

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超音波振動を援用した難削材への小径穴あけ加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人 長野県テクノ財団

目次

- 第1章 研究開発の概要
 - 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - 1-2 研究体制
 - 1-3 成果概要
 - 1-4 当該研究開発の連絡窓口
- 第2章 超音波振動援用加工の原理
- 第3章 実験装置
 - 3-1 空気静圧・スクイズ動圧支持型超音波スピンドルの開発
 - 3-2 スピンドル移動およびワーク移動装置
 - 3-3 小型ワイヤー放電加工機
- 第4章 ドリル形状の超音波領域での振動モード
 - 4-1 市販ツイストドリルを超音波振動させたときの問題
 - 4-2 シャンク〜ドリル部の形状の検討
- 第5章 PCDドリル成形
 - 5-1 PCDドリルの成形装置
 - 5-2 ドリル成形手順
 - 5-3 振動モード撮影
- 第6章 PCDドリル(ϕ 1mm)を用いた実験
 - 6-1 実験方法・条件
 - 6-2 実験結果
- 第7章 PCDドリル(ϕ 0.3mm)を用いた実験
 - 7-1 実験方法・条件
 - 7-2 PCDドリルの機上製作
 - 7-3 内壁面
- 第8章 セラミックスへのドリル加工試験
- 第9章 各種難削材へのドリル加工試験
- 第10章 テフロンおよびCFRPへのドリル加工試験
- 第11章 超硬合金へのドリル加工試験
- 第12章 ガラスへのドリル加工試験
- 第13章 全体総括
 - 10-1 研究成果
 - 10-2 研究開発後の課題・事業化展開

第1章 研究開発の概要

従来では不可能であったセラミックスなどの各種難削材に対してサブミリサイズの小径穴を高精度ドリル加工する革新的技術を開発する。振動援用加工は切削抵抗を極限まで小さくできるが、市販ドリルでは加工精度を悪化させる振動モードが励起される。そこで、振動援用加工に特化して設計された小径ドリル工具を、振動状態が最適になるように逐次観測しながら工作機上で成形する新たな手法を提案し、小径ドリル加工を実現する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

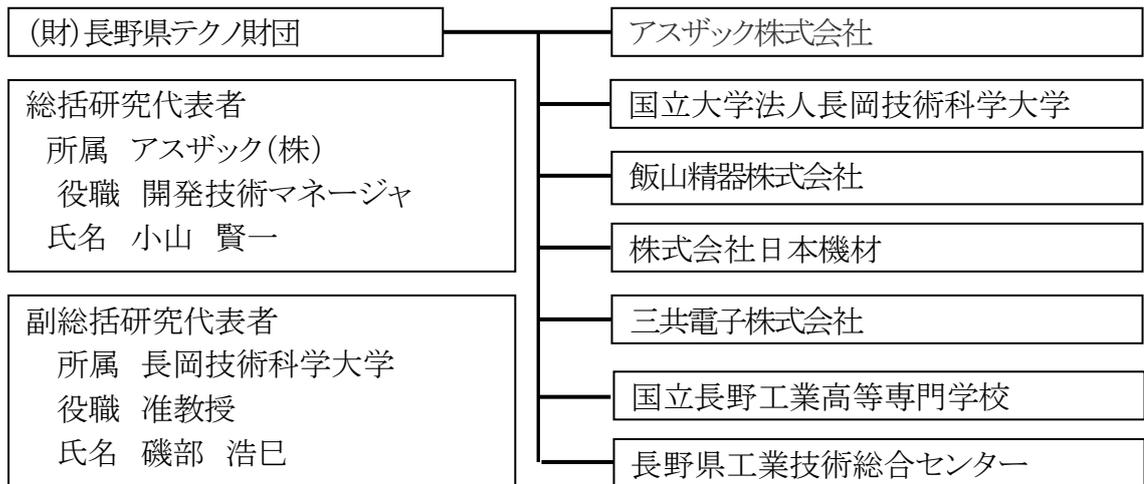
成長が期待されている燃料噴射ノズル、燃料電池、マイクロマシン、マイクロアクタなどの高機能小型部品の材料は、セラミックス、グラナイト、超硬合金、チタン、シリコン等やそれらのハイブリッド材料を含めて多岐に渡る。そのような難削材に高精度・高密度・多数穴で、かつ L/D 値(穴径に対する深さの比)の大きい傾斜穴やクロス穴を加工する技術が要求されている。さらに、次工程の省力化のためのバリレス加工も望まれている。サブミリメートル～数十マイクロメートルの小径穴を、短時間かつ廉価に加工する要求は、各種製造業において市場が広く、多くのニーズがある。特殊加工と呼ばれる放電加工やレーザー加工は、加工力が非常に小さいため、材料の影響をほとんど受けずに加工できる。しかし、加工時間が長いために加工コストも高く、また加工精度が悪いため二次的な仕上加工が必要な場合が多い。そのため、加工速度や加工精度が確立されている慣用的なドリル加工の適用が望まれている。しかし、小径ドリル加工に対応するため、ドリルの形状、材質やコーティングの改良や、切削速度を得るための高速スピンドル開発や新たな切削液供給方法の開発などにより加工特性が日々改善されているが、産業界の要求に応えるには至っていない。

本研究開発の目的は、従来では生産性に難があった放電加工やレーザー加工を中心に行われているセラミックス、ガラス、超硬合金、テフロン等などの各種難削材の微細穴加工に対して、工具を工作機上で成形できる超音波振動援用加工システムを開発することにより、低コストで生産性の高いドリル加工でサブミリサイズの高精度小径穴加工を実現することである。目標としては以下の内容とする。

- a) 穴直径 $\phi 0.2\text{mm}$ の微小穴を耐熱・高硬度材へ穿孔すること
- b) 穴径に対する深さの比率(L/D 値)が 10 以上であること
- c) 穴の入口面および出口面が穴の軸線に対して傾斜していても加工可能であること
- d) クロス穴における管内部のバリ処理工程を省略できる「バリレス切削」を実現すること
- e) 工具摩耗による加工精度低下や工具交換回数減らすための「工具摩耗を抑制」すること
- f) セラミックスに対して穴直径 $\phi 0.3\text{mm}$ 、加工精度 $\pm 10\ \mu\text{m}$ を多穴加工で実現すること
- g) 熱膨張率が非常に高いテフロン材において、加工熱を極限まで抑えた切削加工技術を開発すること
- h) 超硬合金金型に対して、より微細(コネクタ電極径 $\phi 0.2\text{mm}$ 程度)かつ高精度化を実現すること
- i) さらに高硬度な焼結ダイヤモンド金型を廉価かつ高精度に製作できる技術を開発すること
- j) 2～3 分程度で機上工具成形を行い、振れまわりは 0.005mm を目標値とする。
- k) 金型等に利用される焼入鋼に対して、穴数 50 個に対して寸法公差 $\pm 0.01\text{mm}$ を達成すること
- l) 工具寿命については 10 倍程度の長寿命化を達成目標とする。

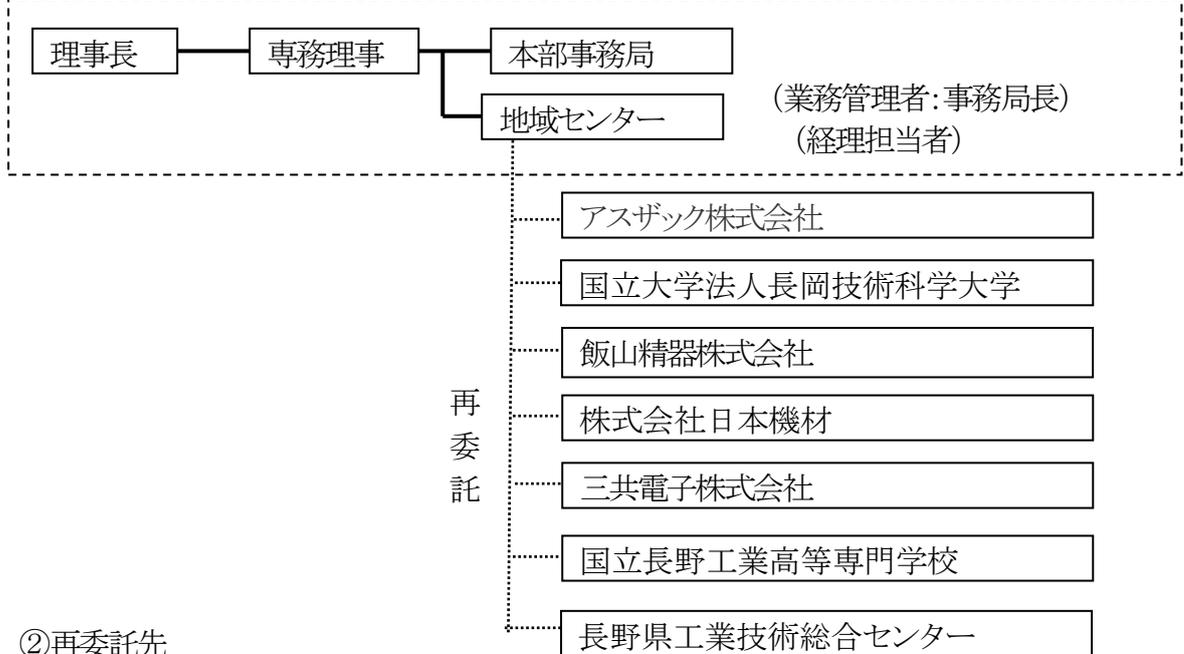
1-2 研究体制

1) 研究組織(全体)



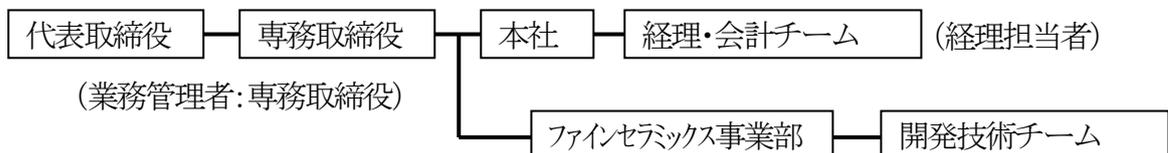
2) 管理体制

① 事業管理者〔財団法人長野県テクノ財団〕

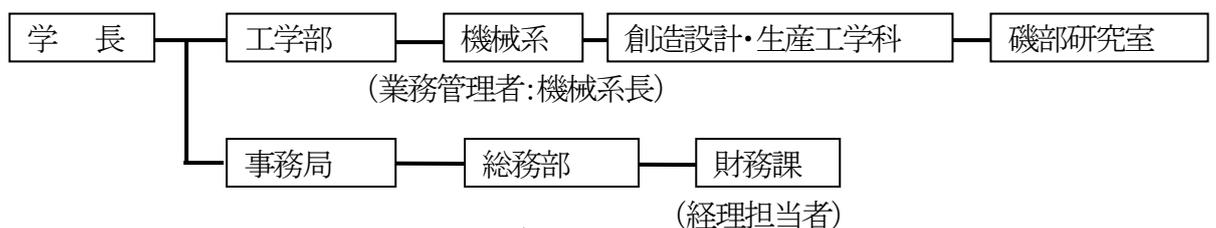


② 再委託先

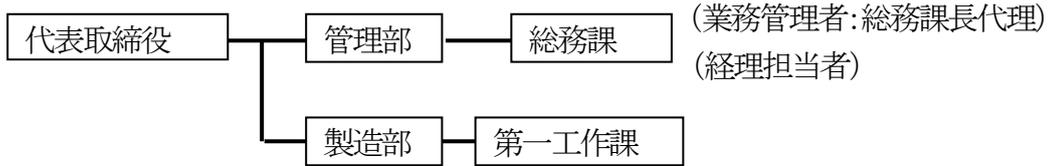
アスザック株式会社



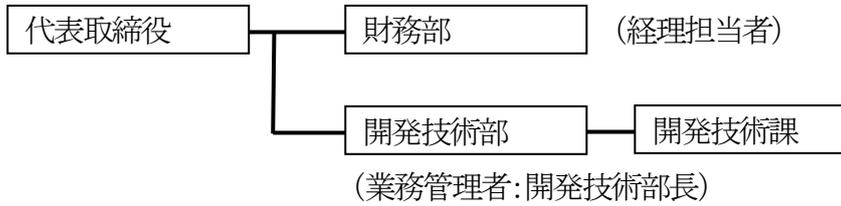
国立大学法人長岡技術科学大学



飯山精器株式会社



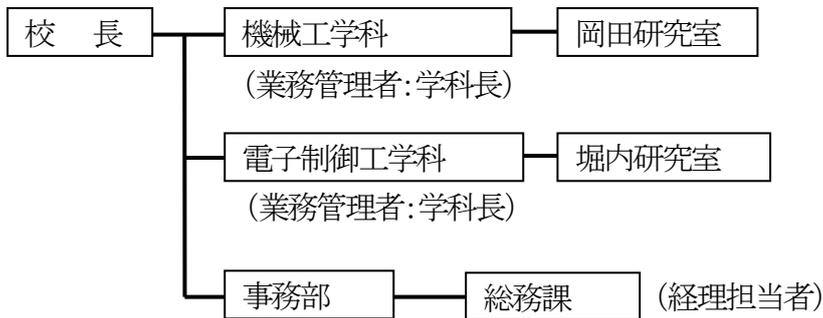
株式会社日本機材



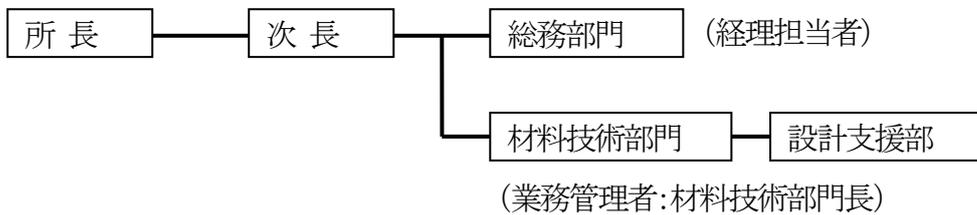
三共電子株式会社



国立長野工業高等専門学校



長野県工業技術総合センター



2) 管理員及び研究員

【管理法人】財団法人長野県テクノ財団

①管理員(プロジェクト管理員)

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
塚田 章芳	善光寺ハレー地域センター事務局長	⑤
山極 佳年	善光寺ハレー地域センター テクノコーディネータ	⑤
坪井 開	善光寺ハレー地域センター コーディネータ	⑤

【再委託先】

②研究員

アスザック株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
小山 賢一	ファインセラミックス事業部 開発技術チームマネージャ	①～④
宮下 忠久	ファインセラミックス事業部 開発技術チームシニアリーダ	①～④
湯本かおり	ファインセラミックス事業部 開発技術チーム	①～④
宮崎 静雄	ファインセラミックス事業部 開発技術チーム	①～④
上原 啓二	ファインセラミックス事業部 開発技術チーム	①～④

国立大学法人長岡技術科学大学

氏名	所属・役職	実施内容
磯部 浩巳	工学部 創造設計・生産工学科 准教授	①～④

飯山精器株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
寺坂 唯史	代表取締役	①, ③, ④
轟 敬一	製造部長兼第一工作課長	③, ④

株式会社日本機材

氏名	所属・役職	実施内容
飯島 貴一	開発技術部 開発技術課 課長	①, ③, ④

三共電子株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
村松 博光	製造技術課長	①, ③, ④
金田 雅樹	製造技術課	①, ③, ④

国立長野工業高等専門学校

氏名	所属・役職	実施内容
堀内 富雄	電子制御工学科 教授	①～④
岡田 学	機械工学科 准教授	②, ③

長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容
小杉 俊	材料技術部門 設計支援部 研究員	①, ②, ④
風間 武	材料技術部門 設計支援部 研究員	①, ②, ④
八木橋 展生	材料技術部門 設計支援部 技師	①, ②, ④

3) 他からの指導・協力者

研究推進委員会名簿

氏名	所属・役職	備考
小山 賢一	アスザック株式会社 ファインセラミックス事業部 開発技術チームマネージャ	委PL
磯部 浩巳	国立大学法人長岡技術科学大学 工学部 創造設計・生産工学科 准教授	SL
寺坂 唯史	飯山精器株式会社 代表取締役	委
飯島 貴一	株式会社日本機材 開発技術部 開発技術課 課長	委
村松 博光	三共電子株式会社 製造技術課 課長	委
堀内 富雄 岡田 学	国立長野工業高等専門学校 電子制御工学科 教授 国立長野工業高等専門学校 機械工学科 准教授	
小杉 俊	長野県工業技術総合センター 材料技術部門 設計支援部 研究員	
塚田 章芳	財団法人長野県テクノ財団 善光寺バレー地域センター 事務局長	
山極 佳年	財団法人長野県テクノ財団 善光寺バレー地域センター テクノコーディネーター	
坪井 開	財団法人長野県テクノ財団 善光寺バレー地域センター コーディネーター	

アドバイザー

戸井 清水	信越富士通株式会社 執行役員	
高橋 浩	株式会社IHIシバウラ 研究開発センター長 理事	

1-3 成果概要

本研究開発は長岡技術科学大学磯部研究室の技術シーズである超音波振動援用加工技術をベースに産(4社)学(2校)官(1機関)が協力して、次の4項目の開発に取り組み、以下の成果を出した。なお、各項目ごとの内容は巻末第13章全体総括に整理してある。

①. 機上成形方法の開発

長岡技科大の現有機の1軸NC位置決め装置を利用し、本研究に必要な装置・機材の設計・手配し、研究実施場所であるアスザック(株)に納入・設置を短期間に完了した。

機上成形については第3章に示す専用の放電加工装置を導入し、第5章に示すドリル成形試験を実施し、0.3-1.2mmのPCDドリルにおいて、その可能性を示した。また振動解析は第4章に示すごとく実施され、有効な基礎データとして利用した。

なお、工具補正手法の開発については、台金の成形で十分な仕様を満たす方法を確立できたため、実施せず。

②. 超音波振動援用加工に適した工具の開発

超音波振動援用ドリル加工に特化して、本加工手法に適した工具形状を開発した。シミュレーションによって求めた形状のドリルを作成し、高速度カメラによって縦振動モードが支配的であることが確認できた。しかし、事業期間内では、様々な工具を製作、実験することができず、最適化は今後の課題となる。

③. 高精度加工システムの構築

目標仕様値を満足する超音波加工装置及び計測機器を導入し、放電加工装置とリンクし、工作機械上での機上成形が可能であることを確認した。しかし超音波スピンドルの納期遅れや、放電加工装置が機上に常設できないことなどから、期間内での機上成形を用いた加工試験の回数が限定され、自動加工に必要な寿命試験は実施できなかった。

④. 難削材への適用可能試験

第1段階として、第7章に示す機上成形したPCDドリル($\phi 0.3$)を用いた快削材料での穴加工試験を実施し、切りくず特性、加工負荷など加工特性が把握できた。

第2段階では各メンバーが目標とした難削材への微細穴加工を実施したが、期間の都合上機上成形による自前ドリルでの試験はできず、市販のドリルを用いた垂直穴加工において超音波振動援用加工の慣用加工に対する優位性を確認する試験のみとなった。内容は第8章～第12章に示すが、第8章セラミックスでは $\phi 0.15\text{mm}$ 穴加工、第9章特殊金属など各種難削材では $\phi 0.1\text{mm}$ 、 $L/D=10$ 穴加工、第10章テフロン樹脂・CFRPでは $\phi 0.2\text{mm}$ 穴加工、第11章超硬合金では $\phi 0.3\text{mm}$ 穴加工、第12章ガラスでは $\phi 0.2\text{mm}$ 穴加工をそれぞれ実施し、加工性や穴形状などそれぞれに有用性が確認された。

以上より、当初計画のごとく位置決め装置の多軸化などの充実を図り、本研究を進めれば、それぞれに掲げた目標値は充分達成でき、市場の要求に合致した高精度で安価な微細穴加工法の実用化を確信できる結果を得た。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

所属:(財)長野県テクノ財団 善光寺バレー地域センター

氏名:テクノコーディネータ 山極 佳年

TEL 026-225-6650 FAX 026-225-6711

E-mail yamagiwa@tech.or.jp

第2章 超音波振動援用加工の原理

超音波振動援用加工とは、工具あるいはワークに超音波強制振動を加えながら行う加工である。工具が振動することで工具とワークは接触・非接触を繰り返し、断続的な加工となる。この接触の瞬間に発生する衝撃エネルギーによって加工が行われるため、高硬度脆性材料を加工する事に適している。超音波振動援用切削のメカニズムはまだ完全には解明されていない¹⁾。ドリル加工においては超音波振動を軸方向に作用させる方法とねじり方向に作用させる方法、それらの複合振動を用いる方法の3種類があり、共通して以下のような特徴がある。

- ・切削抵抗の低減効果²⁾
- ・軸方向力の低減効果⁵⁾
- ・穴形状精度の向上²⁾
- ・工具寿命の増加²⁾
- ・切りくず排出の円滑化³⁾
- ・ばり発生の抑制効果⁷⁾
- ・本来不可能な斜面や曲面への加工を可能にする効果⁶⁾

本実験で用いる手法はドリル軸方向に超音波振動を作用させる方法であり、その概略図を図 2-1 に示す。ドリル刃先はスピンドルによる回転と超音波振動により被削材と一定の間隔で接触を繰り返すことになり、断続的で衝撃力による加工が行われる。この振動方向においては、切削力低減効果、加工精度向上効果、切削油剤の潤滑・冷却促進効果などが挙げられる。この振動方向では工具-ワーク間に周期的な隙間が生じるため、加工液が流入しやすくなる。

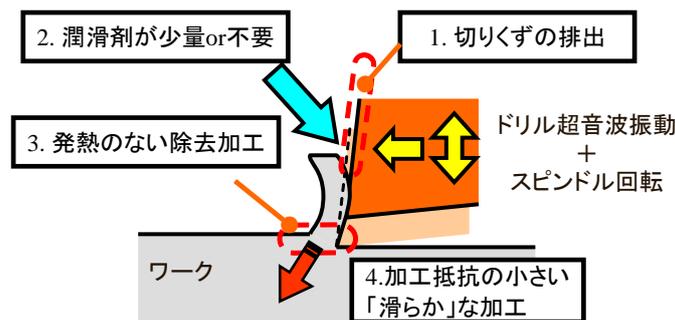


Fig. 2-1 超音波加工現象

参考文献

- 1) 隈部享一郎: 精密加工 振動切削 —基礎と応用—, 実教出版, 1979.
- 2) 鬼鞍宏猷, 大西修, 馮金海, 神田敏和, 森田貴博: 超音波振動が小径穴の加工精度に及ぼす効果, 精密工学会誌 62(5), 676-680, 19960505 (ISSN 09120289) (社団法人精密工学会).
- 3) 鬼鞍宏猷, 大西修: 超音波振動小径穴加工における切削機構, 精密工学会誌 64(11), 1633-1637, 19981105 (ISSN 09120289) (社団法人精密工学会).
- 4) 竹山秀彦: ばりの抑制を目的とする振動穴あけに関する研究, 精密工学会誌 59(10), 1719-1993 (社団法人精密工学会).
- 5) 金原由喜照, 三好壮太, 坂本泰弘: 27kHz 捩り振動による超音波振動切削, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 99(657), 39-46, 20000228 (ISSN 09135685) (電子情報通信学会/社団法人電子情報通信学会).
- 6) 大西修, 鬼鞍宏猷: 傾斜面への微小径穴加工における超音波振動の効果, 精密工学会誌 69(9), 1337-1341, 20030905 (ISSN 09120289) (社団法人精密工学会).
- 7) 竹山秀彦: ばりの抑制を目的とする振動穴あけに関する研究, 精密工学会誌 59(10), 1719-1993 (社団法人精密工学会).

第3章 実験装置

3-1 空気静圧・スクイズ動圧支持型超音波スピンドルの開発

超音波振動援用加工用スピンドルにおいては、主軸自身の超音波振動を妨げることなく、主軸を回転支持する必要がある。装置仕様について以下に列挙する。

- (1) 共振周波数 40kHzで製作されたエアータボエア軸受けスピンドルに超音波共振器を組み込むこと。
- (2) 超音波振動の周波数は 40kHz とし、安定発振が可能であること。
- (3) 超音波発振状態は加工負荷に伴って、発振状態を自動的に調整すること。
- (4) 超音波の振動振幅について、ダイヤルにて調整が可能なこと
- (5) 発振状態を目視できるようにインジケータを装備すること
- (6) 発振周波数を目視できるようにインジケータを装備すること
- (7) テスト発振モードを有して、安定発振を確認できること

さらに、特筆すべき特性値を以下に列挙する。

定格回転数	20,000rpm
静的振れまわり	0.6 μ m
ラジアル剛性	3.5N/ μ m
スラスト剛性	13N/ μ m

3-2 スピンドル移動およびワーク移動装置

超音波スピンドルをZ軸方向に移動させる機構は、内径精密加工専用機(倉敷機械 KIP-300)であり、ラムを特注してスピンドルを搭載する。また、ワークの微小移動については、Z軸自動ステージを用いる。この移動機構の仕様を表3-1に示す。Z軸自動ステージの仕様を表3-2に示す。この結果、スピンドルに取り付けたドリル工具を超音波振動させると、工具の回転運動と軸方向の超音波振動を重畳させながら、ドリルをワークに近づけ、さらに加工を進めることができる。実験機器概略図を図3-1に示す。

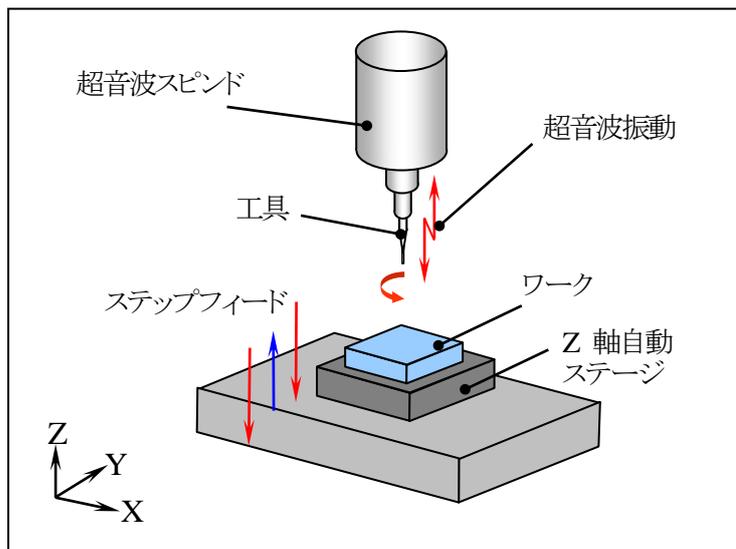


Fig. 3-1 ドリル加工装置構成

Table 3-2 Z軸移動機構の仕様

Corporation		倉敷機械株式会社
Device No.		KIP-300H
Stroke	Z	300 mm
Feed rate		5~10000 mm/min

Table 3-4 Z 軸自動ステージ

Corporation		中央精機株式会社
Device No.		ALV-102-HP
Stroke	Z	0~20mm
Table length × width		120 × 120 mm
Feed rate		~5mm/sec
Resolution		0.001mm
Repeat accuracy		±0.0008mm
Withstand load		98N
Motor		PH544-B

3—3 小型ワイヤー放電加工機

工具成形に使用する放電加工機械は、前述の Z 軸移動装置のテーブル上に設置できる。2 軸の NC ステージとワイヤーヘッドのマニュアル回転機構を有している。各軸のストロークは 15mm であるため、約 12×12mm までの範囲にあるドリルを机上成形できる。ワイヤー放電加工機の仕様を表 3-6 に示す。

Table 3-6 放電加工装置の仕様

Stroke	Y	15mm
	Z	15 mm
Range of motion Y × Z		12 × 12 mm
Feed rate		~10mm/sec
Resolution		0.001mm
Wire feed rate		~1mm/min

第4章 ドリル形状の超音波領域での振動モード

4-1 市販ツイストドリルを超音波振動させたときの問題

市販の小径ドリルで超音波振動援用加工を行った場合、加工した穴の開口部でバリ・ダレが発生し、工具寿命も低下する現象が見られた。この原因を追究するために、FEM による解析(図 4-1)を行ったところ、工具の曲げ振動が支配的であることがわかった。さらに、高速度カメラにより振動状態を撮影したところ、図 4-2 に示すように、軸方向へ振幅 2 μ m で振動しているのに対して、半径方向へは 13 μ m もの振動が確認された。工具が曲げ振動すると、穴開口部にバリ・ダレが発生し、工具寿命も著しく低下してしまう。そのため、超音波振動援用ドリル加工において、軸方向のみに振動(縦振動)することが非常に重要である。そこで、縦振動モードが支配的な工具形状を

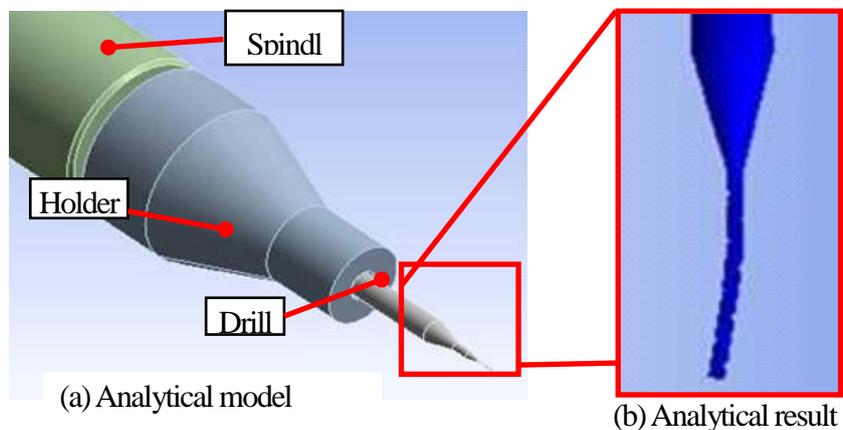


Fig. 4-1 市販工具の振動モード解析結果

FEM ソフト(ANSYS)によって周波数応答解析した。解析は、刃先根元からシャンク部分までの形状と、工具ホルダ先端からの突きだし長さを変化させて行った。解析に使用するドリル刃先は簡略化するために、丸棒とした。表 4-1 に解析条件, 表 4-2 に材料特性, 図 4-3 に解析の概要を示す。

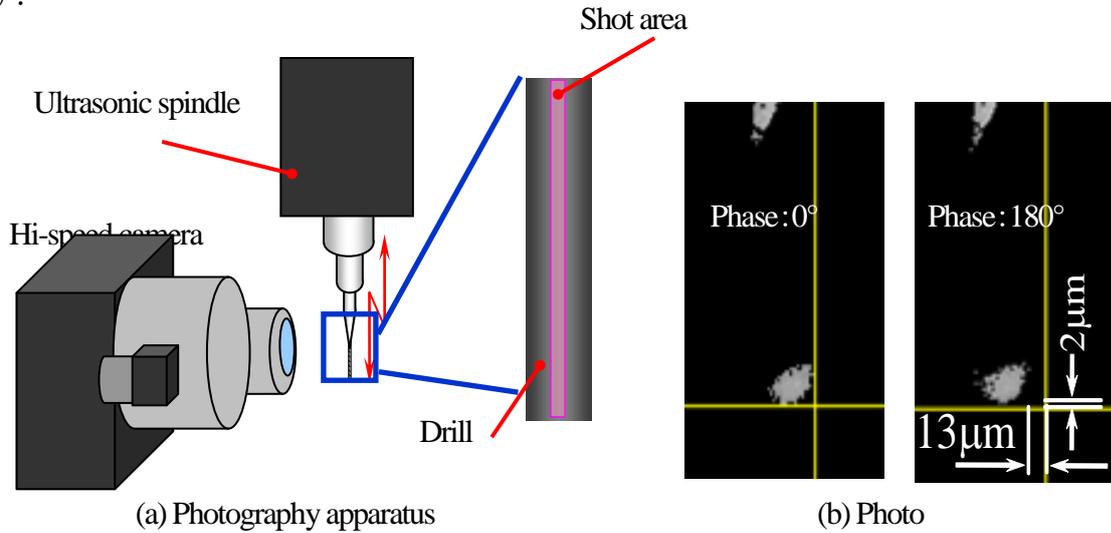


Fig. 4-2 市販工具の振動モードの高速度カメラ撮影

Table 4-1 Analysis condition

Analysis range	55~65kHz
Calculating resolution	0.5 kHz

Table 4-2 Material property

	Spindle	Holder	Drill
Material	structural steel	SUS304	carbide
Young's modulus E GPa	80	197	618
Density ρ kg/m ³	4690	800	14800
Poisson's ratio	0.33	0.3	0.2
elements size	0.002	0.002	0.0009

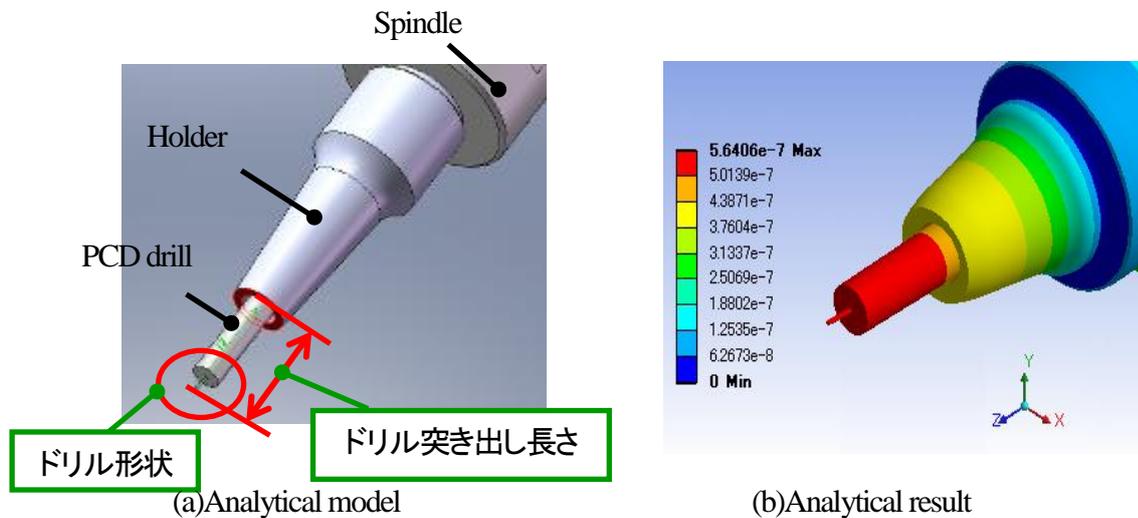


Fig. 4-3 解析モデル

4-2 シャンク〜ドリル部の形状の検討

本節では、シャンクから切刃根元までの形状を変え、突きだし長さなどの他の条件は変えずに周波数応答解析した。

図 4-4 にドリル形状の解析モデルを示す。解析した形状は、ステップ形状(図 4-4(a)), 円弧形状(図 4-4(b)), コニカル形状(図 4-4(c))の 3 種類で行った。ステップ形状はシャンク部分から切刃根元までが段状になっており、円弧形状は曲面、コニカル形状は傾斜面になっている形状である。

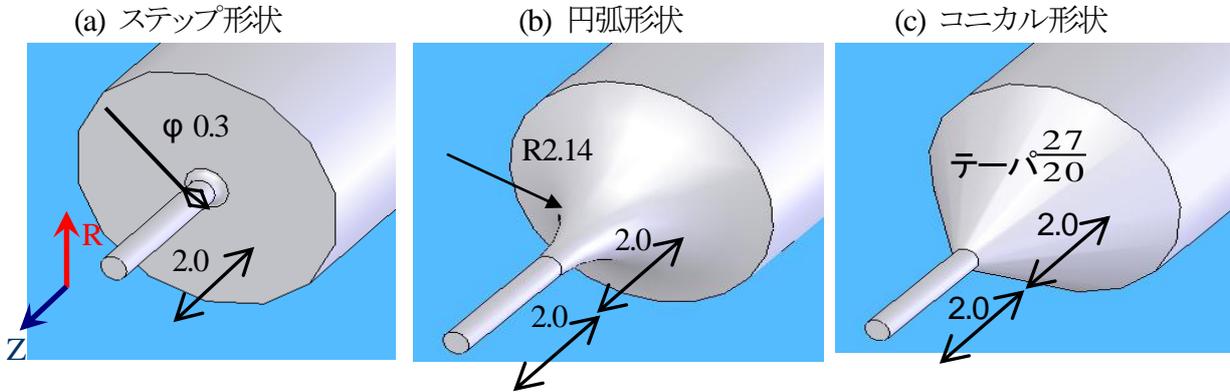


Fig. 4-4 振動解析モデル

図 4-5 に各形状の Z 軸方向と半径方向の解析結果を示す。全ての形状において、スピンドルの共振周波数である 60kHz で共振していることがわかる。だが、コニカル形状では、他の形状より半径方向の変位が大きく、58kHz, 61.5kHz で共振しており、61.5kHz では Z 軸方向への変位より半径方向の変位の方が大きく、約 0.16 μm も変位している。円弧形状は、半径方向の変位も小さいが、ステップ形状に比べて Z 軸の変位が少ない。これらのことより、ドリル形状は Z 軸方向の変位が大きく、半径方向の変位が小さいステップ形状に決定する。

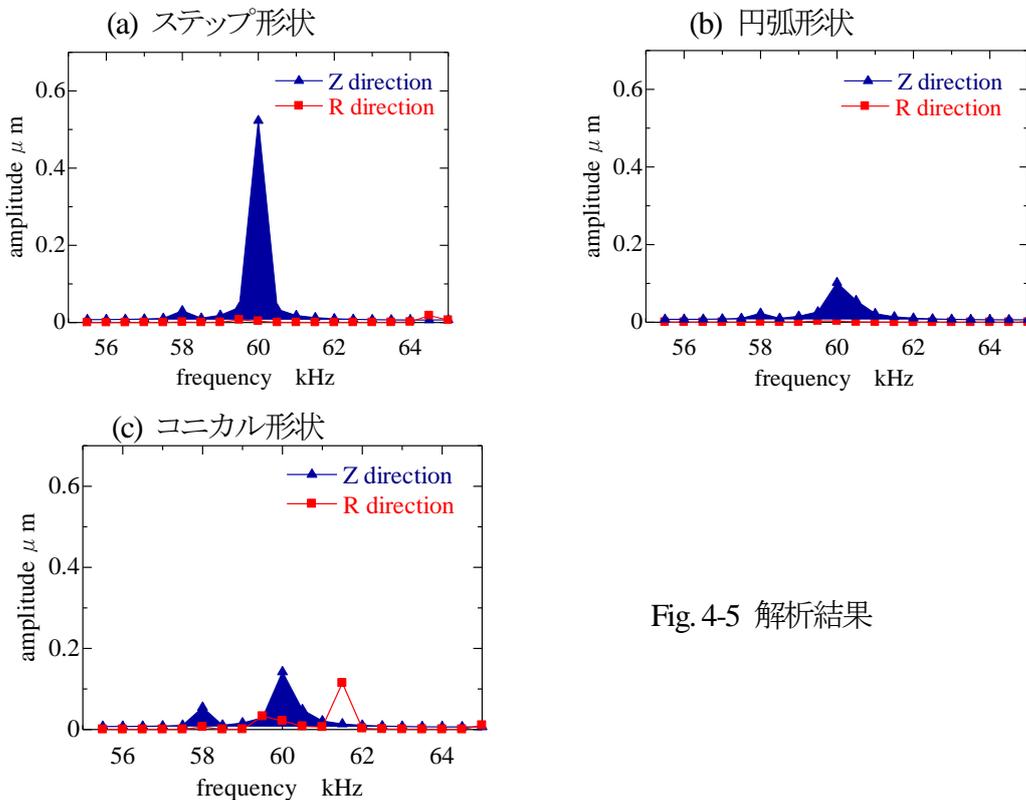


Fig. 4-5 解析結果

第5章 PCD ドリル成形

5-1 PCDドリルの成形装置

PCDドリルは、超硬合金軸に PCD をロウ付けしたブランクドリルから成形する。超硬合金はヤング率が約 600Gpa(参考:鋼は 210GPa)であり、剛性が高い。したがって、小径かつ長尺工具であっても、加工中のたわみを抑制できる。さらに、PCD は熱伝導率、耐磨耗性、耐チップング性、硬度が高く、工具寿命が長い。工具材質の選定と放電加工による工具成形試験を行った。PCD は絶縁体であるので、一般には放電加工は困難である。また、工具径が細くなると、超硬軸と PCD とのロウ付け部の強度が必要である。両者の特性を懸案して、導入した放電加工装置で加工可能な PCD が選定された。本事業では、工作機械スピンドルに設置したブランクドリルを機上に設置したワイヤー径 30 μ m の小型ワイヤー加工機によって、一枚刃ドリル形状へ成形する(注:市販のドリルを用いることも可能なシステムである)。成形の際には、放電によって発生するノイズによって工作機械が誤動作するのを避けるために、主電源を落とした状態で行う。装置全体の概要図を図 5-1 に示す。ワイヤー電極は、NC 制御によって、Y 方向と Z 方向の二次元平面内を位置決めできる。また、ワイヤーヘッドは、Y 軸回りにマニュアルで傾けることができる。さらに、工具台がねは、回転装置によって割り出しが可能である。この機構を使うことで、ドリル外周部を放電加工することで工具外周を加工できる。

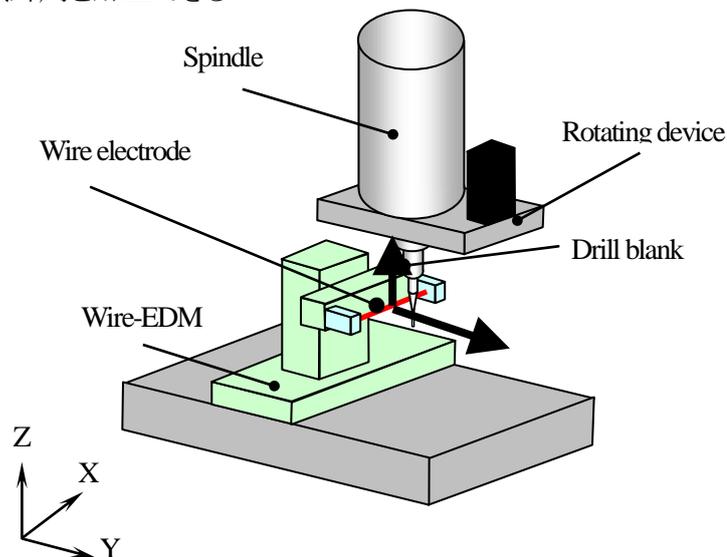


Fig. 5-1 工具成形加工における装置設定

5-2 ドリル成形手順

本事業では、一枚刃ストレートドリルを図 5-2 の手順で成形する。超音波振動を援用することで、切りくずが微細化するため、切りくずの排出が容易となるので、ツイストドリルの特徴であるねじれ溝を設けていない。成形した PCD ドリル写真を図 5-3, 5-4 に示す。

1. すくい面の創成

まず初めに、ドリルブランクを半月上にするために、ドリル先端の PCD 部分から放電を開始し、Z 軸方向へ上がる。シャンク部分まで移動した後、Y 軸方向へ移動し、すくい面の加工を終了する。先端の PCD 部分から加工を開始するのは、PCD と超硬の接合部分に力を与えないようにするためである。

2.切刃創成

すくい面を成形した後回転装置で工具を半時計周りに 90° 回転させ、ドリルの逃げと切刃を作成して一枚刃にする。

3.逃げ面創成

切刃を成形した後、回転装置で工具を半時計周りに 90° 回転させ、ドリルの逃げ面を作成する。

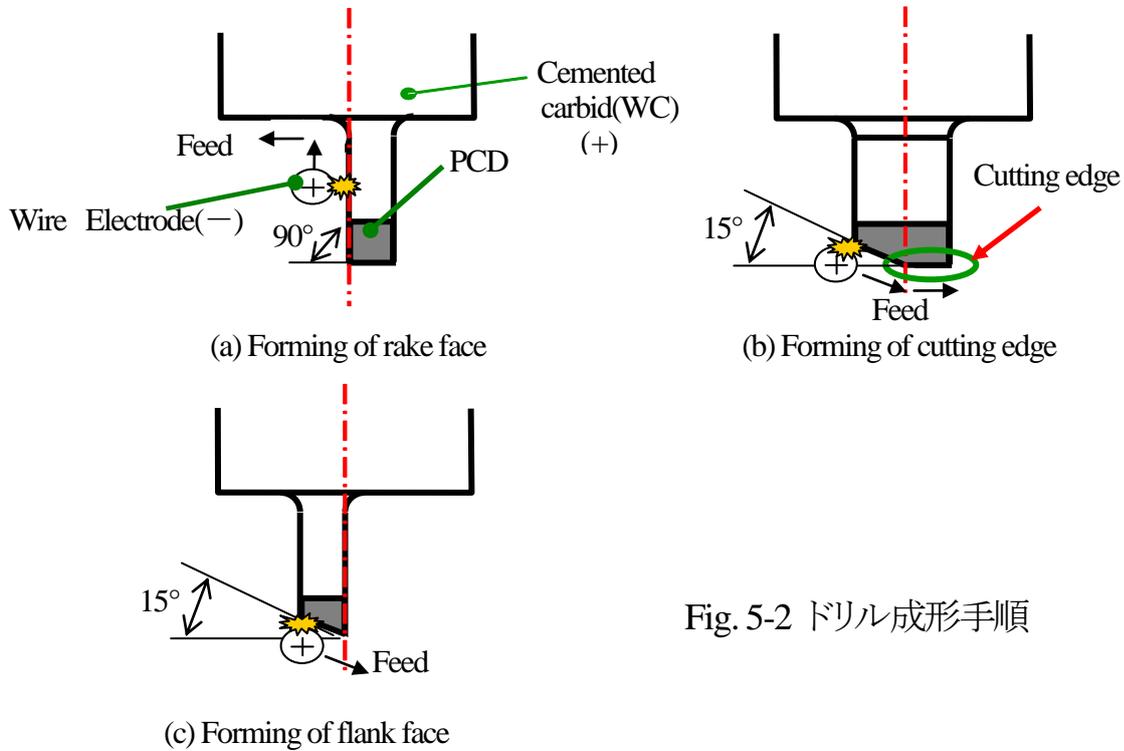


Fig. 5-2 ドリル成形手順

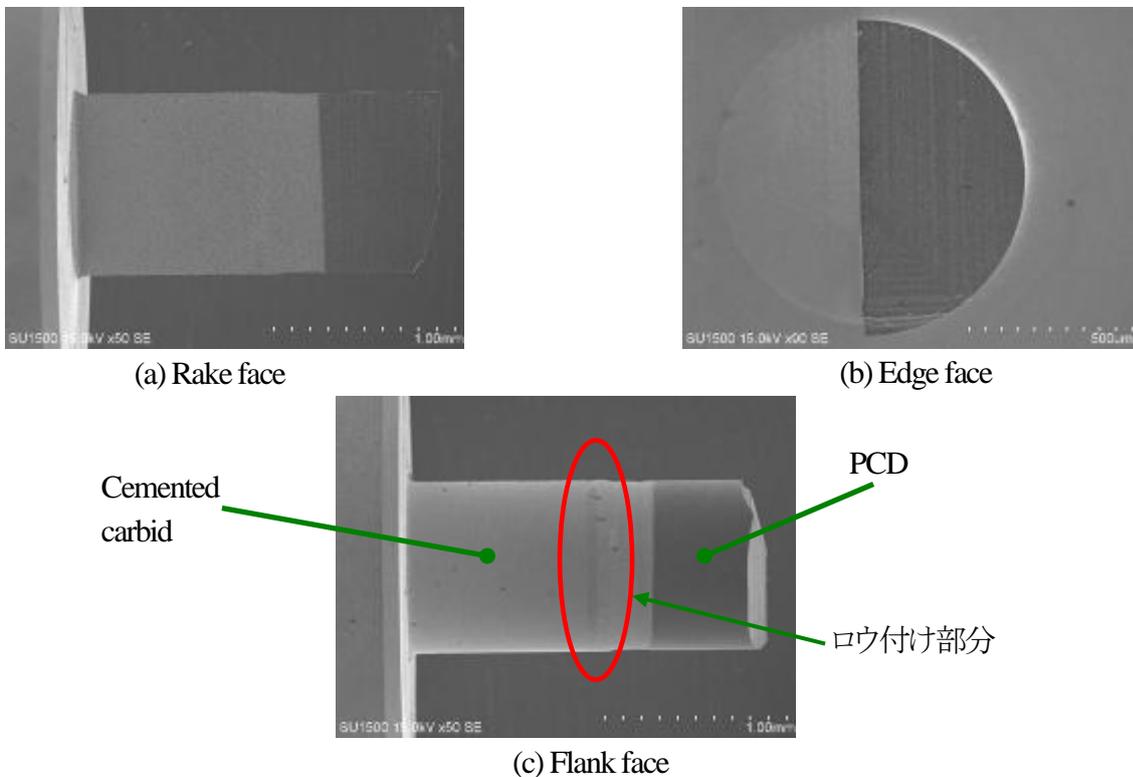


Fig. 5-3 成形されたドリル (φ 1mm)

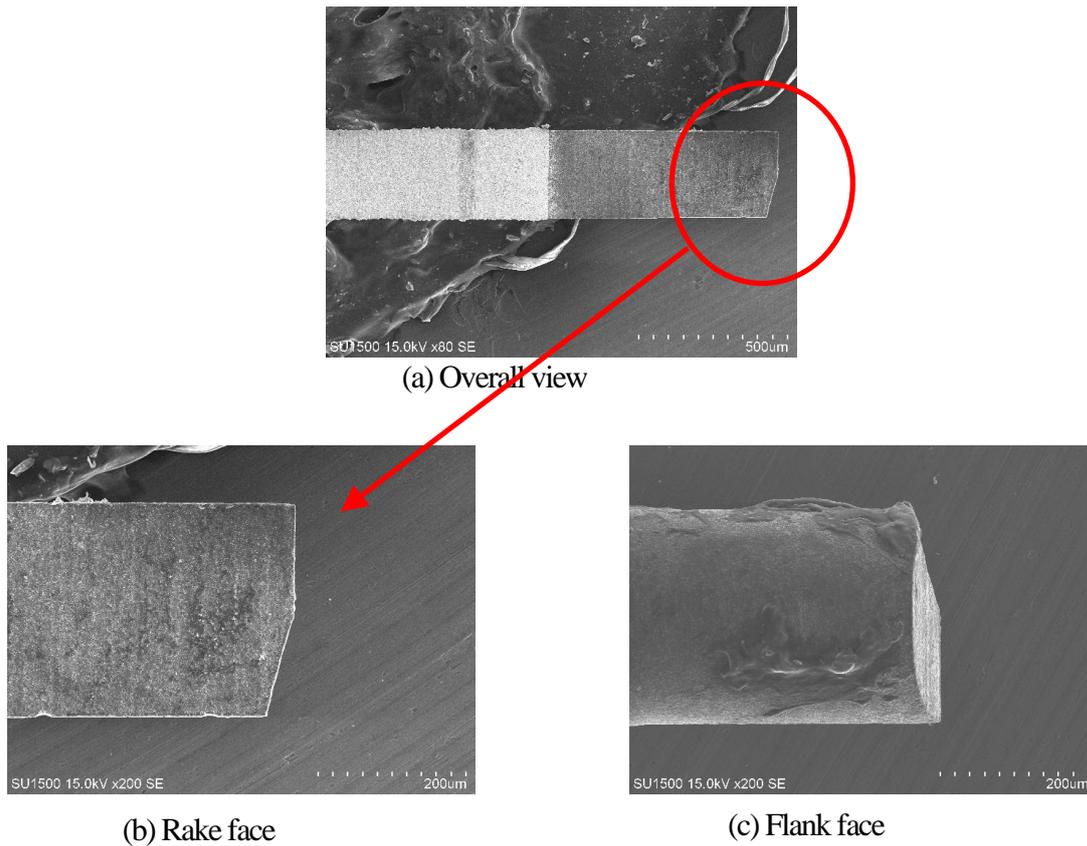


Fig. 5-4 成形されたドリル ($\phi 0.3\text{mm}$)

5-3 振動モード撮影

超音波振動援用ドリル加工において、振動モードは加工に大きな影響を与える。振動モードにおいて、縦振動が支配的ならば超音波振動の効果が得られるが、曲げ振動が支配的な場合は、穴形状や工具寿命に悪影響を及ぼす。そのため、PCDドリルが縦振動モードで振動しているか確認しておく必要がある。工具先端の振動振幅撮影は、高速度カメラで行う。図 5-5 に振動振幅撮影の概要を、表 5-2 に測定装置の仕様を、撮影条件を表 5-3 に示す。なお、本撮影条件では、1ピクセル $1\mu\text{m}$ に相当する。

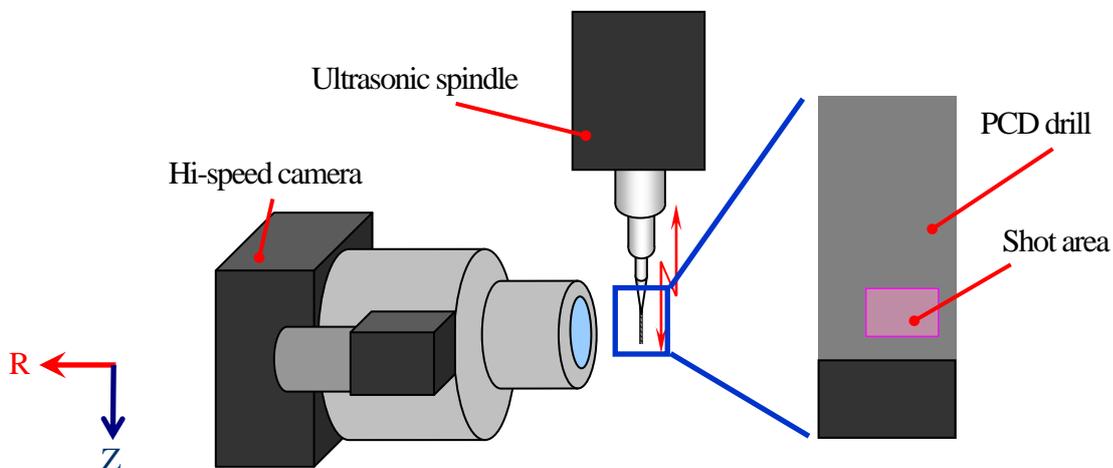


Fig. 5-6 撮影状況

Table 5-2 高速度カメラの仕様

Corporation	PHOTRON Limited
Device No.	FASTCAM SA4
Sensor	CMOS image sensor
Maximum resolution	1024 × 1024 pixel
Shutter	Electronic shutter 1 μsec ~ 1/fps
The color tone of the image	12 bits of the monochrome
Maximum frame rate	500,000 fps
Memory size	8Gbytes
Digital interface	IEEE1394

振動振幅 1μm において、ドリルのすくい面, 側面, 背面の振動状態を撮影した. その結果、全ての撮影結果から、ドリルは半径方向へは振動せずに Z 軸方向へ 1μm (1 ピクセル) のみに振動することがわかった. これより、自作した PCD ドリルは縦振動モードが支配的で、片振幅 1μm であることがわかった.

Table 5-3 Specifications of Picturing condition

Frame rate	10,000fps
Resolution	512×512
Shutter speed	1/ frame sec
Lens magnification	1000
Light source	Metal halide lamp

第6章 PCD ドリル(φ1mm)を用いた実験

6-1 実験方法・条件

ワイヤー放電によって成形した PCD ドリルが、ドリルとして穴加工の切削抵抗に耐えられなければ、縦振動モードが支配的な形状に成形しても意味が無い。ここでは、穴加工が可能であるかを検証すると共に、市販の超硬ツイストドリルとの超音波振動の有無による比較実験を行った。直径 1mm 未満の市販の超硬ツイストドリルでは超音波振動を付加した時に曲げ振動モードが励起してしまう。そのため、市販の超硬ツイストドリルでも振動状態が良好な φ1mm で実験を行った。ここでドリル創成方法は前章同様のワイヤー放電で行う。使用した工具は工具直径 1mm, 首下長さ 2mm, 粒度 0.5μm の PCD ドリルと工具直径 1mm, 首下長さ 5mm の超硬ツイストドリルである。使用した工具を図 6-1 に、放電条件を表 6-1 にそれぞれ示す。放電条件は材質によって異なる。そのため、放電創成する際に、超硬(WC)と PCD で条件を変更する必要がある。実験は、60kHz タイプの超音波スピンドルを用いて動力計の上に被削材を設置して、振動振幅の調整アンプを出力 10%にして行った。実験概略図を図 6-2 に、加工条件を表 6-2 に、被削材を表 6-3 に示す。ここでは、加工特性の比較を行うので、加工が比較的容易な A5052 を被削材とした。

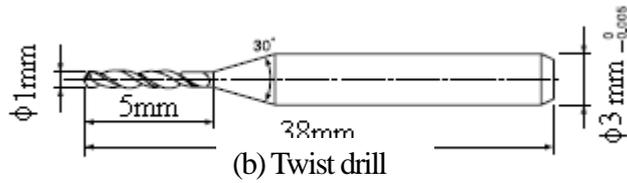
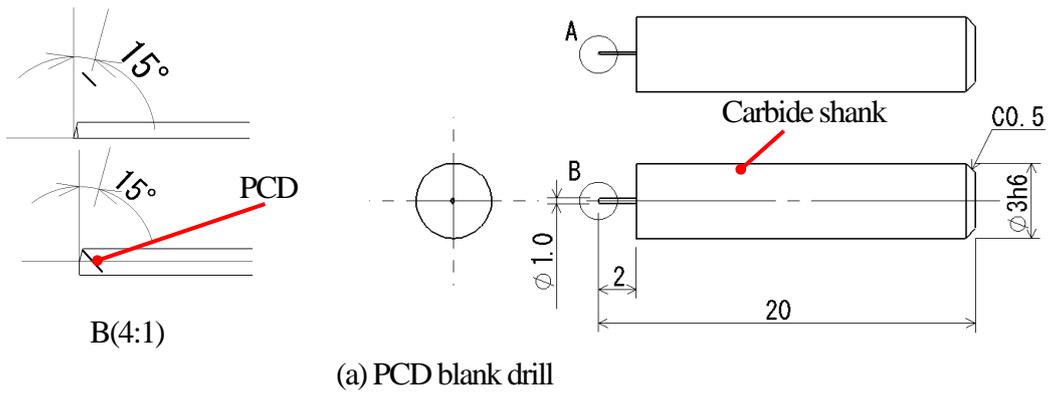


Fig. 6-1 Tool illustration

Table 6-1 Conditions of WEDM

Blank drill	WC	PCD
Tension [N]	0.2	
WS [mm/min]	510	
Feed [mm/min]	0.24	0.17
Ton:Toff [ms]	50:50	70:70
Wire diameter[mm]	30	
Dielectric fluid	purified water	

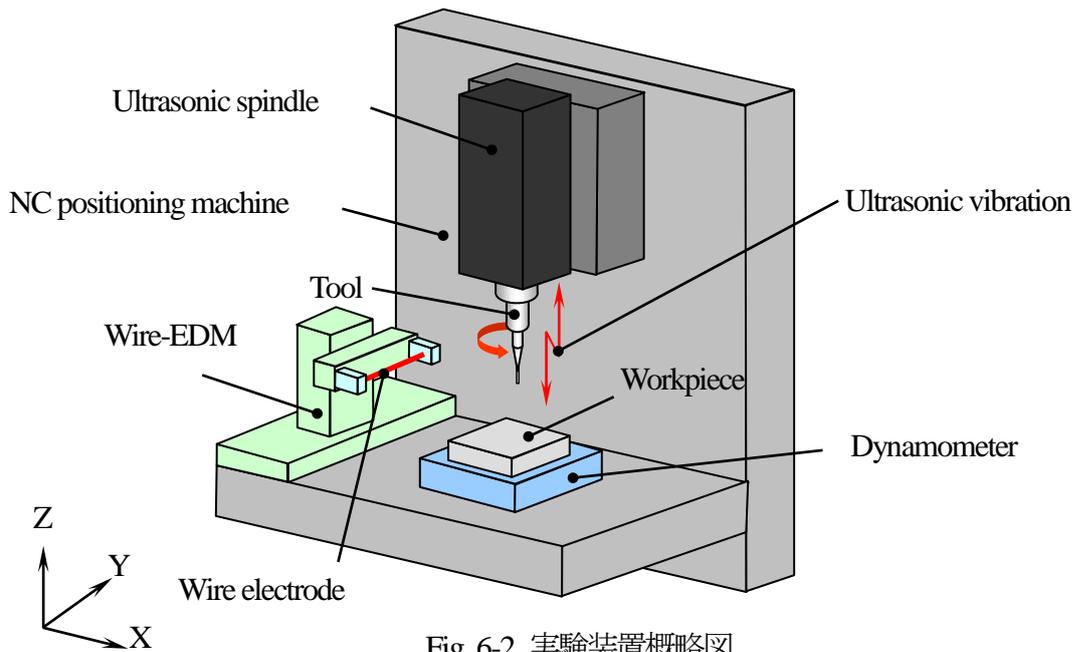


Table 6-2 加工条件

Tool	$\phi 1.0\text{mm}$ / PCD (0.5 μm) $\phi 1.0\text{mm}$ / WC(UNION TOOL)
Ultrasonic vibration	60 kHz / 0.2 μm
Spindle speed	2000 min^{-1}
Feed rate	1 mm/min
Hole depth	0.5 mm
Step feed	5 μm
Chip load	0.5 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Coolant	Air blow
Workpiece	A5052P

Table 6-3 被削材 A5052P の特性

Chemical composition

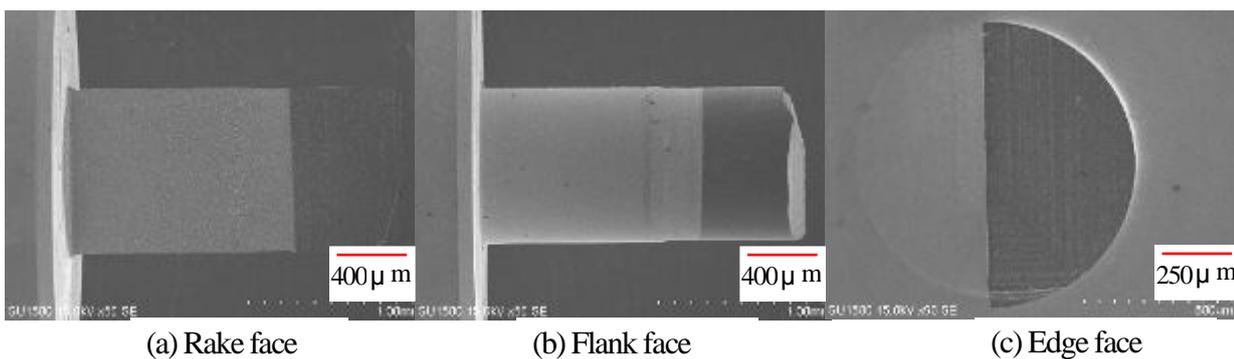
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.25 %	0.40 %	0.10 %	0.10 %	2.2- 2.8 %	0.15- 0.35 %	0.10 %	-	残

Mechanical property

Ratio	Young's module	Strength	Hardness
2.68 g/cm^3	70.6 GPa	120 MPa	58HB

6-2 実験結果

使用したPCDドリルのSEM写真を図6-3に示す。ワイヤー放電成形によりブランクドリルを一枚刃のドリル形状にした。各ドリルでの加工した穴の全体図を図6-4に、各結果を下記に示す。

Fig. 6-3 製作したPCDドリル($\phi 1$)のSEM像

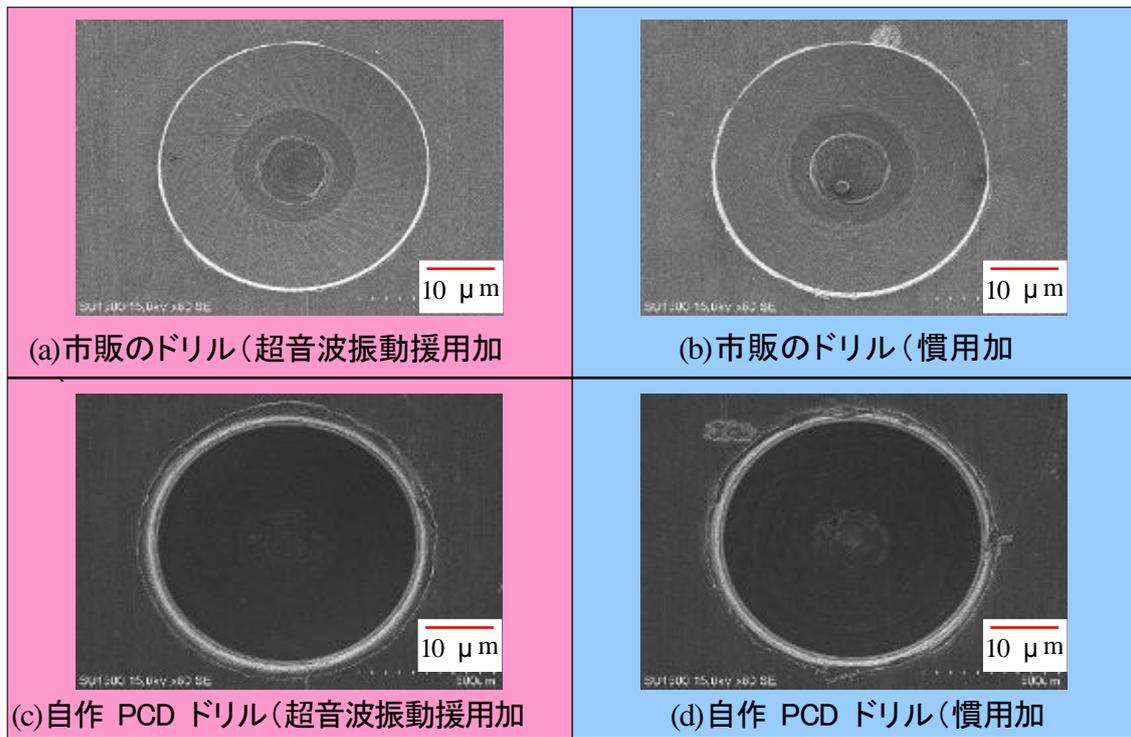


Fig. 6-4 加工された穴の SEM 像(上面)

図 6-5(c) , (d)より, 自作 PCD ドリルにおいて超音波振動の有無に関係なく綺麗な内壁面が得ることができた. 市販のツイストドリルでは曲げ振動が支配的なため, 超音波振動を援用した場合に切刃が内壁面を傷つけ, 図 6-5(a)のような周期的な凸凹ができたと考えられる. 一方, 自作 PCD ドリルにおいては, 縦振動が支配的であるために, 上記のような内壁面の表面粗さの悪化は見られないことがわかった.

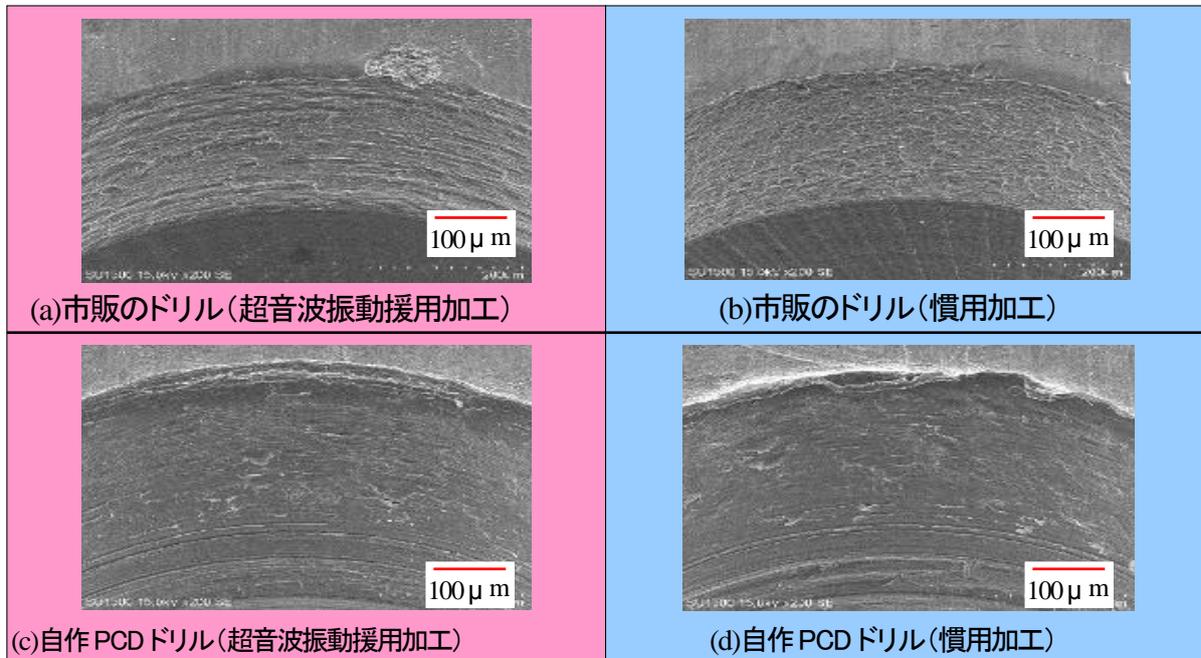


Fig. 6-5 加工した穴の内壁面の SEM 像

図 6-6 よりに採取した切りくずの SEM 写真像を示す. 超音波振動を援用した加工において, ドリル形状には無関係に切りくずの微細化が確認できた. だが, 自作 PCD ドリルは市販のツイストドリルに比べて, 切りくずの微細化が小さい. ツイストドリルは二枚刃なのに対して自作 PCD ドリルは一枚刃なため, 一回転当たりに刃が加工する切りくず厚さがツイストドリルの2倍になり, 自作 PCD ドリルの切りくず厚さがツイストドリルより厚くなり, 切りくずが細かくならなかったと考えられる.

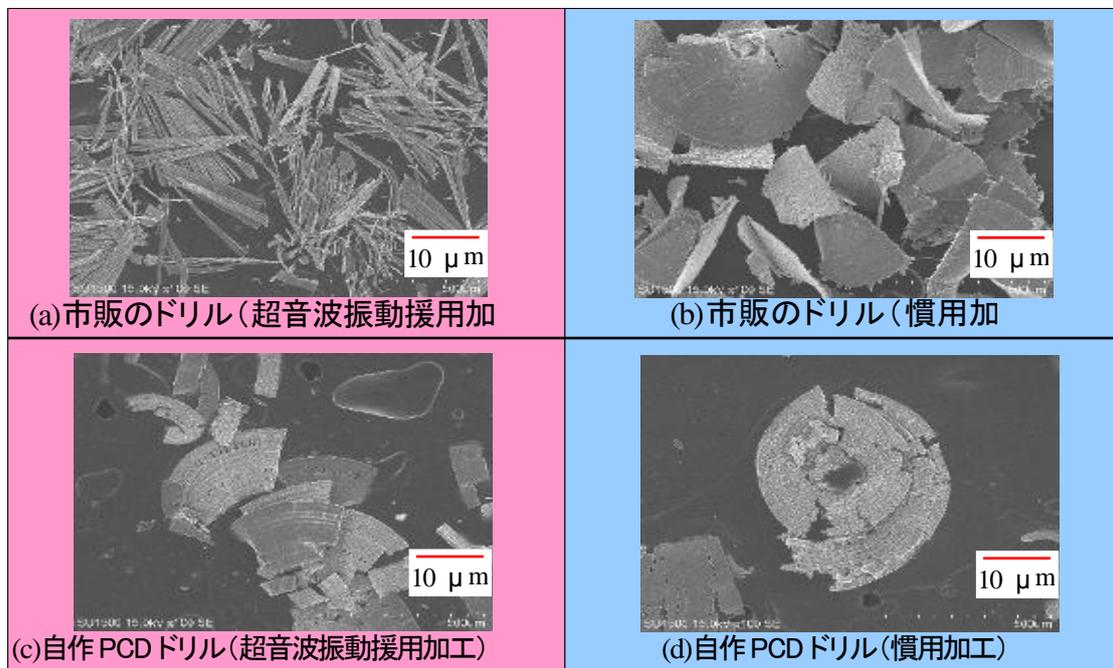


Fig. 6-6 切りくずの SEM 写真像

第7章 PCD ドリル($\phi 0.3\text{mm}$)を用いた実験

7-1 実験方法・条件

実験は, 40kHz タイプの超音波スピンドルを用いて行った. 測定には, 動力計, トルク計の順に

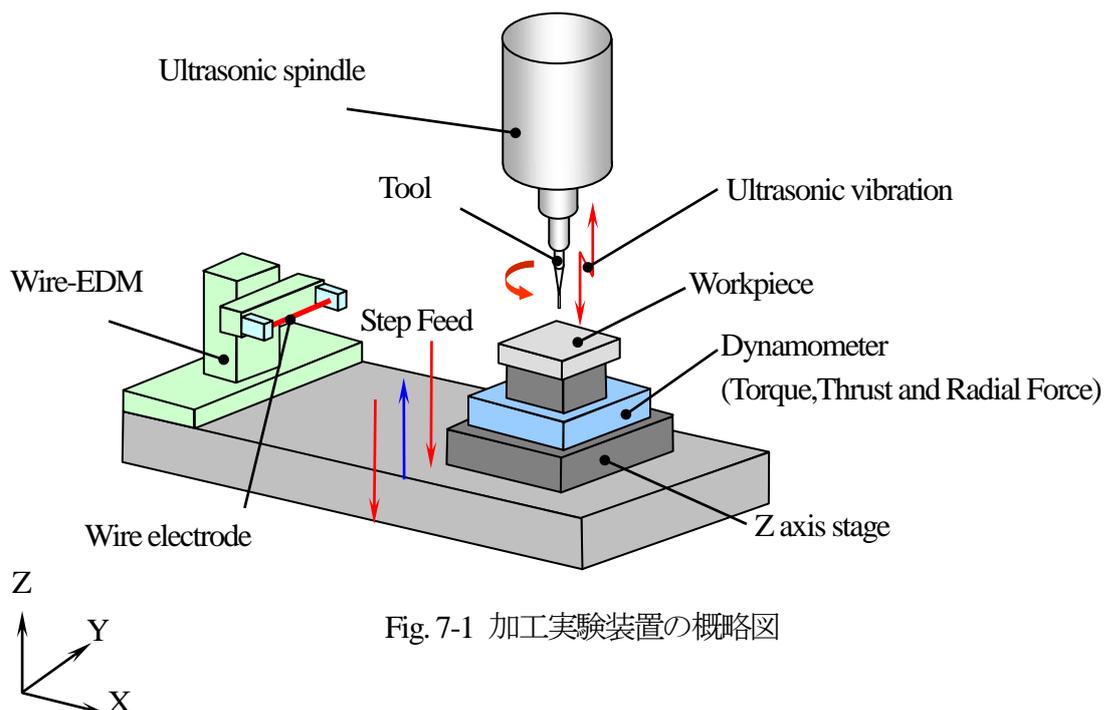


Fig. 7-1 加工実験装置の概略図

設置して、その上に被削材を固定して行った。実験概略図を図 7-1 に、加工条件を表 7-1 に示す。加工には、Z 軸ステージをステップ送りさせて行う。ステップ送りとは、切り込みと逃げを繰り返しながら穴を加工する方法で、切り込みを行った後に必ず穴から逃げる。設置して、その上に被削材を固定して行った。実験概略図を図 7-1 に、加工条件を表 7-1 に示

Table 7-1 加工条件

Tool	$\phi 0.3\text{mm} / \text{PCD}(0.5\mu\text{m})$
Ultrasonic vibration	40 kHz / $1\mu\text{m}$
Spindle speed	20000 min^{-1}
Feed rate	1 mm/min
Hole depth	0.5 mm
Step feed	$10\mu\text{m}$
Chip load	$0.05\mu\text{m}/\text{rev}$
Coolant	Air blow
Workpiece	A5052P

7-2 PCDドリルの機上製作

前章同様にワイヤー放電成形によりブランクドリルを一枚刃のドリル形状にした。作成した PCDドリル($\phi 0.3$)の SEM 写真を図 7-2 に示す。 $\phi 0.3$ のストレート片刃ドリル工具であっても、本手法で機上成形が可能であった。

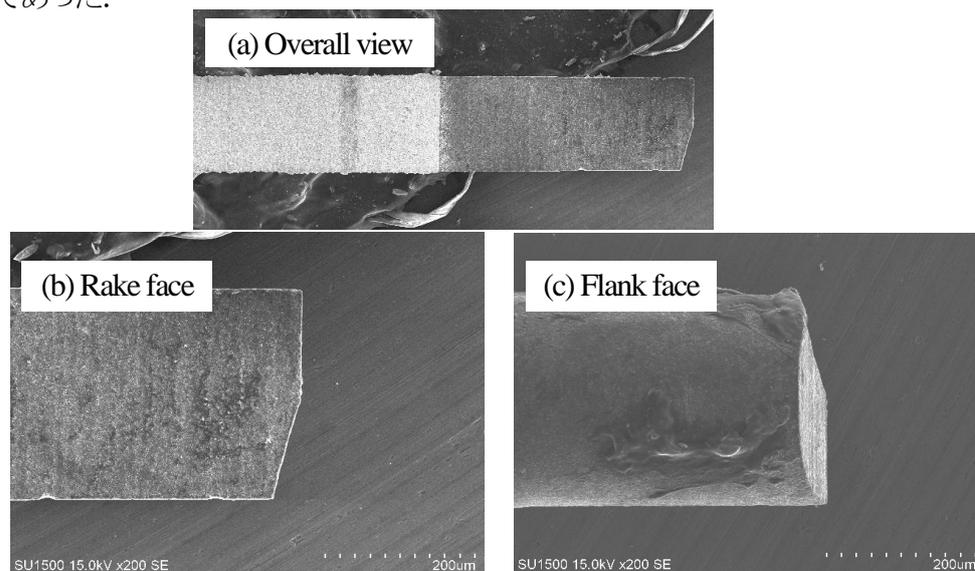


図 7-2 機上製作されたPCDドリル($\phi 0.3$)

7-3 内壁面

図 7-3 に片振幅 $1\mu\text{m}$ で超音波振動援用加工した穴内壁面の SEM 写真を示す。工具径 $\phi 0.3\mu\text{m}$ の自作 PCDドリルにおいても超音波振動を援用することによって綺麗な内壁面が得ることができた。また開口部のバリ・ダレも少なく、良好な開口部を得ることができた。

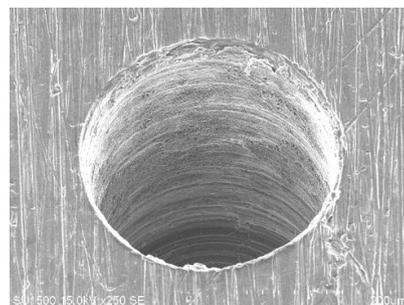


Fig. 7-3 穴内壁面の SEM 像 (振動振幅 $1\mu\text{m}$)

第8章 セラミックスへのドリル加工試験

セラミック微細穴加工として、主に下記4種類を特別仕様にて製作して、その性能比較試験を実施した。使用工具の写真を図 8-1 に示す。

使用工具

NO	名称	径(mm)		材質	詳細
1	軸付(ムク)	0.2	0.4	ダイヤモンド電着	電着メッキ
2	ドリル-B	0.15	0.4	ダイヤモンドコートA	核成長多結晶
3	ドリル-S	0.2	0.4	ダイヤモンドコートB	CVDか?
4	PCD	0.3		多結晶ダイヤモンド	

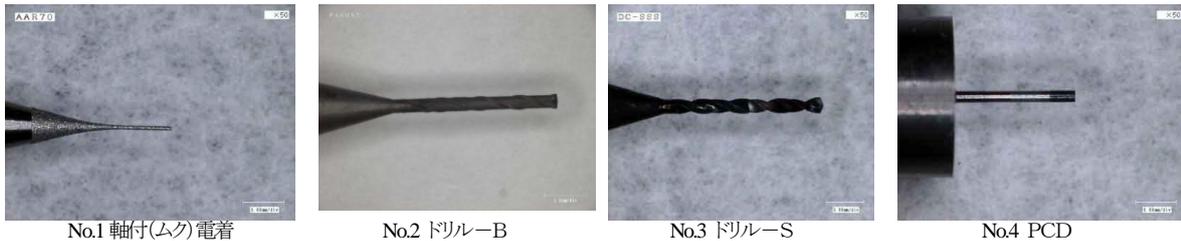


図 8-1 使用工具一覧

加工の主な条件を下記する。但し、PCD工具では未実施である。

加工条件(KIP-300)

NO	回転数 rpm	送り速度 mm/min	切り込み量 mm/min	超音波援用
1	15,000	0.6	0.01	無
2	15,000	0.6	0.01	有
3	15,000	1.8	0.01	無
4	15,000	1.8	0.01	有

加工実験結果を以下に列挙する。

- ①工具NO. 1 軸付砥石 $\phi 0.2$ は超音波無しの場合はいずれの条件でも破損した。
- ②その他いずれの工具でも加工は可能だが、超音波援用加工穴は加工表面の損傷痕が少ない面が得られている。
- ③回転数、送り速度の影響については、この実験では外観上は差異がない結果が出たが、特に送り速度をさらに早くした場合にどうか検証してみる必要がある。
- ④製作上、工具NO. 2だけが $\phi 0.15$ 、 $\phi 0.1$ と微細径の制作が可能のため、現状ではこの工具での加工を優先した。

次に、工具NO. 2 ($\phi 0.15$) での送り速度と超音波有無の比較を図 8-2 に示す。

	送り速度 1.8mm/min	送り速度 3.6mm/min	送り速度 5.4mm/min
超音波有			
超音波無			

図 8-2 超音波振動と送り速度による加工結果の比較

外観上は差異がなかったが、穴底部の観察では、超音波援用加工の優位性が確認できた。次に、損傷痕の撮影結果を以下に示す。

	加工条件A	加工条件B
超音波有		
超音波無		

図 8-3 損傷痕の比較

PCD工具を机上成形して、ドリル加工を試みた。放電加工による工具成形の条件確立が困難であり、希望の工具形状にすることができなかつた。そのため、机上成形した工具での加工条件は回転数20,000rpm、送り速度0.6mmで実施したが、いずれも加工直後に工具破損が発生した。



図 8-4 放電加工によるPCD工具の机上成形結果

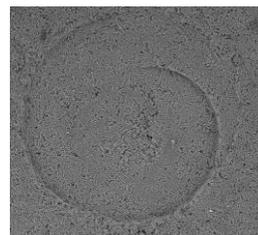


図 10-5 アルミナ表面加工痕

第9章 各種難削材へのドリル加工試験

超音波振動を援用した難削材への小径穴あけ加工技術の開発のため、各種難削材に市販超硬ドリルでL/D値=10の穴加工を行い、慣用穴あけと超音波援用時の切削性の違いを検証する。

(1) 素材

被削材として、インコネル、ハステロイ、モリブデン、タングステン、タンタルを準備した。これらの材料は宇宙産業や原子力、航空機部品、医療分野などに使用され、切削加工時には硬く

て粘り特徴から工具の摩耗が著しく大変苦慮している。特に、0.3以下の小径ドリル穴加工はその特徴から欠損し易く管理が非常に困難である。

(2)ドリル

斉藤製作所 ルーマドリル(材質:超硬)
 * 工具全長 38.0を 30.0に当社設備
 ワイヤークットにて切断する。

径寸法	型番	全長	追加工長さ
Φ0.1	ADR-0010	38.0	30.0
Φ0.3	ADR-0030	38.0	30.0

(3)実験設備

- 慣用穴あけ ファナック製 ROBO DRILL- α 14iA
- 超音波穴あけ 倉敷機械製 KIP-300H

(4)加工条件

可能なかぎり、加工条件を合わせる必要があるため、慣用加工設備と実験設備の加工条件を下記のように設定した。

ドリル径	加工長さ	主軸回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	切り込み (mm)
Φ0.3	3	8,000・10,000	5~24	0.01~0.03
Φ0.1	1	8,000・10,000	1~4	0.01

* 実験機の主軸回転数は 10,000rpmと設定

3. 結果及び考察

	インコネル		ハステロイ		モリブデン		タングステン		タンタル	
	Φ0.3	Φ0.1	Φ0.3	Φ0.1	Φ0.3	Φ0.1	Φ0.3	Φ0.1	Φ0.3	Φ0.1
慣用 ロボドリル										
評価	○	×欠損	○	×欠損	○	×欠損	○	×欠損	×欠損	×欠損
超音波 KIP-300H										
評価	○	○	○	○	○	○	○	○	×欠損	×欠損

図 9-1 慣用穴加工と超音波振動援用加工の結果の比較

図9-1の結果から、慣用による穴あけでは、Φ0.3ドリルではタンタルを除いてL/D値=10の加工が可能であるが、Φ0.1での穴あけは不可能であった。しかし、超音波に於いては、インコネル、ハステロイ、モリブデン、タングステンでの加工でΦ0.3及びΦ0.1の穴あけが可能であったが、タンタルについては、今回の実験ではL/D値=10になる前に全て欠損してしまった。

実験結果から、超音波を援用した加工は難削材の小径加工に於いても有効であることが解った。タンタルについては切り屑が粉状になってしまうために切り屑がドリルの溝に入り込み切り屑の排出がうまくいかなかった為の欠損と予想されるが、今後の課題として、ドリルの形状の見直しと切削油の供給方法の改善が必要であると考えられる。

第10章 テフロンおよびCFRPへのドリル加工試験

超音波振動を援用した難削材への小径穴あけ加工技術の開発のため、テフロン素材及び、CFRP素材の小径穴あけ加工を実施する。テフロンの切削性はきわめて良好で、切削加工は容易であるが、温度による膨脹、収縮は金属より遥かに大きく、加工の際の寸法公差は使用時の温度条件を基準に考えねばならない。そのため、小さな寸法公差を附される半導体製造装置にお

いては、切削熱による温度上昇は熱膨張に直結するため、これをできるだけ抑制しなければならない。一方、CFRP は積層された繊維の方向によって加工性に大きな違いがあり、繊維バリが発生しやすい。また、様々な CFRP 加工用ドリルが多種市販されているが、通常の数値の 5 倍～30 倍する。しかし、カーボン繊維によって工具寿命が極端に短くなるため、加工コストの低減が必要不可欠である。そこで、超音波振動加工機を用いてテフロン、CFRP 素材について $\phi 0.2\text{mm}$ 、穴深さ 1.0mm の加工を行い、テフロンの加工精度に懸念される加工中の素材とドリルに発生する切削熱を調査する。加工条件を以下に示す。

回転数: 8,000rpm
 送り速度: 30ms
 穴径: $\phi 0.2\text{mm}$
 加工ドリル: ATOM ADRL-0.2
 被削材: テフロン(単体, glass 入り, カーボンファイバ入り)
 CFRP

被削材の外観図を図 10-1 に示す。

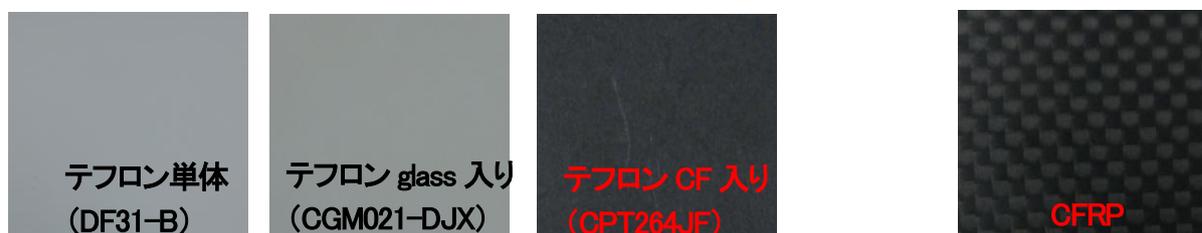


図 10-1 被削材表面性状

加工結果を図 10-2 に示す。全ての素材についてドリルの破損等は確認されず、加工が可能であった。また、テフロン素材については、穴径、穴深さの程度もあるかと思うが、通常のドリル加工と比較し発熱量は少ないため、より表面精度の高い加工ができると考察する。

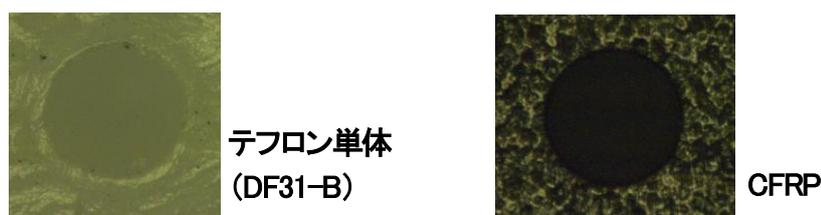


図 10-2 穴あけ加工(光学顕微鏡により撮影×600)

第 11 章 超硬合金へのドリル加工試験

超硬合金への加工は、一般的には放電加工に頼っている。しかし、放電加工は、加工変質層の管理が難しく、また微細加工においては相対的な加工精度を上げることが難しく、最終仕上加工は研削やラッピングが必要である。そこで本章では、超硬合金に対して、比較的廉価な超硬ドリルやコーティングドリルを用いた加工の可能性についての検証を行う。

被削材は、超硬合金 KD20(共立合金製作所 $\phi 10 \times 23.5$)で、自動 Z 軸ステージ上に接着剤にて固定した。切削工具は、 $\phi 0.2$ および $\phi 0.3$ の市販超硬ドリル(超音波共振のために、全長 30mm に切断)および $\phi 0.3$ 市販ダイヤモンドコーティングドリル(FSK 製エフコート D, 全長

23mm に切断)である(図 11-2). 加工条件は, 回転数 20,000rpm, 送り速度 0.6mm/min (10 μ m/sec), 発振周波数:40.45kHz(LD ランプ 1ヶ点灯)である.

実験の結果, 超硬ドリルの場合は, ϕ 0.2 および ϕ 0.3 のいずれにおいても, 加工途中にドリルが破損した(図 11-1, 11-2). 特に ϕ 0.3 の場合は, 切りくずが発生することなく破損したようである. スピンドルに残った部分で振れまわりを測定したところ, 約 20 μ mの振れがあった. ドリル破損の要因としては, ①ドリルの振れ, ②切削送り速度(Z軸上昇速度), ③ドリルの材質などが考えられる. そのため, ①の対策としてドリルの全長を短くしチャック部分からの出量を13mmくらいとするとともに, 振れの少ない工具ホルダを利用する, ②については, Z軸ステージの最低速度の為変更はできない, ③については, ダイヤモンドコーティングドリルに変更して再度実験を行った. その結果, 図 8-3 に示すように, 深さ 0.1~0.2mmくらいまでは, ドリルの破損も無く, 形状もきれいな切削が可能であった. これより深い加工については, 加工装置の不具合のために実験ができなかった.



Fig. 11-1 超硬ドリル(ϕ 0.2)の加工結

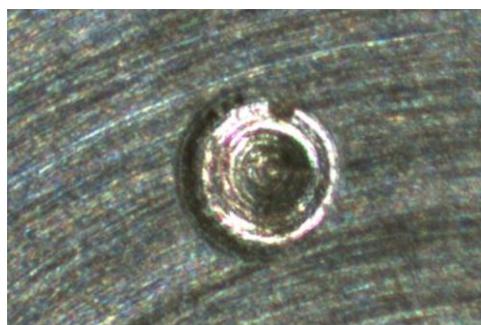


Fig.11-2 超硬ドリル(ϕ 0.3)の加工結果



Fig.11-3 ダイヤモンドコーティングドリル(ϕ 0.3)の加工結果

第12章 ガラスへのドリル加工試験

ガラスは日用品、装飾品、光学部品などの材料として広く使用されている。それらの製品は、美観や光学特性の観点から欠けなどの欠陥が少ないことが求められる。ガラスは脆性材料であるため、切削加工などにおいて引張応力が作用すれば縁部分に欠けが生じやすい。ここでは、ガラス材として一般的なソーダガラスを被削材として小径穴あけ加工を行い、超音波振動を加えた場合と加えない場合の穴の縁部分の欠けの発生状況等を評価する。

被削材材質:ソーダガラス

被削材寸法:50×50×5

使用工具:

① ϕ 1.0mm 超硬ドリル: UNION TOOL 社 UNIMAX DRILL 1.00×10.0 C-UMD 2100-100

②φ0.5mm 焼結ダイヤモンドドリル:Tungaloy 社 SDR3-050DIA

③φ0.2mm 超硬ドリル: UNION TOOL 社 UNIMAX DRILL 0.20×2.5 C-UMD 2020-025

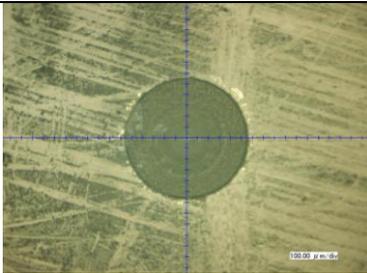
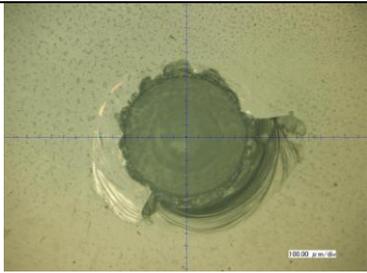
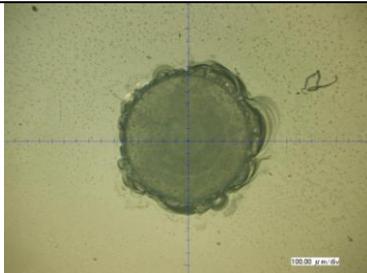
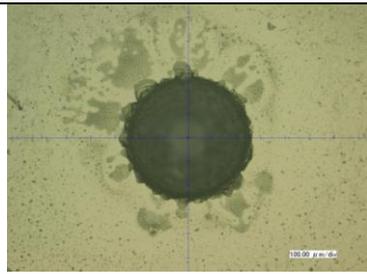
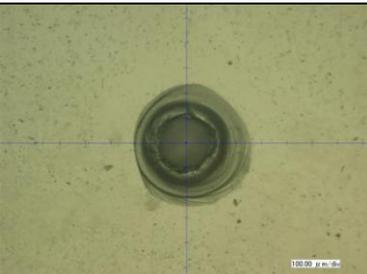
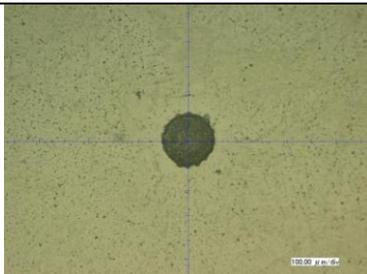
加工条件:

主軸回転数 10,000rpm もしくは 20,000rpm Z軸送り 1.8 mm/min (=30 μ m/s)

チップロード 0.09mm/rev もしくは 0.05mm/rev 加工深さ 0.5mm

加工結果を表 12-1 にまとめる. φ1.0mm 超硬ドリル, φ0.5mm 焼結ダイヤモンドドリル, φ0.2mm 超硬ドリルのいずれを使用した加工においても, 穴の縁の欠けは, 「超音波振動あり」の場合の方が「超音波振動なし」の場合よりも小さくなっている. この結果から, ガラスを被削材とした小径穴あけ加工において, 超音波振動は穴の縁の欠けを抑制する効果があると考えられる.

表 12-1 ソーダガラスの加工結果

	超音波振動なし	超音波振動あり
工具径: φ1.0 工具材質:超硬合金 主軸回転数:20,000rpm 切削速度:62.8m/min	 比較的欠けは小さい	
工具径: φ1.0 工具材質:超硬合金 主軸回転数:10,000rpm 切削速度:31.4m/min	 縁の欠けが大きい	 縁の欠けが大きい
工具径: φ0.5 工具材質:焼結ダイヤモンド 主軸回転数:10,000rpm 切削速度:15.7m/min	 縁の欠けが大きい	 縁に細かい欠け
工具径: φ0.2 工具材質:超硬合金 主軸回転数:10,000rpm 切削速度:6.3m/min	 縁に大きな欠け	 縁に小さな欠け

第13章 全体総括

10-1 研究成果

研究成果について、サブテーマ毎に以下に示す。

サブテーマ【1-1】機上成形方法の開発

①-1装置, 工具の設計・手配

機上放電加工装置一式, 原点測定器を導入した。目標仕様を満足する装置が導入された。機上放電加工装置は特注であり, 当初の計画からは納品時期が遅れてしまったが, 機上工具成形とドリル加工が可能であることを確認した。

①-2FEM振動解析

縦振動する片刃ストレートドリルが設計された。これが超音波振動援用加工において最適な形状であるかは今後多くの実験を要するが, 少なくとも市販ツイストドリルにはない振動特性、すなわち縦振動モードのみが励振周波数付近に存在するドリル加工に適した振動特性が得られた。

①-3現有機の転用

長岡技科大の現有NC位置決め装置の現ラムを本研究用新ラムへ交換し, 本研究用超音波スピンドルを取り付けた。

①-4工具径測定システム導入

工具径測定システムを導入し, 工具の形状測定, 振れまわり測定を行った。

①-5放電加工実験

工具材質の選定と放電加工による工具成形試験を行った。PCD は絶縁体であるので, 一般には放電加工は困難である。また, 工具径が細くなると, 超硬軸と PCD とのロウ付け部の強度が必要である。両者の特性を懸案して, 導入した放電加工装置で加工可能な PCD が選定された。

①-6工具補正手法の開発

本事業期間においては, 工具台がねとしてφ0.3 のものを使用したので, 工具外形の補正は行う必要がなかった。しかし, より細かい工具を機上成形する場合には, 手法の開発が必要である。

①-7工具成形と小径穴加工

φ0.3-L2mm の PCDドリルを機上成形して, 実際に加工が可能であることが確認された。

サブテーマ【1-2】超音波振動援用加工に適した工具の開発

超音波振動援用ドリル加工に特化して, 本加工手法に適した工具形状を開発した。シミュレーションによって求めた形状のドリルを作成し, 高速度カメラによって縦振動モードが支配的であることが確認できた。しかし, 事業期間内では, 様々な工具を製作, 実験することができず, 最適化は今後の課題となる。

サブテーマ【2-1】高精度加工システムの構築

③-1専用チャックの実験

新たな工具ホルダを提案した結果, 焼きばめ作業が10分から1分にまで迅速化された。

③-2超音波加工装置の選定と導入

超音波スピンドルおよび空圧補記類一式, 工具動力測定器一式, 高速度カメラ用光学系, レーザードップラ振動計一式を導入した。目標仕様を満足する装置が導入されたが, 超音波スピンドルは特注であり, 当初の計画からは納品時期が遅れてしまった。

③-3機上成形装置とのリンク

機上放電加工装置が工作機に搭載され, 実際に機上成形が可能であることが確認された。

③—4加工条件の系統的導出手法の開発

加工機の納期が遅れたため、多くの実験を行うことができず、加工条件の導出の必要がなかった。今後、事業化展開においては、実験計画法を導入して、加工条件の最適化手法を開発する必要がある。

サブテーマ【2-2】難削材の適用可能試験

④—1 快削材料での加工実験

小径自作PCDドリル($\phi 0.3$)を用いた穴加工実験を行い、超音波振動の振幅の違いで切りくずの微細化、切りくずの生成、スラスト力、トルクの違いを確認した。振幅が大きくなるにつれて、スラスト力、トルクが減少し、切りくずが微細化した。

④—2 超硬合金への加工実験

超硬合金(KD20)に対して、市販超硬ドリル($\phi 0.2$, $\phi 0.3$)および市販ダイヤモンドコーティングドリル($\phi 0.3$)で加工を行った。その結果、ダイヤモンドコーティングドリルに超音波振動を重畳することで、ドリル加工の可能性があることが実験的に検証された。

④—3 ガラスへの加工実験

$\phi 1.0\text{mm}$ 超硬ドリル、 $\phi 0.5\text{mm}$ 焼結ダイヤモンドドリル、 $\phi 0.2\text{mm}$ 超硬ドリルのいずれを使用した加工においても、穴の縁の欠けは、「超音波振動あり」の場合の方が「超音波振動なし」の場合よりも小さくなっている。この結果から、ガラスを被削材とした小径穴あけ加工において、超音波振動は穴の縁の欠けを抑制する効果があると考えられる。

④—4 テフロンおよびCFRPへの加工実験

テフロンおよびガラス繊維やカーボンファイバを混合したテフロン、ならびにCFRPに対して振動援用ドリル加工を行った。ドリルの破損等は確認されず、加工が可能であった。また、テフロン素材については、穴径、穴深さの程度もあるかと思うが、通常のドリル加工と比較し発熱量は少ないため、より表面精度の高い加工ができると考察する。

④—5 セラミックスへのドリル加工試験

軸付ダイヤモンド電着砥石 $\phi 0.2$ での加工では、超音波を援用することで穴あけができるようになったので、超音波振動の効果が大きい。市販ドリル工具でも加工は可能だが、超音波振動を援用することで、加工表面の損傷痕が少ないことがわかった。スピンドル回転速度、送り速度の影響については、外観上は差異がない結果となった。今後は、特に送り速度を早くした場合の検証が必要である。

10—1 研究開発後の課題・事業化展開

事業期間内においては、「慣用加工ではできないが、超音波加工によって加工可能となった」事例がいくつも確認された。これより、従来技術では加工困難な市場についての獲得の可能性が見いだせたので、研究段階の成果は十分である。しかし、事業化に向けていくつかの課題が明らかとなった。

- ①連続加工実験および実用化試験のためにはマシニングセンターは必須である。
- ②特に加工条件(ドリル加工、および機上放電加工)の設定のシステム化が必要である。
- ③ホルダ、工具などの寿命、コストについて検討が必要である。
- ④さらなる小径穴加工への展開を進める必要がある。

①については、今後の事業化予算獲得を検討する。②については、実験計画法などを活用してシステム化を図る。そして、③、④については、今後の継続的な研究が必要である。