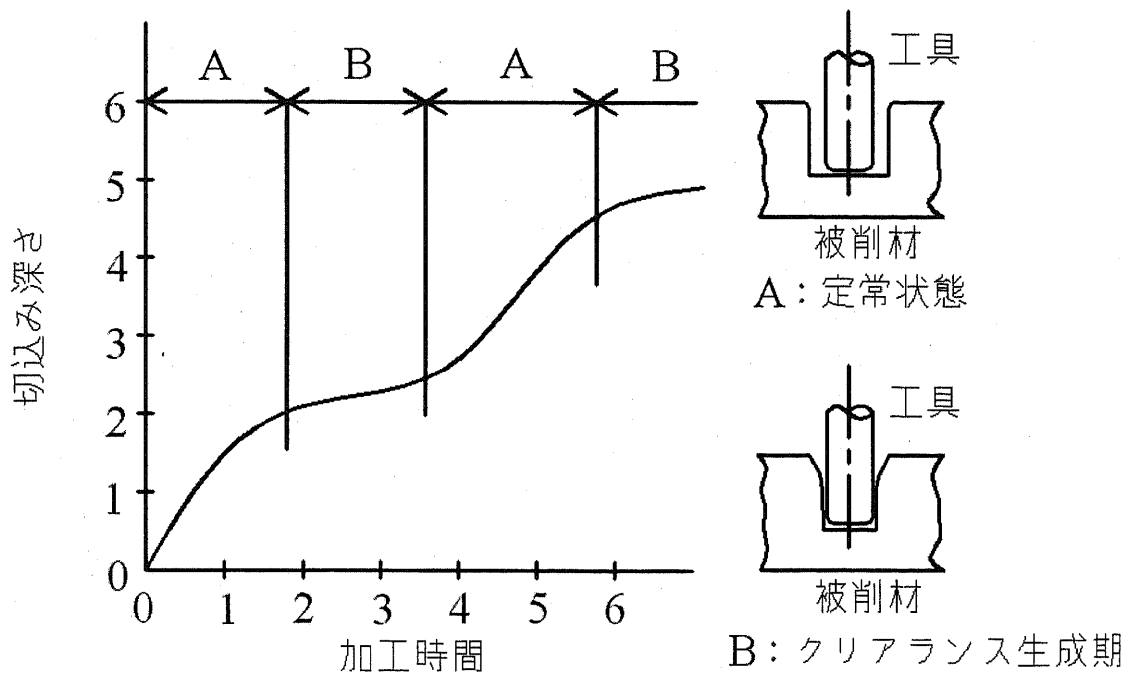


図 7.7 定常状態とクリアランス生成期のイメージ図

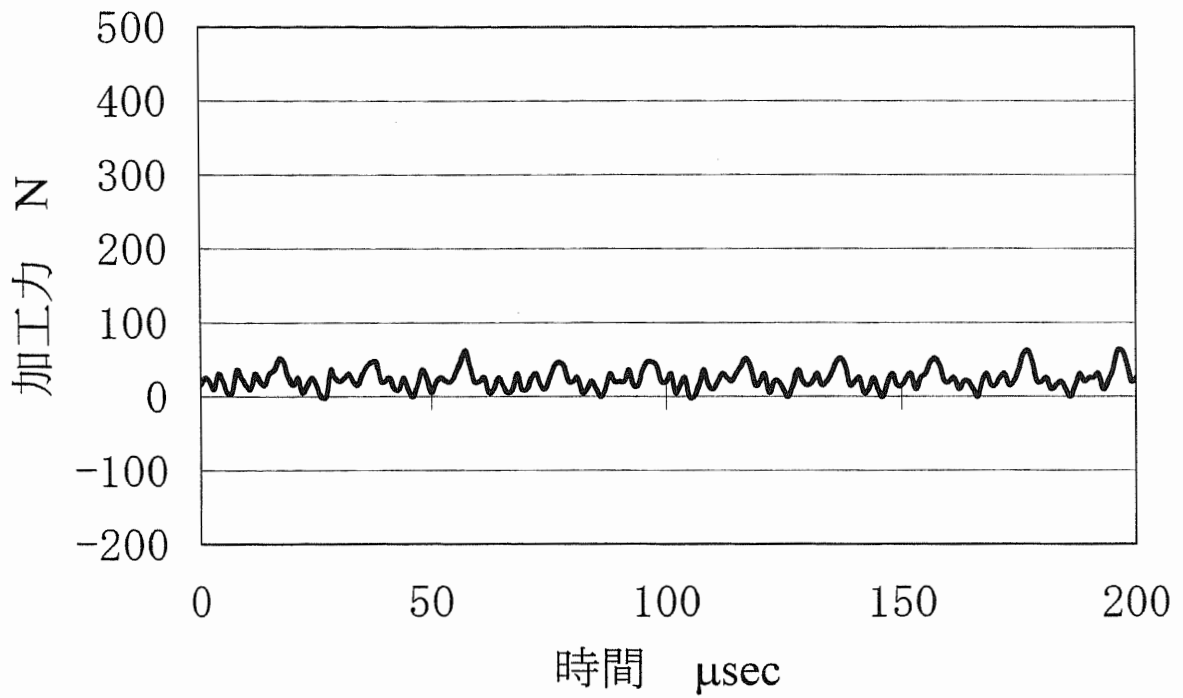


図 7.8 無負荷時の加工力変化

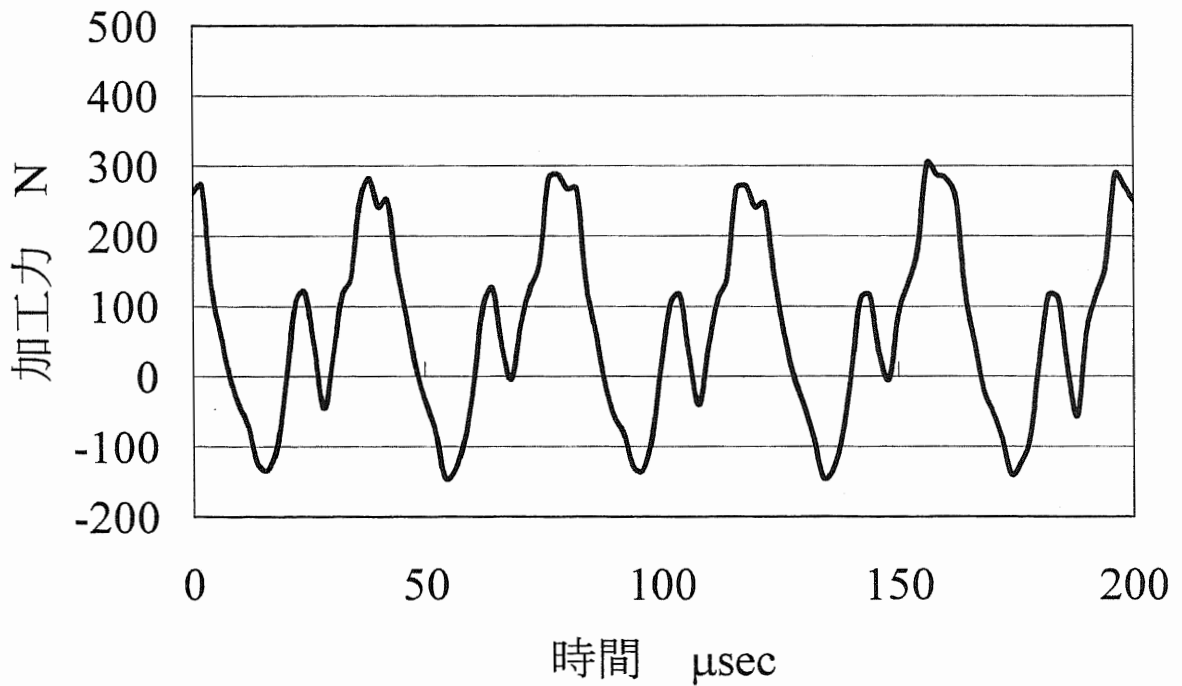


図 7.9 加工深さ 0.1mm のときの加工力変化

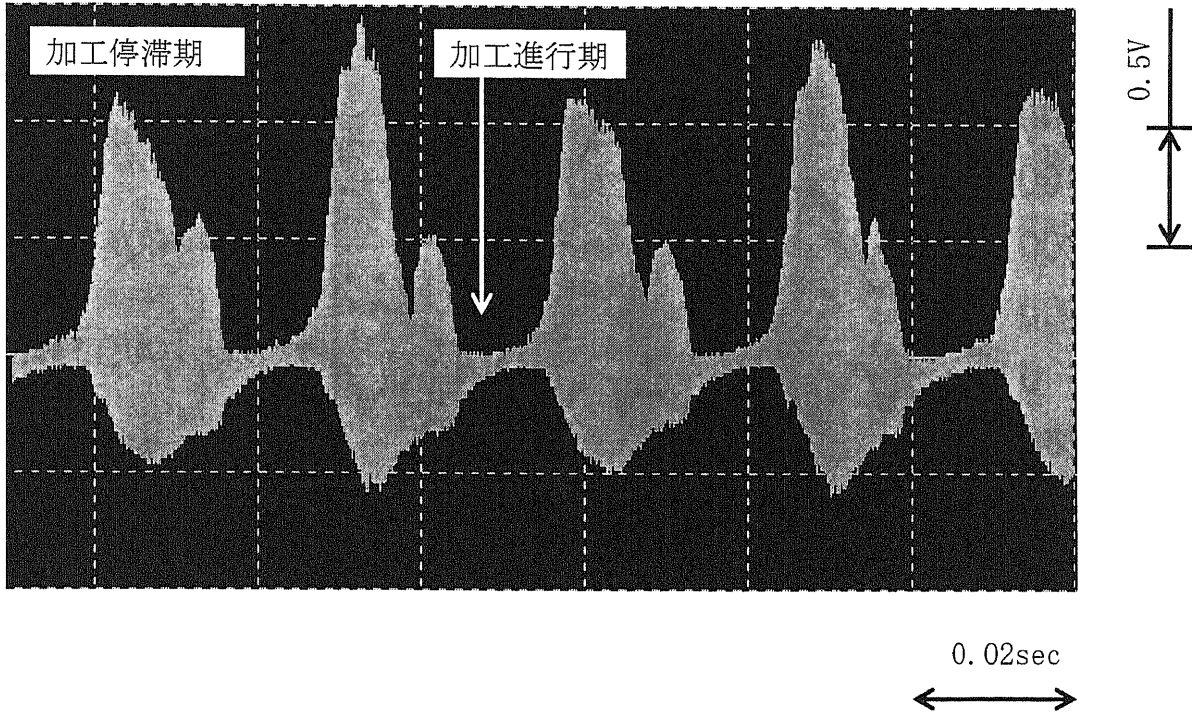


図 7.10 加工深さ 0.1mm のときの加工力の変化

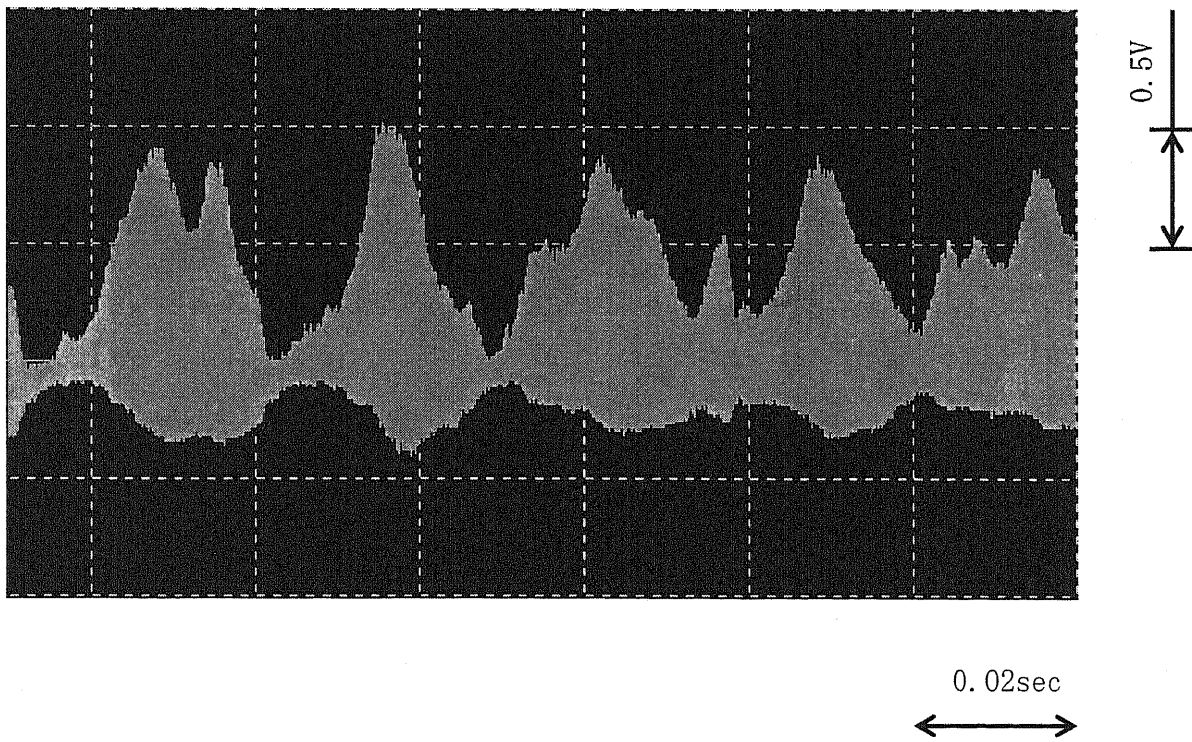


図 7.11 加工深さ 0.2mm のときの加工力の変化

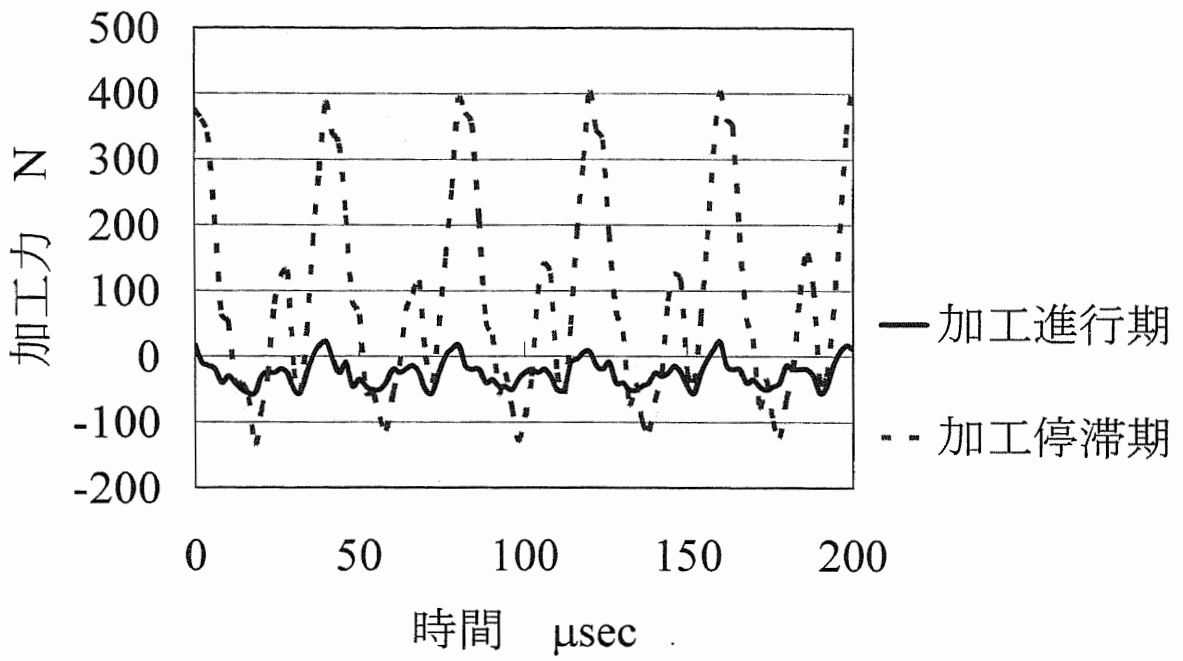


図 7.12 加工深さ 0.2mm 付近の加工進行期と加工停滞期の加工力変化

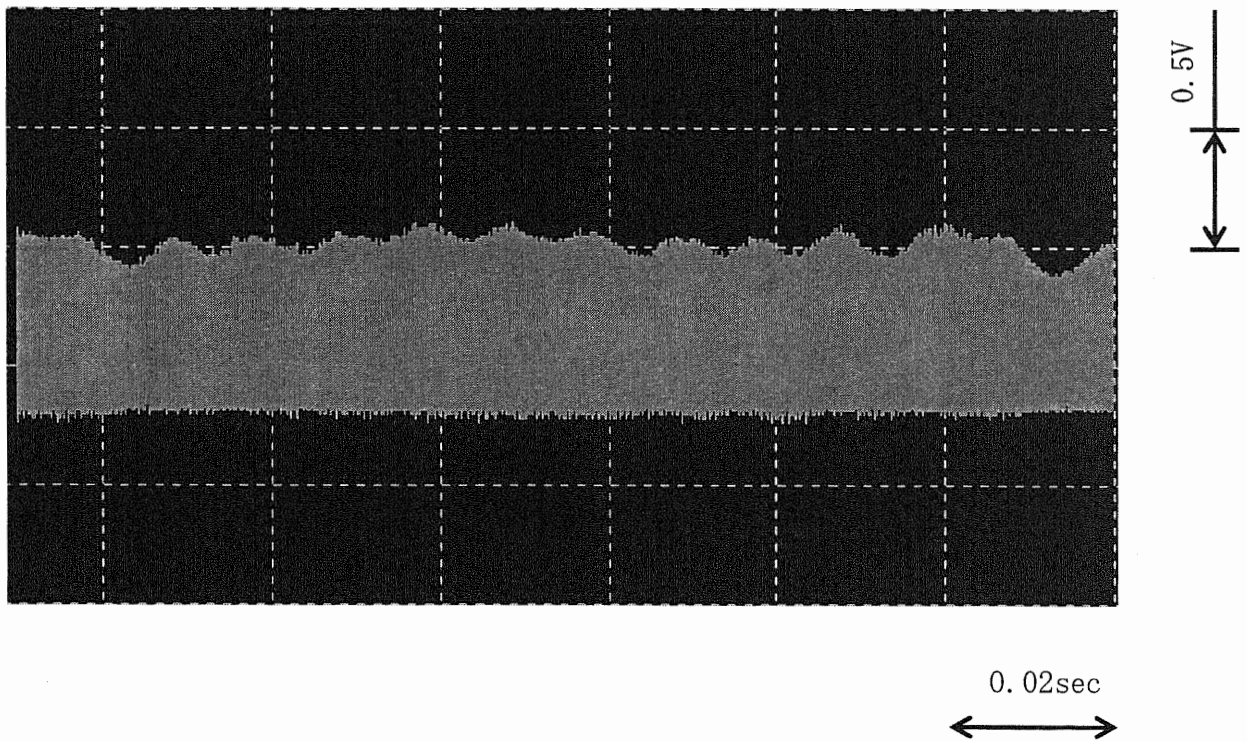


図 7.13 加工深さ 0.4mm のときの加工力の変化

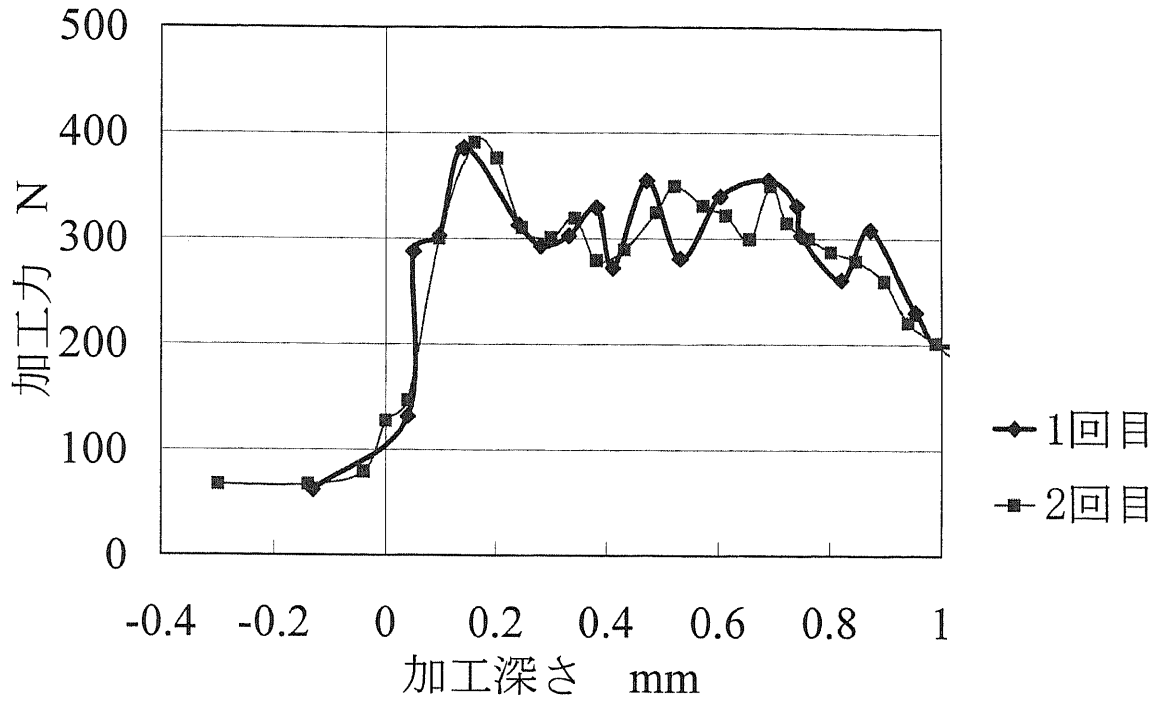


図 7.14 被削材ソーダガラス，工具直径 1.0mm のときの加工深さと加工力の関係

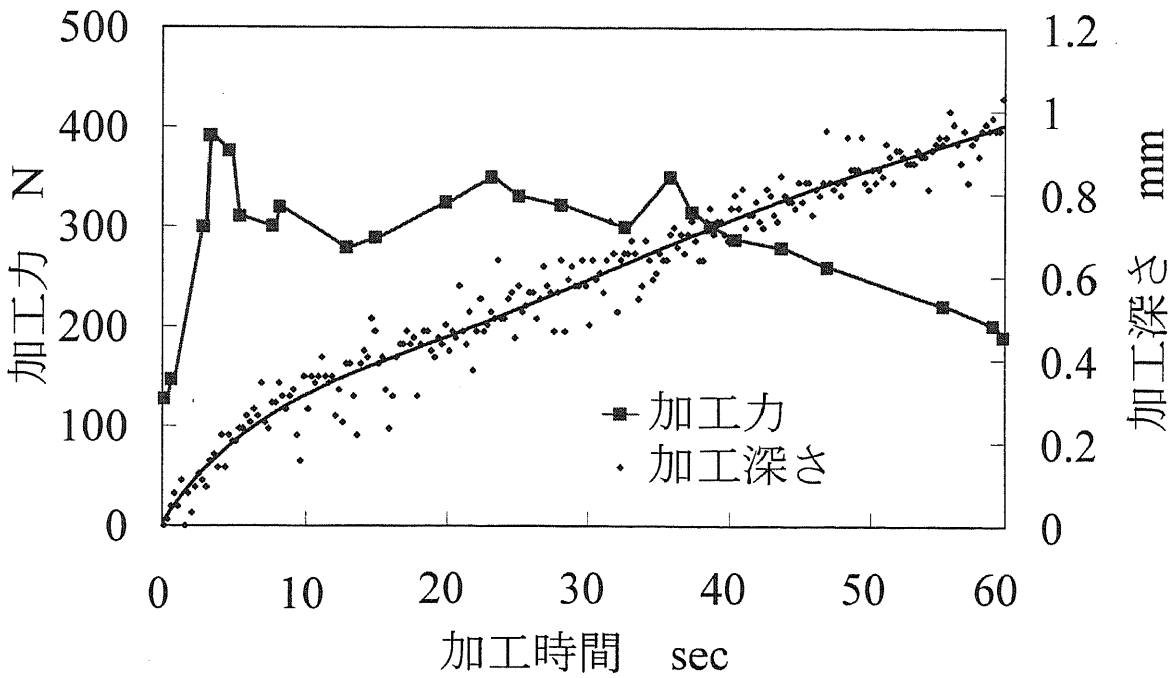


図 7.15 被削材ソーダガラス，工具直径 1.0mm のときの加工力と加工深さの関係

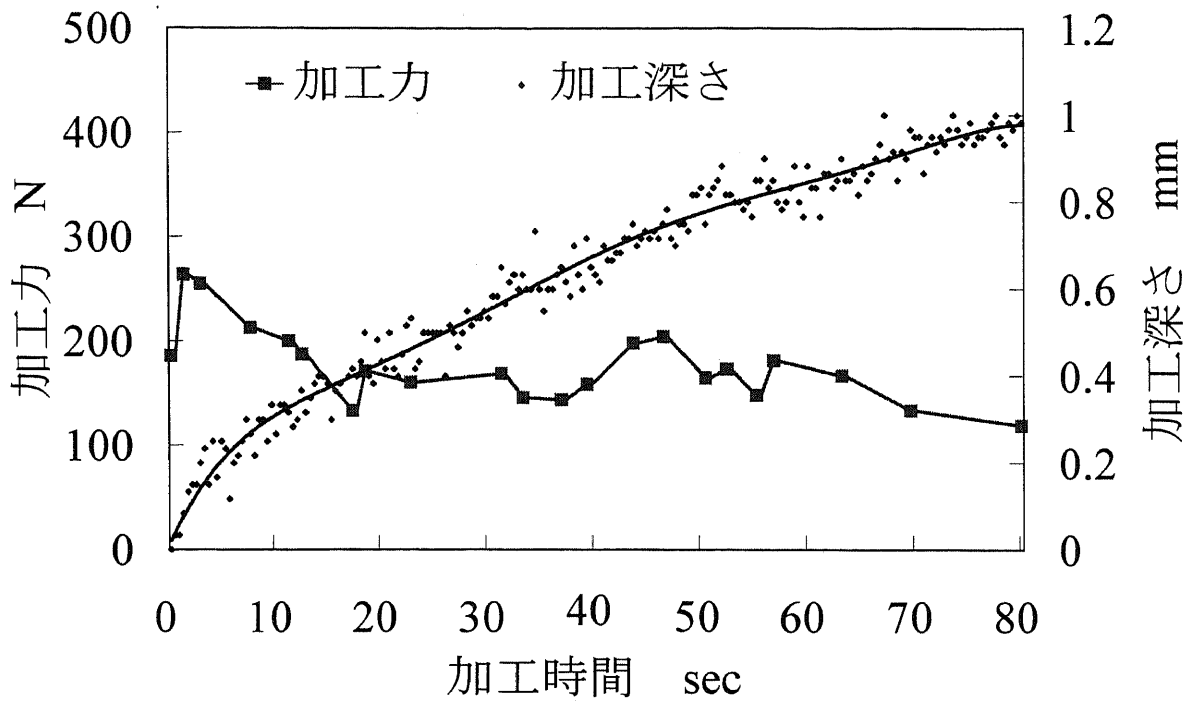


図 7.16 被削材ソーダガラス，工具直径 0.3mm のときの加工力と加工深さの関係

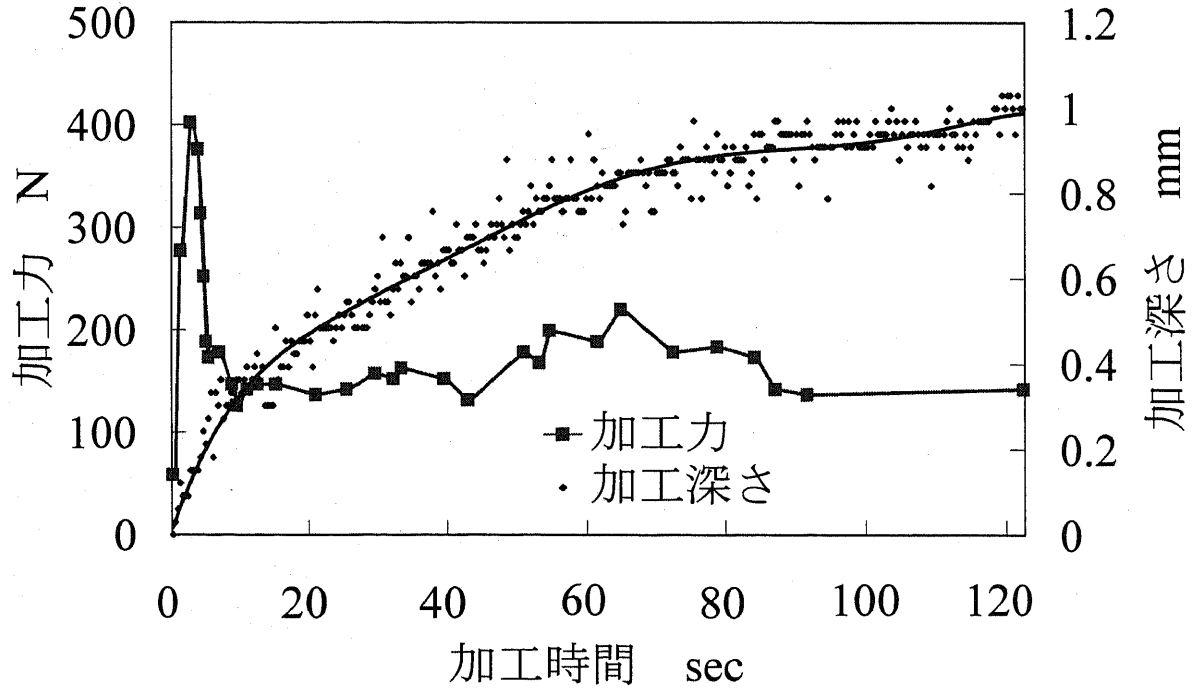


図 7.17 被削材石英ガラス，工具直径 1.0mm のときの加工力と加工深さの関係

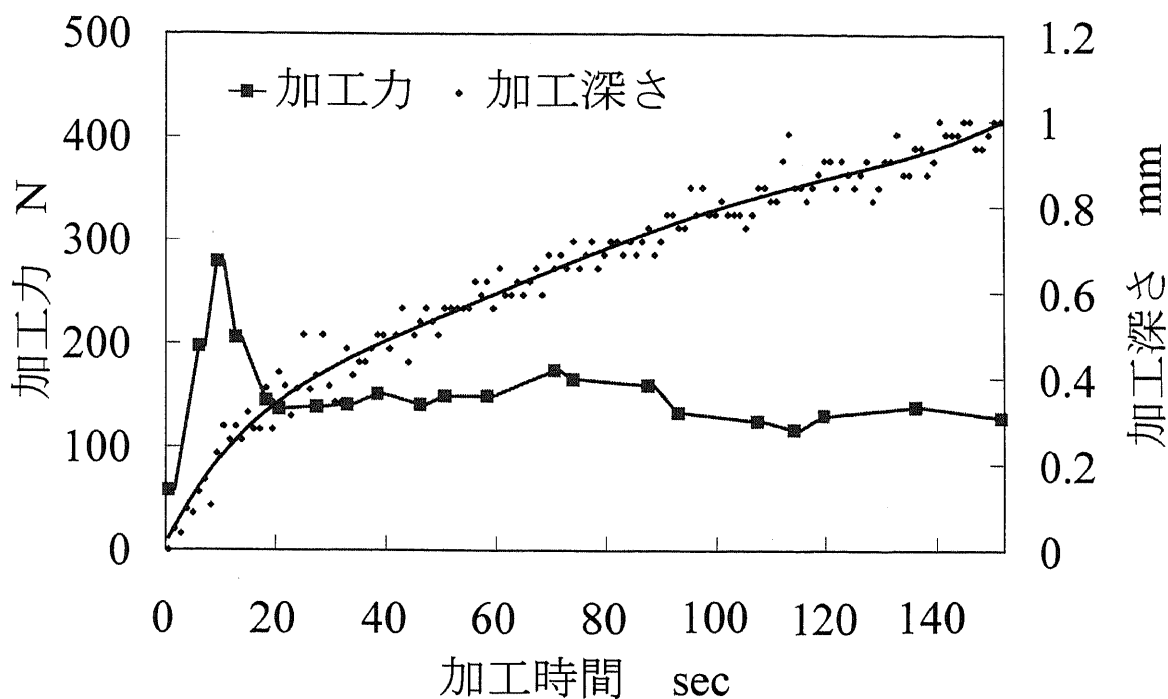


図 7.18 被削材石英ガラス，工具直径 0.3mm のときの加工力と加工深さの関係

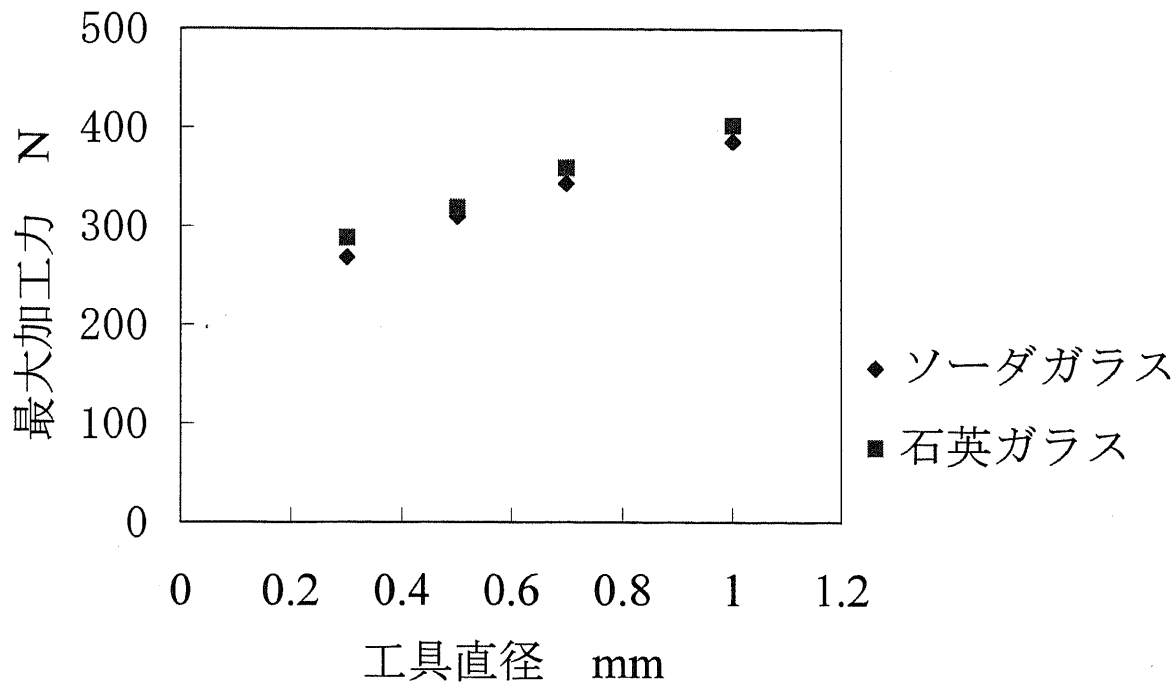


図 7.19 被削材別工具直径と最大加工力の関係

参考文献

- 1) 森栄司：超音波加工における機械的負荷の測定，日本音響学会，11, 4(1955)238.
- 2) 実吉，三尾：大電力負荷時の磁歪振動子自由インピーダンスの測定，日本音響学会研究発表会予稿，(1953)11.
- 3) 谷口紀男：超音波加工機の特性 第2報ピエゾエレメントによる加工力の測定，精密機械，26, 2(1960)94.
- 4) 日本電子工業社内技術資料

第8章 工具直下に発生するキャビテーションの影響について

8.1 キャビテーションとは

キャビテーションという現象は、19世紀末に船のスクリューの周りに多数の気泡が発生し、船の速度が上がりにくくなることで発見された。スクリューの高速回転によって、スクリューの周りに圧力が水の飽和水蒸気よりも小さくなる領域ができ、あたかも水が沸騰するかのように気泡が発生する現象である。「沸騰」との違いは、キャビテーションにおいては、液体の圧力が時間とともに（あるいは空間的に）変化していて、発生した気泡は、圧力の高くなったときに圧壊と呼ばれる激しい収縮をすることである。気泡の圧壊のために、船のスクリューは腐食することが知られている。

一般的に液体中には、無数の気体分子が溶け込み分散している。その液体中に強力な超音波を照射すると、その超音波振動は液体に対して、図8.1に示すように、ある瞬間には減圧力（膨張力）、次の瞬間には圧縮力として働く¹⁾。この繰り返しの中で、液体に減圧力が作用すると、液体中に真空またはそれに近い空洞が発生し、液体に溶け込んでいる気体を取り込んで気泡となる。そして次の瞬間に、気泡には圧縮力が働き押しつぶされる。押しつぶされて気泡が消滅する際に、今まで気泡を取り囲んでいた液分子が衝突するので、強い衝撃波が液体中に発生する。

キャビテーションが発生すると、振動面および振動波を受けている物体の表面にキャビテーション・エロージョン（かい食）を起こさす。島川によると、かい食の加工におよぼす効果には2つ考えられる²⁾。

1つはキャビテーションによって生じた気泡が破裂するとき、大きな衝撃力を瞬間的に周囲の媒質中に伝え、その力によって被削材を微細に機械的にかい食していく効果である。もう1つは、砥粒による被削材の衝撃、あるいはキャビテーションによって生じた表面の亀裂が、次の瞬間にキャビテーションによって物体表面より微細量を取り去られるというものである。

西村ら³⁾は、かい食作用でどれだけ加工物が削りだされるかについて、砥粒を用いずに実験した。その結果、直径4mmの軟鋼工具に対して、被削材としてのガラスのかい食量は約0.1mm³程度と極めて少なく、また、かい食深さも少なかった。このことから、キャビテーションのかい食のみは、超音波加工に重要ではないと言っている。

Rostovtsev⁴⁾は、加工液を密閉して加工をおこなった。加工液の圧力の増加とともに加工量は増加するが、ある圧力で加工量は飽和し、以後いくら圧力を増しても加工量は増大しない。液圧を1気圧よりも高くすると、キャビテーションが発生しにくくなるので、臨界圧力（これ以上ではキャビテーションが発生しない）以上では、加工速さに変化がなかった。よって、キャビテーションの発生は、加工の妨げにこそなれ、なんら益もないと言っている。

この原因の一つは、キャビテーション気泡群が発生し、これが工具の加工面に介在すると、その容積だけスラリー量が少なくなり、加工に作用する砥粒数が減ると考えられる。

さらに斉藤⁵⁾、および厨川⁶⁾は、キャビテーションの発生状態、パイプ状工具の肉厚がキャビテーションの発生状態に与える影響について検討している。工具先端がス

ラリー中に浸漬されている場合には、工具端面で必ずキャビテーションが発生する。しかし、工具端面の外周部から約1.0mmの領域では、キャビテーションによる気泡がほとんど発生しない。これは、工具端面の外周部では、液体の圧力変動が緩慢になるためと推測している。これらのことから、キャビテーション気泡群が超音波加工に与える影響は大きいと考えられる。

8.2 工具先端の状態

8.2.1 かい食による影響について

キャビテーションのみによる工具先端の影響を調べる目的で、ガラス板で1辺30mmの立方体の容器を作り、その中を水道水で満たした。S45C材のそれぞれ直径5.0mm, 3.0mm, 1.5mm, 1.0mmの工具の端部を容器の中に入れて励振し、キャビテーションの発生状態およびかい食痕を観察・記録した。工具直径5.0mm, 3.0mmのときのデジタルカメラで記録したキャビテーションの発生状態を図8.2および図8.3にそれぞれ示す。工具先端面の状態は、三角プリズムを用いて斜め下から観察した。

図8.2からわかるように、工具先端面に白く曇った気泡群と工具中心部から真下へ伸びる線束状の気泡群が観察された。これがキャビテーション気泡群であろうと考えられる。工具直下へ伸びる気泡群は、工具端面付近のキャビテーションが工具端面殻の直進流に引きずられたものであろう。工具先端面から離れると、直進流の勢いが弱まるため、気泡群は拡散する。これらキャビテーション気泡群が超音波加工においてスラリー流入を妨げ、加工の停滞を引き起こす原因の一つと考えられる。

図8.3から、工具直径3.0mmでも先端面にキャビテーション気泡群が観察された。しかもその気泡群は、工具先端面で時々刻々と発生位置が移動し、その大きさも様々であった。また工具直径5.0mmのときにみられた直進流によって引きずられる気泡群は、肉眼では観察できなかった。

工具直径1.5mm, 1.0mmでも同様の観察を試みたが、肉眼での観察およびカメラでの記録は困難であった。100倍の顕微鏡を用いたが、その気泡群の発生を確認できなかった。

実験前に直径5.0mmの工具先端面を平面研削し、10分間励振した後の工具先端の状態を図8.4に示す。工具外周部から0.5mm内側まではその研削痕が残っている。さらにその内側では工具端面が白くなっていることから、この領域でキャビテーションが発生し、かい食されたと考えられる。

この部分、つまり中心部で最も激しいかい食を生ずる作用力の存在があるものと考えられる。

一方、工具直径3.0mmの工具先端の状態を観察したが、図8.4のようなかい食痕はみられなかった。工具直径1.5mm, 1.0mm工具も同様にかい食痕はみられなかった。以上のことから、工具直径が小さくなるにつれて、発生する気泡群は小さくなっていくと考えられる。

このようなキャビテーション気泡群の発生状態および後述するキャビテーション痕は、振動系の振動特性と音響放射特性および輻射インピーダンスとの組み合わせに

よって決まる複雑な現象であるため、結論付けは非常に困難である。

8.2.2 摩耗による影響について

実際に超音波加工をおこない、そのときの工具先端面の状態を観察した。S45C 材の直径 5.0mm, 3.0mm, 1.5mm, 1.0mm の工具, SUS304 材の直径 1.0mm, 0.7mm, 0.5mm, 0.3mm の工具を用意した。被削材はソーダガラス, 加工深さ 1.5mm, 加工穴数は 5 穴とし, その他 (加工圧, スラリー流速等) は, 今までの研究を踏まえて, 最適と思われる条件になるようにした。

加工後の工具先端面の状態を観察した。S45C 材工具のときを図 8.5 に SUS304 材のときを図 8.6 にそれぞれ示す。

工具直径 5.0mm の写真から, 工具全体に見える横縞は, 加工前に平面研削したときに生じた研削痕である。工具中心部に直径 0.1mm 程度のくぼみがあるが, これは直進流の影響によるかい食か, あるいは超音波加工の際にスラリー循環が悪いことが原因で被削材に生じた突起によるくぼみかは, 判断できない。

工具外周部から 0.5mm の幅のリング状に断面 R 凸形状のような盛り上がった状態となった工具摩耗がみられる。エッジ部分は砥粒による摩耗で丸みを帯び, それよりも内側では外周部より高さが低くなっている。

工具直径 3.0mm の写真から, 工具直径 5.0mm のときと同様な工具中心部にくぼみがみられる。また, 外周部から 0.5mm 幅のリング状に断面 R 凸形状盛り上がった状態となった工具摩耗がみられる。それよりも内側では, 外周部よりも高さが低くなっている。

工具直径 1.5mm および 1.0mm の工具写真から, 工具直径 5mm および 3mm のときと異なり, 工具先端面の中心部のくぼみがみられず, 外周部の盛り上がりなども確認できない。エッジ部は, 砥粒による摩耗で丸みを帯びていた。

以上のことから, 工具直径 3.0mm 以上と工具直径 1.5mm 以下の間で, 工具先端面でのキャビテーション気泡群の発生, スラリーの工具直下への流入状態が異なると考えられる。

図 8.6 の工具直径 1.0mm 以下では, 工具先端部全体が摩耗により丸みを帯びた状態となっていた。工具直径が小さくなるほど, 均一に丸みを帯びるというよりも, むしろ多少いびつな形で摩耗しやすい状態であった。これはスラリーの挙動が大きく影響していると考えられる。これらの工具ではキャビテーション気泡群の発生の確認には至らなかった。

8.3 キャビテーション痕について

8.3.1 実験条件および手順について

8.2 において, 工具直径によって工具先端でのキャビテーション気泡群の発生の状態, 工具摩耗の状態が異なることがわかった。そこで今度は被削材表面の状態から, キャビテーションおよび砥粒の挙動について考察する。ここでは, スラリーの工具直下への循環に重点をおくことにする。

用いたのはS45C材の直径4.9mm, 3.0mm, 1.5mm, 1.0mmの工具, 被削材はソーダガラス, 無負荷時工具先端振幅約 $10\mu\text{m}_{p-p}$, 加工穴数は3穴とし, その他(加工圧, スラリ流速等)は, 今までの研究を踏まえて, 最適と思われる条件になるようにした.

工具直径が大きいとき, 今までのような一方向からの供給では, 供給側の反対側に十分スラリーが回り込まないことが考えられたため, ジャマ板で工具周辺を1辺50mmのコの字型に囲い, 十分にスラリーが供給されるように配慮した.

実験手順を以下に示す.

- 1: 零設定
- 2: 被削材被削材面上0.2mmで発振. スラリー供給開始
- 3: 工具降下速さ0.01mm/secで工具を降ろす.
- 4: 設定値に到達したら, 上方へ退避

加工深さ設定値は被削材面上0.04mmから0.005mm刻みとし, さらに被削材面上0.003mm, 0mmもおこなう.

8.3.2 工具直径4.9mmのとき

工具直径4.9mmのときの加工痕および加工後の工具先端状態を図8.7(a)から(h)に示す. 図中において, スラリーは左側から供給した. また, 工具との関係がわかるように, 工具外周部を実線で示した. 被削材面上0.03mmまでは加工痕がつかなかった.

(a)被削材面上0.025mmから工具中心付近に加工痕が付き始めた. これは先述した音響放射特性が影響していると思われる.

(b)被削材面上0.02mmでは, その中心部の加工痕領域が大きくなった.

(c)被削材面上0.015mmでさらに加工痕領域が大きくなった. 工具外周部との関係を考えると, 工具中心部よりもややスラリー供給側に加工痕がついていることから, スラリーの供給方向と流速が影響している.

(d)被削材面上0.01mmから, 中心部の加工痕の他に, 工具外周部から約0.5mm幅で内側にリング状の加工痕が付き始める. 図上端は, 測定機のレンジの都合上カットされた. 外周部では, 工具のポンピング作用によって, スラリーが工具直下に引き込まれ, それが被削材にたたきつけられることにより加工痕が生ずる. しかし, 工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していることから, スラリーは工具外周部から0.5mm内側には供給されていることが, それ以上内側に侵入することが難しく, 加工痕がつかないと考えられる. これが工具外周部から0.8mm内側にある幅0.3mmのリング状の加工されない部分と思われる.

加工されない部分は, 図の右下にもみられるが, これはスラリー供給および循環がこの部分で悪かったと思われる. リング状のキャビテーション気泡群による加工されない部分は, 工具先端と被削材の距離が0.003mmになるまで存在する. それ以降では, 全面に加工痕がつく.

(h) 工具は加工痕と鏡像である. 加工後の工具先端面の状態から, 工具内側の部分では, キャビテーションによるかい食によるものと思われる変化がみられ, 一方で工具外周部ではほとんど変化がみられない.

8.3.3 工具直径 3.0mm のとき

工具直径 3.0mm のときの加工痕と加工後の工具を図 8.8(a) から (g) に示す。被削材面上 0.03mm までは加工痕がつかなかった。

(a) 被削材面上 0.02mm から加工痕が付き始めた。

(b) 被削材面上 0.015mm では、中心部に加工痕が付き始めた。これは工具直径 5mm のときと同様の直進流によるものと考えられる。

(c) 被削材面上 0.01mm では、中心部の加工痕の領域が大きくなっている。使用している砥粒の中心粒径、工具先端振幅を考えると、いかにキャビテーションによって工具先端部へのスラリー流入が妨げられているかがわかる。

(d) 被削材面上 0.005mm によりやく外周部にもポンピング作用でスラリーが引き込まれたと思われる加工痕が付き始める。工具直径 4.9mm と同様に、外周部から 0.4mm から 0.5mm 内側にリング状の加工されない部分が存在する。中央よりやや左下の縦縞状の白い部分は、工具先端面を平面研削したときの研削痕がそのまま転写されたものである。

(e) 被削材面上 0.003mm になると、加工痕の領域は大きくなるものの、リング状の加工されない部分は存在する。

(f) 工具先端面が被削材に接するような状態になっても、リング状の部分は残っていた。これはスラリーの循環が悪かったことが考えられる。

以上のことから、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生しており、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されていることが、それ以上内側に侵入することが難しく、加工痕がつかないと考えられる。

(g) 加工後の工具の状態から、リング状に表面が変質していた。さらに中心部は、工具直径 4.9mm のときと同様にキャビテーションによると思われるかい食もみられた。

8.3.4 工具直径 1.5mm のとき

工具直径 1.5mm のときの加工痕と加工後の工具を図 8.9(a) から (h) に示す。

(a) 被削材面上 0.04mm からしかも工具外周部に相当する位置から加工痕が付き始めた。今までの工具直径 5mm および 3mm とは、加工の状況が異なると思われる。

(b) 被削材面上 0.035mm, (c) 被削材面上 0.03mm と工具が被削材に接近するにつれて、加工痕の領域が大きくなる。

(d) 被削材面上 0.025mm および (e) 被削材面上 0.02mm では、中心部の加工されない部分がはっきりと確認できる。キャビテーション気泡群は多少発生していると思われるが、その発生によるスラリー循環の妨害よりも、ポンピング作用による工具直下、特に工具外周部から 0.5mm 内側へのスラリー循環が上回り、このような加工痕になったと考えられる。

(f) 被削材面上 0.015mm では、上述の傾向が強まり、中心部の加工されない部分がかなり小さくなる。

(g) 被削材面上 0.01mm になると、ほぼ全面に加工痕が付き、これ以降では加工痕に変化がない。

以上のことから、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していると思われるが、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されており、実際に加工が始まるとキャビテーションの影響は小さいと思われる。

(h)加工後の工具先端面の状態から、中心部に今までとはそれほど明確ではないものの、キャビテーションによるかい食痕らしきものがみられた。

8.3.5 工具直径 1.0mm のとき

工具直径 1.0mm のときの加工痕と加工後の工具を図 8.10 (a) から (g) に示す。

(a)被削材面上 0.035mm から工具直径 1.5mm のときと同様に、加工痕が工具外周部に相当する位置からつき始めた。

(b)被削材面上 0.03mm, (c)被削材面上 0.025mm と工具が被削材に接近するにつれて、加工痕の領域は大きくなる。

(d)被削材面上 0.02mm では、工具直径 1.5mm のときと同様に、中心部の加工されない部分が確認できる。

(e)被削材面上 0.015mm では、中心部の加工されない部分がかなり小さくなる。

(f)被削材面上 0.01mm では、ほぼ全面に加工痕がつき、これ以降では加工痕に変化がない。

以上のことから、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していると思われるが、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されており、工具直径 1.5mm のときと同様に、実際に加工が始まるとキャビテーションの影響は小さいと思われる。

(g)加工後の工具先端面の状態から、工具直径 1.5mm のときと同様に、中心部にキャビテーションによると思われるかい食痕がみられた。

8.4 加工面の状態について

8.2.2 摩耗による影響についての章において加工した加工穴底面の面粗さを測定した。また、直径 0.7mm, 0.5mm, 0.3mm の PCD 工具を用いて被削材ソーダガラスに深さ 1.5mm 加工したときの加工穴底面の面粗さも測定した。加工穴底面の測定可能な平面部を確保するために、摩耗による工具変形の少ない PCD 工具を用いた。このときの測定結果を図 8.11 に示す。また、参考までに直径 1.0mm の PCD 工具を用い、8.3 のように加工深さ 0mm にしたときの加工穴底面の面粗さもあわせて示す。

工具直径が 5.0mm では $Rz=3.42\mu\text{m}$, 工具直径 3.0mm では $Rz=1.40\mu\text{m}$ と小さくなっていくが、工具直径 1.5mm では $Rz=5.22\mu\text{m}$ と極端に大きくなる。そして工具直径 1.0mm では $Rz=1.39\mu\text{m}$ と工具直径 3mm のときとほぼ同程度となる。その後、工具直径 0.7mm では $Rz=1.08\mu\text{m}$, 工具直径 0.5mm では $Rz=0.87\mu\text{m}$, 工具直径 0.3mm では $Rz=0.65\mu\text{m}$ と徐々に小さくなっている。

8.3 キャビテーション痕についての章とあわせて考えると、工具直径が大きい (5.0mm および 3.0mm) ときは、工具直下にキャビテーション気泡群が発生することにより、スラリーの挙動が影響を受けることから、加工穴底面の粗さが小さくなる。

工具直径 1.5mm のときには、キャビテーション気泡群の影響よりも、ポンピング作

用によるスラリー循環の効果が上回り、比較的粒径の大きい砥粒が工具直下クリアランスに進入でき、加工に作用することから、面粗さの値が大きくなる。

工具直径1.0mmよりも小さいときには、キャビテーション気泡群の影響が小さくなるが、今度はポンピング作用によるスラリー循環も悪さの影響もあらわれ、加工面の面粗さが小さくなっていくと考えられる。

参考値を用いて工具直径1.0mmの加工深さで考えると、加工深さ0mmでは $Rz=2.65\mu\text{m}$ であり、加工深さが深くなると面粗さが小さくなることがわかる。超音波加工の初期では、比較的粒径の大きい砥粒が被削材に打ち付けられるため、加工面全体の粗さの値が大きくなる。加工が進むにつれて、工具直下のクリアランスに存在する砥粒は、多少摩耗し粒径が平均化されてくることにより、被削材を破壊する単位が加工深さ0mmのときよりも小さくなるため、粗さの値が小さくなると考えられる。

8.5 第8章の総括

第8章 工具直下に発生するキャビテーションの影響についてをまとめると次のようになる。

キャビテーションのみによる工具先端の影響を調べた。工具直径 5.0mm および 3.0mm のとき、工具先端面に発生するキャビテーション気泡群および直進流によって引きずられる気泡群を観察した。工具直径が小さくなるにつれて、発生する気泡群は小さくなっていくと考えられる。

実際に超音波加工をおこない、そのときの工具先端面の状態を観察した。工具直径 5mm および 3mm のとき、工具外周部から 0.5mm の幅のリング状に断面 R 凸形状のような盛り上がった工具摩耗がみられる。エッジ部分は砥粒による摩耗で丸みを帯びている。それよりも内側では外周部より高さが低くなっており、超音波加工による摩耗とキャビテーションによるかい食が原因とみられる。

工具直径 1.5mm および 1.0mm の工具写真から、工具直径 5.0mm および 3.0mm のときと異なり、工具先端面の中心部のくぼみがみられず、外周部の盛り上がりなども確認できない。工具直径 3.0mm 以上と工具直径 1.5mm 以下の間で、工具先端面でのキャビテーション気泡群の発生、スラリーの工具直下への流入状態が異なると考えられる。

スラリーの工具直下への循環に重点をおいて、被削材表面の状態から、キャビテーションおよび砥粒の挙動について考察した。

工具直径 4.9mm, 3.0mm では、工具外周部では、工具のポンピング作用によって、スラリーが工具直下に引き込まれ、それが被削材にたたきつけられることにより加工痕が生ずる。しかし、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していることから、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されているが、それ以上内側に侵入することが難しく、加工痕がつかないと考えられる。

工具直径 1.5mm, 1.0mm では、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していると思われるが、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されており、実際に加工が始まるとキャビテーションの影響は小さいと思われる。

工具直径が 5.0mm から 0.3mm までの加工穴底面の面粗さを測定した。工具直径が大きいときは、工具直下にキャビテーション気泡群が発生することにより、スラリーの挙動が影響を受けることから、加工穴底面の粗さが小さくなる。

工具直径 1.5mm のときには、キャビテーション気泡群の影響よりも、ポンピング作用によるスラリー循環の効果が上回り、比較的粒径の大きい砥粒が工具直下クリアランスに進入でき、加工に作用することから、面粗さの値が大きくなる。

工具直径 1.0mm よりも小さいときには、ポンピング作用によるスラリー循環も悪さの影響があらわれ、加工面の面粗さが小さくなっていくと考えられる。

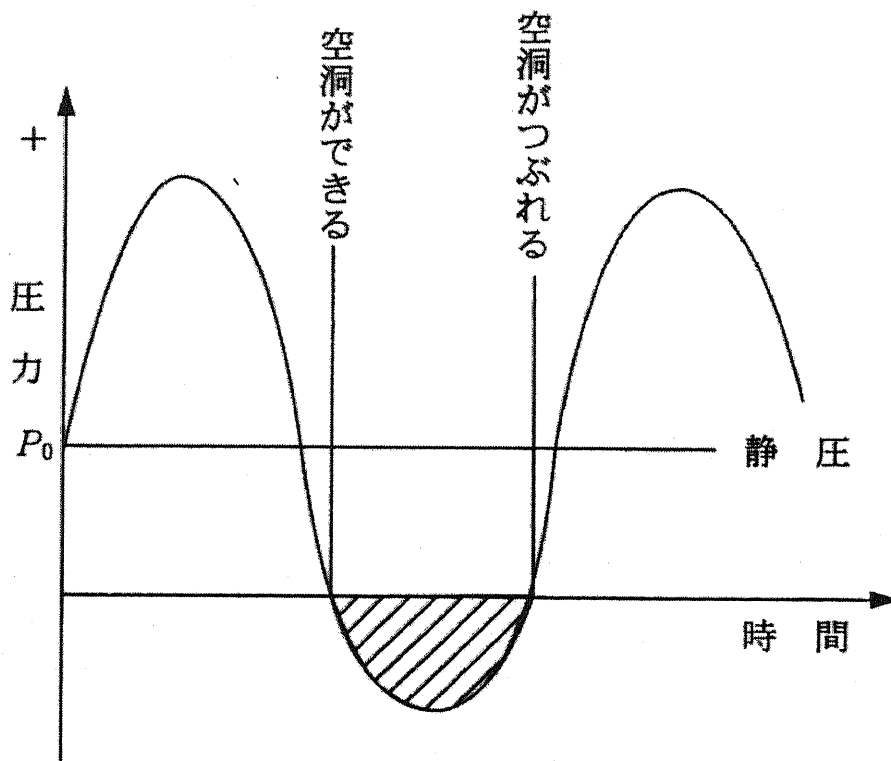
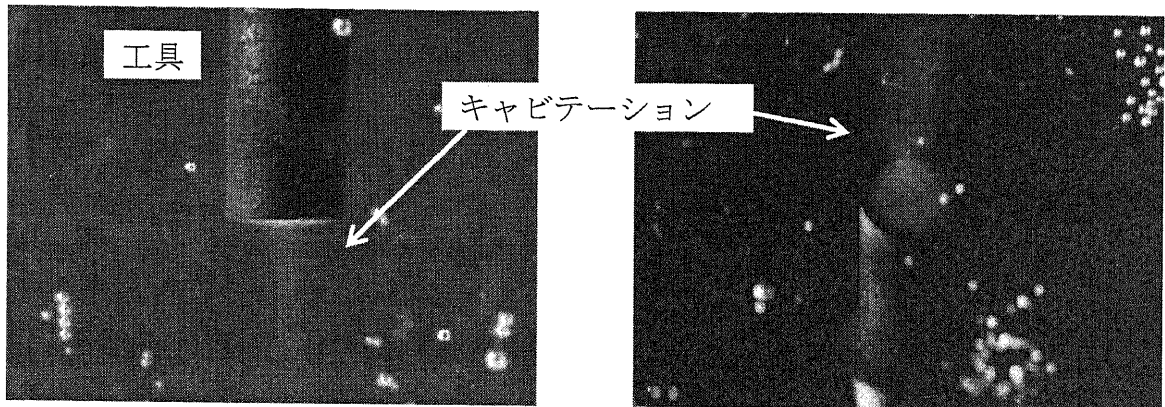


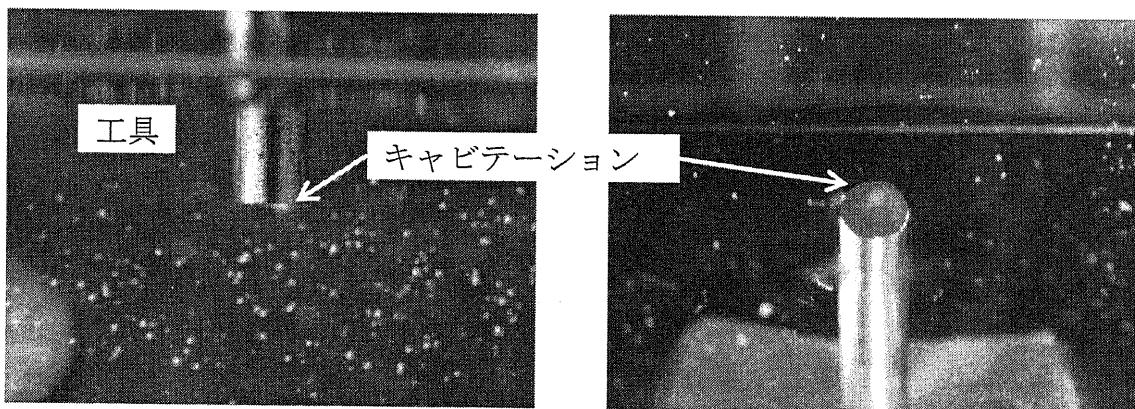
図 8.1 キャビテーションと圧力の関係



(a) 工具正面

(b) 工具直下

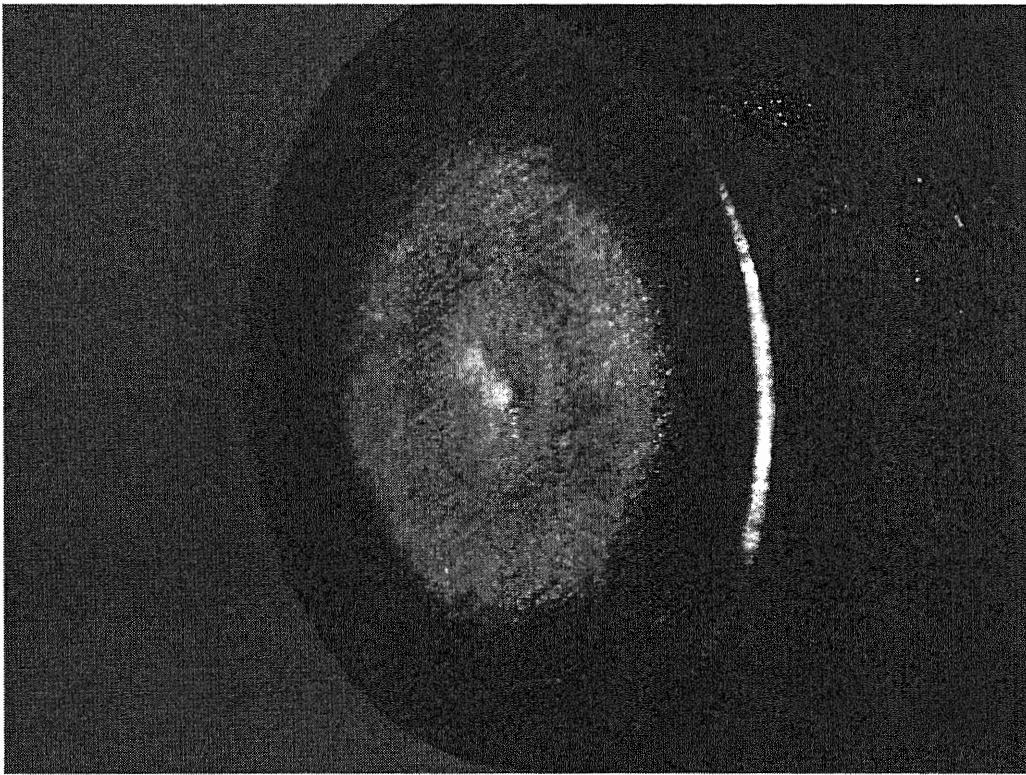
図 8.2 工具直径 5mm のキャビテーション発生状態



(a) 工具正面

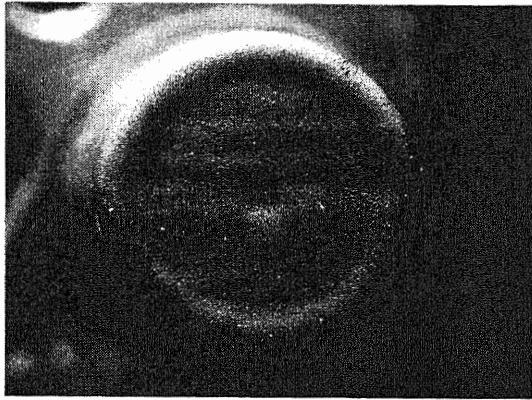
(b) 工具直下

図 8.3 工具直径 3mm のキャビテーション発生状態

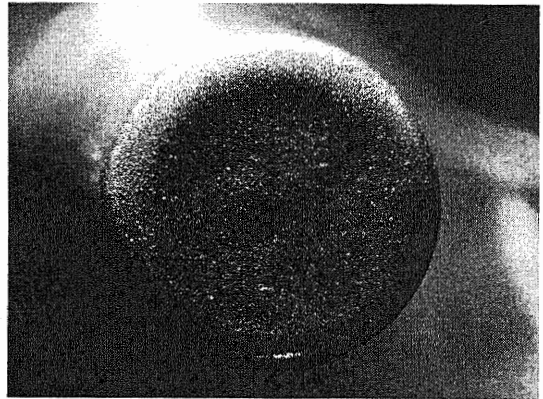


0.5mm
|←→|

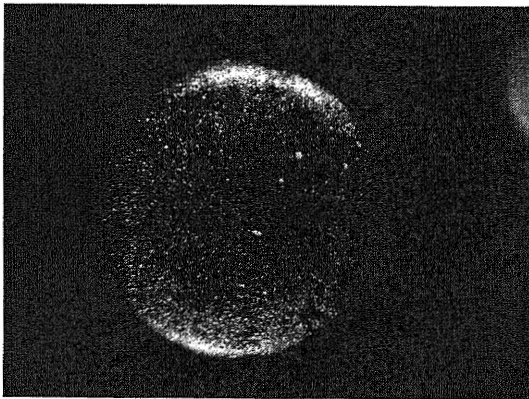
図 8.4 10 分間発振した直径 5mm の工具先端状態



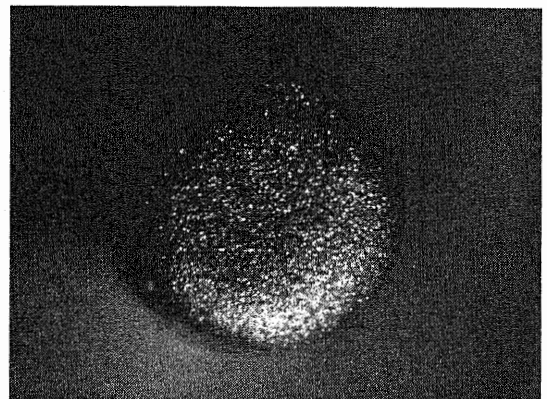
(a) 工具直径 5mm



(b) 工具直径 3mm

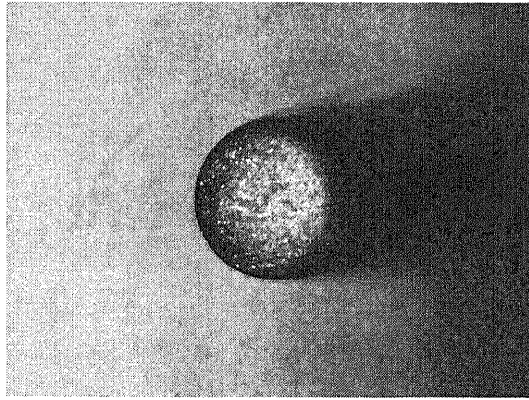


(c) 工具直径 1.5mm



(d) 工具直径 1.0mm

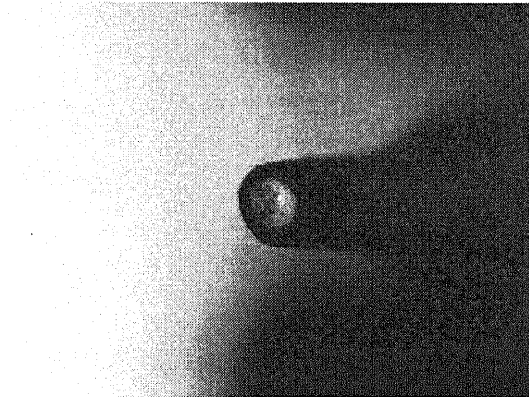
図 8.5 S45C 材工具先端の摩耗状態



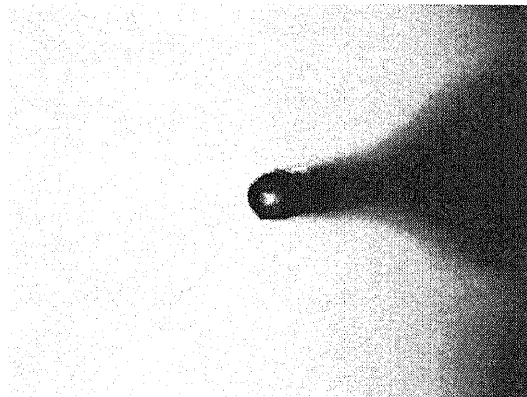
(a) 工具直径 1.0mm



(b) 工具直径 0.7mm



(c) 工具直径 0.5mm



(d) 工具直径 0.3mm

図 8.6 SUS304 材工具先端の摩耗状態

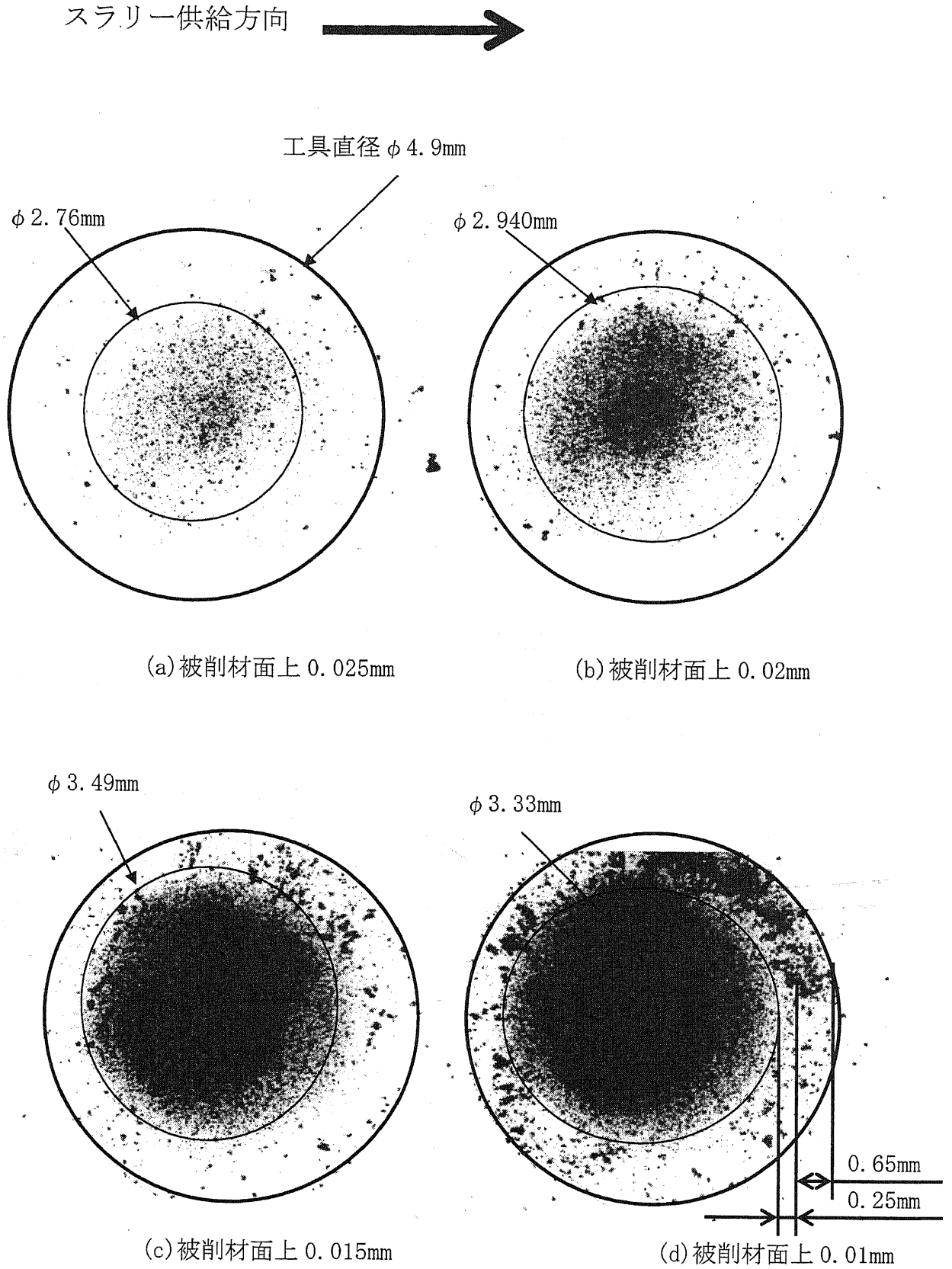
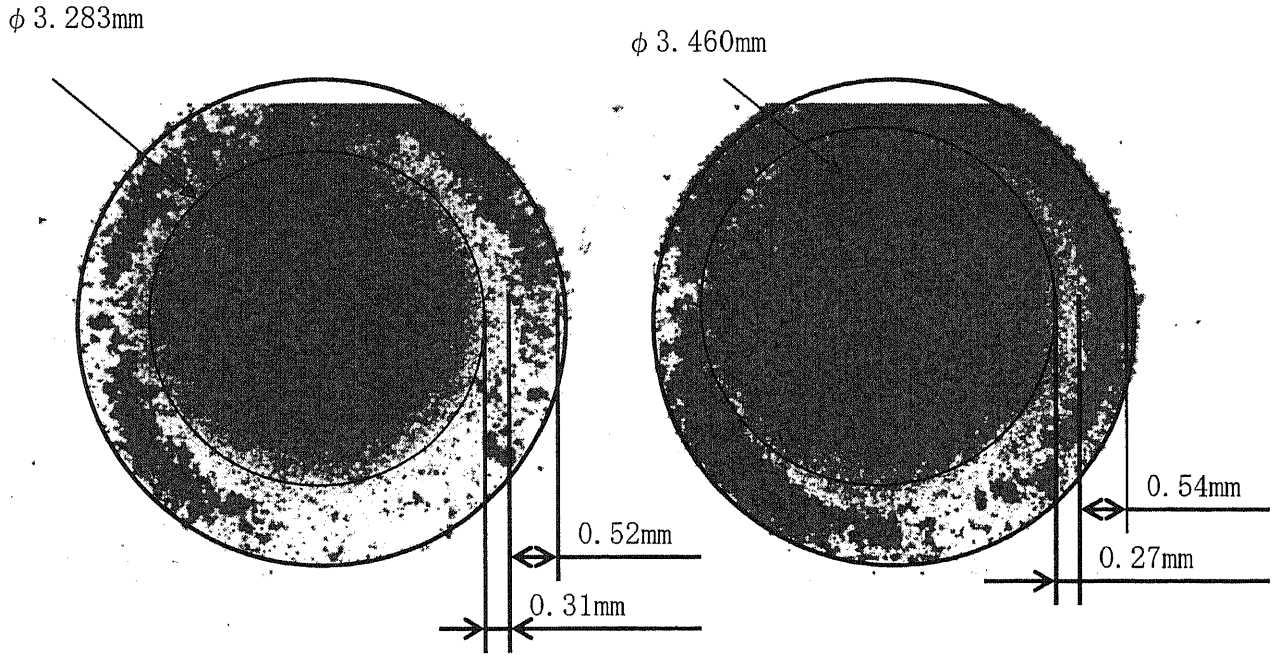
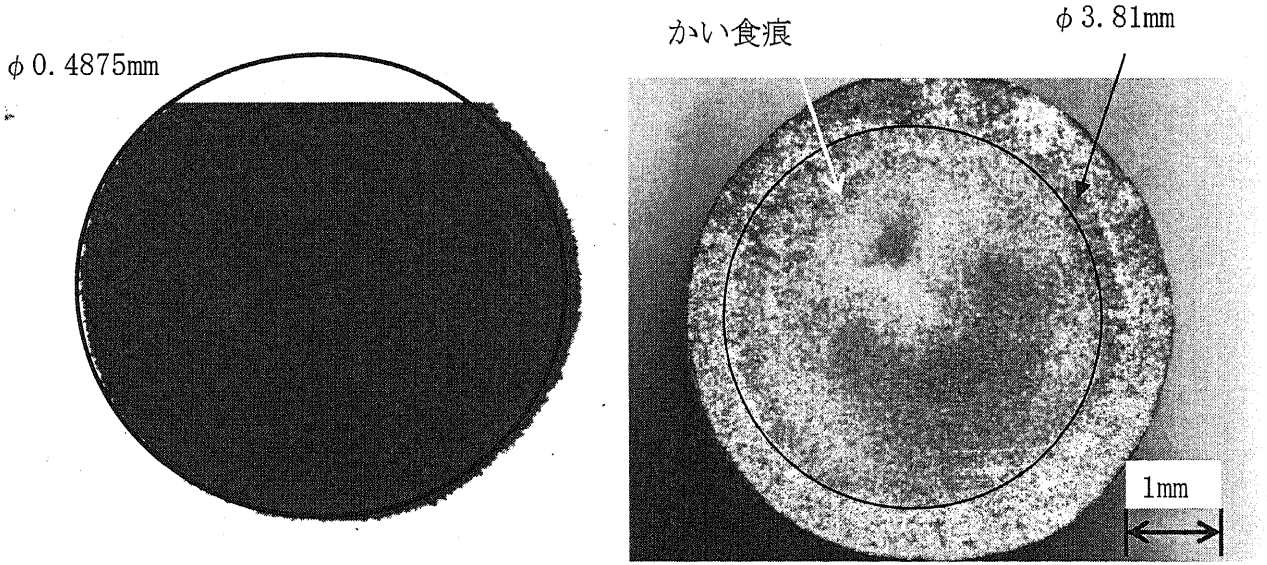


図 8.7 工具直径 4.9mm のときの加工痕 (a) から (d)



(e) 被削材面上 0.005mm

(f) 被削材面上 0.003mm



(g) 被削材面上 0mm

(h) 加工後の工具

図 8.7 工具直径 4.9mm のときの加工痕(e)から(g)と加工後の工具

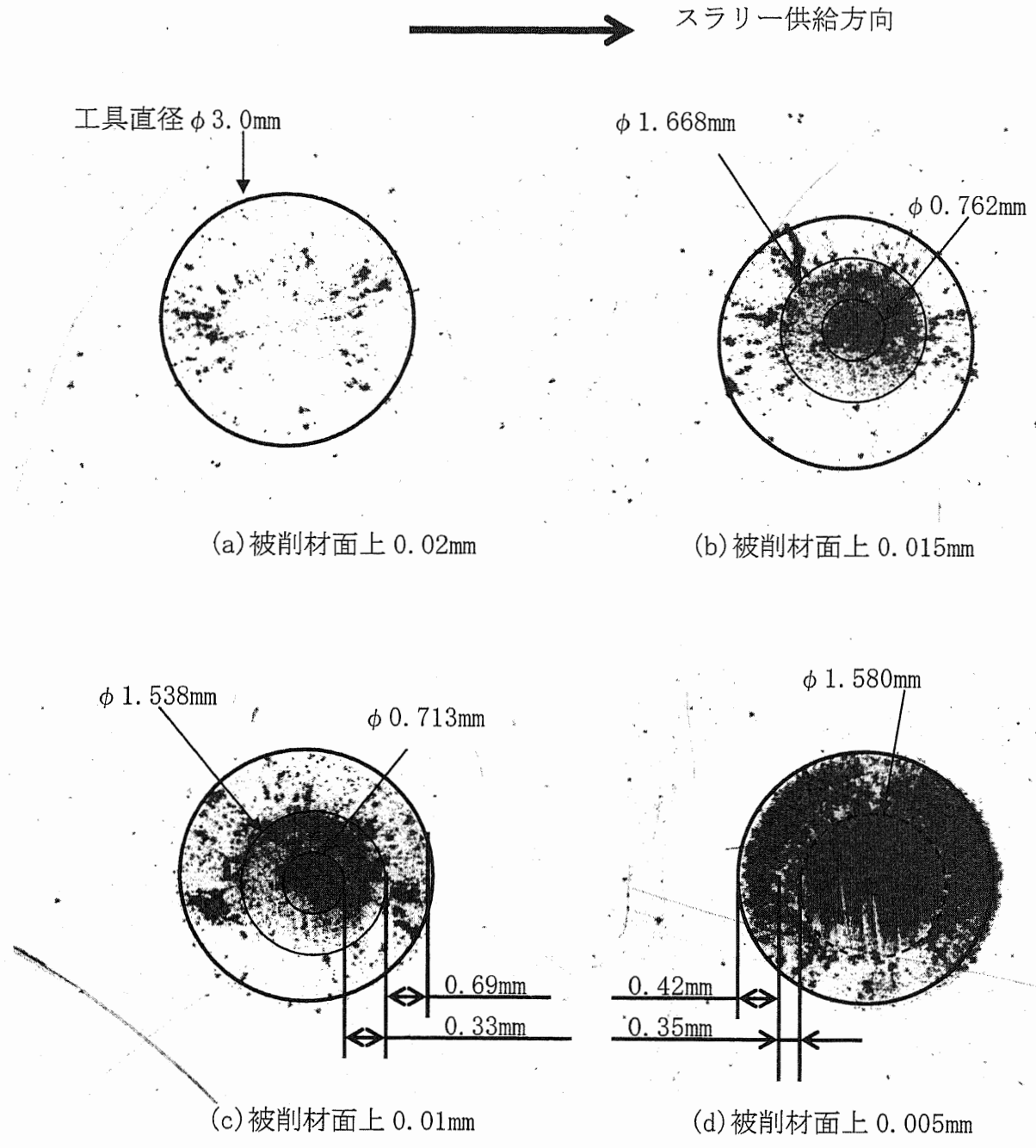
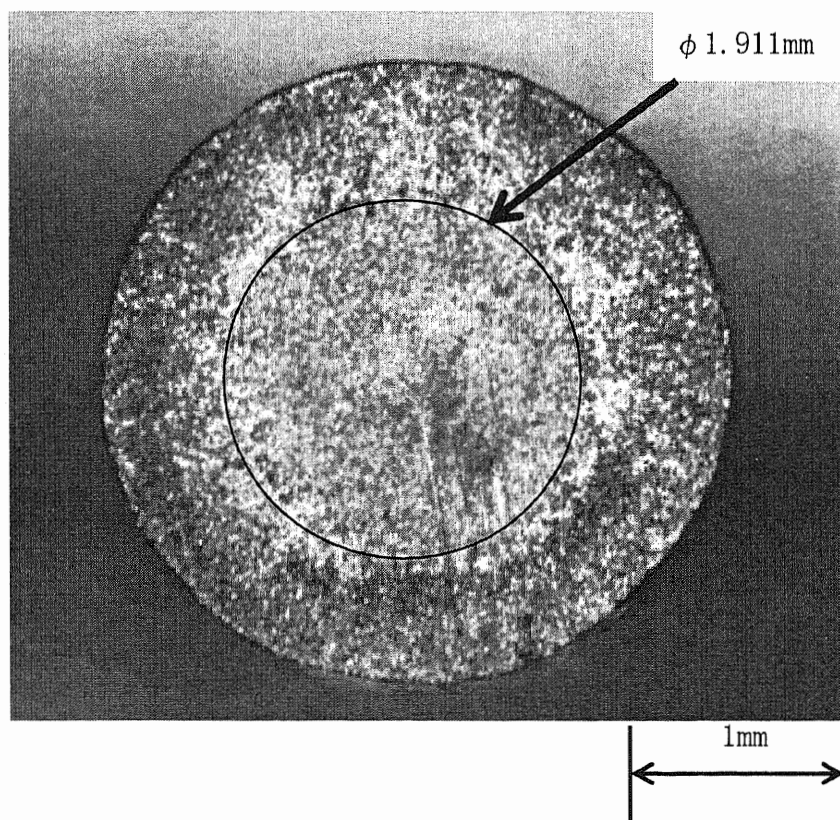
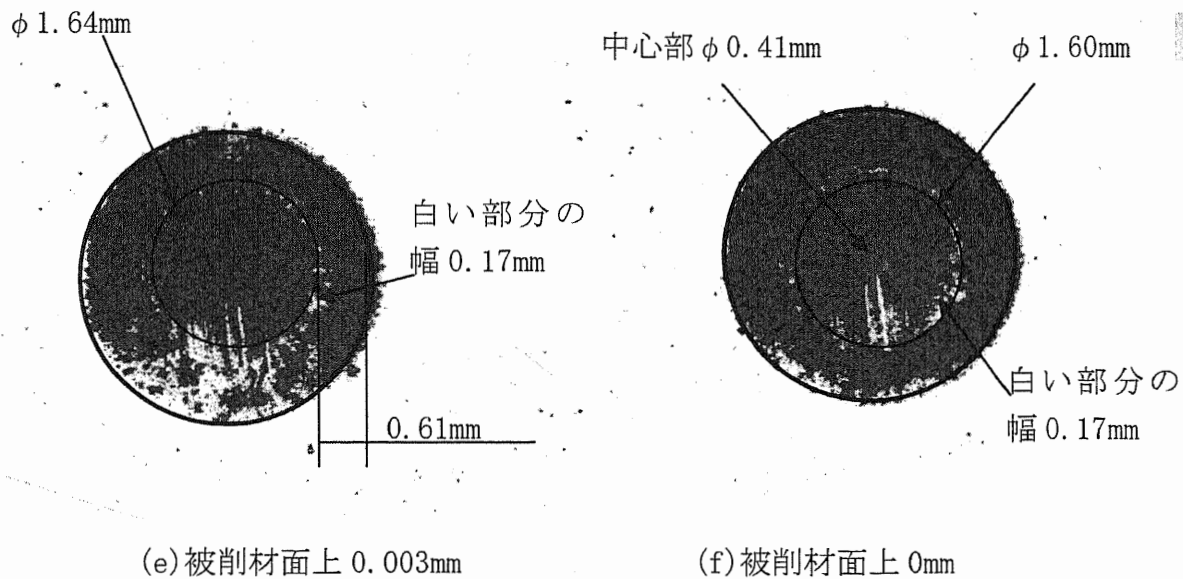
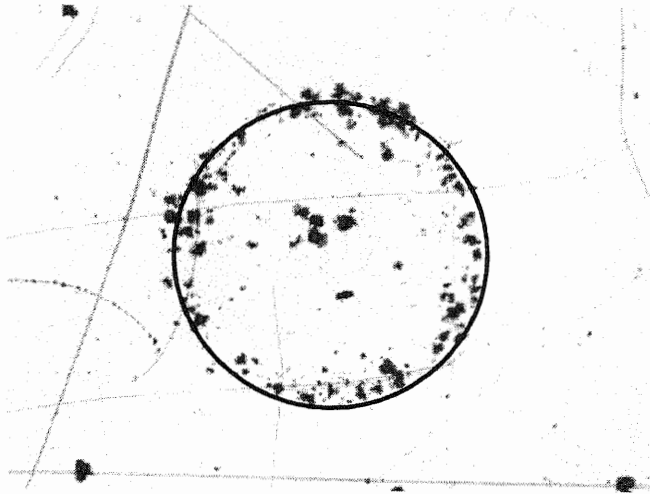


図 8.8 工具直径 3mm のときの加工痕 (a) から (d)

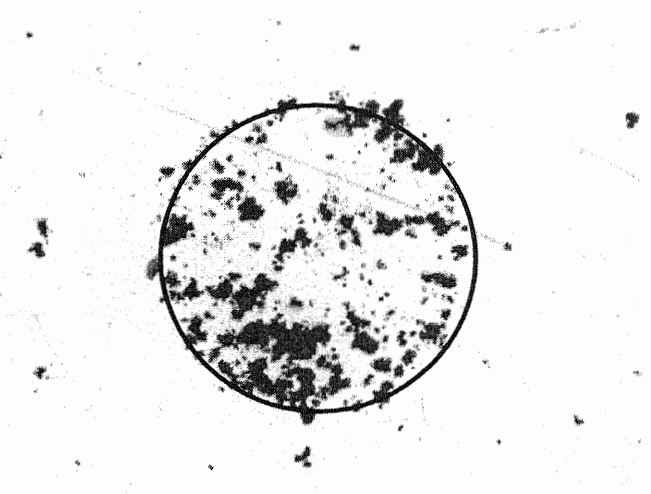


(g) 加工後の工具

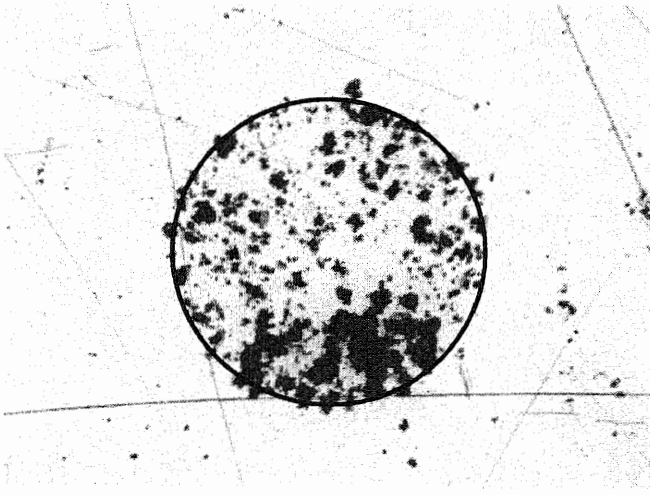
図 8.8 工具直径 3mm のときの加工痕 (e) から (f) と加工後の工具



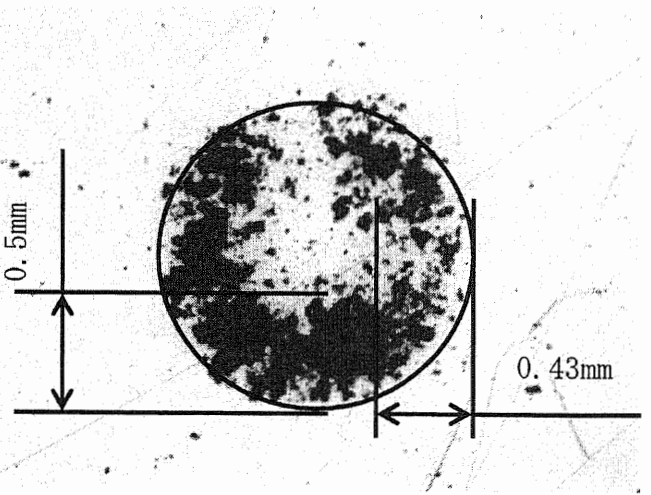
(a) 被削材面上 0.04mm



(b) 被削材面上 0.035mm

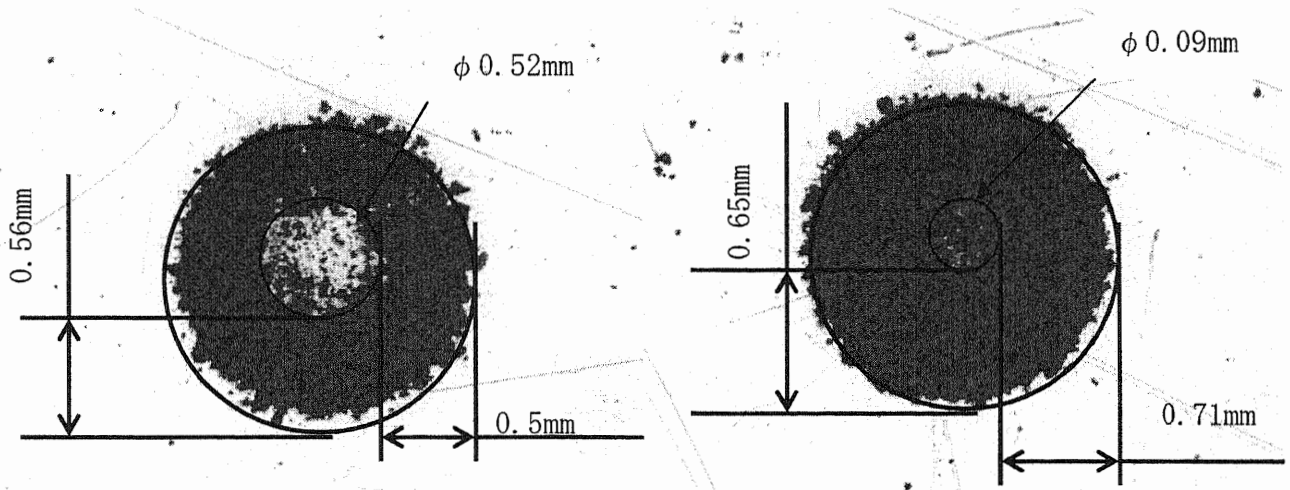


(c) 被削材面上 0.03mm



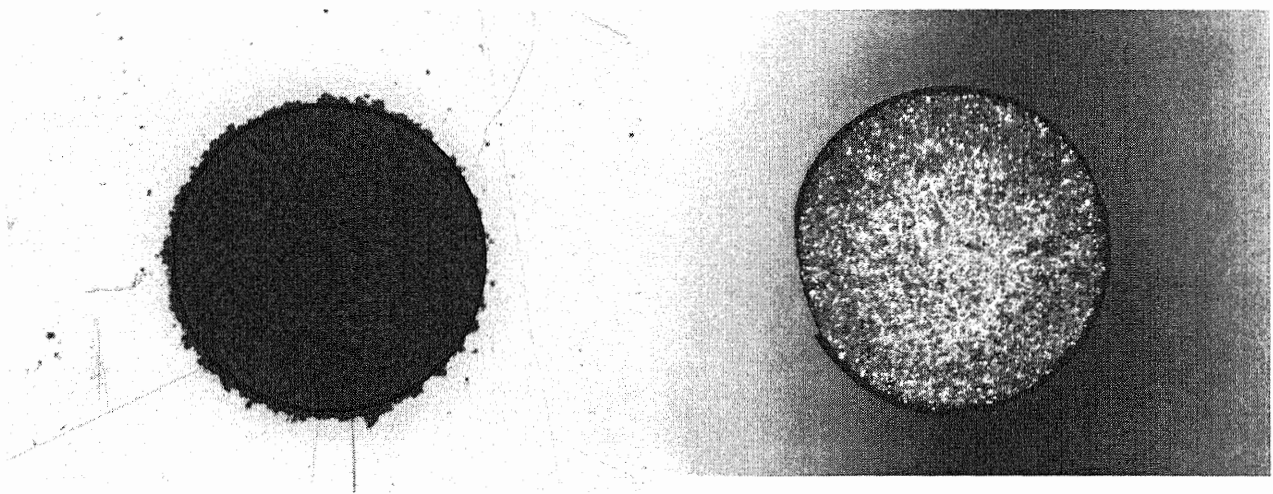
(d) 被削材面上 0.025mm

図 8.9 工具直径 1.5mm のときの加工痕(a)から(d)



(e) 被削材面上 0.02mm

(f) 被削材面上 0.015mm



(g) 被削材面上 0.01mm

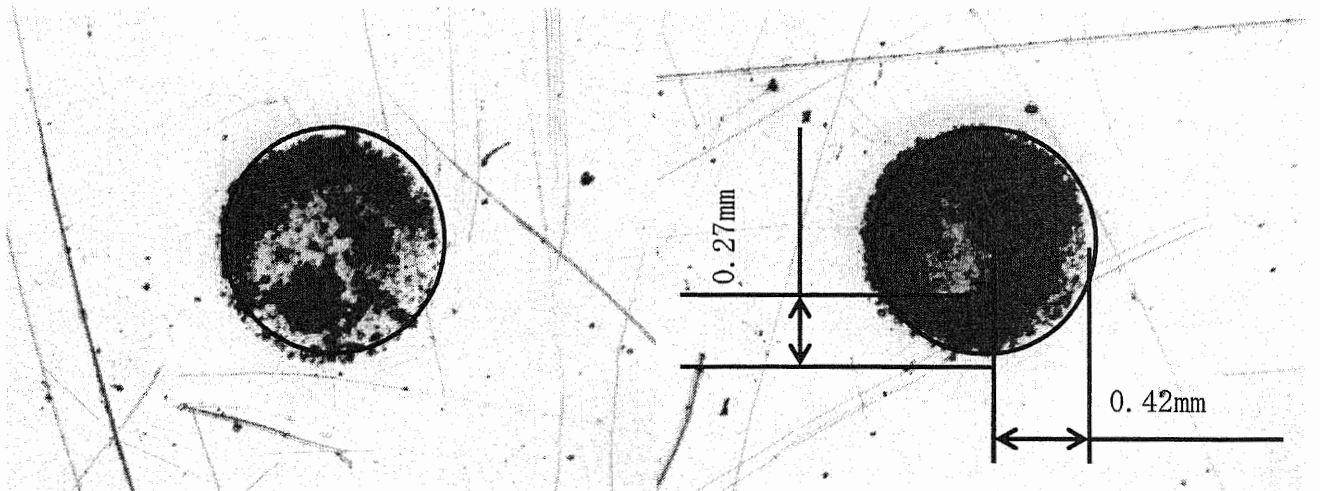
(h) 加工後の工具

図 8.9 工具直径 1.5mm のときの加工痕(e)から(f)と加工後の工具



(a) 被削材面上 0.035mm

(b) 被削材面上 0.030mm



(c) 被削材面上 0.025mm

(d) 被削材面上 0.020mm

図 8.10 工具直径 1mm のときの加工痕 (a) から (d)

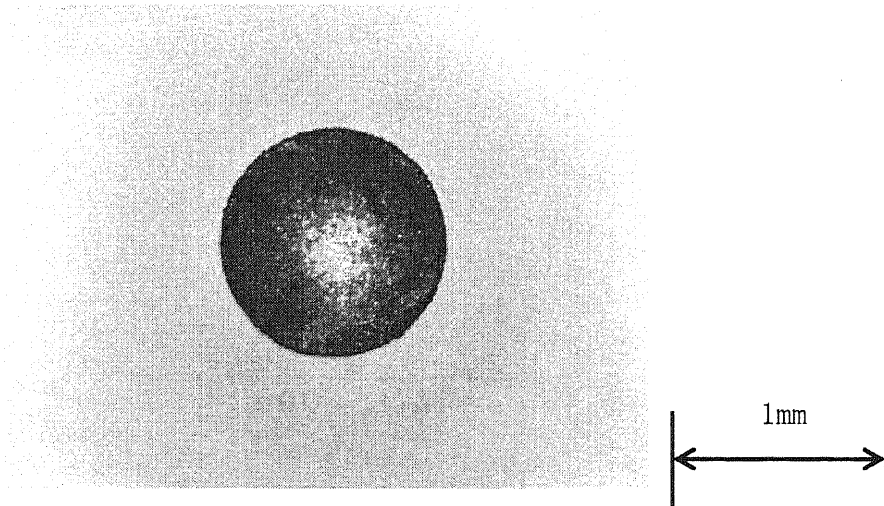
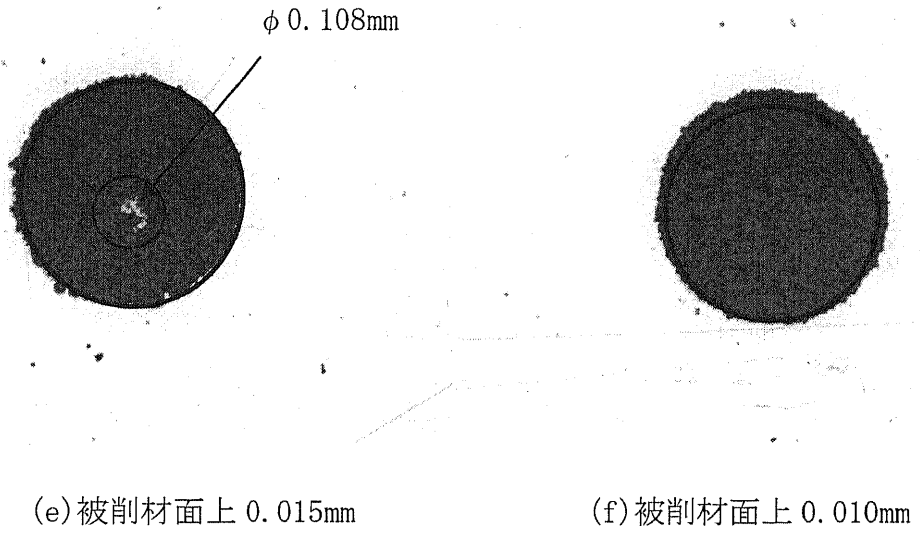


図 8.10 工具直径 1.0mm のときの加工痕(e)から(f)と加工後の工具

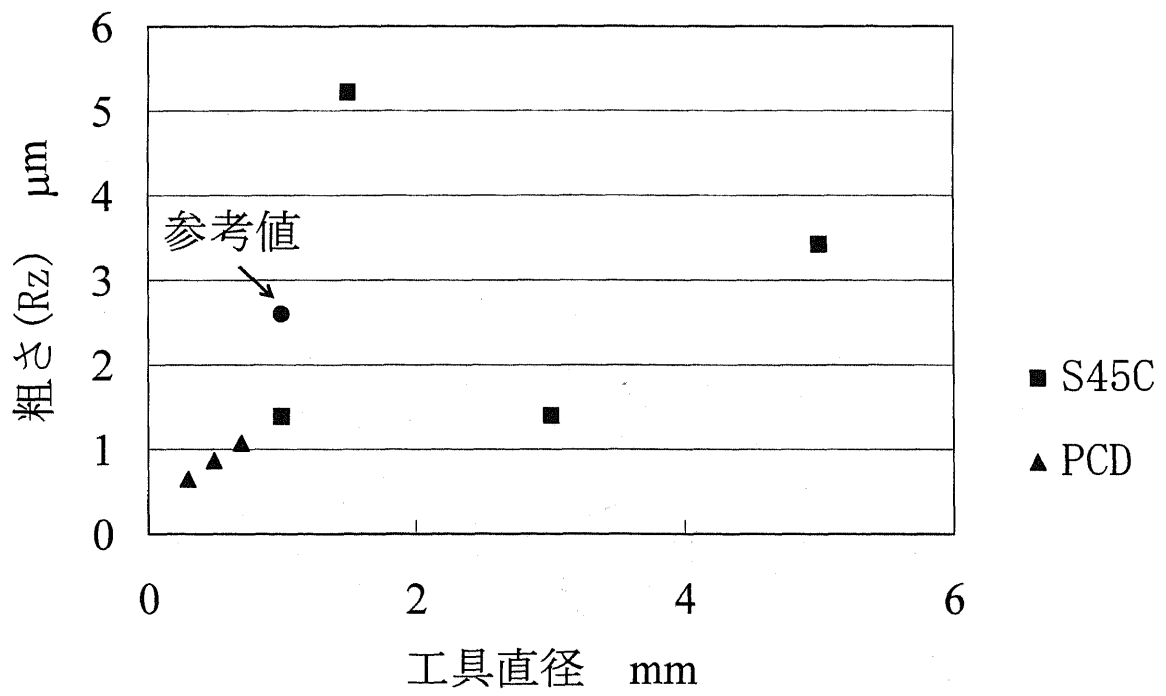


図 8.11 工具直径と加工穴底面の面粗さの関係

参考文献

- 1) 超音波工業会：はじめての超音波, 工業調査会, (2004).
- 2) 島川正憲：超音波工学(-理論と実際-), 工業調査会, (1975).
- 3) G.Nishimura and S.Simakawa：Ultrasonic Mechanical Machining (Part IV) Mainly in Relation to the Analysis of Machining Function and Method of Increasing Machining Efficiency, J. Faculty of Engg. Univ. of Tokyo, **25**, 4(1958)213.
- 4) N. M. Rostovtsev and G. I. Epifanov: Effect of the Mechanical Properties of Solid on Ultrasonic Machining, Soviet Physics-Doklady, **6**, 2(1961)153.
- 5) 斎藤修, 厨川常元, 庄司克雄：超音波型彫り加工における加工孔中心部の突起形成と工具・工作物間の砥粒の挙動 (超音波加工に関する研究, 第2報), 砥粒加工学会誌, **44**, 4(2000)169.
- 6) 厨川常元, 斎藤修, 庄司克雄：工具・工作物におけるキャビテーションの発生と対策 (超音波加工に関する研究, 第3報), 砥粒加工学会誌, **45**, 9(2001)34.

第9章 微細穴超音波加工への展望

本研究で得られた成果から、工具直径 0.3mm 以下の微細穴超音波加工の実現および高能率・高精度加工に役立てることができる指針を以下に述べる。

9.1 加工圧について

3.3章から、工具断面積が直径 1mm のときから 1/2, 1/4, 1/10 と小さくなると、最適加工圧は 2 倍, 4 倍, 10 倍となる。しかし、工具直径が 0.3mm で加工圧を 100MPa 以上にすると、工具先端へのスラリー供給が超音波加工に追いつかないことによる工具折損が生ずる。よって、工具直径が 0.3mm 以下では、従来通りの加工圧のみによる加工が適用できない。

工具先端の零設定をする必要があることからみて、加工圧は加工用重りで振動系が動く必要最低限にとどめる。その上で、本研究で用いた超音波加工機の特徴である加工切込み深さ制御（加工速度制御）機能を用いる。この機能は、予め単位時間当たりの加工切込み深さを設定できる。この一定の加工速度を維持し続ける機能を用いることにより、図 7.6 の加工圧と加工深さの関係のように、工具側面のクリアランスを一定に維持しながら超音波加工を施すことができる。

9.2 振動系について

微細穴超音波加工用工具は、その工具直径が小さいことにより、従来の超音波加工と異なる様々な現象が現れやすくなる。直径が小さいと、座屈による折損が容易に起こることから、また、工具製作の困難さも相まって、その加工に作用する部分の長さを長くすることができない。

さらに工具自身の曲げ振動共振周波数が、振動系の共振周波数に近づくことが考えられ、その場合、工具先端が従来の縦振動振幅以上の曲げ振動を発生し、加工前に工具が折損する。大きな曲げ振動を発生せずとも、この場合、超音波加工が全くと言っていいほど進まず、また加工穴が楕円または変形する。故に、工具長さは曲げ振動共振周波数を避けるようにする必要がある。

また、小径工具でもみられることだが、工具先端振幅が大きいと工具自身が斜め振動あるいは工具先端がループを描くような楕円振動を起こす場合がある。この明確な原因は不明であるが、振動振幅を小さくすることにより縦振動のみにおさまる場合がある。可能な限り縦振動のみの状態で加工することが、結果的に高能率加工につながる。

第4章で明らかになった PCD 工具と超硬シャンク部分の摩耗がみられるような工具では、加工速度は速くなったものの、任意にそのような形状を成形することは難しく、小径・微細穴加工用工具ではなおさらである。第5章の結果から明らかなように、高能率超音波加工を実現する理想的な工具形状として、加工に作用する部分は、先端変形のない平らであるものが望ましい。

9.3 スラリーについて

本研究で用いた砥粒は、 B_4C #600 であり、スラリーをポンプにて供給した。微細穴超音波加工になると、9.2でも述べたように、工具先端で縦振動以外の振動を発生する可能性がある。そこで、縦振動振幅を抑えることになるが、それに応じて使用する砥粒も粒径が小さいものを用いざるを得ない。目安としては、 B_4C #1000 ($4.5 \pm 0.5 \mu m$) または B_4C #1200 ($3 \pm 0.5 \mu m$) であろうと考える。

そのような砥粒を用いても、スラリー供給方法をポンプで供給しては、微細穴加工用工具において、図 4.8 で示したような摩耗状態を生じかねない。そこでポンプでスラリーを供給せずに、図 9.1 に示すように、工具および加工点をジャマ板で囲い、スラリーが工具周辺に滞留し続けることができるような状態が考えられる。この状態であれば、ポンピング作用により、十分に工具先端にスラリーを供給することができると思われる。さらに工具先端振幅以上、約 $10 \mu m$ 以下の範囲で振動系を上下に揺動させるとさらに効果的である。

また、スラリー温度は研究結果から言うまでもなく、加工点において $20^\circ C$ から $22^\circ C$ の状態を維持するようにする。

9.4 第9章の総括

第9章 微細穴超音波加工への展望をまとめると次のようになる。

微細穴超音波加工では、従来通りの加工圧のみによる加工が適用できない。加工圧は加工用重りで振動系が動く必要最低限にとどめる。その上で、本研究で用いた超音波加工機の特徴である加工速度制御機能を用いる。

微細穴超音波加工用工具は、工具自身の曲げ振動共振周波数が振動系の共振周波数に近づくことが考えられ、その場合、工具先端が従来の縦振動振幅以上の曲げ振動を発生し、加工前に工具が折損する。また、工具長さは曲げ振動共振周波数を避けるようにする必要がある。

工具先端振幅が大きいと工具自身が斜め振動あるいは工具先端がループを描くような楕円振動を起こす場合がある。振動振幅を小さくすることにより縦振動のみに治まる場合がある。可能な限り縦振動のみの状態で加工することが、結果的に高能率加工につながる。

微細穴超音波加工になると、縦振動振幅を抑えることになるが、それに応じて使用する砥粒も粒径が小さいものを用いざるを得ない。スラリー供給方法は、工具周辺に滞留し続けることができるような状態が考えられる。さらに工具先端振幅以上、約 $10 \mu m$ 以下の範囲で振動系を上下に揺動させるとさらに効果的である。

また、スラリー温度は研究結果から言うまでもなく、加工点において $20^\circ C$ から $22^\circ C$ の状態を維持するようにする。

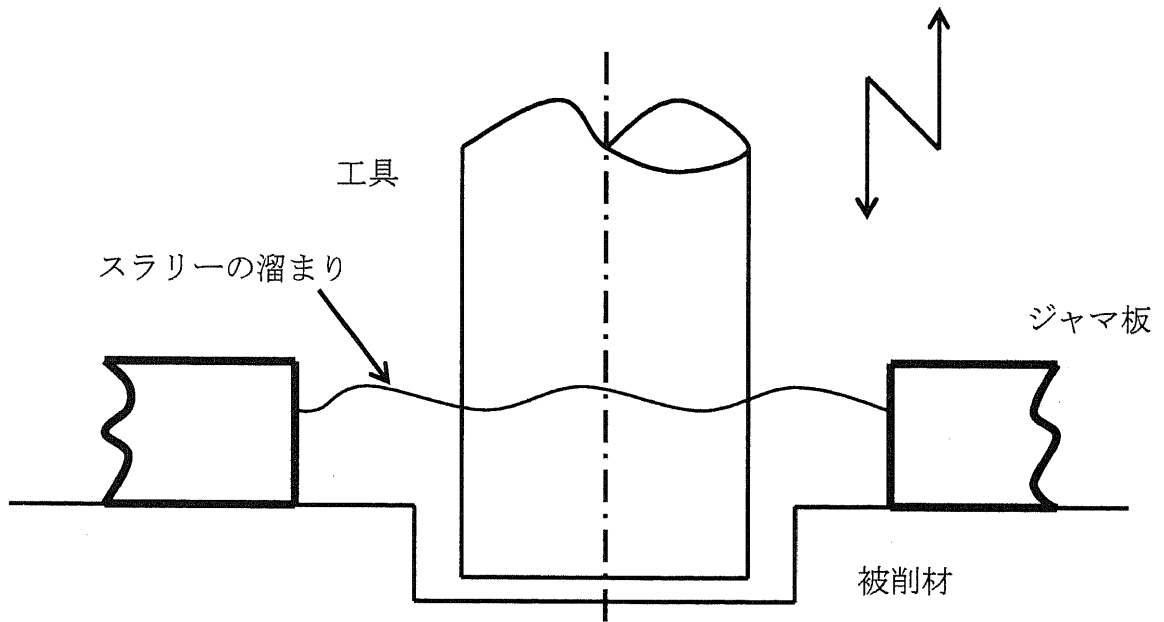


図 9.1 微細穴加工用工具を用いたときのスラリー供給について

第10章 結論

10.1 まとめ

本研究で得られた成果を各章ごとにまとめる。

第1章 緒言について

高精度化と高能率化および他の加工技術との差別化や高付加価値化を実現するため、問題点を提起し、研究に至った経緯を述べた。加工条件（加工圧、スラリー流速・温度）、工具直径、工具先端形状、工具材質等の超音波加工に影響を及ぼす要因と小径穴加工領域での超音波加工現象を明らかにすることを研究目的とする。

第2章 実験方法について

本研究に用いた超音波加工機の性能および特徴、レーザ変位計、スラリー温度管理・供給状態、PCD 工具、超音波加工用振動系、加工力測定用治具、圧力センサ自身の特性について説明した。形状測定に用いた測定機器、加工条件についても述べた。

第3章 加工圧の影響について

超音波加工では、加工圧の大小により加工速度が左右される。加工速度を最大にする最適加工圧が存在し、それはスラリー流速の影響を受け、他の工具直径においても同様であった。工具直径が小さくなると、加工圧の絶対値は小さくなっていくが、工具の単位面積あたりで考えると、加工圧は大きくなっていく。工具断面積が直径 1mm のときから 1/2, 1/4, 1/10 と小さくなると、最適加工圧は 2 倍, 4 倍, 10 倍となる。

第4章 スラリーの影響について

工具直径 1.0mm において、先端を研磨した工具では、スラリー流速 50m/min のときが最も加工速度が速い。摩耗が進んだ工具は、工具先端のエッジが丸みを帯びている。さらに、ダイヤモンド部分とシャンク（超硬）部分との接合部が摩耗し、くびれができている。工具先端を平らに研磨した工具に比べて、加工速度は 1.28 倍になる。

各工具直径において加工速度が最大となるスラリー流速が存在し、工具直径が小さくなると最適スラリー流速が遅くなる。スラリー温度を 15°C から上げていくと、粘度の低下により加工速度は速くなり、約 22°C で最大となる。最適加工圧における加工速度が最も速いのは 22°C のときで、15°C のときの 1.87 倍である。

第5章 工具先端形状の影響について

面取りをつけていない工具では、加工深さによらずほぼ一定の加工速度で加工できる。加工深さが深くなると、大きなチッピングが発生しやすい傾向にある。加工時間が長くなっても加工穴径はそれほど大きくなる。

面取り角度をつけた工具では加工速度が遅くなり、大きなチッピングが発生する。加工深さが深くなると加工時間は長くなる。すると工具側面において、出入りするスラリーの総量は増え、被削材と砥粒が接する時間が長くなり加工穴径は大きくなる。

第6章 工具材質別超音波加工特性について

超硬工具の場合、加工速さが最も速くなる最適加工圧は 7.4MPa であった。加工穴の断面形状から、1 穴目は工具先端のエッジの摩耗が少ないため、加工穴の底面は平面に近かった。加工穴数が増えるにしたがって工具先端の摩耗が進み、20 穴加工後では加工穴が先細りになる。

PCD 工具においては、加工圧の大小による工具長手方向の摩耗量の違いは超硬工具同様にほとんどみられないが、1 穴あたりの工具摩耗量は約 0.3 μm と超硬工具の約 1/77 であった。加工穴の断面形状から、加工穴底面は、エッジが多少丸みを帯びてはいるものの、超硬工具のときのように先端が先細りになるようなことはなかった。

第7章 加工力測定について

25kHz の周期で測定された山の部分は、振動系の超音波振動を正確に測定しており、加工力（被削材への衝撃力）が最大となっているところである。

加工力の最大値にも周期的変動がある。これは脆性破壊が一定の速さで継続して起こるのではないことを意味する。加工が停滞している加工停滞期と被削材が除去されている加工進行期がある。

全ての工具直径、被削材で共通することだが、加工終了時の加工力は、その工具直径における最大加工力の半分かそれ以下になる。

第8章 工具直下に発生するキャビテーションの影響について

工具直径 3.0mm 以上と工具直径 1.5mm 以下の間で、工具先端面でのキャビテーション気泡群の発生、スラリーの工具直下への流入状態が異なると考えられる。

工具直径 1.5mm, 1.0mm では、工具直下にはキャビテーション気泡群が発生していると思われるが、スラリーは工具外周部から 0.5mm 内側には供給されている。

工具直径が 5.0mm から 0.3mm までの加工穴底面の面粗さを測定したところ、工具直径が大きいときは、加工穴底面の粗さが小さくなる。工具直径 1.5mm のときには、キャビテーション気泡群の影響よりも、ポンピング作用によるスラリー循環の効果が上回り、面粗さの値が大きくなる。工具直径 1.0mm よりも小さいときには、ポンピング作用によるスラリー循環も悪さの影響があらわれ、加工面の面粗さが小さくなっていく。

第9章 微細穴超音波加工への展望について

微細穴超音波加工では、加工圧は加工用重りで振動系が動く必要最低限にとどめ、加工速さ制御機能を用いる。微細穴超音波加工用工具では、振動振幅を抑えて可能な限り縦振動のみの状態で加工する。使用する砥粒も粒径が小さいものを用い、スラリーが工具周辺に滞留し続けることができるような状態にする。また、振動系を上下に揺動させるとさらに効果的である。スラリー温度は加工点において 20 $^{\circ}\text{C}$ から 22 $^{\circ}\text{C}$ の状態を維持するようにする。

10.2 今後の研究課題

残された研究課題について述べる。

本研究では、可能な限り工具先端の平面部分の面積を確保する必要があると述べた。しかし、実際の加工現場においては、工具先端が変形しても加工できる場合がある。これは使用する砥粒と工具先端の振幅に関係があると思われる。この関係を明らかにすることで、工具摩耗の許容限界が把握できる。よって、工具先端研削修正に費やす時間の短縮や全工程中の工具交換頻度が低下すると思われる。

研究を進めていく上で最初に最適加工圧を特定した。その上で加工速度が最大となるスラリ流速を求めた。実際の超音波加工では、最適加工圧を中心に、ある範囲内の加工圧であれば充分加工できる。それに伴い、スラリ流速やその他の条件もある範囲が有効となるであろう。このように、ある程度の加工速度を確保できる超音波加工に適した条件の範囲を求めることも必要である。

加工圧の実験においても、最適加工圧とそのときに加工速度が最大となるスラリ流速で加工をおこなった。ある範囲で加工圧を変化させる、工具先端振幅を変化させる等の条件を変えた場合、加工力がどのように変化するかを調べる必要もある。これにより、上記内容の超音波加工に適した条件の範囲を求めることにも役立つであろう。

本研究の小径穴超音波加工では、工具直径0.3mmまでとしたが、それ以下の工具直径における高能率加工の条件、および加工現象を明らかにする必要がある。加工圧、加工速度、スラリ供給方法、揺動制御等未知なる部分がたくさん残っている。それらを一つひとつ明らかにすることで、微細穴超音波加工の実現につながる。

本研究で用いた被削材は、ソーダガラスおよび石英ガラスの2種類であった。しかし、社会から要求のある素材の種類はたくさんある。それらに対しての小径穴および微細穴超音波加工の高能率加工条件を明らかにする必要がある。

終章

本研究は、DNA 解析・たんぱく質解析等のバイオ関連分野、太陽電池・燃料電池等のエネルギー関連分野、繊維等の紡績分野、分析装置・制御装置等のエレクトロニクス分野などの我々日常的に接している分野におけるマイクロオーダーの微細穴超音波加工の高能率化に大いに役立つものである。

本研究で用いたレーザ変位計は、可視的に超音波加工現象を理解するのに役立つ。かつては、工具の切込み深さの値のみで加工量を認識していたが、レーザ変位計導入により、加工条件や加工環境が超音波加工中のわずかな加工速さ変化として現れた。この加工速さを制御することが、結果的に加工技術向上に大きな影響力を持つものと確信する。

従来の超音波加工において、作業者の経験とカンにより、ある範囲内を目安として、時々刻々と変化する加工深さに応じて加工用おもりにて加工圧を調整してきた。それは、小径穴超音波加工においても例外ではなかった。しかし今後は、本研究結果から、工具直径 1.0mm を基準にして、その工具断面積に応じて加工圧を変化させることが高能率加工につながるようになると思われる。

今までのスラリーの供給方法は、スラリーが加工に作用している工具に対して可能な限り均一に供給されている状態にするという極めて抽象的な表現をしてきた。研究成果から、工具周辺でのスラリーによる流線の発生状態を考慮に入れたスラリ流速に設定し、供給状態を維持させるという、具体的なスラリー供給方法が確立できると思われる。

摩耗した状態の工具を使用し続けると、加工時間が増加するばかりでなく、特にザグリ加工の場合はその加工形状への影響も大となる。また、スラリーの供給方法も考慮し、工具材質が鋼材の場合には、工具の一部分が極端に摩耗する状態を避けることも必要である。故に、その加工中の環境および加工後の工具形状には充分注意を払う必要がある。

加工力測定で用いた圧力センサは、超音波加工の本質を理解する一助となる。今までの超音波加工では、被削材内部にクラックを発生させ、複数のクラックで囲まれた領域で破砕が起こり、その部分を被削材から取り除く加工法であるという程度しかわからなかった。本研究から、内部にクラックが蓄積される期間と、破砕される期間が交互に現れるような場合と、クラックの蓄積と破砕がほぼ同時進行しているような場合の2種類の状況が混在していることがわかった。加工条件を変化させることによる加工停滞期の短縮を目指すことが、結果として高能率加工の実現につながることは明らかである。

以上のように、本研究成果は小径穴超音波加工のみならず、他の超音波加工の指針となり、さらには砥粒加工分野に寄与するところ大となる。他の学問分野でも小径穴・微細穴加工に関しては十分に活用されることを切に期待するものである。

本論文を構成する公表論文

- (1) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶, 山崎健司: 小径穴超音波加工に関する研究 (第1報: 種々の加工条件が加工速さに与える影響), 砥粒加工学会誌, 48, 6 (2004) 324.
- (2) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工に関する研究 (第2報: 工具小径化が加工速さに与える影響), 砥粒加工学会誌, 49, 5 (2005) 245.
- (3) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工に関する研究 (第3報: 工具材質の違いが加工特性に与える影響), 砥粒加工学会誌, 49, 5 (2005) 250.
- (4) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅: 小径穴超音波加工に関する研究 (第4報: キャビテーションと諸現象の影響について), 砥粒加工学会誌, (2005) 投稿中.
- (5) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 加藤光吉, 片岡征二: 小径穴超音波加工に関する研究 (第5報: ガラス材種による加工特性の変化), 砥粒加工学会誌, (2005) 投稿中.
- (6) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 加藤光吉, 片岡征二: 小径穴超音波加工に関する研究 (第6報: 共振周波数帯域における加工力の変動と加工特性との関係), 砥粒加工学会誌, (2005) 投稿中.

学会発表

- (1) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶, 山崎健司: 小径穴超音波加工における加工効率について, 2003年度砥粒加工学会学術講演論文集, (2003) 89.
- (2) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工におけるチップング生成過程について, 2003年度砥粒加工学会学術講演論文集, (2003) 85.
- (3) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 長谷川徳慶: 小径穴超音波加工における加工効率について (第2報), 2004年度砥粒加工学会学術講演論文集, (2004) 453.
- (4) 田中信一, 高木純一郎, 長谷川徳慶, 横沢毅: 小径穴加工用超音波振動系の研究について, 2004年度砥粒加工学会学術講演論文集, (2004) 457.
- (5) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅: 小径穴超音波加工における工具直下に発生するキャビテーションの影響について, 2005年度砥粒加工学会学術講演発表予定.
- (6) 田中信一, 高木純一郎, 横沢毅, 加藤幸吉, 片岡征二: 焼結ダイヤモンド工具を用いた超音波加工による脆性破壊現象の解明, 2005年度砥粒加工学会学術講演発表予定.

本論文に関する技術解説

- (1) 田中信一：NC 超音波加工機と微細加工の実際, ツールエンジニア, 46, 2(2005)
94.

本研究と関わりのある共同研究

平成 15, 16 年度 東京都立産業技術研究所共同開発研究報告書

(研究テーマ：マイクロ放電加工による微細工具の製作技術開発)

平成 15 年度 東京都立産業技術研究所共同開発研究報告書

(研究テーマ：高性能微細穴加工用超音波振動系の開発)

平成 16 年度 東京都立産業技術研究所共同開発研究報告書

(研究テーマ：微細穴加工用超音波振動系の高性能化)

その他報告書

平成 16 年度日本学術振興会科学研究費補助金 (奨励研究)

課題番号 16919073 課題報告書

謝辞

本論文は、2002年10月より2005年9月までの3年間におこなわれた小径穴超音波加工に関する研究成果をまとめたものである。

本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり、終始ご指導を賜りました横浜国立大学工学部 高木純一郎教授に心より深く感謝申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、ご指導を賜りました横浜国立大学 前川卓教授、高田一教授、眞田一志教授、三浦憲司教授ならびに梅澤修助教授の審査委員の先生各位に深く感謝申し上げます。

本研究、および学会発表において、適切にご指導および御経験談を賜りました元横浜国立大学講師 劉猛先生に深く感謝申し上げます。

本研究はそのほとんどが日本電子工業株式会社において遂行したものである。本研究を遂行できた環境および設備を与えていただき、また多大なる御理解・御協力をいただきました代表取締役 奥出顕造氏、技術取締役 楡井耕次氏をはじめ関係の皆様

に深く感謝申し上げます。また、共同研究者として、実験の補助をしていただきました山崎健司氏に感謝申し上げます。

本研究に取り組むきっかけや御助言・御指導、叱咤激励をいただきました小玉満氏に心より深く感謝申し上げます。

私が日本電子工業株式会社に入社して以来、超音波技術、計測技術、加工技術等の様々な分野にわたって助言および激励をいただきました東京都立産業技術研究所 横沢毅氏、東京都総務局 長谷川徳慶氏に心より深く感謝申し上げます。

また、共同研究および受託研究実施に御協力いただきました同研究所 光音計測技術グループ 加藤光吉氏、神田浩一氏、山形重雄氏、加工技術グループ 山崎実氏、鈴木岳美氏、城南地域中小企業振興センター 片岡征二氏、多摩中小企業振興センター 松田哲氏に深く感謝申し上げます。

日本学術振興会科学研究費補助金課題研究に御協力いただきました中条宣義氏に心より深く感謝申し上げます。

超音波応用加工分科会でご指導を賜りました日本工業大学 神雅彦助教授に心より深く感謝申し上げます。

最後に、本研究の遂行ならびに小径穴超音波加工に御協力いただきました多くの関係産業界の方々に感謝し、本論文の結びとします。

2005年9月

田中 信一