

学位論文 博士（工学）

3次元サブマイクロ・ナノ機械加工システムと
それを用いた硬脆性材料の高精度加工に
関する研究

2012年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

中元一雄

目 次

第 1 章 諸論	1
1-1 序言	1
1-2 研究の背景	1
1-2-1 精密切削加工機の変遷と現在要求される性能, 機能	1
1-2-2 マイクロPCDエンドミルの役割と工具の製作	4
1-2-3 硬脆性材料のマイクロPCDエンドミルによる加工特性	6
1-3 本研究の目的	8
1-4 本論文の構成	8
第 2 章 微細 3 次元形状加工用超精密加工機の開発	9
2-1 序言	9
2-2 加工機の性能・機能の目標	9
2-3 微細 3 次元形状加工用超精密加工機の要素技術	10
2-3-1 高精度, 高加速度を実現する加工機の構造と材料	10
2-3-2 転がり直動案内の改良	14
2-3-3 ACコアレスリニアモータによる高精度駆動系	17
2-3-4 カウンタ動作による振動抑制機構	18
2-3-5 微小径工具に対応した超高速主軸	21
2-3-6 焼きばめによるツーリングシステム	22
2-4 加工機の評価	24
2-4-1 2次元スケールによる微小コーナ運動の評価	24
2-4-2 2次元スケールによる円弧運動の評価	25

2-4-3	加工による超精密加工機の評価	26
2-5	結言	28
第3章	マイクロPCD工具を製作するためのワイヤ放電加工機の開発	29
3-1	序言	29
3-2	PCDブランク工具の準備	29
3-3	マイクロPCD工具を製作するためのワイヤ放電加工機	31
3-3-1	工具製作用ワイヤ放電加工機の構成	31
3-3-2	6軸工具製作用ワイヤ放電加工機の機構	32
3-3-3	6軸工具製作用ワイヤ放電加工機の問題点と解決策	33
3-3-4	改良型5軸工具製作用ワイヤ放電加工機の仕様	34
3-4	改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機によるマイクロPCD工具の製作	39
3-4-1	改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機を使用し ての高効率加工	39
3-4-2	改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機を使用し ての最適工具形状の加工	40
3-5	結言	42
第4章	マイクロPCD工具の製作用CAMシステムの開発	43
4-1	序言	43
4-2	マイクロPCD工具加工システムの構成と製作工程の概要	43
4-3	マイクロPCD工具の加工の準備	44
4-4	自動NCプログラム生成システム	46
4-4-1	CMT-CAMの基本構成	46

4-4-2	工具データ入力部の構成	47
4-4-3	ワイヤ放電加工機の放電加工条件データベース	48
4-4-4	PCD工具形状の加工パスの生成	49
4-4-5	NCプログラムの計算、出力処理	51
4-5	CMT-CAMによるマイクロPCD工具の製作例	52
4-6	結言	54
第5章	マイクロPCDエンドミルによる単結晶シリコンの3次元形状加工	55
5-1	序言	55
5-2	実験方法	58
5-2-1	被加工物と加工機の特性	58
5-2-2	加工形状、加工方法と工具の選択	59
5-2-3	マイクロPCDエンドミルの製作	60
5-2-4	マイクロPCDエンドミルによる加工方法	61
5-3	マイクロPCDエンドミルによる表面生成の特性	66
5-3-1	生成された面性状の測定	66
5-3-2	加工中の切削抵抗の測定	70
5-4	加工後の工具の観察	71
5-5	結言	74
第6章	マイクロPCDエンドミルによる超微粒子超硬の加工特性	75
6-1	序言	75
6-2	実験方法	75
6-3	実験結果と加工面の解析	78

6-3-1	未使用PCD工具による加エプロセスの挙動	78
6-3-2	加工面品位に対する工具摩耗の影響	82
6-4	加工後のPCD工具面の観察	83
6-5	結言	86
第7章 マイクロPCDエンドミルによる石英ガラスの加工特性		87
7-1	序言	87
7-2	実験方法	87
7-2-1	被加工物と加工機 of 特性	87
7-2-2	マイクロPCDエンドミルの製作	89
7-2-3	加工方法	90
7-3	マイクロPCDエンドミルによる加工特性	92
7-3-1	加工面性状の観察	92
7-3-2	送り速度の影響	93
7-3-3	軸方向切込み深さの影響	94
7-3-4	加工中の切削抵抗のモニタリング	95
7-4	工具と加工表面の相互作用に関する考察	97
7-4-1	工具底面と加工表面の接触面積に関する考察	97
7-4-2	工具底面積と切削抵抗の分析	99
7-4-3	工具表面性状と加工現象との関係	100
7-5	石英ガラスのマイクロウェルのテスト加工	103
7-6	結言	104

第 8 章 結論	105
謝辭	108
参考文献	109
関連文献	115

第1章 諸論

1-1 序言

20世紀半ばから続いてきたエネルギーを大量消費する時代から、20世紀の後半から21世紀にかけては、消費することによるデメリットや資源の限界が見え始め、省エネルギーが叫ばれるようになってきた。情報化社会が急速に進展し高機能な情報機器が普及して生活の仕方が大きく変化してきている。また、高齢化社会が進展し、医療分野の負担が増大し社会問題となっている。これらの大きな流れの中で、ものづくりは基盤を支える重要な基礎技術であり、ここでの成果がますます重要になってきている。

ものづくりの中で、機能性部品は小形化と高機能化が要求され、微細で複雑な形状になってきている。また、その素材は、高機能化と耐久性の要求により、硬脆性材料が多くなってきており、従来の加工機や加工プロセスでは対応が難しく、次世代の加工機と加工プロセスの研究開発が期待されている。

本章では、超精密加工機と加工プロセスの研究の背景と本研究の目的について述べる。

1-2 研究の背景

1-2-1 精密切削加工機の変遷と現在要求される性能、機能

超精密加工機はアメリカにおいて1960年代から大形レンズの製作のために開発が進められ、図1-1に示すローレンスリバモア研究所のLODTM (Large Optics Diamond Turning Machine)¹⁾が代表的なものであり、1980年代初期にダイヤモンド切削加工で25nmの形状精度が得られている²⁾。このシステムには、加工機とは別系統に独立したレーザ干渉計を使用した測定系が設置され、精度の向上が図られており、設置環境温度も厳密に制御されていた。日本においては1970年代後半に旋盤タイプの超精密ダイヤモンド切削加工機が製作され³⁾、アルミニウムのドラムやディスクの鏡面加工に適用されている。これらの超精密加工機の精度と加工精度の変遷について、図1-2に示す加工機の精度の変遷と今後の目標が1983年に谷口より発表されている⁴⁾。図中で2000年頃には超精密加工機の精度は1nmと予想されており、ほぼその通りに実現されている。超精密加工機は、光学記録装置のレンズ加工に使用され、光学記録媒体がCD (Compact Disc), DVD (Digital Versatile Disc), Blu-Rayと変遷していくに従い、より高精度化と複雑化への対応が進んでいった。機械の基本的な構造は旋盤系を基にしていることが多く、形状の複雑化には高応答のファーストツールサーボのような補助軸を付加することで対応している⁵⁾。その後、LED (Light Emitting Diode) 金型のような、ナノメータオーダーの面粗さは必要とするが、形状精度は、あまり要求しないが深さの深い多数個取の金型を短時間で加工する用途が出現し、従来の超精密加工機では対応が難しくなっている。

一方、金型加工用のマシニングセンタからみると、1980年代までは3次元形状の金型はマシニングセンタで直接加工することが難しく、形彫り放電加工で実行され、人の手で磨くことをしていた。その後、高速ミーリング加工⁶⁾や高精度の3次元CAD/CAM

(Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) の出現により切削加工による加工面品質が大幅に向上し、大形の金型から順次放電加工から切削加工に置き換わって行った⁷⁾。しかし、電子部品向けの高硬度の精密金型の分野では、依然として放電加工が使われていた。その理由は、切削加工では工具の破損や摩耗により所定の形状加工が実現できなかったからであるが、鉄系の高硬度材料に対しては小径のCBN (Cubic boron nitride) 工具⁸⁾、硬脆性材料にはダイヤモンド工具が出現し⁹⁾、工具に関しては大きく可能性が開けた。しかし、加工機に関しては精度の不足や高加速度動作ができないことや、主軸の回転数の不足で目的の加工ができない状態であった。

図 1-3 に加工機の精度と加工の大きさを示すが、超精密加工機と精密マシニングセンタとの間には、ギャップがあり、そのギャップ領域の加工性能を要求される加工が、上記の電子部品の金型加工、LED 金型加工や硬脆性材料の加工であり、形状としては微細 3 次元形状の加工である。このギャップを埋める加工機は、従来の超精密加工機で得られた多くの知見を必要とすると同時に、高効率加工を実現するために高加速度動作が要求されることから⁷⁾、機械の基本構造、使用する素材、駆動システム等を基本から見直すことが必要となった。また、微細 3 次元形状では短い距離を高加速度で往復運動することが多く、機械自身の動作が振動源となる振動を発生し、加工に悪影響を与えることがあり、今までの加工機にない振動対策が必要になった。

本研究は、この微細 3 次元形状を高精度に加工する超精密加工機を開発することが目的であり、図 1-3 の赤破線で示したマシニングセンタと従来の超精密加工機のギャップを埋める、高精度と高効率を実現する加工機を目指して開発した。

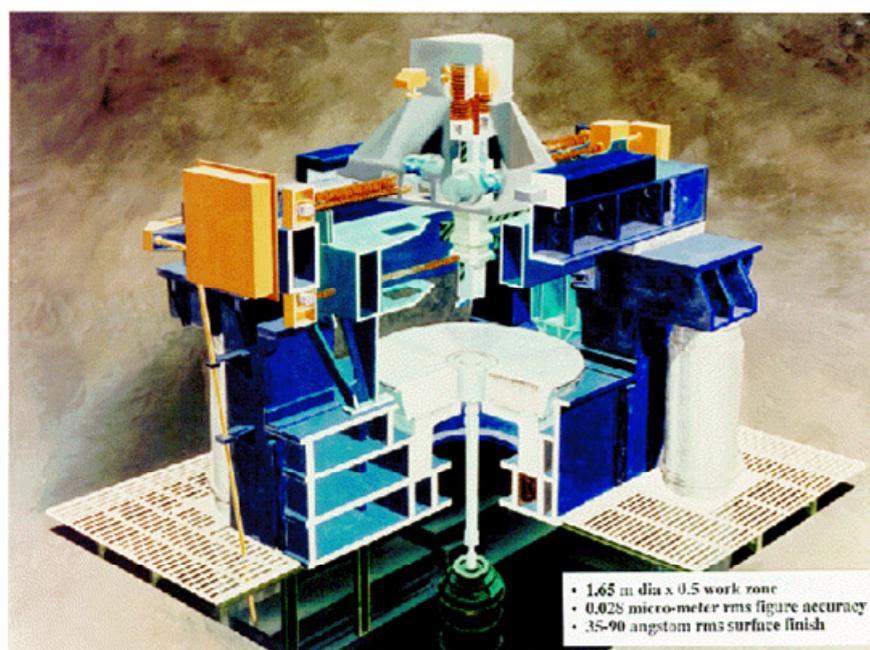


Fig. 1-1 Overview of LODTM¹⁾

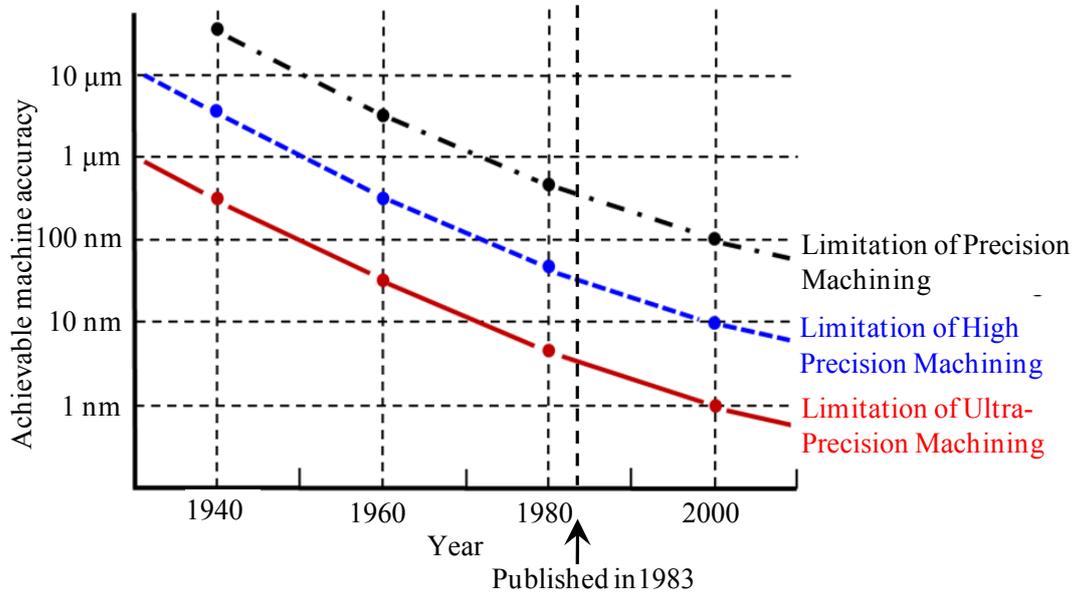


Fig. 1-2 Achievable machine accuracy ⁴⁾

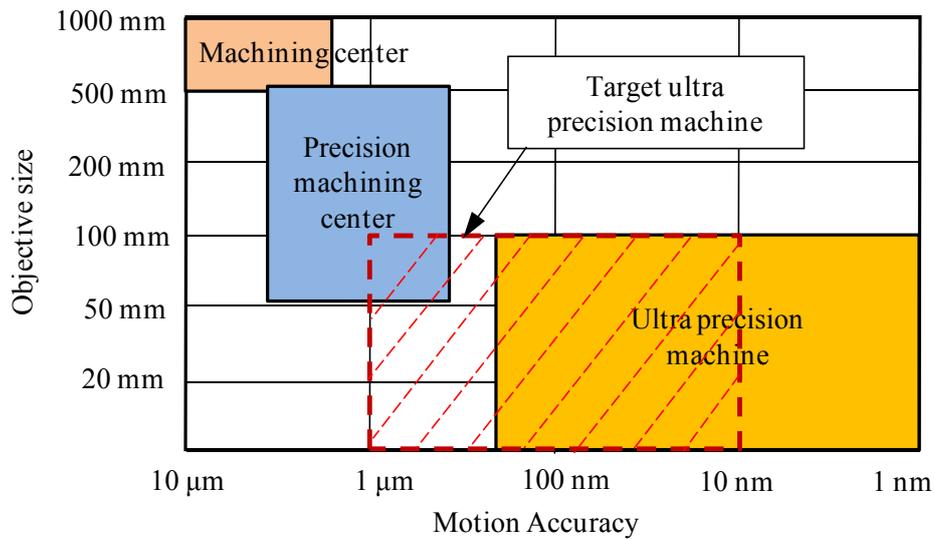


Fig. 1-3 Motion accuracy of machine tool

1-2-2 マイクロPCDエンドミルの役割と工具の製作

電子部品や機能部品の高機能化や小型化に伴って微細な部品を大量に生産することが要求され、耐久性を持った微細形状金型の需要が増大している。また、バイオメディカルのような高付加価値が要求される分野では、オンデマンドに高機能部品が生産されることが望まれている。これらの要求に応えるために、素材として硬脆性材料の使用が必須となっている。それらの硬脆性材料を高効率に加工するシステムの構築が期待されている。

非鉄の硬脆性材料を加工するための工具としては、硬度の高さによりダイヤモンド工具が使用される。ダイヤモンド材料の特性の一覧を表 1-1 に示す¹⁰⁻¹¹⁾。微細 3 次元形状を加工するためには微細回転工具が必要になる。ダイヤモンド回転工具には、単結晶ダイヤモンド工具、ナノ多結晶ダイヤモンド工具、ダイヤモンドコーティング工具、電着ダイヤモンド工具と多結晶焼結ダイヤモンド工具の 5 種類の工具がある。単結晶ダイヤモンドは、非常に滑らかな形状と鋭利な先端エッジ半径の工具を製作できる特徴があり、超精密加工では必須の工具である。しかし、加工においては結晶方位により欠けやすかったり、磨耗特性が違うことがある。工具の製作においては、研削しやすい方向と困難な方向が明確にあり、加工できる形状に制限がある。また、高精度工具を製作するには、時間が多くかかり高価である。単結晶ダイヤモンド回転工具の例を図 1-4 (a) に示す⁹⁾。ナノ多結晶ダイヤモンドは最近開発された材料で、数十ナノメートルサイズの微細多結晶で、硬度が世の中で最も高く、等方性であるため工具材料として理想的な特性を備えている¹¹⁻¹³⁾。しかし、工具を量産する技術がまだ確立していないため普及はしていないが、短時間で製作できる方法が開発されれば普及すると考えられる。ダイヤモンドコーティング工具は、超硬の工具にダイヤモンドをコーティングしたものであるが、コーティング膜が剥離することが問題であったが、コーティング技術の向上により剥離しづらい膜を厚くつけることができるようになってきており、今後大いに普及すると考えられる。電着ダイヤモンド工具は、コストが低いことにより多くの脆性材料の加工に使用されている。但し、工具の形状を正確に規定できないため高精度の形状加工ができないことやナノメートルオーダーの表面粗さを実現することができない問題点がある。

PCD (Polycrystalline Diamond) は、ダイヤモンドの含有率は 80%から 90%であり、単結晶ダイヤモンドに続く高い硬度を持っており、工具材料として使用した場合、高精度に成形することができれば、硬脆性材料を高精度かつ高品質な面性状で加工できると期待される。粒径の違う多くの種類の PCD が開発され、粒径 0.5 μm の超微粒子 PCD も開発され¹⁰⁾、直径 0.1mm 以下の微細形状の工具を高精度に加工できると考えられる。PCD はバインダに金属であるコバルトを使用しているために導電性があり、ダイヤモンド工具の中では唯一、放電加工で加工することができ、様々な形状に成形することができる¹⁴⁻¹⁵⁾。ダイヤモンドは絶縁体であるため単体では放電加工できないが、PCD のように導電体で囲まれた状態で油性加工液中で放電した場合、ダイヤモンド表面に導電性のグラファイト層が形成され、放電が継続することでダイヤモンド自体が加工され、加工形状はダイヤモンドの粒径には依存しないことが報告されている¹⁶⁾。放電加工で実現できる PCD の面粗さは、最大面粗さ約 1-2 μm が示されており、放電加工で高精度の工

具を実現できることがわかった¹⁶⁾。微細 3 次元形状の加工用のマイクロ PCD エンドミルの例の SEM (Scanning Electron Microscope) イメージを図 1-4 (b) に示す。

ワイヤ放電加工による微細工具を形成する方法として、図 1-5 (a) に示す増沢が開発した WEDG (Wire Electrical Discharge Grinding) が知られており¹⁷⁾、この製作方法で製作した PCD 工具での脆性材料の加工の研究が報告されている¹⁸⁻¹⁹⁾。この加工方法は工具の回転と平行にワイヤが走行し、成形できる工具形状に制限がある。微細 3 次元加工に最適な形状の工具を製作するためにはワイヤを傾斜させるか、工具を傾けることが必要であり、図 1-5 (b) に示すような、XYZ 軸と工具の回転軸とワイヤまたは工具を角度割出しする軸を含めて、同時 5 軸動作の加工機が必要になる。

本研究では、硬脆性材料の微細 3 次元形状を高精度に加工する際の工具として期待されるマイクロ PCD 工具を最適な形状に加工することを目的に、同時 5 軸ワイヤ放電加工機を設計、開発した。また、研究者や作業者が容易に種々の PCD 工具を製作できるように専用の CAM ソフトウェアを開発した。

Table 1-1 Properties of diamond based materials¹⁰⁻¹¹⁾

	NPD	SCD	PCD
Knoop hardness GPa	120-140 (isotropic)	70-120 (anisotropic)	50 (isotropic)
Phase transition temperature °C	1400	1400	600-700
High temperature Knoop hardness at 800 °C GPa	100-120	60-90	Phase transitioned
Electrical conductivity	-	-	Yes
Content of diamond Vol. %	100	100	90
Grain size nm	10-30	-	500

NPD: Nano polycrystalline diamond, SCD: Single crystalline diamond, PCD: Polycrystalline diamond

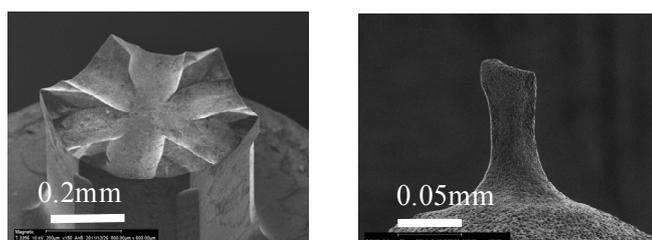
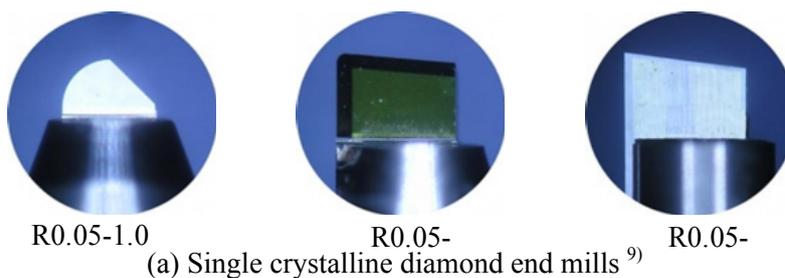
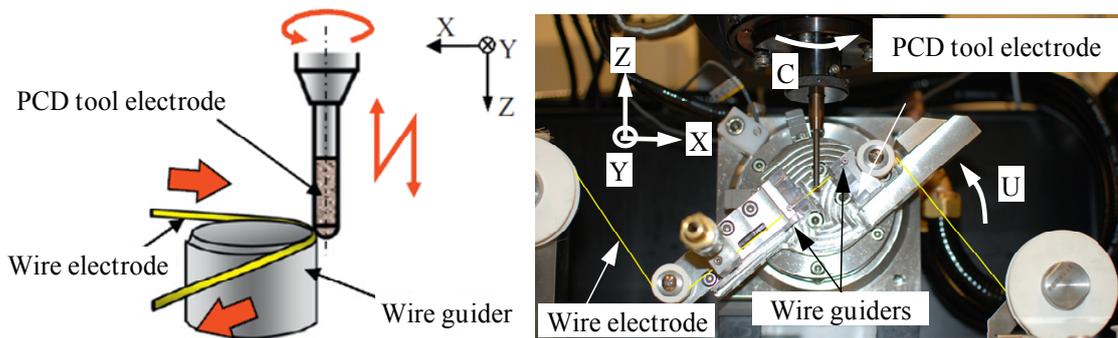


Fig. 1-4 Geometry of single crystalline diamond and PCD end mill



(a) WEDG system¹⁸⁾ (b) Simultaneous 5 axis wire EDM
 Fig. 1-5 Simultaneous 5 axis wire EDM and WEDG system

1-2-3 硬脆性材料のマイクロPCDエンドミルによる加工特性

前節で硬脆性材料を微細 3 次元形状に加工する超精密加工機とそれに使用するマイクロ PCD エンドミルを製作するワイヤ放電加工機, CAM ソフトウェアの開発の必要性を述べたが, この節では, 開発された加工システムを使用してマイクロ PCD エンドミルの基礎的な加工特性を解析, 評価することの必要性を述べる.

ダイヤモンド工具による硬脆性材料の切削加工の基礎的な研究は, 旋削加工で多くがなされており²⁰⁻²³⁾, マイクロ回転工具による切削加工の研究は少なく²⁴⁻²⁷⁾, 加工プロセスの詳細が判明していない事が多い. 特に, マイクロ PCD 工具による加工は, 研削に主眼を置いた C. J. Morgan²³⁾や正木¹⁰⁾による研究があり, マイクロ PCD エンドミルの加工では, 鈴木²⁸⁾や J. Yan²⁹⁾の研究があるが, 様々な硬脆性材料の基礎的な加工プロセスの解明は不足している. マイクロ PCD エンドミルによる硬脆性材料の加工では工具の刃先による切削加工の要素とフランク面による研削加工の要素が複雑に絡み合って作用していることが示されており³⁰⁾, また, この切削と研削の要素は, 被加工物の特性や加工条件により大きく変化することが推定され, 詳細な加工プロセスの解明が待たれている. 工具磨耗特性に関しても切削と研削加工が混在しているために, 磨耗した工具により生成される被加工物の面性状は, 切削加工である単結晶ダイヤモンドやナノ多結晶ダイヤモンド工具とは違ったものとなると考えられる³¹⁾. また, 放電加工で製作された PCD 工具は, 放電加工で実現できる面粗さの限界で発生する工具刃先の凸凹による影響や放電変質層のような放電加工特有の問題があり, それらが加工面性状にどのような影響を与えているかの解明が待たれている³²⁾.

加工対象物である硬脆性材料は, 結晶の構造により加工特性が大きく違うことが想定され, 本研究では, 3 種類の硬脆性材料 (結晶性材料, 焼結材料, 非晶質材料) の中で, 今後用途が拡大すると想定される代表的な材料について加工特性を研究した.

結晶性材料の代表として単結晶シリコンを選択した. この研究で想定した単結晶シリコンの用途は MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) であり, プリンタヘッド, 表示デバイスや各種センサーとして実用化され, 今後とも大きく発展することが期待されている. MEMS の加工において主要なプロセスはエッチングによる 2 次元加工であるが, 滑らかな 3 次元形状が要求された場合, エッチングプロセスだけで実現することは

難しい。そこで、今まで蓄積されてきた単結晶シリコンの切削加工の知見^{20-21), 33-35)}を基にして、マイクロ PCD エンドミルを使用した切削加工を適用することで、サブミクロンレベルの形状精度とナノメートルレベルの面粗さを持つ加工面を実現することを目指した。本研究で行った半球形状の加工は、多くの技術的な要素を含んでおり、実現できれば MEMS 加工における切削加工の評価が確立し、本格的に普及していくと考えられる。

焼結材料の代表として超微粒子超硬を選択した。超硬は高い機械的特性により鉄系の金型材料に比較して高い耐摩耗性を持っており高品位と大量生産が要求される分野で使用が拡大している。超硬の金型は放電加工で行われてきたが、電極の消耗による加工精度の低下、最良仕上げ面粗さの低さや放電変質層によるクラックの発生のような多くの問題点を持っている³⁶⁾。比較的大きな金型では、放電加工特有の表面性状の問題は、人の手により除去することが行われてきたが、微細形状では人手の介入はできない。この問題点を解決できる加工方法は切削加工しかなく、放電加工を置き換えることができれば、形状精度や表面性状の問題点が解決できると考えられ、微細金型の分野において超硬の適用範囲が大きく拡大すると考えられる。この分野は、ナノ多結晶ダイヤモンドのような新しい工具素材が開発され研究が活発化しているが¹⁰⁻¹²⁾、PCD 工具は、放電加工で容易に製作できることや切削と研削が混在した加工プロセスの特徴があり、加工の基礎的な現象を解明し、その知見の基づいて高精度、高効率加工を構築して行くことは大きな意義があると考えられる。

非晶質の代表として石英ガラスを選択した。ガラスの加工に関する研究は、ソーダガラス等の一般的なガラスは超硬の工具で加工した結果が報告されており²⁵⁾、C. J. Morgan により放電加工で製作した円筒状のマイクロ PCD エンドミルを使用して極低熱膨張ガラスの延性モード加工が実現できたことが報告されている¹⁸⁾。石英ガラスは機械的な特性、熱的な特性、化学的な特性と光学的な特性が他のガラス材料に比較して飛躍的に高い特徴を持っているが、切削加工で透明な面を持った微細形状を延性モードで加工するのが非常に難しい^{23), 37)}。バイオメディカル分野でマイクロ流路やマイクロウェルとして使用され³⁸⁾、高精度のデバイスはエッチングで製作されており⁶³⁾、切削加工で加工することができれば、様々な形状をタイムリーに提供することができ、医療の分野で切削加工の適用範囲の拡大が期待できる。

本研究では、開発された超精密加工機と工具製作システムを使用し、マイクロ PCD エンドミルを用いた微細 3 次元形状の硬脆性材料の加工において、基礎的な加工特性を明らかにし、そこで得られた知見に基づいて目標とするデバイスの加工技術を確立することを目的に、この研究を行った。

1-3 本研究の目的

最先端の分野では微細 3 次元形状を持ったデバイスの開発が進められており、デバイス本体やそれを製造する金型の材料は、微細化や耐久性の要求により硬脆性材料に変わってきている。硬脆性材料を高精度、高効率に機械加工するためには、最適な機械加工システム（高精度加工機械、工具を製作する加工機械と CAM ソフトウェア）の開発と基礎的な加工プロセスの研究が必要である。

そこで本研究は、自由曲面を含む微細3次元形状を硬脆性材料素材上に、サブミクロンの精度と数十ナノメートルの表面粗さで、高速切削加工する技術の確立を目的とした。本研究は、1) 高速超精密切削加工機械の開発、2) 硬脆性材料加工のためのマイクロ回転工具製作用加工機械の開発、3) マイクロ工具設計製作用CAMの開発、以上で開発された加工システムを用いて加工が困難といわれている3種類（結晶材料、焼結材料、非晶質材料）の硬脆性材料の微細加工を実施し、加工プロセスの解析、評価を行った。

1-4 本論文の構成

本論文は本章を含む第8章から構成される。

第1章では、本研究の背景と目的について概説した。

第2章では、微細3次元形状を高精度・高効率に加工する切削加工機械の開発について述べた。主要要素技術として、機構と材料の最適化、ガイドウェイの選択と改良、リニアモータによる高加減速送り機構、移動に伴い発生する振動の抑制システム、超高速回転主軸および焼きばめ工具保持方式の開発を行った。

第3章では、微細回転工具を製作する手法と、これを実現するためのワイヤ放電加工機の開発と工具の製作方法について述べた。これにより多結晶ダイヤモンド製マイクロ回転工具を効率的に製作することが可能になった。

第4章では、第3章で述べた放電加工機により微細回転工具を製作するための、CAMソフトウェアの開発について述べた。

第5章では、第2章から第4章までに述べた結果に基づき、結晶性の硬脆性材料である単結晶シリコンを多結晶ダイヤモンド製マイクロ回転工具を用いて半球形状に切削加工するための基礎技術について述べた。

第6章では、焼結材の硬脆性材料である微粒子超硬を多結晶ダイヤモンド製微小回転工具を用いて微細切削加工する基礎技術について述べ、超硬をダイヤモンド工具で微細機械加工する条件と加工特性を明らかにした。

第7章では、非晶質の硬脆性材料である石英ガラスを多結晶ダイヤモンド製微小回転工具を用いて微細切削加工するための基礎技術について述べ、石英ガラスをダイヤモンド工具で微細機械加工する条件と加工特性を明らかにした。

第8章は結論であり、各章の内容をまとめ、本研究によって得られた成果を要約した。

第2章 微細3次元形状加工用超精密加工機の開発

2-1 序言

精度を追求してきた超精密加工機は、ナノメートルレベルを実現し、開発の方向に変化が表れてきた。一つは、超精密加工において加工形状が単純な形状からより複雑な形状への要求である。例えばレンズでは非球面形状から非軸対称非球面レンズの要求や、精度はナノメートルではないが多数の形状を短時間で加工する必要のあるマイクロレンズアレーのようなものが挙げられる。これらの形状は、旋盤を基本にした従来の超精密加工機では実現するのが難しく、新たな発想での機械が要求された。もう一つの流れは、電子機器の小形軽量化の要求により、そこで使用されている部品が小形化し、それらを量産する金型の加工効率に行き詰まりが発生していた。これらの微細形状の金型は、放電加工機で製作されており、電極を製作し放電加工するには多くの工程を要するため、一例として、電子部品の一つの金型を製作するには1週間を要しており、これを数分の一に短くすることが強く望まれていた。また、放電加工で実現できる精度は、電極の消耗や表面粗さにより数ミクロンが限界であった。部品の小形化に比例して金型の精度の向上が必要であるが、放電加工の精度により制限されていた。これらの問題点を解決する加工方法が待望され、高速ミーリングに置き換えることが提案されていたが⁷⁾、微細な形状加工において想定したような性能が実現できない問題点があった。

そこで本研究では、微細3次元形状加工において超精密加工機と精密加工機の両分野における適用範囲のギャップを埋める加工機として、加工精度と加工効率を最大化する超精密加工機を開発した。開発するにあたり、これまでに開発してきた超精密加工機や精密加工機の知見を基にして、下記に示すような要素技術の開発を実施し、それらを統合して超精密加工機を実現した。

- 機械構造と構造材料
- ガイドウェイ
- ドライブシステム
- 主軸
- ツーリングシステム

2-2 加工機の性能・機能の目標

開発する加工機の主要な目標値を表2-1のように定めた。基本的な考え方は、10x10mm程度の微小形状の高速ミーリングによる高精度、高効率加工である。

加工機の基本的な精度は、製品を加工する限定された小さな領域で0.1 μm 以下とした。これを実現する要素として、機械要素では、機械の基本構造とガイドウェイがあり、制御系では、位置、速度の検出系であるリニアスケールの位置と分解能の問題がある。これらの要素を最適化することで、高精度な加工機が実現できる。

実際の加工物を加工する際の最大加工加速度を0.5G、仕上げでは0.3Gとし、その時の精度を1 μm 以下とした。微小形状を加工する場合、速度ではなく加減速の時間をで

きるだけ短くすること，すなわち加速度が加工時間を決める主要な要素となる．一般的な高精度加工機の加工時の加速度は最大でも 0.1G 以下である．

主軸の回転速度は，微小径工具を使用する微細加工における工具摩耗や加工効率を決めることになる．工具の摩耗は切削速度に依存するが，微小径工具において通常の主軸では切削速度が低すぎて摩耗特性の最適な領域で使用できない．CBN 工具は焼き入れ鋼の加工時の最も磨耗の少ない切削速度は 300-500m/min にあり，半径 0.5mm の工具で主軸回転数 100,000min⁻¹ のとき切削速度は 314m/min である．より小径になれば，切削速度が落ちて摩耗特性が悪くなることが考えられ，微小径工具での加工において主軸の高速回転の重要性がわかる．また一刃あたりの最適な除去量は工具と被削物の材質により決まり，高速回転を適用するためには送りも比例して高速にすることが必要になり，微小形状では高加速度で加減速して等速過程を増やすことが必要になる．

Table 2-1 Target specification of developed ultra-precision machine tool

Machine accuracy of small area (10 x 10 mm)	Less than 0.1μm
Maximum acceleration at the time of machining	0.5 G
Spindle speed	More than 100,000 min ⁻¹
Machine stroke	X 150 mm, Y 150 mm, Z 100 mm
Equipment	Automatic measurement system of tool and workpiece
Tooling system	Shrink fit system

2-3 微細 3 次元形状加工用超精密加工機の要素技術

2-3-1 高精度，高加速度を実現する加工機の構造と材料

加工機の軸数は，ナノメートルレベルの高精度を実現するために直交 3 軸とした．将来的に回転軸を付加して多軸化することにした．

最初に XY 軸の構成について考察する．ガイドウェイの乱れや誤差の影響を加工位置でできるだけ少なくするためにはガイド位置と加工位置の距離を短くすることが必要であり，かつオーバハングする要素をできるだけ少なくすることが必要になる．図 2-1 (a) に示す積み重ね式の XY 軸は，コンパクトにまとめることができるメリットがあるが，Y 軸のガイドウェイから加工位置までの距離が長くなること，Y 軸の精度の乱れが X 軸に重なってしまう問題点がある．それに対して図 2-1 (b) に示す XY 軸を上下分離したタイプは，ガイドウェイの中心に加工位置がくる構造であり，ガイドウェイから加工位置の距離も X 軸，Y 軸共に一定にでき，X 軸と Y 軸の精度が相互に干渉しない特徴がある．この構造は，X 軸のガイドウェイが上部手前にくることになり，加工位置と人の立つ位置が離れ，加工物への接近性や視認性が悪くなるという欠点があり，一般的には採用されない．しかし，この問題点は加工段取りを補助する機能で補うことにより補完できると考え採用した．微小形状の金型加工では，被加工物が小さく加工機にセットしてから調整することは少なく，外段取りで準備することや計測機能を付加すること

で対応できると考えた。

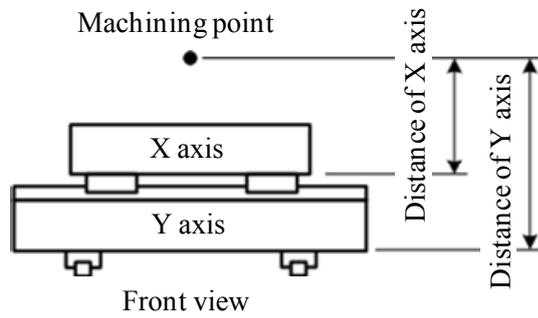
次に、Z 軸と主軸の位置であるが、図 2-2 で示すように二つ案がある。第一の案は、図 2-2 (a) に示す両方を上部に配置する構造、第二の案は図 2-2 (b) に示す主軸を上部に Z 軸を下部に配置する二つの構造が考えられる。一般的な機械は、被加工物の重量や大きさの自由度が大きいことや機械の組み立ての容易性から第一案が選択されるが、この機械は、被加工物の重さと大きさは限定されているので、その制限は当てはまらないが、機械の組み立てについては注意が必要である。上部に主軸と Z 軸を配置すると、その重量により加工機全体の重心位置が高くなり、高加速度で移動したときに振動源となることが考えられる。対して第二案は、重心位置が低くなり高加速度での動作が安定してできると考えた。設計上は、Z 軸が Y 軸のガイドウェイの間に入り、Z 軸の高さが制限されるため、その中に収めるためには、多くの工夫が要求された。X 軸の構成を図 2-3、YZ 軸の構成を図 2-4 に示す。

高加速度で動作するためには、軽量化が必須であるが、移動体の基本的な構造材はアルミナ系のセラミックス（株式会社ソディック SA610）を使用した³⁹⁾。セラミックスは比重が鉄系の材料と比較して約 1/2、ヤング率は鋳鉄と比較して約 2 倍であり、重量あたりの機械特性は 4 倍高い。また、熱膨張係数が鉄系の材料の 1/2 と小さいことで高精度化に寄与すると考えられる。その特性を表 2-2 に示す。セラミックス部材は、最終的な形状に近い形に成形してから焼成し、外形加工は研削加工で行い、穴や微細な形状加工はダイヤモンド工具による穴加工や研削加工を実施して構造材を製作した。軽量化のために、可動部で精度に関係ない部材は、アルミ合金を採用して軽量化を図った。図 2-3 の X 軸スライダ、図 2-4 の Y 軸スライダ、Z 軸コラムとテーブルがセラミックスで製作されている。

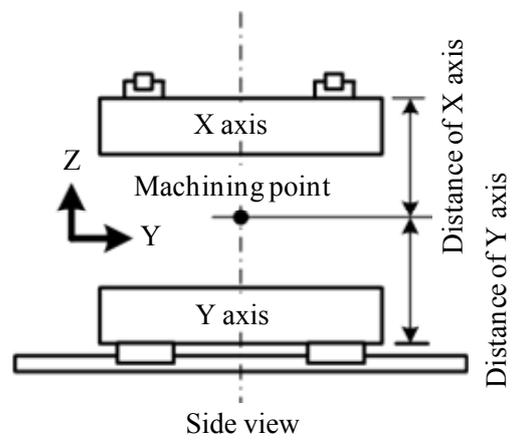
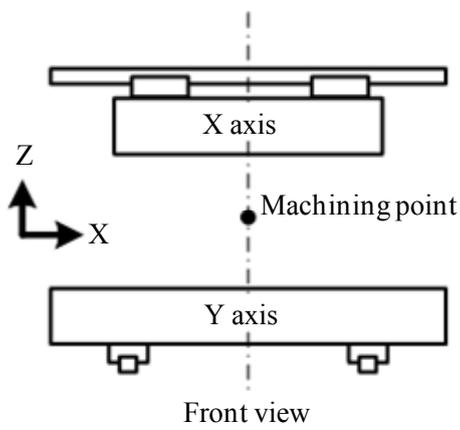
基本構造の鋳物は、低熱膨張の鋳物を検討したが、コストが高いため断念し、通常の鋳物を採用した。但し、鋳物の温度変化を抑えるため、鋳物に溝を掘り、温度制御された冷却油を循環させる機構を付加した。

Table 2-2 Comparison of properties of machine structure materials

	SA610 ³⁹⁾	40 cast	1018 steel
Density (x 10 ³ kg/m ³)	3.5	7.9	7.3
Young's module (GPa)	280	120	200
Thermal expansion (x 10 ⁻⁶ /K)	5.7	11.0	11.7
Thermal conductivity (W/mK)	13.8	52	60

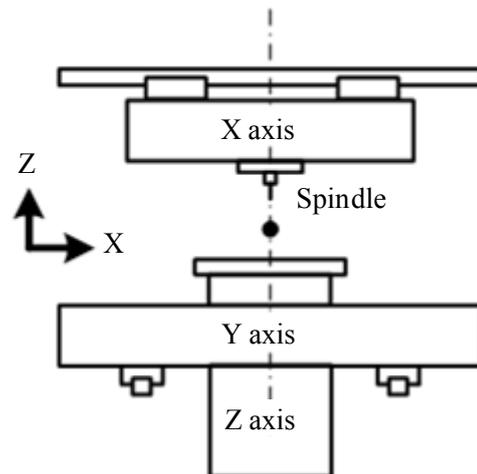
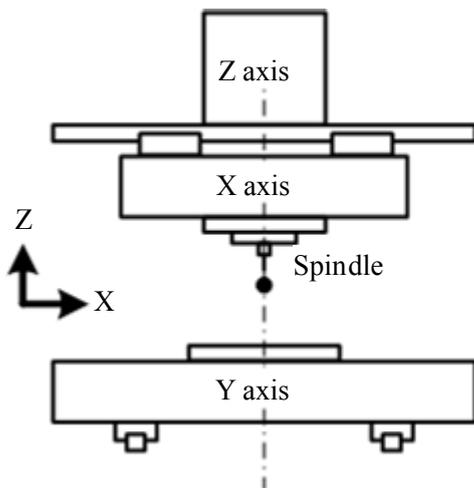


(a) Stacking XY table



(b) Separated XY table

Fig. 2-1 Structure of XY guide way and machining point



(a) Z axis and spindle on X axis

(b) Z axis on Y axis / spindle on X axis

Fig. 2-2 Structure of Z axis and spindle

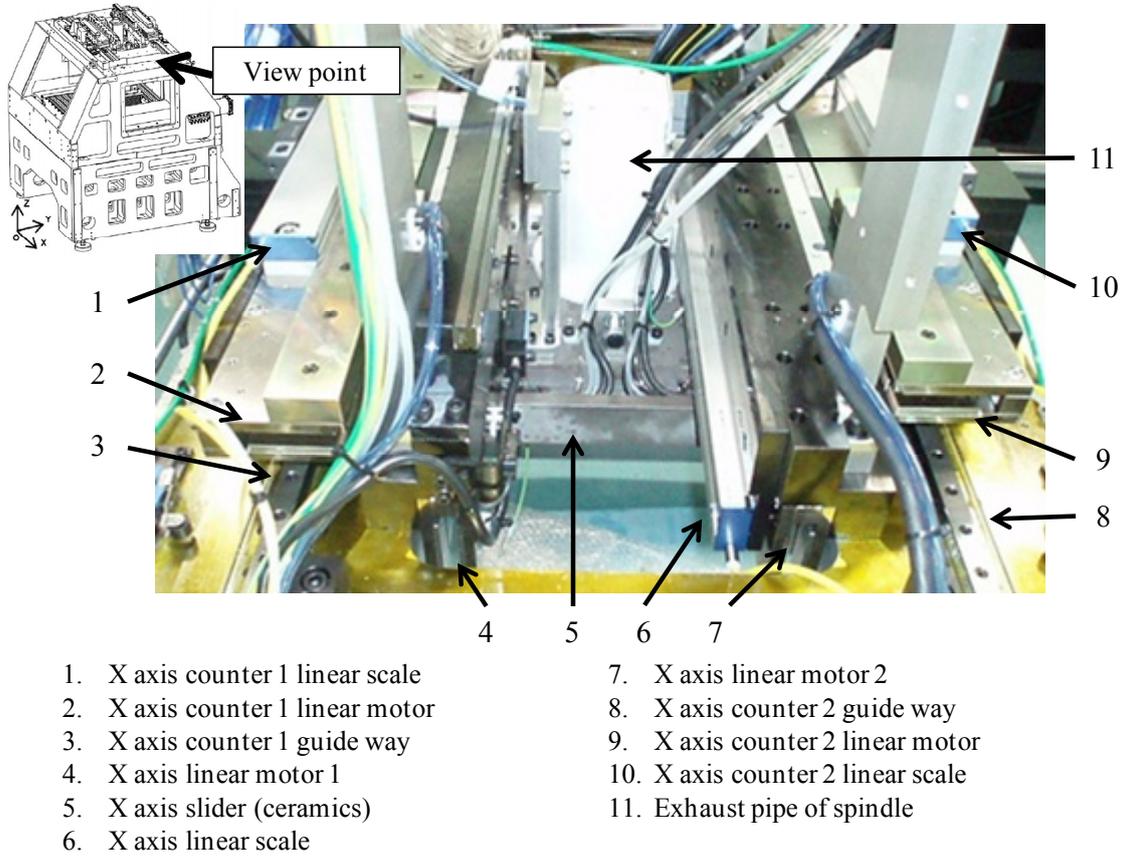
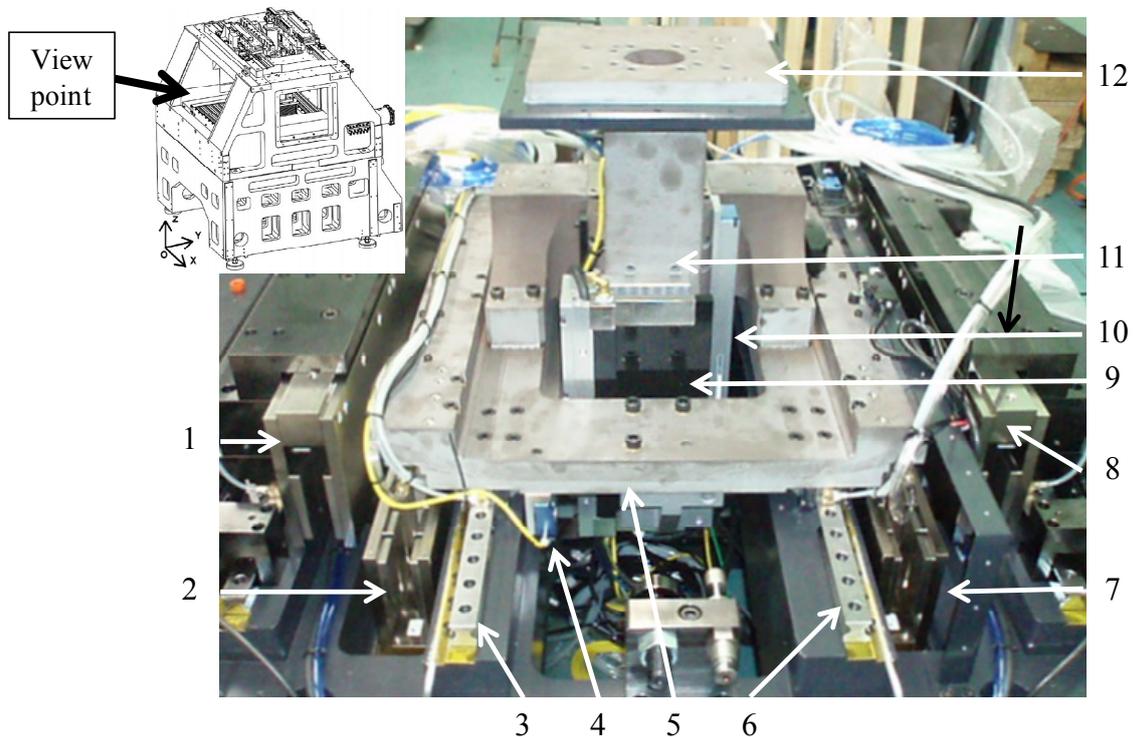


Fig. 2-3 Machine structure of X axis



- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Y axis counter 1 linear motor | 7. Y axis linear motor 2 |
| 2. Y axis linear motor 1 | 8. Y axis linear motor 1 |
| 3. Y axis guide way 1 | 9. Z axis linear motor |
| 4. Y axis linear scale | 10. Z axis linear scale |
| 5. Y axis slider (Ceramics) | 11. Z axis column (Ceramics) |
| 6. Y axis guide way 2 | 12. Table (Ceramics) |

Fig. 2-4 Machine structure of Y, Z axis

2-3-2 転がり直動案内の改良

ナノメートルレベルの高精度を実現するためには、静圧ガイドの使用が有利であるが、高加速度動作では、問題がある。油静圧ガイドでは、油の粘性により高加速度動作に応答できないことが考えられ、また摩擦による温度の上昇も考えられる。空気静圧ガイドは摩擦がほぼゼロのため高加速度に応答できる。しかし、ガイド位置と重心位置が異なることにより、高加速度動作時にトルクが発生し、その成分により傾きが発生して高精度を実現できないと考えられる。従って、常に安定した精度を提供できるのは転がり直動案内しかなく、これを選択することにした。最初の試作機では、クロスローラガイドを使用した。最終的には、精度を改善したローラタイプ直動案内を使用した。有限長直動案内であるクロスローラガイドと無限長直動案内であるローラガイドには一長一短がある。クロスローラガイドでは、ローラユニットの長さで精度が決まるために、高精度を実現するためにはローラユニットの長さを長くする必要があり、それに伴ってガイドレールも長くすることが必要であり、ガイドレールを取り付ける移動体が大きくなり、重くなる欠点がある。ベアリングが循環する無限長のガイドであるローラガイド

は、ベアリングユニットの長さが短いため移動体をコンパクトに設計することができ、軽量化することができる。しかし、転動体のハウジングへの出入りによる転動体通過振動の問題がある⁴⁰⁾。一般的に使用される無限長のガイドでは転動体通過振動は加工位置でマイクロオーダーの値になることがあり、そのままでは超精密加工機には使用できない。そこで、高精度化を実現するための対策を実施した。対策の一つは、転動体通過振動の発生源での抑制で、ベアリングの出入りする部分の傾斜を最適化して転動体のハウジング部への出入り時の剛性の変化を小さくすることにより転動体通過振動の発生を少なくした。次に行った対策は、ベアリングの個数を多くすることにより転動体通過振動を軽減できるため、重量と摺動抵抗が許す範囲で多くのベアリングを使用し、1本のレールに3個のベアリングを使用した。また、転動体通過振動とは直接関係しないが、高精度化のためにガイドレールの取付け穴の間隔を短くし、座繰り穴を深くしてガイド取付け時に発生する曲がりを少なくする対策を実施し、取り付け時に発生するうねりを少なくした。

改良したガイドでの評価試験のセットアップを図2-5に示す。転動体通過振動の測定には静電容量センサーとミラーバーを使用し、ガイドの近くと加工機に実装した時の加工位置を想定して350mm上へオフセットした位置の2点で測定した。ガイドレールとベアリングの実際の配置と合わせて、幅330mm、ベアリングの数は片側3個とした。転動体通過振動対策による改善の結果を表2-3に示す。ピッチングの値は、図2-6と図2-7に示すように、約40nmで高さによって変わらないが、図2-8と図2-9に示すようにヨーイングはテーブル上90mmでは37nmであるが、350mm上では72nmとなり増加している。改良したガイドウェイと標準のガイドウェイの値を表2-3に示すが、改良型にすることで、転動体通過振動は1/2以下となっており、特に想定した加工位置では1/3となっている。

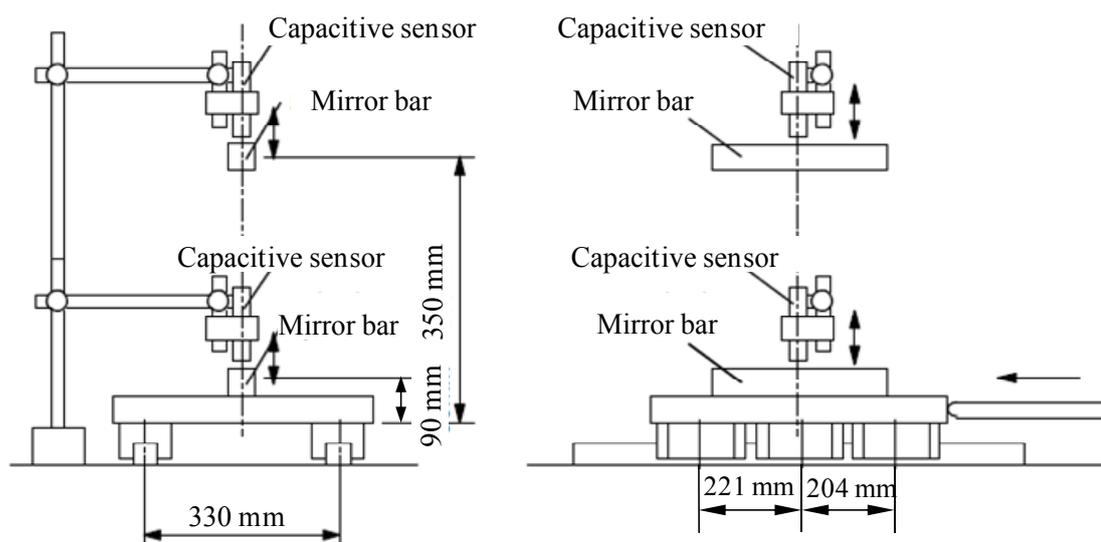


Fig. 2-5 Experimental setup for measurement of waviness of guide way

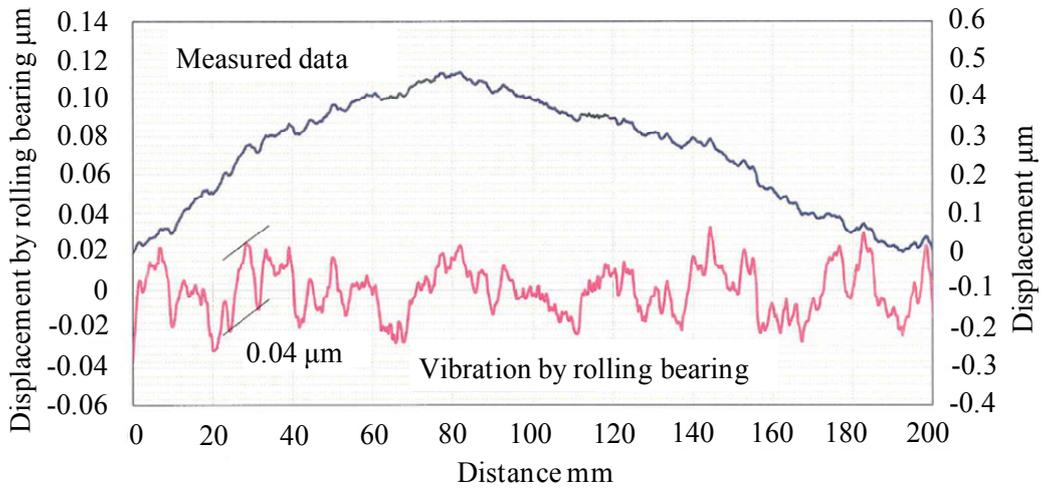


Fig. 2-6 Vibration of rolling bearing of pitching on mirror bar at the height of 90 mm

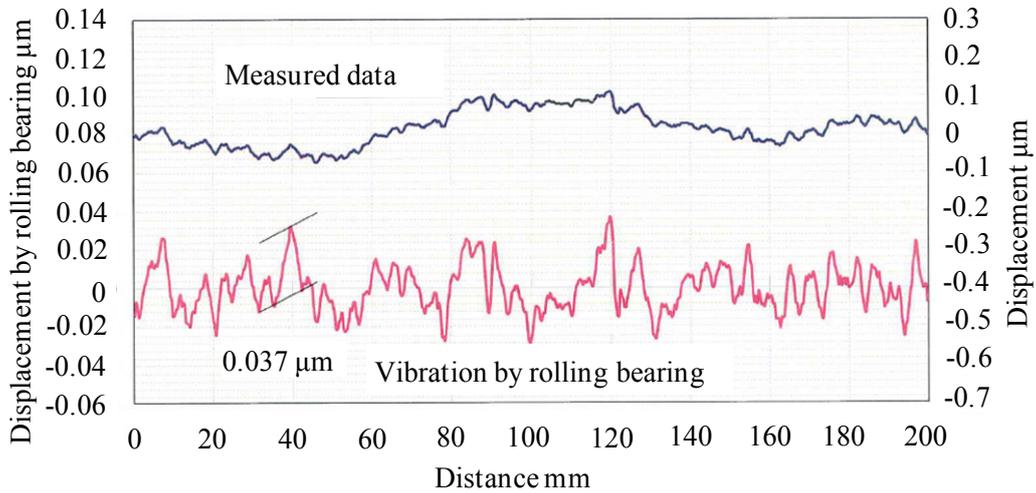


Fig. 2-7 Vibration of rolling bearing of pitching on the mirror bar at the height of 350 mm

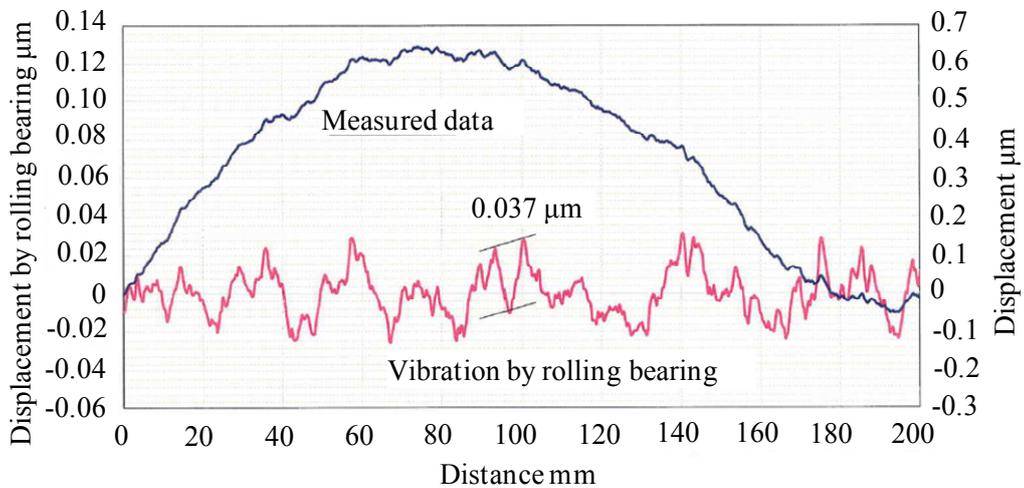


Fig. 2-8 Vibration of rolling bearing of yawing on the mirror bar at the height of 90 mm

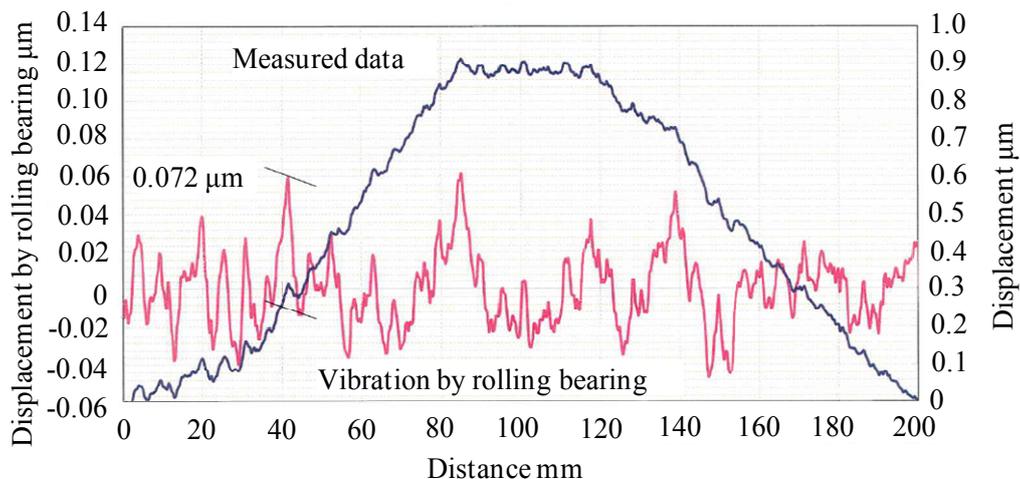


Fig. 2-9 Vibration of rolling bearing of pitching on the mirror at the height of 350 mm

Table 2-3 Vibration of rolling bearing of developed guide way and standard guide way

	Measuring height of mirror bar	Pitching (nm)	Yawing (nm)
Developed guide way	90 mm	40	37
	350 mm	37	72
Standard guide way	60 mm	80	95
	300 mm	85	200

2-3-3 ACコアレスリニアモータによる高精度駆動系

ボールネジと AC サーボモータによる駆動では、ボールネジのボールの循環により発生した振動が機械構造に伝わり、ナノメートルレベルの駆動はできないため、全軸リニアモータによる駆動とした。リニアモータにはコア付きとコアレスがあるが、コア付きは効率は高いがコギングがあり、それが外乱要因となり速度むらが発生する。また、それに起因して加工がむらが発生し、縞模様になることがある。制御系でトルクむらを補正する提案があるが⁴⁾、全ての速度領域で完全に除去できないので、原理的にその要因のない AC コアレスモータを使用した。前記のように移動体は軽量のセラミックスで構成することで、推力の少なさを補った。

リニアモータの配置は XY 軸ではガイド位置と駆動位置が離れることにより発生する回転力の発生を少なくするために各ガイドウェイの近くに 1 個ずつ、計 2 個配置し、移動体の重心位置を駆動するようにした。X 軸のリニアモータの配置を図 2-3、Y 軸の配置を図 2-4 に示す。Z 軸はできるだけ中心に近い位置に 1 個のリニアモータを配置した。Z 軸は被加工物や自重を支える必要があるがリニアモータの駆動力だけで保持することは、推力が少なくできないため、空気圧によるバランスを設置した。この摩擦特性は、Z 軸の制御に大きな影響を与えるため、バランスのシリンダとピストンの間に摩擦のない空気静圧バランスを開発した。

位置の検出にはリニアスケールを使用した。アッベの誤差をできるだけ少なくなるよう加工位置の近くに取付け、固有振動数が高くなるような強固な固定方法で設置した。

リニアスケールの最小分解能は3.125nmである。

リニアモータの制御はPWM（Pulse Width Modulation）アンプを使用し、位置速度の制御は、フィードフォワード補償PID（Proportional Integral Derivative）フィードバック制御方式で行っており、制御周期は12.5KHzである。

2-3-4 カウンタ動作による振動抑制機構

高加速度で微小形状を加工する場合、低重心化や移動体の軽量化をしても振動の発生を避けることができないため、振動を抑制する機構を実装した⁴²⁾。本研究の超精密加工機の基本構成を図2-10に示し、X軸の詳細の機構を図2-11に示す。この機構は、XY軸にだけに実装し、Z軸には、実装するスペースが少なく取り付けることができなかった。制振機構の基本的な考え方は、移動体の移動方向と反対方向に同じ重量の重りを同じ加減速パターンで動作することで振動を除去する機構である。移動体の加減速に伴う反作用は、リニアモータの支持部分に発生するが、反対に移動する重りを載せたリニアモータを同じ支持部に配置することで、力を狭い範囲に閉じ込め移動に伴う重心位置の変動をなくした構造とした。移動体とカウンタ移動体の重心位置を同じ平面内に配置して、重心位置の違いにより発生するトルクを少なくした。X軸に実装した駆動軸と制振機構は、4個のリニアモータで構成されている。内2個は図2-11の5に示すX軸の移動体を駆動するもので、他の2個は図2-11の2と7に示すガイドウェイの両サイドに配置された制振用のリニアモータである。制振用のリニアモータ1と2は独立した軸として制御され、加減速パターンは駆動軸の動きに合わせて制御することで制振の最適化ができる。Y軸の制振機構もX軸と同じように4個のリニアモータで構成されている。

制振機構の評価をするために、微細3次元加工時に発生する短い距離を往復する動作で振動を発生させ、その振動の制振効果を評価した結果を図2-12に示す。加速度を0.5G一定にして、X軸方向を往復する距離を変えて振動源の周波数10Hz（図2-12(a)）、15Hz（図2-12(b)）、20Hz（図2-12(c)）と30Hz（図2-12(d)）を生成して、制振機構の有無によるX軸方向の加速度を測定した。X軸が往復運動することにより発生する振動は、機械や機械を設置している地面との関係で決まり、15Hzから20Hz付近に共振点があると考えられる。表2-4に制振機構の有無による振動抑制の結果を示す。X軸が往復運動することで発生する振動は、制振機構を有効にすることで1/20以下になっており、制振の効果を確認することができた。高調波成分に関しては、振動除去効果が基本波に比べて少なく、その原因と対策が今後の課題である。

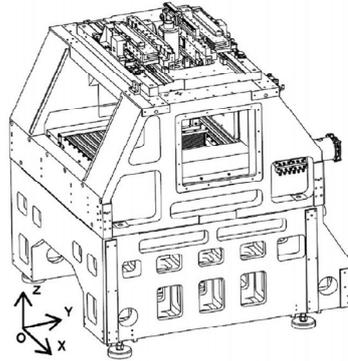
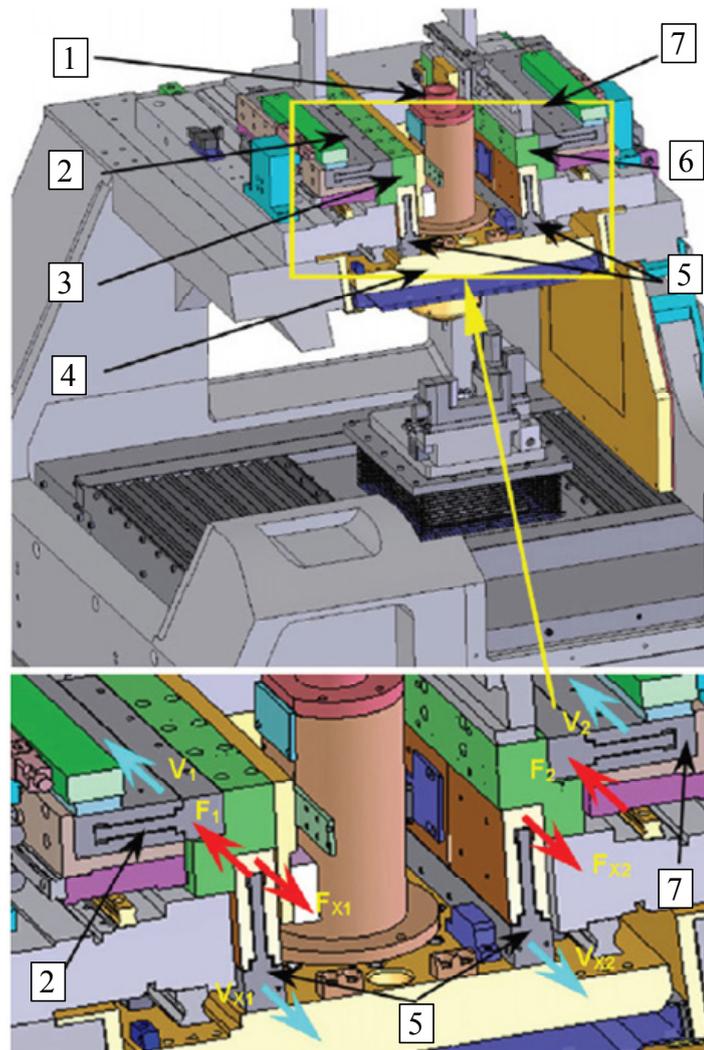


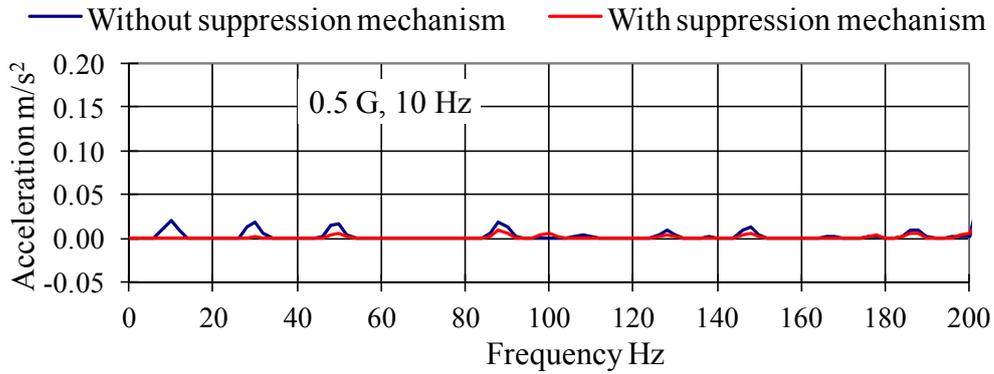
Fig. 2-10 Basic structure of ultra-precision machine tool



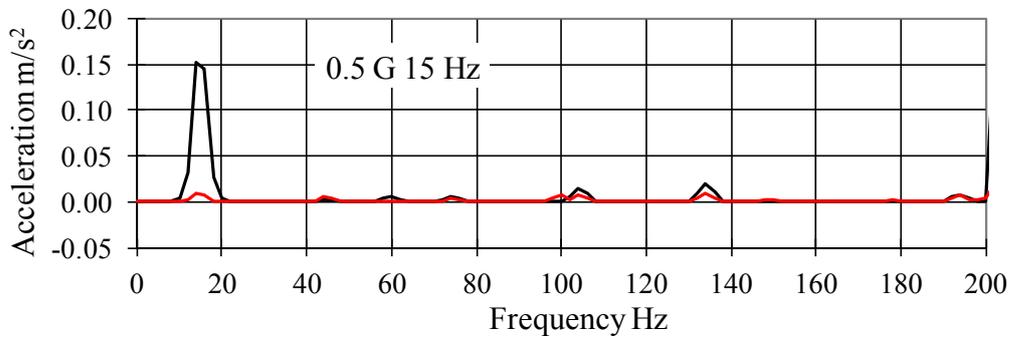
Mechanical structure of X axis of the designed machine tool

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Spindle | 5. Linear motor for X axis |
| 2. Linear motor for damping axis X1 | 6. Fixed supporter 2 |
| 3. Fixed supporter 1 | 7. Linear motor for dumping axis X2 |
| 4. X axis slider made of ceramics | |

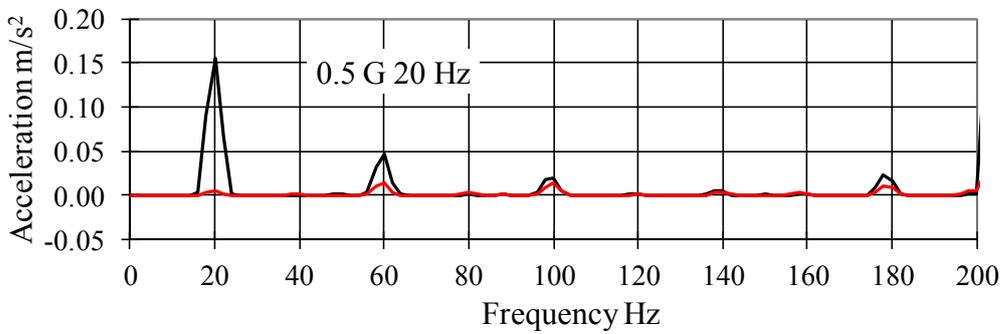
Fig. 2-11 Detail features of vibration suppression mechanism



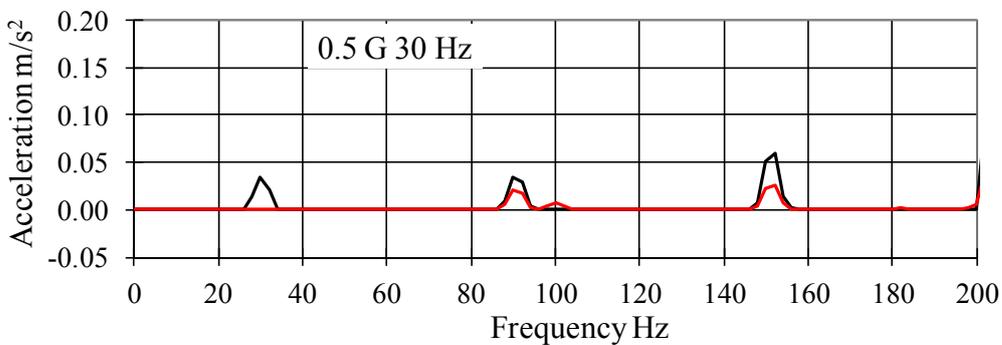
(a) Vibration damping at 10 Hz with 0.5 G



(b) Vibration damping at 15 Hz with 0.5 G



(c) Vibration damping at 20 Hz with 0.5 G



(d) Vibration damping at 30 Hz with 0.5 G

Fig. 2-12 Vibration suppression effects

Table 2-4 Vibration damping ratio by vibration suppression mechanism

Fundamental frequency Hz	Fundamental frequency	3 rd harmonic frequency	5 th harmonic frequency
10	0.025	0.078	0.294
15	0.053	0.545	0.571
20	0.032	0.304	0.667
30	0.029	0.571	0.412

2-3-5 微小径工具に対応した超高速主軸

微小径工具で高速ミーリングを実現するためには、超高速主軸は必須であり、その性能は加工特性の主要な要素である。そこで、 $120,000\text{min}^{-1}$ 回転の空気静圧ベアリングでタービン駆動の主軸を開発した。構造の概要図を図 2-13 に示す。

主軸の性能はベアリングにより決まる。機構の一つとしてボールベアリングが考えられるが、回転精度、ベアリングから発生する振動や寿命の問題があり採用しなかった。空気静圧ベアリングは剛性の点で問題はあるが、超精密加工に必要な回転精度や寿命では高い性能を実現できるため採用した。駆動は、タービン方式とし、回転速度は $120,000\text{min}^{-1}$ 一定とした。図 2-14 (a) にマイクロ工具を実装した主軸の前面の写真と図 2-14 (b) に後端の空気取り入れ口の写真を示す。タービン方式にはタービン翼による振動の問題があるが、一周に 12 枚のフィンを 2 段に配置して、位相をずらすことやエアーの吹き出しの個数 (3 個)、位置や形状の工夫により、この問題を解決している。空気静圧ベアリングは初期にはオリフェス絞り方式を使用していたが、空気の流量が多い問題や、負荷耐性の問題があり、現在は多孔質タイプに変更している。多孔質タイプにすることで空気の流量が少なく、剛性を高くすることができ、万一、ロータがベアリングに接触した場合でも多孔質 (グラファイト) の固体潤滑性でダメージが少なく済み、負荷耐性が向上した。空気静圧ベアリングは抵抗がないため停止するためには 3 分程度の時間が掛かり工具交換の時間が長くなる問題があったが、エアーをタービンの回転する方向と逆方向に噴射することで約 30 秒に短縮することができた。タービン駆動方式は短時間で熱飽和に達するので使いやすいが、空気の使用流量が多く、専用のコンプレッサが必要となり、省エネルギーとは言えない欠点がある。

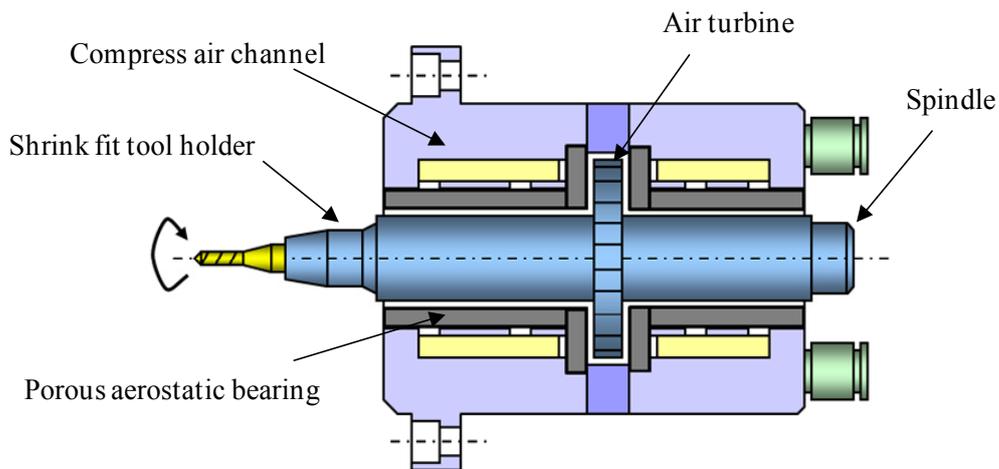
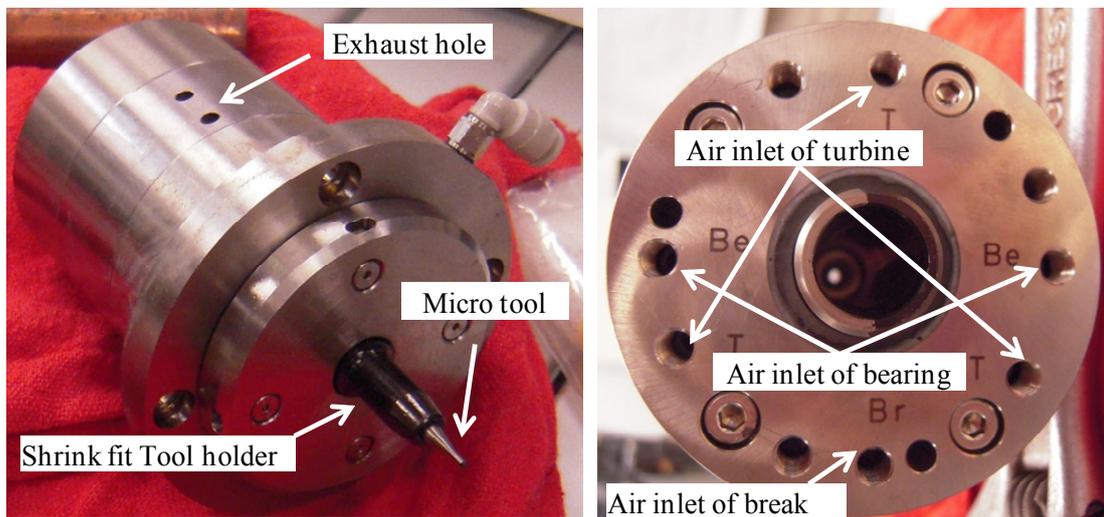


Fig. 2-13 Structure of aerostatic bearing spindle



(a) Front view of spindle with micro tool

(b) Back view of spindle

Fig. 2-14 Aerostatic bearing spindle driven by air turbine

2-3-6 焼きばめによるツーリングシステム

高速ミーリングでは工具の保持機構が重要な技術要素となる⁴³⁾。120,000min⁻¹で回転しながら確実に工具を保持するためには、コレット方式では遠心力に対応する保持力や振れ精度の問題で対応が難しいため、焼きばめ方式とした⁴⁴⁾。一般的には、HSKのような規格化されたホルダを使用して、そのホルダを主軸に脱着するが、高速回転時のバランスを出すことが難しいこと、主軸の回転中心部にスペースがなく脱着する機構を実装できないことにより、このような方式は適用できない。そこで、取り外し式のホルダではなく、図 2-15 に示す主軸ロータに直接工具ホルダが組み込まれたタイプを開発した。主軸は固定されているので、工具を交換する際には、工具を主軸の下まで持ってきてホルダを加熱し工具を交換する。ホルダの加熱は高周波加熱装置を使用し、約 15

秒で加熱して交換動作を行い、発熱量による機械系の影響を極力少なくしている。これらの脱着動作は手動で行うことはできないので、自動工具交換装置を加工機に組み込んだ。ホルダの材質は熱膨張係数が大きいことと耐食性によりステンレス鋼を選択した。図 2-16 (a) に示すように、加熱には高周波誘導加熱方式 (2MHz, 1KW) を採用し、コイルの巻数は 2 ターンで、加熱温度は 450°C, 加熱時間は 15 秒程度である。図 2-16 (b) に示すように、ホルダの加熱領域は約 20mm でそれ以外の領域は加熱されることはなく、主軸ロータ本体への熱影響は発生しない。工具ホルダは、工具直径 4mm に対してホルダは内径 0.385mm として、ホルダの内面研削は主軸ロータに組んだ後に、ロータの回転中心と同心になるように内面研削をしている。

焼きばめホルダと主軸ロータは一体となっており、焼きばめホルダが寿命になれば主軸交換となる。従って、焼きばめホルダの寿命は重要であり、10,000 回の挿抜評価を実施し組織の変化や硬度の変化はなく、十分な耐久性があることが既に評価されている⁴⁵⁾。

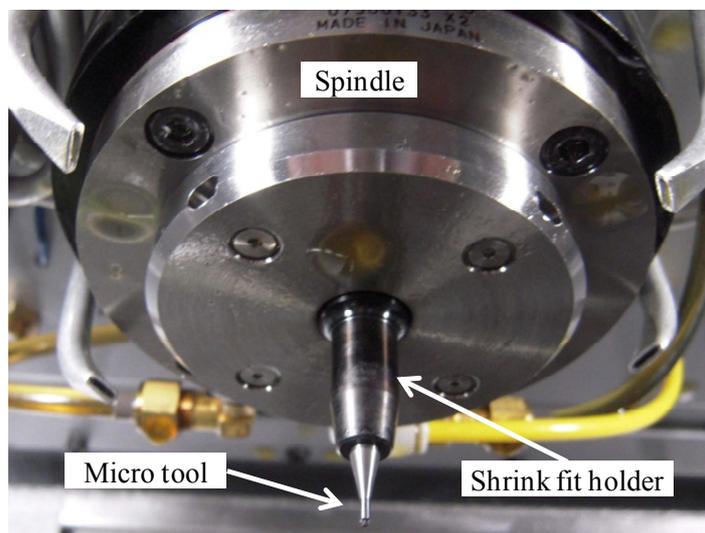
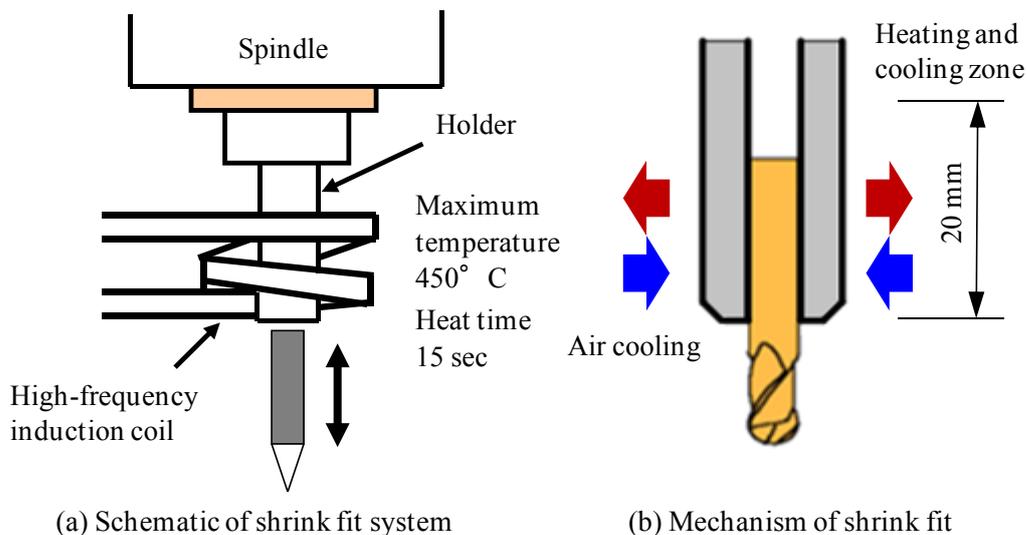


Fig. 2-15 Shrink fit holder on spindle



(a) Schematic of shrink fit system

(b) Mechanism of shrink fit

Fig. 2-16 Shrink fit system

2-4 加工機の評価

2-4-1 2次元スケールによる微小コーナ運動の評価

加工機の運動性能を2次元スケール（ハイデンハイン KGM 181）を使用して評価した。主軸取り付け部分に検出ヘッドを取り付け、テーブル上に2次元スケールプレートセットして測定した。図2-17 (a) は、評価した運動軌跡を示し、0.5mmの四角形状の運動の中で、コーナ部には半径0.025mmのコーナがある。図2-17 (b)、図2-17 (c)は、コーナ部の運動を示し、目標軌跡は黒線、実際の軌跡を赤線で示す。図2-17 (b) では速度1000mm/min（コーナ部加速度1.1G）の運動時の結果であるが、軌跡に乱れが見られ最大1 μ m程度のずれがある。同様に図2-17 (c) は速度500mm/min（コーナ部加速度0.28G）の結果だが、軌跡にずれはほとんど見られない。実際の仕上げ加工では、最大加速度0.3Gで動作することが想定されており、目標とする結果が得られた。

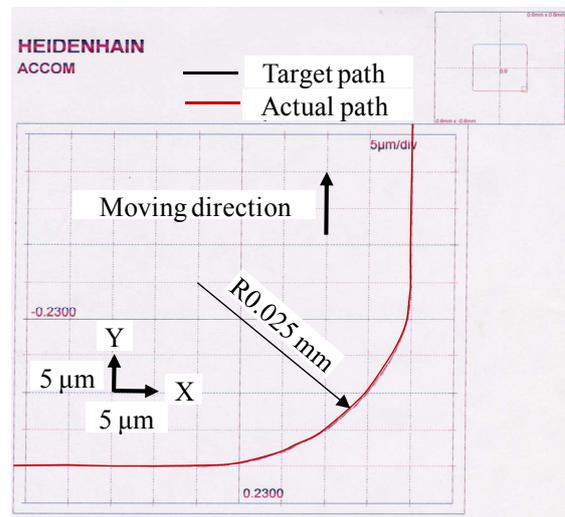
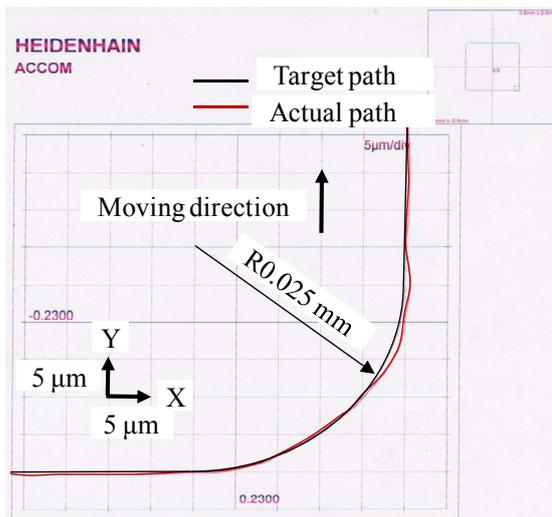
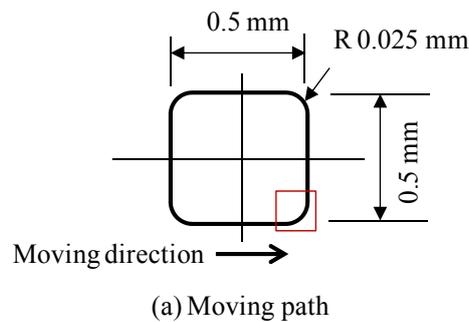


Fig. 2-17 Corner motion of radius 0.025 mm

2-4-2 2次元スケールによる円弧運動の評価

次に、テーブル上に超精密 2 次元スケール（株式会社マグネスケール 最小分解能 0.0625nm）を使用して円弧補間動作の評価を実施した。図 2-18 に機器のセッティングを示す。図 2-19 に測定した結果を示し、主軸取り付け部分に検出ヘッドを取り付け、テーブル上に 2 次元格子プレートセットした。円弧形状からの誤差と象限の切り替わり目には X, Y 軸ともにスパイク状の誤差があり、ガイドの摩擦によるステックモーシオンと考えられるが、今後改善する必要がある。1 回目と 2 回目での誤差は非常に小さいので、再現性のない誤差は少ないと考えられる。

円弧の誤差のデータから、補正データを計算して、逆位相で補正を入れた指令値で動作した結果を図 2-20 に示す。円弧の誤差の結果は表 2-5 に示すが、平均誤差は約 10nm となっており、再現性の高い動作をしていることが確認できた。

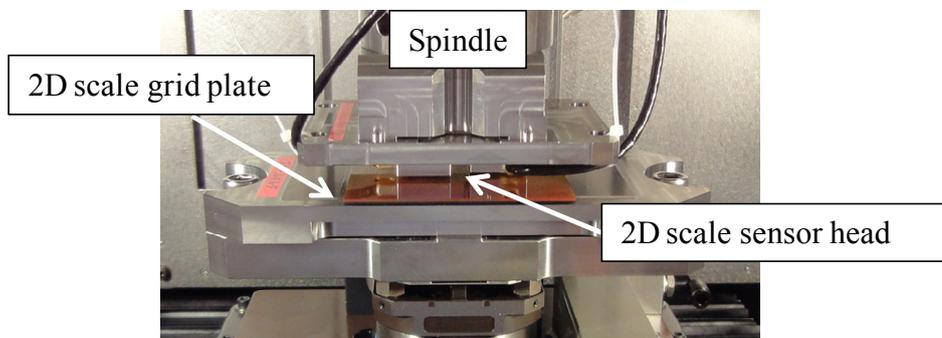


Fig. 2-18 Setting of 2D scale system on developed ultra-precision machine

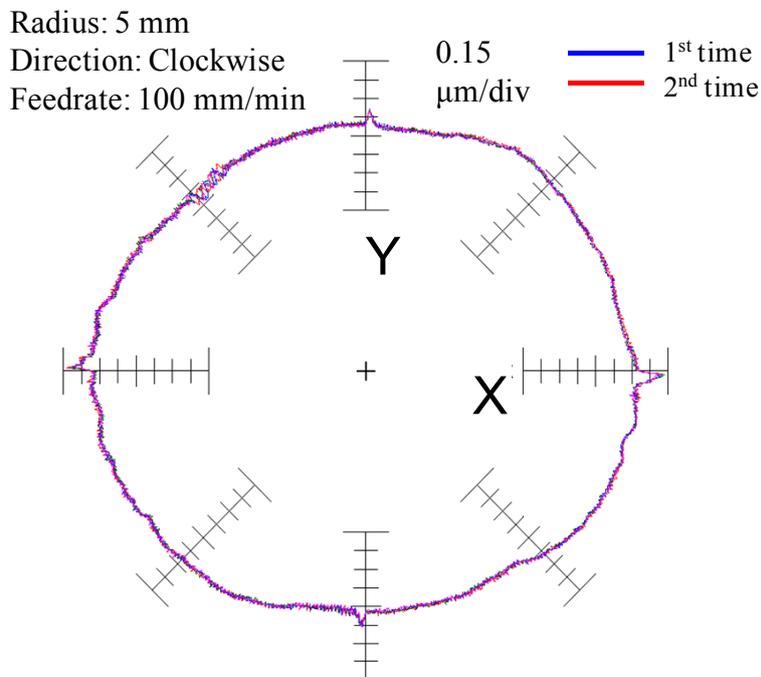


Fig. 2-19 Results of Circle test using ultra-precision 2D scale

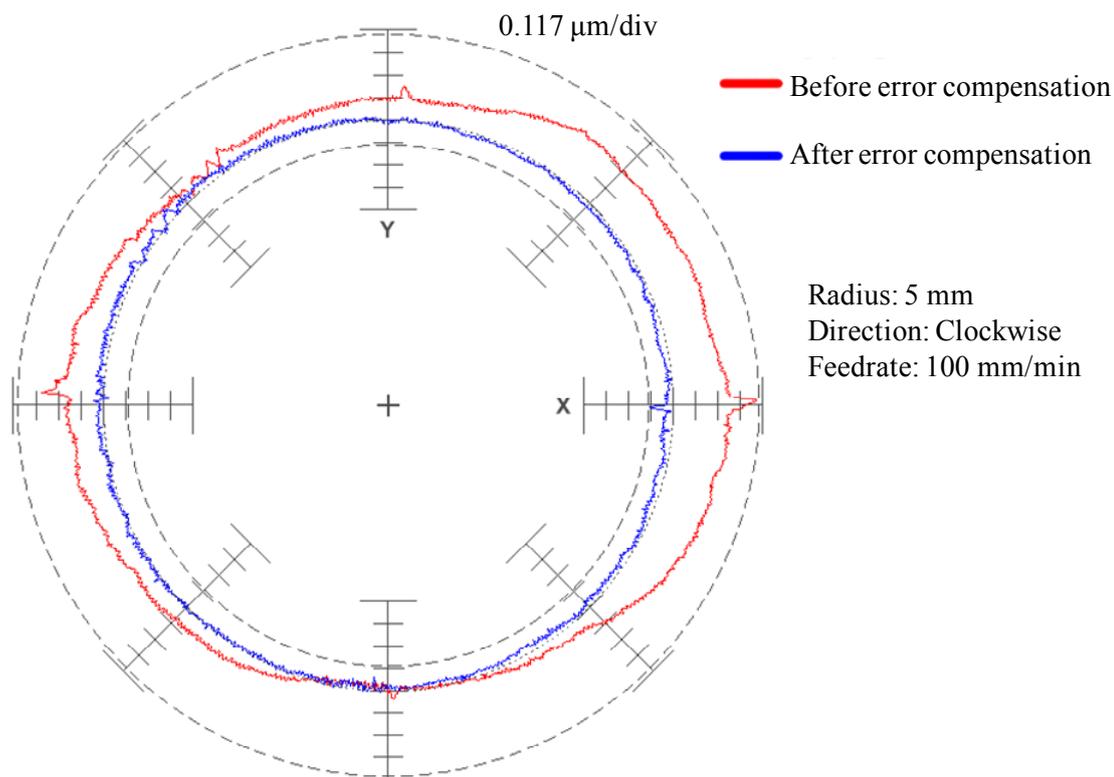


Fig. 2-20 Results of error compensation of circle test

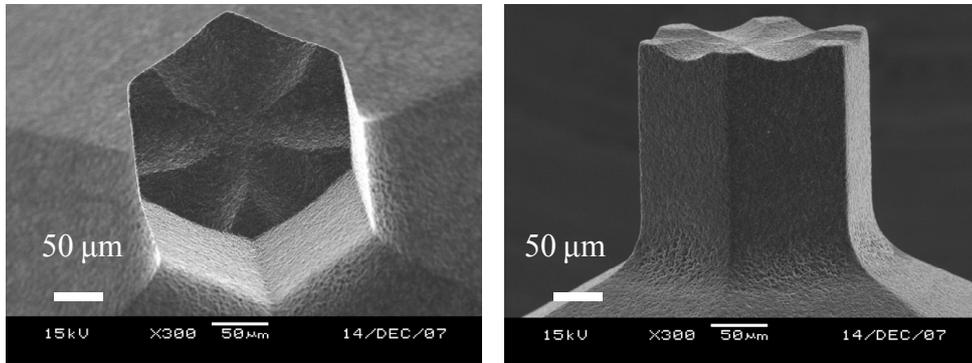
Table 2-5 Results of error compensation of circle test

	Mean (μm)	Std Dev (μm)	RMS (μm)
Before error compensation	0.2080	0.1091	0.2349
After error compensation	-0.0097	0.0185	0.0209
Improvement	95.3%	83.1%	91.1%

2-4-3 加工による超精密加工機の評価

開発した加工機を使用してマイクロ PCD エンドミルによる超硬の加工結果を示す。図 2-21 に使用した半径 0.1mm, 6 枚刃の工具の形状を示す。10x3mm の大きさに幅 3 μm , 高さ 30 μm の微細な曲線のリブを加工した結果を図 2-22 に示す。図 2-22 (a) は、リブの終端部分を示し、欠けの発生がなくスムーズに加工していることがわかる。図 2-22 (b) は、半径 0.12mm の円弧部分で、滑らかに加工されていることがわかる。加工時間は 5 時間であり、長時間安定して加工できることを確認した。

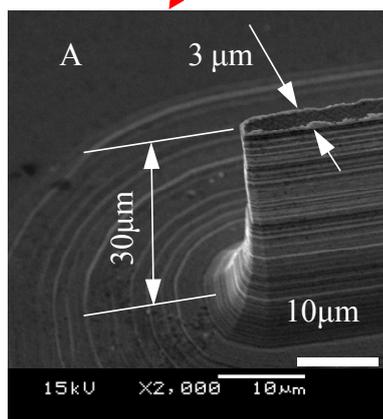
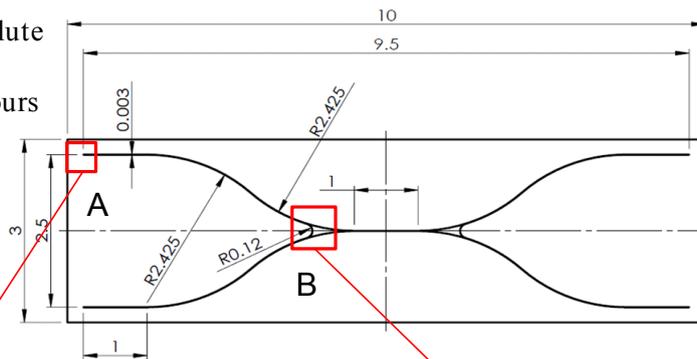
単結晶 SiC ウェハを半径 0.45mm の 6 枚刃 PCD エンドミルで加工した例を図 2-23 に示す。白色干渉計の測定で平均面粗さ Ra は 5nm, 最大面粗さ Rpv は 42nm であった。目的とする脆性材料の加工において、最大面粗さが 50nm 以下、平均面粗さが 10nm 以下の加工が実現できることが確認できた。



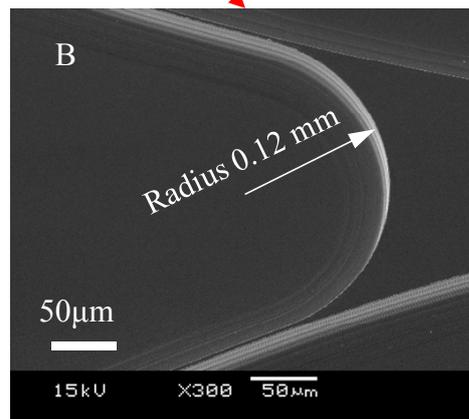
(a) Bottom view of micro PCD end mill (b) Side view of micro PCD end mill

Fig. 2-21 Micro PCD end mill of radius 0.1 mm with 6 flute

Tool: PCD end mill
 R 0.1 mm, 6 flute
 Height: 0.03 mm
 Machining time: 5 hours

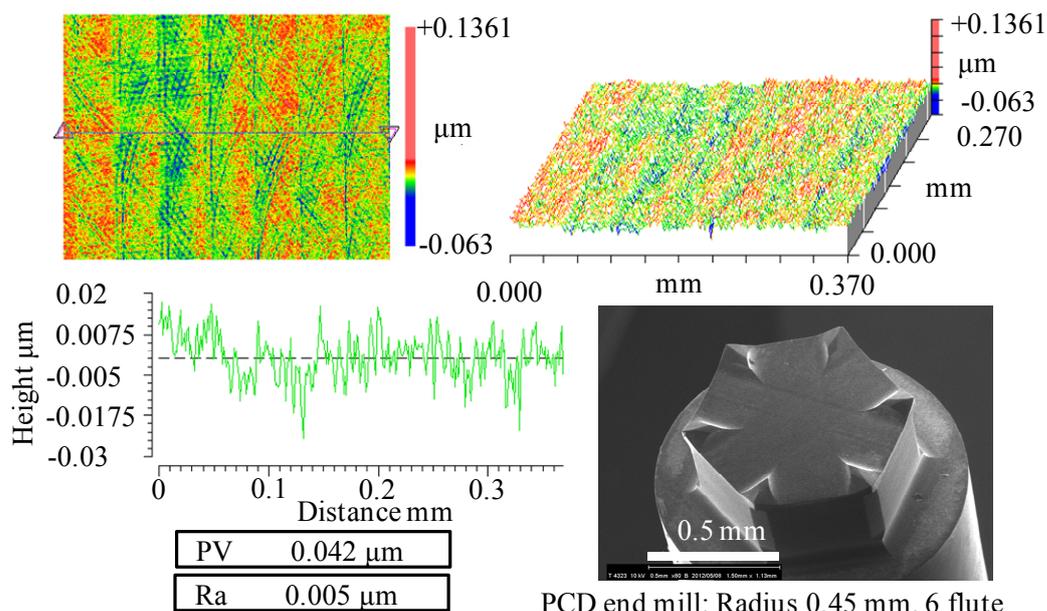


(a) End of curved rib



(b) Curved area

Fig. 2-22 Results of machining of ultra-fine grain Tungsten Carbide



Workpiece: Single crystalline SiC 4H

Cutting conditions: Axial depth of cut 4 μm, Pitch 0.05 mm

Feedrate 0.065 μm/tooth (100 mm/min)

PCD end mill: Radius 0.45 mm, 6 flute

Fig. 2-23 Results of machining of single crystalline SiC

2-5 結言

微細3次元形状加工において加工効率と加工精度を最大化する加工機を目標に、要素技術から開発を進めた。開発した技術要素を最適に組み合わせることで高効率と高精度を実現する超精密加工を実現することができた。本研究で明らかになったことを下記に要約する。

- (1) 加工機の基本構造を見直し、高加速度に対応する低重心でオーバハングの少ない構造を開発し、移動体はセラミクスを全面的に採用し軽量化した。
- (2) ガイドウェイにはローラガイドウェイを採用し、問題点である転動体通過振動が小さいタイプを開発した。
- (3) AC コアレスタイプのリニアモータを適用し、移動体の重心位置を駆動する配置とし、リニアスケールの位置はアッペの誤差が少なくなる位置とした。
- (4) 高加速度動作により発生する振動を少なくするため、カウンタ動作による制振機構をXY軸に実装し、その抑制効果を確認した。
- (5) 微細3次元形状加工に対応した $120,000\text{min}^{-1}$ の超高速空気静圧エアタービン駆動主軸を開発した。
- (6) 主軸のロータに固定された焼きばめホルダを開発し、工具の自動脱着システムを加工機に組み込んだ。
- (7) 加工機の動作評価を2次元スケールで実施し、静的精度と動的精度が目標を満たしていることを確認した。
- (8) 加工評価を実施し、脆性材料の加工において、ナノメートルレベルの面粗さが実現できることを確認した。

第3章 マイクロPCD工具を製作するためのワイヤ放電加工機の開発

3-1 序言

電子部品や機能部品の高機能化や小型化に伴って微細な部品を大量に生産することが要求され、耐久性を持った微細形状金型の需要が増大し、そこで使用される硬脆性材料の高精度、高効率加工システムの確立が期待されている。非鉄の硬脆性材料を加工するための工具としてダイヤモンド工具が使用される。ダイヤモンド回転工具には、単結晶ダイヤモンド、ナノ多結晶ダイヤモンド、多結晶焼結ダイヤモンド、ダイヤモンドコーティング工具と電着ダイヤモンド工具の5種類の工具がある。多結晶焼結ダイヤモンド(PCD)は、バインダに金属であるコバルトを使用しているために導電性があり、放電加工することができる唯一の材料であり、ワイヤ放電加工機により様々な形状に成形することができる。複雑な形状の工具を製作するためにはワイヤまたは工具を傾斜させることが必要であり、工具の回転軸を含めると同時5軸の加工機が必要になる。

そこで本研究では、PCDを用いた微細工具を複雑な形状に製作することができる同時5軸動作のワイヤ放電加工機を開発し、開発した加工機を用いて工具を高精度かつ高効率に製作する方法について研究した。

3-2 PCDブランク工具の準備

PCD工具の製作工程では、図3-1に示すように、PCDバルク材からワイヤ放電加工機により直径1.5mmにチップを切り出し、シャンク直径4mmの超硬ブランクシャンクの先端に蝟付けして、最後に周辺を整えるため研削で仕上げる。この素材にワイヤ放電加工により工具形状に加工することで、マイクロPCDエンドミルを製作する。製作する工具の直径は1mm以下なので、直径1.2mmのブランク工具を製作した。PCDを先端に蝟付けしたブランク工具の図面を図3-2に示す。

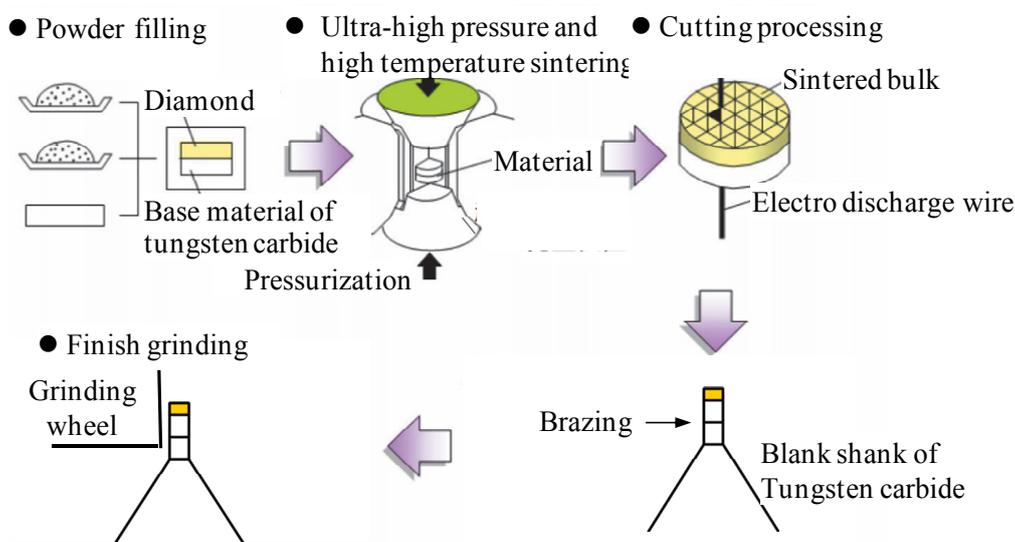


Fig. 3-1 Manufacture process of PCD blank

工具を加工するためには、まず工具ホルダにブランク工具をセットし、C軸に工具ホルダをセットする。工具の中心をC軸の回転中心に合わせ傾きを調整し、加工位置で $1\mu\text{m}$ 以下の振れ精度となるように調整する。

次に、YX軸の座標系は、ワイヤに対する工具の位置を接触感知機能により求めて、セットする。図3-3に示すように、工具の中心位置がワイヤの中心位置になった位置を座標系のゼロにセットする。

接触感知機能とは、ワイヤと工具との間に定められた電圧を掛けておき、その距離を小さくしていくと接触する少し手前で電圧が低下し始める。電圧の低下が設定された一定値以下になった位置で停止する。最初は高い速度で検出し、大凡の位置が判明するので、二回目以降は速度を順次落として測定し、最終的には高精度に接触する位置を検出する機能である。検出精度は、ワイヤの走行時の振動やテンションに依存するが、約 $1\mu\text{m}$ である。

X軸の位置は、U軸を含まない加工では、任意の位置に決めることができるが、U軸を含む加工では、図3-3に示すように、U軸の回転中心からの距離が必要になる。NCプログラムの計算では、U軸が 0° でU軸の回転中心からX軸の原点までの値を用いて、XZの位置を計算する。

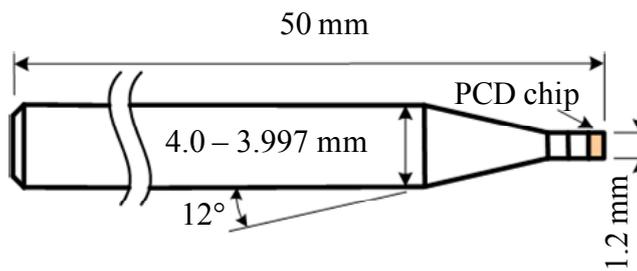


Fig. 3-2 Drawing of PCD tool blank

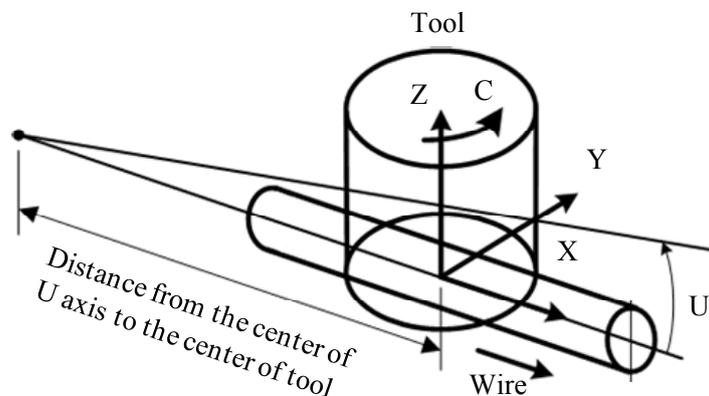


Fig. 3-3 Define of coordinate system

3-3 マイクロPCD工具を製作するためのワイヤ放電加工機

3-3-1 工具製作用ワイヤ放電加工機の構成

工具を加工するためには、工具の回転位置を割り出す回転位置決め機構が必要になる。また工具は回転して使用することを前提としているため、工具を一定速度で回転しながら加工する機構が必要になる。一般的なワイヤ放電加工機では、ワイヤが上下方向に走行し、被加工物は加工槽の中に置かれて、加工液に浸かって加工される。被加工物が固定されている場合には問題はないが、回転の必要がある場合には回転機構が加工液に浸かった状態になり、防水シールが必要となる。シール機構を実装すると、シール抵抗のため精度や応答性に制限が生じ、また、加工液中で回転軸を高速で回すと液が飛散する。工具交換時に付け替えが発生するが、加工液にあるチップで汚れる可能性があり、精度よく交換することが難しい。従って、高精度、高応答を実現するためには、工具を保持回転する機構は加工液中にはない設計が必要になる。

複雑な形状の工具を製作するためには、ワイヤを 45° 以上の大きな角度で傾ける必要がある。しかし、一般的なワイヤ加工機は最大でも $\pm 25^\circ$ で大きな角度が実現できないことがあり⁴⁶⁾、また、図3-4(a)に示すように、大きな角度でワイヤを傾けるとワイヤガイドは傾かないためワイヤの接触する位置が変化することで高精度を実現することが難しい問題がある。

この要求に応えるために図3-4(b)に示すように、ワイヤ走行系を上下方向から左右方向に変更し、工具を保持している回転機構が液に浸からないようにしたことと、ワイヤガイドがワイヤの傾きと一緒に傾斜するようにしたことと、ワイヤが大きく傾いても高精度が維持できるように設計した。ワイヤ放電加工機では、加工液は純水が使用されるが、PCDの高精度加工をするためには油性加工液を使用する必要がある。形彫り放電加工機は油性加工液が使用されているので、設計するための基準となる放電加工機を形彫り放電加工機とし、油性放電加工液の供給システムは、そのまま使用した。

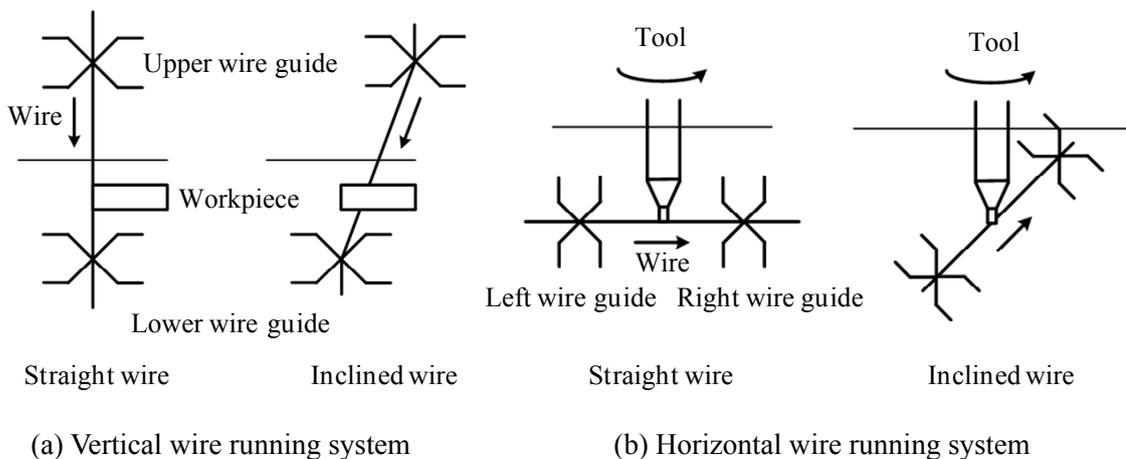


Fig. 3-4 Wire running system for fabrication of PCD tool

3-3-2 6軸工具製作用ワイヤ放電加工機の機構

形彫り放電加工機をベースに水平方向のワイヤ走行系を付加し、ワイヤ放電系の NC (Numerical control) 装置で制御するシステムを構築した。軸構成は直交 XYZ 軸と工具の回転軸の C 軸とワイヤの傾き軸である U 軸と Z 軸に対向して U 軸を載せて回転する V 軸で構成する。軸の名称は、図 3-5 (a) に示す。U 軸はワイヤ走行方向とし XZ 平面内で回転し、 0° で Z 軸と並行となるように調整する。工具をセットする C 軸は、工具の回転中心軸が Z 軸と並行となるように工具の傾きと回転中心位置を調整する。

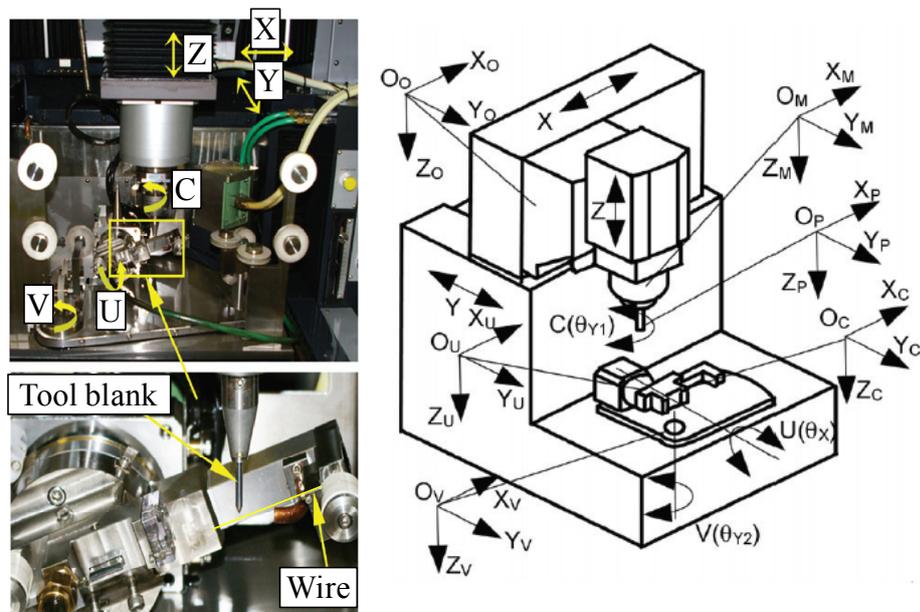
図 3-5 (b) に示すように、直交 XYZ 軸は、テーブルとは独立に全ての駆動軸があり、Y 軸上に X 軸が載り、その上に Z 軸が載る構成となっている。この軸構成は形彫り放電加工機では一般的な構造で、被加工物がテーブル上に固定されて動かず、大きく重い被加工物を設置できることや加工液を動かさないで液がこぼれることがないメリットがある。しかし、3 軸が重なっているため一番下の Y 軸が重くなり応答性が高められないことや、大きな構造体となるため熱変位特性が悪くなるなどのデメリットがある。

U 軸の回転中心は、図 3-5 (a) に示すように加工位置から大きく離れた位置にあり、大きな被加工物を加工できるのではあるが、U 軸の回転精度の影響を大きく受ける。

工具を複雑な形状に加工するためには、XYZ 軸と CU 軸の同時 5 軸動作が必要になる。V 軸は、U 軸の X 軸との平行を出すための調整用のみ使用される。

一般的なワイヤ放電加工液は水であるが、PCD 工具を加工する場合には、できるだけ小さな面粗さと形状加工精度が要求されるため油である必要があり、油性放電加工液を供給するシステムは形彫り放電加工機の油性加工液システムをそのまま使用した。

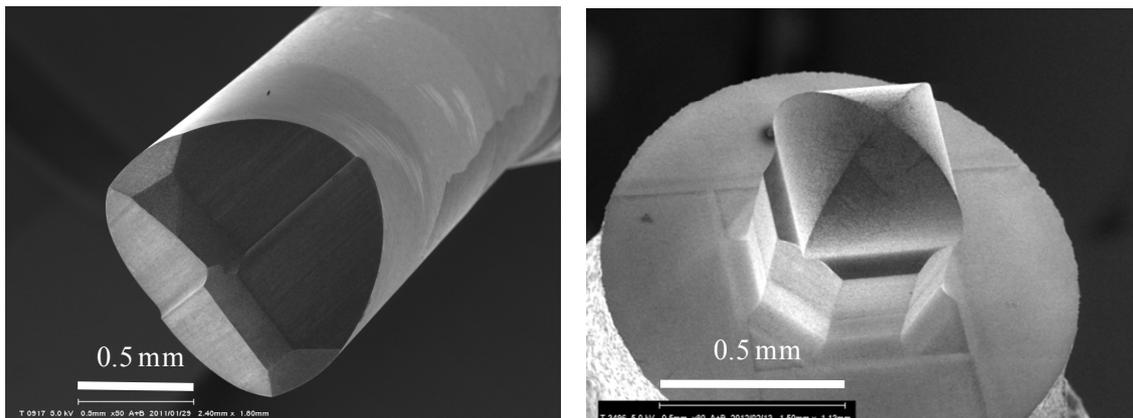
開発した 6 軸ワイヤ放電加工機を使用して製作した PCD エンドミルの例を図 3-6 に示す。図 3-6 (a) は U 軸を使用した 2 枚刃の工具、図 3-6 (b) は U 軸を使用しない 4 枚刃のボールエンドミルである。



(a) Axis structure of six axis wire EDM

(b) Relation of six axes

Fig. 3-5 Define of coordinate system ⁴²⁾



(a) 2 flute end mill using U axis

(b) 4 flute ball end mill not using U axis

Fig. 3-6 Fabricated PCD end mill by six axis wire EDM

3-3-3 6軸工具製作用ワイヤ放電加工機の問題点と解決策

6軸ワイヤ放電加工機では、幾つかの問題点が発生した。

第一は、U軸の精度不良による加工精度の問題である。U軸の構造は、ハーモニックギアを介した駆動となっており、ハーモニックギアに起因するバックラッシュがあることと、加工位置が中心から100mm程度離れており、シールに起因するロストモーションやバックラッシュの影響が大きく反映されてしまい加工精度が不安定で再現性に乏しい。

第一の問題に対する解決策は、U軸の構造を大幅に変更し、ギアを使用しないダイレクト駆動タイプに変更することと、加工位置をU軸の中心位置にすることである。ダイレクトドライブにした場合、シール抵抗が大きいのでモータ出力の大幅なアップが必要であり、ワイヤテンションにより発生するトルクや、先端にあるワイヤ走行機構の重心位置に依存するトルク変動があり、モータ容量の選択には注意が必要である。また、トルクの余裕度が少ないとモータからの発熱で熱変位を起こすことも考慮に入れる必要がある。

第二は、ワイヤガイド間の距離が120mmあり、加工精度を上げるためにワイヤテンションを上げると断線してしまい、ワイヤテンションを上げることができない。

第二の問題に対する解決策は、U軸の回転中心を工具の加工位置に変更し、ガイド間距離を短くすることである。テンションを上げることが可能となり加工精度が向上すると考えられる。

第三は、Y軸方向の熱変位の問題で、長時間加工している最中にY軸方向の位置がずれてしまい形状精度が劣化することである。この問題は、加工中に基準位置を接触感知により再測定することで、ある程度解決できてはいるが、加工時間が長くなる問題は残る。

第三の問題に対する解決策は、ベースとした形彫り放電加工機が大型の加工物を加工できる加工機であったが、工具を専用に加工する加工機とすることで小形の形掘り放電加工機を選択し、熱変位の影響を少なくすることである。

第四は、C軸が、ワイヤ放電用NC制御装置の関係で割出しはできるが、一定に回転する機能がなかったことである。この問題に対応するため、回転専用の装置を開発して対応したが、この回転装置はNC装置には独立に動作するため、工具を加工するにはこの装置に改めて工具を装着し直す必要があり、作業性に問題があった。この機能の有無で工具の加工方法が大きく変わることが想定され、加工時間の短縮や脆性材料の加工に合った切刃の形状加工が実現できることになる。

第四の問題に対する解決策は、割り出し軸の機能と回転軸の機能を満たすC軸の駆動機構とNC制御装置を採用することである。

3-3-4 改良型5軸工具製作用ワイヤ放電加工機の仕様

前節で示した問題点に対する対策を実施して開発した改良型5軸工具製作用ワイヤ放電加工機の外観を図3-7に示す。問題点に対する対策を具体的に以下に示し、最後に実現した仕様の一覧を示す。

第一の問題点は、U軸の精度である。駆動系を100Wモータ+ハーモニックギアから600Wのダイレクトドライブモータに変更し、バックラッシュの対策を実施した。シール抵抗やワイヤのテンションに伴うトルクに対して十分な特性を持っていることを確認した。加工位置をU軸の回転中心にすることで精度が向上することが期待され、その評価結果を以下に示す。

U軸の精度を評価するために図3-8に示すように、回転中心から100mmの位置でのステップ角度送りの指令と実際の位置をZ軸に固定された電気マイクロメータで測定した。最初に測定システムの精度と直交軸の精度を確認するため、Z軸の3 μ mステップ動作を実施し、結果を図3-9に示す。各ステップの保持時間は2秒とした。最大誤差は0.3 μ mで電気マイクロメータの測定限界値に近い値であり、十分な精度を持っていると考えられる。次に、U軸の回転精度を0.05 $^\circ$ 、0.01 $^\circ$ と0.002 $^\circ$ ステップで測定した。0.01 $^\circ$ の結果を図3-10に示し、結果の一覧を表3-1に示す。この誤差は回転中心から100mmの位置での値であり、加工する工具の最大半径は0.5mmなので、その時の位置の誤差に換算すると最大値は約0.05 μ mであり、U軸は十分な精度を持っていると確認できた。

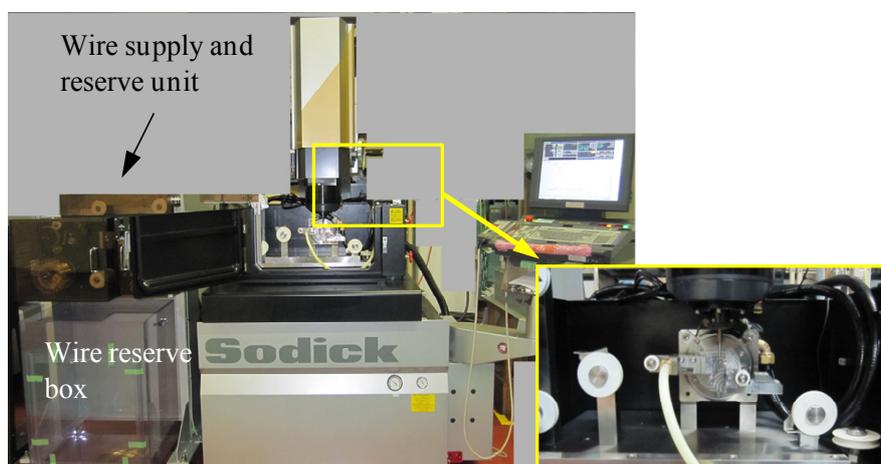


Fig. 3-7 Improved 5 axis wire EDM for fabrication of tool

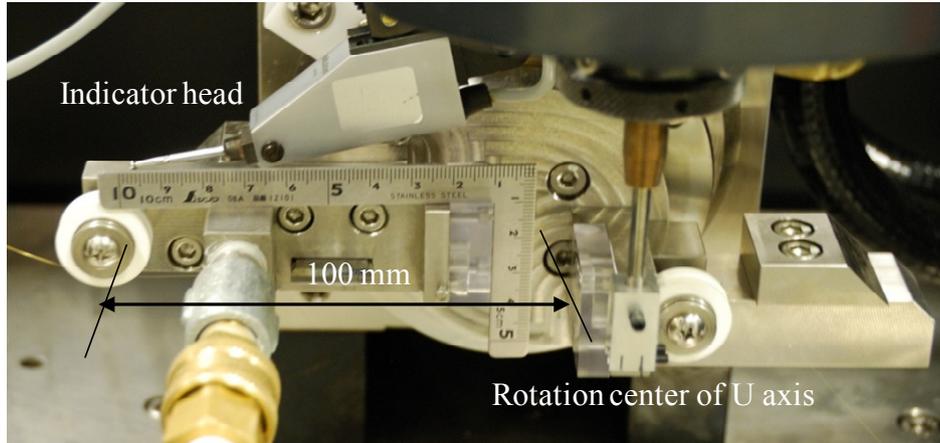


Fig. 3-8 Experimental setup for measurement of accuracy of U axis

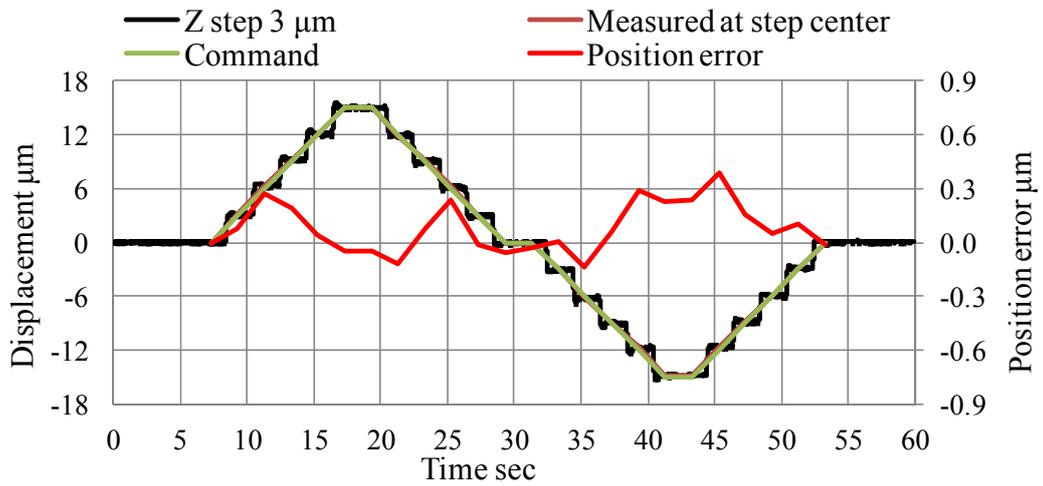


Fig. 3-9 Movement accuracy of 3 μm step on Z axis

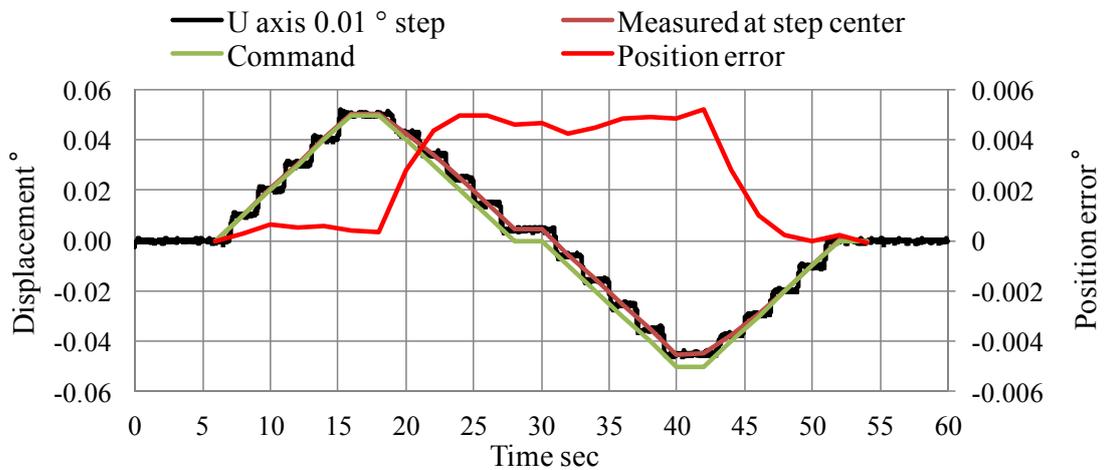


Fig. 3-10 Movement accuracy of 0.01 $^{\circ}$ step on U axis

Table 3-1 Results of movement accuracy of step

Step angle	Maximum position error	Position error at radius 0.5 mm
0.05 °	0.0054 °	0.047 μm
0.01 °	0.0052 °	0.045 μm
0.002 °	0.0042 °	0.037 μm

第二の問題点は、ワイヤテンションを上げることができないことである。加工機の使用用途を工具専用機とすることでガイド間の距離を 120mm から 35mm に短くすることでワイヤの断線の危険性を大幅に少なくした。この寸法は、U 軸の回転中心に工具の加工位置がある時に、60°傾いてガイド部分が工具やホルダに干渉しない最小の間隔として設計した。工具とワイヤガイドの位置関係を図 3-11 に示す。実際の機械で U 軸が 0° の場合を図 3-12 (a) , 45° の場合を図 3-12 (b) に示す。径 0.05mm のワイヤを使用しても十分なテンションを掛けて加工することができ、ワイヤの断線の可能性が大幅に低下したことを確認した。

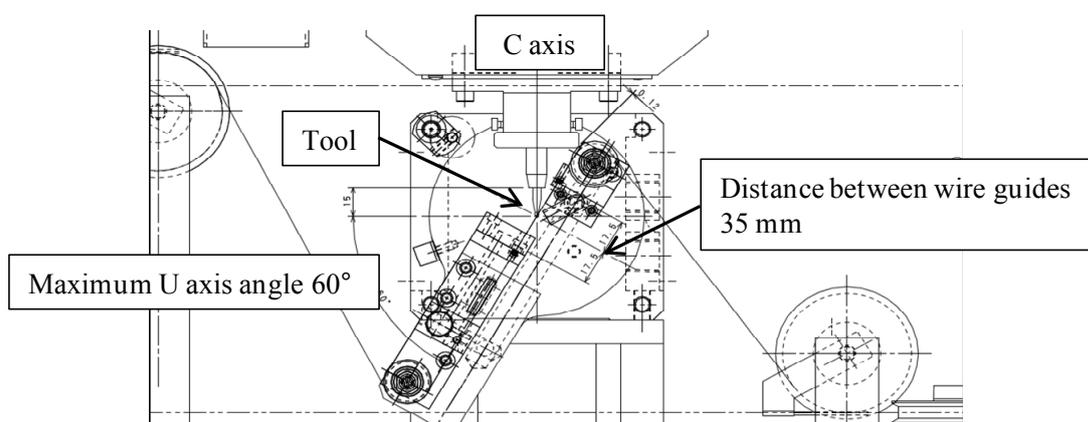
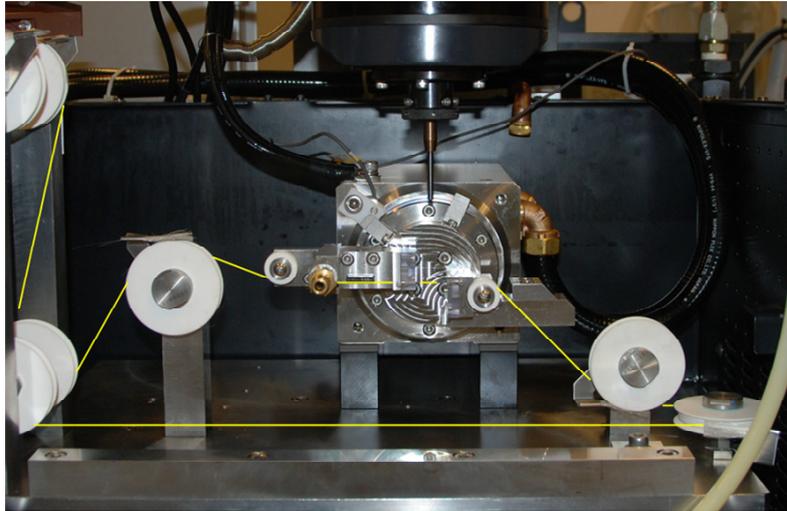
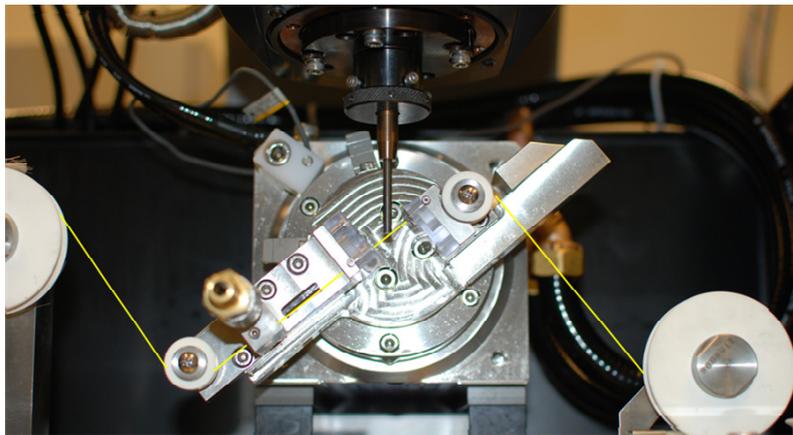


Fig. 3-11 Investigation of interference between wire guide and tool



(a) U axis angle 0°



(b) U axis angle -45°

Fig. 3-12 Wire running system around U axis

第三の問題点は、熱変位の問題であるが、ベースとなる加工機を中型の形彫り放電加工機から超小形の形彫りに変更することで熱変位の影響を小さくした。軸の構成は図3-12に示すように、X軸の上にY軸が載ったXYテーブルとZ軸はCコラムに単独で配置されており安定した動作が期待される構造となっている。熱変位室で正式な評価はしていないが、常に安定した精度が実現できていることから、改善されていると考えられる。

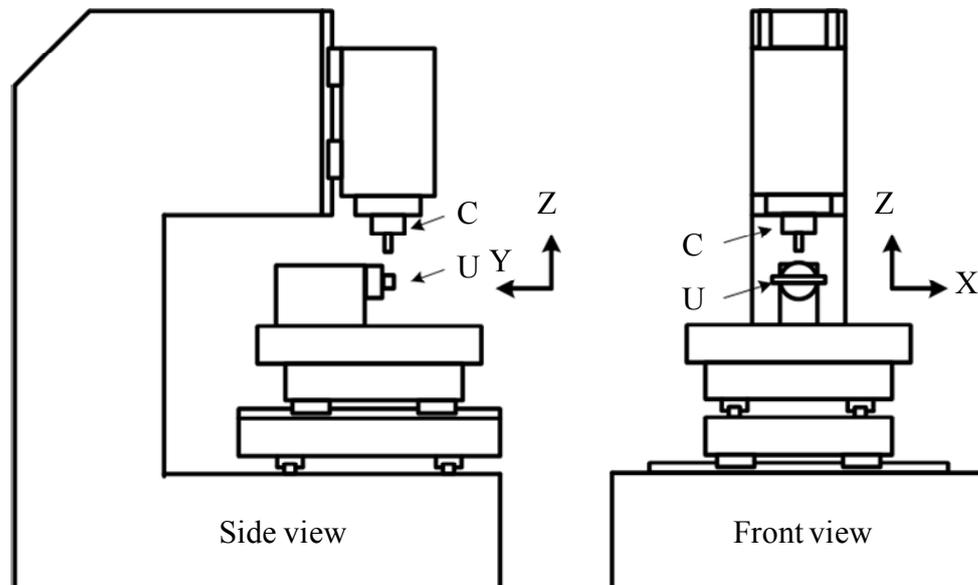


Fig. 3-13 Machine structure of improved 5 axis wire EDM

第四の問題点は、C 軸の割り出しと回転の両方を実現する機能をワイヤ放電加工用 NC 制御装置向けに開発することで解決した。NC プログラムの中で C 軸の割り出し機能と回転機能を切り替えることができるようになり、一回のセッティングで両機能を使用できるようになった。

上記問題点を解決した、改良型 5 軸工具加工機用ワイヤ放電加工機を開発した。第一世代との仕様の比較を表 3-2 に示し、開発した加工機の全景を図 3-7 に示す。

Table 3-2 Comparison of specifications of 6 axis wire EDM and improved 5 axis wire EDM for fabrication of micro PCD tool

	Improved 5 axis wire EDM	6 axis wire EDM
Stroke X, Y, Z	250 x 250 x 100 mm	350 x 300 x 250 mm
XYZ axis drive motor	Linear motor	Linear motor
Resolution of linear scale at XYZ axis	0.1 μm	0.1 μm
Encoder pulse of C axis	720,000 pulse	720,000 pulse
U axis drive	Direct drive	Harmonic gear + servo motor
Pulse of U axis	1,048,576 pulse	800,000 pulse
Machining position	Rotational center of U axis	Distance of 100 mm from rotational center of U axis
Distance of wire guide	35 mm	120 mm
Minimum wire diameter	0.05 mm	0.1 mm
C axis control	Positioning and rotation	Positioning
Wiring position	Right in right out	Right in left out

3-4 改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機によるマイクロPCD工具の製作

3-4-1 改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機を使用しての高効率加工

6軸工具製作用ワイヤ放電加工機では、割り出しと回転が一度にセッティングできなかったが、改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機では割り出しと回転を連続して行うことができ、加工方法を改善することにより大幅な加工効率の向上を実現した。

従来の加工方法は、図 3-14 (a) に示すように割り出し機能で形状を生成していたが、新しい方法では、回転体を最初に生成してから刃を生成する。従来の方法では、カットされた稜線の組み合わせで形状が形成されているため、少しでも位置がずれると稜線的位置が大きくずれ、形状精度に影響する。図 3-14 (b) と図 3-14 (c) に示す新しい方法では、最初に高精度に回転体を生成すれば、刃先は回転体の一部を切り取るだけなので、工具の回転精度には影響を与えない。二つの方法で加工した結果を図 3-15 に示す。加工時間は回転しながら形状を生成した方が、加工時間を短くできるメリットがある。加工工程毎の時間の比較を図 3-16 (a)、積算時間を図 3-16 (b) に示す。回転体として加工しているため精度が高く、加工時間は 1/4 以下となった。

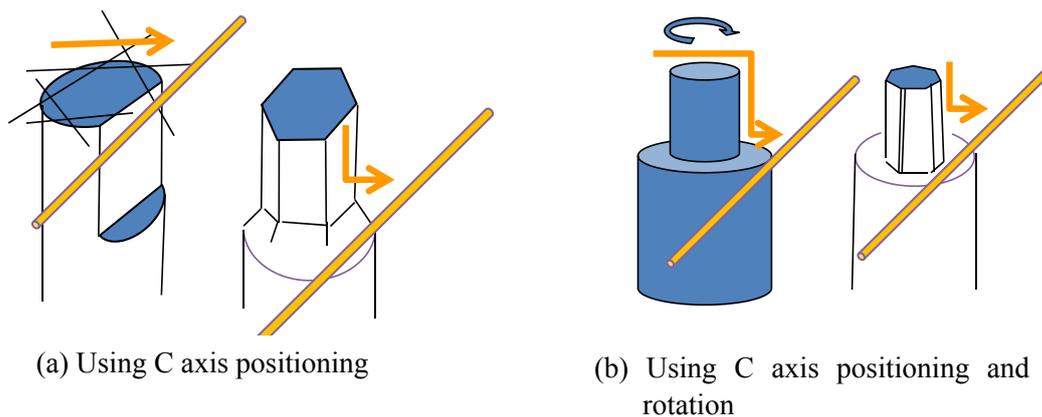


Fig. 3-14 Two machining methods of PCD end mill

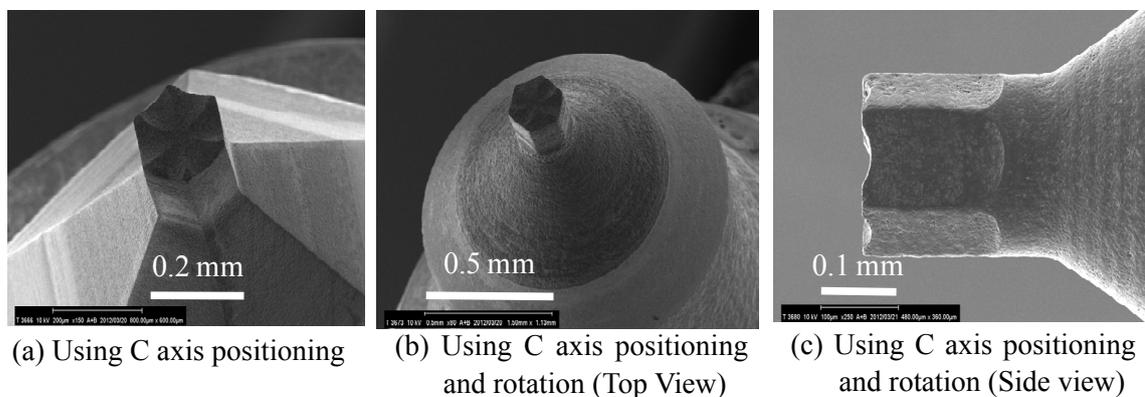


Fig. 3-15 Machined results of two machining methods with SEM

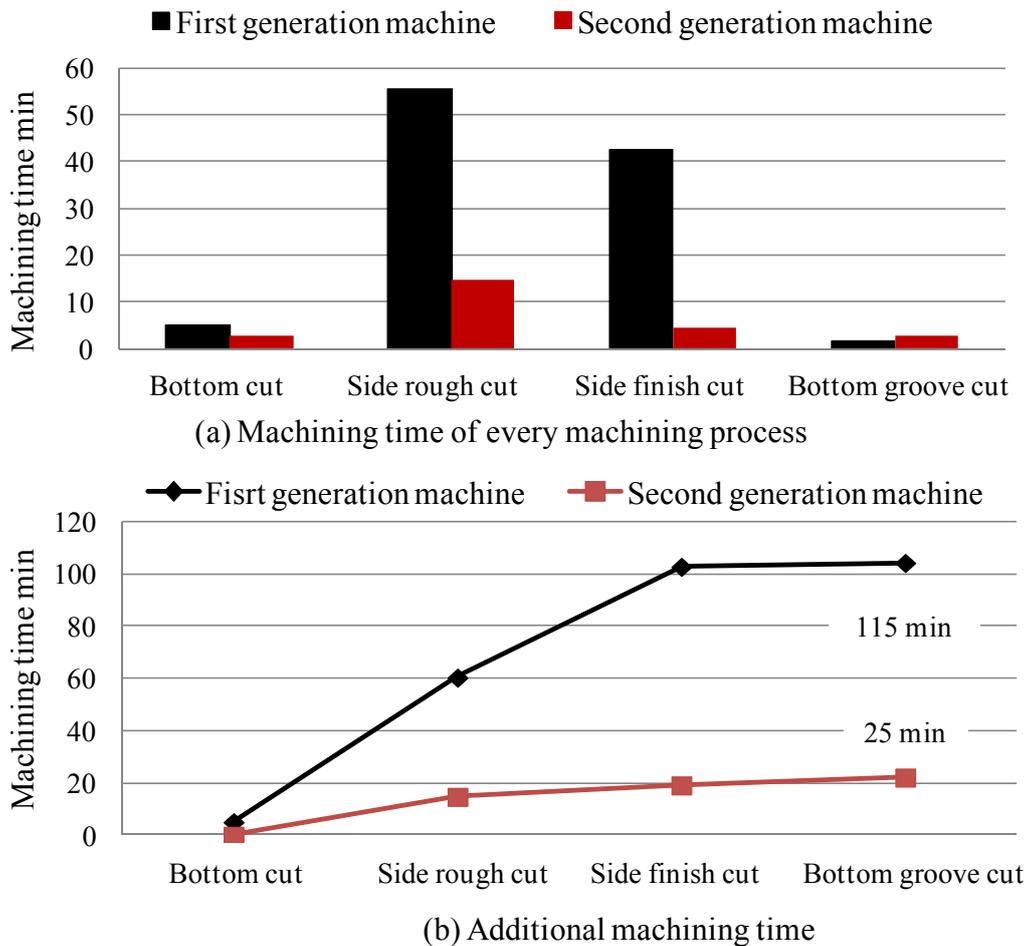


Fig. 3-16 Comparison of machining time with first generation and second generation machine

3-4-2 改良型工具製作用5軸ワイヤ放電加工機を使用時の最適工具形状の加工

硬脆性材料の加工における PCD 工具の加工特性を評価していく中で、加工特性を左右する部分は、刃先だけではなく刃先が摩耗して形成される平坦な摩耗領域の両方が関係することが判明している。工具のエッジで加工する切削だけではなく、フランク面の被加工物と接触している部分で研削作用があると考えられる。超硬や石英ガラスのような硬脆性材料では、エッジ部が鋭利に出ていると表面粗さが悪くなったりし、場合によっては脆性破壊が発生することがある。従って、工具のエッジ形状は図 3-17 (a) で示すような鋭利な形状ではなく、図 3-17 (b) で示すような、平坦な部分が最初から形成された形状が最適と考えられる。但し、平坦な部分があまりにも大きくなると、切削抵抗が大きくなり空気静圧ベアリングを使用している主軸では、過負荷で破損する可能性があるため幅は 0.01mm 程度が最適と考えられる。

改良型工具製作用 5 軸ワイヤ放電加工機では、回転と割り出しの機能が利用できることにより、回転加工で平坦部を形成し、その後割り出し機能で幅の一定した刃を形成する方法により最適な工具が形成できる。4 枚刃半径 0.3mm のボールエンドミルを工具製作用 6 軸ワイヤ放電加工機で加工した結果を図 3-18 (a) に示し、改良型工具製作用 5 軸

ワイヤ放電加工機で加工した結果を図 3-18 (b) に示す. 平坦部の幅は約 0.01mm である. 製作した二種類の工具の脆性材料の加工評価は, 今後実施する予定である.

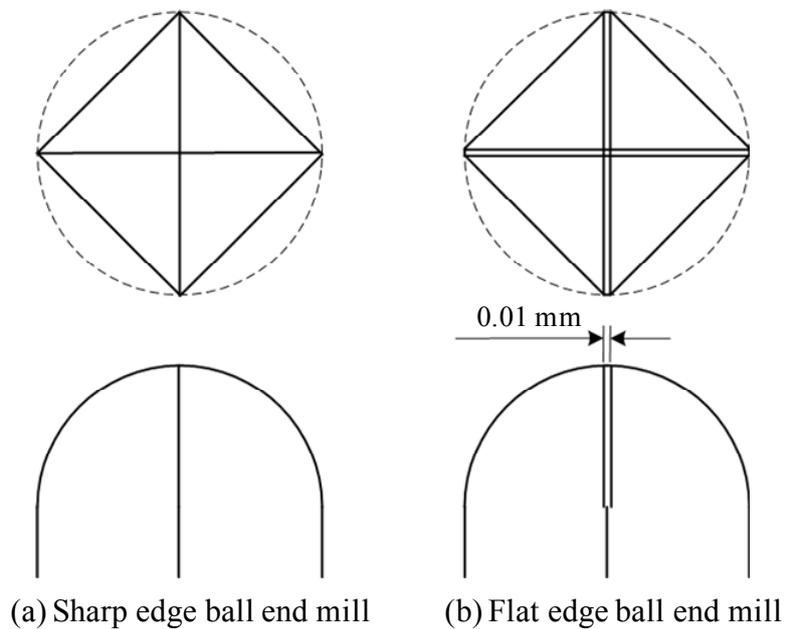


Fig. 3-17 Two different edge forms of four flute ball end mill

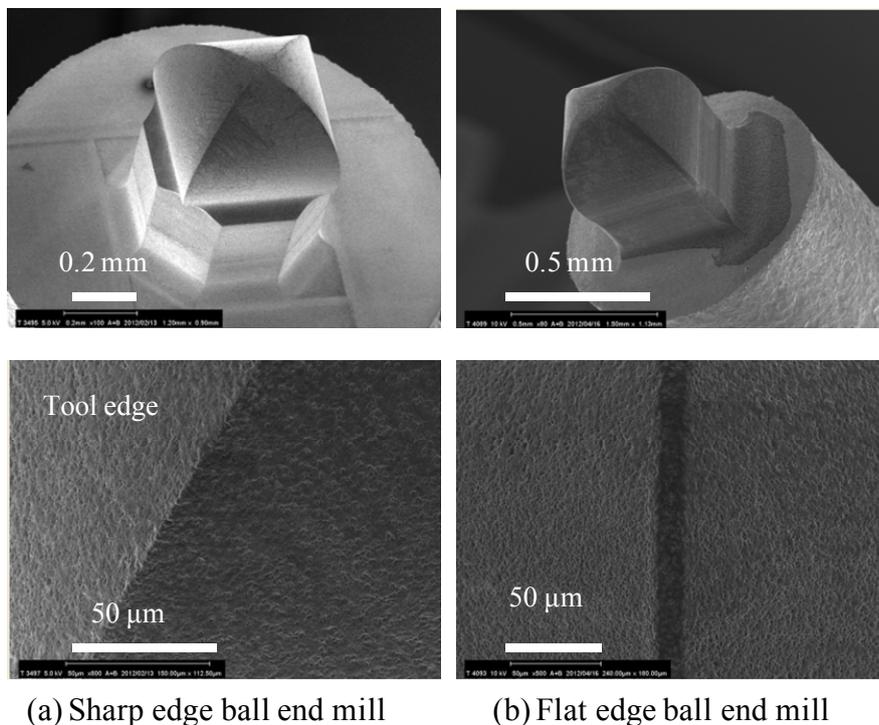


Fig. 3-18 Fabricated two different edge forms of four flute ball end mill

3-5 結言

マイクロ PCD 工具製作用の 6 軸ワイヤ放電加工機を開発し、複雑な形状の工具が効率的に加工できることを確認した。加工機を使用して行く中で、幾つかの問題点が見つかり、それらを解決した改良型工具製作用 5 軸ワイヤ放電加工機を開発した。この開発で、判明したことや解決した問題点を以下に要約する。

- (1) 複雑な工具形状を加工できる 6 軸ワイヤ放電加工機を開発し、マイクロ PCD 工具が高精度に加工できることを確認した。
- (2) U 軸の精度が安定しない問題は、ハーモニックギアとサーボモータの組み合わせからダイレクトモータに変更したことと、加工位置を U 軸の中心に変更したことで解決した。回転精度を測定した結果、サビミクロン以下の誤差であった。
- (3) ワイヤテンションを上げることができない問題は、ガイドの間隔を 1/3 以下に変更することで、直径 0.05mm のワイヤまで対応が可能となった。
- (4) 熱変位により加工精度が劣化する問題は、ベース加工機を中型放電加工機から極小型放電加工機に変更し、その超小型放電加工機はシンプルな構造で熱変位が小さいと考えられ、長時間加工しても安定した結果が得られた。
- (5) C 軸が割り出し機能のみである問題は、割り出し機能と回転機能の両方を持つ NC 装置を開発した。
- (6) これらの問題点を解決して、新しい回転を主体とする加工方法を開発し、加工時間の大幅な短縮と平坦な部分を持った新しい刃先の形状を開発した。

第4章 マイクロPCD工具の製作用CAMシステムの開発

4-1 序言

前章で PCD エンドミルを製作するワイヤ放電加工機について述べたが、本章では、開発した加工機を用いて工具を製作する加工工程と NC プログラムを生成する CAM ソフトウェアの研究開発について述べる。

PCD 工具で硬脆性材料を加工するとき、加工形状が指定されると、どのような加工工程で、どのような工具を使用するかが決まる。一般的な工具であれば、市販されている製品の中から選択するが、PCD エンドミルは標準品が販売されていない。工具メーカーに形状を指定してオーダーすることになるが、PCD 工具をダイヤモンド砥石で製作しようとする、砥石の摩耗が大きく高精度に製作するのは難しく、形状によっては製作できないことがある。また、オーダーした工具の製作には月単位の時間が掛かる。そこで、ワイヤ放電加工機で PCD が加工できることは判明しており、その機械を使用して自作することになるが、その時最初から加工方法を考えるのでは非常に時間が掛かるため、放電加工や NC プログラムの知識の少ない技術者や研究者でも、容易に PCD 工具を加工できる CAM ソフトウェアが必要になった。

工具製作用に開発した 6 軸のワイヤ放電加工機により、複雑な形状を加工できるが、PCD 工具の加工対象物は、脆性材料に限定し、微細形状を対象とするため工具直径は 1mm 以下を想定しており、一般的に市販されている工具のような複雑な形状や多くの径の種類には対応しない。ここで開発した形状は、PCD 工具を使用した加工特性の研究のなかで、必要とした形状のみであり、工業的な用途を全てカバーしたものではない。加工対象物は硬脆性材料を想定しており、工具のエッジは鋭利な角度を想定しておらず、すくい角はゼロまたは負の値を前提としている。ワイヤ径は、加工機の仕様で直径 0.1mm 固定となっており、微細な形状では、干渉が発生するため制限が生ずる。

本研究は、放電加工の知識の少ない研究者や作業員でも容易にマイクロ PCD 工具を製作できるようにするために工具製作用 CAM を開発した。

4-2 マイクロPCD工具加工システムの構成と製作工程の概要

PCD 工具加工システムは、図 4-1 に示すようにワイヤ放電加工機とブランク工具と NC プログラム生成ソフトウェア CMT-CAM (Custom Micro Tool CAM) で構成される。NC プログラムの出力対象は、第 3 章で述べた 6 軸工具製作用ワイヤ放電加工機である。

工具の製作工程は、次のような順序で実施される。最初、加工に必要な工具のタイプと形状を決め、CMT-CAM にパラメータを入力し、NC プログラムを出力し、NC 装置に入力する。ブランク工具を準備して、工具ホルダにセットし、ホルダを C 軸にセットする。工具が C 軸の中心にセットされ、傾きがないように調整する。次に、ワイヤと工具の位置関係を放電加工機の接触感知機能により決め、座標系をセットする。加工液を加工タンクに満たし、加工液面の高さを調整して、読み込んだ NC プログラムを実行する。

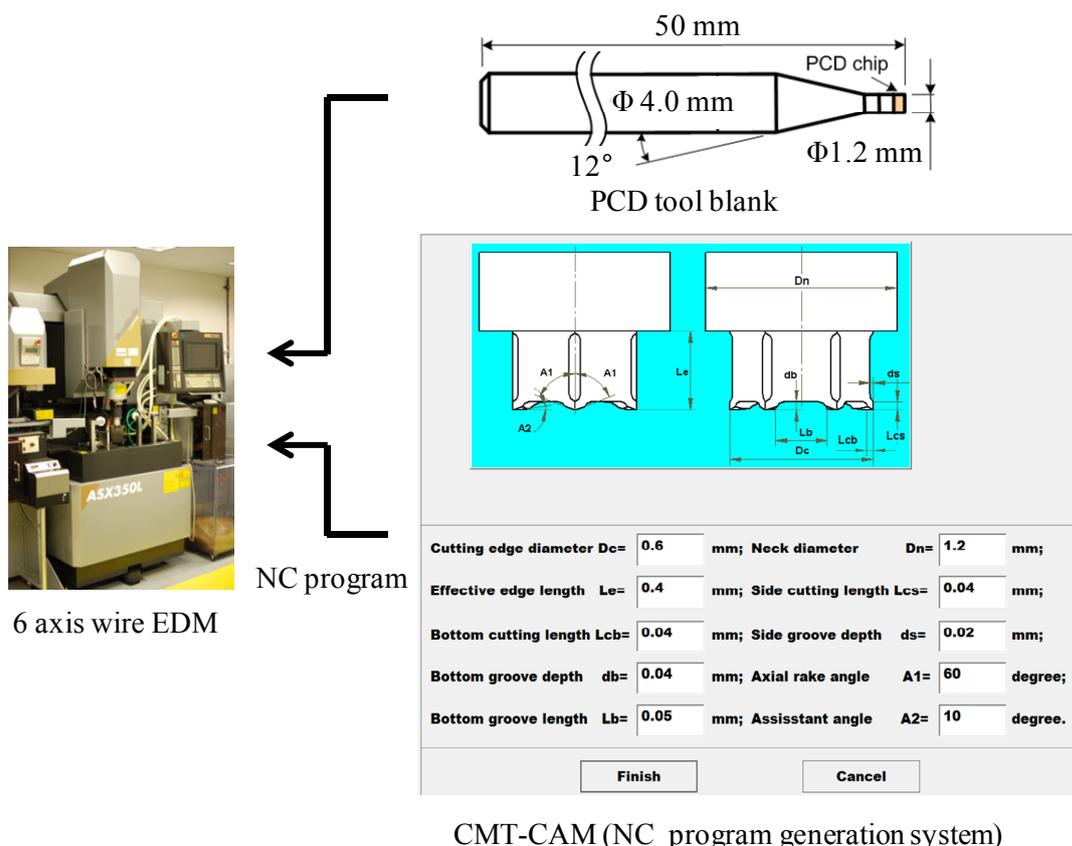


Fig. 4-1 PCD tool fabrication system

4-3 マイクロPCD工具の加工の準備

加工を開始する前に、ワイヤ走行系を正しく調整する必要がある。ワイヤは X 軸に平行である必要があり、Y 軸方向のずれは V 軸で調整し、Z 軸方向のずれは U 軸で調整する。調整方法は図 4-2 に示すように、ホルダに基準球を装着し、X 軸方向の 2 点 P1 と P2 のワイヤ中心位置を測定し傾きを計算する。U 軸と V 軸を動かすことによりワイヤの走行系の X 軸との平行を実現してから、U 軸と V 軸を指定の座標系でゼロセットする。

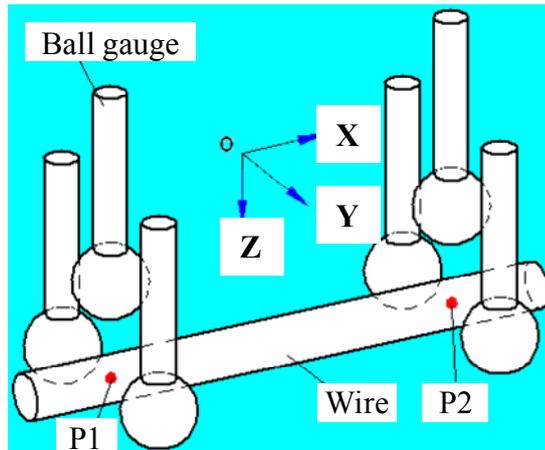


Fig. 4-2 Measurement of inclination by the X axis of a wire

ブランク工具をホルダにセットし、図 4-3 に示すように、C 軸にホルダを装着する。工具が C 軸の回転中心にセットされ、かつ傾きがないように電気マイクロで測定しながら調整する。精度は、工具先端の加工点で $1\mu\text{m}$ 以下になるように調整する。

次に、ワイヤ放電加工機の接触感知機能により、工具先端の中心が、ワイヤの中心に一致するように座標系の Y、Z 軸と C、U 軸をゼロにセットする。X 軸については、U 軸を使用しない場合には、任意に設定できるが、U 軸を使用する加工では第 3 章、図 3-3 に示すように U 軸の回転中心からの距離が必要となり、測定して入力する。

また、U 軸を使用した加工では、加工液面の位置に注意が必要で X 軸の原点の位置が U 軸の回転中心から 100mm 程度離れており、 -45° 傾けると Z 軸の位置が約 71mm 上方に移動するので、加工位置が加工液中にあるように、事前に加工液の液面を高く設定する必要がある。図 4-4 (a) は、U 軸が 0° の場合の液面に対するホルダの高さを示し、図 4-4 (b) は U 軸が 45° での液面に対するホルダの高さを示し、加工位置が液面から出ないように加工液面高さを調整する必要がある。U 軸を使用する加工では、機械の干渉と加工液の高さの確認が必要になる。

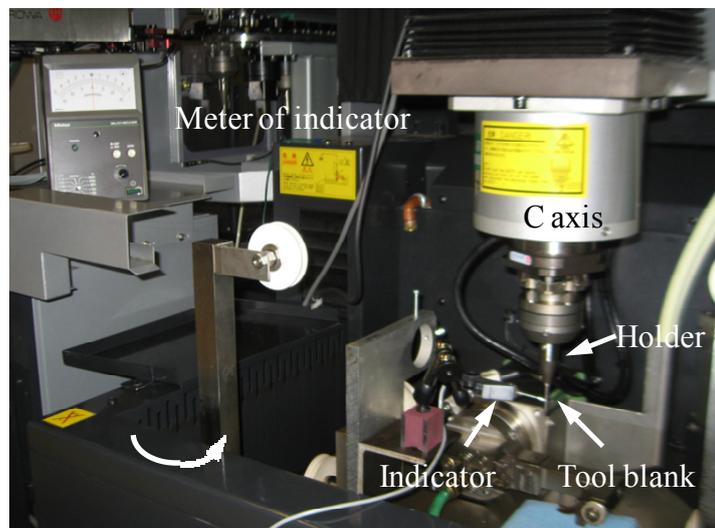
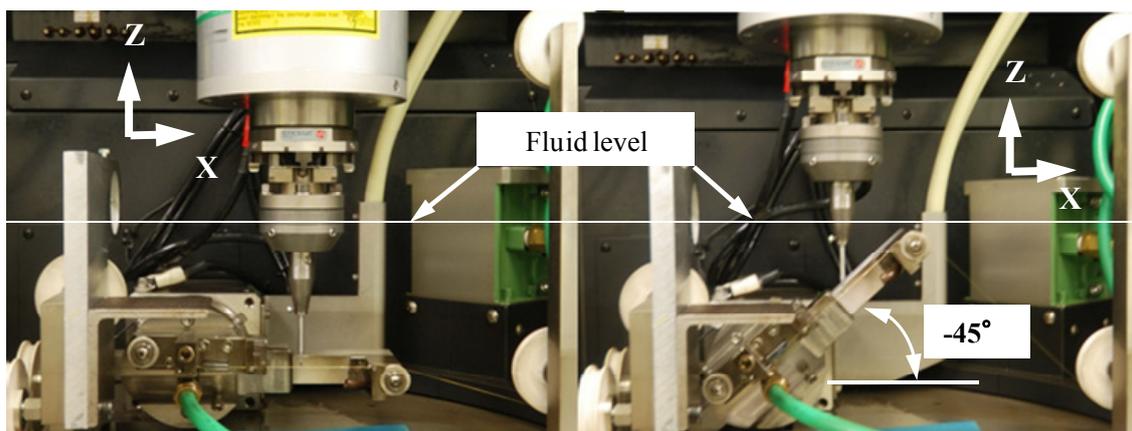


Fig. 4-3 Adjustment of inclination of tool



(a) Height of fluid at U axis angle of 0°

(b) Height of fluid at U axis angle of -45°

Fig. 4-4 Height of fluid at U axis of 0° and 45°

4-4 自動NCプログラム生成システム

4-4-1 CMT-CAMの基本構成

工具を加工するためのNCプログラムを生成するソフトウェアの名称はCMT-CAM (Custom Micro Tool-CAM) とし、構成を図 4-5 に示す。工具の基本形状とその詳細パラメータを入力するマンマシンインターフェース部、放電加工条件とそのオフセットからなる放電加工データベース、最終加工形状を実現するための工具の運動 (Cutter Location CL) を生成するモジュール、加工機用のNCプログラムに変換するポストプロセッサモジュールで構成される。

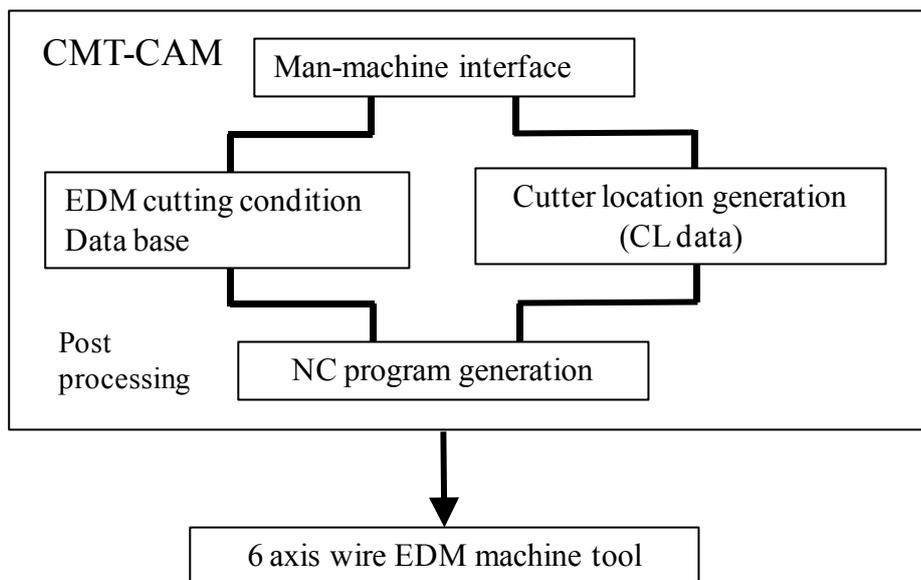


Fig. 4-5 Function modules of CMT-CAM

4-4-2 工具データ入力部の構成

工具の基本形状とその詳細パラメータを入力するマンマシンインターフェース部は、データ入力部、データの確認部、工具生成 NC プログラム出力部と工具とワイヤの位置関係を検出する NC プログラム部とで構成される。

開発された工具形状を表 4-1 に示す。工具形状入力画面の例として、図 4-6 に 4 枚刃のねじれ角度 45°のボールエンドミルの NC プログラムを生成するための入力画面の例を示す。

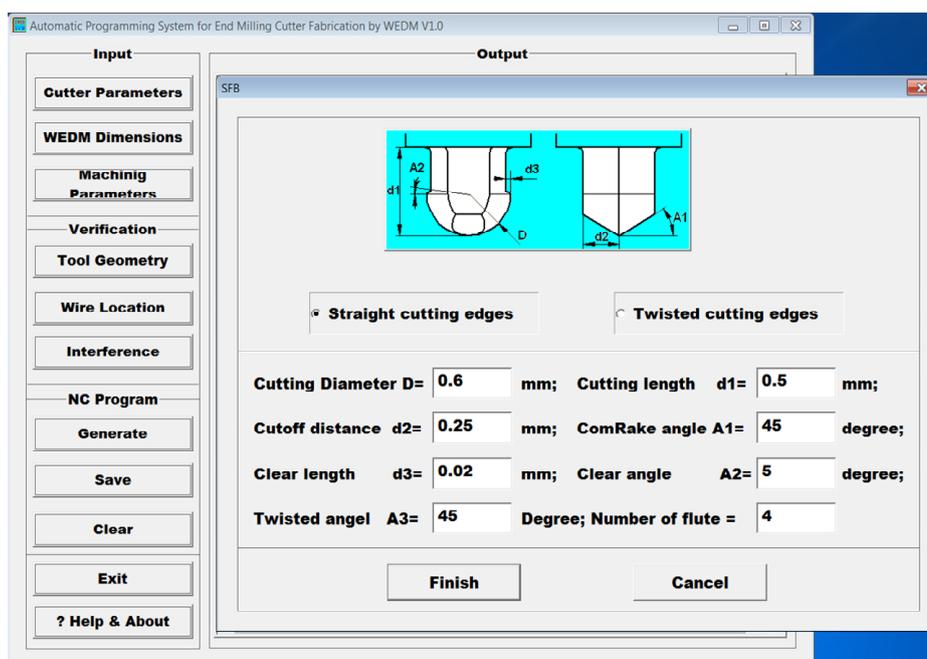


Fig. 4-6 Data input screen for 4 flute ball end mill

Table 4-1 Developed tool types of PCD tool

Main tool type	Sub- tool type
Helical end mill	
Ball end mill	Integral flute 1
	Separate flute
	Simple ball shape
	Integral flute 2
	Integral flute 3
Hexagonal end mill	
Two flute end mill	
Straight edge end mill	2-flute SEE
	4-flute SEE
	6-flute SEE
Twisted hexagonal end mill	
Shaper tool	V shaper
	R shaper

4-4-3 ワイヤ放電加工機の放電加工条件データベース

ワイヤ放電加工機の加工条件は、放電条件とオフセットで構成され、粗加工条件、仕上げ加工条件がある。これらの条件は、使用する加工機、ワイヤ直径、PCD の材料特性と加工形状に依存するため、ワイヤ放電加工機は第3章で述べた6軸工具製作用ワイヤ放電加工機、ワイヤは直径0.1mmの真鍮をコーティングしたピアノ線、PCD 工具材料は住友電工ハードメタル株式会社 DA シリーズと加工形状はマイクロ加工用工具として開発した。

マイクロ PCD 工具向けの加工条件は、同じような形状を加工したときの加工条件となるようにするため、図4-7に示すような、0.2mmの板状のPCDをPCD素材から切り出し、そこに加工条件を変えて、加工することで最適な加工条件を採取する。測定する項目は、面粗さ、加工された幅から計算される放電ギャップと加工時間である。放電の加工条件は多くあるため、実験計画法により最小の加工実験で最適な加工条件が選択されている⁴⁷⁾。粗加工条件は、加工効率を最大になるように選択し、仕上げ条件は最小面粗さを実現する条件を選択した。得られた加工条件の構成は、粗加工3条件、仕上げ3条件である。

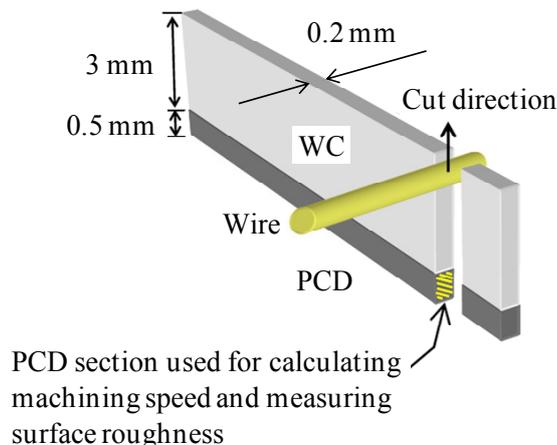


Fig. 4-7 Cutting conditions of wire EDM for 6 axis wire EDM for fabrication of micro tool ⁴⁷⁾

4-4-4 工具形状の加工パスの生成

実際のワイヤは有限の外径があるが、パスの生成では太さゼロの線として考える。ワイヤの太さと放電ギャップを考慮したオフセットを計算するのは、後述する NC プログラムを出力する、ポストプロセッサの処理である。加工開始時のブランク形状は、直径 1.2mm の円筒形状で、座標系は XY 軸では工具の中心位置がゼロ、Z 軸は工具下端がゼロとする。加工に使用する軸は、XYZ 軸と回転軸 C、U 軸の 5 軸である。V 軸は U 軸の位置の調整にのみ使用し、工具の成形には使用しない。C 軸は割り出し機能のみで、独立に回転することはできない。

工具のエッジの生成は、ワイヤが生成する面の交線で定義する。加工は、加工効率を高くするため、ワイヤが点で接触して加工するのではなく、できるだけワイヤが長い直線で接触して加工する方法とする。U 軸を使用する加工は、U 軸を割り出して加工する方式とし、U 軸との同時動作はしない。

U 軸を使用しない例として、図 4-6 の入力画面で設定した 4 枚刃の半径 R の半球状のボールエンドミルの加工例を図 4-8 に示す。ワイヤを赤線で示し、1 は開始位置、2 は 45° の角度から見て角度 θ の位置で、式 (4-1) で示され、3 が終了位置で、式 (4-2) で示される。緑の丸は、工具エッジ部を示す。XYZ 軸の各位置での計算を下記に示す。

1 の位置での XYZ の位置座標 $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$

2 の位置での XYZ の位置座標 $(X, Y, Z) = (0, R \sin 45^\circ \sin \theta, R (1 - \cos \theta))$ (4-1)

3 の位置での XYZ の位置座標 $(X, Y, Z) = (0, R \sin 45^\circ, R)$ (4-2)

工具の角度を C 軸で 90° 毎に 4 回割り出し、 θ の値が 1° 毎の XYZ 軸の位置データを計算することで CL のデータを算出する。

図 4-8 (a) では、刃はストレートであるが、図 4-8 (b) のようにエッジ部をツイストするのであれば Z 軸の移動と共に C 軸の角度をずらして行けば実現できる。

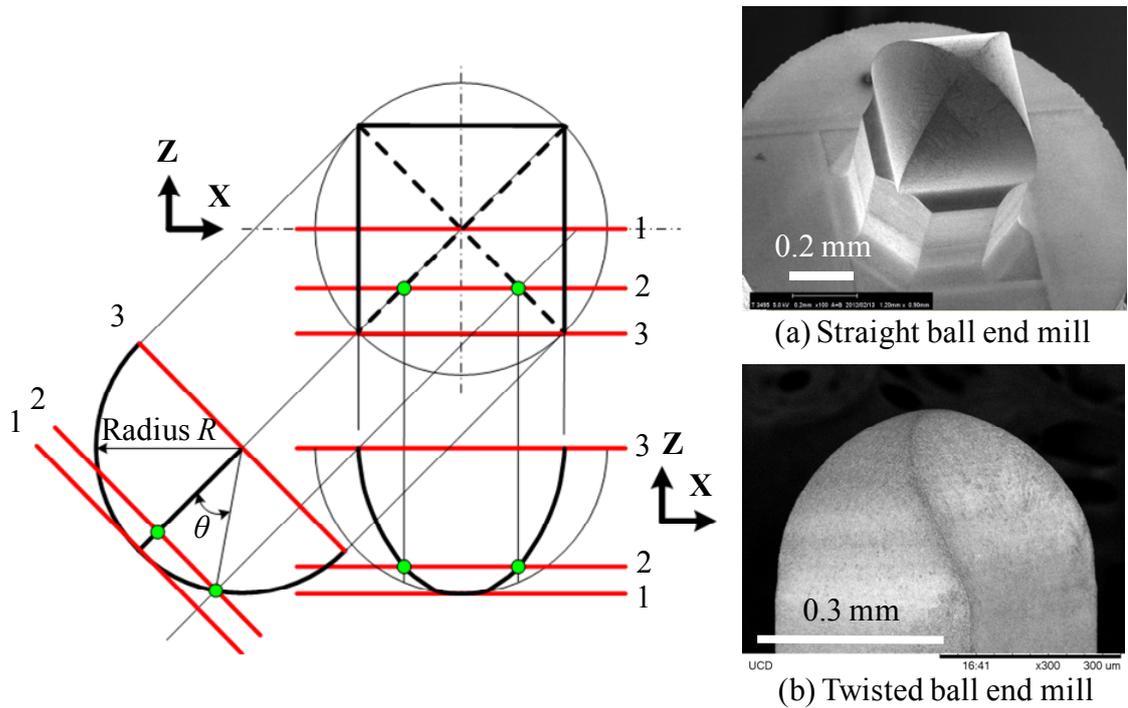


Fig. 4-8 Calculation of CL data with 4 flute ball end mill

U軸を使用した2枚刃のエンドミルの形状図を図4-9、実際に加工した工具のSEM写真を図4-10に示す。図4-9の赤四角で囲った傾斜面の加工は、面の途中に段差があり、XYZ軸とC軸では加工することができないため、U軸を使用する必要がある。A2は45°、A3は8°である。それらの傾斜部は、U軸を45°と8°に割り出して加工し、その他の部分は、U軸0°でXYZ軸とC軸を使用して加工した。

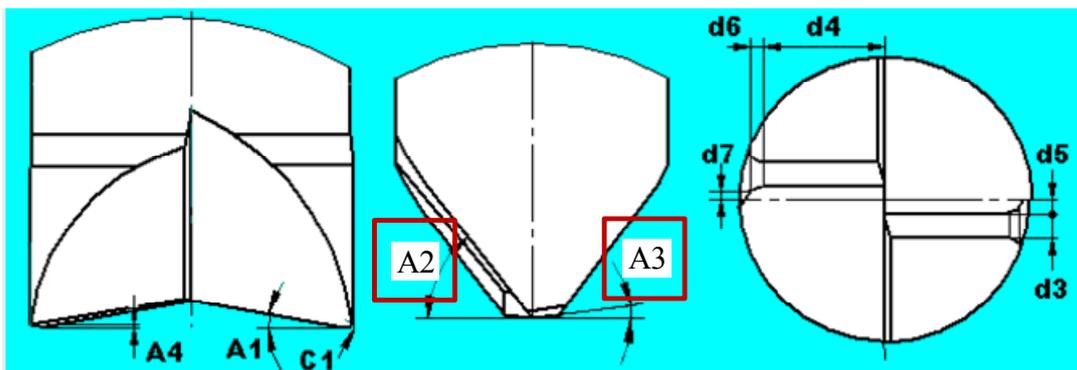


Fig. 4-9 Data input screen for two flute end mill

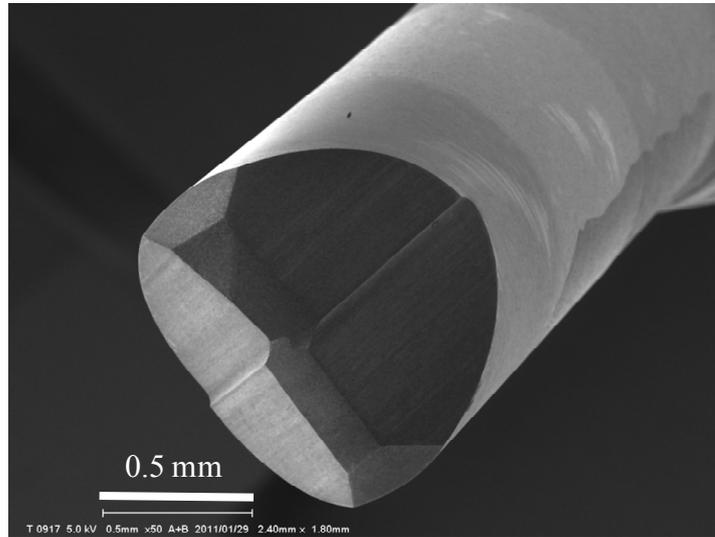


Fig. 4-10 Fabricated PCD end mill using U axis

4-4-5 NCプログラムの計算, 出力処理

作成された CL データと放電加工条件データベースの値からワイヤ放電加工機の解釈できる NC プログラムに変換する. ここでの出力対象機械は, 株式会社ソディック ASX350L である. NC プログラムの基本構成フォーマットは, 全ての工具で同じである. 図 4-11 で示すように, CL のデータから軌跡に法線を立て, 工具の太さと放電ギャップを考慮したオフセットが付加される. 刃先生成の加工プログラムは, サブルーチンで呼ばれるため, オフセットは変数で与えられる.

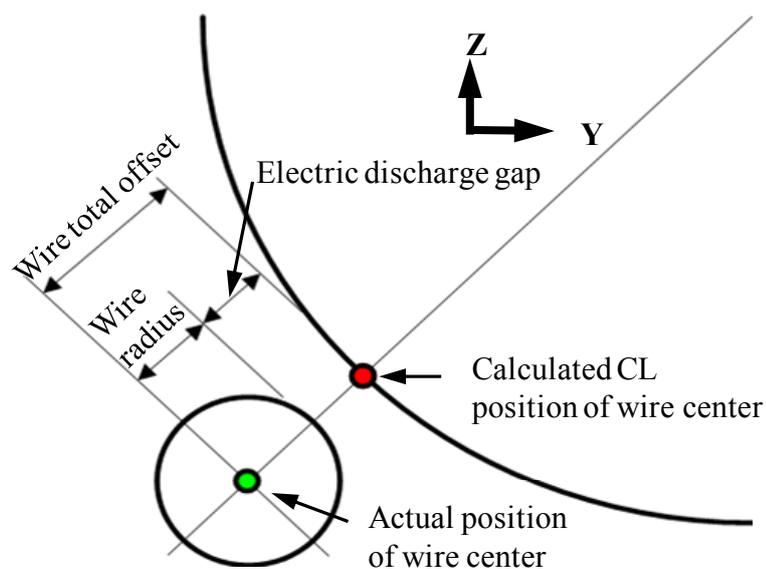


Fig. 4-11 Calculation of offset from CL data

4-5 CMT-CAMによるマイクロPCD工具の製作例

実際に CMT-CAM により出力された NC プログラムを用い、第 3 章で開発された 6 軸ワイヤ放電加工機を使用して加工した例を図 4-12 に示す。

図 4-12 (a) は 6 枚刃、半径 0.3mm のスクエアエンドミルで、溝加工や底刃による平面の生成に使用する。底面と側面の刃は、すくい角 -60° 、逃げ角 30° となっており、底面と側面の刃長は 0.03mm である。硬脆性材料を高効率に加工する場合に、非常に有効な工具である。

図 4-12 (b) は、6 枚刃、半径 0.1mm のスクエアエンドミルで、側面の刃を 45° ツイストすることで側面加工時の被加工物上面のクラックの発生を抑えて加工することができる。

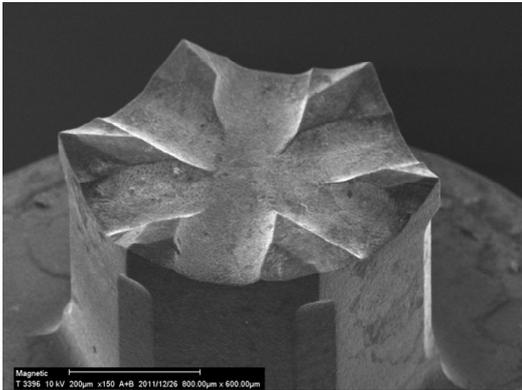
図 4-12 (c) は、2 枚刃、半径 0.1mm のボールエンドミルで微細形状加工に使用する。

図 4-12 (d) は、4 枚刃、半径 0.3mm のボールエンドミル、有効刃の角度が 90° あり、半球形状の加工をすることができる。第 5 章の単結晶シリコンの加工で使用した。被加工物上面のクラックの発生を抑えるためにツイストすることも可能である。

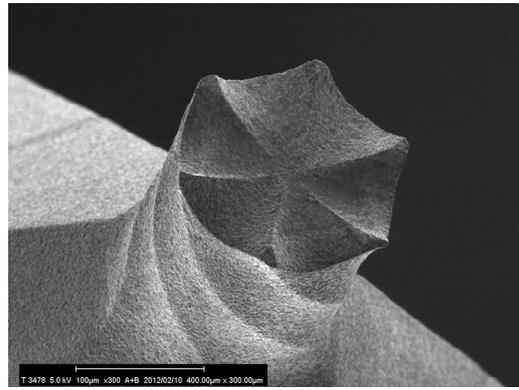
図 4-12 (e) は、1 枚刃、半径 0.1mm のスクエアエンドミルで、硬脆性材料の基礎的な加工条件の探求に使用した。第 6 章の超微粒子超硬の加工、第 7 章の石英ガラスの基礎的な加工プロセスの解明に使用した。

図 4-12 (f) は、1 枚刃、半径 0.025mm のスクエアエンドミルで、第 5 章の単結晶シリコンの半球形状加工後に中心部に微細な穴を開けるために使用した。

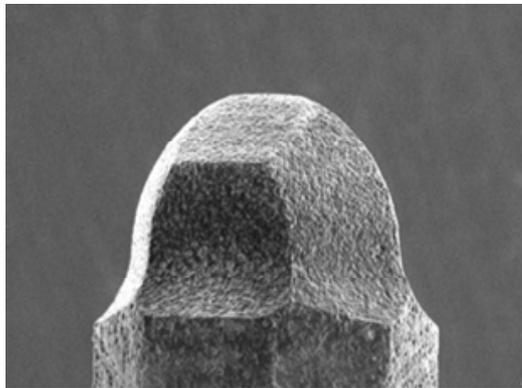
これらの形状以外にも表 4-1 に示す、多種類の形状の微細工具が、この CMT-CAM を使用して製作された。



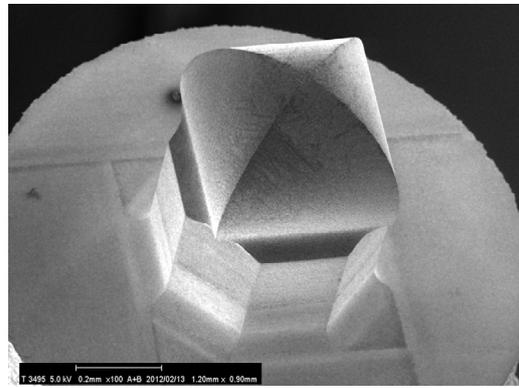
(a) 6 flute end mill of R0.3 mm



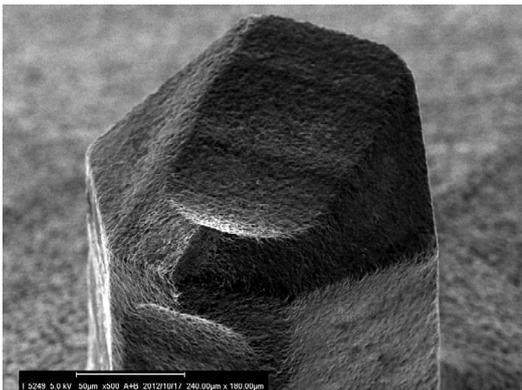
(b) 6 flute twisted end mill of R0.1 mm



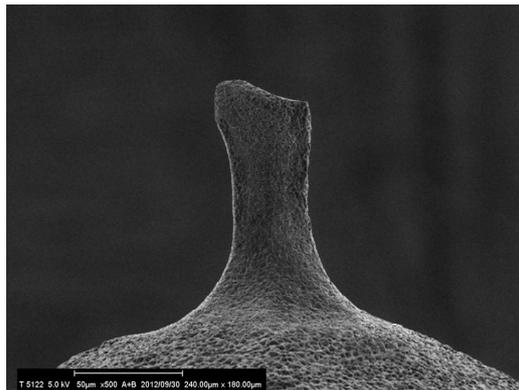
(c) 2 flute ball end mill of R0.1 mm



(d) 4 flute ball end mill of R0.3 mm



(e) 1 flute end mill of R0.1 mm



(f) 1 flute end mill of R0.025 mm

Fig. 4-12 Examples of fabricated PCD end mills

4-6 結言

放電加工の知識の少ない研究者や作業者でも容易にマイクロ PCD 工具を製作できるようにする目的で CMT-CAM を開発し、第 3 章で開発した工具製作用ワイヤ放電加工機を使用して実際にマイクロ PCD 工具を製作し、目的の工具ができることを確認した。以下に開発したことを要約する。

- (1) 工具タイプ、刃数、すくい角、逃げ角や有効刃長等を入力することにより、ワイヤ放電加工用の NC プログラムを出力できることを確認した。
- (2) 出力された NC プログラムを第 3 章で開発した工具製作用 6 軸ワイヤ加工機に入力し、PCD ブランク工具を正しく機械にセッティングすることで、目的とする工具形状が加工できることを確認した。
- (3) 基本的な PCD 工具の種類を開発したが、より高精度かつ高効率に加工できる工具を今後とも開発して行く。

第5章 マイクロPCDエンドミルによる単結晶シリコンの3次元形状加工

5-1 序言

単結晶シリコンは集積回路で使用されるだけではなく、MEMSのベース素材として利用されている。MEMSは機能性デバイスとして各種センサー等に使用され普及している。MEMSの製作方法の基本はエッチングプロセスであるが、高機能化に伴い3次元形状の要求が出現しており、エッチングだけでは製作が困難な場合がある。このような3次元形状の加工に、放電加工やマイクロ切削や研削の適用による研究が進められている⁴⁸⁻⁴⁹⁾。

実際に、マイクロジャイロスコープMRIG (Microscale Rate Integrating Gyroscope) において振動子を半球状の形状にすることで小型化と性能向上を目指すプロジェクトが進行している⁵⁰⁾。基本的な構造を図5-1に示す。製作工程は図5-2(a)に示すように、単結晶シリコンで半球形状を作製して、それを型としてダイヤモンドの半球状の振動子を製作し、その後、半導体製造プロセスで周辺のインターフェース部分を集積する。図5-2(b)にデバイスの形状を示し、振動子の大きさは直径1mm、厚さは0.001mmで、底に振動子を支える直径0.05mmで高さ0.03mmのアンカーがある。振動子の材質はダイヤモンドの多結晶体である。現在進めているプロジェクトでは、4インチウェハに200個のデバイスを製作することを目標に進めており、形状あたりの製作する時間は10分以下を目標としている。

この型となる滑らかな面を持つ半球形状をエッチングプロセスで高精度に形成することは難しく、放電加工や機械加工で加工することを提案している。

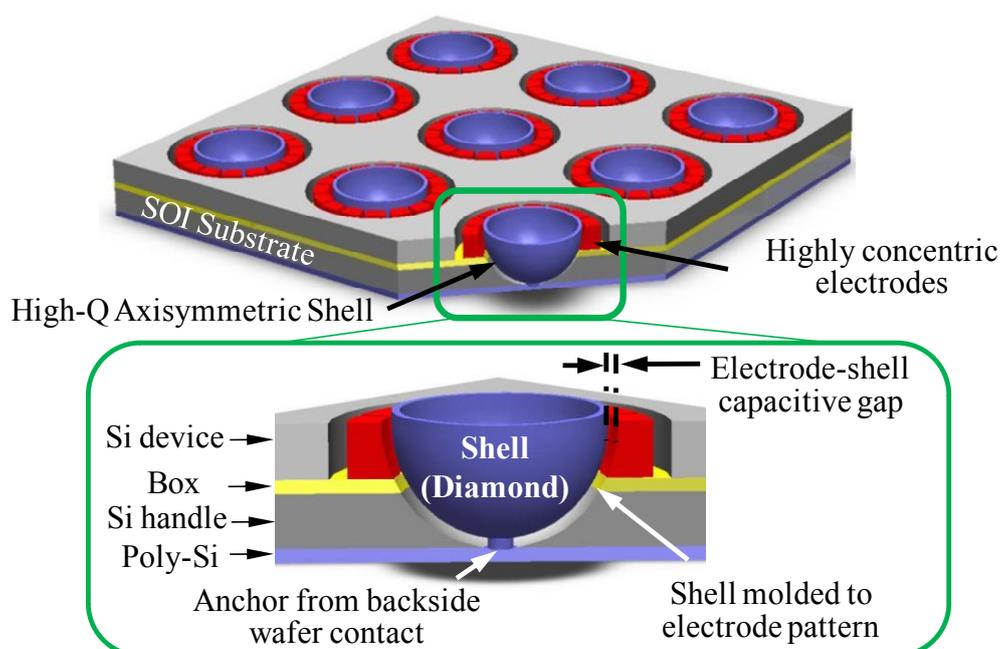
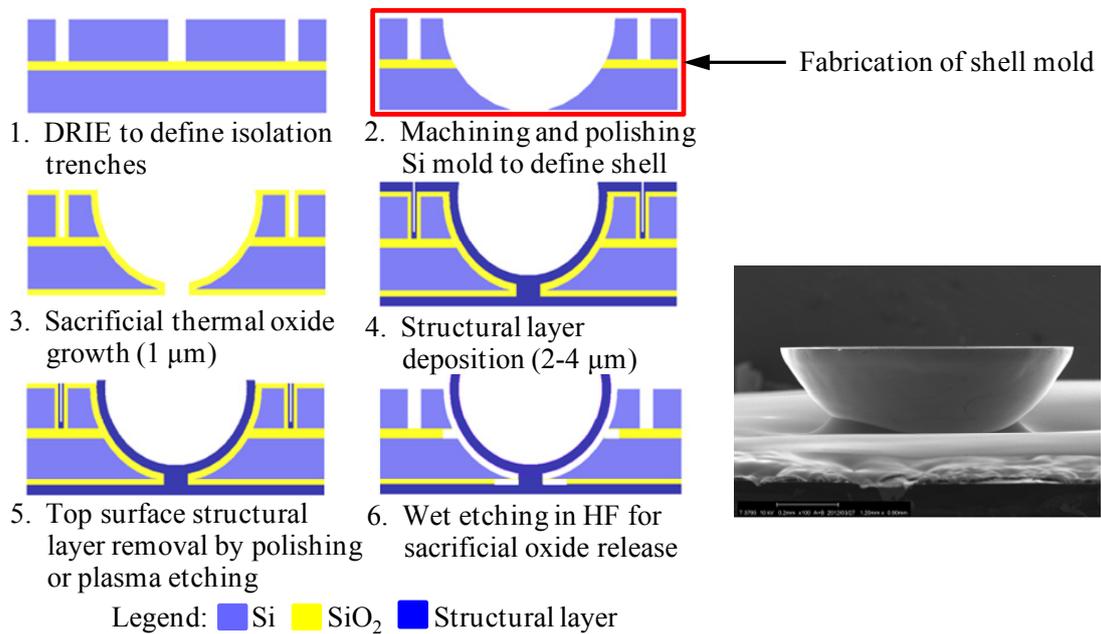
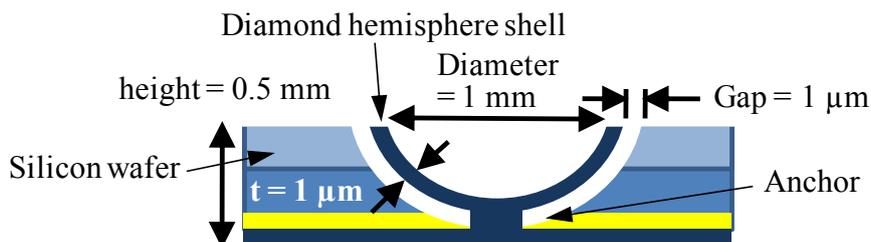


Fig. 5-1 Structure of MRIG (Microscale Rate Integrating Gyroscope)



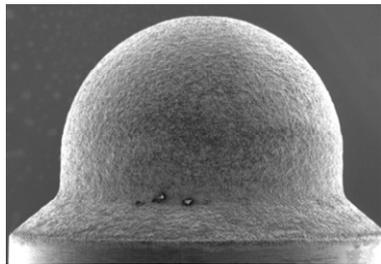
(a) Fabrication process of hemisphere shell



(b) Geometry of hemisphere shell

Fig. 5-2 Fabrication system of MRIG ⁴⁸⁾

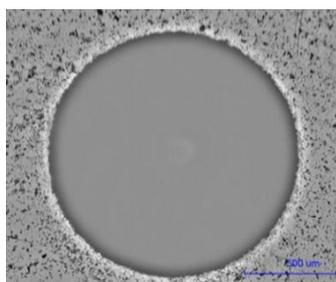
単結晶シリコンの放電加工に関して、基礎的な研究が宇野により報告されており ⁵¹⁾、シリコンウェハに金属をドーピングして導電性を持たせることにより放電加工にて加工できることが示されている。電極に導電性ダイヤモンドや PCD を用い、最適な加工条件を選択することで、消耗の非常に少ない加工を高効率にできることが報告されている ⁵²⁾。F. Peter により PCD を電極として導電性を持った単結晶シリコンを加工すると短時間で電極の消耗が非常に少ない加工をすることができると判明した ⁴⁸⁾。しかし、この加工条件で放電加工した面の最大面粗さは 10 μm レベルであり、そのままでは振動子の型として使用できず、等方性エッチング HNA (Hydrofluoric Nitric Acetic) により表面を溶かして平坦度を向上させる必要があった。それらの結果を図 5-3 に示す。放電加工では、仕上げ加工を入れても更に表面粗さ小さくする必要があり、エッチングによる後処理の工程を付加する必要がある。エッチングを付加するとうねりが発生して形状精度をミクロンオーダーにすることができない。そこで、切削や研削のような機械加工により一工程で必要な形状精度と面品質を得ることができれば、生産効率を飛躍的に向上できると考えられる。



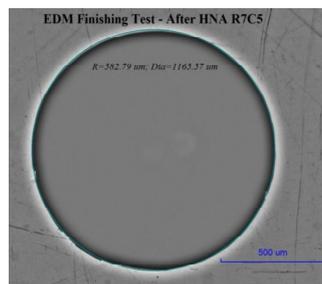
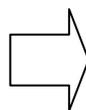
PCD electrode



200 EDMed features on silicon wafer



EDMed hemisphere



EDM + HNA hemisphere

Fig. 5-3 EDM process and HNA (Hydrofluoric, Nitric, Acetic) process ⁴⁸⁾

単結晶シリコンの切削加工について検討すると、単結晶ダイヤモンドによる切削加工の研究は既に多く報告されているが、旋削による基本特性の研究が多く^{20-21), 33-35), 53-55)}、このようなマイクロ回転工具による切削加工の研究は少ない。ボールエンドミルの加工では、工具を傾斜して溝を加工する研究が報告されており、傾斜角が45°付近で最も面粗さが小さくなることが報告されている⁵⁶⁾。しかし、本研究で実現しようとしている形状は、ほぼ半球形状であり、工具を傾けて加工することが難しく、工具を傾斜させないで加工する方法を選択した。ボールエンドミルで工具を傾けないで運動軌跡で半球形状を加工すると、下記のような問題点が発生する。上部より順次加工位置を下げて行くと加工部の工具半径が小さくなるに伴って切削速度が遅くなり、中心部では切削速度がゼロになり、上下方向の切削抵抗が大きくなる問題点がある。また、単結晶シリコンは結晶方位により延性モードとなる最大チップ厚さが変わることが報告されており²¹⁾、全面に渡って延性モード加工するには、延性モード最大チップ厚さの最小値より小さい値にする必要がある。また、工具のすくい角がマイナスであることにより加工した面にはストレスが加わり、表面にはアモルファス層とその下に転移層が生成されることがJ. Yanにより報告されており⁵⁷⁾、そのことが面の性状やその後のプロセスにどのような影響を与えるかに注目する必要がある。

半球形状を加工する切削加工用の工具として、単結晶ダイヤモンドエンドミルがあるが、半球状を加工するためには、ボールエンドミルの有効刃形状が90°まで必要であり、砥石の可動範囲の制限や単結晶ダイヤモンドの加工の異方性により研削で高精度に製作することが難しい。一方、PCDはバインダにコバルトを使用しているため導電性が

あり、ワイヤ放電加工機で容易に加工することができ、様々な刃数の半球形状の工具を製作することができ、高効率で高品質な面を実現する工具を開発することができる。半球形状の底には半球形状の振動子を支える微細なアンカーの加工が必要であり、この部分の微細加工も実現する必要がある。

半球面を高精度かつ高効率に加工するためには多くの高度な技術的要素を解決することが必要であり、実用化することが難しい加工である。この研究により、技術要素を解決することができれば、単結晶シリコン上に微細3次元形状を加工することが必要なMEMSにおいて、マイクロPCDエンドミルの加工が一つの加工方法として確立することになると考えられる。

本研究では、単結晶シリコンウェハ上にMRIG用の振動子の金型となる半球形状を製作することを旨として、開発したワイヤ放電加工機でマイクロPCDエンドミルを製作し、高品質な面性状と形状精度を実現する切削加工方法について研究をした。

5-2 実験方法

5-2-1 被加工物と加工機の特性

被加工物の単結晶シリコンは直径100mmで結晶方位は<100>面であり、放電加工できるように金属をドーピングすることで導電性を持たせている。特性を表5-1に示す。

加工機械には、表5-2に示す仕様のエアタービン駆動スピンドル主軸とリニアモータ駆動による3軸の送り軸で構成された超精密加工機を用いた⁴²⁾。なお、主軸の回転数は $123,000\text{min}^{-1}$ 固定である。加工実験では、加工中の切削抵抗を測定する目的で図5-4に示すように加工機のテーブル上に3軸(X, Y, Z)微小切削動力計を固定し、その上に被加工物をセットして行なった。工具と被加工物表面との位置関係の測定は、放電の接触感知機能(主軸の回転を止めて工具とシリコンウェハの間にDC5Vの電圧を印加し、工具とウェハを近づけると接触直前に電圧レベルが下がり、4V以下になった位置で停止する。)により、PCD工具の先端とシリコンウェハ上面の位置を直接測定した。主軸の回転が停止しているときと回転して熱的に飽和したときの位置の変化は、事前に測定して、高さの補正を行った。

Table 5-1 Properties of single crystalline silicon

Wafer size	$\Phi 100 \times 0.45 \text{ mm}$
Crystal orientation	<100>
Electric resistivity	0.0001 – 0.0002 $\Omega \cdot \text{m}$

Table 5-2 Specifications of ultra-precision machine tool

Stroke X, Y, Z	150 x 150 x 100 mm
Drive system	AC coreless linear motor X, Y, Z
Maximum acceleration	0.5 G (on machining)
Spindle	Speed 123,000 min ⁻¹ , Aerostatic bearing, air turbine drive

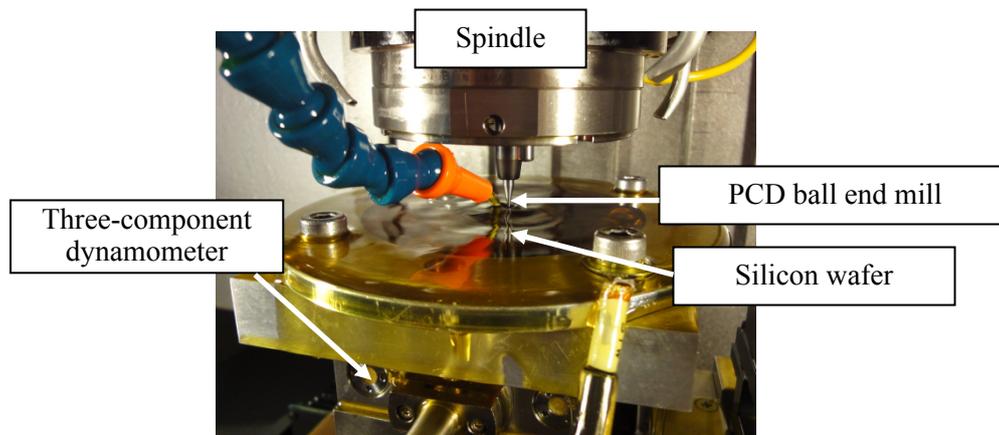


Fig. 5-4 Experimental setup of silicon wafer machining system

5-2-2 加工形状, 加工方法と工具の選択

加工する形状は図 5-5 に示ように, 厚さ 0.45mm の単結晶シリコンウェハに半径 0.5mm の球面を深さ 0.39mm, アンカー部分は直径 0.05mm, 深さ 0.03mm に加工する.

加工方法として, 単純に Z 軸方向に上下するだけで加工する突き加工方法もあるが, その場合, 加工精度は工具形状に依存し, また, 工具の中央部は切削速度ゼロで押しつぶすようになるため, 安定して加工することが難しい. このことから, スパイラル状の運動軌跡による加工方法を選択した. この方法では, 運動軌跡を変えることにより, 加工形状の補正をすることができる. 事前に形状加工を実施し, 加工された形状を測定し, 目標値からのずれ分を計算して, ずれと逆方向に軌跡を変更する補正加工を実施することで高精度化することができる. この補正された加工により工具形状の半径やボール形状からのずれを吸収することができるため, 工具形状が加工形状精度に直接影響することを低減することができる. 工具形状精度を 1 μ m 以下にすることは難しいため, サブミクロンの高精度形状加工を実現するためには, この補正加工は必須であると考えられる. 但し, この研究では, 補正加工は実施していない.

半球形状を加工する工具の半径は, 加工形状の半径に近いほうが切削長は短くなるが, 工具中心の軌跡半径は小さくなる. 円弧運動の加速度は式 (5-1) で計算され, 運動の半径が小さくなり送り速度を上げると加速度が急激に高くなり, 加工機の加速度制限に掛かることや高加速度運動は精度の劣化を招くことが考えられたため, 適切な工具径を選択する必要がある. 使用した超精密加工機の最大加速は 0.5G であるが, 高精度を実現するため 0.3G に制限している. これらのことを考慮して, この研究では, 工具半径は 0.3mm を選択した.

A : 加速度

R : 半径

V : 速度

$$A = \frac{V^2}{R} \quad (5-1)$$

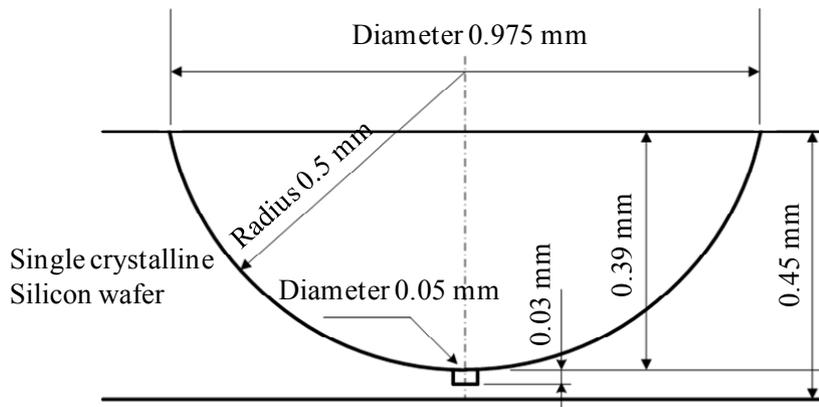


Fig. 5-5 Geometry of machined hemisphere for MRIG

工具の刃の形状は、半球を加工するので半球状のボールとなる。すくい角は、J. Yan の単結晶ダイヤモンドによる旋削加工での報告では³⁵⁾、 -30° から -60° で延性モードになるチップ厚さが最大となっており、本研究では、すくい角 -45° を選択した。工具の刃数は多くすることで加工効率は向上するが、全ての刃が加工に寄与するように高精度に製作することが難しいという問題が発生するため、単純な製作工程で製作できる4枚刃とした。

アンカー部分を加工する工具は、加工形状は直径0.05mm、深さ0.03mmの穴なので、ドリルのような突き加工をすることを想定して、一枚刃で半径0.025mmのエンドミルとした。

5-2-3 マイクロPCDエンドミルの製作

工具素材は、表5-3に示す特性を持つ超微粒子PCDを採用した。PCDバルクからワイヤ放電加工機で切り出した円筒状のチップを超硬のブランクシャンクにロウ付けし、周辺を研削成形した後、第3章で示した同時6軸制御のワイヤ放電加工機にて所望の工具形状に加工した。工具形状は4枚刃の半径0.3mm半球形状マイクロエンドミルとし、製作した工具の刃先全体のSEM写真と中心部とエッジ部の写真を図5-6に示す。工具の加工時間は約3時間である。稜線部分を拡大したSEM写真を図5-7に示す。稜線部分は放電加工での面粗さを反映して、 $1-2\mu\text{m}$ の凸凹が見られる。

アンカー部分を加工するために製作した1枚刃の半径0.025mmマイクロPCDエンドミルを図5-8に示す。

Table 5-3 Properties of PCD

Grain size	0.5 μm
Content	90 (Vol.%)
Traverse rupture strength	2.6 GPa
Vickers hardness	110 – 120 GPa

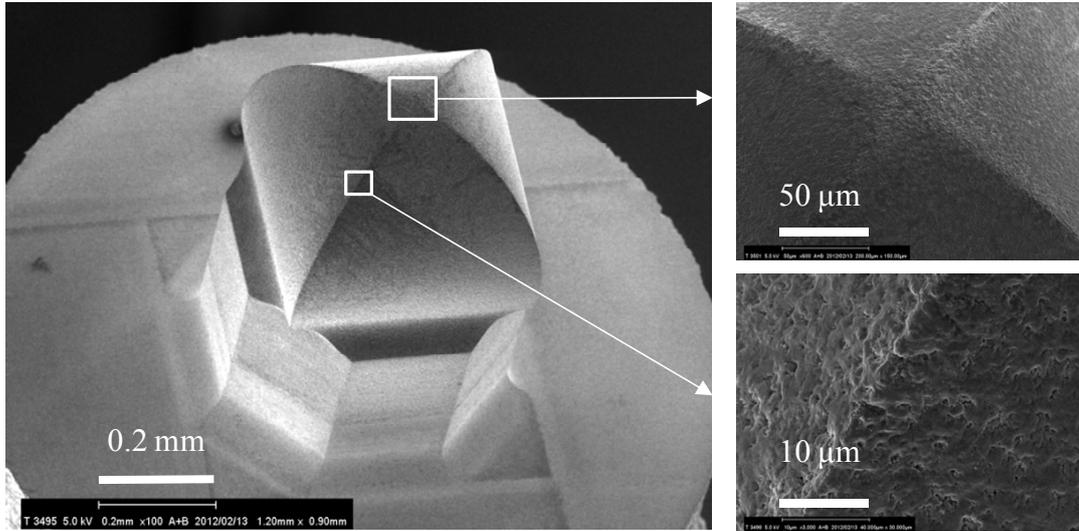


Fig. 5-6 4 flute PCD ball end mill for hemisphere with SEM

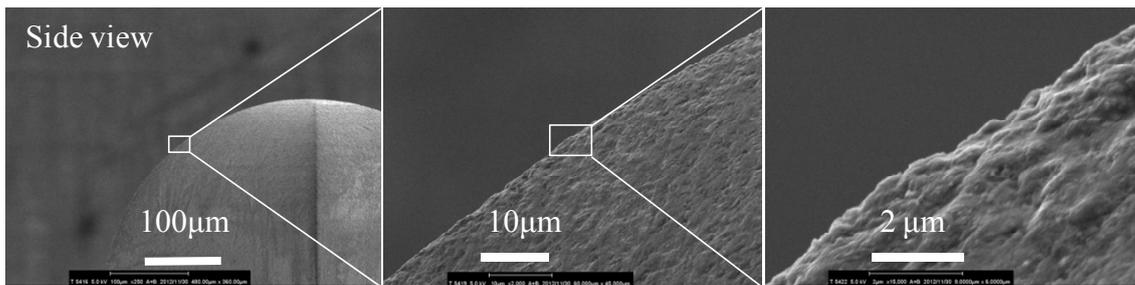


Fig. 5-7 Tool edge of 4 flute ball end mill with SEM

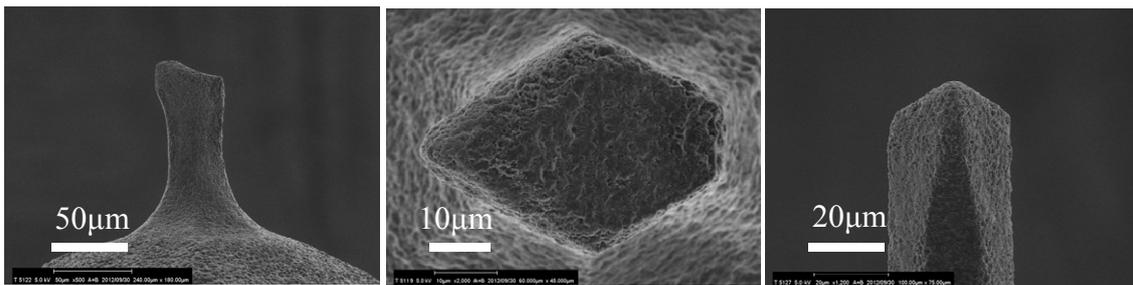


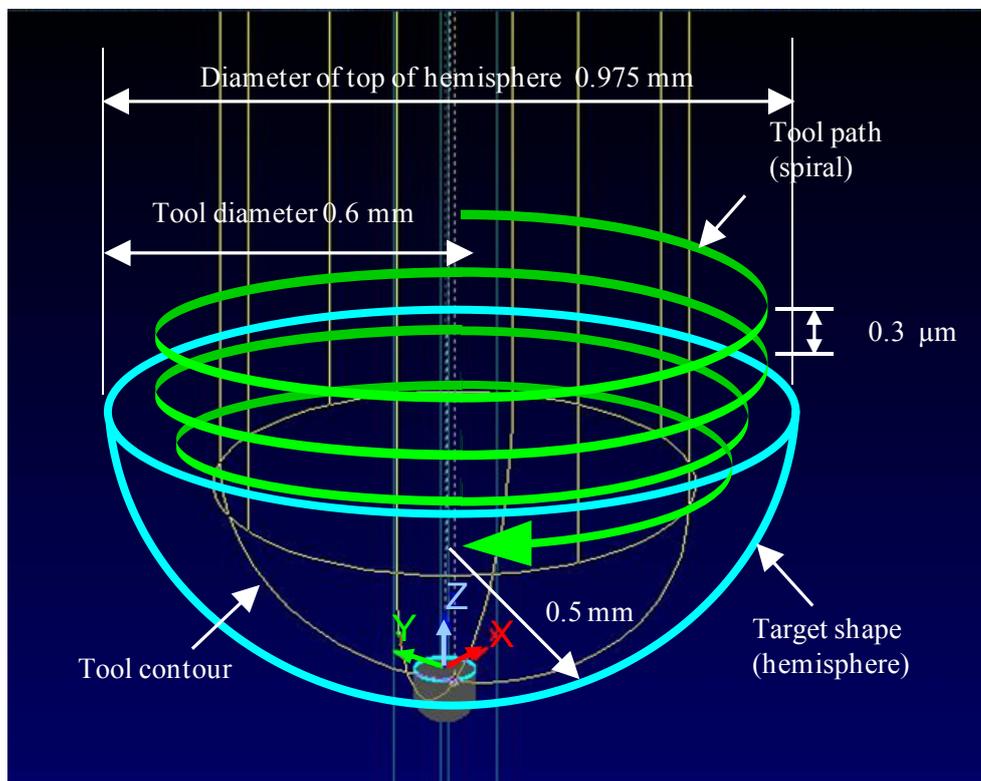
Fig. 5-8 1 flute PCD end mill for anchor with SEM

5-2-4 マイクロPCDエンドミルによる加工方法

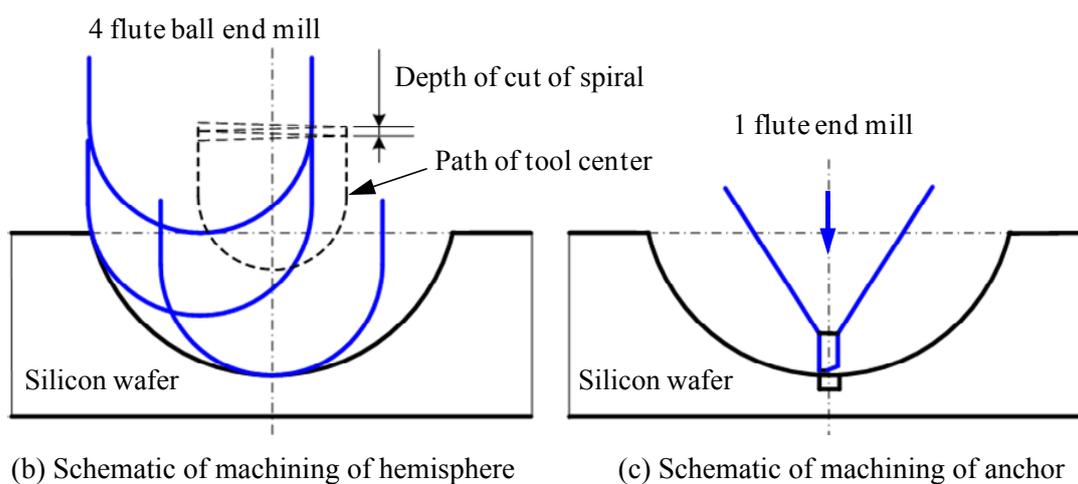
加工方法は、生成される面性状、上面エッジ部の欠けと形状精度を高精度に実現する方法として、粗加工と仕上げ加工の組み合わせによる加工を選択した。

平坦な単結晶シリコンウェハに残し代 0.01mm で粗加工を実施し、同じ工具を使用して、送り速度を変えて仕上げ加工を実施した。アンカー部分は、半球形状を加工した後

に低速で Z 軸だけの加工を実施した. 加工の概念図を図 5-9 (a) に示し, 図 5-9 (b) は半球形状の加工, 図 5-9 (c) はアンカー部の加工の概要を示す. 半球形状部分の加工条件を表 5-4 に示し, アンカー部分の加工条件を表 5-5 に示す.



(a) Schematic of machining of hemisphere and anchor



(b) Schematic of machining of hemisphere

(c) Schematic of machining of anchor

Fig. 5-9 Schematic of machining of hemisphere and anchor for MRIG

Table 5-4 Cutting conditions for hemisphere

Machining shape	Hemisphere: Diameter 1mm, depth 0.39 mm
Tool	Ball end mill, 4 flute, Radius 0.3 mm
Spindle speed	123,000 min ⁻¹
Cutter path type	Spiral
Axial depth of cut per rotation	0.3 μm
Stock allowance	0.01 mm
Feedrate at tool center	Finish 0.05 μm/tooth, rough 0.5 μm/tooth
Fluid coolant	Synthetic oil, kinematic viscosity 7.59 mm ² /sec

Table 5-5 Cutting conditions for anchor

Machining shape	Anchor: Diameter 0.05 mm, depth 0.03 mm
Tool	Square end mill, 1 flute, Radius 0.025 mm
Spindle speed	123,000 min ⁻¹
Cutter path type	Simple one axis cut (Z -)
Feedrate at tool center	0.01 mm/min
Fluid coolant	Synthetic oil, kinematic viscosity 7.59 mm ² /sec

半球形状の加工は、軌跡のタイプはスパイラルで、そのピッチは0.3μmとした。工具の先端部分がウェハの上面に接触して、球形状加工に入る前まではZ軸方向に指定切込みピッチ一定で切込み、球形状の加工に入ると球形状に沿って指定切込みピッチで加工した。

加工を上面から見ると、図5-10のように示すことができ、工具と被加工物の接触する点の送り速度は、円弧動作であるため、工具軌跡の半径(0.2mm)と加工形状の半径(0.5mm)の比により、工具中心の送り速度の2.5倍となる。粗加工では工具中心の送り速度が0.5μm/toothなので加工位置では1.25μm/tooth、仕上げ加工では工具中心の送り速度が0.05μm/toothなので0.125μm/toothとなる。加工時のチップの生成の概念図を図5-11に示す。図5-11の斜線で示す領域のように、チップ厚さは前回の工具の軌跡と今回の工具軌跡により生成され、その時のチップ厚さは、式(5-2)で近似的に計算される。

D : チップ厚さ

R : 工具半径

F : 送り速度

Y : Y軸方向の現在の工具中心からの距離

$$D = \frac{YF}{R} + R - \sqrt{\frac{Y^2 F^2}{R^2} + R^2 - F^2} \quad (5-2)$$

チップの厚さが延性モードの最大厚さを超えると脆性破棄が発生するが、次回の刃先によりその部分が切り取られれば、最終的に加工面には延性モードの面が得られる。図 5-11 の赤線で示す部分が、脆性破壊領域であっても次回のパスで切取られるため、延性モードの面が得られる。粗加工の送り速度 $1.25\mu\text{m}/\text{tooth}$ では、 $Y = F/2 = 0.000625\text{mm}$ の位置でのチップ厚さは、式 (5-2) より約 5nm となり、単結晶シリコンの延性モードの最大チップ厚さは 50nm 程度²¹⁾より小さいため、全ての面が延性モードになると考えられる。

球面形状加工を側面から見ると、一公転あたり球面に沿って $0.3\mu\text{m}$ 切込むスパイラル動作であり、半球の中心部に近づくに従って Z 軸方向の一公転あたりの切込み深さは小さくなる。チップ厚さは上面から見た場合と同様に延性モード最大厚さより十分小さくなるため常に延性モードで加工されると考えられる。球面加工時の側面から動作のイメージを図 5-12 に示す。

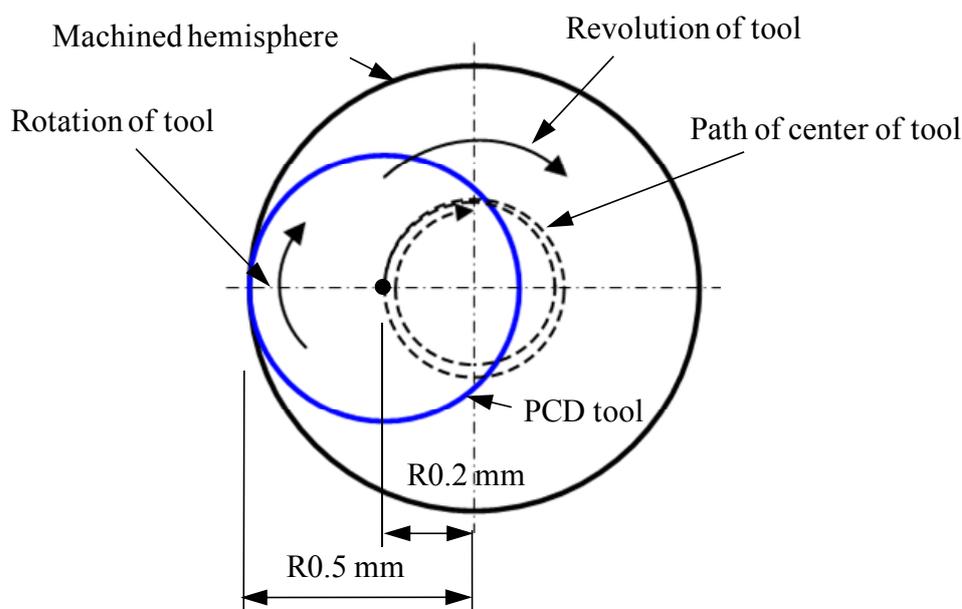


Fig. 5-10 Top view of machining of hemisphere

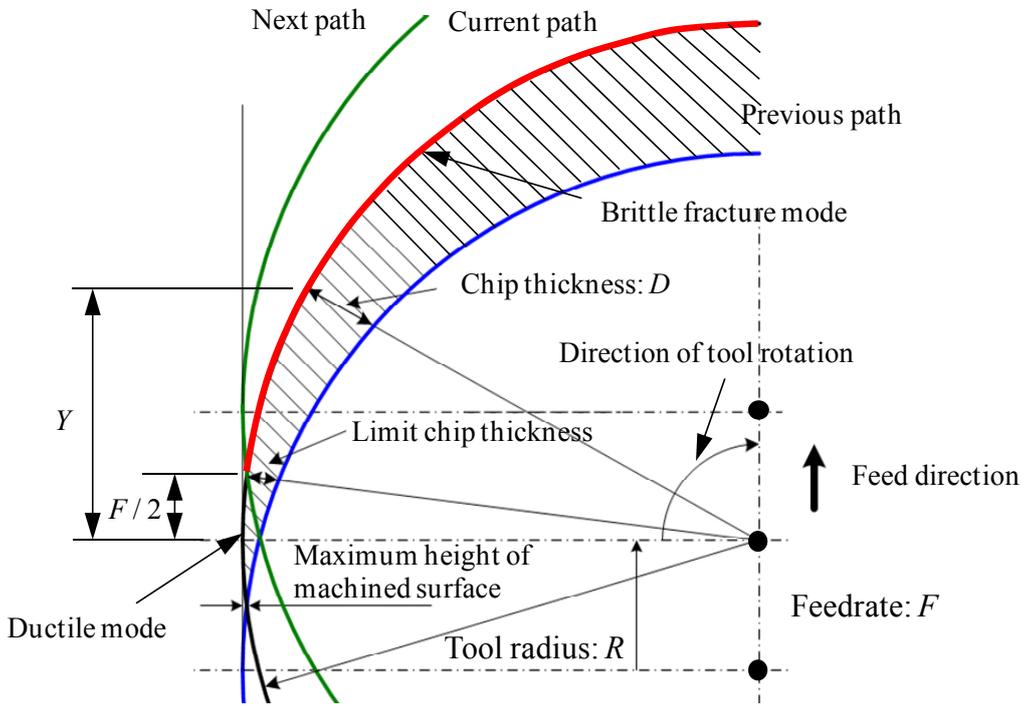


Fig. 5-11 Generation of chip by PCD ball end mill

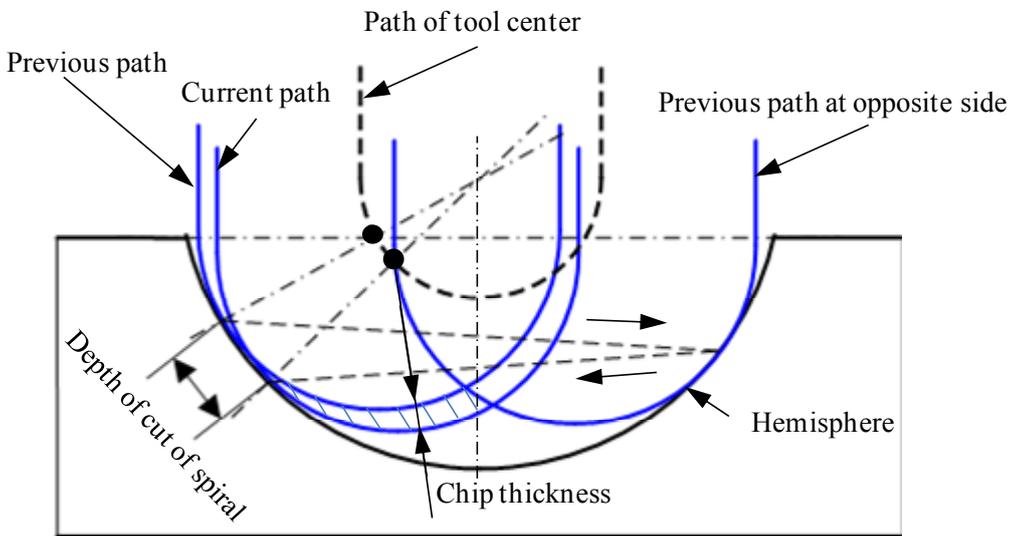


Fig. 5-12 Side view of machining of hemisphere

5-3 マイクロPCDエンドミルによる表面生成の特性

5-3-1 生成された面性状の測定

加工した形状は、SEM とレーザオートフォーカス非接触形状測定装置 (LPCMI) で測定した。

図 5-13 に加工された半球形状のレーザオートフォーカス非接触形状測定装置による 3D イメージを示す。ほぼ延性モードで加工されているが、周辺の傾斜部に欠陥らしき部分が見える。図 5-14 (a) は全体の形状の断面を示す。エッジ部を拡大した結果を図 5-14 (b) に、アンカー部を拡大した結果を図 5-14 (c) に示す。球面のエッジ部に傾斜がついたこと、深さが浅かった件は、被加工物のセッティング上の問題と考えられる。アンカーは、ほぼ想定した形状に加工されていた。図 5-15 (a) は半径を断面形状に最適にフィッティングした時の値で、半径 0.494mm であった。図 5-15 (b) は、フィッティングした半径からの誤差である。表面状態の突起と周辺部を除くと約 $\pm 1\mu\text{m}$ に入っており、想定範囲内である。更に精度を上げるためには、工具の精度を上げるか、または一度形状を加工して、できた形状を測定し、誤差を逆位相で形状補正することで実現できると考えられる。MRIG 用の型としては十分な精度であると考えられる。

図 5-16 は SEM のイメージである。図 5-16 (a) の全体の写真を見ると、ほぼ延性モードで加工されているのがわかる。次に詳細に各部分を観察した。図 5-16 (b) の写真はエッジ部の欠陥部分を示し、0.5 から $1\mu\text{m}$ 程度の欠けて抜け落ちたような穴がある。図 5-16 (c) の写真はアンカー部分の写真であるが、エッジ部分に薄く剥がれたような欠陥が見える。図 5-16 (d) の写真は、傾斜部に見られる欠陥部分で、帯状に $15\mu\text{m}$ 程度の幅で薄く貝殻上に剥離したような脆性破壊した面が見られる。

傾斜部の欠陥部分を詳細に見るための、図 5-17 (a) の写真のようにウェハを傾けて LPCWI で測定した。全体の欠陥の状態を観察すると、図 5-17 (b) に示すように 90° で 4 方向に欠陥部分が帯状に見られ、D カットに対しては、 45° 傾いている。SEM イメージと同じように $15\mu\text{m}$ 程度の幅で欠陥が見られる。図 5-18 は (A) の部分の拡大であるが、帯状の欠陥部分から一部が逸脱した欠陥が見られる。図 5-18 は (B) の部分の拡大であるが、小さく貝殻状に割れたような面が帯状に生成されている。この現象は、旋削加工で最大延性モードチップ厚さが結晶方位により、一回転の間に 4 回ピークがある現象²¹⁾と符合するが、そのことが原因であれば脆性破壊する帯状の領域が中心から放射状に十字に発生すると考えられる。原因は結晶方位と関係していると考えられるが、加工する角度を 3 次元的に考慮して解析する必要がある。また粗加工による影響を考慮する必要がある。加工時間は、半球形状加工の粗加工は 14 分、仕上げ加工は 2 時間であった。アンカー部分は 3 分である。加工した結果をまとめて表 5-5 に示す。

今後、欠陥部分が発生しない加工方法を探求するとともに、加工時間の大幅な改善が必要である。

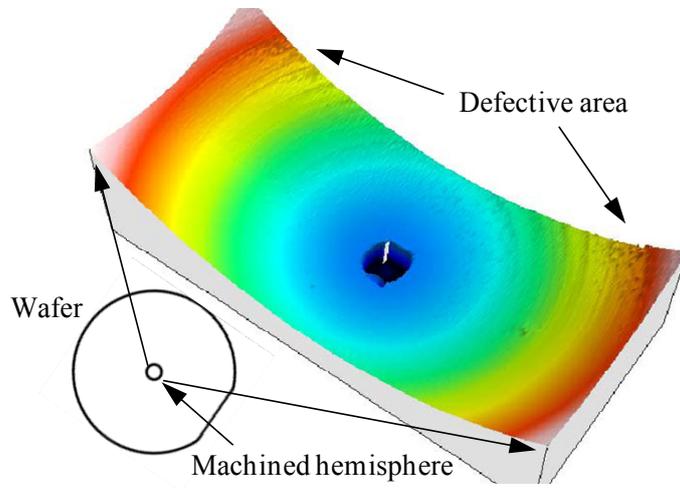
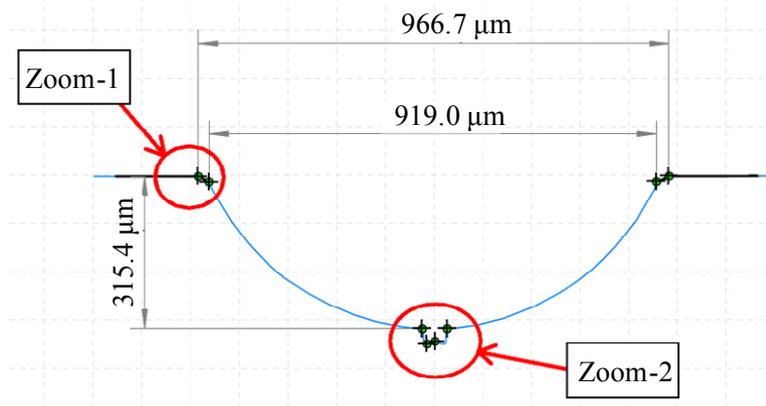
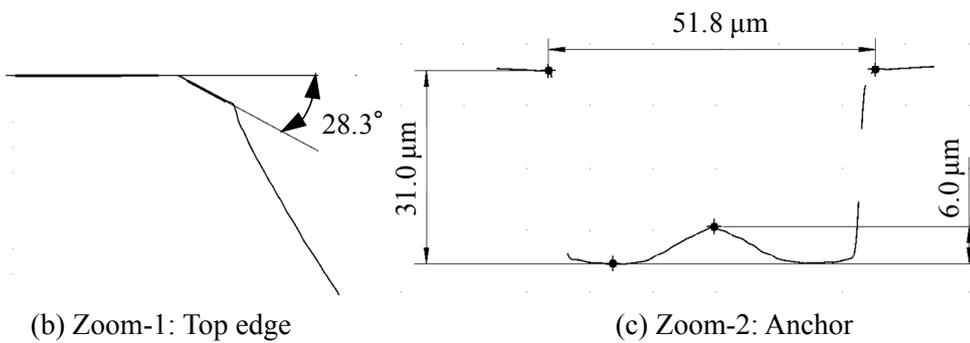


Fig. 5-13 Isometric view at bottom with LPCMI



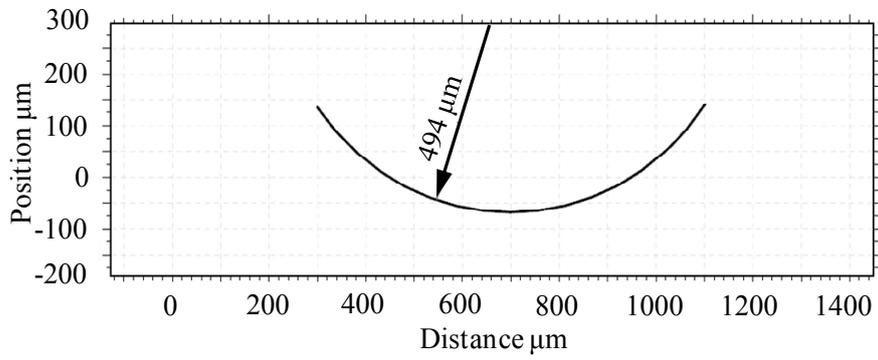
(a) Cross section of machined hemisphere



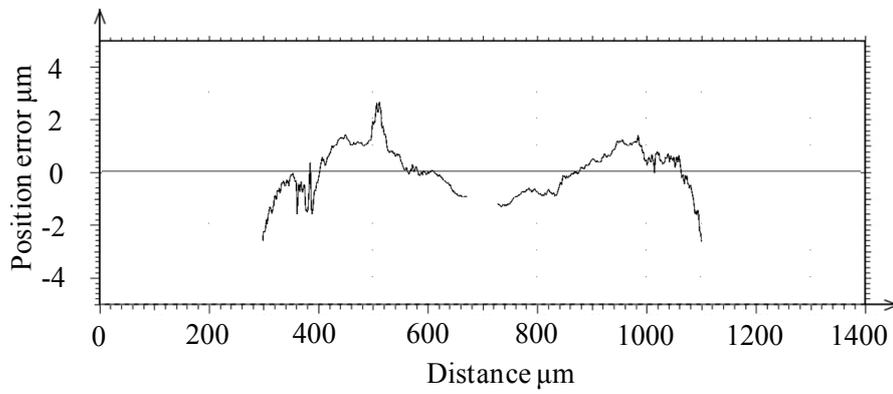
(b) Zoom-1: Top edge

(c) Zoom-2: Anchor

Fig. 5-14 Geometry analysis with LPCMI

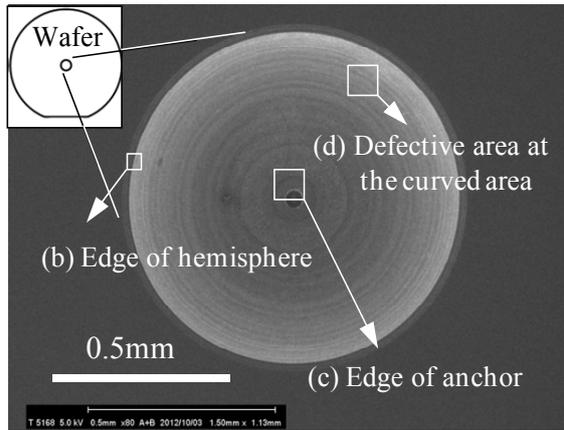


(a) Radius fitting of hemisphere

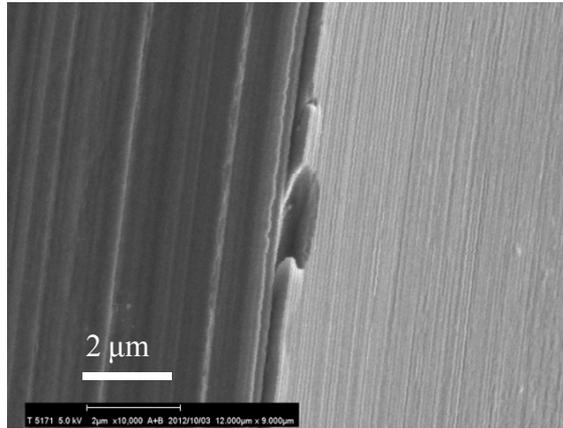


(b) Position error of radius fitting of hemisphere

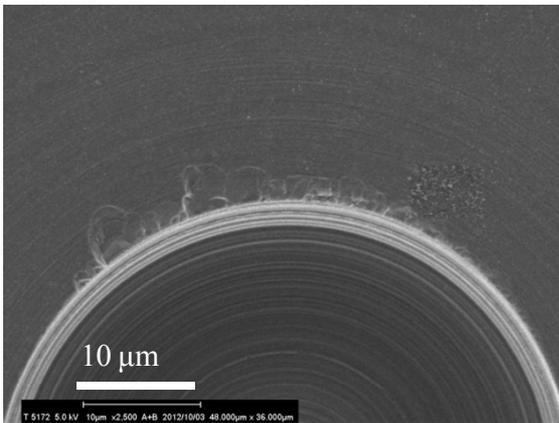
Fig. 5-15 Radius fitting with LPCMI



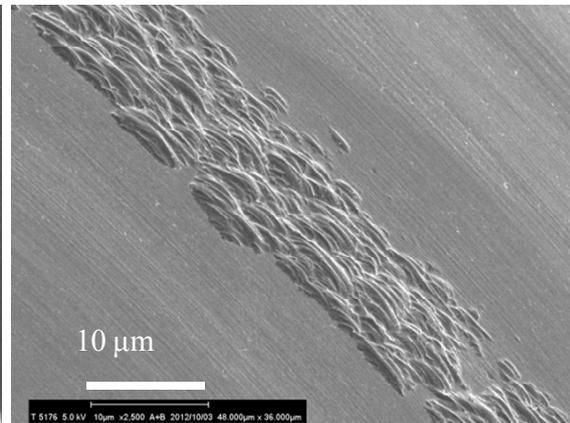
(a) Top view of machined hemisphere



(b) Edge of hemisphere



(c) Edge of anchor

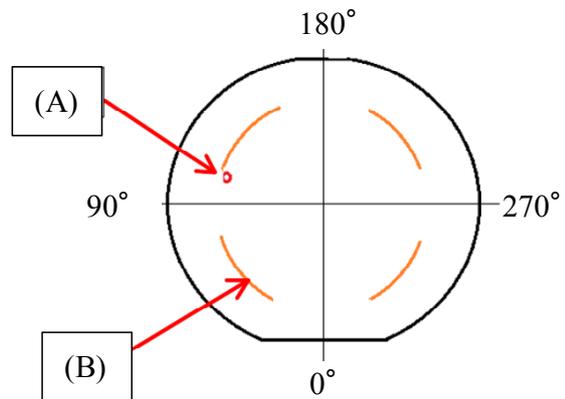


(d) Defective area at the curved area of hemisphere

Fig. 5-16 SEM image of machined hemisphere and anchor



(a) Setup of measurement system



(b) Measurement of defect area

Fig. 5-17 Measurement positions of defect area with LPCMI

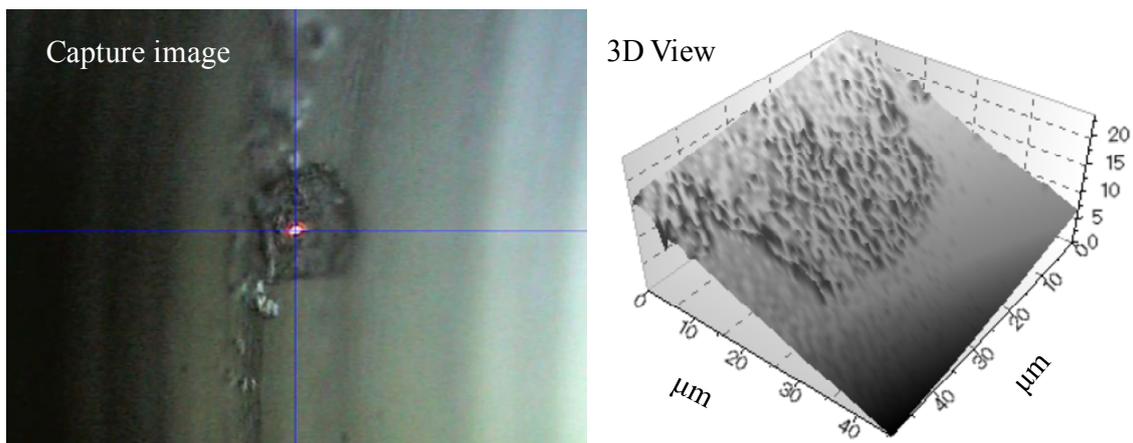


Fig. 5-18 Defective area image at (A) area in Fig. 5-17

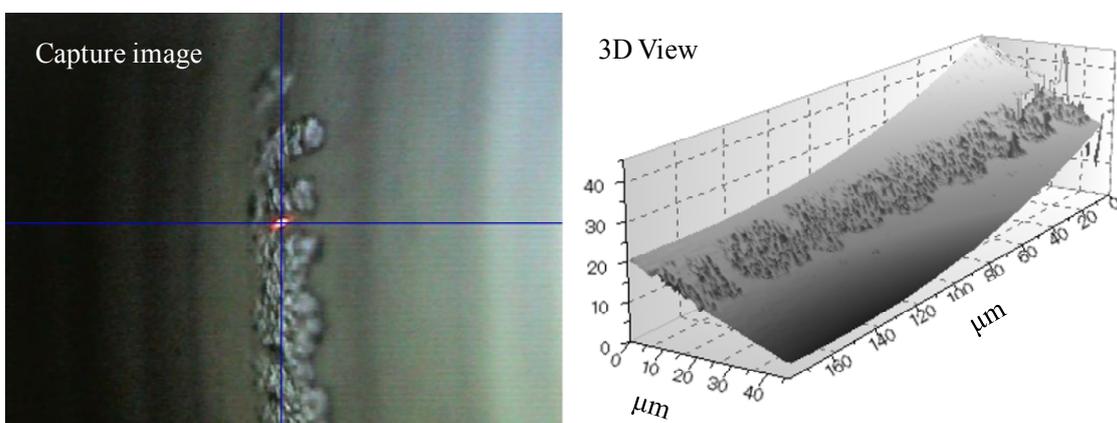


Fig. 5-19 Defective area image at (B) area in Fig. 5-17

Table 5-5 Results of machined hemisphere on silicon wafer

Cutting time	Hemisphere: rough 14 min, finish 2 hours, Anchor: 3 min
Tool	4 flute R0.3 mm
Fitting radius	0.494 mm (Target radius 0.5 mm)
Error of fitting radius	$\pm 1 \mu\text{m}$

5-3-2 加工中の切削抵抗の測定

加工中の XYZ 軸の切削抵抗の測定結果を図 5-17 に示す。Z 軸の切削抵抗の振幅が大きく、周期は大きな振幅の周期と小さな周期が重なった波形となっている。大きい振幅は工具の一回転の周期 0.49ms を示しており、その中にある 4 つのピークは刃数を示している。この結果より、4 枚刃が確実に加工に作用していることが判る。XY 軸の波形はどの位置を加工しているかにより変化するが、測定した場所では、Y 軸は Z 軸と逆位相の振幅となっている。X 軸は明確な波形が見られない。

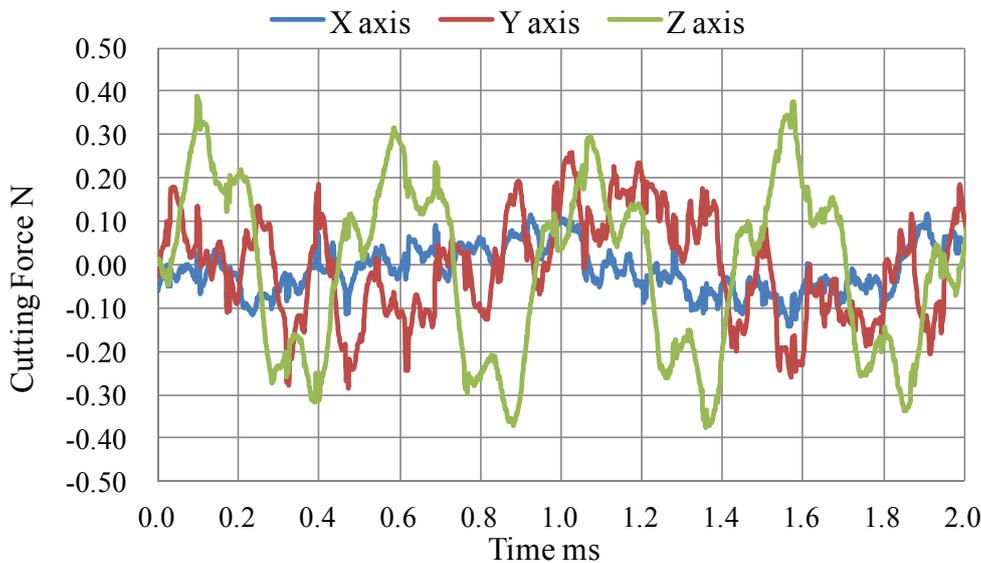


Fig. 5-20 Wave form of cutting force with 3 axis micro dynamometer

5-4 加工後の工具の観察

単結晶シリコンを加工した後に工具を観察すると図 5-21 のようにエッジ部に付着物が付いていた。このようにエッジ部に付着物があると、加工特性に影響を与えることが考えられ、脆性破壊が一部で発生する原因のひとつと考えられる。エッジ部が付着物に覆われている様子を図 5-22 (a) に示す。図 5-22 (b) に示すように、部分的に付着物にクラックが入っており、図 5-22 (c) に示すように、その厚さは約 $3\mu\text{m}$ である。付着物の表面を高倍率で観察すると、図 5-22 (d) のように周期 $0.3\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ を持った波のようなテクスチャが見える。この付着物は、シリコンを延性モードで加工中に生成される微細な切子が付着し生成たと推定される。その事を確かめるために、付着物の EDS 分析を実施した。図 5-23 は、付着物の領域 (A) と PCD 素材の領域 (B) の分析結果を示す。領域 (A) は、PCD の素材である炭素とコバルトが検出され、領域 (B) では、ベースの PCD 素材の成分とシリコンと酸素が検出され、原子比率から SiO_2 と推定される。分子構造については分析していないが、J. Yan による単結晶シリコンの加工による切子の分子構造の分析結果¹⁹⁾を参考にするとアモルファス構造と考えられる。アモルファス SiO_2 は図 5-24 に示すように、平均 $0.5\text{-}0.7\text{nm}$ の穴を持ったポーラス構造をしており、非常に強いファンデルワールス力を持っていることが特徴である⁵⁸⁻⁵⁹⁾。この力により PCD 工具の表面に付着したと推定される。

このように付着した SiO_2 は、アセトン溶液中での超音波洗浄で取り除くことはできず、また酸やアルカリ溶液に入れただけでも取り除くことはできない。そこで、図 5-25 に示されるような電解システムを使用して、表 5-6 のテスト条件にすることで、30 秒程度で取り除くことができることが判明した⁶⁰⁾。

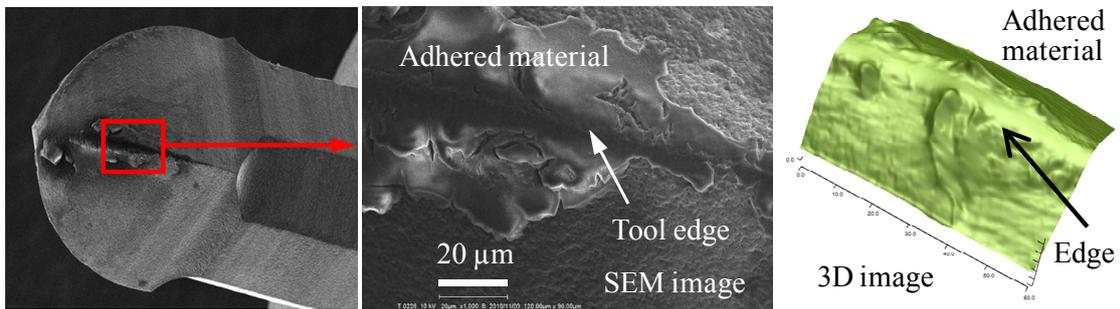
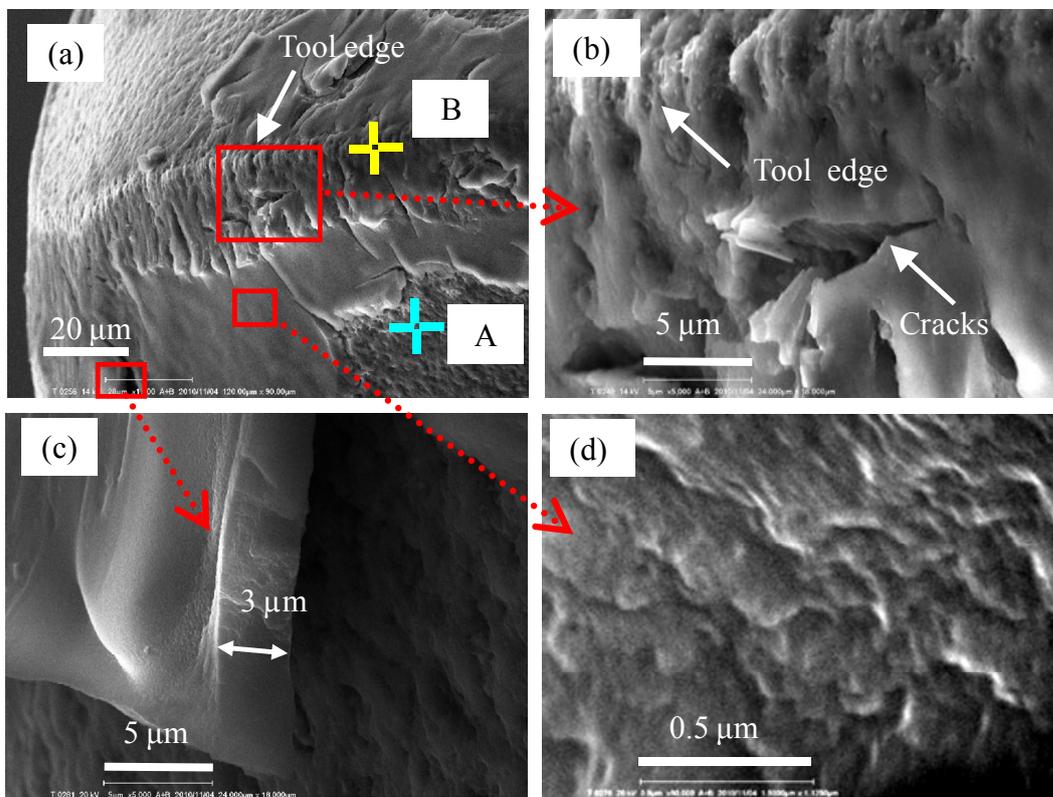
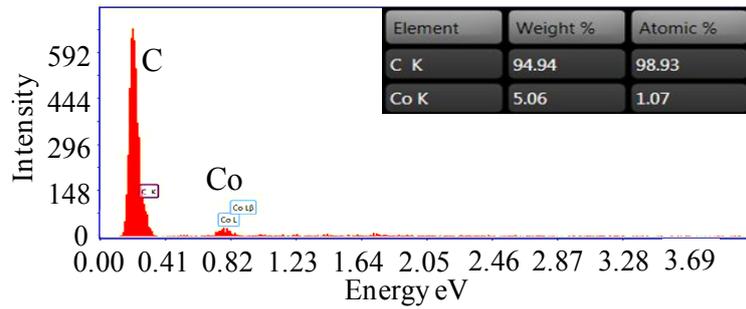


Fig. 5-21 SEM image of PCD tool surfaces after silicon machining

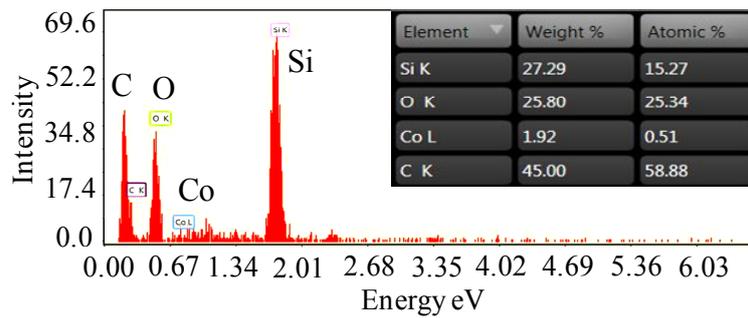


- (a) Adhesive materials on tool edge
- (b) Cracks of adhesive materials
- (c) Thickness of adhesive materials
- (d) Micro texture on adhesive materials

Fig. 5-22 SEM images of contamination layer on PCD tool



(a) Analysis at the position A in Fig. 5-22 (a) with EDS



(b) Analysis at the position B in Fig. 5-22 (a) with EDS

Fig. 5-23 Analysis of adhesive materials with EDS

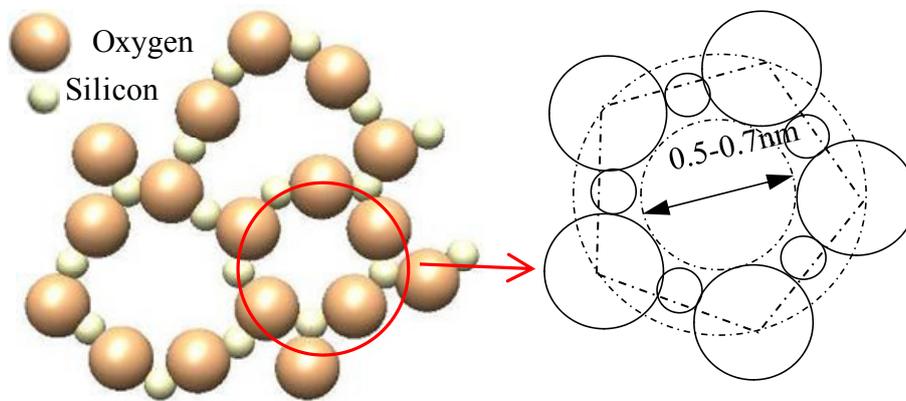


Fig. 5-24 Structure of amorphous SiO_2 in two dimensions

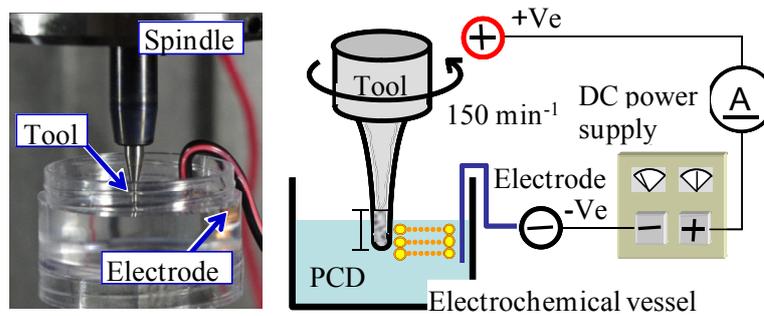


Fig. 5-25 Electrochemical test setup

5-5 結言

単結晶シリコンウェハ上に MRIG 用の半球形状を製作することを目指して、マイクロ PCD ボールエンドミルをワイヤ放電加工機で製作し、その工具を使用して高品質な面性状と形状精度を実現する加工方法を研究した結果、以下のことが判明した。

- (1) ワイヤ放電加工機で製作した 4 枚刃のマイクロ PCD ボールエンドミルを使用して、適切な加工条件を選択することにより、シリコンウェハ上に半球形状をほぼ全面に渡り延性モードで加工できることが判明した。
- (2) 極小径のマイクロ PCD エンドミルで中心部の微小なアンカー形状を高精度に加工することができた。
- (3) 半球のエッジ部の一部にサブミクロンのクラックが見られた。
- (4) 傾斜部に帯状に幅 0.015mm 程度の脆性破壊した領域が発生する。その位置は、90°毎に 4 方向あり、D カット部から 45°傾いており、結晶の異方性によるものと推定される。
- (5) 延性モードで加工すると、工具にシリコンの切子が付着し、その組成は EDS 分析により SiO_2 であることが分り、アモルファス SiO_2 と推定される。
- (6) 工具に付着した SiO_2 は水酸化ナトリウム溶液による電解作用により短時間で取り除くことができることが判明した。

第6章 マイクロPCDエンドミルによる超微粒子超硬の加工特性

6-1 序言

近年、エンジニアリングプラスチックや光学ガラスのような高機能な材料を用いたマイクロ・ナノスケールの部品を大量生産するニーズが高まり、これら微小精密部品を射出成型やガラス成形により製造することが必要になっている⁶¹⁻⁶²。このような生産技術的要求を満たすために、高硬度材料でできた高精度・高品位な金型を製造することが求められるようになった。このような金型に用いられる高硬度材料には超微粒子超硬を用いることが最適とされ、この素材をシングルナノメータの面粗さと数十ナノメータの形状精度で加工し、微細な3次元形状を作り上げて金型とする加工技術を確立することが急務となっている。このような精密金型に作り込む3次元微細形状の特徴は、高アスペクト比を有する非常に狭い溝や薄いリブで構成され、しかもそのほとんどが非対称な形状のため、放電加工、研削加工、手作業による磨きでは製作することはほとんど不可能である。これらの微細3次元形状を要求される面粗さと形状精度で加工生成する唯一可能な製作方法は、粗加工から仕上げ加工まで一貫して、超精密工作機械と回転工具を用いて、微小切削加工により実施することである⁴²。そのような加工には、PCDのような超硬よりも硬い材料でできたマイクロ切削回転工具(典型的には数十から数百マイクロメータの直径)を用いることが必要であるが、現在までこのような微粒子超硬の微細加工を微小回転工具により機械加工することに関する基本的な研究は限られたものしかない。近年、鈴木らが比較的大きな直径2mmのPCD工具を使用して、直径2.4mmの非球面レンズ金型を製作することで超硬の切削加工の有用性を示した研究成果を発表しているもの²⁸、より微小な工具による微細3次元形状のマイクロミーリング加工に役立つ系統だった研究成果は発表されていない。

そこで、本研究では、微粒子超硬の様々な3次元形状の加工を実用するためには、加工プロセスの基礎的な特性を理解するための研究が必要であると考え、超微粒超硬をマイクロPCDエンドミルを用いて機械加工する場合の、加工条件、工具の摩耗、および生成される加工面の基本的な関係と加工プロセスの挙動を理解することを目的として、研究を行った。

6-2 実験方法

超微粒子超硬のマイクロPCDエンドミルによる加工の基本的な特性を系統的に理解するために、(1)加工条件、(2)工具摩耗、(3)切削中のX軸、Y軸、Z軸方向の切削抵抗、(4)マイクロ加工に使用された工具の表面性状、(5)加工された面の品位、の関係に注目した実験を行った。

加工素材として使用した超微粒子超硬と微小回転工具の材料として使用したPCDの材料特性を表6-1に示す。加工実験において主軸の振れや工具の取り付け誤差の影響を極力排除する目的で、工具形状は、図6-1に示すように、一枚刃のマイクロエンドミル形状とした。

第3章と第4章で述べたマイクロPCD工具製作システムを用いて工具製作し、第2章

で述べた超精密加工機を使用して加工実験を行なった。図 6-2 は実験のセットアップを示す。

次の点を明らかにするために、実験では、2種類の加工を行なった。

- (1) 未使用工具（摩耗していない工具）を使用した場合の、加工条件と生成された加工面品位の関係。
- (2) 工具摩耗の進行に伴い、加工面品位の変化。

実験は、素材を機械上にセットしたのち、表面を平坦に仕上げるための前加工を超硬工具を用いて行い その面を図 6-3 に示すようにマイクロ PCD エンドミルで溝加工することにより行った。

表面粗さの測定は白色干渉計 SWLI（Scanning White Light Interferometer）で行った。

Table 6-1 Properties of tungsten carbide and PCD

	Tungsten carbide	PCD
Grain size	0.3 μm	$\sim 0.5 \mu\text{m}$
Content	88(wt.%)	90(Vol.%)
Traverse rupture strength	4.4 GPa	2.6 GPa
Vickers hardness	17.3 GPa	100-120 GPa

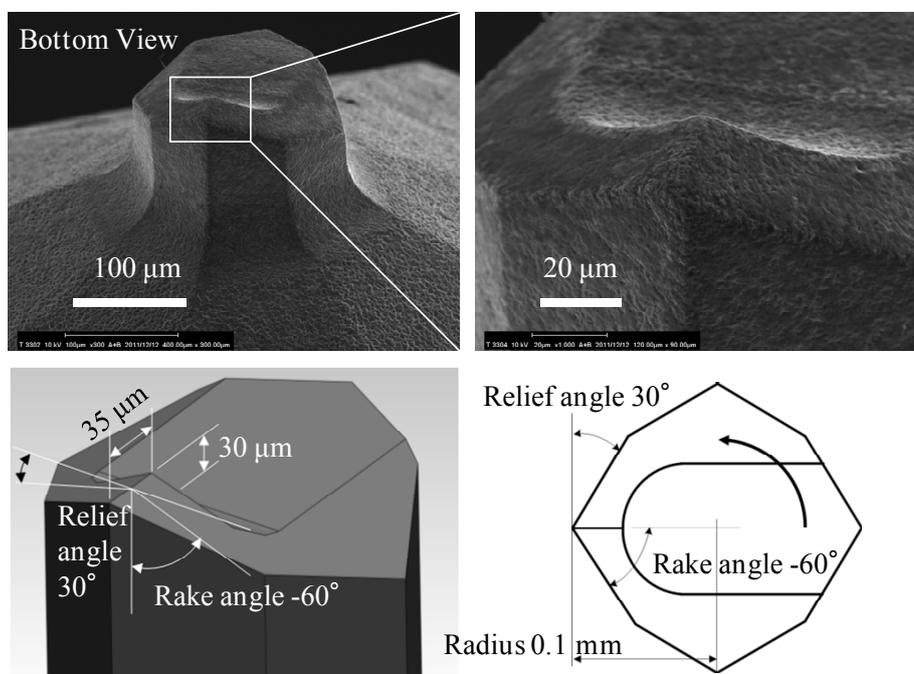


Fig. 6-1 Micro PCD end mill geometry fabricated for experiments

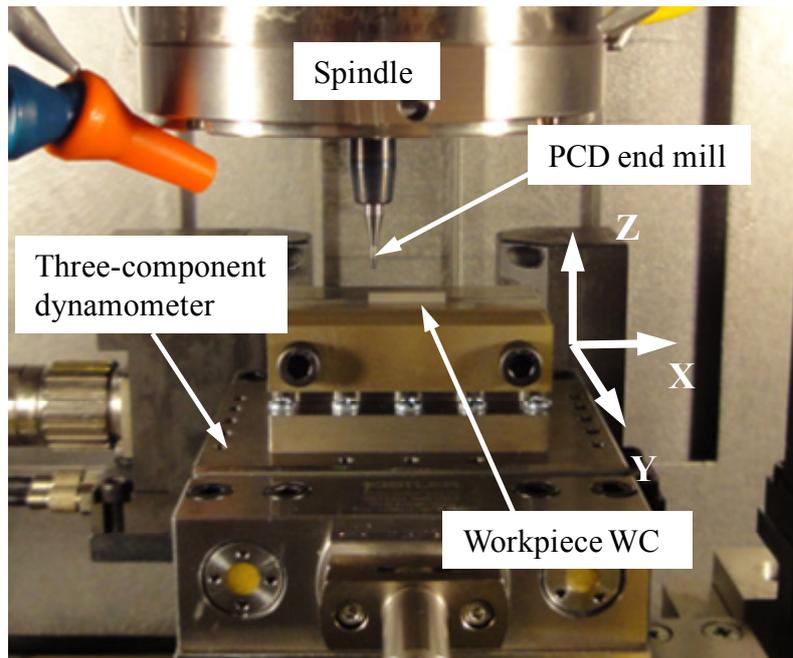


Fig. 6-2 Set-up for micro milling experiments

加工開始前の工具と被加工物との接触検出を容易にし、かつ加工中の切削抵抗の挙動を測定できるようにするために、被加工物を図 6-2 に示すように、3 軸微小切削動力計を機械テーブル状に設置し、その上に固定した。溝加工は、図 6-3 に示すように、X 軸マイナス方向に加工することで行った。加工中、常時、鉍物油の加工液を切削場に供給した。主軸の回転数は、常に $122,500\text{min}^{-1}$ 一定であり、切削速度は 76.9m/min (工具半径 0.1mm) である。

ワイヤ放電加工機で加工された刃先は、図 6-4 (a) に示すように工具表面に細かい凹凸が存在し、そのまま切削に用いると高品質な加工面を得ることができないため、実験を始める前に、工具先端が、図 6-4 (b) に示されるような平坦化形状 (先端が約 $2\mu\text{m}$ 後退) になるまで、一定の条件で被加工物を加工する前切削を実施した。

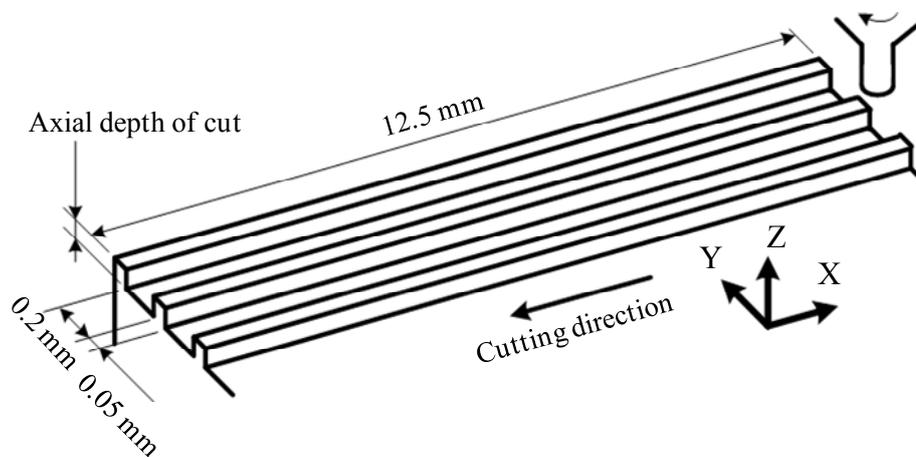
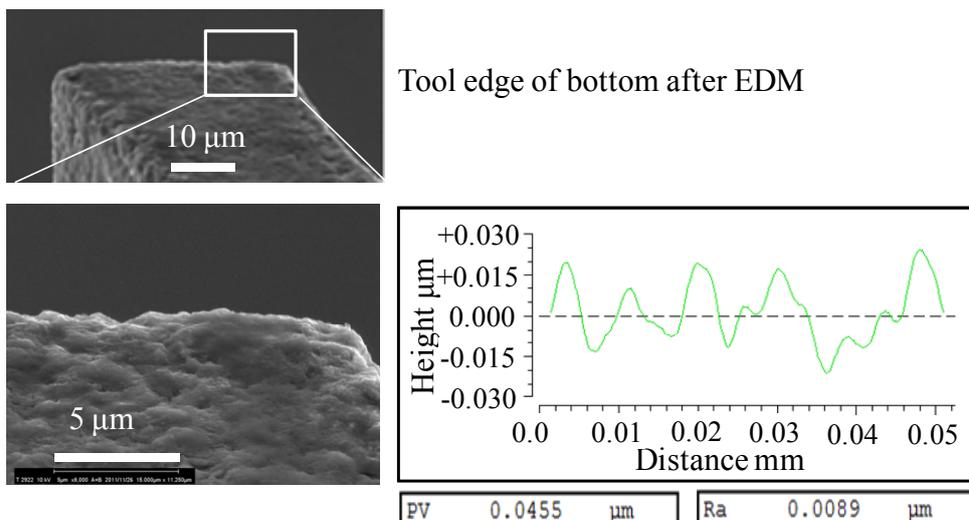
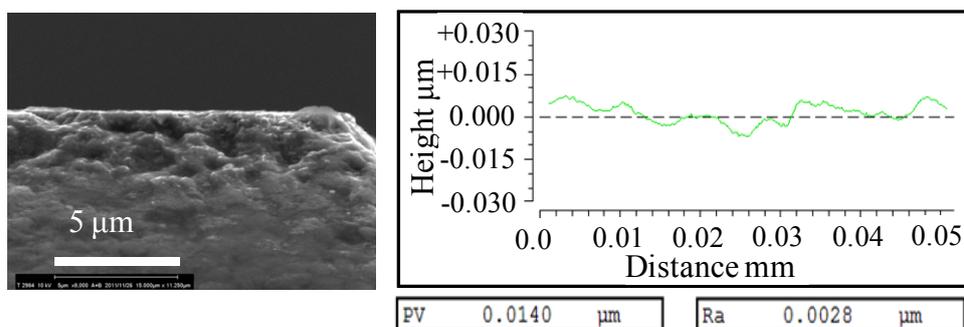


Fig. 6-3 Groove machining experimental illustration



(a) Tool edge of bottom after EDM and machined surface roughness



(b) Tool edge of bottom after conditioned and machined surface roughness

Fig. 6-4 Pre-conditioning effect of the tool edge (SEM micrograph of the cutting edge tip and cross-sectional view of machined workpiece with scanning white light interferometer)

6-3 実験結果と加工面の解析

6-3-1 未使用PCD工具による加工プロセスの挙動

未使用工具（摩耗なし）を用いた実験では、以下のように切込み深さと送り速度を変化させた

軸方向切込み深さ：0.2, 0.5, 1.0 μm

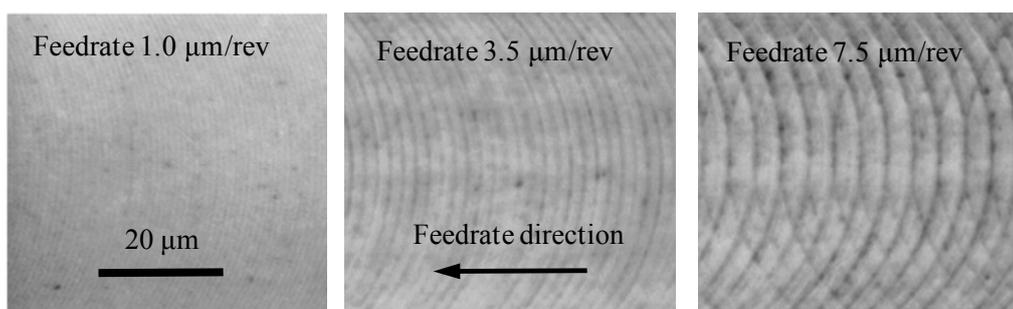
送り速度：0.1, 0.2, 0.35, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.5, 5.0, 7.5, 10 $\mu\text{m}/\text{tooth}$

図 6-5 に、種々の送り速度で加工された顕微鏡写真を示す。加工面には送り速度をピッチとしたカッターマークが観察された。カッターマークが送り方向と逆方向についているのは、工具が主軸（Z 軸）方向切削抵抗により押し上げられるため、工具が主たる切削（溝切削の場合には半回転の間）を終了した後、残り半回転の間も工具がすでに仕上げた面を擦る、ヒーリング現象により生成されたものであると考えられる。この工具

が切削抵抗により、主軸上方に押し上げられるという現象は、空気静圧ベアリングで支持された高速主軸の場合避けることのできない現象で、その変位量は空気静圧ベアリングのZ軸方向の剛性に依存する。

この剛性を把握するため、主軸は回転させず、空気精圧軸受けのみ動作させて、主軸を数値制御によりZ軸下方にステップ移動させながら工具先端を徐々に動力計に押し当てて、Z軸の移動量とZ軸方向の力を測定した。図6-6に示す結果を得た。これによれば、ヒステリシスはなく、剛性は約6N/μmである。

実験中は切削抵抗も常時測定した。図6-7は異なる2種類の送り速度での切削中に測定された切削抵抗の測定結果を示している。図6-7(a)は送り速度0.35μm/tooth、図6-7(b)は送り速度1μm/toothの切削抵抗の測定結果を示す。図6-7(b)は図6-7(a)より送り速度が約3倍早いいため、Z軸切削抵抗のピークは約2倍大きくなっている。これにより、図6-7(b)のほうが主軸がZ軸上方へより高く押し上げられる結果となり、実際に加工された面は図6-7(a)に比べ高くなり、ヒーリングがより大きくなるため、Z軸方向切削抵抗の最小値はゼロにはなっていない。



(a) Feedrate 1.0 μm/tooth (b) Feedrate 3.5 μm/tooth (c) Feedrate 5.0 μm/tooth
Fig. 6-5 Microphotograph of surface machined with various feedrates ($A_d = 0.2 \mu\text{m}$)

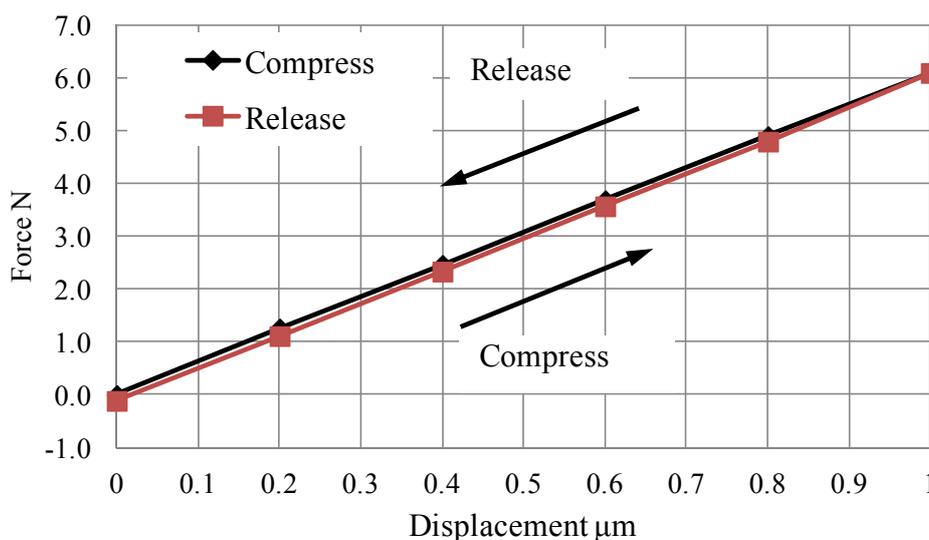


Fig. 6-6 Measured Z-axis spindle compliance

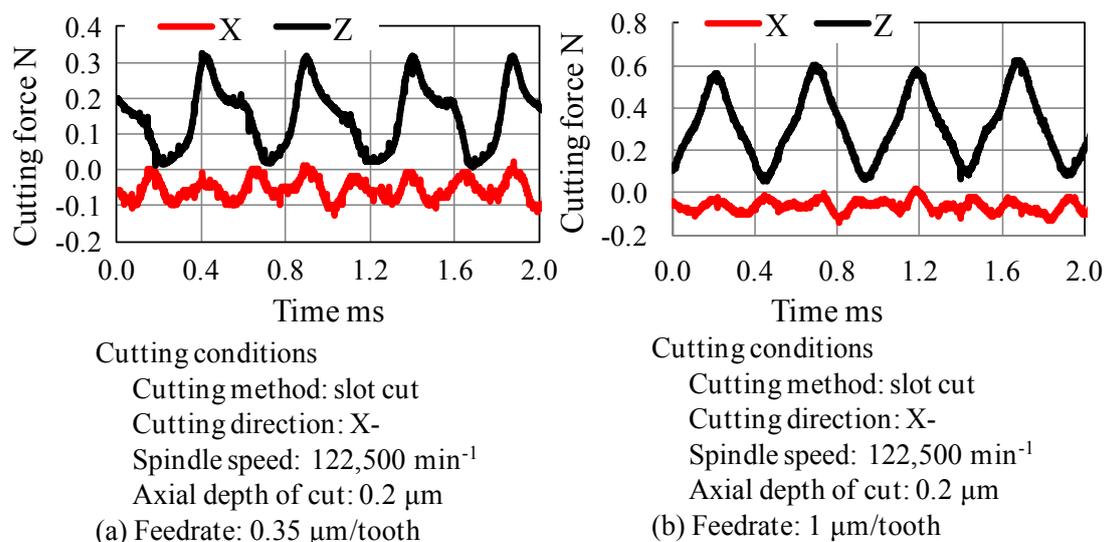


Fig. 6-7 Cutting force waveforms with deferent feedrate

種々の送り速度で加工した加工面粗さを白色干渉計により測定した。その結果を図 6-8 に示す。面の凹凸の変化を評価するため、面粗さの単位には山と谷の二乗平均値を採用し、以降の表記を最大面粗さ R_z と表記する。この図から観察されるように、ある送り速度までは、最大面粗さは数十 nm であるが、その送りを超えると数百 nm のレベルまで急に上昇する。

図 6-8 に見られるような急激な面粗さの上昇は、軸方向切込み深さ 0.2 μm では、送り 5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$ 付近で発生する。急激な最大面粗さの上昇の原因を追求するために、白色干渉計を使用してさらに詳細に測定した。表面には、クレータ状の穴があることが判明し、図 6-9 に示すように、その穴の大きさは超硬の粒子径とほぼ同じサイズの 400 nm 程度であった。このことから、クレータは超硬母材の主要構成要素である超硬微粒子が PCD 工具によって掘り起こされ、母体から脱落することによりできると判断した。

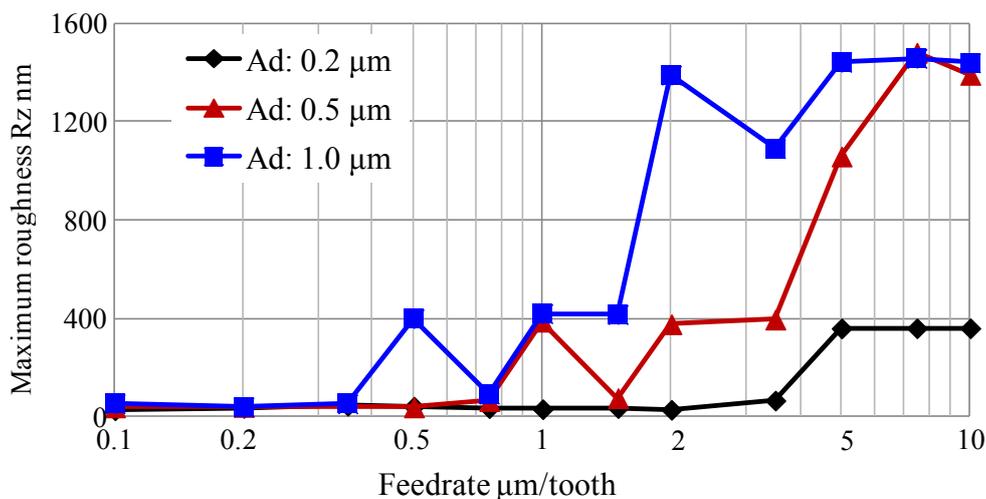


Fig. 6-8 Machined surface roughness with various axial depth of cut

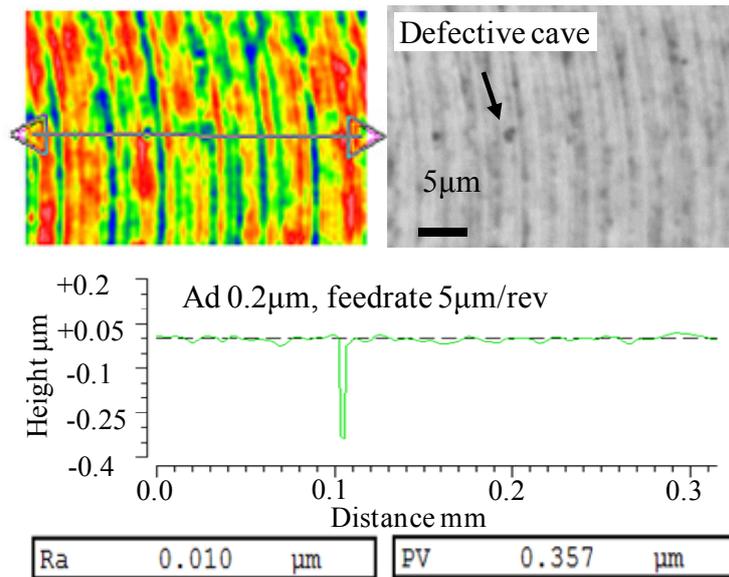


Fig. 6-9 Observation of a crater defect found on machined surface

図 6-10 は刃先整形処理をした図 6-4 (b) に示すような未使用工具を用いて Z 軸方向切込み深さ 0.2μm で、種々の送り速度で加工した面を白色干渉計で測定して得られた平均面粗さと最大面粗さを示す。一刃当り送り 5μm 付近で最大面粗さが急激に悪化するが、それ以下の送りでは、平均表面粗さ Ra は 4nm 以下、最大面粗さ Rz は 30~40nm であった。一刃当り送りが 5μm 以下の加工表面は、図 6-5 (a) と図 6-5 (b) で示すようなヒーリングが発生するが、これらのヒーリングの加工面粗さへの影響はほとんど無視できるという結果になった。

未使用工具による実験で得られた結果からわかることは、欠陥のない加工面を生成するための加工条件の範囲は重要であり、高効率で高品位の面を実現するためには軸方向切込み深さと送り速度を適切に選択することが重要であるという知見を得た。

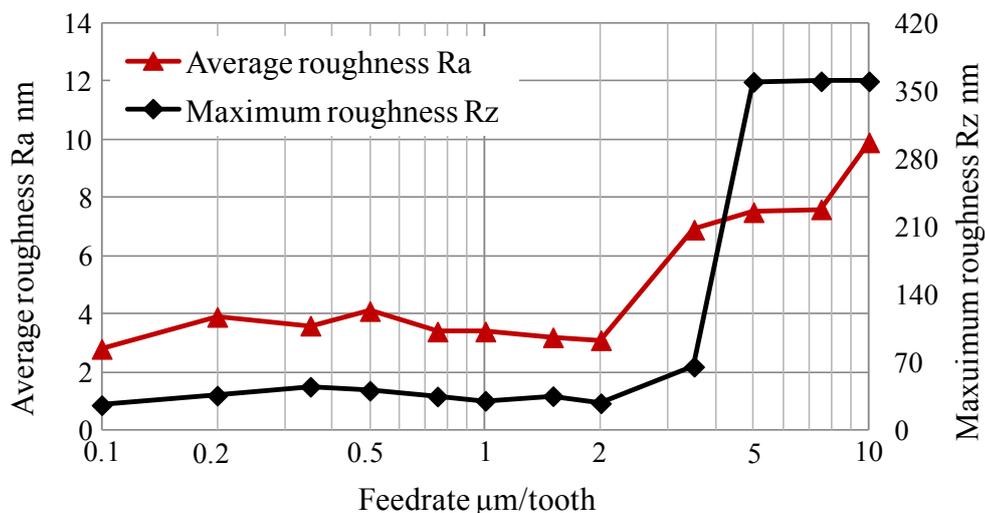


Fig. 6-10 Average and maximum surface roughness values with axial depth of cut of 0.2μm

6-3-2 加工面品位に対する工具摩耗の影響

工具摩耗の進行に伴い加工面品質がどのように変化するかを観察するために長時間にわたる加工実験を行った。実験中、適当な時間間隔で加工を中断し、磨耗量を測定した。摩耗は図 6-11 に示すように、走査型電子顕微鏡像で観察される後退した刃先の長さで定義した。その時に、生成された加工面の平均面粗さと最大面粗さも測定した。

工具の摩耗進行に伴う加工面粗さを図 6-12 に示す。加工距離が 18m 以上になり、工具摩耗量もかなり大きくなっても、加工面品位は良好である。この結果は、PCD 製マイクロ回転工具による加工では、工具刃先の加工面に接する部分の面積が増えても、加工面品位が劣化せず良好な加工面を維持することを示し、工具が磨耗しても加工を続けることができることが判明した。この結果を裏付けるため、同様な刃先を持つ工具を用いて高アスペクト比を持つ幅の狭い溝（幅 0.253mm、深さ 1.016mm）加工を実行し、図 6-13 に示すような溝が加工できることを確認した。

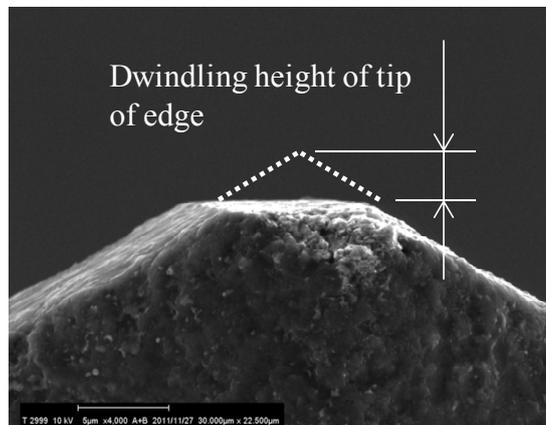


Fig. 6-11 Definition of tool wear (SEM micrograph of side view of tip of tool edge)

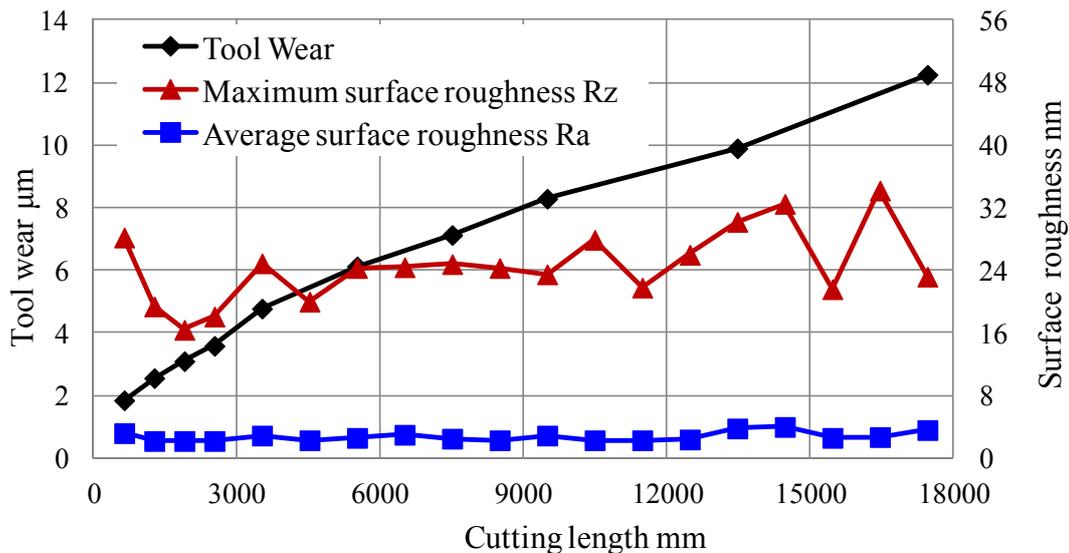


Fig. 6-12 Average surface roughness Ra and Maximum surface roughness Rz in according with progressive of tool wear

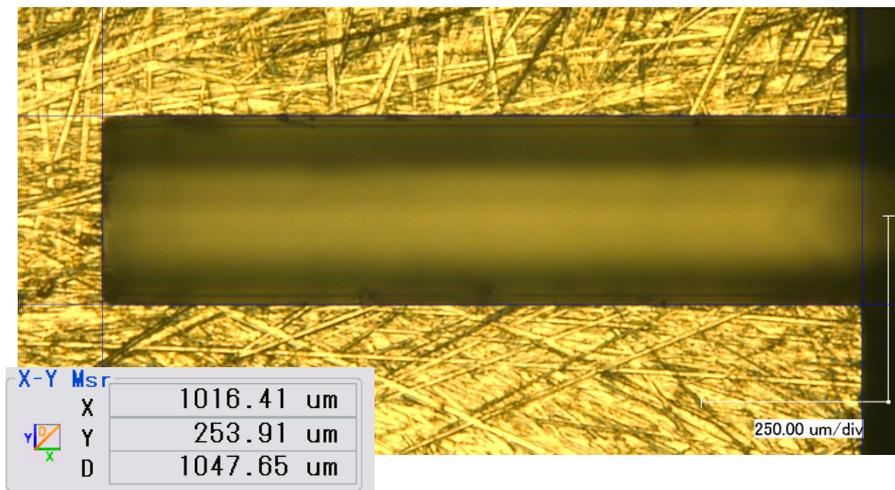


Fig. 6-13 Side-view of successful example of narrow groove machining with high aspect ratio (cutting conditions: $A_d = 0.1$ mm, feedrate = 0.1 mm/tooth, machining time = 13 h, 53 min).

6-4 加工後のPCD工具面の観察

PCD 工具の加工プロセスにおける被削材との相互作用の様子を詳細に調べるために、超微粒子超硬の加工に使用した PCD 製マイクロ工具の刃先近傍のすくい面を SEM により観察した。それにより得られた写真を図 6-14 に示す。工具の表面には、PCD とは異なる付着物や固着した物質があることが見受けられる。その物質を調べるためにエネルギー分散型 X 線分析 EDS (Energy dispersive X-ray spectrometry) を実施した。図 6-15 は、図 6-14 の中で付着物として認められる赤丸で示した個所を分析した元素スペクトラムダイヤグラムである。これによれば赤丸か所の付着物はタングステンと酸素で構成される物質であることが判明した。さらに、これらの成分の原子個数分析を行った結果、この物質は酸化タングステン (WO_3) であると判定された。このダイヤグラムには炭素も高いピークとなって表れているが、この炭素成分は PCD 本体から検出されたものと考えるのが妥当である。工具刃先近傍に付着した酸化タングステン (WO_3) は、加工プロセスにおいて被削材が除去される際に生成され、微粒子の切り粉となって、工具面に押し付けられたことで、工具の上に付着したものであると結論された。

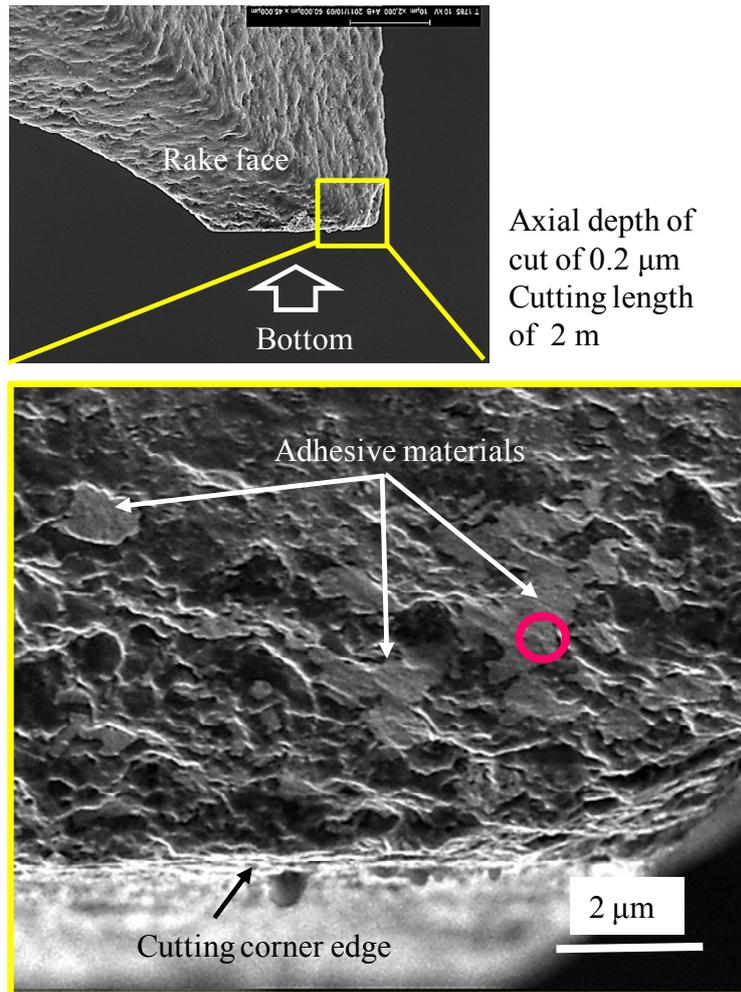


Fig. 6-14 SEM micrograph of rake side of PCD tool after micro milling

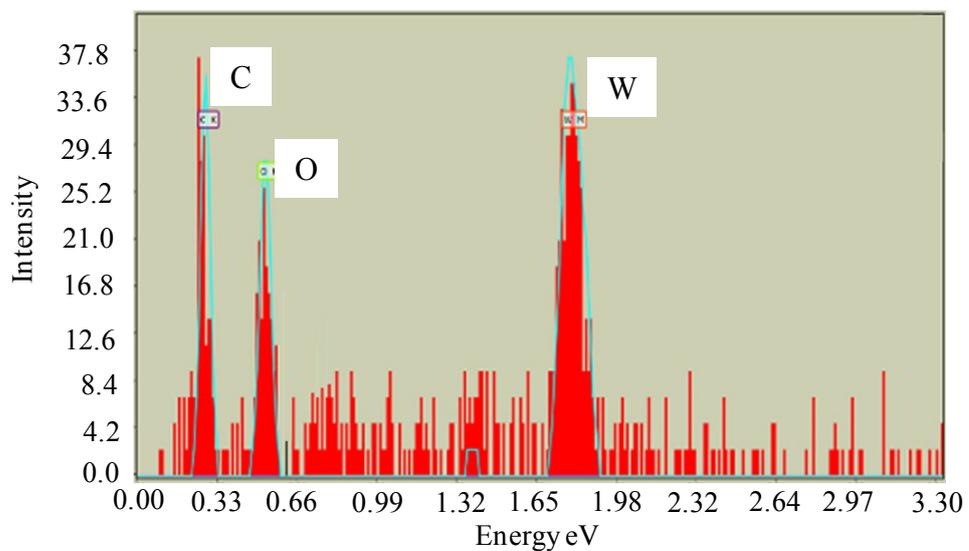


Fig. 6-15 EDS analysis results for red round mark in Fig. 6-14

図 6-16 は、図 6-14 で示した工具と同一工具の底面である。工具の底面は摩耗により平坦になっている。表面には分散したサブミクロンサイズの微粒子と PCD の焼結時に生成された多くのキャビティー状の微小穴が存在している。これらの穴は、一つ一つのダイヤモンド粒子がマイクロ切れ刃となり被削材の表面を微小切削し、その微小切り粉をとらえるチップポケットとして作用しており、これが微小切り粉をため込み前述した酸化タングステンの付着物として蓄えられと考えられる。さらには図 6-14 で示されるように、2m の距離を切削した後でも、工具のすくい面に、空のマイクロキャビティーと酸化タングステンのマイクロ付着物が混在している事実から、工具摩耗の進展に伴い、常にこの付着物の生成と脱落が繰り返されるため、工具は摩耗するものの長時間安定した除去作用が持続すると考えられ、工具底面は被削材に対し、切削よりはむしろ研削効果をもたらしていると考えられる。

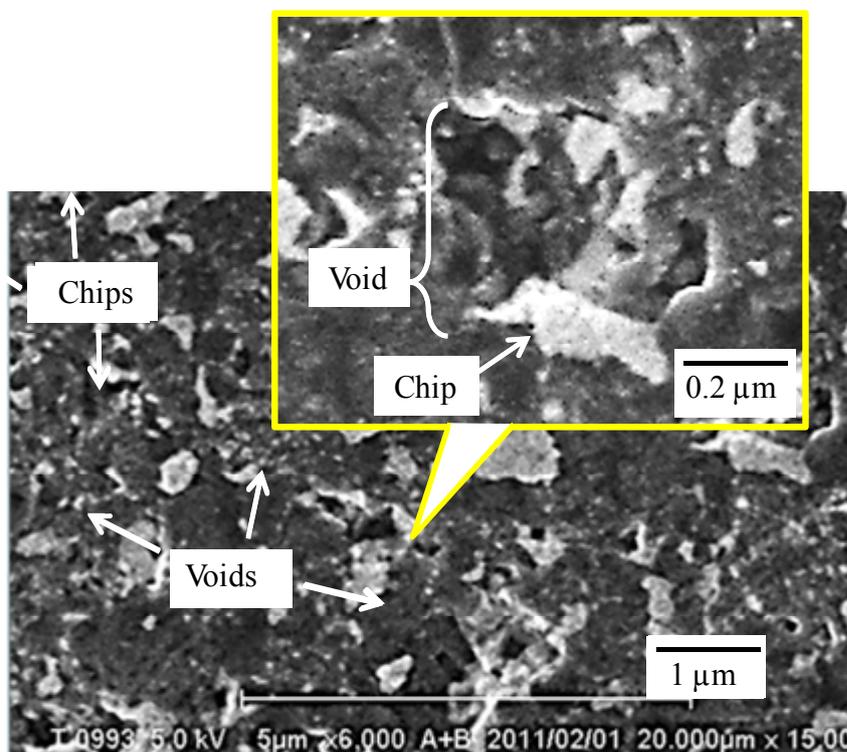


Fig 6-16 Bottom view of PCD tool after micro milling

6-5 結言

本研究では、超微粒超硬をマイクロ PCD エンドミルを用いて機械加工する場合の、加工条件、工具の摩耗、および生成される加工面の基本的な関係と加工プロセスの挙動を理解することを目的とした研究を行った。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 刃先成形処理されたマイクロ PCD エンドミルで微粒子超硬を加工する場合、軸方向切込み深さや送り速度が一定の範囲であれば、延性モード加工面が得られ、本実験の環境では、平均面粗さが数 nm、最大面粗さが 40nm 以下の加工面品位が達成できることが確認された。
- (2) ワイヤ放電加工機で製作されたマイクロ PCD エンドミルを使用し超硬微粒子製の被削材を加工する場合、高品位の加工面を得るには、工具刃先が平坦で滑らかになるように、前処理を施す必要であることが判明した。
- (3) 軸方向切込み深さや送り速度が許容範囲を超えると、工具刃先が大きな力で加工面に押し付けられることによる圧縮応力の増大によって、超硬部粒子が掘り起こされ、粒子の母材からの脱落が発生し、面品質が大きく損なわれることが判明した。
- (4) PCD 工具の刃先が摩耗し、刃先に大きな面積の平坦部分を有するようになって、この平坦部分が被削材加工面に押し付けられて加工が行われる場合には、摩耗した工具で加工された面の品位は悪化しないという結果を得た。この理由は、この平坦部分に小さなキャビティーと微粒子ダイヤモンドが混在しており、ダイヤモンド微粒子が超硬素材を微小切削し、その切り粉が小さなキャビティーに捉われて保持され、刃先の摩耗に伴ってこの微小キャビティーに堆積した切り粉が脱落することにより、新しいダイヤモンド粒子とキャビティーが現れるというサイクルが持続することによって安定した除去効果が持続することであると結論された。これにより、高品位な加工面を保ちながら、非常に長い距離を加工できる結果が得られた。

第7章 マイクロPCDエンドミルによる石英ガラスの加工特性

7-1 序言

石英ガラスは、機械的強度が高く、化学的や熱的に非常に安定しているため半導体プロセスや機能性デバイスとして使用されている。可視光領域で透過率が非常に高いことから μ -TAS (Micro-Total Analysis Systems) のようなバイオメディカル用のデバイスの材料として用途が拡大している⁶³⁻⁶⁴⁾。

これらの分野では、所望のデバイスを必要とされるときに迅速に製作することが必要であることから、少量多品種の製造方法が望まれ、製作に時間が掛かる製造方法、例えば、金型を製作してガラス射出成形により生産したり、化学的エッチングプロセスを利用して製造するという方法などは適用できない。このような要求を満たす製造方法として、切削や研削といった機械加工を用いて、石英ガラス素材に3次元の微細形状を加工する方法が考えられるが、これまで、微小回転工具を用いた石英ガラスのマイクロミーリング加工に関してはあまり研究が行われず⁶⁴⁾、その加工の特性や加工条件が明らかになっていない。そこで、PCD ダイヤモンド工具による石英ガラスの高品位微細加工に関して、その基本的な加工プロセスの挙動を実験的に観察し、高品位の加工面を得るための基本的な加工条件を明らかにすることを試みた。石英ガラスは脆性材料であるため、透明で高品位な加工表面を有する微細な形状加工を実現することが困難と考えられるが、過去に延性モードで旋削加工により高品位な加工面を得る研究が発表されている²³⁾。複雑な微細形状を加工するためには微細な回転工具が必要であり、石英ガラスのような硬脆性材料は、ダイヤモンド等の非常に硬い材料で作られた工具で加工するのが一般的である。しかし、単結晶ダイヤモンドは結晶構造に異方性があり力が加わる方向によっては破壊し易いことから、回転工具用の刃先材料としては、適しているとは言えない。この理由から、強度に異方性がない材料として、PCD を用いて微小回転工具を製作することが有効であると考えられる。また、PCD には導電性があり放電加工により容易に微細形状の工具を製作することができるという利点もある。

そこで、本研究では、特別な形状を有するマイクロ PCD エンドミルを開発し、それを用いて、石英ガラスに高品位微細加工を行うための、加工プロセスを支配する加工条件と加工面や工具の状態を詳細に観察することで加工プロセスを明らかにし、その結果から、石英ガラスの高品位微細加工技術を確立することを目的とした。

7-2 実験方法

7-2-1 被加工物と加工機の特徴

被加工物である石英ガラスは両面を鏡面加工されたオプティカルフラット ($\lambda/4$ λ : オプティカルフラットの面精度を表す際に用いられる波長で通常は633nm) (直径25.4mm, 高さ12.7mm) とし、その片面を加工した。同素材の特性値を表7-1に示す⁶⁵⁾。

加工機械には、表 7-2 に示す仕様のエアタービン駆動スピンドル主軸とリニアモータ駆動による3軸の送り軸で構成された超精密加工機を用いた⁴²⁾。なお、主軸の回転数は

123,000min⁻¹ 固定である。加工実験では、工具と加工物の接触する位置の検出と、加工中の切削抵抗を測定する目的で図 7-1 に示すように加工機のテーブル上に 3 軸 (X, Y, Z) 微小切削動力計を固定し、その上に被加工物をセットして行なった。

Table 7-1 Specification of fused silica ⁶⁵⁾

Young's modulus	72.7 GPa
Shear modulus	31.4 GPa
Modulus of rupture, abraded	52.4 MPa
Bulk modulus	35.4 GPa
Poisson's ratio	0.16
Knoop hardness (100gf load)	522 kgf/mm ²

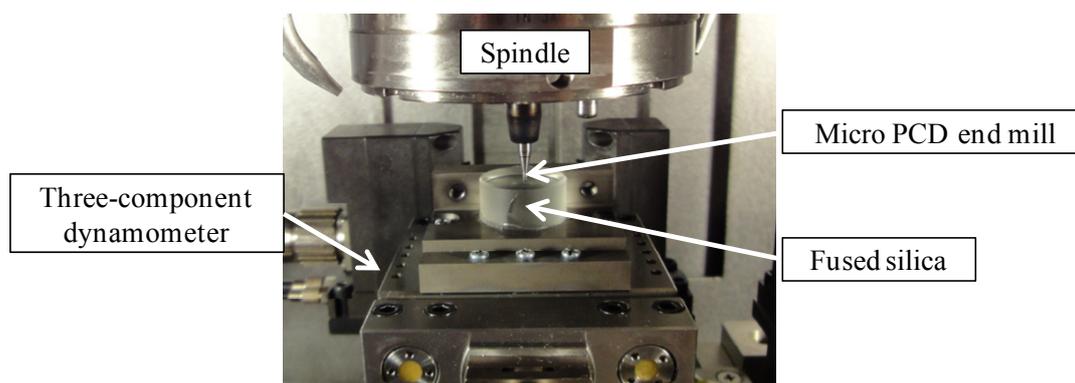


Fig. 7-1 Set-up for micro milling experiments

Table 7-2 Specification of ultra-precision machine tool

Machine stroke	150 x 150 x 100 mm
Drive system	AC coreless linear motor X, Y, Z
Maximum feedrate	5 m/min
Maximum acceleration at machining	0.3 G
Minimum resolution of linear scale	3.125 nm
Spindle type	Aerostatic bearing, Air turbine drive
Spindle speed	123,000 min ⁻¹

7-2-2 マイクロPCDエンドミルの製作

工具素材は、表 7-3 に示す特性を持つ PCD を採用し、これを開発したワイヤ放電加工機により所望の工具形状に加工した。加工実験において主軸の振れや工具の取り付け誤差の影響を極力排除する目的で、工具形状は一枚刃のマイクロエンドミル形状とし、製作した工具の形状を図 7-2 に示す。

Table 7-3 Properties of PCD

Grain size	~ 0.5 μm
Content	90 (Vol.%)
Traverse rupture strength	2.6 GPa
Vickers hardness	110 – 120 GPa

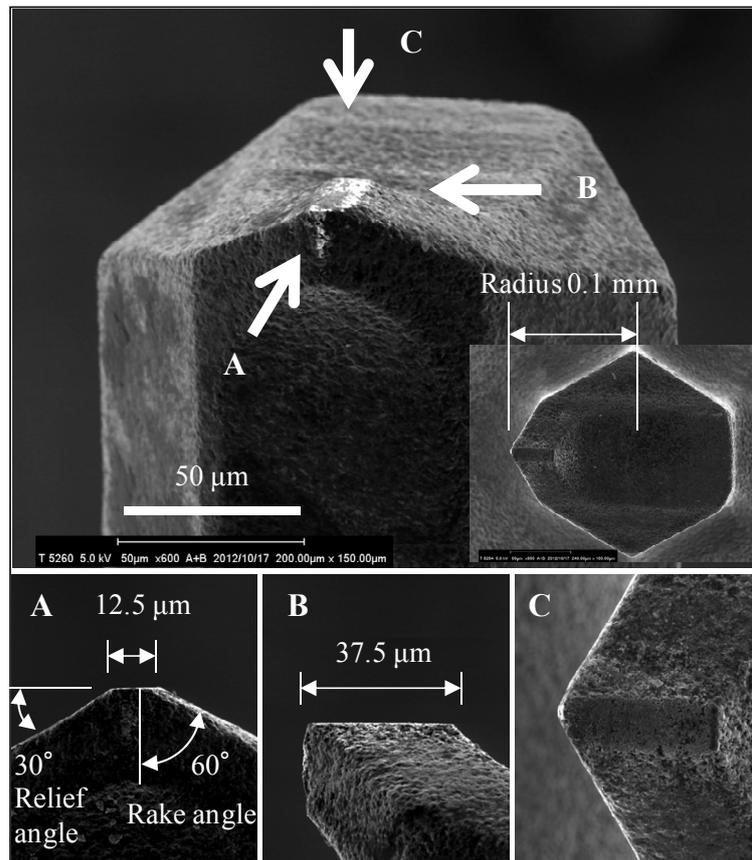


Fig. 7-2 Micro PCD end mill fabricated as a base tool with SEM

7-2-3 加工方法

本実験では、基本的な加工特性を把握するために、図 7-3 に示すような単純な溝加工を実施した。溝切削を行う場合に、直ちに所定の切込み設定値まで工具が切込むことにより脆性破壊モード加工になる危険を避けるため、図で示したように溝の入口と出口の両方に傾斜をつけて、工具が徐々に食いつき溝加工を行い、加工後は工具が徐々に引き抜かれるように配慮した。

実験は、表 7-4 に示すとおり、主に軸方向の切込み深さ指令値（ ap 値）と送り速度を変えることで、各々の条件下における加工特性を観察した。最初の加工条件を決めるにあたり、既に報告されている Griffith の亀裂伝搬式から求められた石英ガラスの延性・脆性破壊モード遷移最大深さ 27nm を参考にして^{22),66)}、最初の実験における送り方向の切込み深さを 30nm/tooth とした。

実験に用いた加工機械の主軸は、毎分約 12 万回転の速さでエアタービン駆動され、工具の回転軸は空気軸受けで支持されているため、とくに回転軸方向に切削力が加わると空気軸受けの軸受け隙間の空気が圧縮されるため、回転軸はわずかに上方に変位する。そこで、この特性をあらかじめ把握し、加工中の工具 - 加工物間の挙動を理解する上でこの工具の上方移動量を考慮するため、この上方変位特性を測定する実験を行った。実際に工具を回転させて、工具回転軸方向（以下 Z 軸方向と呼ぶ）に力を加え、上方変位量を測定することが難しいため、主軸を回転させず、空気軸受けだけを作動させた状態で実験を行った。Z 軸方向の負荷は、主軸に取り付けた工具の先端を、機械の Z 軸方向移動距離を数値制御機能により、テーブル上に取りつけた微小切削動力計にセットしたワークに押し当てる方法で与えた。このようにすれば、機械の Z 軸方向の移動分と空気軸受け隙間が Z 軸方向に変化し、工具の Z 軸方向の変異となって表れるとともに、それに対応した Z 軸方向に押付け力を負荷として測定できる。このようにして行った Z 軸方向負荷と変位量の実測結果を図 7-4 に示す。この実験結果により、主軸の軸方向の静剛性は 3N/ μm であることが判明した。

実験中、加工位置には温度制御された切削油を供給し、工具および被加工物の温度依存性が実験結果に影響を及ぼさないよう配慮した。また、このような配慮のもと、工具摩耗は主として機械的な摩耗であると仮定した。

また、加工した被加工物と工具の観察および形状評価には、光学顕微鏡、白色干渉計 SWLI、走査型電子顕微鏡 SEM と原子間力顕微鏡 AFM（Atomic Force Microscope）を使用した。

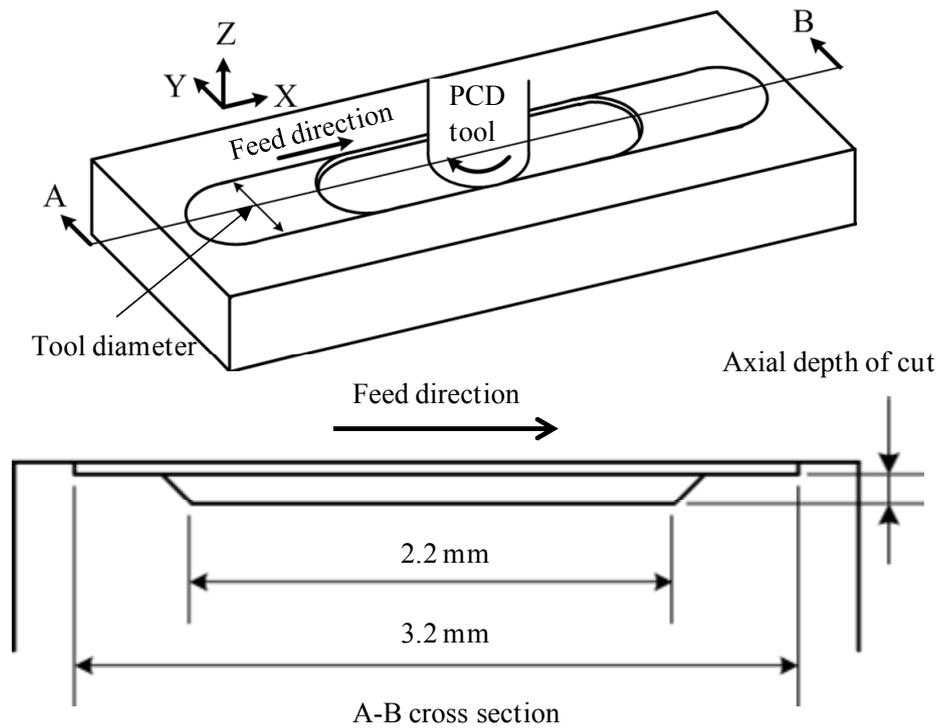


Fig. 7-3 Cut shape for experiments

Table 7-4 Cutting condition

Spindle speed	123,000 min^{-1}
Cutting speed	77.2 m/min (R0.1 mm)
Cutting method	Groove cut, length 2.2 mm, direction X+
Axial depth of cut	1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 2.75, 3.0 μm
Feedrate	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$
Fluid coolant	Synthetic oil, kinematic viscosity 7.59 mm^2/sec

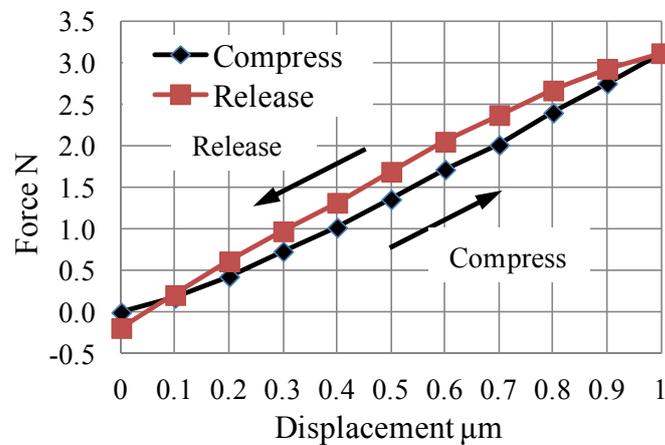


Fig. 7-4 Static displacement of spindle to the force of Z direction

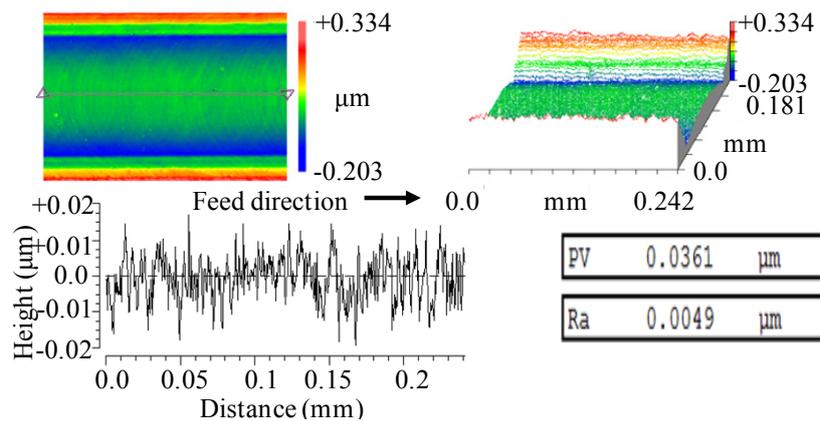
7-3 マイクロPCDエンドミルによる加工特性

7-3-1 加工面性状の観察

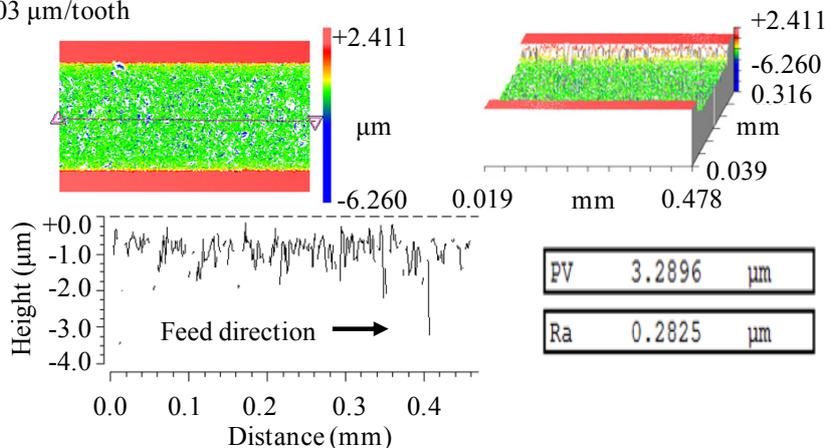
まず基本的な加工特性を把握するため、送り方向切込み深さ 30nm/tooth の条件で加工した。加工後の面性状の様子を図 7-5 (a) に示す。加工された溝全体が透明であり、平均面粗さ R_a は約 5nm 、最大面粗さ R_z は約 35nm の表面が得られることを確認した。加工した面の任意の面数か所を同様な方法で観察した結果、すべて同様な観察結果が得られたため、加工面は全面に渡って、延性モードで安定的に加工されたと結論した。なお、加工された溝の深さも測定し、切込み設定値 $1\mu\text{m}$ に対し、実際に加工された溝の深さは $0.43\mu\text{m}$ 、また加工中の Z 軸方向切削抵抗は約 0.5N と測定された。これらのことから、工具は切削中の切削抵抗により Z 軸上方へ押し上げられることにより、実際の切込み深さは、切込み設定値より、小さくなることが確認された。

また、軸方向切込み深さと送り速度をより大きな値に設定して加工したところ、図 7-5 (b) に示すように、脆性破壊モードの加工面へ遷移することが観察された。

これらの基礎的な実験結果に基づき、延性モード加工面と脆性破壊モード加工面を分ける加工条件設定値の境界を求めるための実験を行なった。



(a) Surface roughness machined with ductile mode: axial depth of cut of $1\mu\text{m}$, feedrate of $0.03\mu\text{m/tooth}$



(b) Surface roughness machined with brittle fracture mode: axial depth of cut of $2\mu\text{m}$, feedrate of $0.1\mu\text{m/tooth}$

Fig. 7-5 Typical surface roughness machined with a ductile mode and a brittle fracture mode

7-3-2 送り速度の影響

まず、切込み深さ指令値 $1\mu\text{m}$ (一定) で送り速度を 0.01 から $5\mu\text{m/tooth}$ の範囲で変化させ、加工された面の表面粗さを測定した。図 7-6 にその結果を示す。これによれば、送り速度 $2\mu\text{m/tooth}$ 以下では、すべての条件下において平均面粗さ R_a : 約 5nm 、最大面粗さ R_z : 約 40nm の延性モード加工面が生成された。なお、 $5\mu\text{m/tooth}$ まで送り速度を上げると、延性モードで加工されてはいるものの、カッターマークが顕著に現れ、平均面粗さと最大面粗さが他に比べて大きくなる結果となった。

また、全ての送り条件で生成された溝の深さを観察した。溝の底面は延性モード加工面となっていたが加工された溝の深さを測定した結果、指令値(切込み深さ指令値 $1\mu\text{m}$)より小さな値であることが判明した。図 7-6 に示すように、送り速度が $0.1\mu\text{m/tooth}$ より大きくなると、Z 軸切削抵抗の増大とともに、実加工深さは指令値の $1/5$ 以下になることが分かった。この現象の要因については、次節でさらに検討する。

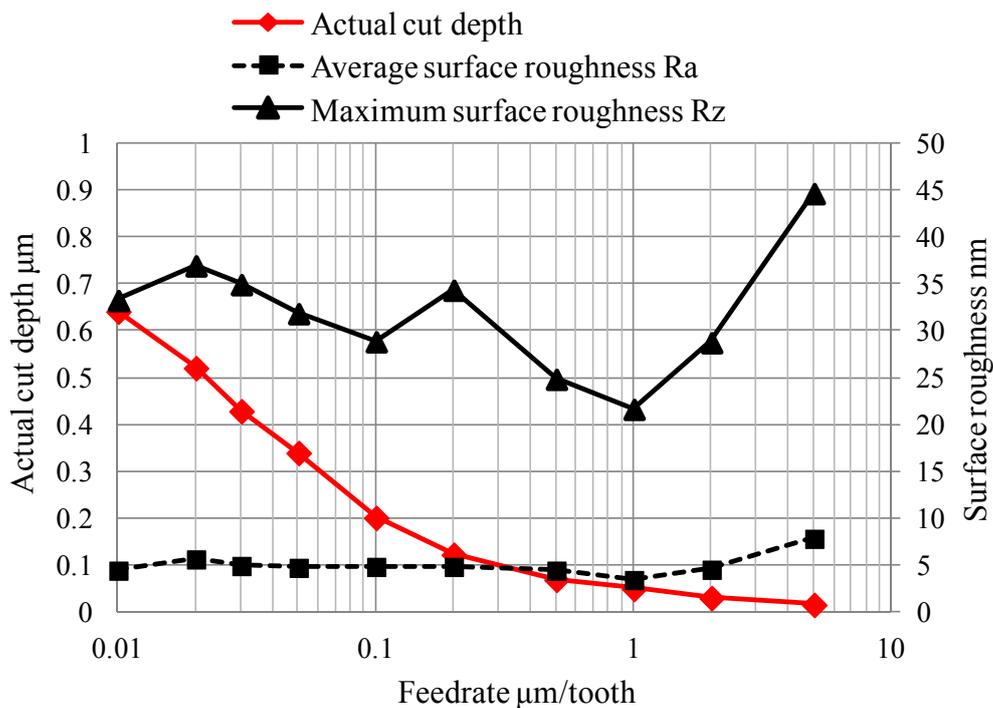


Fig. 7-6 Relation of feedrate, actual cut depth and surface roughness: axial depth of cut of $1\mu\text{m}$

7-3-3 軸方向切込み深さの影響

次に、送り速度を一定にして、軸方向の切込み深さを変化させ、それぞれの条件下で得られる被加工物の面粗さを測定した。その結果を図 7-7 に示す。なお、送り速度は $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$ 一定とした。同図より、切込み深さ指令値 $1.75\mu\text{m}$ までは平均表面粗さ R_a : 約 5nm の延性モード加工面が得られたが、切込み深さ指令値が $2.0\mu\text{m}$ を超えると、図 7-8 の顕微鏡写真に示されるような延性モードと脆性破壊モードが混在する加工面となった。写真左側は延性モード加工面、右側が脆性破壊モード加工面である。また図 7-9 には、切削抵抗の変化も示したが、延性モード加工時には、Z 軸方向の平均切削抵抗は 1.5N 程度を示しているが、脆性破壊モードへと遷移する直前に、一瞬切削抵抗が増大し、脆性破壊モードに入る、その後 Z 軸切削抵抗は、ほぼゼロ N になる。なお、XY 軸方向の切削抵抗成分を見ると、延性モードと脆性破壊モードのいずれにおいても非常に小さく、両加工モードでの違いを判別することができなかった。また今回の実験条件下では切込み深さ指令値 $2\mu\text{m}$ が、延性モードから脆性破壊モードに遷移する境界条件であると判断できた。なお、一つの加工で延性モードと脆性破壊モードが混在している場合には、脆性破壊モードであると判定する。

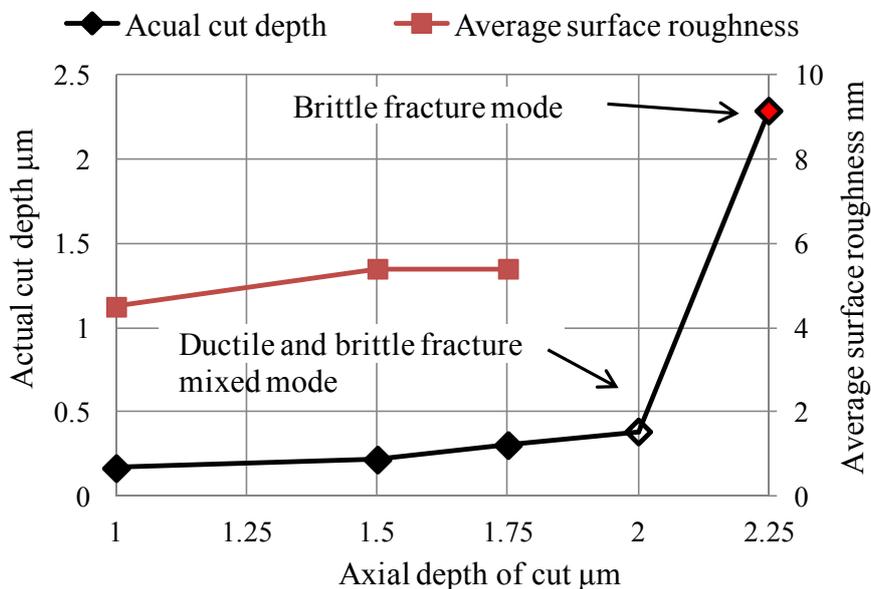


Fig. 7-7 Relation of axial depth of cut, actual cut depth and average surface roughness: feedrate $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$

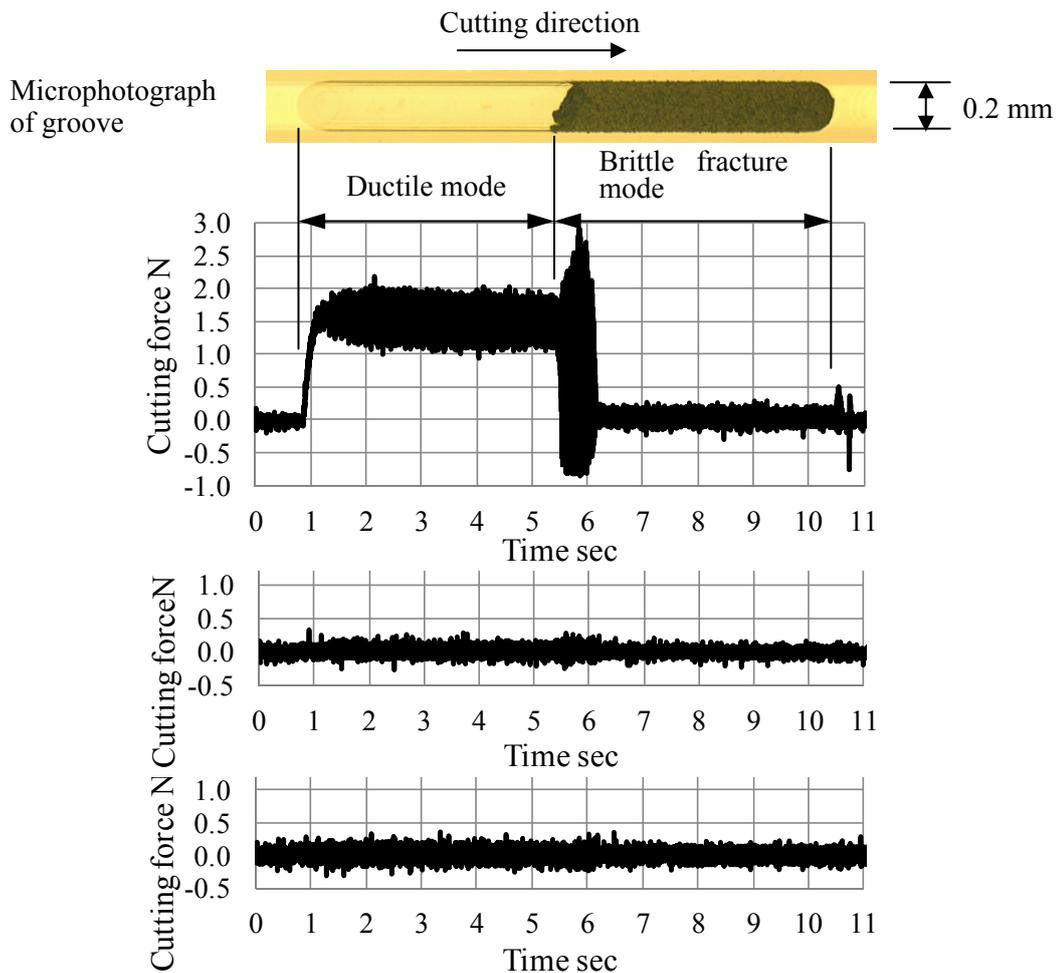
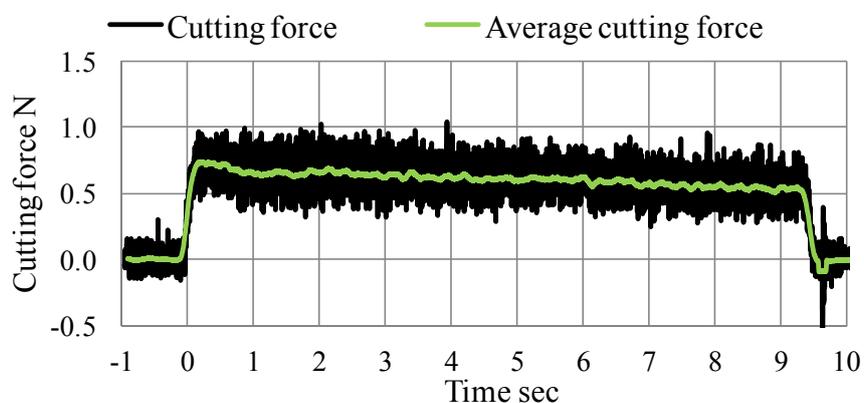


Fig. 7-8 Cutting force and microphotograph: axial depth of cut of 2 μm , feedrate 0.1 $\mu\text{m}/\text{tooth}$

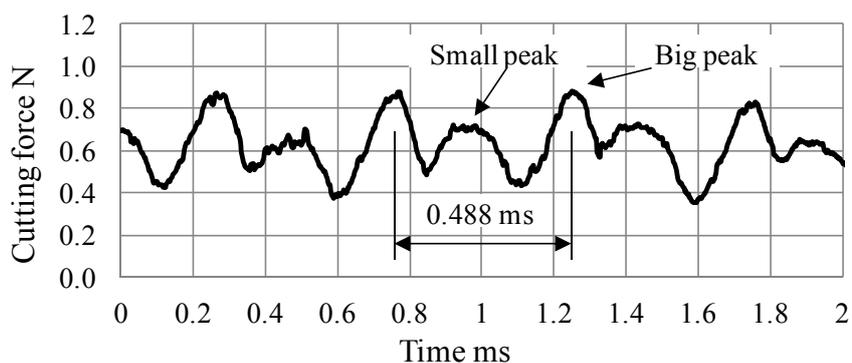
7-3-4 加工中の切削抵抗のモニタリング

延性モード加工中のZ軸方向の切削抵抗波形は、図7-9(a)に示すように、切削抵抗がゼロになることはない。図7-9(b)はこの波形の一部を拡大表示したものであるが、このように切削抵抗は周期的に変化する。主軸の回転数は $123,000\text{min}^{-1}$ であるので、工具一回転の周期は、0.488msであることに注目すれば、一回転中にZ軸方向の切削抵抗は2回変動する。理論的には、一枚刃エンドミルによる溝加工では、工具回転のほぼ半周期が切削を行い、残り半周期はすでに切削した加工面の上を工具切れ刃が通過するため切削抵抗はゼロになる。しかし、今回の実験に用いた機械の主軸のZ軸方向の剛性が完全に無限大ではないために、回転半周期の切削中、切削抵抗により工具が押し上げられ切削された溝の底面は当初設定した面より高くなる。そのため、残りの半周期中も、工具が加工された面を若干切削したり、擦ったりする、いわゆるヒーリング (healing) という現象が起こるため、工具一回転中、切削抵抗は2回ピークを持つと考えられる。この切削抵抗の変動に応じて工具がZ軸方向に持ち上げられるため、図7-10(a)の溝断面形状の測定結果に示されるように溝の断面は中央部が盛り上がった形状となる。図

7-10 (b) には溝断面が中高になることを説明するモデルを示す。工具の切れ刃の位置が 0° の時には、除去量が最も大きくなるため、切削抵抗は最大となり、工具も大きく押し上げられる。 90° と 270° では除去量が最も少なくなり切削抵抗も最小となり工具は切込み深さの指令値に近い深さまで達する、 180° では以前の加工中に工具が押し上げられたために除去されなかった中高の部分再度加工するため、切削抵抗に低いピークが現れる。



(a) Cutting force in whole groove cutting



(b) Cutting force at 5 seconds

Fig. 7-9 Cutting force with ductile mode cutting: axial depth of cut of $1 \mu\text{m}$, feedrate $0.1 \mu\text{m/tooth}$

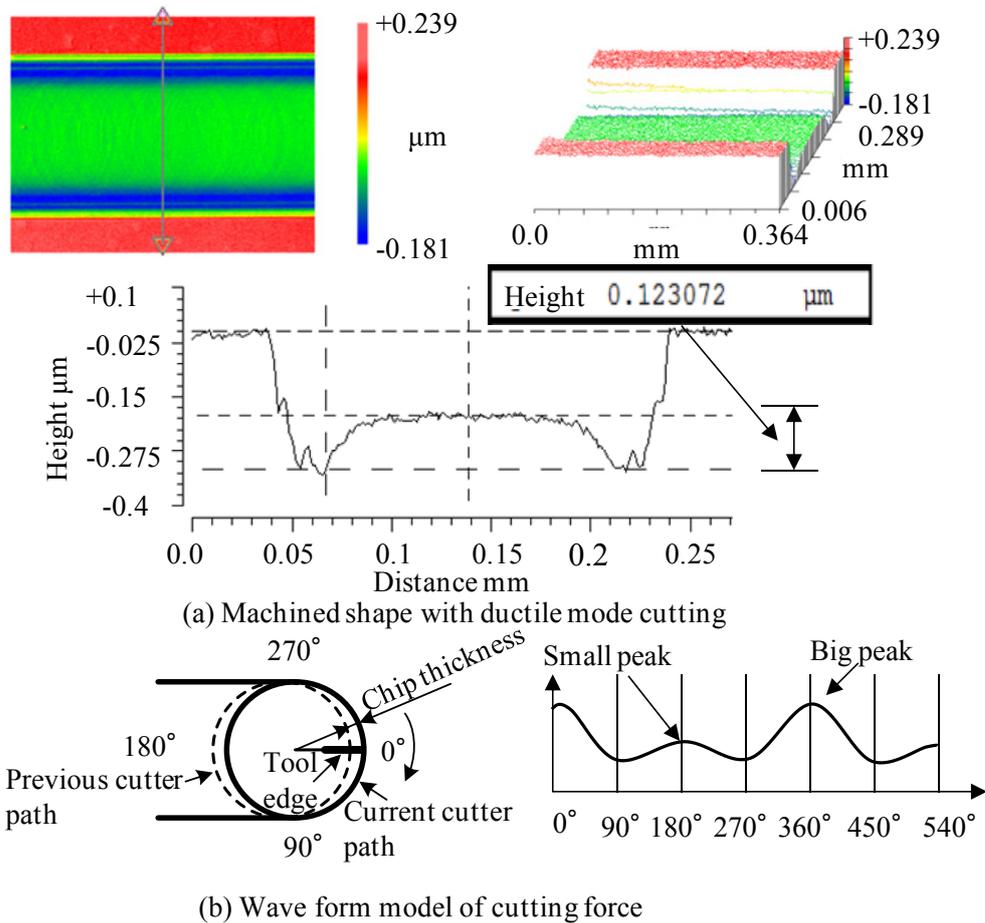


Fig. 7-10 Relation of machined shape and cutting force: axial depth of cut of 1 μm , feedrate 0.1 $\mu\text{m}/\text{tooth}$

7-4 工具と加工表面の相互作用に関する考察

7-4-1 工具底面と加工表面の接触面積に関する考察

基準工具の加工において軸方向の切込み深さを変えることにより延性から脆性破壊モードに遷移することが判明したが、この現象を支配する要因を考察するため、工具底面の面積を変えた工具を製作した。工具が大きく摩耗したことを想定して、図 7-11 に示す基準工具形状の刃先先端から $10\mu\text{m}$ カットし、加工面と工具の接触する面積を大きくした工具を製作した。この工具を平坦刃先工具と称する。この工具を用いて、送り速度 $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$ 一定で、軸方向の切込み深さを変えて加工した結果を図 7-12 に示す。比較のために基準工具の加工で得られた面の結果も同図に示した。延性モードでの最大切込み深さ指令値は、基準工具では $1.75\mu\text{m}$ であるが、平坦刃先工具では $2.75\mu\text{m}$ へと変化した。一方、実切込み深さは、どちらの工具を使用した場合でも、ほぼ $0.3\mu\text{m}$ あった。

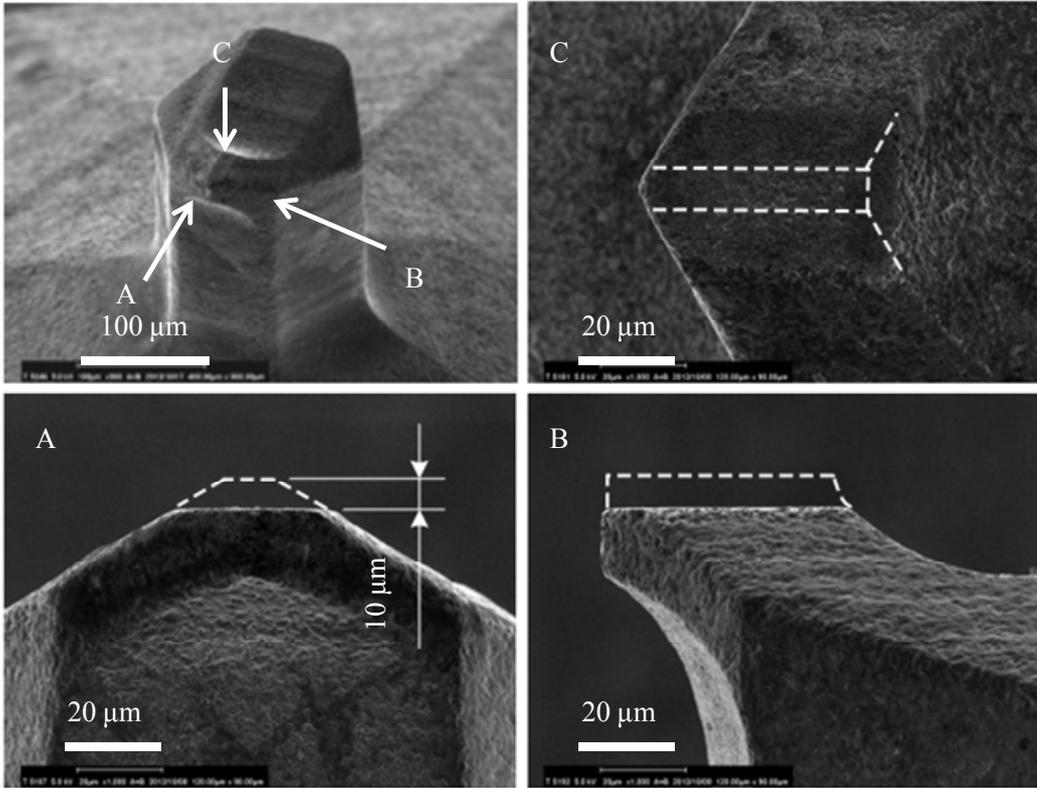


Fig. 7-11 Flattened tool cut off 10 μm at bottom edge

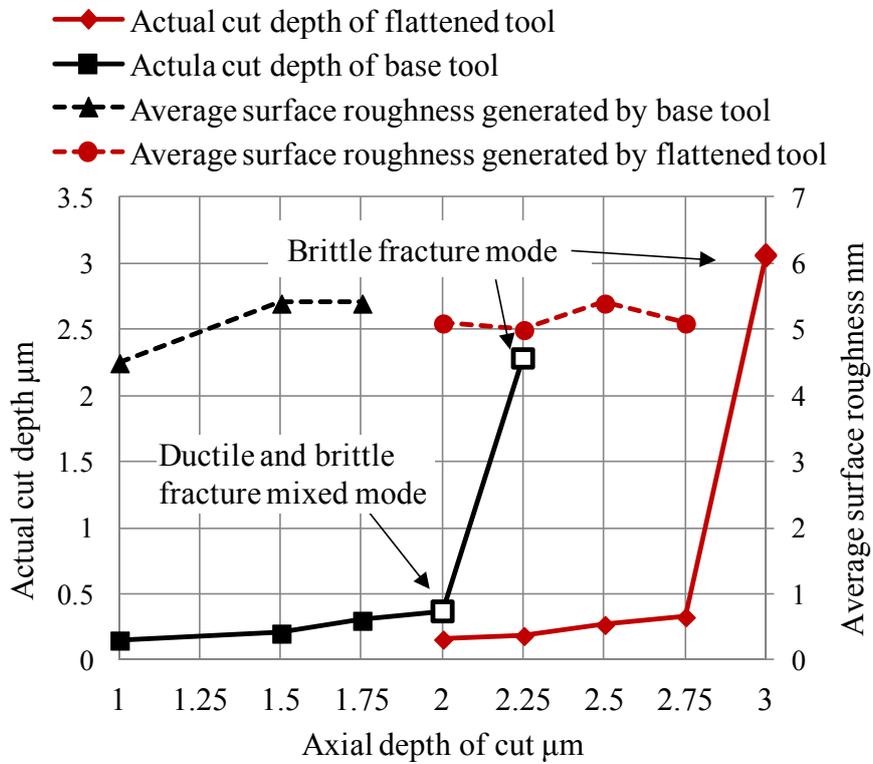


Fig. 7-12 Average cutting force per unit area, average cutting force and axial depth of cut using flattened tool and base tool

7-4-2 工具底面積と切削抵抗の分析

前節で述べたように、工具の底面積を変えることにより、延性から脆性破壊に遷移する切込み深さが大きく変化した。この現象を追求するため、単位接触面積あたりの Z 軸切削抵抗に注目して、延性モード加工と脆性破壊モード加工との関連を考察した。

工具底面の平坦部の面積は図 7-13 の SEM 写真により、基準工具では $4.46 \times 10^{-4} \text{mm}^2$ 、平坦刃先工具では、 $1.85 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ の結果を得た。図 7-14 に実線で基準工具と平坦刃先工具の軸切込み深さと平均切削抵抗の関係を示す。延性モードの最大の軸方向切込み深さ指令値は、基準工具では $1.75 \mu\text{m}$ で、平均切削抵抗は Z 軸 1.1N であり、平坦刃先工具では軸方向切込み深さは $2.75 \mu\text{m}$ で、平均切削抵抗は約 4N であった。図 7-14 に点線でこれらの値を接触単位面積あたりの力に換算した結果を示す。基準工具で、延性モードの最大値は $1.75 \mu\text{m}$ で、 $2.47 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ と計算され、平坦刃先工具では $2.75 \mu\text{m}$ で $2.15 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ となり、ほぼ同じ値となる。この値が、送り速度 $0.1 \mu\text{m/tooth}$ で加工した場合に延性モードで加工できる最大の単位面積あたりの力である。これらの結果をまとめて表 7-5 に示す。

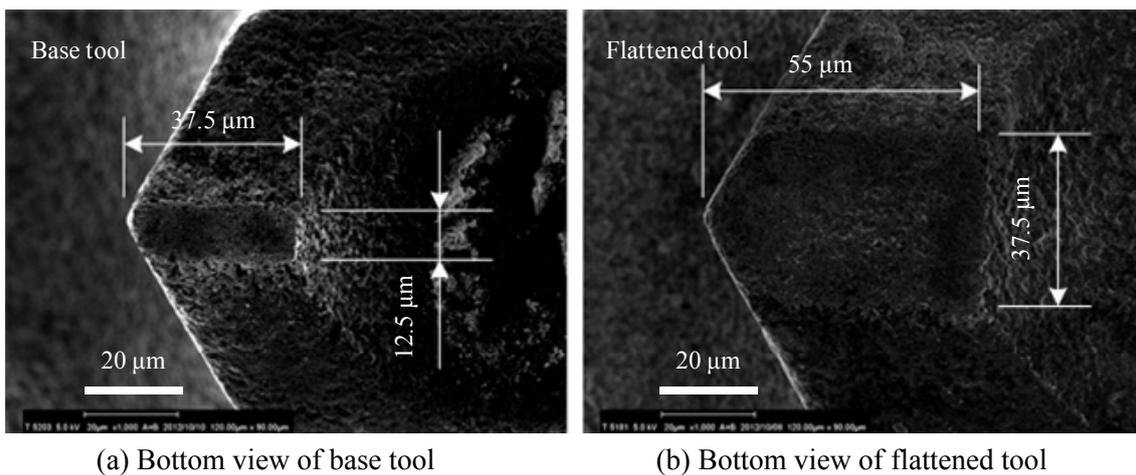


Fig. 7-13 Measurement of bottom area of base tool and flattened tool in contact with workpiece

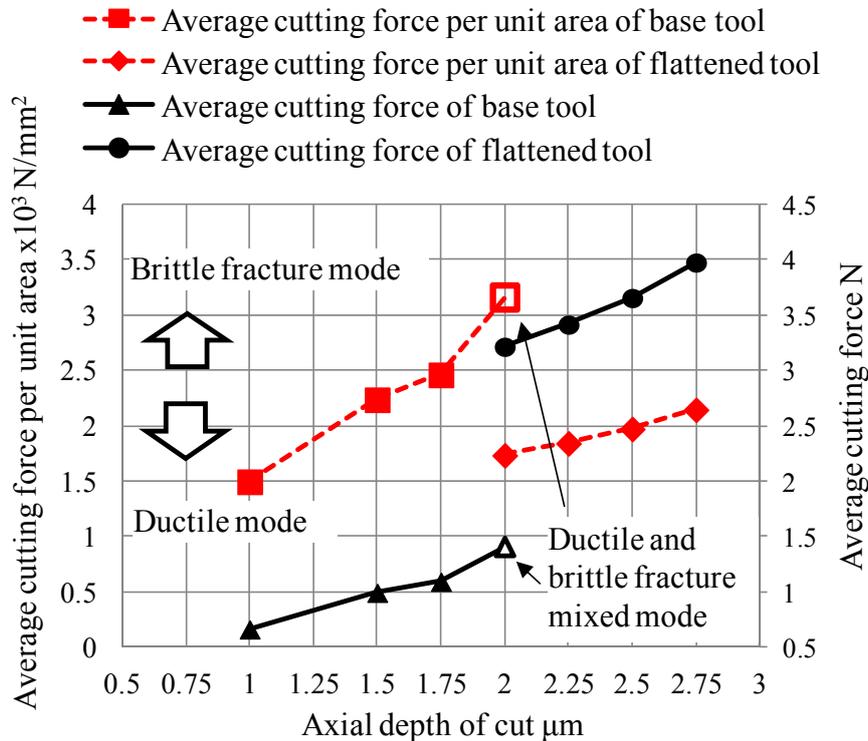


Fig. 7-14 Relation of average cutting force per unit area, average cutting force and axial depth of cut using flattened tool and base tool

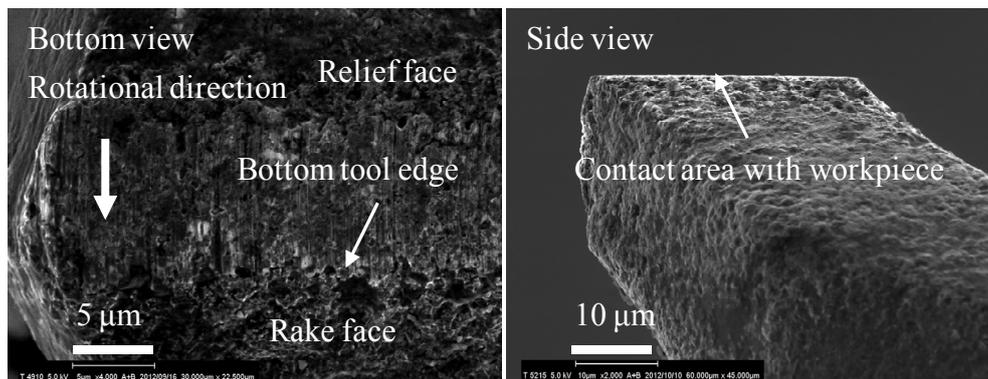
Table 7-5 Comparison of machining properties with flattened tool and base tool

	Base tool	Flattened tool
Maximum axial depth of cut with ductile mode	1.75 μm	2.75 μm
Average cutting force	1.1 N	4 N
Bottom area of tool	4.46x10 ⁻⁴ mm ²	1.85x10 ⁻³ mm ²
Force per unit area of bottom of tool	2.47x10 ³ N/mm ²	2.15x10 ³ N/mm ²

7-4-3 工具表面性状と加工現象との関係

前節より、マイクロPCDエンドミルを用いて石英ガラスを加工する際に、その加工特性に影響を及ぼすのは、工具の底面部分であることがわかった。そこで、加工後の工具の底面部をSEMおよびAFMを用いてより詳細に観察することで、加工現象をさらに掘り下げて考察する。

図 7-15 は、送り速度 0.1μm/tooth, 軸方向切込み深さ 1μm の条件の下、加工に使用した基準工具を、底面 (7-15 (a)) および側面 (7-15 (b)) 方向から観察した結果である。加工中に工具底面部が摩滅することにより、非常に平坦となっている。さらに、底面には、工具の回転方向に沿って、工具と被加工物が接触することで生じたスクラッチ痕が認められる。



(a) Bottom view of base tool

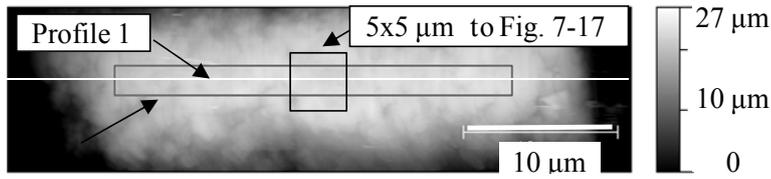
(b) Side view of base tool

Fig. 7-15 SEM images of used end mill with SEM

底面の平坦部分を、AFMを用いてより詳細に分析した結果を図7-16に示す。工具底面の中心部 $32 \times 2 \mu\text{m}$ の領域における平均面粗さ R_a は $0.064 \mu\text{m}$ 、最大面粗さ R_z は $0.586 \mu\text{m}$ であった。さらに、中心部別箇所の $5 \times 5 \mu\text{m}$ の領域をフォーカスした結果を図7-17に示す。工具の回転方向に対して平行な溝と、焼結時に生成されたと推定される空孔が認められる。溝の深さは、概ね $0.1 \mu\text{m}$ 程度あり、峰の部分に粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド粒子の一端があると考えられる。空孔の深さは、約 $0.2 \mu\text{m}$ である。

マイクロPCDエンドミルを用いて石英ガラスを延性モードで加工するためには、上述したダイヤモンド粒子の突出、および焼結時に生成された空孔が大きな役割を果たしていると考えられる。すなわち、実際の加工現象は、工具のエッジ部が切れ刃として作用する切削モデルではなく、工具の底面部に多数存在する微細なダイヤモンド粒子の働きによる研削モデルと考えた方が妥当といえる。例えば、超精密研削によって石英ガラスを鏡面加工する際には、砥石番手 $\#8000 \sim \#20000$ （平均砥粒径 $2 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$ ）を使用する必要があり、その際の、砥粒の突き出し量は概ね $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ といわれている⁶⁷⁻⁶⁸。そのサイズは、AFM観察より得られた工具底面の溝高さと良好に一致している。ここで、工具底面の空孔は、除去された切りくずを効果的に排除するチップポケットの役割を果たすと推察され、この点でも研削モデルが当てはまる。

PCD工具を用いた研削モデルについては、現象をより正確に捉えるための追加実験が必要であると考えられ、使用するダイヤモンド粒のサイズ、含有率、被加工物との相性なども含め、今後も継続的に検討を進める必要がある。



Measurement are of surface roughness 32 x 2 μm

Maximum surface roughness Rz	0.586 μm
Average surface roughness Ra	0.064 μm

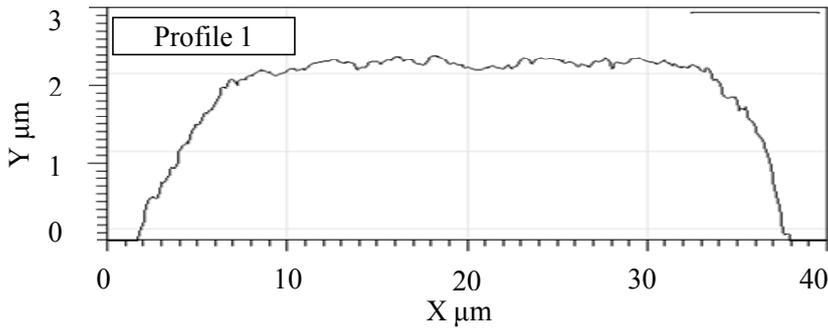
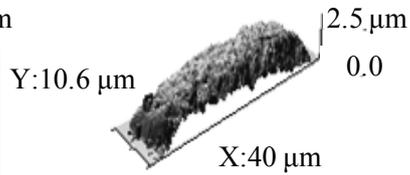
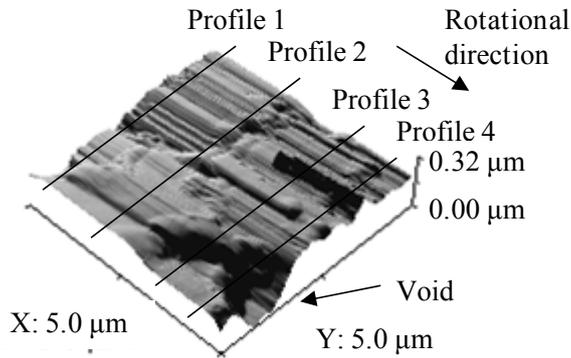
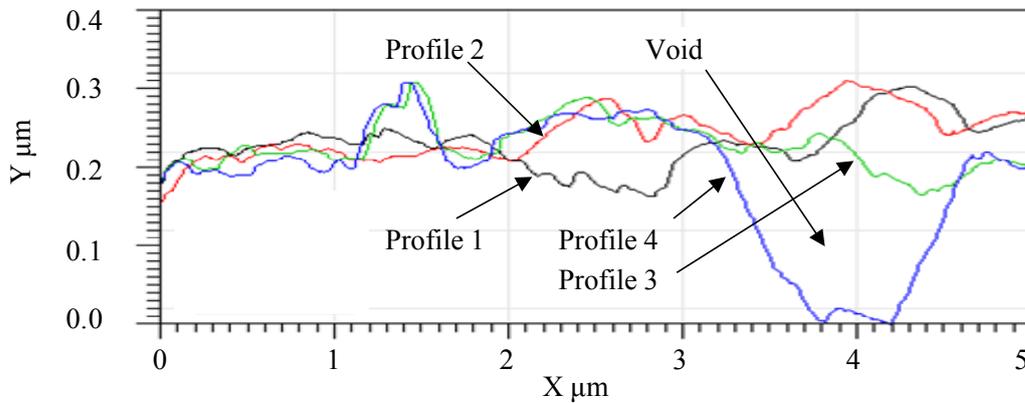


Fig. 7-16 Profile nad surface roughness of the bottom of used tool with AFM



(a) Isometric view at the center of bottom of used tool



(b) Cross section at the center of bottom of used tool

Fig. 7-17 Surface geometry at the center of bottom of used tool 5 x 5 μm

7-5 石英ガラスのマイクロウェルのテスト加工

前章において、マイクロ PCD エンドミルを用いたいわば研削モデルに基づく加工プロセスにより、石英ガラスの高品位加工が可能であるという指針を示した。しかしながら、これまでの実験はすべて単純な溝加工で行っており、本加工プロセスが実際の製品加工へ適用できるか検証する必要がある。そこで、本手法をバイオメディカル用デバイス加工へ適用することを意識し、細胞を培養/観察するためのマイクロウェル（微細容器）の加工を試みた^{38),69)}。

加工対象となるマイクロウェルの形状、および前章までの実験結果に基づいて選定した加工条件を表 7-6 に整理する。マイクロウェルの全体形状および内部底面の面粗さを測定した結果を図 7-18 に示す。ウェル内部底面の平均面粗さ Ra は 10nm の高品位な面性状が得られた。また、全体的に均一に、かつ透明に仕上がっていることから、生細胞の蛍光顕微鏡観察を高解像度で実現できると考えられる。

なお、本テスト加工で仕上げたマイクロウェルのサイズは、直径 0.6mm、深さ 0.1mm であるが、工具形状やカッターパスの工夫により、さらに微細な形状も加工可能である。石英ガラスに対して、このような微細かつ高品位な表面加工を達成することは、他のプロセスでは難しく、マイクロ PCD エンドミルを用いた本手法が極めて有効であると言えよう。今後も引き続き、本手法の加工メカニズム解明および最適加工条件導出のため、より掘り下げた検討を行うとともに、加工対象素材としても石英ガラスのみならず、付加価値の高い他の素材（ MgF_2 、 CaF_2 など）も適用することを視野に入れ、系統的に研究を進めて行く。

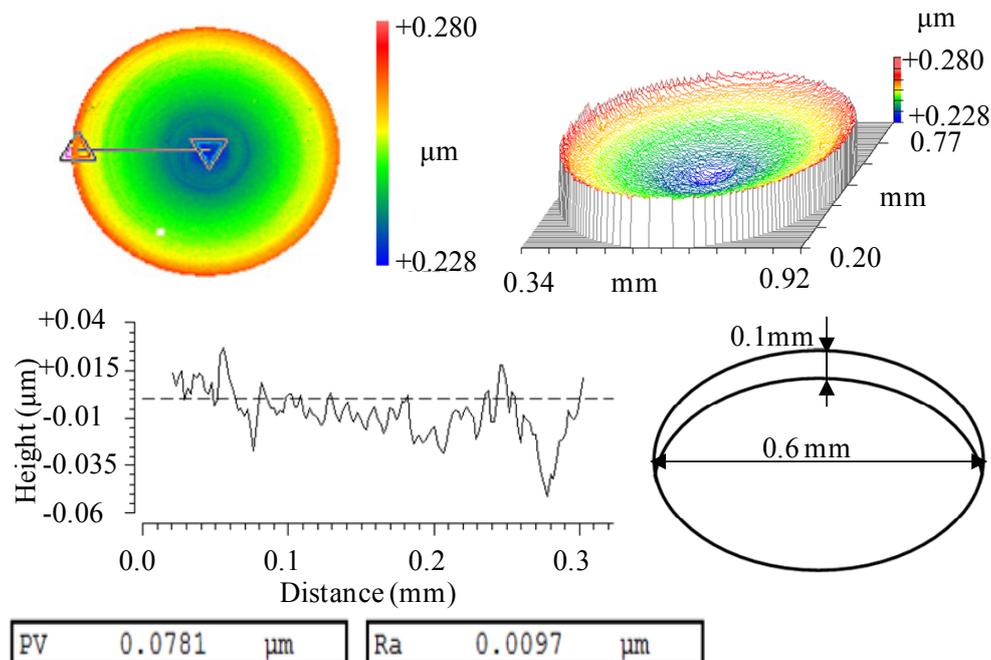


Fig. 7-18 Surface roughness at the bottom of machined micro well

Table 7-6 Cutting conditions and geometry of micro well

Geometry of micro well	Diameter 0.6 mm, depth 0.1mm
Tool	Base tool (R0.1 mm, 1 flute)
Axial depth of cut	0.5 μm
Feedrate	0.1 $\mu\text{m}/\text{tooth}$
Cutting time	10 hours

7-6 結言

本研究では、マイクロ PCD エンドミルで石英ガラスの高品位微細加工を行う際の、加工プロセスを支配する加工条件と加工面や工具の状態を詳細に観察して加工プロセスを解析した。得られた結果を以下に示す。

- (1) マイクロ PCD エンドミルを用いて石英ガラスを加工した結果、平均面粗さ 5nm, 最大面粗さ 40nm の高品位な表面が得られた。
- (2) 軸方向切込み深さ 1 μm では、すべての送り速度において、延性モードで加工できたが、実加工深さは、浅く、送り速度を早くするほど指令値との差が広がった。
- (3) 石英ガラスのマイクロ PCD エンドミル加工で、延性モードの加工面を得るためには、工具主軸(Z 軸)方向の工具接触面積あたりの切削抵抗を特定の値以下に抑制することが重要であることが判明した。
- (4) 本実験で使用した加工機械、工具、被削材(石英ガラス)の場合、工具加工物間の単位接触面積あたりの切削抵抗が、約 2,500N/mm² より小さければ、延性モード加工面が得られる結果を得た。
- (5) 加工後の工具の底面部を詳細に観察した結果、ダイヤモンド粒子の突出および焼結時に生成された空孔が認められた。これらの加工プロセスは工具の底面部に存在する微細なダイヤモンド粒子と空孔による研削プロセスと考えたほうが妥当であると考えられる。
- (6) 本研究で得られた延性モード加工のための知見を用いて、細胞培養マイクロウェル相当のテスト加工を行った結果、ウェル内部底面の平均面粗さ 10nm の高品位な面性状、かつ全体均一な透明加工面が得られた。

第8章 結論

硬脆性材料を高精度、高効率に機械加工するためには、最適な機械加工システム（高精度加工機械，工具を製作する加工機械と CAM ソフトウェア）の開発と基礎的な加工プロセスの研究が必要である。

そこで本研究は，自由曲面を含む微細 3 次元形状を硬脆性材料素材上に，サブミクロンの精度と数十ナノメートルの表面粗さで，高速切削加工する技術の確立を目的とした。本研究は，1) 高速超精密切削加工機械の開発，2) 硬脆性材料加工のためのマイクロ回転工具製作用加工機械の開発，3) マイクロ工具設計製作用 CAM の開発，以上で開発された加工システムを用いて加工が困難といわれている 3 種類（結晶材料，焼結材料，非晶質材料）の硬脆性材料の微細加工を実施し，加工プロセスの解析，評価を行った。以下に，本研究で得られた結果をまとめる。

第 1 章では，この研究の背景として，現在の機械加工システムの問題点を指摘した。微細 3 次元形状を加工するにあたって，現在の加工機の精度と運動特性の両方に問題があることを指摘し，開発の必要性を述べた。硬脆性材料を加工するためにはダイヤモンド工具が最適であり，その中で PCD 工具は放電加工で製作することができ，最適な工具を製作するシステムの必要性を指摘した。PCD 回転工具を使用した硬脆性材料の加工の研究は少なく，基礎的な加工特性の解析，評価が必要であることを指摘した。これらの問題点を解決するための本研究の目的を述べた。

第 2 章では，微細 3 次元形状を硬脆性材料素材上に高精度かつ加工効率良く加工する超精密加工機の開発について述べた。開発するにあたり，多くの要素技術の開発を実施し，それらを統合して超精密加工機を実現した。研究した結果を列記する。

- (1) 機械の基本構造を再検討し，高精度と高加速度と動作に対応するための低重心化，オーバハングの極小化と可動部の軽量化を図った。
- (2) 精度のベースとなるガイドウェイにおいて転動体通過振動の少ない転がり直動案内を開発し，従来比 1/3 以下にした。
- (3) 駆動には AC コアレスリニアモータを採用し，重心位置を駆動し高精度駆動を実現した。
- (4) 高加速度往復動作時に発生する振動を少なくするために，カウンタ動作による制振機構を XY 軸に設置し，基本振動を 1/20 以下に低減することができた。
- (5) 超高速，空気静圧ベアリング，エアータービン駆動主軸を開発した。
- (6) ツーリングシステムに焼きばめを採用し，ホルダを主軸のロータと一体化する方式とし，自動工具交換機構を加工機に組み込んだ。
- (7) 加工機の精度と運動特性を 2 次元スケールで評価し，仕様を満足することを確認した。
- (8) 加工評価を実施し，ナノメートルレベルの面粗さが実現できることを確認した。

第3章では、PCDを用いた微細工具を複雑な形状に製作する同時5軸動作のワイヤ放電加工機を開発し、工具を高精度かつ高効率に製作する方法の研究について述べた。研究した結果を列記する。

- (1) マイクロ PCD 工具製作用の同時5軸動作のワイヤ放電加工機を開発し、高精度な工具が製作できることを確認した。
- (2) 高精度工具を製作する上で確認された問題点を解決するために改良型を開発し、更なる高精度化を実現した。
- (3) 改良型の加工機を使用して、回転を主体とした加工方法を開発し、加工時間を1/5にできることを示した。

第4章では、放電加工機の知識の少ない人でも容易に工具を製作できるように工具製作用ワイヤ放電加工 CAM システムの開発について述べた、研究した結果を列記する。

- (1) 工具タイプ、刃数、すくい角、逃げ角や有効刃長等を入力することにより、ワイヤ放電加工用の NC プログラムを出力できることを確認した。
- (2) 出力された NC プログラムを第3章で開発した工具製作用ワイヤ放電加工機で実行することで、目的とする PCD 工具が高精度に製作できることを確認した。

第5章では、結晶性の硬脆性材料として単結晶シリコンを選択し、単結晶シリコンウェハ上に MRIG 用の半球形状を製作することを目指して、マイクロ PCD ボールエンドミルをワイヤ放電加工機で製作し、その工具を使用して高品質な面性状と形状精度を実現する加工方法の研究について述べた。研究した結果を列記する。

- (1) マイクロ PCD 工具製作システムを使用して4枚刃の PCD ボールエンドミルを製作し、超精密加工機で半球形状に加工した。その結果、適切な加工条件を選択することにより、シリコンウェハ上に半球形状をほぼ全面に渡り延性モードで加工できることが判明した。
- (2) 半球形状の傾斜部の狭い範囲に帯状に脆性破壊部が生成され、その位置から結晶方位と関係していると推定される。
- (3) 延性モードで加工すると工具のエッジ部に付着物が着き、その成分を分析すると SiO_2 であることが判明した。付着物は、強固に付着しているが、水酸化ナトリウム水溶液中の電解により短時間で取り除くことができることが判明した。

第6章では、焼結材料の代表として超微粒子超硬を選択し、マイクロ PCD エンドミルを用いて機械加工する場合の、加工条件、工具の摩耗、および生成される加工面の関係と基礎的な加工プロセスを理解することを目的とした研究について述べた。研究した結果を列記する。

- (1) 放電加工で製作されたマイクロ PCD エンドミルの刃先を成形し、加工した結果軸方向切込み深さと送り速度が一定の範囲において延性モードで加工することができ、平均面粗さ約 5nm, 最大面粗さ約 40nm の面が得られることを確認した。
- (2) 放電加工で製作されたマイクロ PCD エンドミルで加工する場合、高品位の面を得るためには工具刃先を平坦化する処理が必要であることが判明した。
- (3) 軸方向切込み深さと送り速度が一定の範囲を超えると最大面粗さが急激に大き

くなり，その原因は工具により超硬の粒子が掘り起こされて母材から脱落することが原因であると判明した。

- (4) 切削長が長くなり工具の刃先が磨耗し，被削材との接触面積が大きくなった場合でも，加工面の品質が大きく損なわれないことが判明した。
- (5) 加工後，工具の底面を詳細に観察すると，小さなキャビティーと微粒子ダイヤモンドが混在しており，そこに切子が付着しているのが観察され，刃先の磨耗に伴ってこの微小キャビティーに堆積した切り粉が脱落することにより，新しいダイヤモンド粒子とキャビティーが現れるというサイクルが持続することによって安定した除去効果が持続すると結論された。これにより，高品位な加工面を保ちながら，非常に長い距離を加工できる結果が得られた。

第 7 章では，非晶質の硬脆性材料の代表として石英ガラスを選択し，マイクロ PCD エンドミルで石英ガラスの高品位微細加工を行う際の，加工プロセスを支配する加工条件と加工された加工面の関連を解析する研究について述べた。研究した結果を列記する。

- (1) マイクロ PCD エンドミルを用いて石英ガラスを加工した結果，平均面粗さ 5nm，最大面粗さ 40nm の高品位な表面が得られた。延性モードでの加工では，Z 軸方向切込み深さ指令値と実加工深さの差は非常に大きく，送り速度を早くするほど指令値との差が広がった。
- (2) 石英ガラスのマイクロエンドミル加工で，延性モードの滑らかな加工面を得るためには，工具主軸（Z 軸）方向の工具接触面積あたりの切削抵抗を特定の値以下に抑制することが重要であることが判明した。
- (3) 加工後の工具の底面部を観察した結果，ダイヤモンド粒子の突出および焼結時に生成された空孔が認められ，加工プロセスは工具の底面部に多数存在する微細なダイヤモンド粒子の突起と焼結時に生成された空孔による研削プロセスと考えたほうが妥当であると考えられる。
- (4) 本研究で得られた延性モード加工のための知見に基づいて，細胞培養マイクロウエルのテスト加工を行った結果，ウェル内部底面の平均面粗さ 10nm の高品位な面性状，かつ全体が均一な透明加工面が得られた。

以上を踏まえて今後の展望を述べる。

本研究で，微細 3 次元形状を硬脆性素材上に加工する加工システムを構築できたが，マイクロ PCD エンドミルを使用した硬脆性材料の加工の研究は，始まったばかりであり，基礎的な加工特性の評価の段階にある。今後，高品質で高効率な加工を実現して行くには，詳しい加工プロセスの解析，工具形状や材料の最適化が必要であり，そのような加工の知見を蓄積することによりマイクロ PCD エンドミルによる硬脆性材料の加工が広く普及して行くと確信している。

謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科在学中に、青山藤詞郎教授のご指導のもとで行われたものであり、同教授より賜ったご指導とご鞭撻に対して厚く御礼申し上げます。

ご多忙の中に貴重な時間をさかれて本論文をご査読され、有益なご助言を賜れた、慶応義塾大学大学院理工学部総合デザイン工学専攻 システム統合工学専修 青山英樹教授、閻 紀旺教授、開放環境科学専攻 環境・資源・エネルギー科学専修 鈴木哲也教授に厚く御礼申し上げます。

本研究に対して有益なご助言を頂いた、Professor Kazuo Yamazaki, University of California Davis, (独) 理化学研究所 片平和俊博士に謹んで感謝の意を表します。

さらに、本研究に対して多大なご協力を頂いた、株式会社ソディック、住友電工ハードメタル株式会社、日進工具株式会社に深く感謝致します。

参考文献

- 1) S. R. Patterson, "Inspection of the Large Optics Diamond Turning Machine", *66th Meeting of the IMOG*, (1987).
- 2) E. R. McClure, "LLNLにおける超精密加工研究およびダイヤモンド切削加工機械の開発状況", 日本興業技術振興協会超精密技術部会, (1984.11.30).
- 3) 超精密加工機の変遷, 工作機械'84・超精密加工, Vol. 15, (1984), 大河出版.
- 4) 谷口紀男, 超精密加工とその応用 ―超微細加工との関連において―, 日本時計学会誌, Vol. 106, (1983).
- 5) 田野誠, 高偉, 水戸正美, 清野慧, "小型ファストツールサーボの製作と評価", 日本機械学会第4回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2002), pp. 149-150.
- 6) 高橋一郎, 安齋正博, 中川威雄, "往復送りカッタパスを用いる超高速ミーリング機の開発", 精密工学会誌, Vol. 65, No. 5 (1999), pp. 714-718.
- 7) 松岡甫篁, 安齋正博, 高速ミーリングの基礎と実践, (2006), pp. 13-18, 日刊工業新聞.
- 8) 安齋正博, 高橋一郎, "高速切削とcBN工具cBNボールエンドミルによる焼き入れ鋼の高速ミーリング", 砥粒加工学会誌, Vol. 47, No. 1 (2003), pp. 16-19.
- 9) マイクロダイヤモンド株式会社, "製品情報", http://www.micro-dia.com/seihin_01.html (参照日 2012年12月26日).
- 10) 沖田康彦, 久木野暁, 深谷明弘, "DA1000の開発", SEIテクニカルレビュー, 第172号 (2008.1), pp. 96-99
- 11) K. Harano, T. Satoh, H. Sumiya, A. Kukino, "Cutting performance of Nano-Polycrystalline Diamond", *SEI Technical Review*, No. 71 (2010), pp. 98-103.
- 12) 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均, "ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 768-776.
- 13) 久保明彦, 餅田恭志, 田牧純一, 原野佳津子, 角谷均, シャリフ ウラ, "超硬合金切削における各種ダイヤモンドバイトの摩耗特性", 砥粒加工学会誌, Vol. 55, No. 10 (2011), pp. 593-600.
- 14) 金子雄二, 豊永竜生, 貞光大介, 正田和男, 鈴木清, 関洋子, 植松哲太郎, "PCDのワイヤ放電加工条件", 精密工学会大会学術講演会講演論文集, (1998), pp. 330.
- 15) 和田紀彦, 正木健, "マイクロ放電加工を用いたマイクロPCD工具の製作との加工例 (特集 マイクロ加工用工具の最先端技術)", 砥粒加工学会誌, Vol. 45, No. 10

- (2005), pp. 546-549.
- 16) 南久, 渡邊幸司, 増井清徳, 鍋倉伸嘉, “放電加工による焼結ダイヤモンド工具の成形加工”, 電気加工学会, Vol. 44, No. 105 (2010), pp. 17-24.
 - 17) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, N. Kinoshita, “Wire electro-discharge grinding for micro-machining”, *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 1 (1985), pp. 431-434.
 - 18) C. J. Morgan, R. R. Vallance, E. R. Marsh, “Micro Machining Glass with Polycrystalline Diamond Tools Shaped by Micro Electro Discharge Machining”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, (2004), pp. 1687-1692.
 - 19) Z. Zhang, H. Peng, J. Yan, “Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 65, (2013), pp. 99-106.
 - 20) 呉東権, 森田昇, 吉田嘉太郎, “単結晶シリコンの切削加工に関する研究”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 557, (1993), pp. 283-288.
 - 21) 閻紀旺, 庄司克雄, 鈴木浩文, 厨川常元, “ダイヤモンド平バイトを用いた単結晶 Si の延性モード切削”, 精密工学会誌, Vol. 64, No. 9 (1998), pp. 1345.
 - 22) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介, “超硬合金の切削に関する研究 ; 旋削における PCD 工具の摩耗機構と切削抵抗”, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 12 (2003), pp. 1724-1728.
 - 23) 小倉一郎, 岡崎祐一, “シングルポイントダイヤモンド旋削による光学ガラスの延性モード切削加工に関する研究”, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 9 (2000), pp. 1431.
 - 24) Y. Takeuchi, K. Sawada, T. Sate, “Ultraprecision 3D micromachining of Glass”, *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 1 (1996), pp. 401-404.
 - 25) T. Matsumura, T. Ono, “Cutting process of glass with inclined ball end mill”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 200, (2008), pp. 356-363.
 - 26) 安田信仁, 青山藤詞郎, 柿沼康弘, 松村隆, “マイクロエンドミルによるガラスの 3次元微細切削加工に関する研究”, 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2006), pp. 25-26.
 - 27) 渡邊大記, “硬脆性材料加工に対応する単結晶ダイヤモンド工具「アキュドリル」 「アキュエンドミル」(特集1 小径穴, 微細形状の効率的加工技術) -- (小径穴, 微細形状効率加工のための切削工具)”, 機械と工具, Vol. 49, No. 3 (2005), pp. 34-36.
 - 28) H. Suzuki, T. Moriwaki, Y. Yamamoto, Y. Goto, “Precision Cutting of Aspherical Ceramic Molds with Micro PCD Milling Tool”, *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1 (2007),

pp. 131–134.

- 29) J. Yan, K. Uchida, N. Yoshihara, T. Kuriyagawa, “Fabrication of micro end mills by wire EDM and some micro cutting tests”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, (2009) 025004, pp. 1-9.
- 30) Z. Zhang, H. Peng, J. Yan, “Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 65 (2013), pp. 99-106.
- 31) 久保明彦, 餅田恭志, 田牧純一, 原野佳津子, 角谷均, シヤリフ ウラ, “超硬合金切削における各種ダイヤモンドバイトの摩耗特性”, 砥粒加工学会誌, Vol. 55, No. 10 (2011), pp. 593-600.
- 32) J. Yan, K. Uchida, N. Yoshihara, T. Kuriyagawa, “Fabrication of micro end mills by wire EDM and some micro cutting tests”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, (2009) 025004, pp. 1-9.
- 33) 呉東権, 森田昇, 吉田嘉太郎, “単結晶シリコンの切削加工に関する研究 (第1報, 延性-脆性遷移に伴う加工表面性状の変化)”, 日本機械学会論文集, Vol. C59, No. 557 (1993), pp. 283-288.
- 34) 市田良夫, ペン フレジ ナビル, ユセフィ レザ, “単結晶シリコンの延性モード鏡面切削 (第1報)”, 精密工学会誌, Vol. 64, No.47 (1998), pp. 608.
- 35) 閻紀旺, 庄司克雄, 厨川常元, “大きな負のすくい角工具による延性・ぜい性遷移”, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7 (2000), pp. 1345.
- 36) 八高隆雄, 長谷川正, “超硬合金における放電加工条件と表面微小クラック深さとの関連性”, 日本機械学会誌論文集 (C編), Vol. 61, No. 583 (1995-3), pp. 456-461.
- 37) 松村隆, 大野威徳, “硬脆材料のエンドミル加工”, 日本機械学会2004年度年次大会論文集, (2004), pp. 325-326.
- 38) Y. Sakai, S. Yoshida, Y. Yoshiura, R. Mori, T. Tamura, K. Yahiro, H. Mori, Y. Kanemura, M. Yamasaki, K. Nakazawa, “Effect of microwell chip structure on cell microsphere production of various animal cells”, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 110, No. 2 (2010), pp. 223.
- 39) 株式会社ソディック エフ・ティEMG事業部, “技術案内エンジニアリングセラミックス 材料特性表”, <http://www.sodick-emg.co.jp/eng.ceramics.pdf> (参照日 2012年12月26日).
- 40) 日本精工株式会社, “積機製品・技術レポート: 最近のNSKリニアガイドの技術動向”, http://www.jp.nsk.com/services/pm_techreport/report46.html (参照日 2012年12月26日).

- 41) 山本暁洋, 宮河秀和, 浜松弘, 後藤聡, 中村政俊, “コギングの制御によるリニアモータの高精度位置決め制御”, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, D&D, (2001), pp. 144.
- 42) X. Cheng, K. Nakamoto, M Sugai, S. Matsumoto, Z. G. Wang, K. Yamazaki, “Development of Ultra-precision Machining System with Unique Wire EDM Tool Fabrication System for Micro/nano-machining”, *Annals of the CIRP*, Vol. 57, No. 1 (2008), pp. 415–420.
- 43) 松岡甫篁, 安齋正博, 高速ミーリングの基礎と実践, (2006), pp. 86-116, 日刊工業新聞.
- 44) 松岡甫篁, 藤原和徳, 杉田良雄, “焼きばめ保持具の最新動向”, 第5回生産加工・工作機械部門講演論文集, (2004.11).
- 45) 藤原和徳, 佐野正明, 勝又信行, 長谷川均, “焼きばめ誘導加熱方式による加熱—冷却が及ぼす保持具の寿命検証”, 型技術者会議2004講演論文集, (2004.6).
- 46) 株式会社ソディック, “ワイヤ放電加工機のテーパ角度”, http://www.sodick.co.jp/product/tool/wedm/ag400l_ag600l.html. (参照日 2012年12月26日).
- 47) P. Fonda, K. Katahira, Y. Kobayashi, K. Yamazaki, “WEDM condition parameter optimization for PCD microtool geometry fabrication process and quality improvement”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 9-12 (2012), pp. 1011-1019.
- 48) M. L. Chan, P. Fonda, C. Reyes, J. Xie, H. Najar, L. Lin, K. Yamazaki, D. A. Horsley, “Micromachining 3D hemispherical features in silicon via micro-EDM”, *IEEE 25th International Conference on MEMS*, (2012), pp. 289-292.
- 49) M. Arif, M. Rahman, Y. S. Wong, “An experimental investigation into micro ball end-milling of silicon”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, (2012), pp. 52-61.
- 50) DARPA, ”Microfabrication methods to help navigate a day without GPS”, <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2012/09/20.aspx>, (参照日 2012年12月26日).
- 51) 宇野義幸, 岡田晃, 中西洋人, 岡本康寛, “単結晶シリコンに関する基礎的研究”, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 10 (1997), pp. 1459-1463.
- 52) K. Suzuki, A. Sharma, S. Sano, M. Iwai, T. Uematsu, “A new application of PCD as a very low wear electrode material for EDM”, *Key Engineering Materials*, Vol. 291-292, (2005), pp. 549-554.

- 53) 中村格芳, 後藤崇之, 李木経孝, “単結晶シリコンの超精密加工におけるクラックの発生に及ぼす結晶方向の影響”, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 12 (2003), pp. 1754.
- 54) 柴田隆行, 鈴木章弘, 牧野英司, “単結晶シリコン超精密切削における延性/ぜい性遷移機構”, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 10 (1999), pp. 1512-1516.
- 55) 柴田隆行, 藤井茂, 小野敦, 牧野英司, “単結晶シリコン超精密切削の微視的構造”, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 7 (1999), pp. 992-996.
- 56) M. Arif, M. Rahman, Y. S. Wong, “An experimental investigation into micro ball end-milling of silicon”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, (2012), pp. 52-61.
- 57) J. Yan, T. Asami, H. Harada, T. Kuriyagawa, “Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining”, *Precision Engineering*, Vol. 33, (2009), pp. 378-386.
- 58) K. Kaneko, “Determination of Pore Size and Pore Size Distribution”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 96, (1994), pp. 59-89.
- 59) J. W. Kim, Y. D. Lee, H. G. Lee, “Decomposition of Na_2CO_3 by Interaction with SiO_2 in Mold Flux of Steel Continuous Casting”, *ISIJ International*, Vol. 41, No. 2 (2001), pp. 116-123.
- 60) K. Katahira, K. Nakamoto, P. Fonda, H. Ohmori, K. Yamazaki, “A novel technique for reconditioning polycrystalline diamond tool surfaces applied for silicon micromachining”, *Annals of the CIRP*, Vol. 60, No. 1 (2012), pp. 591-594.
- 61) N. H. Hansen, J. R. Hocken, G. Tosello, “Replication of Micro and NanoGeometries”, *Annals of the CIRP*, Vol. 60, No. 2 (2011), pp. 695-714.
- 62) D. Dornfeld, S. Min, Y. Takeuchi, “Recent Advances in Mechanical Microengineering”, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 2 (2006), pp. 745-768.
- 63) 大久保博行, 樫村誠一, “石英ガラスの高精度微細加工技術およびその応用”, 日立電線, Vol.25, (2005.1.1), pp. 11-16.
- 64) 森俊道, 岡崎祐一, 阿部勝幸, “ダイヤモンド工具によるマイクロ流路の延性モード加工”, 東京都立産業技術研究所報告, Vol. 7, (2004), pp. 9-12.
- 65) Corning Incorporated, “HPFS Fused Silica Standard Grade”, <http://www.corning.com/assets/0/965/989/1081/4A3CF573-9901-4848-9E8F-C3BA500EA7B5.pdf> (参照日 2012年12月26日).
- 66) T. G. Bifano, T. A. Dow, R. O. Scattergood, “Ductile-Regime Grinding: A New

Technology for Machining Brittle Materials”, *Transactions of the ASME*, Vol. 5, No. 113 (1991), pp. 184.

- 67) K. Katahira, H. Ohmori, Y. Uehara, M. Azumi, “ELID grinding characteristic and surface modifying effects of aluminum nitride (AlN) ceramics”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, (2005), pp. 891.
- 68) H. Ohmori, K. Katahira, T. Naruse, Y. Uehara, A. Nakao, M. Mizutani, “Microscopic Grinding Effects on Fabrication of Ultra-fine Micro Tools”, *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1 (2007), pp. 569.
- 69) Y. Sakai, S. Yoshida, K. Nakazawa, “Embryoid body culture of mouse embryonic stem cells using microwell and micropatterned chips”, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 111, No. 1 (2011), pp. 85.

関連論文

1. 原著論文

- (1) K. Nakamoto, T. Aoyama, K. Katahira, P. Fonda, K. Yamazaki, “A Study of Nanometric Surface Generation on Tungsten Carbide Using a Micro Polycrystalline Diamond End Mill”, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 6, No. 4 (2012), pp. 547-553.
- (2) 中元一雄, 片平和俊, 山崎和雄, 青山藤詞郎, “PCDマイクロ回転工具による石英ガラスの加工特性に関する研究”, 砥粒加工学会誌 (掲載決定).
- (3) K. Nakamoto, K. Katahira, H. Ohmori, K. Yamazaki, T. Aoyama, “A study on the quality of micro-machined surfaces on tungsten carbide generated by PCD micro end-milling”, *Annals of the CIRP*, Vol. 61, No. 1 (2012), pp. 567–570.

2. 国際会議

- (1) K. Nakamoto, T. Aoyama, Z. Wang, X. Cheng, W. Zhu, K. Yamazaki, “Study on Nano Metric Surface Finish Generation in Micromachining of Hard and Brittle Materials”, *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Nagarakawa, Japan*, Vol. 2 (2010), pp. 109-112.
- (2) X. Cheng, K. Nakamoto, T. Aoyama, K. Yamazaki, ”Study on the Ductile-mode Micro/nano Machining for Crack-free Top Edge of the Single Crystal Silicon by Custom Micro PCD Tooling”, *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Nagarakawa, Japan*, Vol. 1 (2010), pp. 95-98.

3. その他論文

- (1) K. Katahira, K. Nakamoto, P. Fonda, H. Ohmori, K. Yamazaki, “A novel technique for reconditioning polycrystalline diamond tool surfaces applied for silicon micromachining”, *Annals of the CIRP*, Vol. 60, No. 1 (2012), pp. 591–594.
- (2) Z.G. Wang, X.Cheng, K.Nakamoto, S.Kobayashi, K.Yamazaki, “Design and development of a precision machine tool using counter motion mechanisms”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, (2010), pp. 357–365.
- (3) Xiang Cheng, Zhigang Wang, Kazuo Nakamoto, Kazuo Yamazaki, “Design and development of PCD micro straight edge end mills for micro/nano machining of hard and brittle materials PCD Tooling”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 11 (2010), pp. 2261–2268.
- (4) X. Cheng, K. Nakamoto, M. Sugai, S. Matsumoto, Z.G. Wang, K. Yamazaki, “Development of ultra-precision machining system with unique wire EDM tool fabrication system for micro/nano-machining”, *Annals of the CIRP*, Vol. 57, No. 1 (2008), pp. 415–420.

- (5) P. Sriyotha, K. Nakamoto, M. Sugai, K. Yamazaki, “Development of 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine”, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1 (2006), pp. 381–384.

4. 国内学会発表

- (1) 中元一雄, 片平和俊, 山崎和雄, 青山藤詞郎, “PCDマイクロエンドミルによる石英ガラスの高品位加工の研究”, 精密工学会春季大会学術講演会 2013 東京、(発表予定).
- (2) 中元一雄, 桶谷三雄, 松本真一, 吉原和彦, “制振機構を持つ高加速度・高精度リニアモータ駆動加工機の開発”, 日本機械学会 埼玉ブロック大会講演論文集, No. 1 (2005), pp. 51-52.
- (3) 岩部洋育, 遠藤尚, 中元一雄, “小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工における工具摩耗と仕上げ面粗さに関する研究”, 日本機械学会年次講演論文集, No. 42 (2005), pp. 357-358.

5. その他

- (1) 中元一雄, 安齋正博, 松本真一, “制振機構をもつ高加速度・高精度リニアモータ駆動加工機の開発”, 精密工学会誌(技術賞業績解説), Vol. 74, No. 6 (2008), pp. 543-546.
- (2) 中元一雄, “セラミックスエアースライドを用いたリニアモータ駆動超精密加工機”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 4 (2006), pp. 427-430.