

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
「切削加工に係る技術の開発 難削材・新素材加工対応」

## 成果報告書

平成21年3月

委託者 関東経済産業局  
委託先 マイクロ・ダイヤモンド株式会社

# 研究開発成果報告書

## 目 次

ページ

第 1 章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景	
(ア) ニーズ	1
(イ) 研究開発の背景	1
(ウ) 当該分野における研究開発動向	1
1-2 研究目的および目標	
(ア) 研究の目的	2
(イ) 研究の目標	2
1-3 研究・管理体制	
( 1 ) 研究組織	3
( 2 ) 管理員及び研究員	4
( 3 ) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	5
( 4 ) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項	6
1-4 平成 1 8 年度の事業成果概要	7
1-5 平成 1 9 年度の事業成果概要	9
1-6 平成 2 0 年度の研究開発目標	12
1-7 平成 2 0 年度の事業成果の概要	13
1-8 本プロジェクト連絡窓口	14
第 2 章 本論 (平成 2 0 年度の研究成果)	
2-1 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発	15
2-2 技術の新規性、独創性、改善性の対策	16

2-3	極小単結晶ダイヤモンドボール(半月)エンドミルを用いたディンプル、溝加工	17
2-4	単結晶ダイヤモンド工具の研磨方位が加工性能に及ぼす影響	22
2-5	高純度 cBN エンドミルによる金型鋼材のミガキレス加工の試み	31
2-6	レーザー加工と切削加工を利用したマイクロ流路形状の製作	35
2-7	硬脆材料(ガラス)への微小溝ミーリング加工への振動付与効果	41
第3章	まとめ	43

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景

#### (ア) ニーズ

各種工業製品の高機能化、高品質化が一層進む中で、それらを構成する部品の精度向上や複雑化・微細化の要求が高まっている。したがって、これらの製造においても、精度向上や複雑化・微細化加工技術への対応など、加工技術の高度化が一段と求められている。

大量生産のためのツールとなる金型においても同様な要求が顕著になっており、その結果、特に金型の耐摩耗性向上が重要な課題になっている。例えば、熱間プレスや鋳造により製造されていた製品を冷間プレス加工へと加工法を変更することによって、精度向上と加工コスト削減を目指す傾向が見られる。この場合において、成形圧力の上昇から金型寿命の向上が重要な課題となり、耐摩耗特性のより高い金型材として高硬度鋼材や超硬合金が適用されることが多くなっている。

また、マイクロスイッチやマイクロコネクタなどの電機・電子部品、マイクロレンズなどの光学部品、マイクロ流路・マイクロアクタなどの化学プラントやバイオ関連機器においては、ガラスやセラミックス素材が多用され、それら素材への微細形状の直接創成のみならず、大量生産のための金型素材としても要求が増大している。

このような要求から、焼入れ鋼などの鉄系金型素材から、より高硬度で耐摩耗特性の高い超硬合金や一部セラミックス材を用いた金型への期待が高まっている。また、新素材開発の活発化に伴い、加工方法が未知な素材や、極めて難加工性を示す素材の工業部品への適用に対しても期待が高い。しかしながら、それらの加工技術には未だ課題が多く、特に切削加工の適用においては切削工具の寿命改善が必須の課題と考えられている。

#### (イ) 研究開発の背景

現在最も多く用いられている工具素材である超硬合金を、高硬度材、難削材の切削に適用した場合、実用的な工具寿命が得られないのが一般的である。従来から、硬度が高すぎて加工が困難な場合には超砥粒砥石を用いた研削加工が、また導電性のある素材には放電加工が適用されてきた。しかしながら、加工コストの削減と微細形状・高精度化への対応から切削加工への期待が一層高まっているのが最近の動向である。

一方、難削材、新素材の加工には、切削加工をはじめとする機械加工法や、放電加工に代表される熱加工法以外にも、近年ではレーザーや電子、イオンなどのビームを利用した加工法の工業的な利用や研究開発が盛んになっている。しかしながら、エネルギー効率の低さの問題や、加工安定性の課題などにおいて汎用的な利用は困難で、依然として特殊加工法といわざるを得ない。

そこで本研究開発では、ダイヤモンドおよび高純度cBN多結晶を切れ刃素材とし、かつドリルやエンドミルといった回転工具を用いた難削材・新素材に対して有効な加工技術を開発することを課題としている。

#### (ウ) 当該分野における研究開発動向

単結晶ダイヤモンド切削工具は、これまで超精密切削用の工具として銅、アルミ、ニッケルなどの軽合金やプラスチック材に適用されてきた。ダイヤモンドの優れた物性と、極めて鋭利な切れ刃が作製できるという特長のためである。他方、切削温度が高温になる鉄系素材や、高硬度な被削材に対しては、拡散摩耗の増大や低靱性によるチッピングのため使用できないとされてきたが、近年では研究の範囲ではある(実用のレベルに達していない)ものの、ガラスやシリコンなどの硬脆材料に対応する加工事例が報告されている。また、ダイヤモンドおよびcBN多結晶工具は、旋削加工用として多用されてきたが、最近では小径回転工具による穴あけやエンドミル加工技術の開発が活発になっている。しかしながら、極小工具の製作が困難であることに加えて、加工条件が未知であるため、多結晶体の最適化、工具製作技術の改善、加工条件の最適化など開発課題は多い。

## 1-2 研究目的および目標

### (ア) 研究の目的

切削加工の微細・精密・高品位化の要求に対応するために、様々な加工技術の中でも、汎用性の高さ、エネルギー効率の高さにおいて最も優れている機械的切削加工技術を適用すれば高付加価値の工業製品を高効率で生産出来る。そのために、超硬合金やセラミックス、ガラスなどの難削材や新素材の切削加工を可能にすると共に、これらを汎用素材なみのコストで、かつ高精度に加工可能にすることを目的とする。

マイクロ・ダイヤモンド株式会社は、微小ダイヤモンドや高純度cBNを超硬シャンクに位置ぎめ固着する化学ロー付け技術を開発・確立すると共に、極小工具として必要な刃先創成の形状研磨技術を蓄積してきた。この事業基盤に立って、ますます増大する難加工材の高精度加工の要求に対応出来るように、更なる極小工具形状と寸法の最適化の開発を進める。そのために、難削材や硬脆材料を素材とする金型や機能部品の穴形状を含む微細形状の高精度切削加工を実現出来る単結晶ダイヤモンドおよび高純度cBNを刃先とする極小回転工具を開発し、工作機械精度の向上と合わせて加工条件の最適化を実現する。また、近年著しい発展を遂げるレーザー加工による精密微細加工の技術的特性や経済性と比較し、適材適所に対応出来る微細精密加工の総合的な高度化を合わせて追求する。

### (イ) 研究の目標

#### 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

##### -1 単結晶ダイヤモンド極小工具の開発

半月状エンドミル工具寸法、R0.1mm、輪郭度 100nm 最終年度 30nm、単刃エンドミル工具寸法 50  $\mu$ m、四角錐および三角錐の切れ刃を有するドリル工具寸法 50  $\mu$ m を目標とする。

##### -2 高純度cBN極小工具の開発

2 枚刃ボールエンドミル工具寸法 R0.1mm、輪郭度 50nm 以下、単刃エンドミル工具寸法 50  $\mu$ m を目標とする。

##### -3 難削材の加工特性の評価

超硬合金、ガラス、セラミックスなどの被加工材に関する微細形状の切削加工データを収

集し、基礎的な加工特性から最終的に生産現場への適用への展開を目標とする。

#### 加工特性の調査のための実験方法の開発

##### -1 超精密加工機による加工特性の調査

超精密加工機を利用すれば機械剛性や送り精度の悪影響を無視出来るので、従来実験事例がほとんど無い硬脆性難削材の加工特性を研究し加工方法を開発する。

##### -2 高速回転、高振れ精度主軸の開発

10万～17万 $\text{min}^{-1}$ まで実験可能な主軸を開発し、空気静圧・軸受けで高振れ精度の実用開発を行う。

##### -3 工具摩耗、加工精度に及ぼす切削条件の影響の調査と最適化

工具切れ刃形状、工具振れ精度、切削抵抗、工具振動などを研究解析し実用化に役立てることを目的とする。

#### 最適加工条件実現のための課題抽出と新たな加工技術の開発

##### -1 専用主軸の利用による最適加工条件の開発

専用主軸の利用による静・動剛性の向上や出力の向上をはかり、最適加工条件を実現する。

##### -2 振動付与装置の開発とその効果に関する検討(平成19年度より実施)

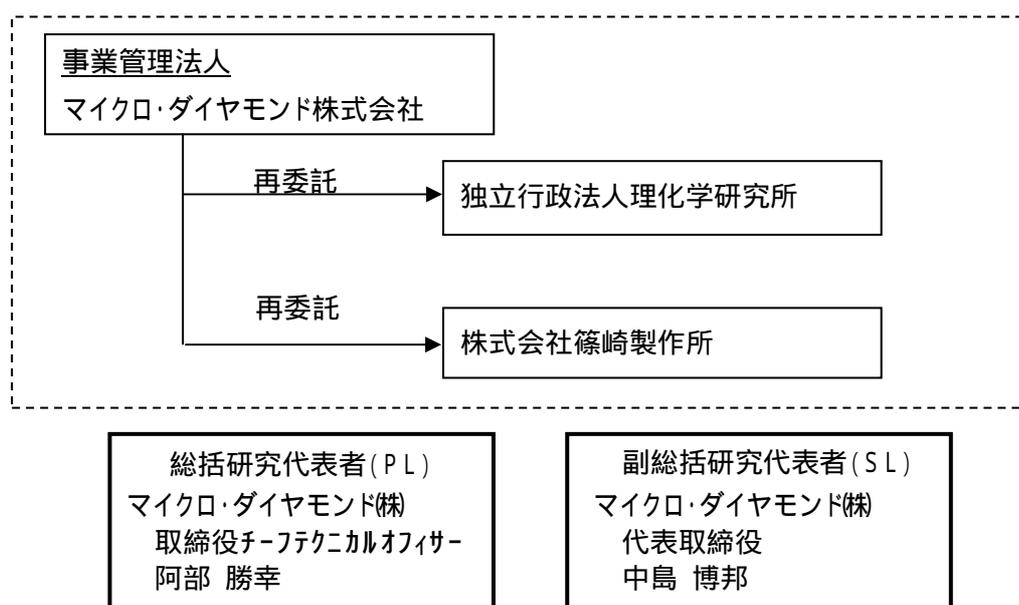
硬脆性材料の研削加工ではすでに実用化されている技術であるが、本開発が目指す特定被加工材の精密微小切削加工においては超音波振動複合加工の効果は実証されていない。まず2倍程度の加工能率向上と工具の摩耗減少を目標とする。

##### -3 機械的加工以外の方法による微細精密加工との比較と総合的最適加工条件の検討

### 1-3 研究体制

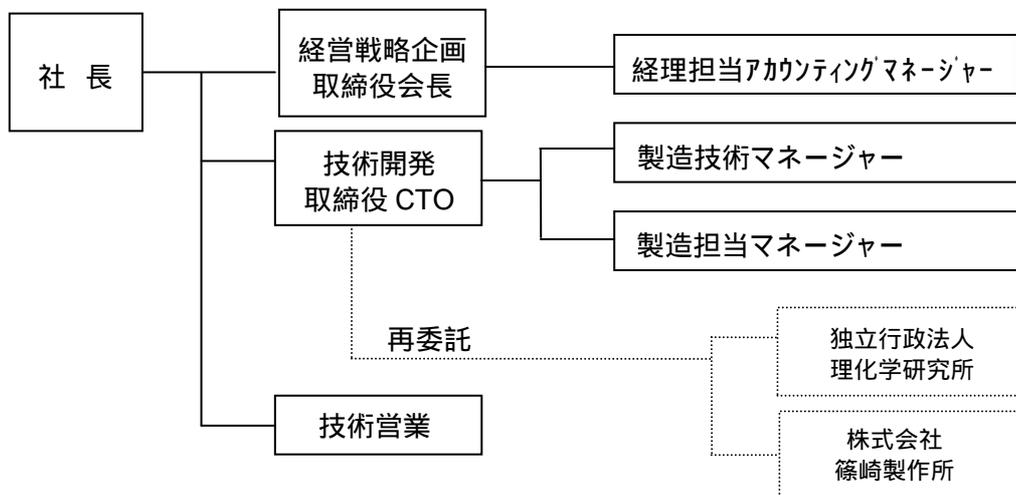
#### (1) 研究組織

##### 1) 研究組織(全体)



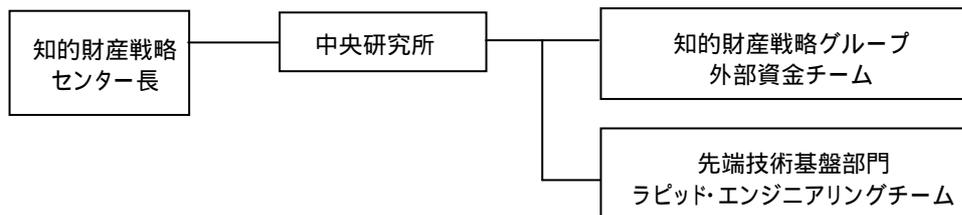
2) 管理体制

事業管理者

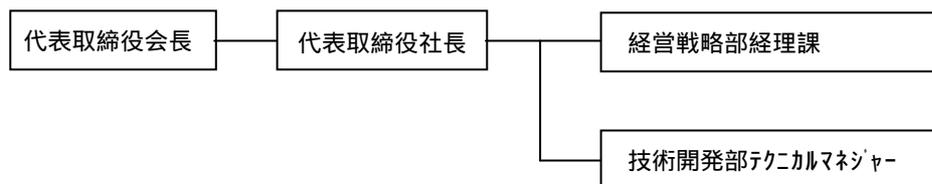


(再委託先)

独立行政法人理化学研究所



株式会社篠崎製作所



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 マイクロ・ダイヤモンド株式会社

管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
西江 寛	取締役会長 経営戦略担当	
岸 恵子	アカウント	

研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
中島 博邦	代表取締役社長	-1.2.3、 -1
阿部 勝幸	取締役 チーフ テクニカル オフィサー	-1.2.3、 -1.3、 -1
阿部 広己	製造技術部 製造担当 マネージャー	-1.2

【再委託先】 研究員のみ

独立行政法人理化学研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高橋 一郎	先端技術基盤部門 ラピッド・エンジニアリングチーム 前任技師(工学博士)	-1.2.3 -1

株式会社篠崎製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小俣 恵一	LALF テクニカルマネジャー	-1.3 -1

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

マイクロ・ダイヤモンド株式会社

(経理担当者) アカウナント 岸 恵子

(業務管理者) 取締役会長 西江 寛

(再委託先)

独立行政法人理化学研究所

(経理担当者) 知的財産戦略グループ 外部資金チーム 坂庭 励

(業務管理者) 知的財産戦略センター長 斉藤 茂和

株式会社篠崎製作所

(経理担当者) 経営管理部 経理課長 鈴木 順子

(業務管理者) 代表取締役社長 井ノ原 忠彦

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究開発委員会委員およびアドバイザー

氏名	所属・役職	備考
阿部 勝幸	マイクロ・ダイヤモンド株式会社 取締役 チーフ テクニカル オフィサー	PL 委
中島 博邦	マイクロ・ダイヤモンド株式会社 代表取締役	SL 委
阿部 広己	マイクロ・ダイヤモンド株式会社 製造技術部 製造担当 マネージャー	委
西江 寛	マイクロ・ダイヤモンド株式会社 取締役会長 経営戦略担当	委
岸 恵子	マイクロ・ダイヤモンド株式会社 アカウント	委
高橋 一郎	独立行政法人理化学研究所 ラピッド・エンジニアリングチーム 前任技師 工学博士	委
小俣 恵一	株式会社篠崎製作所 LALF テクニカルマネージャー	委
松岡 甫篁	株式会社松岡技術研究所 代表取締役 技術士 工学博士	アドバイザー

#### 1-4 平成18年度(第1年度)の事業成果概要

1-2 に示した本事業計画における目標を踏まえ、平成 18 年度は短い実施期間の中で以下の成果を得た。概要についてテーマごとに記す。

##### サブテーマ 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

各種形状寸法の単結晶ダイヤモンドおよび高純度cBNを研磨し、工具の形状精度を調べた。特に小径工具の場合は切れ刃の鋭利性が折損の原因になるとも言われているため併せて検討した。輪郭精度に関する当初の目標値100nmに対し、単結晶ダイヤモンド半月エンドミルの輪郭精度は150～200nmであった。同様に高純度cBN半月エンドミルを研磨して輪郭度を測定したところ、80～120nmと意外な数値であった。単結晶ダイヤモンドの場合は結晶の特性による硬さの異方性の影響があると当初から考えていたが、高純度cBNに関しては多結晶体とはいえ、予想外の結果であった。これら二つの輪郭形状の位置をずらして輪郭誤差を調べたところ、単結晶ダイヤモンド工具の場合はほぼ一定な結晶方位に輪郭形状誤差が認められた。それに対し、高純度cBN工具は一定した傾向は認められなかった。これらの結果から判断すると、研磨機のスピンドル剛性が影響しているものと思われる。

次に、スピンドル剛性とダイヤモンドの硬さの異方性を勘案した研磨を試みた。手法として、意識的に結晶の耐摩耗方位を追加的に研磨した結果、輪郭精度の一部に改善された効果が認められたものの、安定した輪郭精度を得るまでの効果は認められなかった。

輪郭度以外の形状寸法の研磨では、工具径が小径になればなるほど研磨加工の難易度が高くなるのは当然であるが、研磨技術の熟練度の差により加工中の工具折損が頻発したことが懸念材料であった。工具切れ刃の鋭利性について調べてみると、単結晶ダイヤモンド工具と高純度cBN工具では予想したほどの大差は無かった。切れ刃の鋭利性は、研磨機のスピンドル剛性とダイヤモンドホイールの性能に影響されると推定される。

-1～ -3 についてテーマごとに成果概略を示す。

##### -1 単結晶ダイヤモンド極小工具の開発

ダイヤモンド半月状エンドミルの加工形状精度は、第1年度の予算で設置した輪郭度測定装置で工具形状を測定した結果、次のことが判った。

- イ. 加工機のスピンドル剛性が工具のR研磨に際し加工精度に影響する。
- ロ. ダイヤモンドは硬さ以外に硬さの異方性による加工形状への影響が想像以上に大きい。超硬工具などによる研磨との違いが見られる。
- ハ. 以上のことを考慮して、ダイヤモンドの硬さの異方性から生じた幾何学的R形状からのつき出し部を意識的に追加工することを試みたが規則的に安定した輪郭精度は得られなかった。

##### -2 高純度cBN工具の開発

- イ. 輪郭度測定装置で高純度cBN工具の輪郭度を測定したところ、高純度cBN素材により切れ刃の研磨面粗さに差のあることがわかった。高純度cBNは一般に市販されているcBN焼結体と異なり、高温高压の領域で再結晶させた多結晶体なので、安定した性能を確立することが課題となっている。工具にとって、切れ刃の鋭利性は絶対の必要条件なので素材メーカーと打合せを行い、検討を依頼した。
- ロ. 現在、高純度cBN素材メーカーではX線解析を含む多角的な方面から高純度素材の要因を検討しており、近々回答が得られる予定である。

### -3 工具形状の調査

- イ. 超硬金型の直掘りに用いる工具形状を調査した。適用工具はダイヤモンド以外に考えられないが、工具寿命が課題となっている。ダイヤモンドの耐摩耗方位と切れ刃の関係から、研磨方位の検討を行った。
- ロ. これ迄に作成されているダイヤモンド工具のすくい面は人口ダイヤモンドの面{100}に限定される。この面方位は切り屑の流れ方向とダイヤモンドの摩耗方位が一致して工具寿命の観点からは好ましくない。小径工具に天然ダイヤモンドを選んで研磨する難しさがあるが、すくい面に耐摩耗方位{110}を選び、従来の面方位{100}とどの位の寿命差があるかの確認作業を行う。

## サブテーマ 加工特性の調査のための実験方法の開発

- 1 超精密加工機による加工特性の調査
- 2 高速回転、高振れ精度主軸の開発
- 3 工具摩耗、加工精度に及ぼす切削条件の影響の調査と最適化

高硬度焼入鋼に対するマイクロ・ダイヤモンド製の高純度cBN工具は、一般的に広く利用されているコーテッド超硬工具に比較して極めて高い工具摩耗特性を有していることを予備テストで確認した。以下に成果概要を示す。

1. 高純度cBNボールエンドミルではセラミックコーティング超硬ボールエンドミルに比較して、極めて高い工具寿命が期待できる見通しが得られた。
2. ボールエンドミルの工具中心に相当する工具中心刃処理(チゼル幅)に関して、大きすぎると切削抵抗が増大し工具折損が生じやすいこと、小さくすることは工具製造上困難を伴うとともに切削時にはチップングが生じやすくなる。
3. 高純度cBNといえども、工具摩耗は生じる。その摩耗形態は、マイクロチップングに起因していると予想され、その対策として切れ刃稜線粗さの改善が必要と思われる。

そこで、従来型cBN工具に対する高純度cBN工具の優位性を比較する準備として、他5社のcBN工具の切れ刃形状を電子顕微鏡SEMを用いて観察し、切れ刃形状と切れ刃稜線粗さについて比較検討した。開発設計による超精密加工機専用主軸の開発は、第1年度の完成を目指したが、性能向上を目的に特殊モータを採用することにした

結果、第1年度内には性能を満足できる主軸の製作までは実施できなかった。しかしながら、早急に十分な仕様が達成可能な主軸の製作に取りかけられる見通しが得られた。また、切削性能の評価や定量化のために、工具の振れ量、びびり振動、切削抵抗(切削トルク)などの測定、解析を実施するため、第1年度予算で購入した変位計及び電力計を利用したデータ収集の実験準備を整えた。

#### サブテーマ 最適加工条件実現のための課題抽出と新たな加工技術の開発

- 1 専用主軸の利用による最適加工条件の開発
- 2 振動付与装置の開発とその効果に関する検討

超精密加工機専用主軸の完成が遅れたため、最適加工条件実現のための実験を実施することは出来なかった。しかしながら、以下の理由により特にボールエンドミル切削においては、工具の振れ精度が工具の摩耗特性に大きく影響することが分かってきた。すなわち、微小径のボールエンドミル切削では、工具の折損防止のため、微小切込量となる切削条件の採用が必須である。したがって、等高線加工により工具軸方向に徐々に掘り進めて行くのが一般的な加工方法となり、ボールエンドミルの中心近傍の切れ刃を常に用いることになる。この場合、切削速度が高く出来ない上に被削性の悪い切れ刃部位を用いることになり、加えて、工具の振れが工具中心の偏芯運動を招き、摩擦距離の極端な増大となり工具寿命に大きく影響を及ぼすことになる。実用上は、振れ量を完全に無くすることは困難であるため限界値を実験的に明らかにすることが重要となることになった。サブテーマ -2は第2年度より実施の予定である。

#### 1-5 平成19年度(第2年度)の事業成果概要

本事業計画における目標(前述)と平成18年度の事業成果を踏まえ、平成19年度の開発目標を設定したうえで加工特性評価のための研究開発を遂行した。テーマごとに研究開発の内容を示し、具体的に実施した実験内容と得られた成果を記す。

#### サブテーマ 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

- 1 単結晶ダイヤモンド極小工具の開発
- 2 高純度cBN工具の開発
- 3 工具形状の調査

実施：マイクロ・ダイヤモンド株式会社  
(阿部勝幸、中島博邦、阿部広己)

場所：マイクロ・ダイヤモンド株式会社

##### 1. 工具切れ刃Rの微小化に望まれる切れ刃の改善

単結晶ダイヤモンドエンドミルによるディンプル加工において、工具のすくい面位置が形状精度に影響について検討した。すくい面が工具の回転中心にある場合とプラス側、マイナス側にある場合の形状精度を確認した。また、ディンプル加工に用いる半月状エンドミルのRはますます微小化の傾向にあり、導光板用金型の小型化によ

るディンプル径の微小化が原因と思われるが、昨今の工具への要求は従来工具の最小R0.1mmがR50 $\mu$ m、更に25 $\mu$ mと小さくなっている。工具切れ刃Rが小さくなると、機上計測が難しいばかりでなく、研磨による研ぎ残しが影響して刃荒れが目立ってくる。そこで、R研磨の方法及び切れ刃の鋭利性についての根本的な対策が必要となり、研磨する砥石、加工機械について検討した。

## 2. 長寿命ダイヤモンド工具要望への対応技術開発

昨今、微細加工を必要とする大きな金型では、終日かかる切削加工を工具交換なしで完了できる工具の要望があり、これまでの工具寿命の改善が課題となってきた。大型非球面回折レンズ金型や大型導光板などの加工では、工具による切削繋ぎ面の乱れが許されない為に、ダイヤモンド工具の長寿命化の検討が望まれている。工業用に用いられる人造ダイヤモンド工具のすくい面は、面方位{100}が一般的であるために、形状精度を必要とする工具にとっては好都合であっても、工具寿命の観点からは問題である。文献によれば、切り屑の流れる面方位{100}の面は摩耗し易い方位となる欠点がある。このことからすると、これ迄のダイヤモンド工具は製作のしやすさを第一義に考え、工具寿命に関しては検討されなかったように思われる。そこでダイヤモンド耐摩耗工具の研究・開発に当たっては、ダイヤモンドの耐摩耗特性に関する文献を参考にして、工具のすくい面方位を{100}、{110}に選んで工具寿命を比較検討すると共に、結晶方位を有さない多結晶ダイヤモンドを追加して検討した。また、その際多結晶ダイヤモンド工具の創成技術についても検討を行った。

### サブテーマ 加工特性の調査のための実験方法の開発

実施：独立行政法人理化学研究所（高橋一郎）

マイクロ・ダイヤモンド株式会社（阿部勝幸）

株式会社篠崎製作所（小俣恵一）

場所：独立行政法人理化学研究所ラピッド・エンジニアリングチーム

株式会社篠崎製作所

#### -1 超精密加工機による加工特性の調査

超精密加工機の高い機械剛性と運動精度、高純度cBN工具の優れた耐摩耗特性を生かし、高硬度焼入れ鋼（金型鋼）の高精度エンドミル加工の実現を目指し、具体的な目標として、表面粗さRz0.1 $\mu$ m以下のミガキレス加工の実現を目指した。

#### -2 高速回転、高振れ精度主軸の開発

第1年度で検討した高速回転・高振れ精度主軸を早期に導入することができた。性能評価として主軸の回転精度の改善が切削性能に及ぼす影響を調査した。なお、回転精度の評価は第1年度で導入した変位計を用いて測定し、従来型主軸に対する優位性を調査した。

#### -3 工具摩耗、加工精度に及ぼす切削条件の影響の調査と最適化

第1年度で比較検討した数種のcBN工具の切れ刃形状の相違、およびサブテーマ

- 2 で開発した高振れ精度主軸を用いた際の工具振れ精度が切削性能に及ぼす影響を工具振動の測定結果から解析した。

サブテーマ 最適加工条件実現のための課題抽出と新たな加工技術の開発

実施：独立行政法人理化学研究所（高橋一郎）

マイクロ・ダイヤモンド株式会社（阿部勝幸）

場所：独立行政法人理化学研究所工学基盤研究部

- 1 専用主軸の利用による最適加工条件の開発

専用主軸を用いた切削実験を遂行し、最適加工条件実現のための課題抽出を実施した。特に、微細形状の高精度加工に関する調査研究を実施し、工具振れ量が切削性能に及ぼす影響が極めて大きいことの定量的な検証を実施した。具体的課題として特定な微細形状を取り上げ、レーザービームを利用した加工法と切削加工を比較すると共に、互いの優位性を明確にした。

- 2 振動付与装置の開発とその効果に関する検討

被削材を超音波加振可能な振動付与装置を開発する。本機を超精密加工機上で使用する際の課題などを調査すると共に、適切な使用環境を調査し、その上で振動付与効果を明らかにすることとした。

具体的に実施した実験内容と得られた成果の概要を以下に示す。

表 1 具体的な実験実施内容

研究開発実施内容	テーマ No.
( 1 ) 単結晶ダイヤモンドエンドミルを用いたアクリル材へのディンプル加工において、工具のすくい面位置が形状精度に及ぼす影響を調査し、工具形状の最適化を実施する。	-1 -1
( 2 ) 開発している高純度 c B N 工具および在来の c B N 工具を用いた高硬度焼入鋼の微細形状（ポケット穴）加工において、開発工具の優位性について工具摩耗実験を遂行する。	-2 -1 -2
( 3 ) 微細形状の高精度加工に関し、開発した超精密加工機用主軸および使用する工作機械の性能の影響を調査する。微細形状（ロゴマーク）の創成において、切削加工のみならずレーザー加工も適用し、それらの特性として長所短所について検討する。	-3 -2 -3 -1
( 4 ) 初年度に実施したダイヤモンドの研磨方位が加工特性に及ぼす影響の検討を進めるため、3種のバイトを製作し、耐摩耗特性の調査を実施する。	-3 -1
( 5 ) 振動付与装置の基本性能の確認と、その効果に関する実験を実施する。	-2

1. 単結晶ダイヤモンドエンドミルによるディンプル加工においては、工具のすくい面位置が形状精度に影響することが判ってきた。すくい面が工具の回転中心にある場合とプラス側にある場合の形状精度が確認できたので、すくい面がマイナス側にある場合の影響を検討し、工具のすくい面位置が形状精度に及ぼす影響を明確にする必要がある。また、不十分であった切れ刃の鋭利性について、鑄鉄砥石を用いた研磨方法を検討した。なお、目標とする工具の輪郭度精度 50nm については機械のスピンダル剛性を高めて実現させる。さらに今後要求が高まる極小径化に対して R50 ~ R25  $\mu\text{m}$  の工具製作を最終年度中に実現することを目標とする。
2. 高純度 cBN は、在来の cBN 焼結体工具と比較して高硬度鋼材加工に対する優位性は確認できた。しかしながら、加工条件の最適化と各種の被加工材への適用効果は明確になっていない。そこで、高速切削における仕上げ面粗さ及び工具寿命について調査し、高純度 cBN 工具の適用範囲を明確にする。
3. 微細形状創成加工として、ロゴマークを切削加工とレーザー加工で実施し、それぞれの加工法の長所、短所を調査し、その棲み分けをある程度明確にすることができた。
4. 大型化する金型及び難削材の切削に求められる工具寿命や形状精度に及ぼす影響を調べるために、面方位 {100}、{110} を工具のすくい面に選んで比較検討した。さらに、結晶方位を持たない多結晶ダイヤモンドについても追加した。しかしながら、その研磨は極めて困難であることが分かり、FIB 加工により実現したが製造コストが増大するため、工具製造方法の確立を目指す必要性が明らかになった。
5. 超音波振動を付与することによる切削能率、工具寿命、加工精度への影響を調べるための準備を行った。今後は被削材を振動させる本方式のメリットを明らかにする必要がある。

#### 1-6 平成 20 年度（第 3 年度）の研究開発目標

##### サブテーマ 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

実施：マイクロ・ダイヤモンド株式会社  
（阿部勝幸、中島博邦、阿部広己）

場所：マイクロ・ダイヤモンド株式会社

##### -1 単結晶ダイヤモンド極小エンドミルの開発

半月状エンドミル工具寸法 R0.1mm、輪郭度 100nm、最終年度 30nm 単刃エンドミル工具寸法 50  $\mu\text{m}$ 、四角錐および三角錐の切れ刃を有するドリル工具寸法 50  $\mu\text{m}$  を目標とする。

##### -2 高純度 cBN 極小工具の開発

2 枚刃ボールエンドミル工具寸法 R0.1mm、輪郭度 50nm 以下、単刃エンドミル工具寸法 50  $\mu\text{m}$  を目標とする。

-3 難削材の加工特性の評価

超硬合金、ガラス、セラミックスなどの被加工材に関する微細形状の切削加工データを収集し、基礎的な加工特性から最終的に生産現場への適用への展開を目標とする。

サブテーマ 加工特性調査のための実験方法の開発

実施：独立行政法人理化学研究所（高橋一郎）

マイクロ・ダイヤモンド株式会社（阿部勝幸）

場所：独立行政法人理化学研究所ラピッド・エンジニアリングチーム

-1 超精密加工機による加工特性の調査

超精密加工機を利用すれば機械剛性や送り精度の悪影響を無視出来るので、従来実験事例がほとんど無い硬脆性難削材の加工特性を研究し加工方法を開発する。

-2 高速回転、高振れ精度主軸の開発

10万～17万 min<sup>-1</sup>まで実験可能な主軸を開発し、空気静圧・軸受けで高振れ精度の実用開発を行う。

-3 工具摩耗、加工精度に及ぼす切削条件の影響の調査と最適化

工具切れ刃形状、工具振れ精度、切削抵抗、工具振動などを研究解析し実用化に役立てることを目的とする。

サブテーマ 最適加工条件実現のための課題抽出と新たな加工技術の開発

実施：独立行政法人理化学研究所（高橋一郎）

マイクロ・ダイヤモンド株式会社（阿部勝幸）

株式会社篠崎製作所（小俣恵一）

場所：独立行政法人理化学研究所ラピッド・エンジニアリングチーム

株式会社篠崎製作所

-1 専用主軸の利用による最適加工条件の開発

専用主軸の利用による静・動剛性の向上や出力の向上をはかり、最適加工条件を実現する。

-2 振動付与装置の開発とその効果に関する検討

硬脆性材料の研削加工ではすでに実用化されている技術であるが、本開発が目指す特定被加工材の精密微小切削加工においては超音波振動複合加工の効果は実証されていない。まず2倍程度の加工能率向上と工具の摩耗減少を目標とする。

1-7 平成20年度（第3年度）の事業成果の概要

サブテーマ 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

1. 切れ刃の輪郭精度と鋭利性：研磨機械の回転精度改善、剛性向上に加えて、ナノダイヤモンド砥石の開発によって50nmの実現に成功した。

2. 極小工具の開発：単結晶ダイヤモンドおよび高純度cBNのR50μmのエンドミル、

ドリルの製作技術確立し、R25  $\mu\text{m}$  の製作にも成功した。ガラスの切削加工に適用した。ダイヤモンドドリルの製作においては 30  $\mu\text{m}$  に成功し、石英ガラス、カーボンの穴あけで実用化を達成できた。

3. FIB 加工を利用して刃先 R2  $\mu\text{m}$  ダイヤモンドバイトを開発し、回折レンズ金型加工に適用した。研磨工程中の砥石交換時の位置合わせを工夫することで、更なる精度向上の可能性が得られた。今後更なる向上を追及するとともに、本開発を極小工具へ順次展開する。本研究開発における研究目標は十分達成できた。

#### サブテーマ 加工特性調査のための実験方法の開発

1. 単結晶ダイヤモンドの摩耗方位を考慮した工具および多結晶ダイヤモンド工具を製作し、極端な工具摩耗特性を示すアルミとガラス材の旋削加工に適用した結果、開発工具の優位性を確認できた。
2. 開発した極小 R 付エンドミルをアクリル材のディンプル、R 溝切削に適用し、工具仕様の適正と工具 R 精度の実証を行った。回転工具を用いる超精密加工の実現のハードルは極めて高く、さらに微細形状加工への応用とその実用化は一層課題が多いが、これらの課題抽出と現状における最適化の方向性を確認することができた。

#### サブテーマ 最適加工条件実現のための課題抽出と新たな加工技術の開発

1. マイクロレンズ金型のミガキレス加工を目的に、ステンレス鋼材の平面および凹面加工に高純度 cBN ボールエンドミルを適用し、12 万  $\text{min}^{-1}$  の回転数で高能率加工の可能性を明らかにした。
2. マイクロ流路を模した溝形状加工に、レーザー加工と切削加工を複合した効果について調査した。高能率なレーザー加工を前加工とし、少ない除去量を切削で仕上げる効果を得た。
3. 超音波振動付与効果をマイクロ流路加工に適用し、その効果を確認した。単結晶ダイヤモンドのみならず高純度 cBN や多結晶ダイヤモンドを素材とする微小工具、ダイヤモンド結晶方位を最適化する長寿命工具の製作は、高硬度・低靱性のため極めて難しいが、本開発ではその製作技術が大幅に向上でき、その利用技術の開発も進んだ。

1-8 本プロジェクト連絡窓口 阿部 勝幸 マイクロ・ダイヤモンド株式会社

取締役 チーフ・テクニカル・オフィサー (CTO)

#### 用語説明

**磨きレス切削(=ミガキレス切削)**(P.14)

微細な突起が多数ある面の底部は研磨が不可能である為に切削加工だけで研磨したと同等の切削面を得る切削加工をいう。

**高純度 cBN(=バインダレス cBN)**(P.P.1,7,8,9,10,11,12,13)

粒径 1  $\mu\text{m}$  程度の hBN を高温 (約 2300 ) 高圧 (約 7.7GP) の領域でバインダを用いずに強固な多結晶体化した切削工具素材。

## 第2章 本論（平成20年度の研究成果）

第3年度目に当たる平成20年度において遂行した開発内容を項目ごとに以下に記す。

### 2-1 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発

昨今の精密金型をはじめとする機能部品等の加工に用いられるマイクロ工具は更に小径化傾向にあり、工具加工の難度が高まる中で高精度化が求められている。単結晶ダイヤモンド及び高純度cBNを切れ刃とするマイクロ工具は従来の超硬工具や超砥粒の焼結体工具に比べ切れ刃の鋭利性については優位に有るものの、研磨の手法によっては優れた性能を発揮できないこともある。工具が小径になれば更なる高度な研磨技術が求められ、第2年度の研究・開発では工具の小径化が進んだものの、形状・寸法更に大切な切れ刃の鋭利性に課題を残す結果となった。その主な原因は研磨機のスピンドル剛性の不足および研磨に使用するダイヤモンド砥石の性能不足による工具精度への影響であった。この課題を解決する手段として、第3年度は主軸剛性を高めた研磨機の新規採用と研磨方法の改善に取り組んだ。従来のダイヤモンド砥石による研磨工程は同様であるが、その後に鑄鉄砥石によるラップ工程を設けることにより極小径工具切れ刃の鋭利性を大幅に改善することができた。

#### 2-1-1 極小径化の追求

工具の極小径に伴う具備条件は形状・寸法精度および鋭利な切れ刃の維持である。第3年度は極小径工具の加工精度を確認するための顕微鏡による形状寸法の測定に加え、SEM観察による切れ刃の状態を調べることで既存寸法から大幅に極小化を進めることができた。

表 2-1-1

工具の名称	既存寸法	開発寸法
ダイヤモンドドリル	0.1mm	30 μm
ダイヤモンドエンドミル半月R	R0.1mm	R30 μm
ダイヤモンド単刃	0.1mm	50 μm

#### 2-1-2 工具切れ刃の鋭利性

回転工具の研磨加工は極小径になろうとも研磨機上にある顕微鏡の視野の中に工具を捉えて所定の形状寸法に仕上げる方法には変らない。顕微鏡の倍率は加工する工具との焦点距離の関係で倍率が低いので、研磨した切れ刃の状態まで確認することが不可能である。その為に研磨加工した工具を取り外してSEMで切れ刃の状態を観察する。一度取り外した工具は形状が微小な為に再度同じ位置に取り付けたとしても工具研磨面の位置合せが難しく、通常は取り外した後の研磨は不可能とされている。第2年度に工具を取り外すことなく、鑄鉄砥石によるラップ作業に切り替えたところ、切れ刃の鋭利性に大きな改善が認められたが、一方においてバラツキのあることが発見された。第3年度はこのバラツキの原因を追究した。作業工程をよく観察してみると作業者が頻りにダイヤモンドパウダー(0-1/4 μm)を鑄鉄面に塗布していることが判った。塗布したダイヤモンドパウダーを完全に埋め込んでラップしたところ切れ刃の乱れのバラツキを改善することができた。

### 2-1-3 工具の輪郭精度の改善

第 1 年度の研究・開発で工具の輪郭精度へ及ぼす要因として、ダイヤモンドの硬さの異方性と研磨機のスピンドル剛性が大きく影響していることがわかった。

その結果から判断して第 2 年度に高剛性スピンドル研磨機を導入し、輪郭精度の改善をめざしたが、目標とする輪郭精度 50nm を達成するまでには至らなかった。第 3 年度は輪郭精度に影響する工具研磨面粗さの改善と工具逃げ面の方位を{100}に選定して研磨したところ、輪郭精度が大幅に改善され 50nm を実現することが可能となった。

### 2-2 技術の新規性、独創性、改善性の対策

エンドミルによるデンプル加工の場合、加工機の機種によっては主軸スピンドルが傾けられない為に、加工されたデンプルの底にへそができることがある。第 3 年度の加工テストでこのような現象は工具のすくい面の影響によるもので、すくい面が出張るか、凹んでいることが原因であることが確かめられた。テストの結果を参考に、研磨加工したエンドミルのすくい面位置を机上計測すれば、エンドミルとしての加工精度が判断できる。

第 2 年度の課題であった極小 R エンドミルの刃荒れについて、第 3 年度で引き続き加工方法を検討した。試行錯誤の結果、見出した研磨方法によって、図 2-2-1 に示すような鋭利な切れ刃に磨き上げることができた。第 2 年度の研究・開発の成果として FIB(Focused Ion beam) によるダイヤモンドバイト刃先の微小 R 加工を報告した。超精密バイトがいかに高付加価値があろうとも、高額な FIB 加工費の負担が懸念されていたので、第 3 年度の研究・開発に取り上げた。微妙な機械運動操作を用いれば、機械加工でも正確な微小 R の加工が可能となった。図-2 に機械加工による刃先 R1.8  $\mu\text{m}$  を示す。この刃先 R は FIB 加工と比較しても遜色なく、回折レンズ金型の切削によって実用化が可能と判断された。今後この研磨方法を利用すれば、加工コストの大幅な低減が期待される。

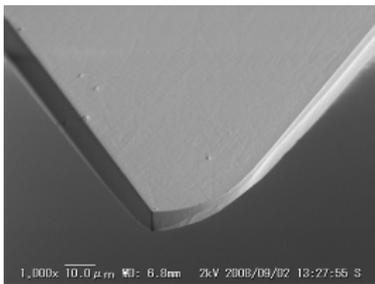


図 2-2-1 R30  $\mu\text{m}$  半月エンドミルの切れ刃

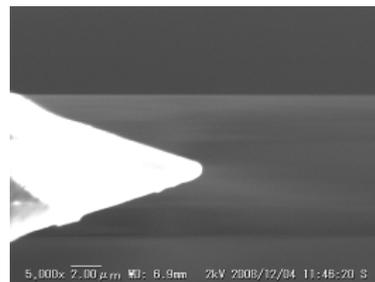


図 2-2-2 機械研磨方式により製作した R1.8  $\mu\text{m}$  工具

## 2-3 極小単結晶ダイヤモンドボール（半月）エンドミルを用いたディンプル、溝加工

開発・製作した極小径の単結晶ダイヤモンドR付半月エンドミルを評価することを目的に、超精密加工機を用いて被削性の良好なアクリル材にディンプルおよび溝形状の加工を施し、その加工形状から工具形状（R形状精度）を評価する。また、逃げ角などの工具仕様様の適正についても評価する。

### 2-3-1 加工に使用した工具

マイクロ・ダイヤモンド(株)にて開発・製作した極小R付の半月エンドミル4種を用いた。シャンク径 4.0mm（のみ 6.0）、テーパ角（片角） $30^\circ$ で、 $R=0.050$ 、 $R=0.030$ 、および  $R=0.025$ mm である。図 2-2-1 に未使用状態の工具の SEM 写真を示す。

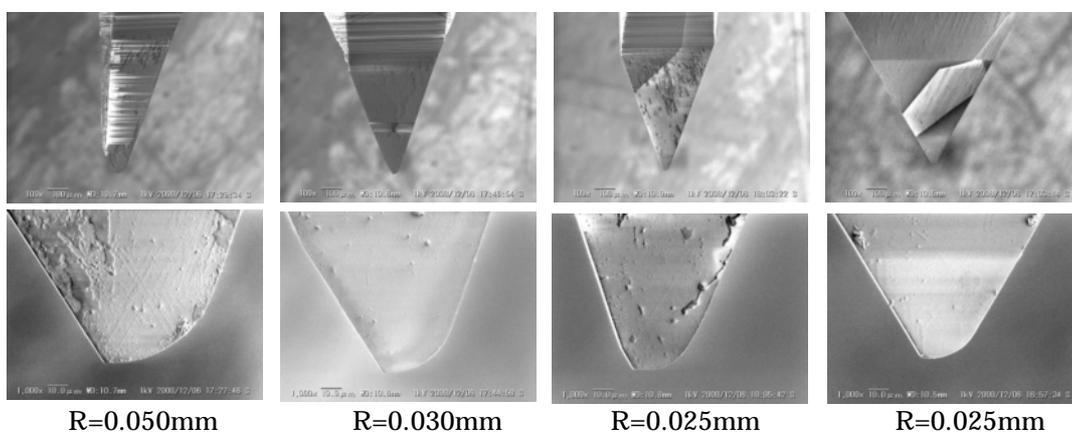


図 2-3-1 未使用工具の SEM 像

### 2-3-2 加工方法と加工条件

超精密加工機（NPIC ナガセインテグレックス製）に、本開発にて製作した高速高精度エアスピンドルを搭載（B軸を利用することで主軸を傾斜可能）し、ワークテーブルに固定したアクリル材（ $80 \times 80 \times 5$  t）をミーリング加工する。加工形状は図 2-2-2 のようであり、被削材面に垂直に工具を切り込むだけで加工したディンプル形状、さらに被削材面方向に送りを与えて加工する溝形状を創成し、工具形状を転写させた。なお、主軸の傾斜角度  $= 0$  度と  $10$  度について実験を行った。その様子を図 2-2-3 に示す。加工条件は、主軸回転数  $N=80,000\text{min}^{-1}$ 、オイルミスト潤滑とし、切込み量  $A_d$ 、送り速度を表 2-2-1 のように変化させ実験を行った。

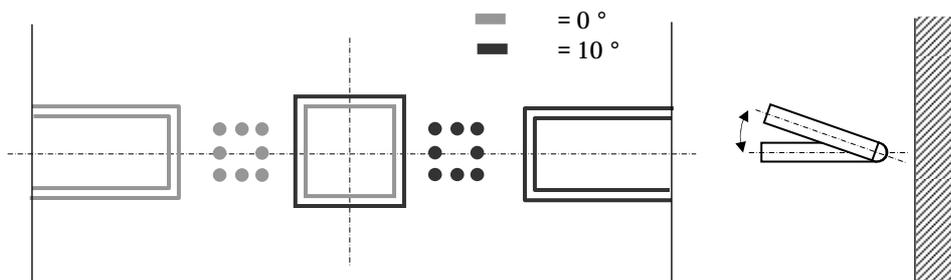
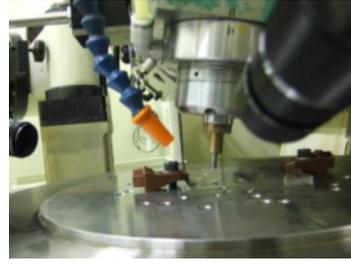


図 2-3-2 加工方法（加工経路）



主軸傾斜角 = 0°



主軸傾斜角 = 10°

図 2-3-3 実験の様子

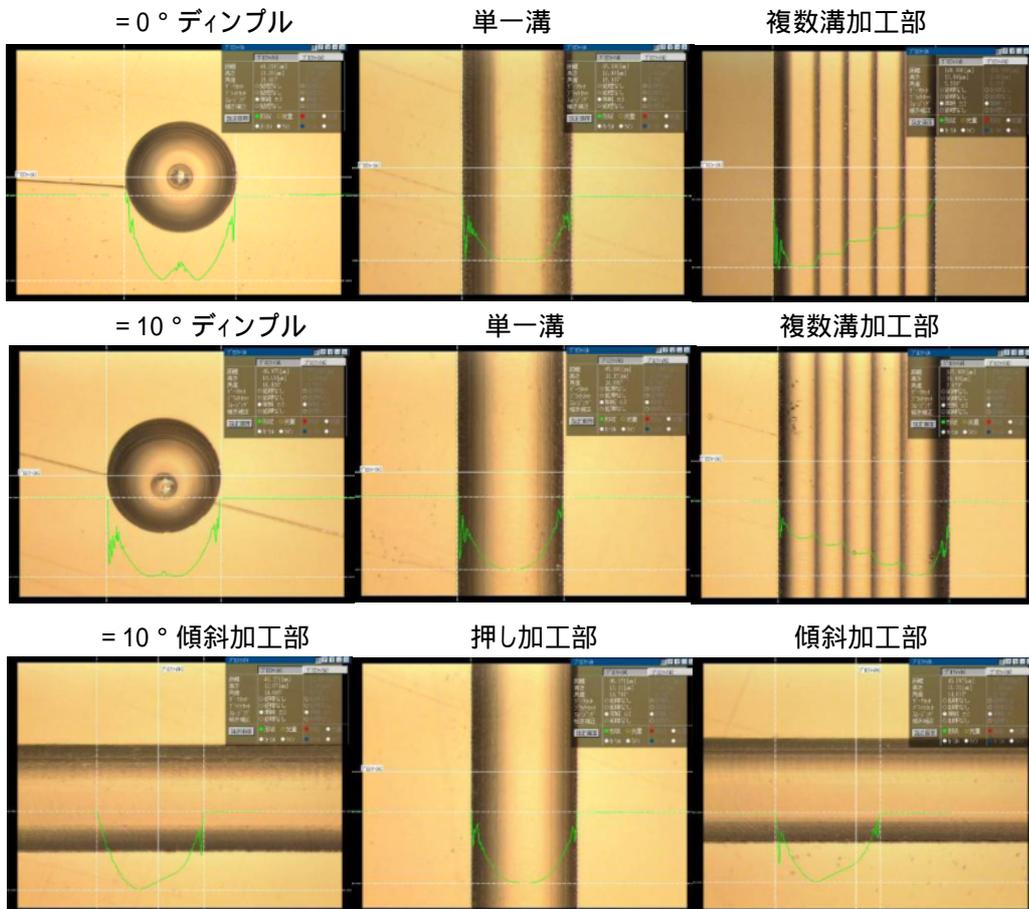
表 2-3-1 加工条件 (単位 mm)

工 具			
ディンプル部	Ad0.025 F1、5、10	Ad0.015 F1、5、10	Ad0.0125 F1、5、10
溝加工部	Ad0.0025 × 10 F100	Ad0.0015 × 10 F100	Ad0.00125 × 10 F100

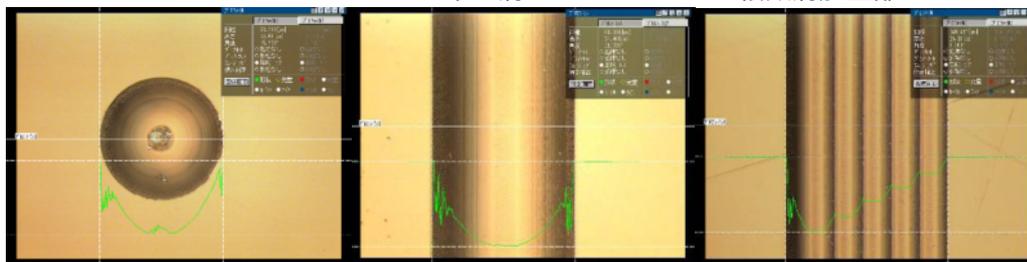
2-3-3 共焦点顕微鏡による加工断面の測定結果

以下に、溝部、ディンプル部、および主軸傾斜加工部の一部の形状を観察した結果を以下に示す。

(1) R0.025mm 工具を使用した加工形状の測定結果



(2) R0.030mm 工具を使用した加工形状の測定結果  
= 0° デンプル

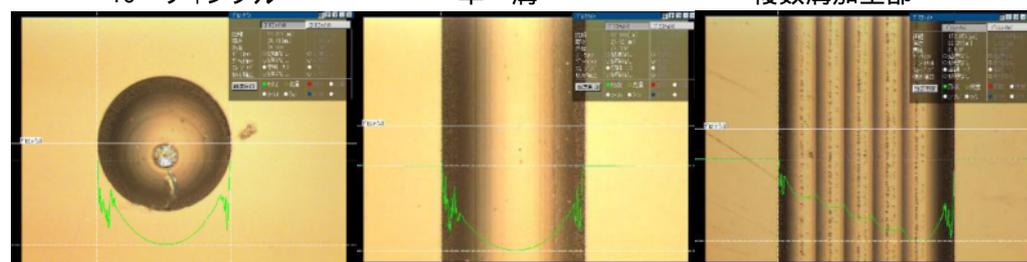


= 10° デンプル

単一溝

複数溝加工部

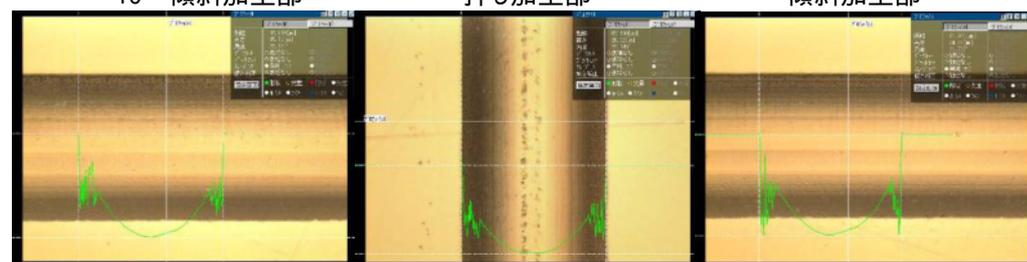
複数溝加工部



= 10° 傾斜加工部

押し加工部

傾斜加工部

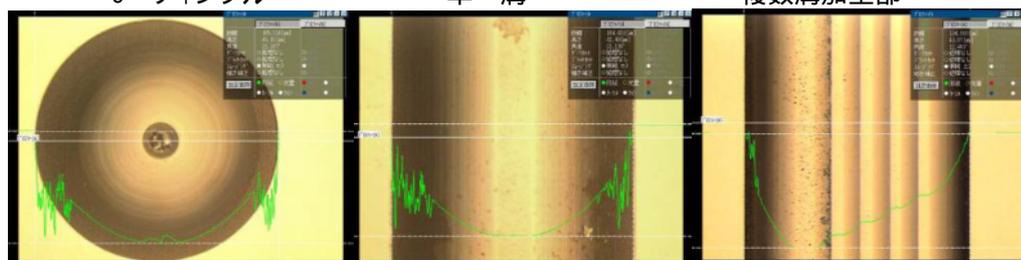


(3) R0.050mm 工具を使用した加工形状の測定結果

= 0° デンプル

単一溝

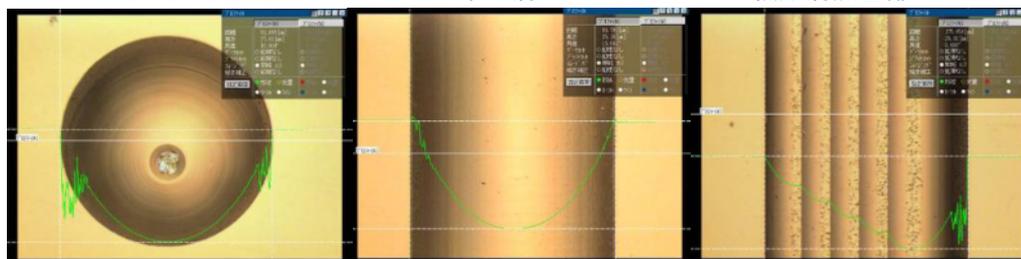
複数溝加工部

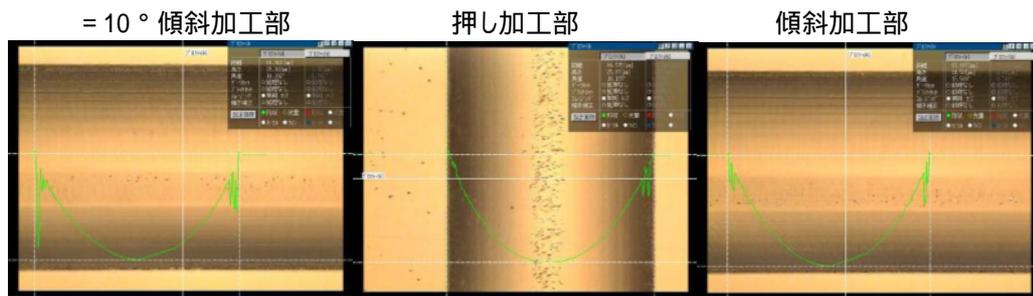


= 10° デンプル

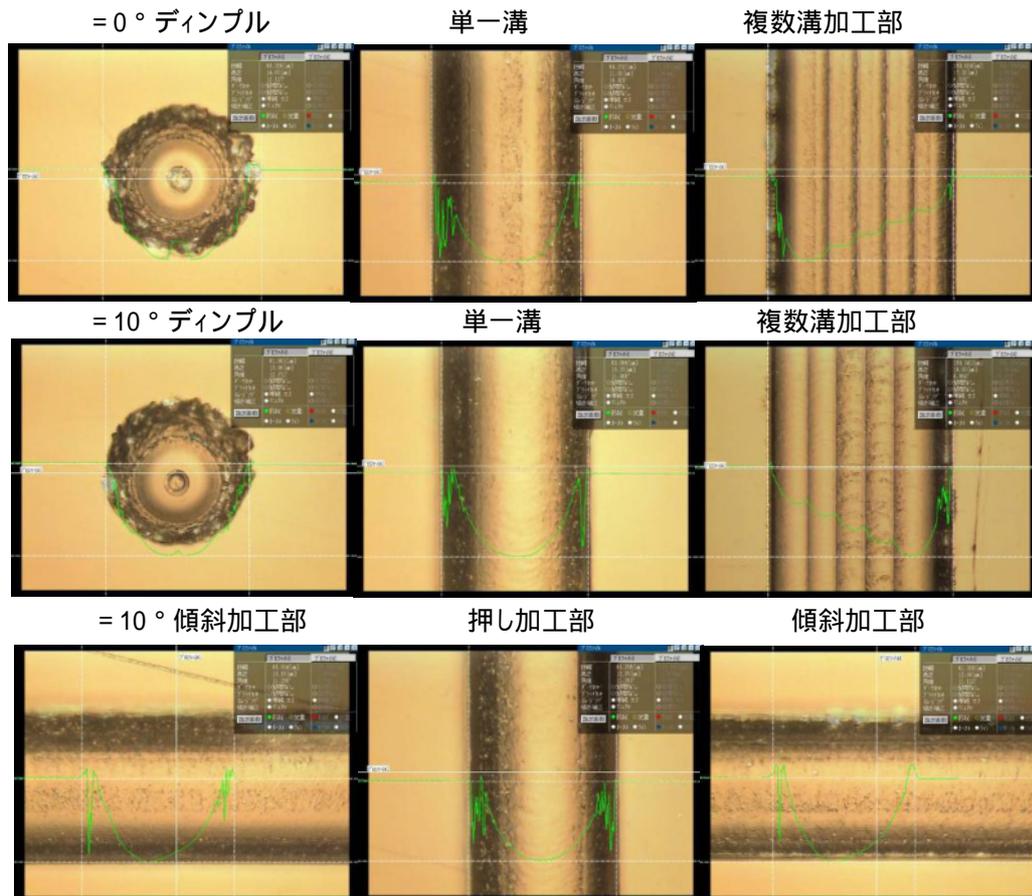
単一溝

複数溝加工部





(4) R0.025, Shank= 6 工具を使用した加工形状の測定結果



#### 2-3-4 考察とまとめ

図 2-3-4、図 2-3-5 に一例を示したように観察結果の画像を利用して R 形状をフィッティングさせることによって R 精度の評価を試みた。なお、図中に緑線で示される断面曲線において、斜角の大きくなる測定部ではうまく測定できていない（レーザー光の反射を利用する測定方式のため）。以下に得られた結果をまとめて示す。

- ・ いずれの工具においても切削加工そのものに問題は生じておらず、概ね良好な切削が可能であった。ただし、工具では、大き目な切り込みで加工した際の被削材表面部の荒れが観られ、逃げ角が不十分であると推測される。工具の後に製作した ~ 工具ではこの点は改善できている。

- ・ ディンプル加工部の観察結果より明らかなように、加工中心部にへそが残っている。工具の幾何学的中心と実際の使用時の回転中心のずれが原因であり、前年度評価したとおりである。この課題は、工具の微小径化に伴い一層重要になる。工具回転軸を傾斜させて工具中心部を使用しない方式とすること（本実験の と Ad から幾何学的に求める）も方策であるが、ずれを機上で調整可能とする仕組みなどの根本的な振れ対策を検討することが重要である。
- ・ 上記の課題は溝加工部では顕著には現れず、本観察方法ではほぼ無視できる程度であった。
- ・ 傾斜溝加工時の傾斜方向と送り方向の違いが加工面の性状や R 形状に影響していることが観察できる。被削性の良好なアクリル材の加工においても僅かな切削力が工具のたわみの原因となっていることが予想され、押し加工において最もその影響が少ないことが分かる。

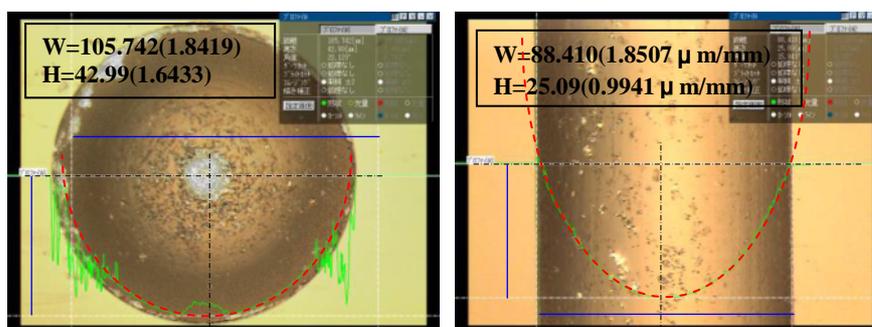


図 2-3-4 R 精度の評価・推定方法 1

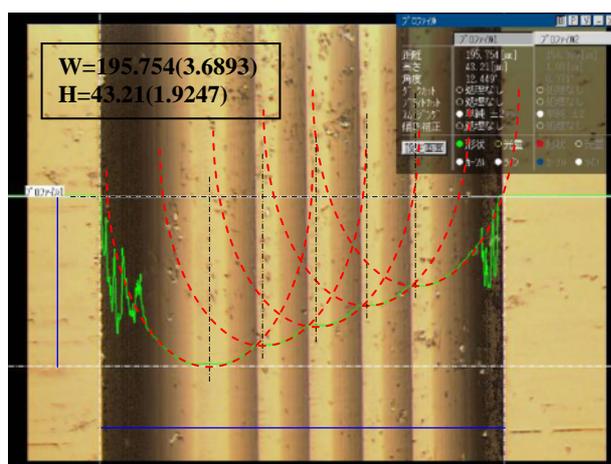


図 2-3-5 R 精度の評価・推定方法 2

## 2-4 単結晶ダイヤモンド工具の研磨方位が加工性能に及ぼす影響

昨今、ダイヤモンド工具を使用する超精密切削加工の適用分野において、長時間を要する加工においても高精度を実現する必要から、工具寿命の延長に対する要求が高まっている。例えば、大型非球面回折レンズの金型加工では、切削過程において工具交換をした際の繋ぎ目に生じる誤差が許されないために工具の長寿命化が課題になっている。

工業用に用いられるダイヤモンド工具の面方位は $\{110\}$ からなる長方形が基本形態であるために、高い形状精度で切れ刃を創成するためには優位であるものの、切屑が流れる面方位 $\{100\}$ は摩耗しや

すい方位となり工具寿命の観点からは欠点となる問題がある。これまでのダイヤモンド工具は切れ刃の鋭利性を第一義に考えたためである。本取組みは、ダイヤモンド耐摩耗工具の開発を目指して、すくい面方位が一般的な面方位と異なる工具を製作し、工具寿命に対して比較検討する。また、併せて結晶方位を有さない多結晶ダイヤモンド工具も追加して検討する。なお、製作した多結晶ダイヤモンド工具素材は住友電工と愛媛大学の共同開発によって造られた人工ダイヤモンドであり、微細なダイヤモンド粒子のみからなる高純度多結晶で、単結晶のようなへき開性や前述の耐摩耗特性の異方性がない。

### 2-4-1 製作したダイヤモンド工具

一般的に製作されている単結晶ダイヤモンド工具 (Tool 1) に対し、すくい面および逃げ面の面方位が $\{110\}$ となるように製作した工具 (Tool 2) さらに結晶方位を有さない多結晶ダイヤモンド工具 (Tool 3) を製作した。工具形状は先端角  $60^\circ$  のV形の旋削用バイトとし、先端Rは  $1\mu\text{m}$ 程度とした。製作後のバイトの概観写真を図 2-4-2 に、検査結果を表 2-3-1 に示す。

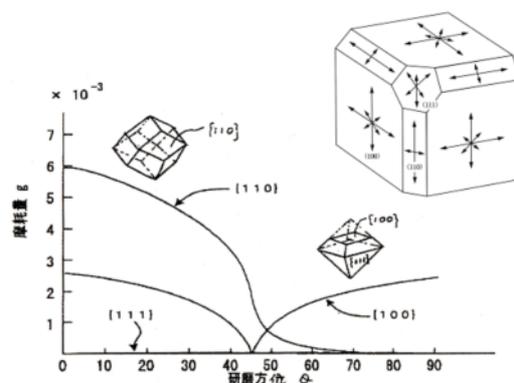


図2-4-1 ダイヤモンドの面方位における摩耗特性

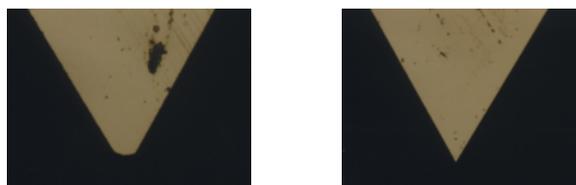


図 2-4-2 バイトの外観写真

表 2-4-1 工具の仕様

Tool	素 材	すくい/前逃げの 面方位	検査結果 先端角度/芯高/前逃げ
No.1	単結晶ダイヤモンド	{100}	59°56 / 5.575 / 7°10
No.2	単結晶ダイヤモンド	{110}	60°06 / 4.984 / 7°12
No.3	多結晶ダイヤモンド	-	59°52 / 4.494 / 7°08

なお、面方位{110}の単結晶ダイヤモンド工具の製作は、予想通り研磨加工が容易でなかった。また、多結晶ダイヤモンド工具の製作に当たっては、その硬度の高さやへき開性を持たないなどの理由から、その製作は一層困難を伴った。単結晶ダイヤモンドと同様な手法では鋭利な刃先を得ることは出来なかったため（図 2-4-3）集束イオンビーム（FIB）加工を採用することで鋭利な刃先形状を実現した。最終的に実験に使用した3種の工具のSEM像を図 2-3-4 に示す。



単結晶ダイヤモンドバイト 多結晶ダイヤモンドバイト  
図 2-4-3 通常研磨で製作した単結晶ダイヤモンドバイトと  
多結晶ダイヤモンドバイトの先端形状

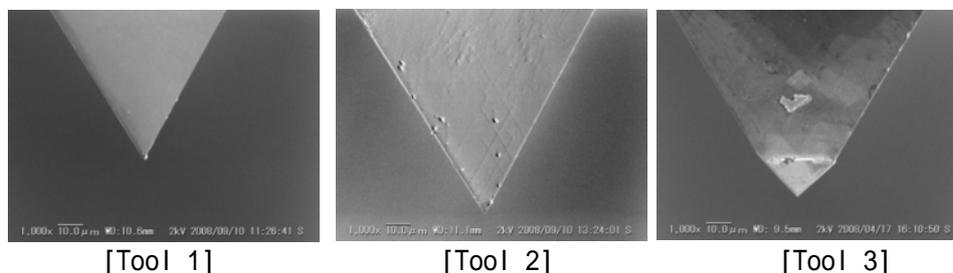


図 2-4-4 刃先の SEM 写真（×1000）

## 2-4-2 実験方法

### 2-4-2-1 アルミニウムの旋削試験

実験に使用した工作機械、加工方式、被削材料および評価方法を以下に示す。

加工機械：超精密加工機 NPIC（ナガセインテグレックス社製）

加工方式：端面旋削（縦型）

被加工材：高純度アルミニウム（99.99%+Mg、日本軽金属社製） 90 / 13mm

評価方法：摩耗観察（工具先端の SEM 観察と加工溝形状の共焦点顕微鏡測定）

実験の様子を図 2-4-5 に示す。円筒（リング）形状の被削材を超精密加工機の C 軸中心に固定し、C 軸の回転機能を利用して旋削加工した。加工条件を以下に示す。1 面加工の切削距離は約 2.5 k m である。

被削材 (C 軸) 回転数  $N : 200 \text{ min}^{-1}$   
 切削速度  $V : 54\text{max} \sim 8\text{min} \text{ m/min}$   
 切込量 (Z 軸ピッチ)  $d : 0.05 \text{ mm}$   
 送り量 (X 軸移動速度)  $f : 0.005 \text{ mm/rev} (F = 1 \text{ mm/min})$   
 クーラント : 約  $1 \text{ cc/hour}$

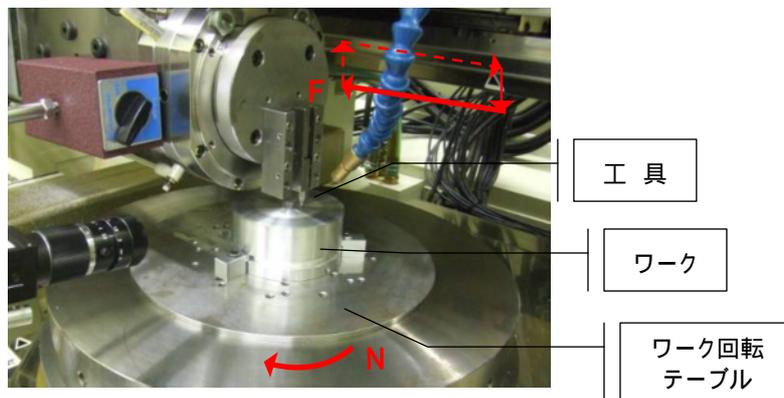


図 2-4-5 加工の様子

#### 2-4-2-2 ガラスのシェーパ加工試験

実験に使用した工作機械、加工方式、被削材料および評価方法を以下に示す。

加工機械：超精密加工機 NPIC (ナガセインテグレックス社製)

加工方式：シェーパ加工

被加工材：青板 (ソーダ) ガラス、 $50 \times 50\text{mm}$

評価方法：摩耗観察 (工具先端の SEM 観察と加工溝形状の共焦点顕微鏡測定)

実験の様子を図 2-4-6 に示す。板形状の被削材を超精密加工機テーブルに固定し、Z 軸に固定したバイトによるシェーパ加工を行った。加工条件を以下に示す。切削長さは約  $25\text{m}$  (約  $5000\text{Pass}$ )

切削速度 (Y 軸移動速度) :  $2000 \text{ mm/min}$

切込量 (Z 軸ピッチ) :  $0.001 \text{ mm} (\times 10 \text{ 回} = \text{Total} 0.01\text{mm})$

送り量 (X 軸移動ピッチ) :  $0.002 \text{ mm}$

クーラント : ドライ

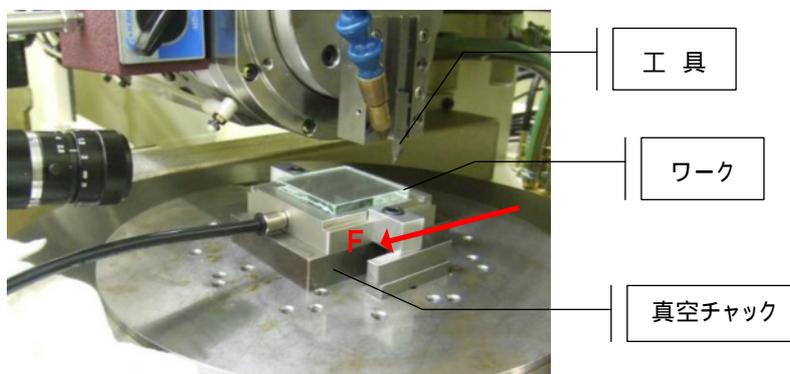


図 2-4-6 加工の様子

### 2-4-3 実験結果

#### 2-4-3-1 アルミニウムの旋削試験による工具摩耗、加工面性状の比較

アルミニウム円筒端面を先に示した加工条件で、10面、20面、50面旋削加工ごとに工具摩耗のSEMおよび加工面性状のCCD顕微鏡観察した結果を3種の工具ごとに示す。実験の目的が工具摩耗の比較であることから、切込み量を $50\mu\text{m}$ と比較的大きな値とした。したがって、切削面の性状は鏡面を呈していない。さらに、多結晶ダイヤモンド工具では先端角 $60^\circ$ の切れ刃部以上の切込み量であったためにやや不安定な切削になっていたようである。

それぞれの工具の摩耗を正確に測定することは困難であるため、SEM画像から判断した。3種の工具とも工具摩耗はほぼ生じていない。僅かに多結晶ダイヤモンド工具の切れ刃の摩耗が多く見受けられる程度であった。したがって、本実験ではダイヤモンドの摩耗方位の差異を顕著に得ることはできなかった。

また、本実験ではオイルミストを付与しているが、その油量や供給の詳細において30数時間の間では不安定であったため、一概には比較できないものの、単結晶ダイヤモンド工具と比較して多結晶ダイヤモンド工具への被削材の付着が多く認められる。多結晶ダイヤモンド工具製作時の研磨が困難でFIB加工を採用していることが起因している可能性が予想される。

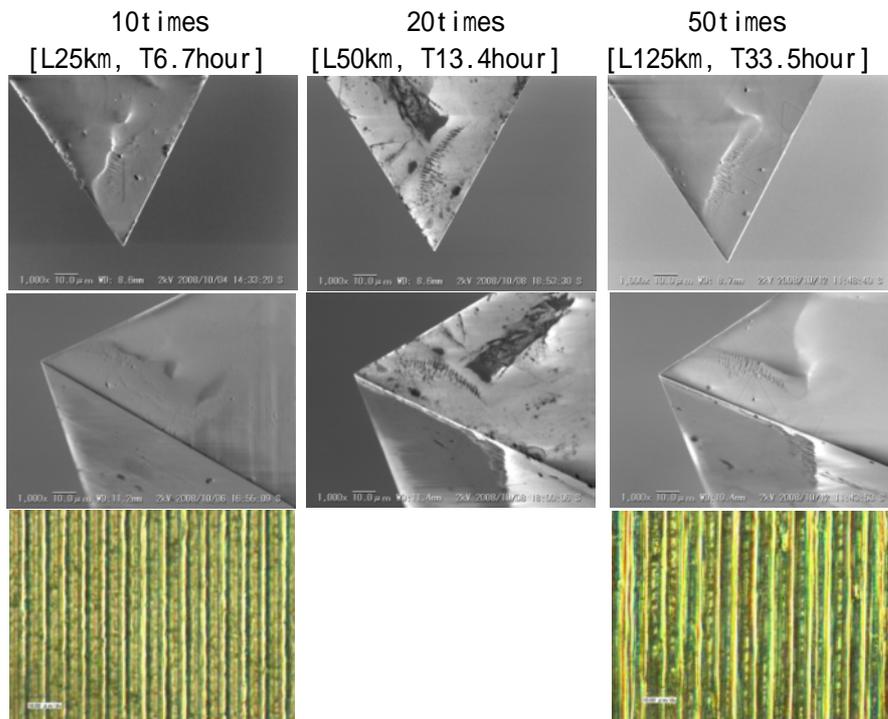


図 2-4-7 [Tool 1]の工具摩耗と加工面性状

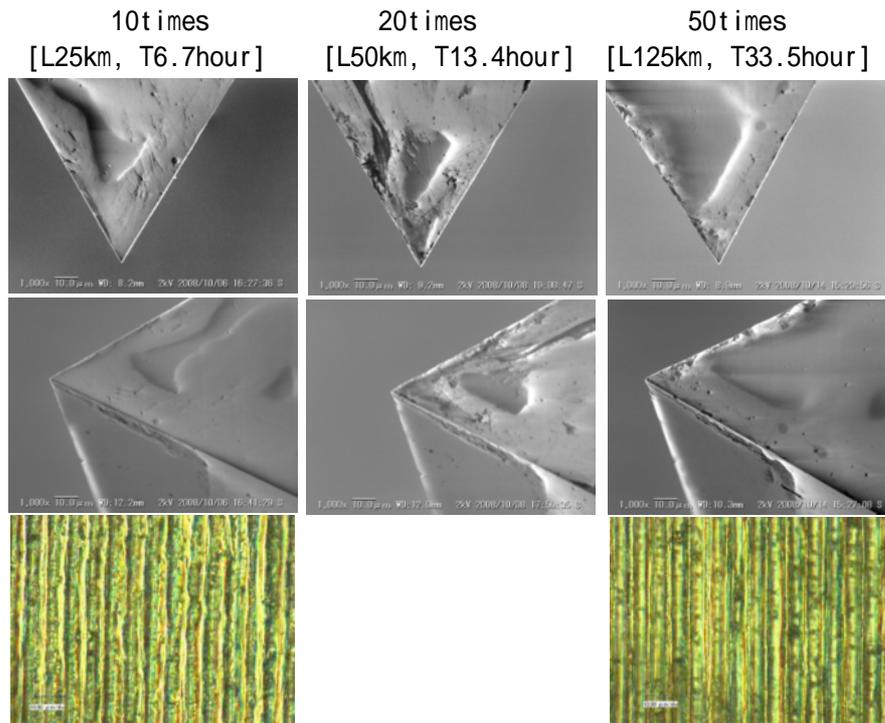


図 2-4-8 [Tool 2]の工具摩耗と加工面性状

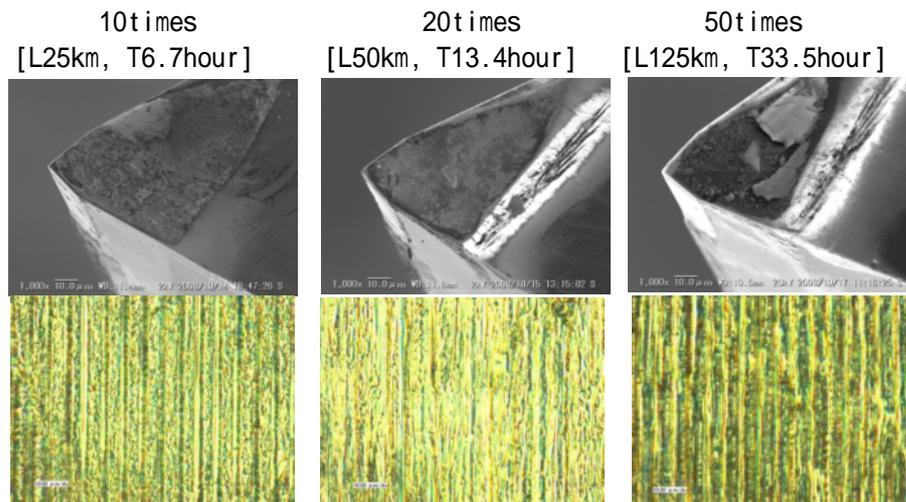


図 2-4-9 [Tool 3]の工具摩耗と加工面性状

#### 2-4-3-2 アルミニウムの旋削試験後の工具先端の摩耗状況（溝加工形状の測定結果）

2-4-2 に示したように 3 種の工具摩耗に大差は観察できなかった。そこで、再度 3 種の工具を用いて、図 2-4-10 に示す被削材を僅かに切削（シェーパ加工）し、その加工形状から摩耗の様子を推測することにした。ただし、新品時に同様な加工はしておらず、あくまでも参考のテストになる。

切削経路を図 2-4-10 に示す。切込み量を  $d : 50 \quad 2 \quad 2 \quad 0 \quad 1 \mu\text{m}$  と変化させ最終的に V 溝が形成されるようにした。加工後の形状を共焦点顕微鏡で観察した結果を図 2-4-11 ~ 13 に示す。この結果からも、工具摩耗の差異を明確に観察することはできな

かった。ただし、図 2-4-14 ( 図 2-4-11 ~ 13 の赤破線丸を拡大して抜き出した ) に示すように、V 溝先端部の鋭利さは Tool2 が最もシャープであるように観察できる。

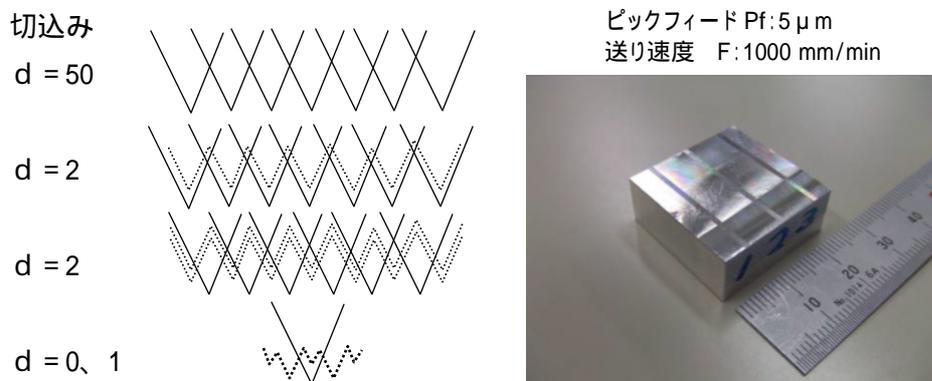


図 2-4-10 加工経路とサンプルの様子

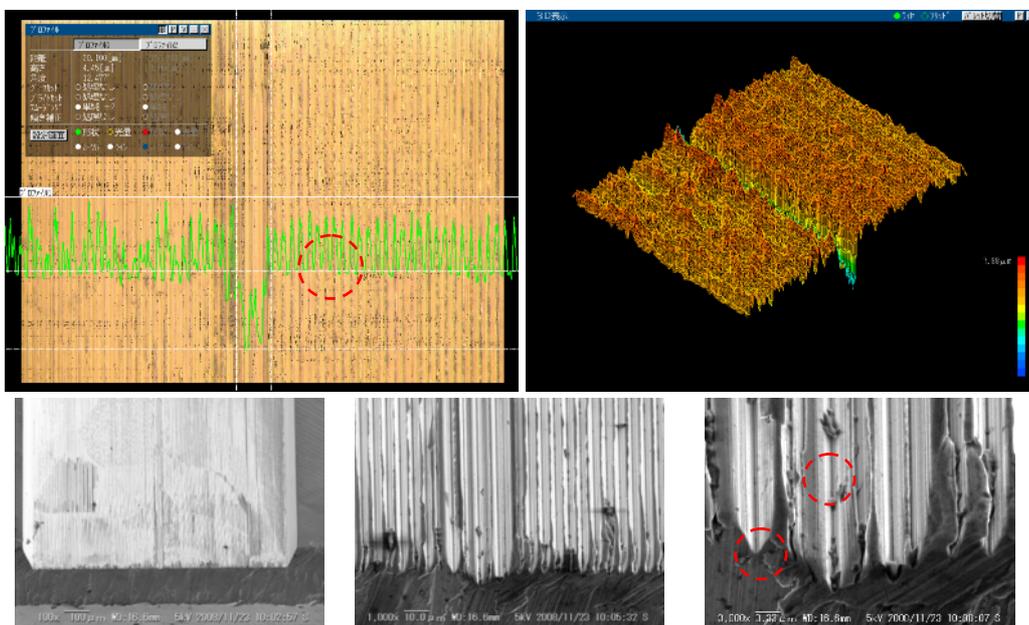
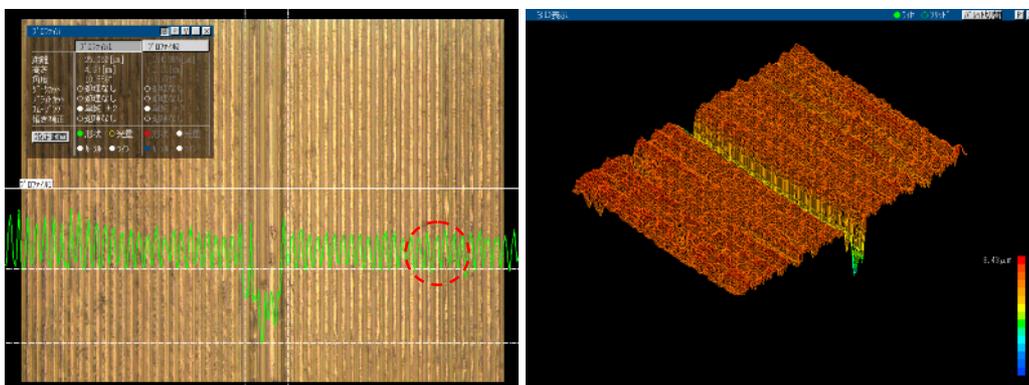


図 2-4-11 加工形状の観察結果 ( Tool 1 )



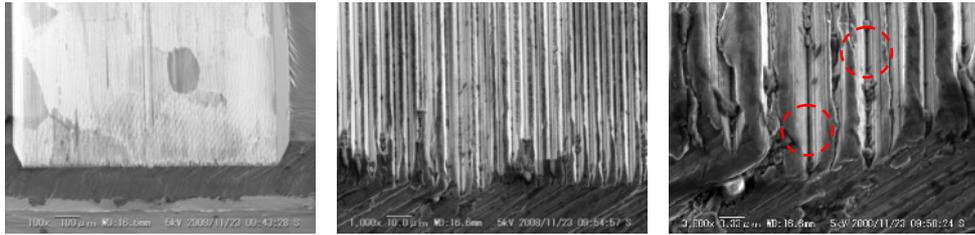


図 2-4-12 加工形状の観察結果 (Tool 2)

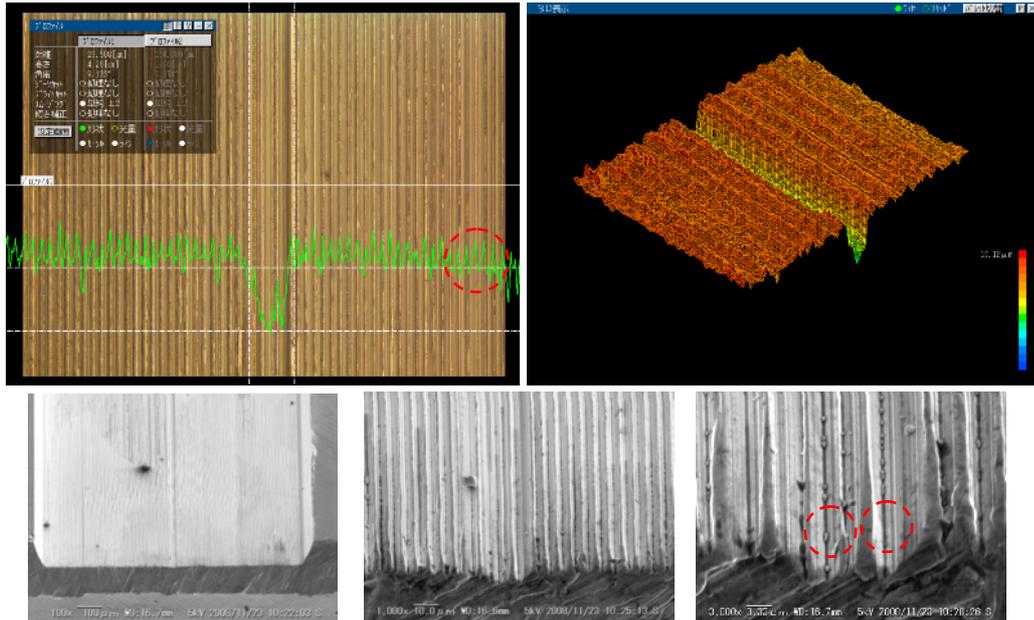


図 2-4-13 加工形状の観察結果 (Tool 3)

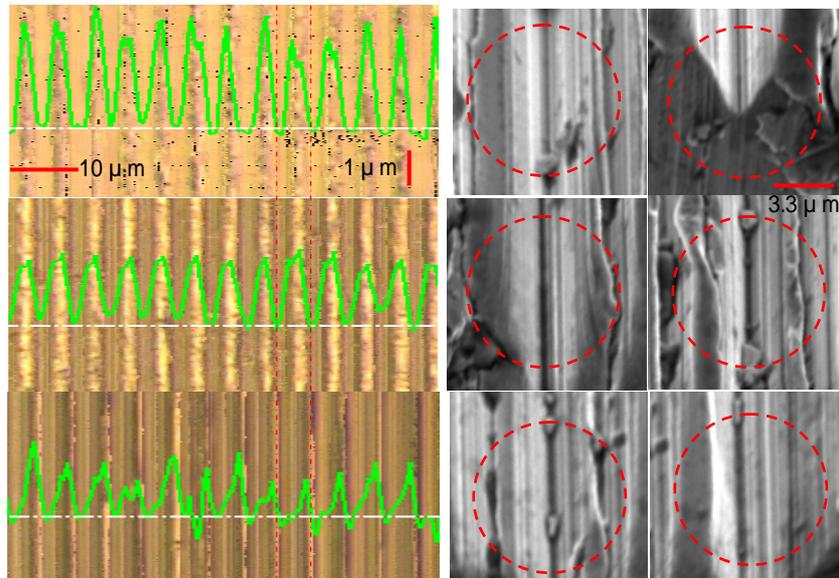


図 2-4-14 3種の工具の加工溝形状からの比較結果

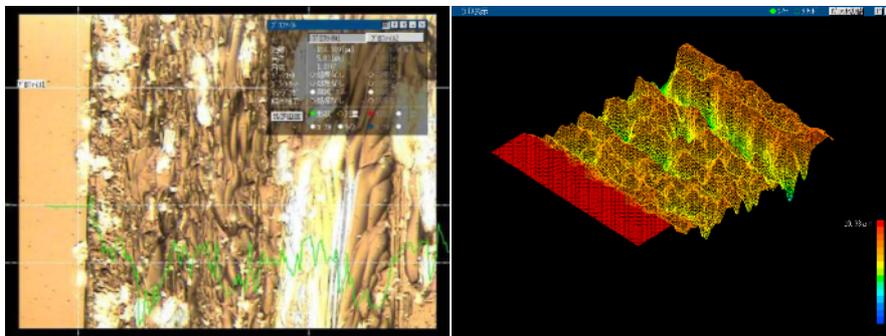
2-4-4 ガラスのシェーパ加工試験による工具摩耗、加工面性状の比較

加工面の様子を共焦点顕微鏡で観察した結果を図 2-4-15 に示す。いずれも脆性破砕

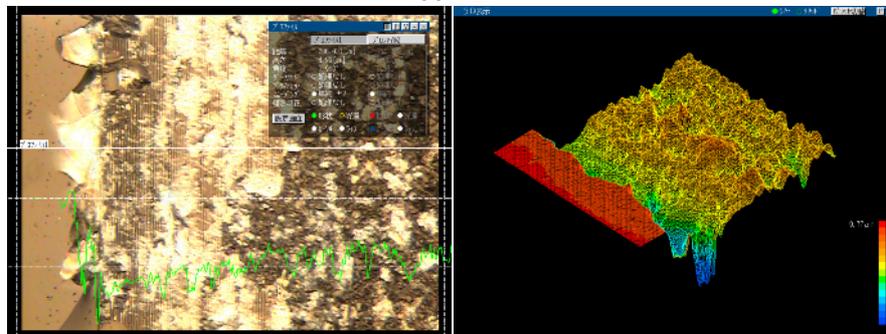
した面であり、延性モード加工は実現していない。ただし、Tool 2 の加工面の一部は延性モード加工が観られるが、これは次に示す工具摩耗が大きく、結果的に切込み量が小さくなったために実現したものと推測できる。被削材の平坦度が本実験のマイクロメータオーダの切込みに対して十分でなかったために、3種の工具で除去体積や切削距離にバラツキが生じてしまったと思われる。加えて、図 2-4-16 に示すようにいずれの工具も予想以上に摩耗が大きくなったため、正確な工具摩耗量の比較を行うことは困難であることが分った。

図 2-4-16 に示す SEM 観察結果より工具摩耗の差異を比較してみると、Tool 1 < Tool 2 < Tool 3 の順に摩耗が大きくなっていることが分る。この結果からは、開発工具の摩耗に対する優位性を観察することはできなかった。

Tool 1



Tool 2



Tool 3

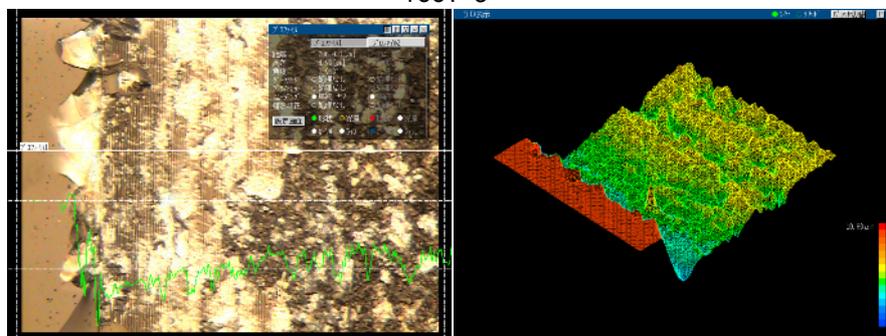


図 2-4-15 ガラス切削面の様子

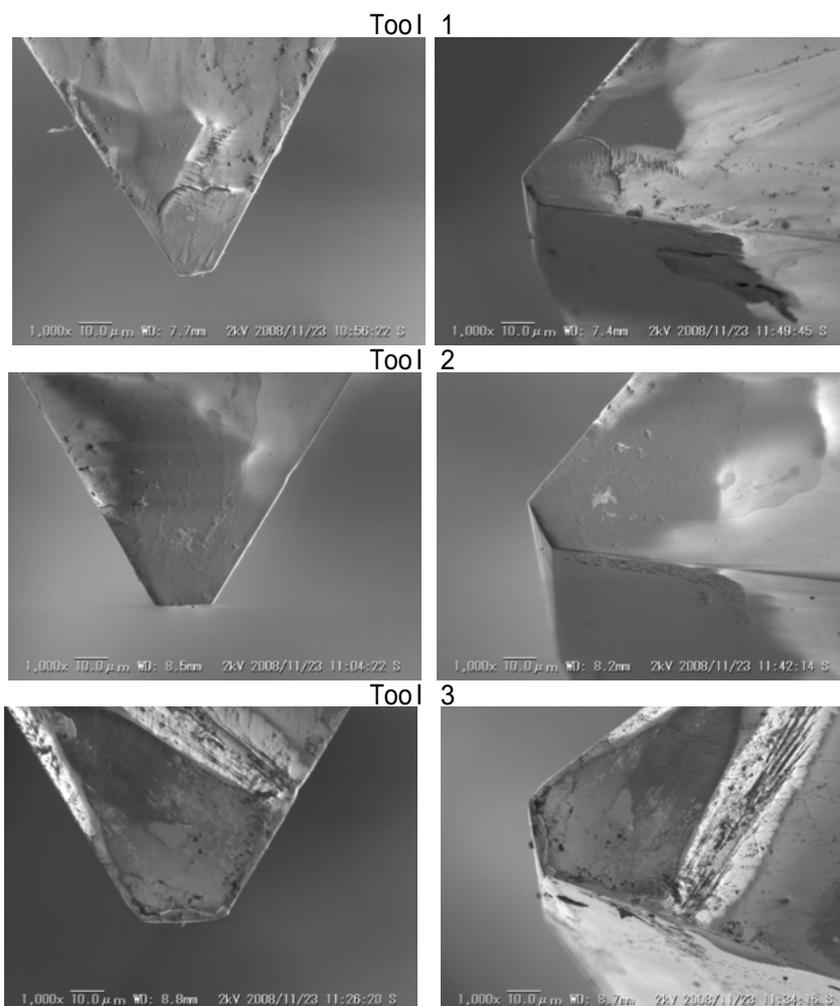


図 2-4-16 ガラス切削後の工具摩耗の SEM 観察結果

#### 2-4-5 考察とまとめ

本工具摩耗の比較実験は、アルミニウム切削では工具摩耗がほとんど生じず、次に実施したソーダガラスの切削では工具摩耗が予想以上に進行し過ぎてしまった。その結果、3種の工具摩耗の比較をすることが困難であり、開発したすくい面を{110}の耐摩耗方位とした Tool 2、多結晶ダイヤモンド工具 Tool 3の従来工具に対する工具摩耗の優位性を明確に示すことはできなかった。しかしながら、一部の企業において試用した評価で大幅な工具寿命延長が実現できたとの事例があること、工具を製作する際の研磨においてその効率が低下することから、適切な使用状況下であれば開発工具の優位性が得られるものと確信する。

## 2-5 高純度 cBN エンドミルによる金型鋼材のミガキレス加工の試み

小型レンズ金型の加工において、磨き(一般に手作業)工程の省略が求められている。つまり、切削加工の仕上面精度(粗さ)を磨きのレベルまで向上させることが望まれている。マイクロ・ダイヤモンド(株)のユーザ企業において、HP-cBN エンドミルを用い、かつ高速ミーリングにより加工面粗さが改善できたとの報告を受け、より一層の表面粗さの改善を実現し、磨きレス加工の実現を目指す。具体的には、工具回転数を  $12 \text{万} \text{ min}^{-1}$  まで高速化することで、表面粗さがどの程度改善可能かについて調査を行う。

### 2-5-1 実験方法

加工条件：工具回転数  $N=120,000 \text{ min}^{-1}$ 、軸方向切込み量  $A_d=0.01\text{mm}$  程度、  
半径方向切込み量  $P_f=0.01\text{mm}$  程度、送り  $F=600 \sim 1000\text{mm/min}$   
部品 A(WC-Co)：超硬工具で面だし ( $A_d=0.01\text{mm}$  で 3 面) 後、  
 $P_f=0.01\text{mm}$  と  $0.02\text{mm}$  で仕上げ加工 (1/2 面づつ)、  
 $S_z=0.0025\text{mm/tooth}$  ( $N=120,000$ 、 $F=600$ 、2 枚刃)  
部品 B(HP-cBN)：超硬工具で面だし後、HP-cBN 工具に取替え、  
 $A_d=0.01\text{mm}$  で 2 面加工後、 $P_f=0.01\text{mm}$  と  $0.005\text{mm}$  で仕上げ加工  
 $S_z=0.0083\text{mm/tooth}$  ( $N=120,000$ 、 $F=1000$ 、1 枚刃)

加工機：AZ150 (ソディック製)〔図 1〕

加工形状：丸棒端面の平面仕上げ〔図 2〕

使用工具：R0.2mmBEM、コーテッド超硬 (MSB230G2、NS 製)

R0.2mm 半月 EM、HP-cBN (P08204SA-1、MDC 製)〔図 3〕

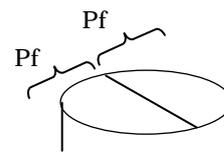


図 2-5-1 使用機外観

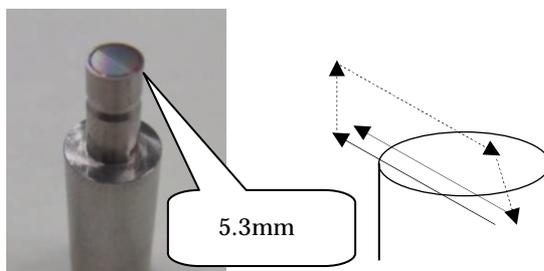


図 2-5-2 被削材の様子と加工経路

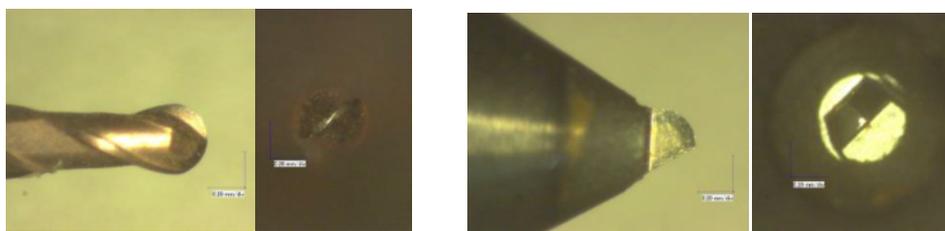


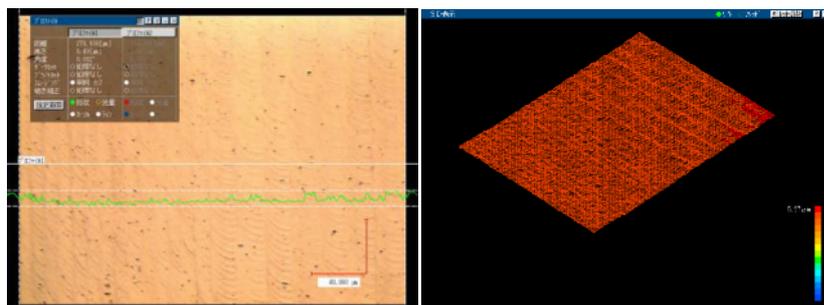
図 2-5-3 使用した工具 (左：超硬、右：HP-cBN)

### 2-5-2 実験結果 (加工面の様子)

超深度表面形状測定顕微鏡 (VK8500 キーエンス製) により観察した加工面の性状を

以下に示す。

部品 A(WC-Co)



部品 B(HP-cBN)

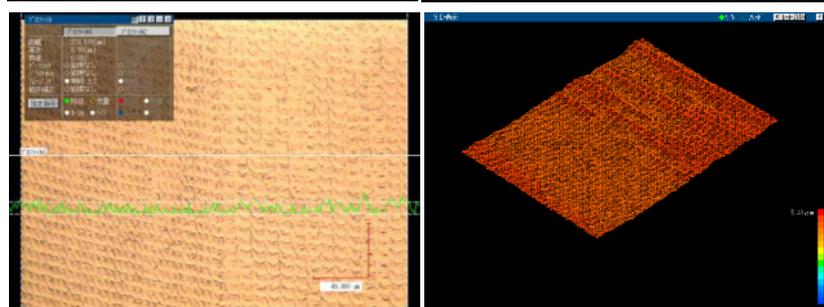
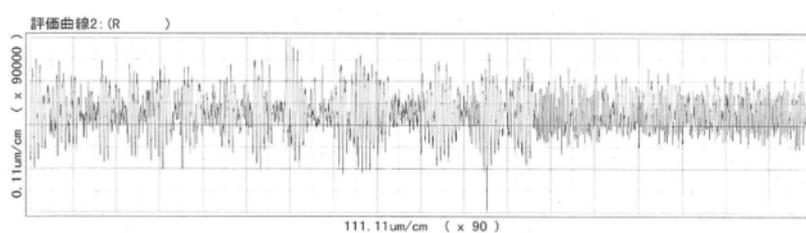


図 2-5-4 加工面性状（水平面加工）

### 2-5-3 実験結果（表面粗さ）

フォームトレーサー（SV-C624 ミットヨ製）により測定した切削面粗さを示す。

部品 A(WC-Co)



部品 B(HP-cBN)

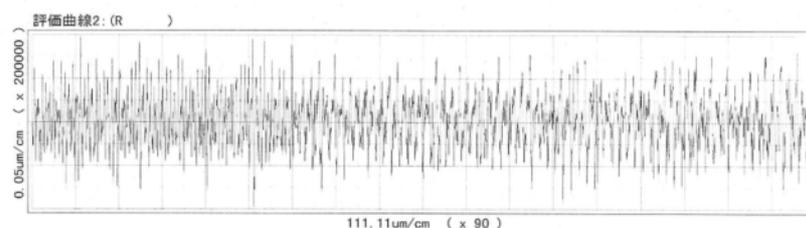


図 2-5-5 切削面粗さ（水平面加工）

### 2-5-4 傾斜加工の適用実験

小型レンズ金型の加工において、磨きレスの可能性を調査するため、表面粗さの改善を目標に加工テストを実施した。先の実験では、ボールエンドミルの中心付近を使用した水平面の加工において、工具回転数を  $12 \text{万} \text{ min}^{-1}$  まで高速化した際に、最大高さ  $R_y$  は  $0.2 \mu\text{m}$  程度の粗さを得ることができた。本実験では、より良好な切削条件となる斜面の加工において、その効果を確認することを目的とした。

### 2-5-5 傾斜加工の実験方法

加工条件：被削材の傾斜角度  $45^\circ$

工具回転数  $N=120,000 \text{ min}^{-1}$ 、軸方向切込み量  $A_d=0.01\text{mm}$  程度、  
半径方向切込み量  $P_f=0.01\text{mm}$  程度、送り  $F=600 \sim 1000\text{mm/min}$

加工機：AZ150（ソディック製）

加工形状：丸棒端面の平面仕上げ、単純一方向平面加工（加工経路を図6に示す）

使用工具：R0.2mmBEM、コーテッド超硬（MSB230G2、NS製）

R0.2mm 半月 EM、HP-cBN（P08204SA-1、MDC製）

加工の様子を図6に、加工後のワークの様子を図7に示す。

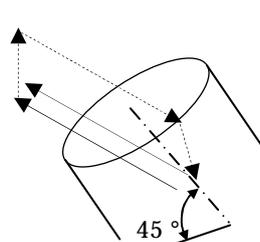


図 2-5-6 加工経路とワークのセッティング

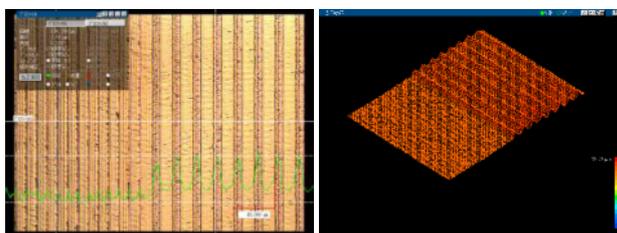
図 2-5-7 加工面の様子

#### 2-5-6 傾斜加工の実験結果

コーテッド超硬ボールエンドミルを使用して面だし加工を行った際の切削面性状と粗さ曲線を図 2-5-8、図 2-5-9 に示す。  $P_f=0.02\text{mm}$  と  $0.01\text{mm}$  で加工した面の境界付近を測定している。  $P_f=0.02\text{mm}$  では理論粗さ  $R_{th}=(0.02)^2/8/0.2=0.25 \mu\text{m}$  に対して 3 倍、  $P_f=0.01\text{mm}$  では理論粗さ  $R_{th}=(0.01)^2/8/0.2=0.063 \mu\text{m}$  に対して 4 倍ほど大きな粗さになっているものの、規則的なカスプハイトが明確に現れており、良好な切削が実現できていると言える。

次に、HP-cBN 半月エンドミル工具で加工した切削面性状と粗さ曲線を同様に図 2-4-8、図 2-5-9 に示す。同様に  $P_f=0.005\text{mm}$  と  $0.01\text{mm}$  で加工した境界付近を測定している。一刃送り量  $S_z$  が  $0.005\text{mm}$  であることも影響していると考えられるが ( $P_f=S_f$ )、明瞭なカスプハイトは観られないが、  $R_y=0.15 \mu\text{m}$ 、  $R_a=0.024 \mu\text{m}$  の良好な切削面粗さが得られた。

部品 A(WC-Co)



部品 B(HP-cBN)

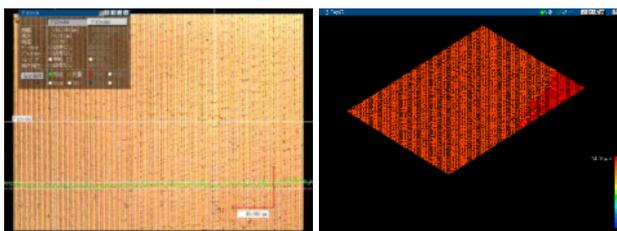
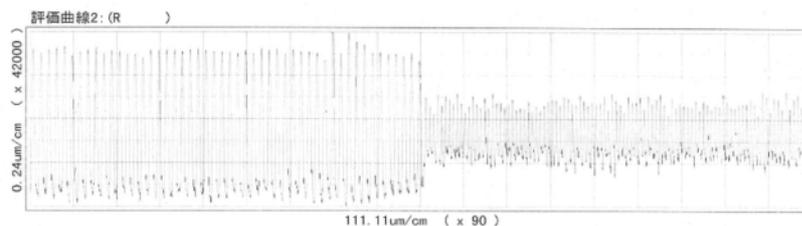


図 2-5-8 加工面性状（斜面面加工）

部品 A(WC-Co)



部品 B(HP-cBN)

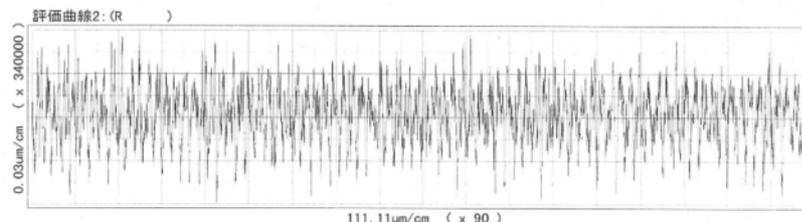


図 2-5-9 切削面粗さ (斜面面加工)

### 2-5-7 結果の考察

理論 (幾何学的) 粗さは以下のとおりであり、得られた面粗さは理論粗さに比較して大きな値になっている。これは、ボールエンドミルの中心付近の切れ刃を使用した水平面の加工であること、Ad, Pf, Sz の何れもかなり小さいことなどから、理想的な切削は困難であり、また振動などの粗さの悪化要因の影響も大きいことから、ある程度やむを得ない結果と思われる。しかしながら、最大粗さ  $R_y=0.2\mu\text{m}$  前後が得られたことは十分高精度な切削が実現できたと評価できる。

超硬 :  $R_{th}(Pf)=(0.01)^2/8/0.2=0.0625\mu\text{m}$ ,  $(0.02)^2/8/0.2=0.25\mu\text{m}$

$R_{th}(Sf)=(0.0025)^2/8/0.2=0.0039\mu\text{m}$

HP-cBN :  $R_{th}(Pf)=(0.005)^2/8/0.2=0.0156$ ,  $(0.01)^2/8/0.2=0.0625\mu\text{m}$

$R_{th}(Sf)=(0.0083)^2/8\cdot 0.2=0.043\mu\text{m}$

次に、ボールエンドミルの中心部を使用しない傾斜面を加工した場合には、切削速度の高い条件で加工ができるとともに、1枚刃の工具では振れ回りの影響もほぼ無視されることから切削面粗さが改善できている。 $R_y=0.12\mu\text{m}$  をきる良好な鏡面が得られた。

### 用語説明

#### カスプハイト (P.33)

「ボールエンドミル工具を用いた加工において、工具形状(ボール半径)および加工条件(ピックフィード)から幾何学的に計算される加工面の理論粗さ(最大高さ)」

## 2-6 レーザー加工と切削加工を利用したマイクロ流路形状の製作

微細形状創成加工においては様々な加工方法の利用が考えられるが、本プロジェクトではサブミリオードの微細形状創成に最適と期待される切削加工に着目している。具体的には、微小径回転工具を用いた高速ミーリング技術の適用であり、微小径工具の開発が必須となる。加えて、高精度な加工の実現には切削工具の摩耗を最小限に抑える必要があり、工具素材にはダイヤモンド（単結晶、多結晶、焼結材）およびcBNが選択される。一方、これらの工具素材を用いても、工具摩耗をゼロにすることは不可能である。したがって、切削工具への負担を少なくする加工法の選択が重要となり、本実験ではレーザー加工の複合を考える。すなわち、レーザー加工によって前加工を行った後に切削加工により仕上げる。レーザー加工の優れた加工スピードで前加工を行い、少ない除去量を切削加工で仕上げることにより、切削工具の摩耗を最小限に抑えることを目指す。本実験では、マイクロ流路の作製を意識し、ガラス基板上にY字形の溝を創成することにした。ガラス基板は一般的には石英ガラスが用いられるようである。これは、汎用ガラス素材とダイヤモンド工具との相性が悪く、化学的作用により摩耗が増大するためであり、一般的には利用されない。本実験では、一般的で安価な素材を利用することの利点とレーザー加工では石英ガラスは加工困難であることの2点を考慮して、顕微鏡観察用プレパラート(白板ガラス)を選択した。

### 2-6-1 レーザー加工によるマイクロ流路作製

#### 1) レーザー加工条件

エキシマレーザーを用いた。その他の加工条件の詳細は公開せず

#### 2) 加工結果（加工後の断面形状）

加工後の顕微鏡写真および断面形状の測定結果を以下に示す。

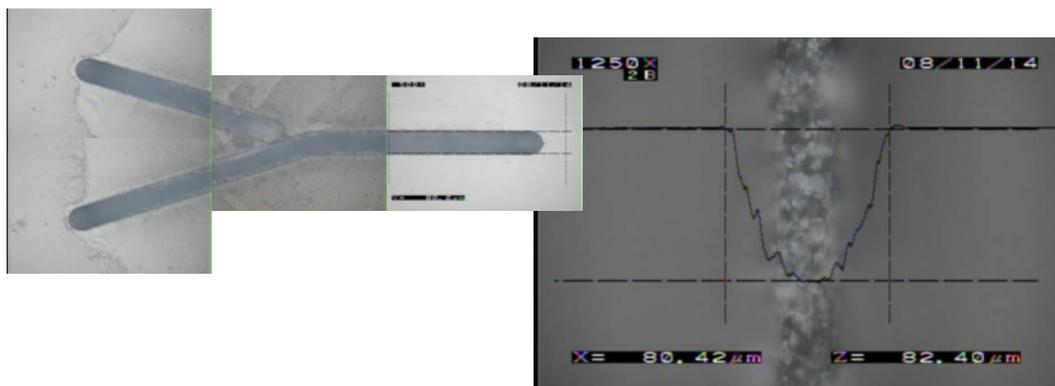


図 2-6-1 レーザー加工後の様子（右：溝の断面形状）

### 2-6-2 切削加工実験準備

#### 2-6-2-1 ワーク固定治具加工

前加工を施したワークとの位置決めを正確に行うため、実験に使用する加工機上でワーク固定用具を加工した。

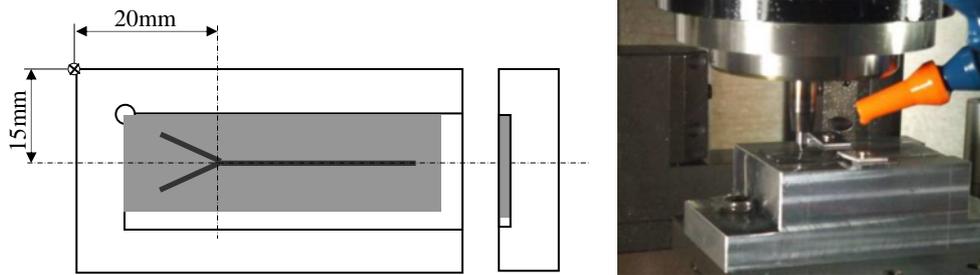


図 2-6-2 ワークの固定時具と加工方法

### 2-6-2-2 工具形状と加工溝形状

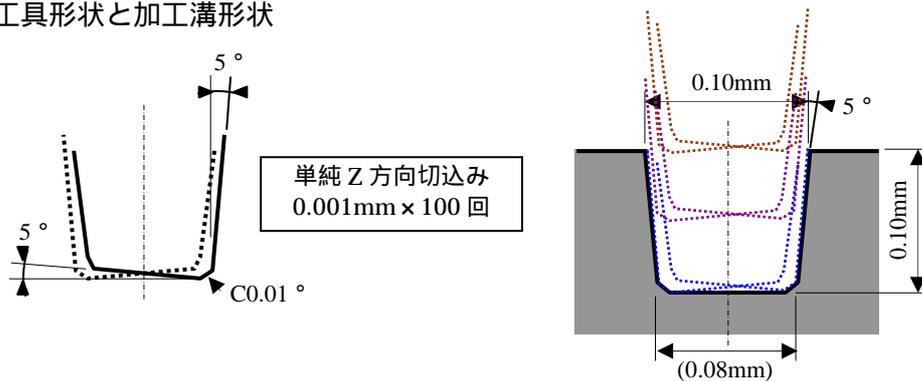


図 2-6-3 工具形状と加工溝形状

### 2-6-3 切削実験方法

～ の条件にて加工テストを実施する。使用する工具は単結晶ダイヤモンドエンドミルおよびバインダレス cBN エンドミルとし、使用する工作機械は高速ミーリング機および超精密加工機とする。

工 具：ASQ1 f - No1

ワーク：レーザー加工済み

加工機：AZ150

加工条件：Ad=0.001mm × 100 回 = 0.1mm、Rd=0.01mm

F=120mm/min ( 0.001mm/rev. )

N=120,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

工 具：ASQ1 f - No3

ワーク：レーザー加工済み

加工機：AZ150

加工条件：Ad=0.001mm × 30 回 ( 5 回はアプローチ ) = 0.025mm、Rd=0.01mm

F=24mm/min ( 0.0002mm/rev. )

N=120,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

工 具：ASQ1 f - No4

ワーク：未加工品

加工機：AZ150

加工条件：Ad=0.001mm × 30 回 ( 5 回はアプローチ ) = 0.025mm、Rd=0.01mm

F=24mm/min ( 0.0002mm/rev. )

N=120,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

工 具：HSQ ( cBN ) - No1

ワーク：レーザー加工済み

加工機：AZ150

加工条件：Ad=0.001mm × 30 回 ( 5 回はアプローチ ) = 0.025mm、Rd=0.01mm

F=24mm/min ( 0.0002mm/rev. )

N=120,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

工 具：HSQ ( cBN ) - No2

ワーク：レーザー加工済み

加工機：AZ150

加工条件：Ad=0.001mm × 55 回 ( 5 回はアプローチ ) = 0.055mm、Rd=0.01mm

F=24mm/min ( 0.0002mm/rev. )

N=120,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

工 具：ASQ1 f - No2

ワーク：レーザー加工済み

加工機：NPIC

加工条件：Ad=0.001mm × 30 回 ( トータル切込み特定できず )、Rd=0.01mm

F=16mm/min ( 0.001mm/rev. )

N=80,000min-1、ダウン加工、オイルミスト

## 2-6-4 加工結果

### 2-6-4-1 AZ 使用時の工具計測結果

工具 No	工具長 H		工具径 D			
	加工前	加工後	加工前	加工後		
1 . ASQ	-27.616	-27.614	0.040	0.040		
2 . ASQ	-26.716	-26.713	0.048	0.043		
3 . ASQ	-27.747	折損	0.043	折損		
4 . HSQ	-28.054	折損	0.040	折損		
5 . HSQ	-27.473	-27.473	折損	0.037	0.037	折損

### 2-6-4-2 加工後の工具 SEM 写真

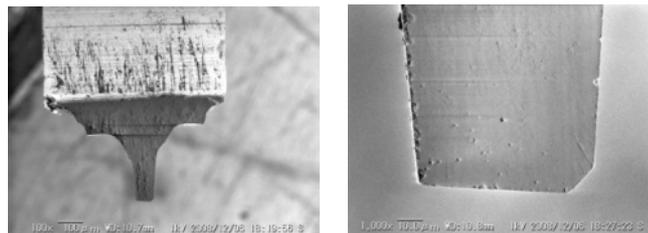


図 2-6-4 ASQ1f 未使用品

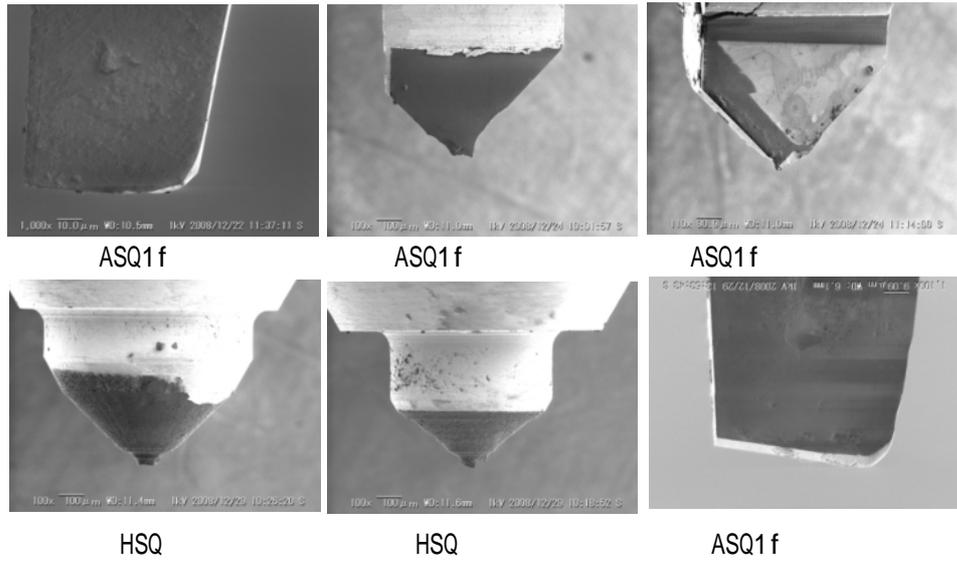


図 2-6-5 加工後の工具 SEM 写真

2-6-4-3 加工形状観察（共焦点顕微鏡）

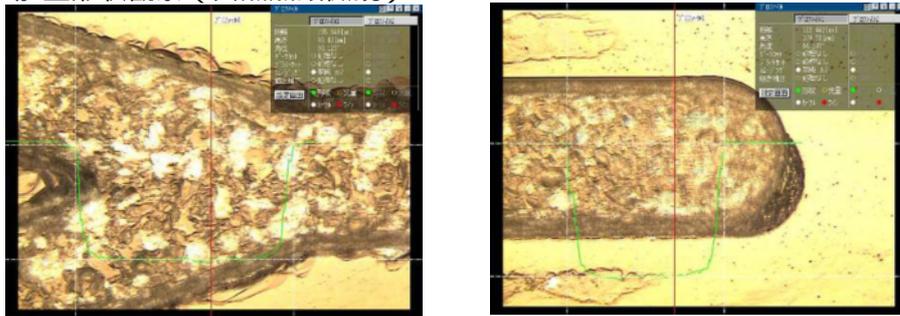


図 2-6-6 実験 : ASQ1f 、レーザー加工品、 $Ad=0.100\text{mm}$

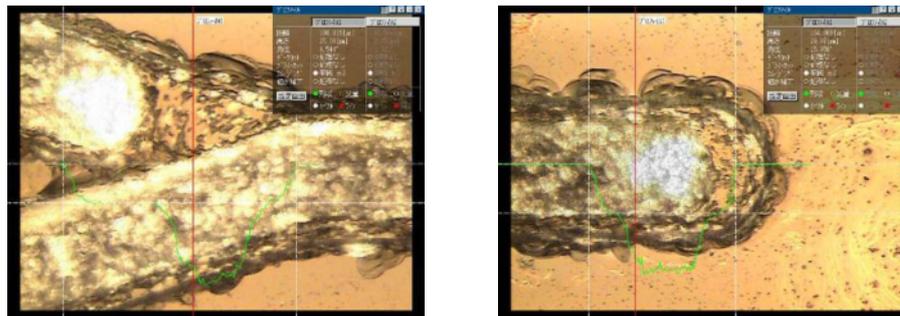


図 2-6-7 実験 : ASQ1f 、レーザー加工品、 $Ad=0.030\text{mm}$



図 2-6-8 実験 : ASQ1f 、レーザー未加工品、 $Ad=0.030\text{mm}$

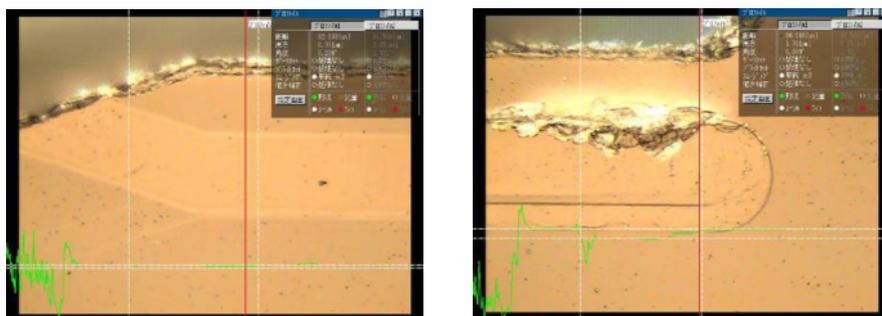


図 2-6-9 実験 : HSQ 、レーザー未加工品、 $Ad=0.030\text{mm}$

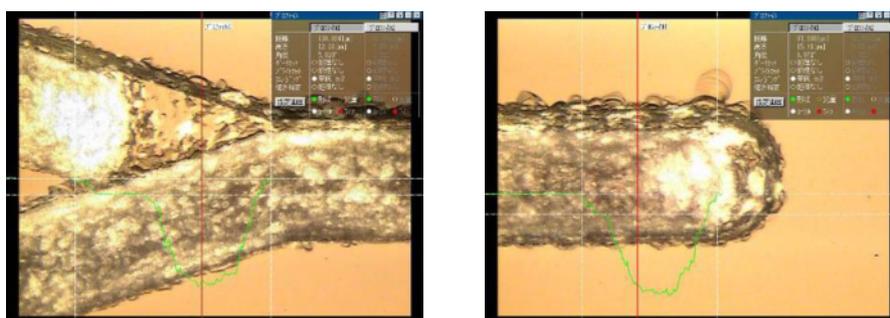


図 2-6-10 実験 : HSQ 、レーザー加工品、 $Ad=0.030\text{mm}$

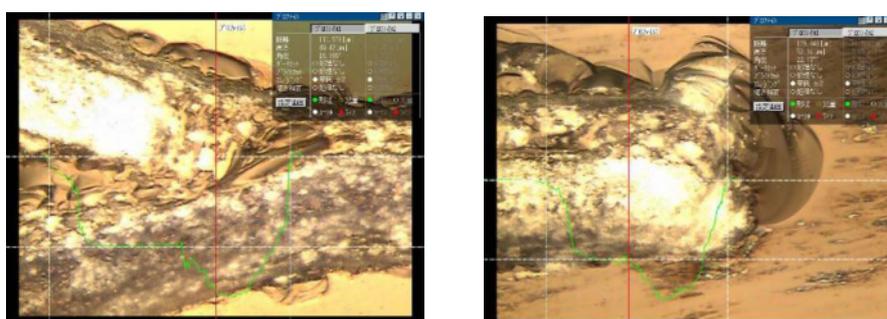


図 2-6-11 実験 : ASQ1f 、レーザー加工品、 $Ad=0.050\text{mm}$

#### 2-6-5 考察 (得られた知見)

1. 工具製作は極めて困難を伴った。従来から製作されている工具に比較して刃長が極めて長い場合工具製作時に容易に工具が折損してしまう。刃長  $0.1\text{mm}$  を確保することを優先し、かつ工具剛性を持たせるために、テーパ (片角度  $5^\circ$ ) を許容した。

2. 上記の理由から、加工深さが大きくなった場合でも全ての外周刃が被削材と干渉することになり、大きな切削力が工具に作用することになる。
3. 上記の場合でも、工具は折損せずに加工は完了できた（実験）。
4. しかしながら、加工精度の点で課題が見出された。すなわち、未加工部との境界、加工溝のエッジ部に大きなチッピングが発生した。この原因として、切削条件が適切でない（切込み量が過大）前加工のレーザー加工による加工ダメージが影響したことが推測される。
5. 総切込み量を  $30\mu\text{m}$  程度にした実験 においてもチッピングの減少などの効果は得られない。レーザー未加工品の加工実験 ではチッピングの発生は極めて少なく良好な加工が実現できた。以上から、レーザー加工による変質層の発生や残留応力の発生も考慮する必要が認められる。
6. cBN 工具は、良く知られている鉄系素材において被削材料との相性はダイヤモンドに勝り良好な耐摩耗特性を示す。汎用ガラス素材における同様な特性を検証することを目的に HP-cBN 工具の適用を試みた。本実験では、焼結材という低靱性のために欠損してしまったと思われる。レーザー加工による前加工で切削抵抗を低減すれば加工可能と見込んだものの良い結果は得られなかった。
7. HP-cBN 工具の切れ刃の鋭利性は当然のことながら単結晶ダイヤモンドには及ばない。しかしながら、本実験ではガラス材の延性モード加工が可能であることが分った。
8. 超精密加工機を使用した実験では、高精度なマシン特性と開発した高精度スピンドルの効果が期待されたが、先に使用した高精度マシニングセンタとほぼ同様な実験結果であった。これは、切り込み開始位置（ワーク原点位置決め用の Z 方向）の検出が困難であったため、狙い値どおりの総切込み量を実現できなかったためと思われる。

## 2-7 硬脆材料（ガラス）への微小溝ミーリング加工への振動付与効果

マイクロ流路製作を目的に、ガラス素材への溝形状加工を微小ダイヤモンドエンドミルを用いた切削加工により創成することを試みてきた。ここでは、工具の摩耗抑制、折損防止と加工精度の改善が期待できる超音波振動複合加工について調査する。

### 2-7-1 実験方法

#### 2-7-1-1 実験の様子



HICART（理研開発機） クマクラ製超音波テーブル（UST-100-20K）

図 2-7-1 使用した加工機と実験の様子

#### 2-7-1-2 加工条件

被加工材：ソーダガラス（20×60×1.1 t）

石英ガラス（25×25×1.0 t）

ベース板（ガラス）にワークをワックスで固定

工 具：PCD エンドミル（1 枚刃、0.08mm、三井刻印製）

加工条件：N=80,000min<sup>-1</sup>

F=10mm/min

オイルミスト

超音波振動出力 30%

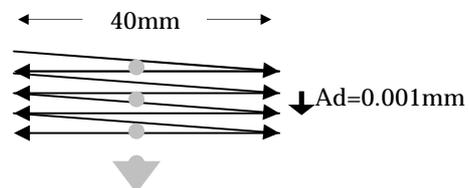


図 2-7-2 加工経路

#### 2-7-2 工具摩耗の観察（SEM 観察）

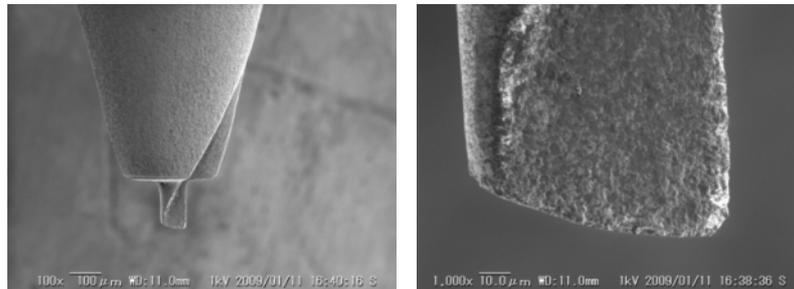
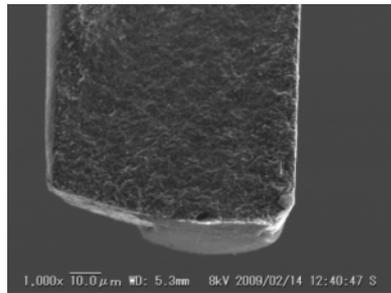
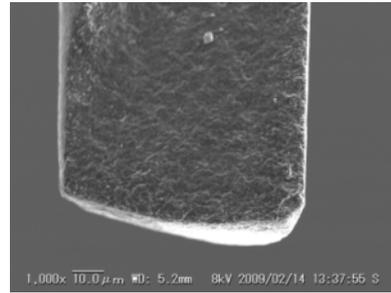


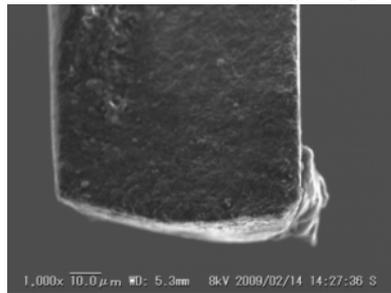
図 2-7-3 新品工具の SEM 写真



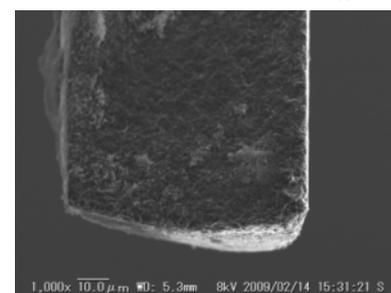
ソーダガラスを 10 パス加工後



ソーダガラスを 30 パス加工後



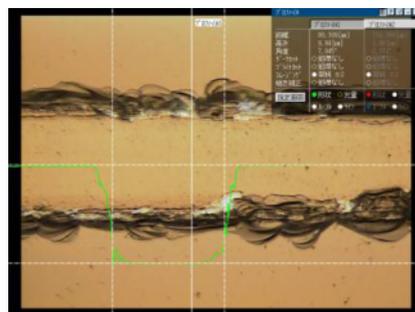
石英ガラスを 10 パス加工後



石英ガラスを 30 パス加工後

図 2-7-4 加工後の工具摩耗の様子

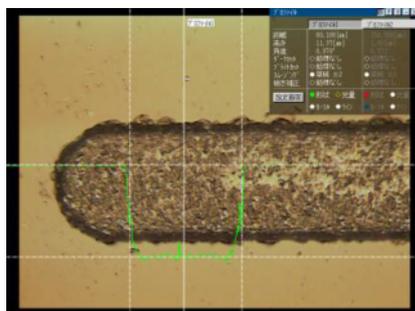
### 2-7-3 加工形状の測定



ソーダガラスを 10 パス加工後



ソーダガラスを 30 パス加工後



石英ガラスを 10 パス加工後



石英ガラスを 30 パス加工後

図 2-7-5 加工後の様子

### 2-7-4 考察

- 1) ソーダガラス、石英ガラスとも工具折損無しに加工可能を確認（振動付与の効

- 果：切削抵抗の低減)
- 2) 工具摩耗は少なく、振動付与効果絶大(切削抵抗、切削熱、切屑排出)
  - 3) 材料表層のチッピングは、ソーダガラス>石英ガラス(材料の硬度、破壊靱性値などの物性値の差異)
  - 4) 溝底面部の加工面性状は、ソーダガラスの方が良好(材料の硬度、破壊靱性値などの物性値の差異)、振動付与が加工面性状に及ぼす悪影響は不明

### 第3章 まとめ

以下に、平成20年度の得られた成果をまとめて示す。

研究開発実施内容と成果	テーマ No.
(1) 極小ドリルおよび極小エンドミルの開発(工具の長寿命化、極小径化、切れ刃形状精度(R精度、鋭利性)の追求) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工具製作技術の開発、研磨装置改良、研磨方式(研磨板と砥粒)の見直し</li> <li>・ 最小径：R25 μm エンドミル、 30 μm ドリルの達成</li> <li>・ 輪郭精度：100nm を安定的に達成、50nm も可能にした</li> <li>・ FIB 加工を利用した切れ刃創成に挑戦、回折レンズ金型加工で実用化</li> <li>・ ナノ多結晶ダイヤモンド新素材で微小R付V形バイト製作を実現</li> </ul>	-1 -2
(2) 高速高精度主軸の開発および加工技術開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 3種のダイヤモンドバイト(従来工具、摩耗方位考慮の開発品、多結晶)の工具摩耗を比較し、開発工具の優位性を確認した</li> <li>・ 開発した極小R付エンドミルをアクリル材へのディンプル、R溝切削に適用し、工具仕様が適正であることを確認した</li> <li>・ マイクロレンズ金型のミガキレス加工に高純度cBNエンドミルを適用、高速回転による高能率化と高精度化を確認した</li> </ul>	-3 -1 -3 -1
(3) 微細形状創成のための加工技術開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ マイクロ流路を模した溝形状加工にレーザー加工(前加工)と切削加工(仕上げ加工)を複合する効果を調査し、その効果を確認した</li> <li>・ 硬脆材料(ガラス)のミーリング加工への振動付与効果を確認した</li> </ul>	-3 -1 -2