

博 士 論 文

微細精密加工用ダイヤモンド工具の  
開発と応用に関する研究

2015 年 9 月

高 野 登



# 目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	5
1.3 本論文の構成	7
参考文献	9
第 2 章 ダイヤモンドアレイ工具の開発	11
2.1 緒 言	11
2.2 ダイヤモンドアレイ工具の提案	12
2.2.1 ダイヤモンドアレイ工具の作製プロセス	12
2.2.2 単結晶シリコンの異方性エッチング	13
2.2.3 エッチングマスクパターンの作製	15
2.2.4 異方性エッチングによるシリコンモールドの作製	17
2.2.5 熱フィラメント CVD 法による多結晶ダイヤモンド膜の形成	21
2.3 種々のダイヤモンドアレイ工具の作製	25
2.3.1 異なるマスクパターンによるアレイ工具の大きさと配列の制御	25
2.3.2 異なるウェハ面方位によるアレイ工具形状の制御	25
2.3.3 等方性エッチングによる形状の制御	27
2.3.4 切れ刃の先鋭化	27
2.3.5 切れ刃の微細化	28
2.4 結 言	30
参考文献	31
第 3 章 ダイヤモンドアレイ工具の性能評価	33
3.1 緒 言	33
3.2 工具性能評価装置の作製	34
3.2.1 評価装置の設計指針	34
3.2.2 工具性能評価装置の構成	34
3.2.3 押込み荷重測定用板バネの設計と校正	36
3.2.4 引っかき荷重測定用板バネの設計と校正	37
3.2.5 ギャップセンサの校正	38
3.3 押込み加工実験	39

3.4 引っかけ加工実験 .....	42
3.4.1 加工方向の検討 .....	42
3.4.2 複数の切れ刃による引っかけ加工面の評価 .....	44
3.5 結 言 .....	47
参考文献 .....	48

## 第 4 章 1 立方インチサイズ超小型フライス盤と微細加工用回転工具の開発 .....

4.1 緒 言 .....	49
4.2 ナノフライス盤の開発 .....	51
4.2.1 ナノフライス盤の仕様 .....	51
4.2.2 ステージの構造解析 .....	53
4.2.3 X ステージの構造 .....	55
4.2.4 Y ステージの構造 .....	55
4.2.5 Z ステージの構造 .....	56
4.2.6 ナノフライス盤の試作 .....	57
4.3 ナノフライス盤制御システムの開発 .....	58
4.3.1 ナノフライス盤制御システムの構成 .....	58
4.3.2 主軸モータの制御 .....	59
4.3.3 ピエゾ素子の制御 .....	60
4.3.4 パソコンによる NC 制御 .....	61
4.3.5 ステージの送り速度の設定 .....	62
4.3.6 変位量データの取り込み .....	64
4.4 ステージの性能評価 .....	65
4.4.1 ステージの応答性 .....	65
4.4.2 ステージ変位誤差の補償 .....	68
4.5 ダイヤモンドアレイ工具による加工実験 .....	71
4.6 微細加工用回転工具の開発 .....	73
4.6.1 微細加工用回転工具の作製 .....	73
4.6.2 微細加工用回転工具の評価 .....	74
4.7 微細加工用回転工具の高精度化 .....	78
4.7.1 工具取り付け装置と高精度微細加工用回転工具の作製 .....	78
4.7.2 高精度微細加工用回転工具の評価 .....	81
4.8 結 言 .....	83
参考文献 .....	86



<b>第 5 章 FIB により先鋭化した加工用 AFM カンチレバーを用いた微細 V 溝加工</b>	87
5.1 緒 言	87
5.2 実験方法	89
5.2.1 FIB による加工用 AFM カンチレバー切れ刃の加工	89
5.2.2 溝加工実験装置および実験条件	91
5.3 AFM を用いた加工実験	93
5.3.1 先端角の影響	93
5.3.2 すくい角の影響	95
5.3.3 横すくい角の影響	97
5.4 結 言	99
参考文献	100
<b>第 6 章 加工用 AFM カンチレバーを用いた高能率微細加工</b>	103
6.1 緒 言	103
6.2 加工用 AFM 多刃カンチレバーの作製と評価	104
6.2.1 加工用 AFM 多刃カンチレバーの作製	104
6.2.2 引き切り加工実験	107
6.3 加工用 AFM マルチカンチレバーの作製と評価	110
6.3.1 加工用 AFM マルチカンチレバーの作製	110
6.3.2 各レバーの加工特性評価実験	112
6.3.3 マルチカンチレバーによる重畳加工実験	115
6.4 結 言	118
参考文献	119
<b>第 7 章 結 論</b>	121
7.1 本研究の成果と結論	121
7.2 今後の展望	126
<b>本論文の関連研究論文および国際会議プロシーディング</b>	129
<b>謝 辞</b>	131



# 第1章 緒 論

## 1.1 研究の背景

原子や分子のレベルの極微の空間で、物質の構造を制御して活用する「ナノテクノロジー」に関する研究は、クリントン元大統領が 2000 年初めに打ち出した NNI (National Nano-technology Initiative) 構想をきっかけに全世界で取り組まれている。この NNI 構想の大目標の1つとして「ナノテクノロジーによって、連邦議会図書館のあらゆる情報を角砂糖ほどの大きさのデバイスに収める技術を探る」を掲げ、夢の実現に向けた期待を全米に広げた。その他、強度は鉄の 10 倍ながら軽さは 10 分の 1 という新素材、現在の数百倍もの計算能力を有するコンピュータ、あるいはわずか数個のがん細胞が検出できる診断技術などの実現も掲げている。このように、極微な世界に挑むナノテクノロジーは、電子工学はもとより新素材、生命科学、医療、環境、エネルギーなど幅広い領域に計り知れない影響をもたらすため、今日に至るまで活発に研究されている<sup>1)</sup>。

ナノテクノロジーの構造体を作製する代表的な方法として、図 1.1 に示すように、ボトムアップとトップダウンが挙げられる<sup>2)</sup>。ボトムアップは、主として有機物に利用される方法で、SAM (Self Assemble Monolayer) のように、物質が自然に構造を形成する自己組織化あるいは自己集合化などがある。また、走査型トンネル顕微鏡などのプローブを使って、原子・分子 1 つ 1 つを積み上げる、あるいは除去することでナノ構造体を実現する

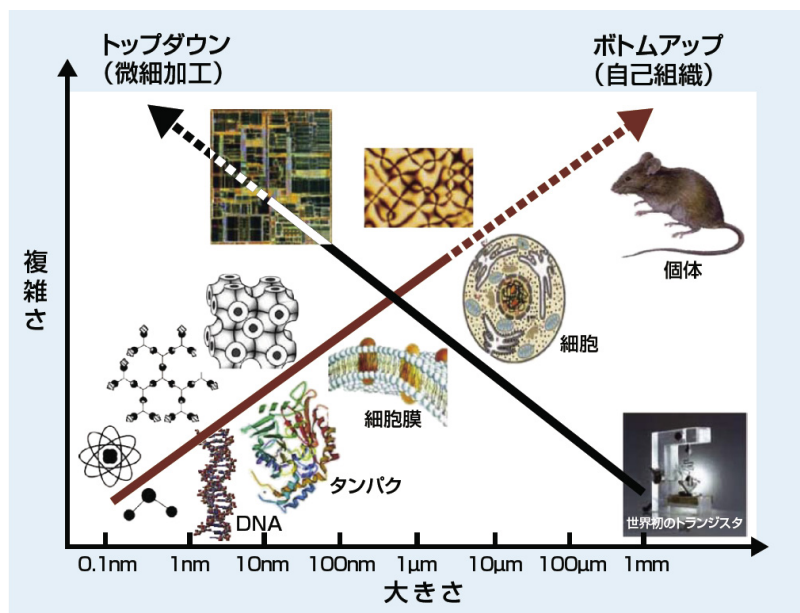


図 1.1 トップダウンとボトムアップ

方法もボトムアップに含まれる。このボトムアップは、大量生産には不向きで産業化が現状では困難であるという課題があるものの、多数のチップを有する走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）の作製が可能になれば、同時に多数の原子・分子操作ができるようになり、産業化が加速する。

一方、トップダウンは、半導体微細加工技術のように、エッチングや薄膜堆積を繰り返してナノメートルサイズの機能素子を実現する方法で、既に多くの技術が確立されている。その典型的な例として、LSI 微細加工である用いられるリソグラフィ技術が挙げられる。これは、フォトマスクを用いて感光樹脂の露光を行い、このパターンを基に、エッチングにより微細パターンを作製し、これを繰り返すことで微小回路を積層する技術である。金属または半導体、酸化物の膜の加工に用いられ、32nm 程度までの光源によるリソグラフィは可能である<sup>3)</sup>。

しかしながら、この光学的・化学的な手法は、大きな加工範囲を微細加工できる利点があるものの、加工形状はフォトマスク転写による 2 次元的形状であるため、加工の自由度において制約がある。また、工法が真空中・ガス雰囲気中など特殊な環境が必要であり、その環境を確保するためのチャンバーを装備するため装置が大掛かりなものになり、設備価格や装置の維持費が高額になるという課題が残る。

これ以外の方法では、X 線リソグラフィ<sup>4)</sup>、厚膜フォトレジスト<sup>5)</sup>、放電加工<sup>6)</sup>、光造形法<sup>7)</sup>などが研究されている。表 1.1 は、これら代表的な加工方法をまとめたものである<sup>8)</sup>。加工法により、一長一短がある。

トップダウンの代表的な機械加工法として微細切削加工技術は、物理的な作用により物体を変形除去させて微細な構造物を形成しようとする方法である。これらの手法は、従来

表 1.1 各種微細加工法の比較

加工方法	分解能	被加工材料	加工速度	問題点
シリコン・マイクロマシニング	高	単結晶シリコンなど	小	3 次元的構造物の製作
X 線リソグラフィ	高	X 線レジスト	小	X 線発生装置が巨大
放電加工	中～高	金属一般	中～小	非導電性材料の加工、表面仕上げ粗さ
光造形	中	光硬化性樹脂	中	表面仕上げ粗さ
精密切削・研削	中～高	ほとんどの金属、プラスチック、セラミックスなど	大～中	加工力、微細加工用工具

より広く利用されており現在でも極めて広い分野で用いられている。マイクロマシンという言葉の広がりとともにシリコンウェハ上に LSI 回路を形成する技術によって微細な構造物を形成する技術が注目を集め、既にいくつかの応用製品が現れているが、3 次元的に自由な構造を形成する手法としては機械加工法が依然として広く利用されている。機械加工法は、微細機械部品や微細光学素子の支持機構などの補助的な部品の生産に使用されることも多いが、微細光学素子やセンサ、アクチュエータなどの機能性部品を直接形成する方法としても有効であり、多くの分野で利用されている。

微細機械加工法は、その原理から大別して切削加工法、砥粒加工法、塑性加工法に分類される。切削加工法は、旋削やシェーパー加工のように工具で切削を行う方法、穴あけやミリングのように回転型の多刃工具で加工を行う方法がある。微細加工の分野では、その性質上切り込み量が小さいため、1 本の工具で加工する方法や、回転工具の場合でも 1 刃で加工する場合が多い。砥粒加工は、固定砥粒を用いる研削加工法と遊離砥粒を用いるポリッシング、ラッピング法があるが、微細な形状を形成する方法としては固定砥粒による研削加工法が多く用いられる。塑性加工法は、プレス成形などの変形加工法、打ち抜きなどの除去加工法に分類できる。

これらの機械加工法は、一般的には大きな物体を効率よく高速に加工可能であることが特長とされているが、近年の加工装置の進歩や工具の改良を含めた技術開発により、微細加工法として大きな発展を遂げている。特に切削加工法では、主に単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削加工法により、微細な構造物を形成することが可能となり、その有効性が高まっている。

単結晶ダイヤモンド切削工具による加工法は、被削材が軟質金属やプラスチック材料に限定されるが、ナノメートルレベルでの運動転写が可能であり、10 $\mu\text{m}$  以下の大きさの構造物からナノメートルレベルのシャープエッジを有する構造物まで形成が可能となっている。こういった微細加工を可能にした技術背景としては、材料や工具の進歩はもちろん、ナノメートルレベルでの運動制御が可能な加工装置の開発が可能となった点が大きな要因といえる。

このように、軟質金属やプラスチック材料の微細切削加工法は有用であり、その加工精度は加工装置の運動精度に大きく依存しており、多自由度の同時制御が可能な超精密加工装置ではより複雑な形状や光学素子も形成可能となる。また、フォトリソグラフィによる方法と異なり、非球面レンズのような自由局面を有する微細形状や、ブレード化された回折格子の斜面のような形状を光学素子レベルの精度で加工可能なことも大きな特長である。

一方、切削加工法は通常 1 回の加工プロセスで 1 個の製品しか製造できないため、電鋳によるレプリカ技術やプラスチックの射出成形技術などと組み合わせることにより、量産効果を高める必要がある。また、形状の創成に用いられる微細・高精度工具の形状形成精度の向上と微細化、軟質金属以外の材料も加工可能とする工具の開発や加工された微細形

状をナノメートルレベルでオンマシン評価する手法などが必要である<sup>9)</sup>。

高精度の工作機械による切削加工においては、加工位置精度が数 nm の 3 次元加工が実現しているが、機械振動を抑えるために装置が大型化している。また、工具の切れ刃部分の寸法が現在数  $\mu\text{m}$  に留まっているため、位置精度は数 nm でも最小加工寸法は数  $10\mu\text{m}$  になってしまう。さらに、工具摩耗などの不確定要因の影響により、サブミクロン以下の切り込みでの加工制御ができていないのが現状である<sup>10)</sup>。

STM や AFM などの操作型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いてトップダウン、すなわち除去加工する研究も進められている<sup>11)~29)</sup>。SPM を微細加工に用いる利点は、元来原子オーダーの表面観察を目的として開発されたため、ナノメートルスケールの運動機構を有していること、測定用の探針を工具として利用できることである。また、加工時のカンチレバーのたわみやねじれを検出しフィードバック制御させることにより、加工力を一定に保つことができるため、切込みを正確に制御することが可能となる。さらに、恒温室などの大掛かりな装置も必要としないことから、超精密ナノ加工機や MEMS などと比較して低コストで高精度な微細加工が実現できると予想される。

## 1.2 研究の目的

前節のような背景から、本研究では微細切削加工用工具に焦点を絞り、マイクロメートルからナノメートルオーダーの微細加工を、高精度で実現するための精密加工用ダイヤモンド工具の開発とその応用について検討を行う。

表 1.2 は、本研究で提案・開発する精密加工用ダイヤモンド工具（以下、ダイヤモンドアレイ工具）と類似した他の微細加工用工具の特徴をまとめたものである。

ダイヤモンドアレイ工具は、単結晶シリコンの結晶異方性エッチング技術と多結晶 CVD ダイヤモンド技術を併用して作製するため、微細な多結晶ダイヤモンドから成る規則的な形状の切れ刃を有し、切れ刃の配列を任意に作製できるという特徴を持っている。また、ダイヤモンドアレイ工具の型となるシリコンモールドで切れ刃形状が決定されるため、切れ刃形状の自由度が高い。

そこでまず、種々の切れ刃形状や配列を有するダイヤモンドアレイ工具の作製方法について検討を行うことにより、作製方法の確立を目的とする。

作製したダイヤモンドアレイ工具単体で、単一切れ刃または複数切れ刃に対して押し込み実験と引き切り実験の基礎的な加工実験を行い、精密微細加工用工具としての性能評価を目的とする。

つぎに、ダイヤモンドアレイ工具の応用について検討を行う。複数の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具の切れ刃群を抽出し、マイクロモータの回転軸端に装着したスピンドルを搭載する 1 辺が 1 インチ以下の寸法の超小型 3 軸ナノフライス盤の開発し、加工実験を行うことで、ナノフライス盤とダイヤモンドアレイ工具の評価を行うことを目的とす

表 1.2 各種微細加工用工具の特徴

名称	Si マイクロツール <sup>30)</sup>	ET チップ <sup>31)</sup>	ダイヤモンドアレイ工具
材質	単結晶シリコン	単結晶ダイヤ	多結晶ダイヤ
作製方法	エッチング	エキシマレーザ	シリコンモールド+CVD
切れ刃密度	エッチング条件に依存する	任意	任意
切れ刃形状	同上	限定的	自由度が高い
切れ刃サイズ	同上	任意 (5 $\mu\text{m}$ 以上)	任意 (1 $\mu\text{m}$ 以上)
切れ刃配列	同上	任意	任意
切れ刃強度	低	高	高

る。また、通常の工作機械でも使用可能な微細加工用回転工具を作製し、加工実験を行い、工具の評価を行う。

最後に、原子間力顕微鏡（AFM）を用いた微細加工用 AFM カンチレバーの提案・開発を行う。この加工用 AFM カンチレバーの特徴は、高剛性のシリコン製カンチレバーにダイヤモンドアレイ工具から切れ刃 1 つを抽出して装着している点である。そのため、加工時の垂直荷重を数千  $\mu\text{N}$  と高く設定することができ、加工距離が 1000mm を超えても安定した切削が可能となる。しかしながら、切れ刃の先端角が  $70.6^\circ$  であるため、加工溝の断面形状が限定される。そこで、この加工用 AFM カンチレバーを狭角の微細 V 溝加工用工具に適用するため、集束イオンビーム（FIB）を用いて、ダイヤモンド切れ刃の先端角、すくい角、横すくい角を設けた加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金に対して溝加工実験を行い、切れ刃形状が加工溝性状に及ぼす影響について検討し、微細 V 溝加工に適切な切れ刃形状を見出すことを目的とする。

加工用 AFM カンチレバーの高効率加工についても検討するため、2 種類の加工用 AFM カンチレバーを提案する。一つは、1 本のカンチレバー先端に複数の多結晶ダイヤモンド切れ刃を具備した加工用 AFM カンチレバーである。もう一つは、剛性の異なるカンチレバーを複数本有する加工用 AFM カンチレバーである。これら 2 種類の加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金および結晶シリコン（100）に対して溝加工実験を行い、高効率な微細加工が可能な加工用 AFM カンチレバーの作製を目的とする。



### 1.3 本論文の構成

本研究論文は、以下のように 7 章から構成されている。図 1.2 は、本研究の流れである。

第 1 章では、ナノテクノロジーの必要性を述べ、代表的な微細加工技術を挙げ、その特徴について述べる。また、本研究の目的として、微細加工技術の中でも、微細切削加工用ダイヤモンド工具に焦点を絞り、従来にない新しい微細加工用工具を提案・開発するとともに、それを応用した工具の作製に取り組んだことを述べる。

第 2 章では、単結晶シリコンの異方性エッチングとダイヤモンド CVD 技術を用い、任意の切れ刃形状と配列を規定できるダイヤモンドアレイ工具を提案するとともに、その作製方法について述べる。

第 3 章では、提案したダイヤモンドアレイ工具の工具性能を評価するために、工具性能評価装置を作製し、押込み加工と引っかき加工実験を行った結果について述べる。

第 4 章では、3 次元ナノ加工機のモジュールのひとつとして、1 辺が 1 インチの立方体内に収まるナノフライス盤の開発を行う。また開発したナノフライス盤を使用しダイヤモンドアレイ工具によるフライス加工実験を行った結果について述べる。さらに、通常の工作機械でも使用可能な微細加工用回転工具を作製し、加工実験を行い、工具の評価を行う。

第 5 章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、微細かつ高精細な V 溝加工を行うことを目的として、集束イオンビームを用いて、ダイヤモンド切れ刃の先端角、すくい角、横すくい角を設けた加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金に対して溝加工実験を行い、切れ刃形状が加工溝性状に及ぼす影響について検討を行った結果について述べる。

第 6 章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、高能率な微細加工を行うことを目的として、1 本のカンチレバーに複数の多結晶ダイヤモンド切れ刃を具備した多刃カンチレバーと、剛性の異なるカンチレバーを複数本有するマルチカンチレバーを作製し、Ni-P 合金めっきと単結晶シリコン (100) に対して加工実験を行い、高能率微細加工用工具としての評価を行った結果について述べる。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章まで得られた結果をまとめ、本論文の結論とするとともに、今後の展望について述べる。

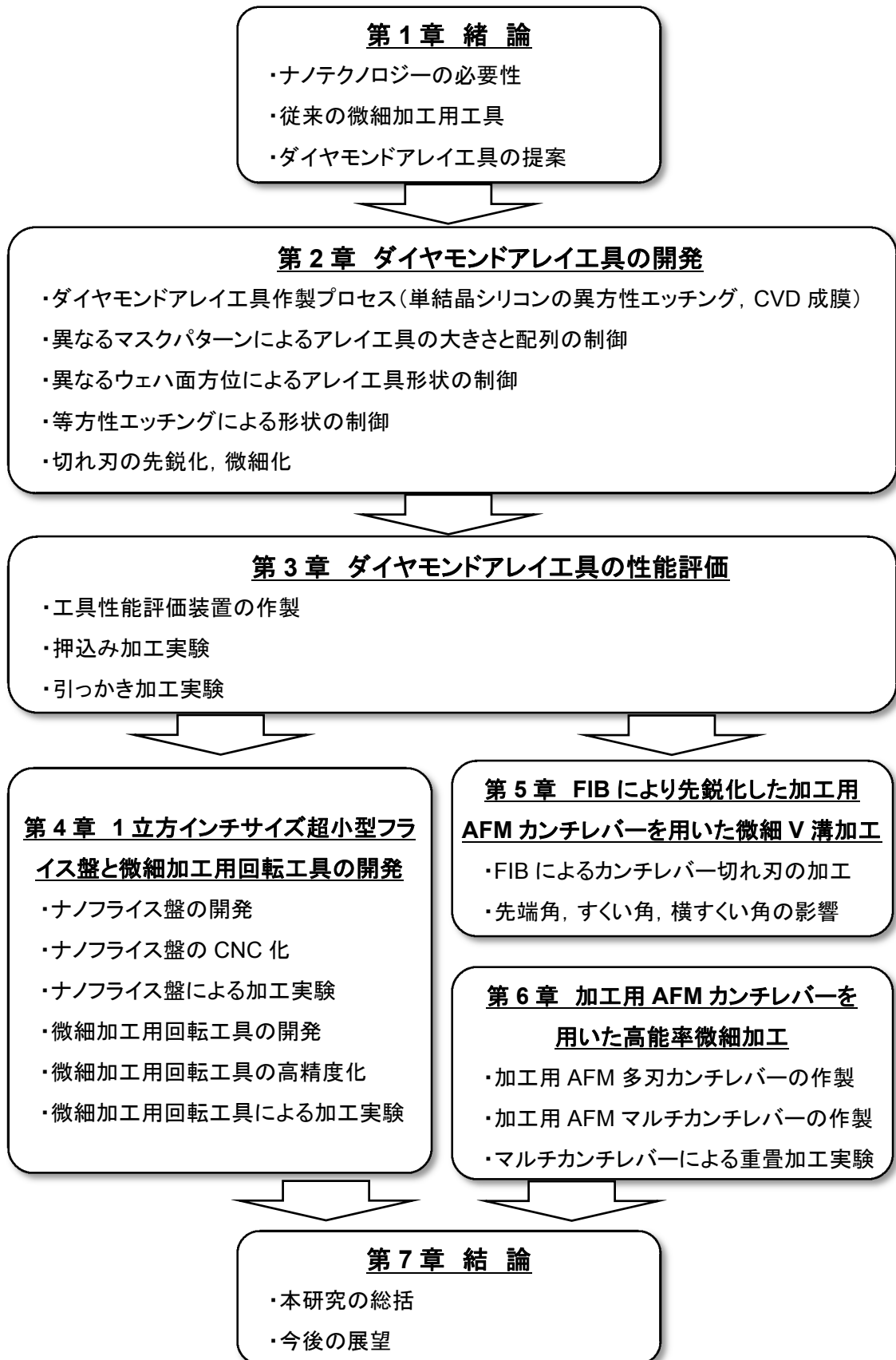


図 1.2 本研究の流れ

## 参考文献

- 1) 榑 裕之：全図解ナノテクノロジー，かんき出版，(2004) 18.
- 2) 横山 浩：ボトムアップ型ナノテクノロジー，産総研 TODAY, (2006) 4.
- 3) 石内秀美，伊藤義康，稲葉道彦：ナノテクノロジー最前線，東芝レビュー，Vol.63, No.2 (2008) 2.
- 4) W. Menz : Proc of International Micromechanism Symposium, IFToMM, (1993) 106.
- 5) Y. Hirai, Y. Inamoto, K. Sugano, T. Tsuchiya, O. Tabata : Moving Mask UV Lithography for Three-Dimensional Structuring, J. Micromechanics and Microengineering, Vol.17, No. 2, (2007) 199.
- 6) T. Masaki, K. Kawata and T. Masuzawa : IEEE MEMS-90 Workshop, (1990) 21.
- 7) T. Takagi and N. Nakajima : IEEE MEMS-94 Workshop, (1994) 211.
- 8) 山形 豊，森田晋也，大森 整：超微細溝加工ー超精密マイクロ切削技術で実現ー，ツールエンジニア，大河出版，Vol.45, No.5 (2004) 38.
- 9) 樋口俊郎 編：マイクロマシン技術総覧，産業技術サービスセンター，(2003) 232.
- 10) 江田 弘：超精密工作機械の製作，工業調査会，(1993).
- 11) M. A. McCord, R. F. Pease : Scanning tunneling microscope as a micromechanical tool, Appl. Phys. Lett., 50, 10 (1987) 569.
- 12) J. K. Gimzewski, R. Moller : Transition from the tunneling regime to point contact studied using by scanning tunneling microscope, Phys. Rev. B, 36, 2 (1987) 284.
- 13) 李木経孝，遠藤敏郎，桑原改造，金子礼三：AFM による金属表面の微細加工（第 2 報）ー加工条件の影響ー，1994 年度精密工学会秋季大会講演論文集，(1994) 75.
- 14) E. Hamada, R. Kaneko : Micro-tribological evaluation of polymer surface by atomic force microscopes, Ultramicroscopy, 42, 44 (1994) 184.
- 15) 長島伸夫，松岡三郎，宮原健介：AFM 技術による微小硬さ測定，日本機械学会論文集（A 編），61, 582 (1995) 416.
- 16) S. Miyake : 1 nm deep mechanical processing of muscovite mica by atomic force microscopy, Appl. Phys. Lett., 67, 20 (1995) 2925.
- 17) 佐光大和：テトラメチルアンモニウムヒドロキシド(TMAH)を用いたシリコンウェーハの研磨加工及び AFM による原子スケール加工の研究，精密工学会誌，62, 4 (1996) 531.
- 18) H. K. Kweon, T. Kuriyagawa, S. Kiyono : Basic Study of Micromechanical Processing, Proceeding of ICPE 96 and 6<sup>th</sup> SJSUT, (1996) 211.
- 19) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber : Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Lett., 56 (1986) 930.

- 20) R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong and C. A. Mirkin : “Dip Pen” Nanolithography, *Science*, 283 (1999) 661.
- 21) K. Ashida, N. Morita and Y. Yoshida : Study on Nanomachining Process Using Mechanism of a Friction Force Microscope, *JSME Int. J., Ser.C*, 44 (2001) 244.
- 22) 小野崇人, 浜中 均, 江刺正喜 : SPM とマイクロマシニング, *表面科学*, 18, 4 (1997) 198.
- 23) 柴田隆行 : ダイヤモンド薄膜のマイクロマシニング, *表面技術*, 50, 11 (1999) 961.
- 24) 小野崇人, 江刺正喜 : 走査型プローブ顕微鏡とナノメートル加工への応用, *計測と制御*, 38, 12 (1999) 763.
- 25) 作原寿彦, 須田正之, 古田一吉, 渡邊直哉 : SPM によるマイクロ加工, *精密工学会誌*, 68, 2 (2002) 197.
- 26) 吉田浩也, 松室昭仁, 岩田博之, 高木 誠 : SPM を用いた Si 単結晶のナノ加工と表面の構造変化, *精密工学会誌*, 73, 10 (2007) 1149.
- 27) 清水 淳, 周 立波, 山本武幸, 津村貴史, 岡部秀光, 江田 弘 : 微小引っかきによるシリコンウエハ研削現象の解析, *砥粒加工学会誌*, 52, 10 (2008) 601.
- 28) M. A. McCord and R. F. Pease: Scanning tunneling microscope as a micromechanical tool, *Appl. Phys. Lett.*, 50 (1987) 569.
- 29) E. J. van Loenen, D. Dijkkamp, A. J. Hoeven, J. M. Lenssinck and J. Dieleman: Nanometer scale structuring of silicon by direct indentation, *J. Vac. Sci. Technol.*, A8 (1989) 574.
- 30) 加藤慎也, 樋口誠宏, 矢野章成, 山口智実, 山本 登 : シリコンの多刃工具の設計, 2001 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2001) 187.
- 31) 橋本 洋, 今井健一郎, 竹田次郎, 辰巳達也 : 微細溝付きダイヤモンド工具 (Engineered Tool) の試作と石英の加工実験—第 2 報 微細溝付きダイヤモンド工具を用いた石英の加工実験—, 1998 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1998) 200.

## 第2章 ダイヤモンドアレイ工具の開発

### 2.1 緒 言

超精密加工技術の発展にともない、ナノメートルオーダーの機械加工技術が求められている。これを達成するためには、工作機械の高精度化とともに、切削工具の高精度化が必須である。工作機械については運動精度をナノメートルオーダーで実現する実用技術が存在するが、切削工具の形状精度についてはマイクロメートルオーダーが限界とされている。

一方、研削工具に関しては、切れ刃となる砥粒の形状や分布が不規則であるため、加工精度や誤差要因の理論的分析を困難なものにしている。また、研削メカニズムの基礎的解明には、砥粒形状と配列を制御した工具が有効であると考えられる。従来、切れ刃の形状と配列を制御した工具の提案はいくつか行われている。例えば、超精密加工機で成形後の超硬部材に DLC コーティング処理した工具<sup>1)</sup>、集束イオンビーム（以下、FIB）加工により作製したダイヤモンド工具<sup>2)</sup>、レーザ加工により作製したダイヤモンド工具<sup>3)</sup>、結晶異方性エッチングにより作製したシリコン多刃工具<sup>4)</sup>などがある。

一方、単結晶シリコンのエッチング技術は、様々な工業技術に応用され、この技術を利用することにより適切なマスク開口をウェハ結晶方位と正確にあわせてエッチングすることで、形状や寸法を精密に規定することができる。すでに、現在、圧力・力・流れ・加速度計測のためのセンサを生産するのに用いられ大量生産が可能である。したがって、任意の寸法や配列の酸化膜マスクパターンを施した単結晶シリコンのエッチング技術を用いてモールド（以下、シリコンモールド）を形成し、このシリコンモールドに多結晶ダイヤモンドの CVD 成膜を行うことにより、容易に所望の寸法と配列を有する工具を作製することが可能であると考えられる。また工具の材質は多結晶ダイヤモンド薄膜であるため、高硬度の工具が作製できると考えられる。すなわち、これらの技術を駆使することで、“任意の切れ刃形状”、“任意の切れ刃配列”、“高硬度等”の要素を兼ね備えた精密加工用微細工具を作製できると考える。

本章では、ダイヤモンドアレイ工具の作製方法を提案し、作製条件について検討する。まず、エッチャント濃度、エッチング温度およびエッチング時間を変化させ、最適なシリコンモールドを得るための作製条件について検討する。つぎに、作製したシリコンモールドに熱フィラメント CVD 法により多結晶ダイヤモンドを成膜し、シリコンモールド除去後のダイヤモンドアレイ工具の形状や状態について評価する。また、酸化マスクパターンを変化させ、異なる切れ刃の寸法や配列を有するダイヤモンドアレイ工具を試作する。さらに、種々の切れ刃形状のダイヤモンドアレイ工具を作製するため、面方位の異なるシリコンモールドの利用、等方性エッチングによるシリコンモールドの作製、収束イオンビームによるマスクパターンの描画についても検討する。

## 2.2 ダイヤモンドアレイ工具の提案

### 2.2.1 ダイヤモンドアレイ工具の作製プロセス

従来から、微細加工されたシリコンに CVD 法で成膜し作製したダイヤモンド微細構造<sup>5)</sup>や、この手法を応用して作製したダイヤモンドプローブ<sup>6)</sup>など、シリコンをモールドとしたダイヤモンド微細構造形成の手法がいくつか報告されている。

本研究では、切れ刃の形状精度がナノメートルオーダーであるだけではなく、工具自体のサイズがマイクロメートルオーダーである工具の作製を第一目標とした。そのため、独自のダイヤモンドアレイ工具作製方法を考案・開発した。

図 2.1 は、単結晶シリコン (100) 面を用いた場合の作製プロセスの概要である。各プロセスの詳細については、次項以降で述べる。

- (1) 単結晶シリコン上の酸化膜に、リソグラフィー技術を用いて任意のエッチングマスクパターンを作製する。
- (2) 水酸化カリウム (KOH) 水溶液により結晶異方性エッチングを行い、(111) 面で構成された凹みを形成する。
- (3) フッ酸 (HF) により酸化膜を除去し、ダイヤモンドアレイ工具の型となるシリコンモールドを得る。
- (4) シリコンモールド上に CVD 法により多結晶ダイヤモンド薄膜を成膜する。
- (5) アルカリエッチングによりシリコンモールドを完全に除去し、ダイヤモンドアレイ工具を得る。

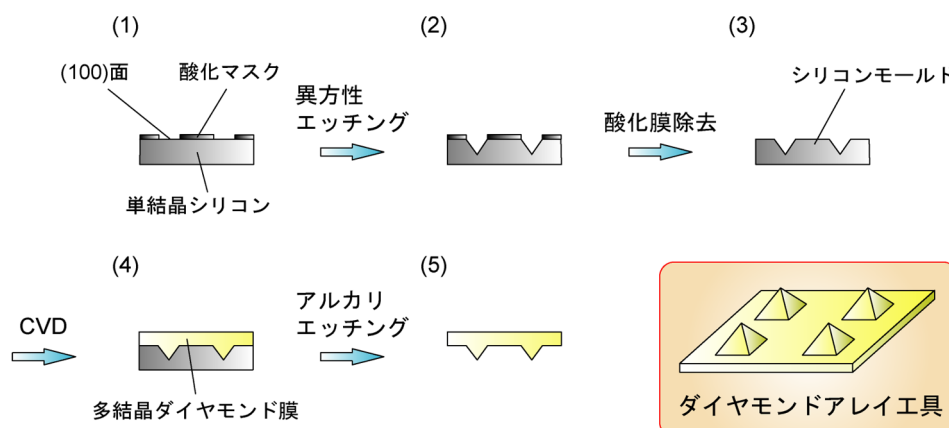


図 2.1 ダイヤモンドアレイ工具の作製プロセス

### 2.2.2 単結晶シリコンの異方性エッチング

本研究で開発するダイヤモンドアレイ工具は、工具の金型となるシリコンモールドを用いて作製される。また、このシリコンモールドは、アルカリ性水溶液に対して単結晶シリコンのエッチング速度が結晶面方位によって異なる性質を利用して作製される。このとき、シリコンモールドの形状を決定する因子として最も重要となるのが、単結晶シリコンの結晶構造である。

図 2.2 は、単結晶シリコンの結晶構造で、ダイヤモンド結晶構造である。この単結晶シリコンの異方性エッチングを行うエッチャントとして、KOH 水溶液、エチレンジアミン水溶液などが知られている<sup>7)</sup>。これらを用いてエッチングすると、(111) 面のエッチレートは他の結晶面のそれと比べてきわめて小さい値を示す。例えば、(110) 面と (111) 面とのエッチレートの比は、約 180 : 1 に及ぶ<sup>8)</sup>。

図 2.3 は、単結晶シリコン (100) 面を異方性エッチングしたときの模式図である。この場合、(111) 面で構成される四角錐形状が作製され、(100) 面と (111) 面とのなす角は次式で与えられる。

$$\cos^{-1} \left\{ \frac{(111) \cdot (100)}{|(111)| \times |(100)|} \right\} = \cos^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{3} \times 1} \right) = 54.7 \text{ (deg)}$$

したがって、このシリコンモールドから作製されるダイヤモンドアレイ工具の先端角は、約 70.6° となる。

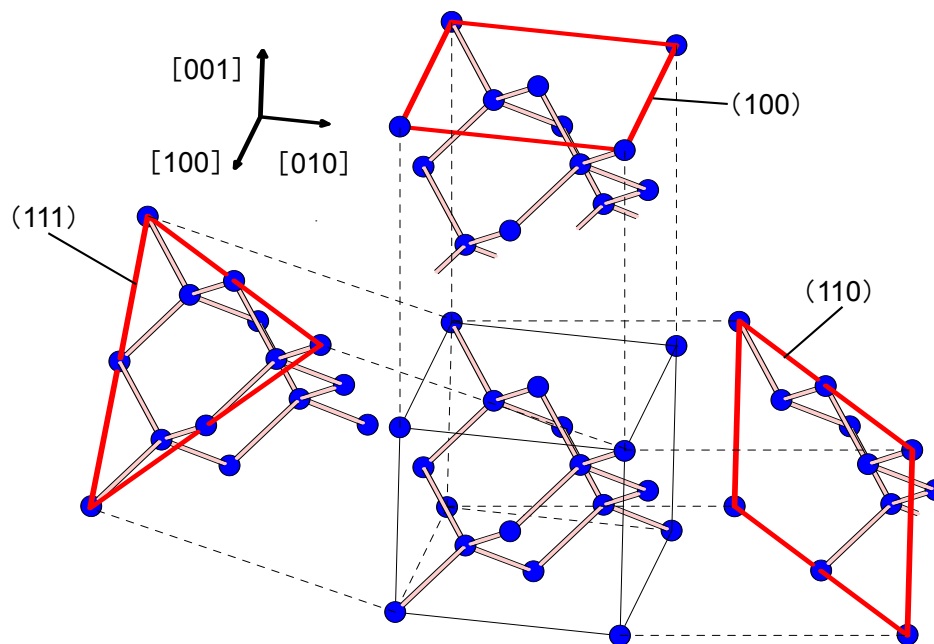


図 2.2 単結晶シリコンの結晶構造

一方、シリコンの酸化膜である  $\text{SiO}_2$  や窒化膜  $\text{Si}_3\text{N}_4$  などのエッチレートもシリコンに比べて非常に小さい。この性質を利用して本研究では、シリコンの酸化膜を単結晶シリコンの表層にパターニングすることにより、任意の配列と寸法を有するシリコンモールドを作製した。

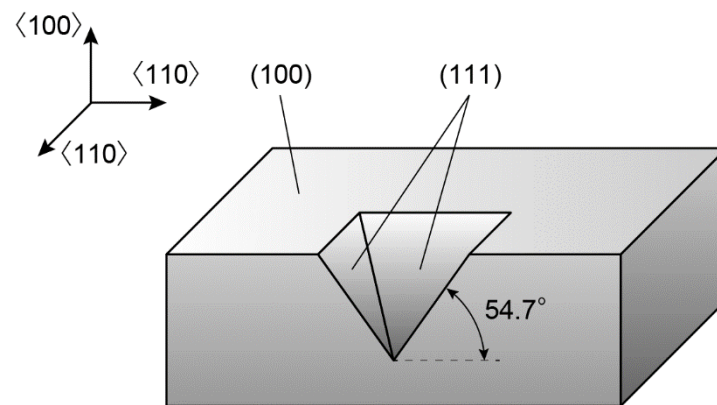


図 2.3 単結晶シリコン (100) の異方性エッチング



### 2.2.3 エッチングマスクパターンの作製

エッチングマスクパターンは、フォトリソグラフィ技術を用いて、単結晶シリコン表面の酸化膜に開口部を作製する。そのため、まず初めに露光用のフォトマスクを作製する。図 2.4 は、フォトマスク作製装置（日本レーザー社製、DWL-66 型）である。描画エリアは 4inch 角であり、4inch 角または 2inch 角のフォトマスクを作製可能である。最小線幅と描画速度はそれぞれ  $0.8\mu\text{m}$ 、 $150\text{mm/s}$  である。

フォトリソグラフィの際の露光には図 2.5 に示す両面マスクアライナー装置（ユニオン光学社製、PEM-800 型）を用いた。この装置は、等倍率の露光装置であり、用いるマスクと同等のサイズの露光が可能で、5inch 角、4inch 角および 2.5inch 角のフォトマスクサイズに対応しており、アライメント機能は  $\pm 5\mu\text{m}$ 、解像度は  $3\mu\text{m}$  である。アライメント光学系は、ウェハの表面と裏面に配置しており、上下に配置した対物レンズによりマスクとウェハのアライメントを行う。また、双対物レンズの間隔は可変可能であり、不定形ウェハに対しても、任意の間隔でアライメントが可能である。

これらの装置を用いて、エッチングマスクパターンを単結晶シリコン表面に作製した。その手順を以下に示す。

- (1) 単結晶シリコンウェハ上に、エッチングマスクとなる熱酸化膜  $\text{SiO}_2$ （約  $0.4\mu\text{m}$ ）を形成する。
- (2)  $\text{SiO}_2$  膜上にポジ型フォトレジスト（東京応化工業社製：OFPR-800）をスピンコートにより、約  $1\mu\text{m}$  の膜厚で塗布する。

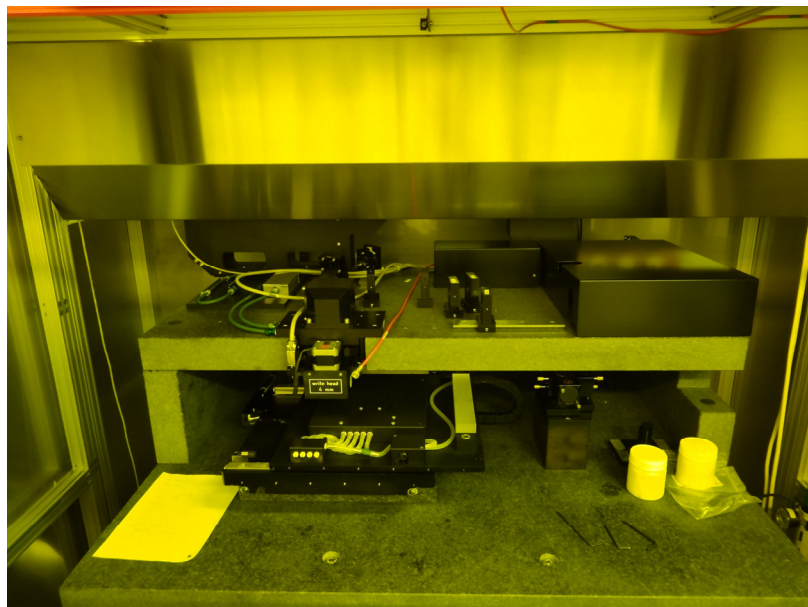


図 2.4 フォトマスク作製装置

- (3) ホットプレート上にフォトリソistを塗布した単結晶シリコンウェハを置き、363K、30min の条件でプリベークを行う。
- (4) 両面マスクアライナーを用いて、任意のパターンのフォトマスクを重ねて露光する。
- (5) 現像液にて露光部分のレジストを除去し、413K、30min の条件でポストベークを行う。
- (6) バッファードフッ酸（BHF）によりエッチングを行い、SiO<sub>2</sub> 膜に開口部を作製する。
- (7) レジストを完全に除去する。

これらの行程ではその間のウェハをクリーンに保つことが重要である。特にレジストをコーティングする前のシリコンウェハは洗浄・乾燥を十分に行う必要がある。その行程を十分に行わないと、現像や、酸化膜のエッチングの際にレジストの剥離が生じる等の問題が発生する。また、最適露光時間はレジストの厚さや露光を行う日の雰囲気等に大きく影響を受ける。露光時間が多すぎることによってもレジストの剥離が生じることがあるため、露光時間は正確に選定する必要がある。

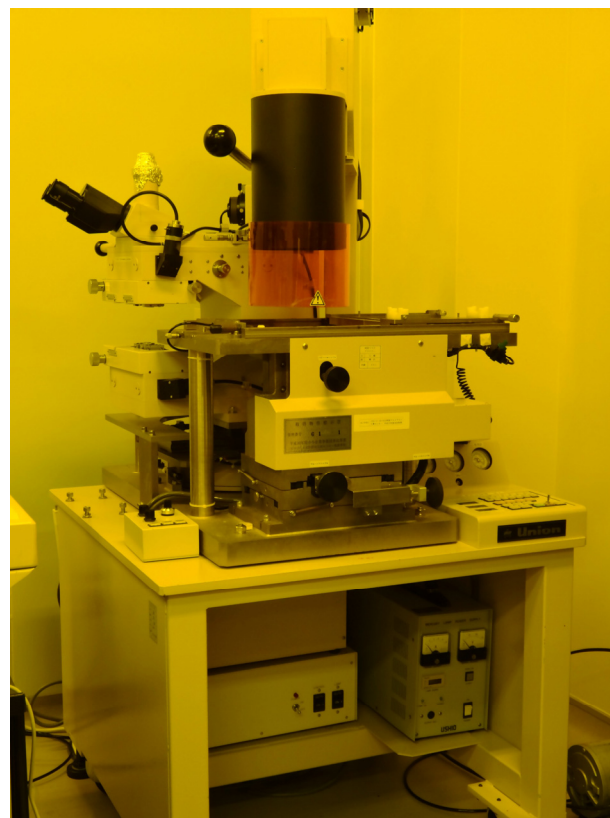


図 2.5 両面マスクアライナー装置

## 2.2.4 異方性エッチングによるシリコンモールドの作製

シリコンモールドを作製する際に最も重要な因子は、その形状精度である。ダイヤモンドアレイ工具はシリコンモールドにダイヤモンドを成膜して作製されるため、工具の形状精度にはモールドの形状精度が転写される。とくに工具先端部は切れ刃となるため、モールドの相当部分には高い形状精度と再現性が要求される。単結晶シリコンの異方性エッチングで形状精度を確保する適正エッチング条件については、既に多くの研究成果がある。しかし、それらは KOH 水溶液濃度 35mass%，温度 353K を適正とするもの<sup>9)</sup>や、濃度 25mass%，温度 348K を適正とするもの<sup>10)</sup>など様々である。そこで、シリコンモールドを作製するための最適エッチング条件を得ることを目的として、数種類の温度や濃度でエッチング実験を行った。また、異なる形状のエッチングマスクを用いて実験を行い、マスク形状がシリコンモールドの形状に及ぼす影響についても検討した。

表 2.1 エッチング条件

面方位		(100)
エッチャント		KOH 水溶液
濃度	(mass%)	25, 30, 35, 40, 45
温度	(K)	343, 353, 363
時間	(min)	40～80

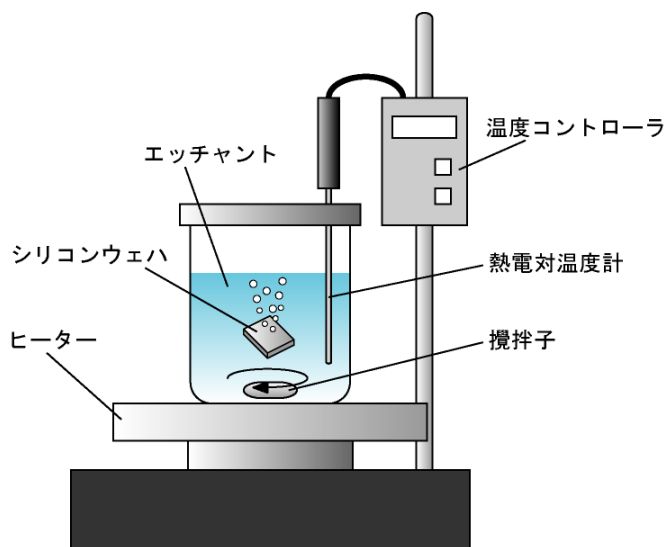


図 2.6 エッチング装置

図 2.6 は、エッチング実験装置の模式図である。この装置は、ヒーター、攪拌装置および温度コントローラから構成されている。エッチング中の温度を一定に保つため、熱電対温度計を用いてエッチャントの温度変化を $\pm 1\text{K}$ 以内に制御した。また、エッチングむらの低減やエッチング面の表面品質向上のため、エッチャントを攪拌しながらエッチングを行った。表 2.1 は、エッチング条件である。シリコンウェハの面方位は(100)面、ウェハの厚さは $500\mu\text{m}$ 、酸化膜の厚さはおよそ $0.4\mu\text{m}$ である。

まず温度を $353\text{K}$ 一定とし、エッチャント濃度を变化させた実験を行った。エッチング時間は、 $40\text{min}$ である。図 2.7 は、異なる 5 種類の濃度でエッチングした場合のシリコン

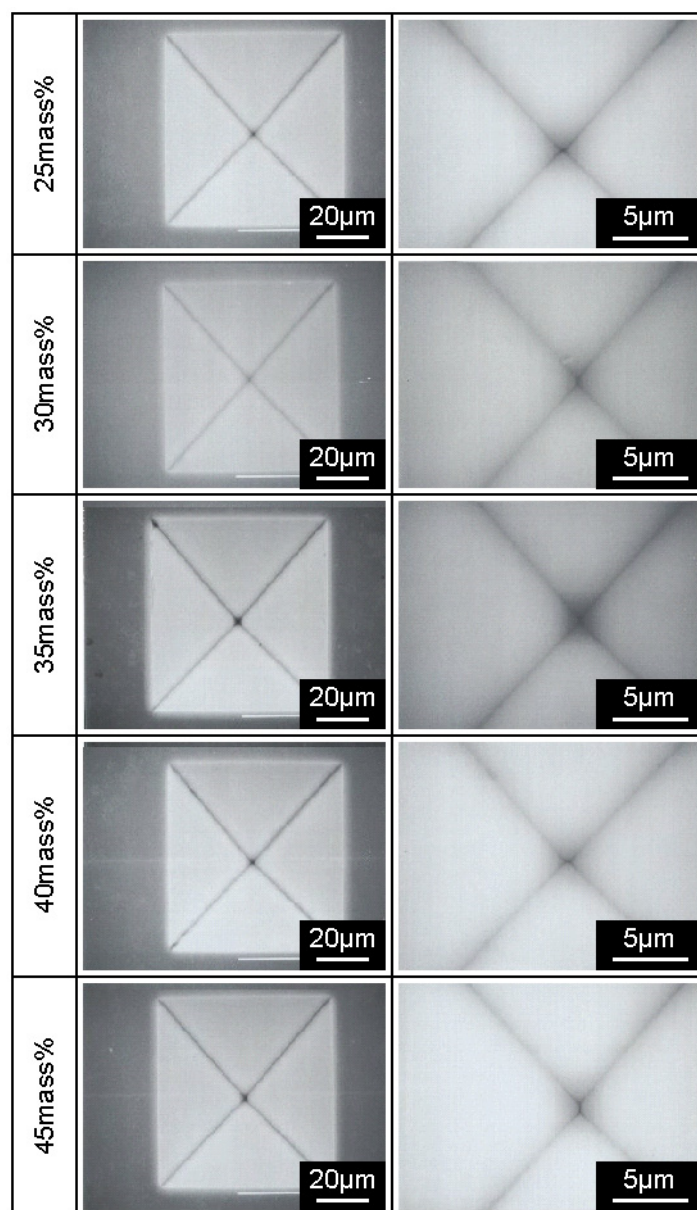


図 2.7  $353\text{K}$ において異なるエッチャント濃度で作製したシリコンモールドの SEM 画像

モールドの SEM 像である．いずれの条件でも (111) 面でエッチストップにより，四角錐状の凹みが形成されている．エッチャント濃度 40mass% と 45mass% の条件ではコーナー部の稜線がはっきりと形成されない．これは，エッチャント濃度が高くなるとエッチレートが低下する<sup>11)</sup>ため，40min ではエッチングが十分に行われなかったためと考える．その他の濃度ではコーナー部が鋭利である．四角錐面を構成する (111) 面の表面性状については，どの条件でも差異はみられない．エッチャント濃度については 35mass% 以下が適していると判断した．

つぎに濃度を 35mass% に固定し，温度を変化させてエッチングを行った．その結果，343K では，353K と同様に鋭利な凹みが形成された．一方 363K では，図 2.8 に示すよう

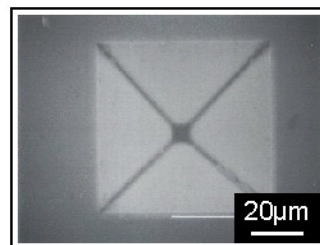


図 2.8 363K, 35mass% のエッチャントで作製したシリコンモールドの SEM 画像

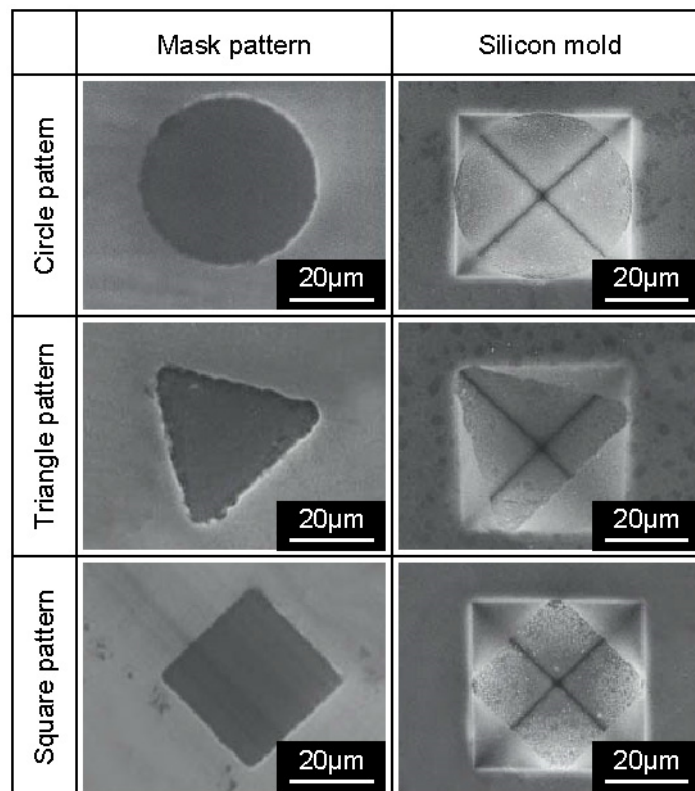


図 2.9 開口部の異なるマスクでエッチングしたシリコンモールドの SEM 画像



に、四角錐の先端部と稜線部が鋭利でない凹みが観察された。これは、結晶異方性エッチングの作用が他の条件に比べ強く現れなかったため(111)面でエッチストップが起こりやすく、エッチング後の形状にむらが生じたと考えられる。したがって、エッチャント温度は 343K から 353K が良いと考える。

図 2.9 は、異なる形状の開口部を持つエッチングマスクを用いてエッチングを行った結果である。いずれのマスクを用いても、エッチング後の凹み形状はマスク開口部の形状に外接する正方形を底辺とする四角錐となった。すなわち、エッチング後のモールドの形状については、いずれのマスクパターンでも大きな違いは見られなかった。エッチングマスクとして用いる開口部の形状は、正方形に内接する形状であればどのようなパターンを用いてもエッチング後の形状に大きな違いは見られず、同一の精度で四角錐状の凹みを形成することができると思う。

以上の結果をもとに、シリコンモールドの作製を行った。図 2.10 は、適正なエッチング条件で作製したシリコンモールドである。作製条件は濃度 35mass%，温度 353K，時間 40min，円形マスクパターンである。この条件でシリコンモールドを作製することで、先端の鋭利な四角錐の凹みを再現性よく形成することができた。また、いずれの凹みも同一形状をしており、それが規則的に配列していることが確認された。

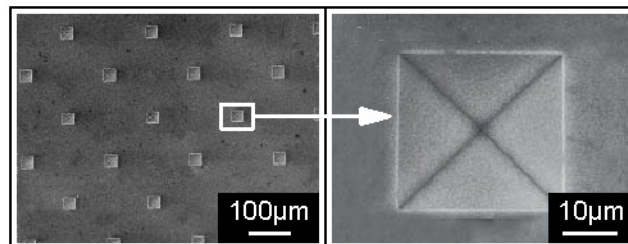


図 2.10 353K, 35mass% KOH のエッチャントで作製したシリコンモールドの SEM 画像

### 2.2.5 熱フィラメント CVD 法による多結晶ダイヤモンド膜の形成

ダイヤモンドを成膜する上で重要なことは、シリコンモールドの形状を正確に転写することである。作製されたシリコンモールドの形状をそのままダイヤモンド膜に転写することで、目的とする“既知の形状と配列の切れ刃を持つアレイ状工具”を作製することが可能となる。

代表的な CVD 成膜方法としては熱フィラメント法、マイクロ波法、熱プラズマ法などがあるが、本研究では熱フィラメント法を用いた。熱フィラメント法は他の方法と比較して、試料形状に合ったフィラメント形状を使用するため、シリコンモールドのような 3 次元構造への成膜に適している。

図 2.11 は、実験に使用した熱フィラメント CVD 装置の模式図である。この装置を用いたダイヤモンド成膜プロセスを以下に示す。

- (1) ナノメートルオーダーの微粒ダイヤモンドの入った液にシリコンモールドを入れ、超音波を付加する核発生処理を行う。これにより、 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  と高密度のダイヤモンド核発生サイトが生じ、シリコンモールド先端までの成膜が可能となる。
- (2) シリコンモールドを CVD 装置に入れ、適切な条件で成膜する。

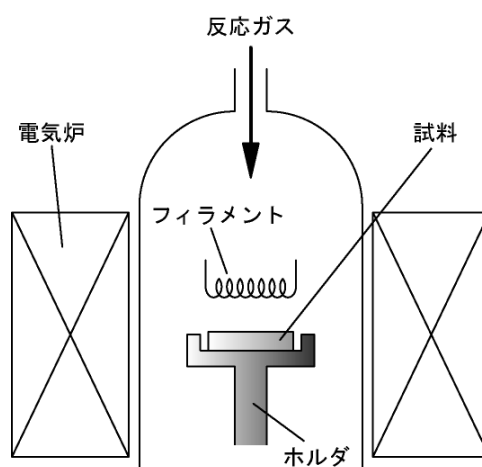


図 2.11 熱フィラメント CVD 装置の概略図

図 2.12 は、成膜に用いたダイヤモンド CVD 成膜装置の概観である。本装置は、成膜を行うチャンバー、フィラメント電流を調節する制御盤、安定した電力を供給する電源、水素およびメタンガス供給ボンベから構成されている。

表 2.2 は、CVD 成膜条件である。

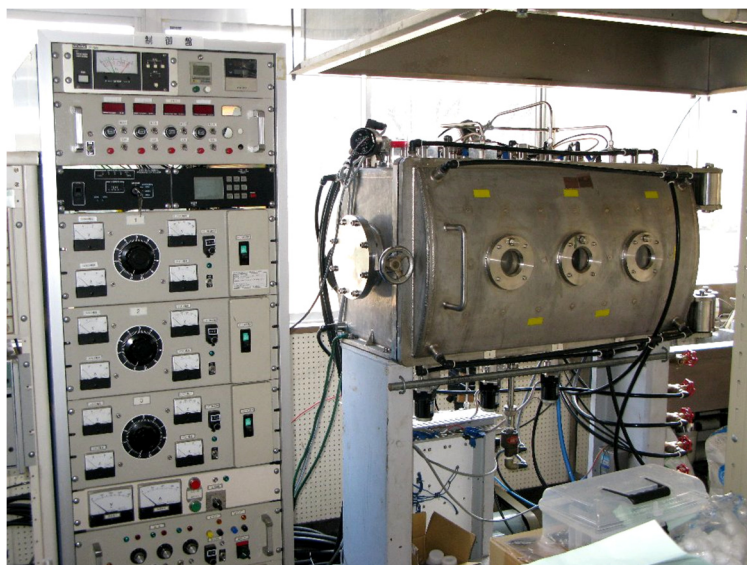


図 2.12 ダイヤモンド CVD 成膜装置の概観図

表 2.2 CVD 成膜条件

反応ガス		$\text{CH}_4 : \text{H}_2 = 99 : 1$
試料温度	(K)	1123
フィラメント温度	(K)	2273
圧力	(kPa)	2.6
堆積速度	( $\mu\text{m}/\text{h}$ )	1.0

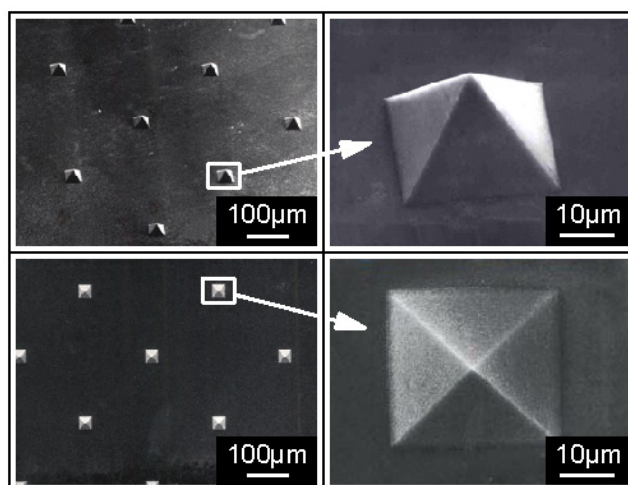


図 2.13 作製したダイヤモンドアレイ工具の SEM 画像



図 2.13 は、成膜後、エッチングによりシリコンモールドを完全に溶解して取り出したダイヤモンドアレイ工具である。図中上段は斜め上方から、下段は正面から観察したものである。図から一辺が約  $30\mu\text{m}$  の四角錐状の構造が規則的に配列しており、シリコンモールドの形状を正確に転写していることがわかる。

図 2.14 は、ダイヤモンドアレイ工具の切れ刃先端の AFM 観察像である。その先端半径はシリコンモールドの形状を正確に転写しており、数  $10\text{nm}$  と非常に鋭利であった。これより、ダイヤモンド粒子を微小な切れ刃先端部にまで、高密度に核生成が行われていることがわかる。したがって、ダイヤモンドアレイ工具は、数  $10\text{nm}$  オーダの高い切れ刃精度を有しているため、超精密加工用工具として応用可能であると考ええる。

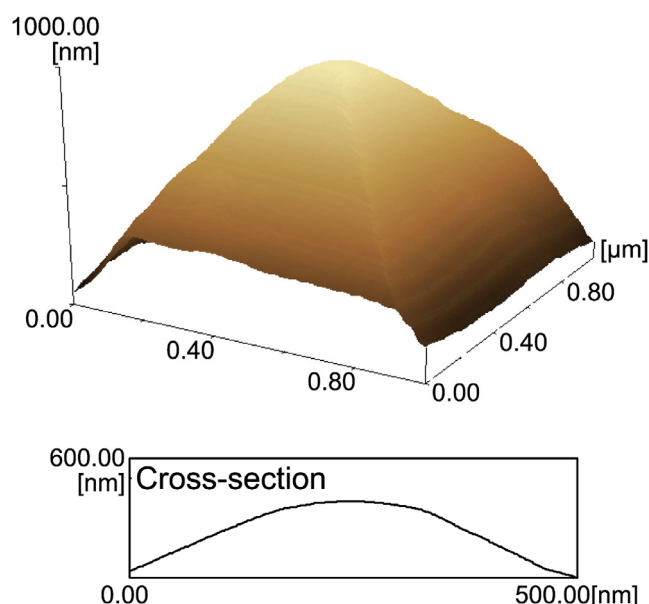


図 2.14 ダイヤモンドアレイ工具の切れ刃先端の AFM 観察像

図 2.15 は、ダイヤモンド成膜表面の SEM 観察像（上段）および AFM 観察像（下段）である。同図(a)は、シリコンモールドを除去して現れたダイヤモンド膜の表面である。SEM 観察、AFM 観察において、表面は非常になめらかであり、結晶粒界は観察されなかった。すなわち、工具の切れ刃表面側は、良好な面を形成する。一方、ダイヤモンドが堆積成長する同図(b)は、結晶粒が観察され、その粒径は約  $2\mu\text{m}$  程度であった。

ダイヤモンド成膜後の状態を把握するため、レーザラマン測定を行った。図 2.16 は、ダイヤモンド膜のレーザラマン測定図である。シリコンモールド除去前の表面、除去後の表面・裏面のいずれも、 $1332\text{cm}^{-1}$  でピーク値を示し、良好なダイヤモンド膜が成膜されたことがわかる。

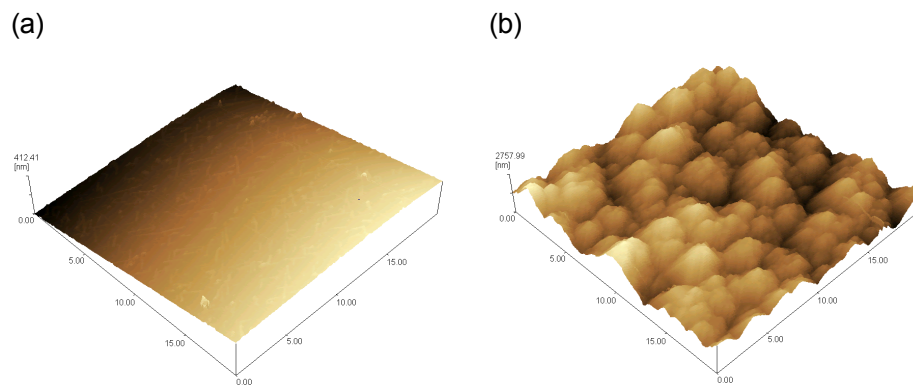
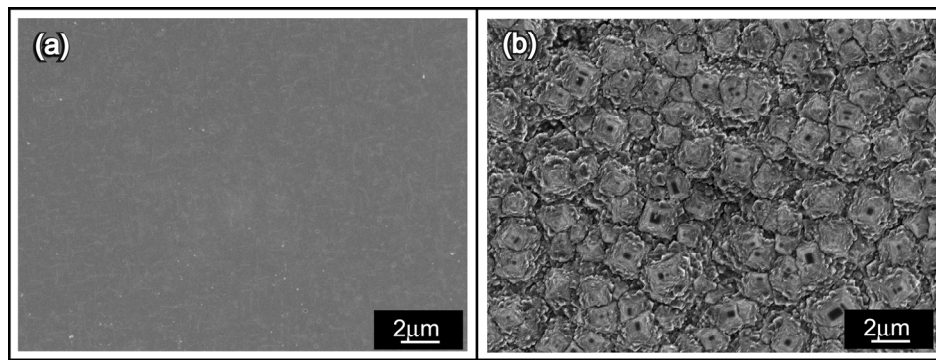


図 2.15 ダイヤモンド成膜表面の SEM 観察像および AFM 観察像

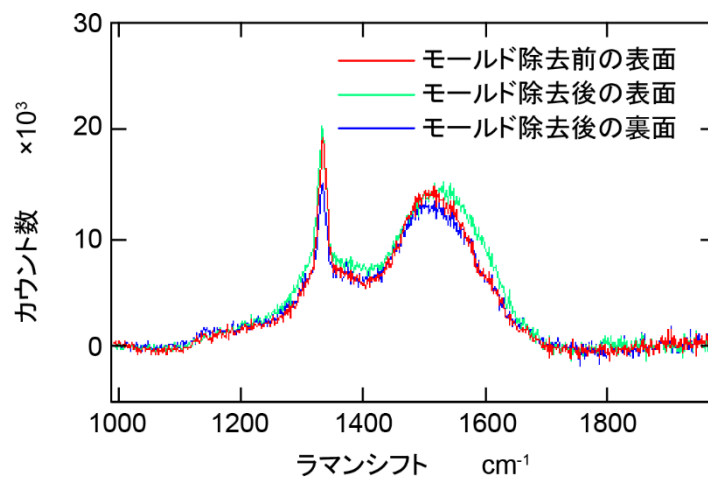


図 2.16 ダイヤモンド膜のレーザラマン測定図

## 2.3 種々のダイヤモンドアレイ工具の作製

### 2.3.1 異なるマスクパターンによるアレイ工具の大きさと配列の制御

ダイヤモンドアレイ工具の配列や大きさは、エッチングマスクの形状によって決定される。図 2.17 は、異なる配列や大きさのマスクパターンを用いて作製した 3 種類のダイヤモンドアレイ工具である。設計したマスクパターン（同図上段）により、異なる配列と大きさのダイヤモンドアレイ工具（同図下段）を作製できることを確認した。

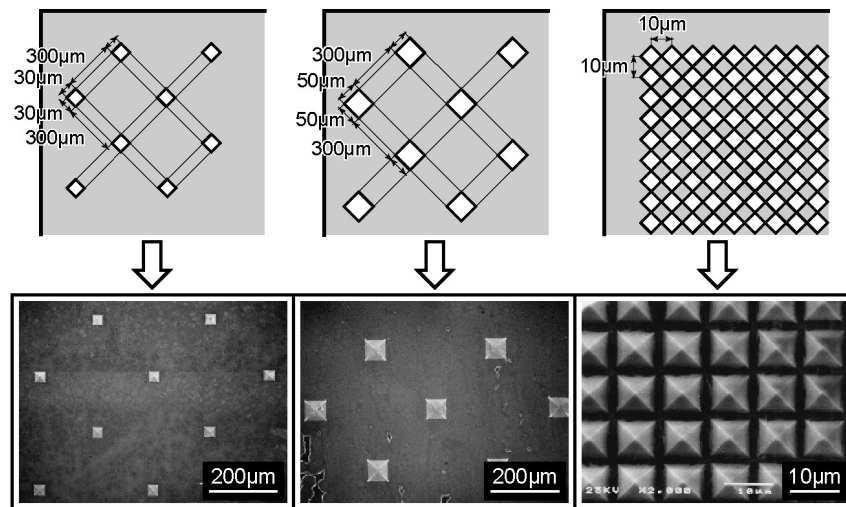


図 2.17 配列や大きさが異なるマスクパターンで作製したダイヤモンドアレイ工具

### 2.3.2 異なるウェハ面方位によるアレイ工具形状の制御

前項までに、ウェハ面方位が（100）面の場合について、四角錐形状の切れ刃を持つダイヤモンドアレイ工具が作製できることを示した。ここでは、他のウェハ面方位を用いた場合について検討した。図 2.18 は、面方位（110）面のシリコンウェハを用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具である。いずれのマスクパターンでも六面体の屋根型形状をした構造が形成されている。また、破線で示すようにマスクパターンを、円形状、正三角形状、正形状に変えることで異なる形状のダイヤモンドアレイ工具を得ることができる。図 2.19 は、面方位（111）面のシリコンウェハを用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具である。図中破線はマスクパターンの形状を示す。単結晶シリコンの結晶異方性を利用したアルカリエッチングでは通常、〈111〉方向は他の結晶方向と比べ 1/1000 以下のエッチングレートである<sup>12)</sup>。そこで、今回 300min のエッチングを行った結果、図に示すように（111）面で構成される正六角柱形状の凹みを持つシリコンモールドを作製することができた。これを用いて正六角柱状のダイヤモンドアレイ工具を作製することができた。

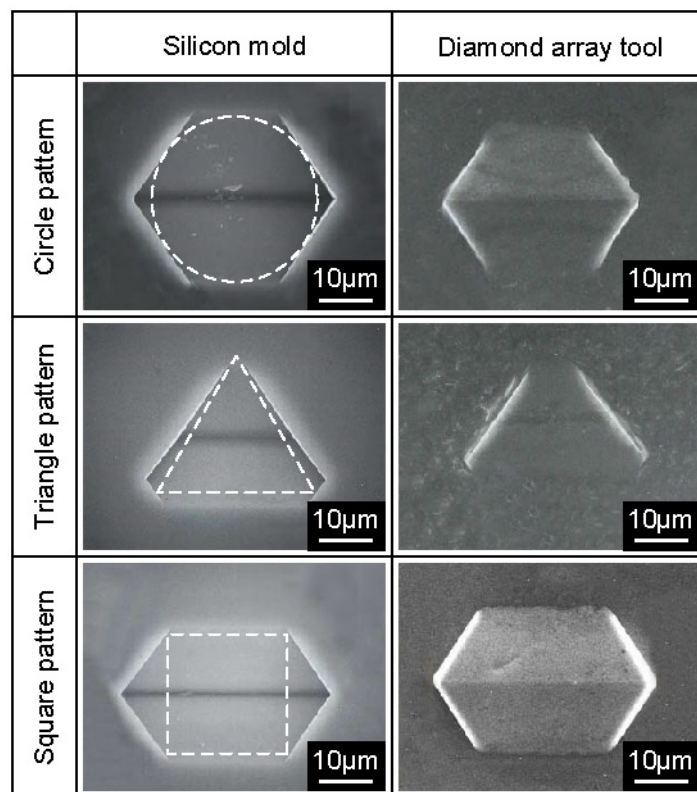


図 2.18 面方位 (110) 面のシリコンウェハを用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具

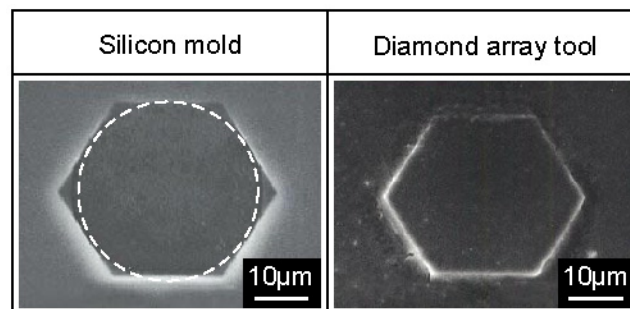


図 2.19 面方位 (111) 面のシリコンウェハを用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具

### 2.3.3 等方性エッチングによる形状の制御

これまでは、異方性エッチングにより形状や配列の異なるダイヤモンドアレイ工具が形成できることを示した。ここでは、等方性エッチングを用いてシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具の作製を行った。図 2.20 は、面方位 (100) 面のウェハを用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具である。シリコンモールドの作製条件は、エッチャントに  $\text{HF} - \text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  (質量比 1 : 4 : 1)、温度 293K、時間 40s である。マスク材料は  $\text{SiO}_2$  膜、マスクパターンは四角形状である。等方性エッチングでは、全ての面方位に等しくエッチングが進行するため、図のようなドーム型の切れ刃が配列したダイヤモンドアレイ工具が作製された。

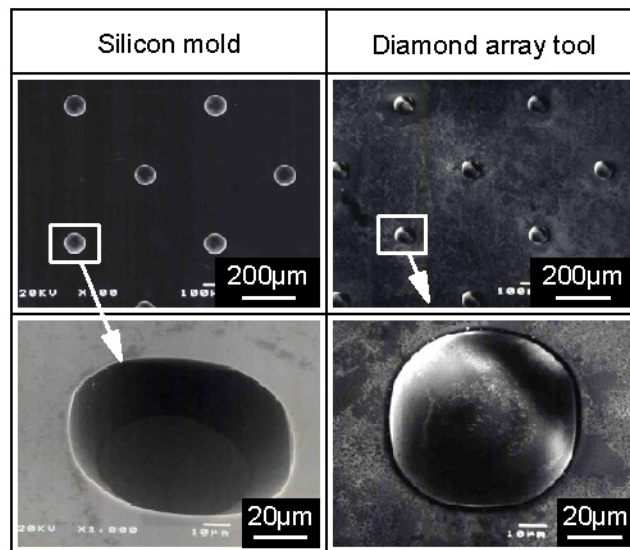


図 2.20 等方性エッチングにより作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具

### 2.3.4 切れ刃の先鋭化

ウェハ面方位 (100) 面のシリコンモールドから作製される四角錐状のダイヤモンドアレイ工具先端の曲率半径は、数 10nm 程度である。この工具を用いてナノメーターオーダーの機械加工を行うためには、切れ刃の先鋭化をさらに図る必要がある。そこで、単結晶シリコンの熱酸化により生成される  $\text{SiO}_2$  膜に着目した。この  $\text{SiO}_2$  膜は単結晶シリコン上に生成する際、平面部に比べコーナー部の成膜速度が小さい<sup>13)</sup>。すなわち、作製したシリコンモールド上に  $\text{SiO}_2$  膜を成膜するとき、凹み先端部よりも四角錐面上に厚い  $\text{SiO}_2$  膜が形成される。これより、凹みの先端が突き出す形状になると期待できる。図 2.21 は、ダイヤモンドアレイ工具切れ刃先端の先鋭化のプロセスである。成膜は、ウェット酸化（酸素と水素混合によるパイロジェニック酸化）で、酸化温度 1233K、酸化時間 315min の条件

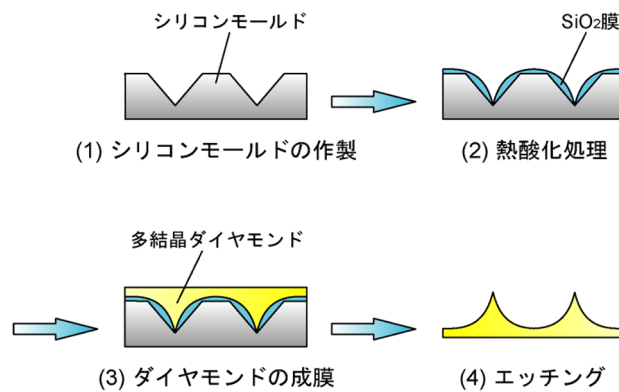


図 2.21 シリコンモールドの酸化による切れ刃先端の先鋭化

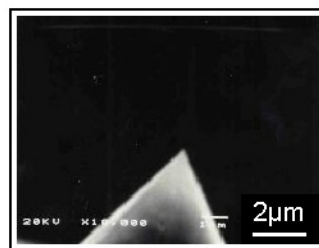


図 2.22 先鋭化したダイヤモンドアレイ工具の先端部

で行った．図 2.22 は，この方法によるシリコンモールドで作製したダイヤモンドアレイ工具先端部の SEM 像である． $\text{SiO}_2$  膜の効果により先端曲率半径が数 nm 程度にまで先鋭化されている様子がわかる．

### 2.3.5 切れ刃の微細化

単結晶シリコンに FIB 照射を行うと，照射部が KOH 水溶液に対して難溶性となり，マスクとして作用し，微細構造を形成することができる<sup>14)</sup>．これを利用して，さらに微細なダイヤモンドアレイ工具の作製ができる．図 2.23 は，シリコンモールド作製の概略，図 2.23 は，面方位 (100) 面のウェハを用いて FIB 照射により作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具である．FIB 照射条件は，イオン源を  $\text{Ga}^+$  として，加速電圧 30kV，ドーズ量  $2.5 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$  である．また，エッチング条件は，エッチャント KOH 水溶液，濃度 20mass%，温度 308K，時間 25min である．図から，一辺が約  $1\mu\text{m}$  の四角錐状の切れ刃が規則的に配列しているのがわかる．このプロセスを用いることで，さらに微細なダイヤモンドアレイ工具を安価で容易に作製できると期待される．



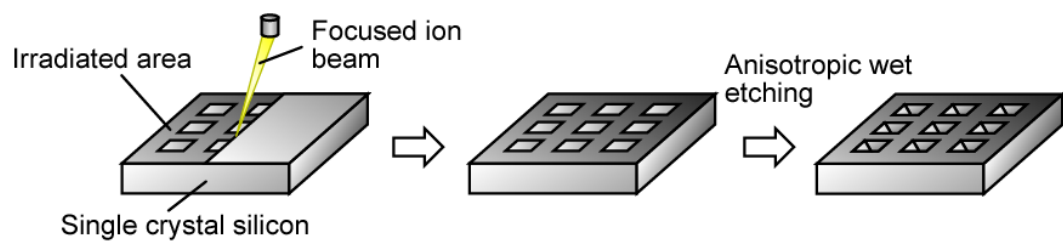


図 2.23 FIB を用いたシリコンモールド作製の概略

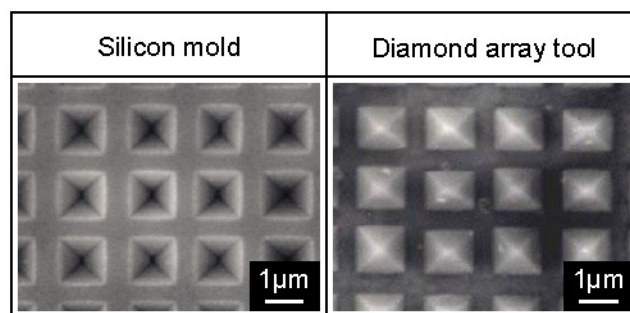


図 2.24 FIB を用いて作製したシリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具

## 2.4 結 言

本章では、単結晶シリコンの異方性エッチングとダイヤモンド CVD 技術を用い、任意の切れ刃形状と配列を規定できる微細加工工具（ダイヤモンドアレイ工具）を提案し、その作製方法を示した。また、作製方法について検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 単結晶シリコン（100）に対して、KOH 溶液を用いたシリコンモールド作製のための最適なエッチャント条件は、濃度 25～35mass%，温度 343～353K，時間 40min であった。
- (2) 単結晶シリコン（100）の異方性エッチングで作製したシリコンモールドを用いて、熱フィラメント CVD 法により作製したダイヤモンドアレイ工具は、シリコンモールドの形状を正確に転写しており、先端角約  $70.6^\circ$  の四角錐形状の切れ刃を有し、切れ刃先端も数 10nm と非常に鋭利であった。
- (3) マスクパターンを変化させることで、任意の切れ刃配列と大きさをもつダイヤモンドアレイ工具の作製が可能であった。
- (4) 面方位の異なるシリコンウェハを用いることで、切れ刃形状の異なるダイヤモンドアレイ工具の作製が可能であった。面方位（110）のシリコンモールドでは、六面体の屋根型形状、面方位（111）のシリコンモールドでは、正六角柱状の切れ刃を得ることができた。
- (5) 単結晶シリコン（100）を等方性エッチングすることにより、ドーム形状の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具が作製できた。
- (6) 異方性エッチング後のシリコンモールドを酸化させることにより、ダイヤモンドアレイ工具切れ刃の先鋭化が可能であった。
- (7) 単結晶シリコン（100）に対して収束イオンビーム照射を行うことで、照射部が KOH 水溶液に対して難溶性となりマスクとして作用することを利用して、一辺が約  $1\mu\text{m}$  の四角錐状の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具を作製することができた。

以上の結果から、シリコンモールドとして用いる単結晶シリコンの面方位、マスクパターン、異方性／等方性エッチング、シリコンモールドの酸化、収束イオンビームの利用などを適切に選択することにより、ダイヤモンドアレイ工具は精密な微細加工用工具として有効な利用が可能であると考ええる。

次章以降では、作製したダイヤモンドアレイ工具の精密加工用工具としての性能評価と応用について検討を行っていく。



## 参考文献

- 1) 諸貫信行：機能表面の新たな展開－サーベイ報告－，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) 69.
- 2) M. Yoshino, S. Aravindan and N. Fujii : Fabrication of nano formed surfaces on hard brittle materials, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2003) 173.
- 3) 橋本 洋，今井健一郎，竹田次郎，辰巳達也：微細溝付きダイヤモンド工具 (Engineered Tool) の試作と石英の加工実験－第 2 報 微細溝付きダイヤモンド工具を用いた石英の加工実験－，1998 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1998) 200.
- 4) 西澤啓之，山口智実，樋口誠宏，矢野章成：Si マイクロピラミッドによるナノ切削加工の研究 (第 1 報)－ミリ加工機の開発と加工面の評価－，2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2002) 369.
- 5) H. Bjorkman, P. Rangsten, U. Simu, J. Karlsson, P. Hollman and K. Hjort : Diamond microstructure replicas from silicon masters, Proceeding of IEEE MEMS-98, (1998) 34.
- 6) K. Unno, T. Shibata and E. Makino : Micromachining of diamond probes for atomic force microscopy applications, Sensors and Actuators, A88 (2001) 247.
- 7) K. E. Petersen : Silicon as a Mechanical Material, Proceeding of IEEE, 70, 5 (1982) 420.
- 8) 佐藤一雄：単結晶 Si の異方性エッチング技術，精密工学会誌，53, 6 (1987) 849.
- 9) 平井聖児，古川勇二：高能率，高精度異方性エッチングの選定指針，精密工学会誌，62, 3 (1996) 428.
- 10) K. Unno, Y. Kitamoto, T. Shibata and E. Makino : Smart nano-machining and measurement system with semiconductive diamond probe, Smart Materials and Structures, 10, 4 (2001) 730.
- 11) M. Yamamoto, Y. Iriye, K. Asaumi, M. Shikida, Y. Matsushima, T. Yamashiro and K. Sato : Characterization of orientation dependent etching properties of single-crystal silicon－Effect of KOH concentration－，Sensors and Actuators, A64-1 (1998) 87.
- 12) M. Elwenspoek and H. V. Jansen : Silicon Micromachining, Cambridge University Press, (1998).
- 13) R. B. Marcus and T. T. Sheng : The Oxidation of Shaped Silicon Surfaces, Journal of The Electrochemical Society, 129, 6 (1982) 1278.

- 14) 川堰宣隆, 柴田浩一, 森田 昇, 芦田 極, 谷口 淳, 宮本岩男: ナノスケール機械加工と化学エッチングを併用した 3 次元極微細構造形成 (第 2 報, 集束イオンビーム照射を利用した 3 次元微細構造形成の可能性), 日本機械学会論文集 (C 編), 70, 696 (2004) 2541.

## 第3章 ダイヤモンドアレイ工具の性能評価

### 3.1 緒 言

前章において、単結晶シリコンのエッチング技術と多結晶ダイヤモンドの CVD 技術を併用した、ダイヤモンドアレイ工具を提案した。この工具は、切れ刃形状と配列を精密に規定できるという特徴をっており、精密加工用工具への応用が期待できるが、加工性能・工具強度など加工用工具としての性能は未知である。

本章では、工具性能評価装置を作製し、ダイヤモンドアレイ工具の性能評価を行う。まず、性能評価を行うための基礎的な加工として、押し込み加工と引っかかり加工の 2 種類の加工を想定した工具性能評価装置の作製を行う。評価装置の設計に際して、想定される加工荷重や切り込み量から、構成部品の選択や設計を行った。つぎに、作製した評価装置を用いて、ダイヤモンドアレイ工具の押し込み加工実験と引っかかり加工実験を行った。評価に用いたダイヤモンドアレイ工具の切れ刃形状が四角錐形状をしていることから、引っかかり実験では、単一切れ刃で引っかかり方向を変化させて評価を行った。さらに、切れ刃が複数の場合、引っかかり方向に対してダイヤモンドアレイ工具の切れ刃列を傾斜させ、加工ピッチを変化させて評価した。

## 3.2 工具性能評価装置の作製

### 3.2.1 評価装置の設計指針

ダイヤモンドアレイ工具の性能評価を行うための基礎的な加工として、押し込み加工と引っかかり加工の2種類の加工を行う。前者は工具形状の転写性を目的とし、後者は規則的な切れ刃による加工性の確認を目的とした。様々な加工を行った際の諸因子を測定し、工具の評価を行う必要があるため、下記の条件を満足する工具性能評価装置を新たに試作した。

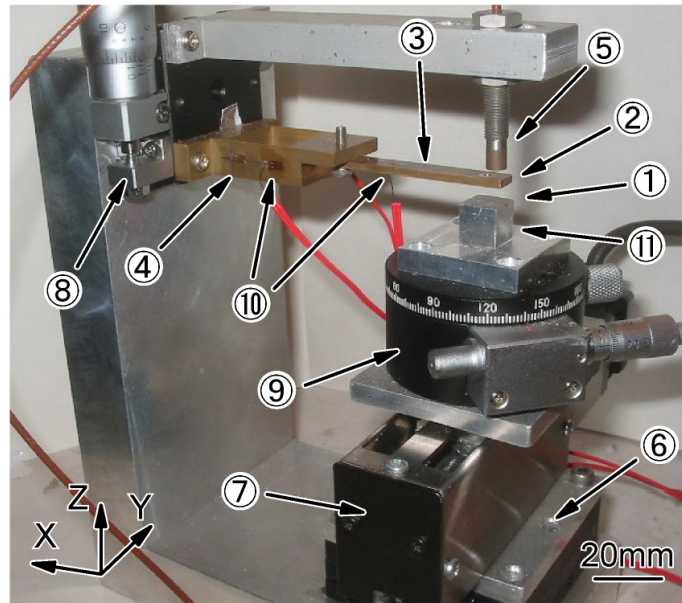
- 1) 0.1~1 $\mu$ m 単位で切り込み量の調節が可能であること。
- 2) 押し込み抵抗、引っかかり抵抗の測定が可能であること。
- 3) 切削速度の制御が可能であること。
- 4) 工具配列に対して加工方向の制御が可能であること。
- 5) 工具の交換が容易に行えること。
- 6) 様々な被削材を用いることが可能であること。

### 3.2.2 工具性能評価装置の構成

前項の設計指針をもとに、図 3.1 に示す評価装置を作製した。評価装置は、切込みを与えるための Z 軸ステージ (⑧)、引っかかり加工を行うための Y 軸ステージ (⑦)、工具送り量を変化させるための X 軸ステージ (⑥)、加工方向を変化させるための回転ステージ (⑨)、押し込み荷重を測定するための板バネ (③)、引っかかり抵抗を測定するための平行バネ (④)、工具と被削材の接触の検出と実切込み量を測定するためのギャップセンサ (⑤) から構成される。

ダイヤモンドアレイ工具は、 $\langle 110 \rangle$  方向が Y 軸と平行になるように、回転ステージ上の工具台 (⑪) に接着剤で貼付した。被削材は、押し込み荷重測定用板バネの先端に固定した。押し込み加工は、Z 軸ステージ (最小移動単位 0.5 $\mu$ m) を用いて工具を被削材に押しつけて行った。また、引っかかり加工は、工具を被削材に一定荷重で押し込み後、Y 軸ステージ (最大速度 8mm/s) を移動させて行った。

押し込み荷重と引っかかり抵抗は、それぞれ板バネと平行バネに貼付したひずみゲージ (⑩) で測定されるひずみの変化量を、あらかじめ測定した校正曲線から変換して求めた。



①	ダイヤモンドアレイ工具		
②	被削材	A1050	
③	押し込み荷重測定用板バネ	りん青銅板	
④	引っかき荷重測定用平行板バネ	りん青銅板	
⑤	ギャップセンサ	電子応用： AEC-5505	測定範囲：0～2mm 分解能：0.5 $\mu$ m
⑥	X 軸ステージ	駿河精機：B11-60	移動量： $\pm 6.5$ mm
⑦	Y 軸ステージ	オリエンタルモーター： SPL26T08B-03	最大速度：8mm/s 分解能：1.6 $\mu$ m
⑧	Z 軸ステージ	シグマ光機： TSD-401SRDM	分解能：0.5 $\mu$ m
⑨	回転ステージ	中央精機：RS-511	分解能： $\pm 2.5^\circ$
⑩	ひずみゲージ		
⑪	工具台		

図 3.1 工具性能評価装置の外観

### 3.2.3 押込み荷重測定用板バネの設計と校正

押込み荷重測定用板バネを作製する際考慮すべき点は、予想される最低押込み荷重を負荷した際に、変位センサでそのたわみを計測可能であるということである。これは、変位センサでたわみの測定を行うことができなければ、切り込み量の算出を行うことができないためである。そこで、押込み加工実験に用いるダイヤモンドアレイ工具の切れ刃 1 つ当りの最低押込み荷重を 1mN と仮定して設計を行った。板バネに使用する材料は、バネとしての性質に優れているりん青銅板を用いた。

実験に用いるダイヤモンドアレイ工具の切れ刃数を 221 個と仮定すると、工具全体での最低押込み荷重は 221mN である。また、変位センサを用いて測定可能なたわみ量は、分解能の 10 倍と考え  $5\mu\text{m}$  とした。よって板バネに求められるたわみ剛性  $k$  (N/m) はたわみ量を  $v$  (m) 荷重を  $W$  (N) とすると次式で与えられる。

$$k = \frac{W}{v} = \frac{2.21 \times 10^{-1}}{5.00 \times 10^{-6}} = 44.2 \times 10^3 \quad (3.1)$$

この結果をもとに板バネの寸法を決定した。この板バネのたわみ剛性は、板バネの長さを  $l=32 \times 10^{-3}$  (m)、幅を  $b=7 \times 10^{-3}$  (m)、厚さを  $t=2 \times 10^{-3}$  (m)、りん青銅板のヤング率を  $E = 98 \times 10^9$  (Pa) とすると

$$k = \frac{Ebt^3}{4l^3} = \frac{98 \times 10^9 \times 7 \times 10^{-3} \times (2 \times 10^{-3})^3}{4 \times (32 \times 10^{-3})^3} = 41.9 \times 10^3 \quad (3.2)$$

となり、式 (3.1) で求めた条件を満足する。

板バネの校正は、板バネ先端近傍の被削材固定位置に分銅を吊るし、ひずみゲージアンプの出力電圧を測定して行った。

図 3.2 は校正曲線である。本実験測定範囲内では、負荷荷重と出力電圧の間には、よい線形関係が見られる。荷重 200mN 付近でひずみゲージの出力電圧が 100mV 程度出力されている。ノイズ電圧はこれに比べて十分に小さいため、作製した板バネは 200mN 以上の荷重を十分に測定できる。

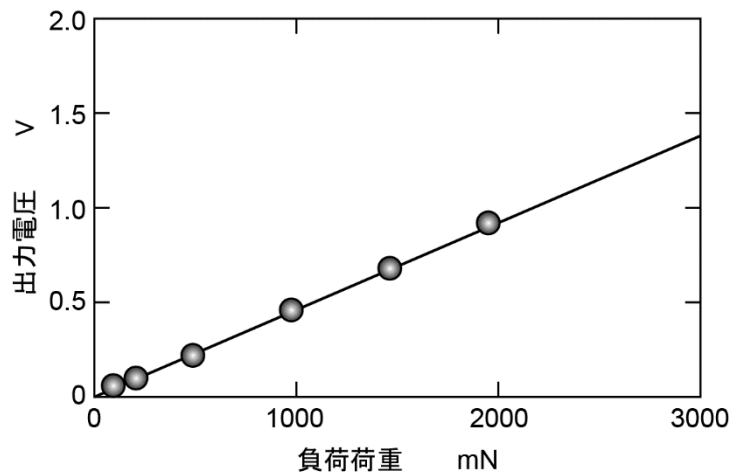


図 3.2 押込み荷重測定用板バネの荷重と出力電圧の校正曲線

### 3.2.4 引っかかり荷重測定用板バネの設計と校正

引っかかり荷重測定用板バネの設計の際は、押込み荷重用板バネとは異なり変位センサの分解能を考慮する必要がない。そのため、最低荷重負荷時のひずみをひずみゲージで読み取ることができれば、荷重を測定することが可能である。設計を行う際に用いる切れ刃 1 つあたりの最低引っかかり荷重は押込みと同様に 1mN とした。また、板バネに用いた材料も押込み荷重測定用板バネと同様に、りん青銅板を用いた。

押込み荷重測定用板バネは平行板バネであり、ひずみゲージはその固定端部分に貼付した。その部分のひずみ $\varepsilon$ は、荷重を $W=2.21 \times 10^{-1}$  (N)、板バネ部の長さを $l=2 \times 10^{-3}$  (m)、幅を $b=10 \times 10^{-3}$  (m)、厚さを $t=5 \times 10^{-4}$  (m)、ヤング率を $E=98 \times 10^9$  (Pa) とすると次式で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{3Wl}{2Ebt^2} = \frac{3 \times 2.21 \times 10^{-1} \times 2 \times 10^{-3}}{2 \times 98 \times 10^9 \times 10 \times 10^{-3} \times (5 \times 10^{-4})^2} = 2.706 \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

したがって、設計した寸法の引っかかり荷重測定用板バネを用いて 221mN の荷重を付加した際に生じるひずみは市販の一般的なひずみゲージを用いて測定可能である。

板バネの校正は、押込み荷重測定用板バネと同様の方法を用いて行った。

図 3.3 は校正曲線である。本実験測定範囲内では、負荷荷重と出力電圧は、ほぼ線形関係になっている。荷重 200mN 付近でひずみゲージの出力電圧が 500mV 程度出力されている。十分な出力電圧が得られていることから、作製した板バネは 200mN 以上の荷重が測定可能である。

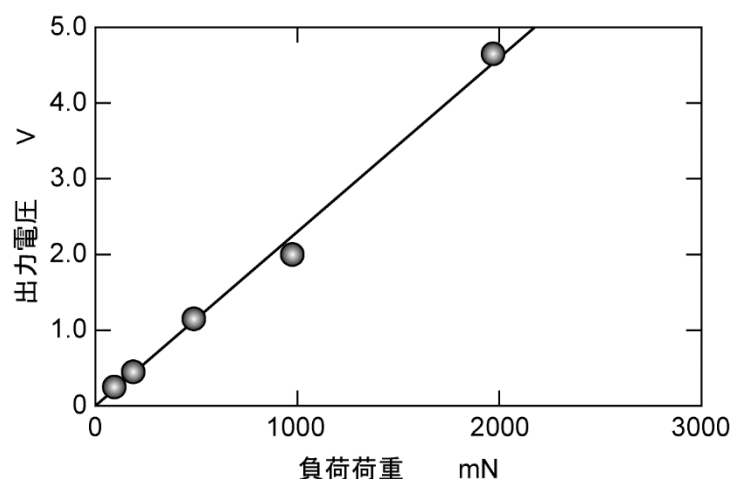


図 3.3 引っかき荷重測定用板バネの荷重と出力電圧の校正曲線

### 3.2.5 ギャップセンサの校正

ギャップセンサには，渦電流式のものをを用いており，電磁誘導作用によって被測定物表面に磁束の通過と垂直方向の渦電流が流れ，センサヘッド内のセンサコイルのインピーダンスが変化することによる発振状態の変化により，距離を測定する．ここで，発生する渦電流は被測定物の種類によって異なる値を示すため，測定対象に合わせて校正を行う必要がある．

図 3.4 は，りん青銅板に対しての校正線図である．ギャップセンサと測定物の距離が 0.7mm 以下では，距離と電圧が線形的な関係を示すことから，この範囲内で距離測定を行うこととした．

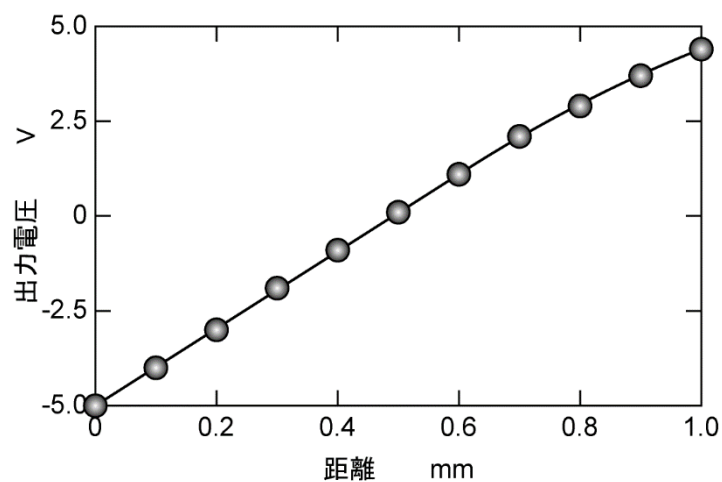


図 3.4 ギャップセンサの距離と出力電圧の校正曲線



### 3.3 押し込み加工実験

押し込み加工実験は、表 3.1 に示す条件で行った。被削材には、転写性のよいアルミニウム合金 A1050 を用いた。加工用工具には、図 3.5 に示す 5mm×5mm の範囲に一辺 30 $\mu$ m の四角錐状の切れ刃が 221 個規則的に配列したダイヤモンドアレイ工具を用いた。図 3.6 は、押し込み加工実験の模式図である。Z 軸ステージのマイクロメータヘッドを回転させる

表 3.1 押し込み加工実験条件

被削材		A1050
一刃あたりの押し込み荷重	(mN/個)	39 ～ 144
押し込み時間	(s)	30
切れ刃数	(個)	221

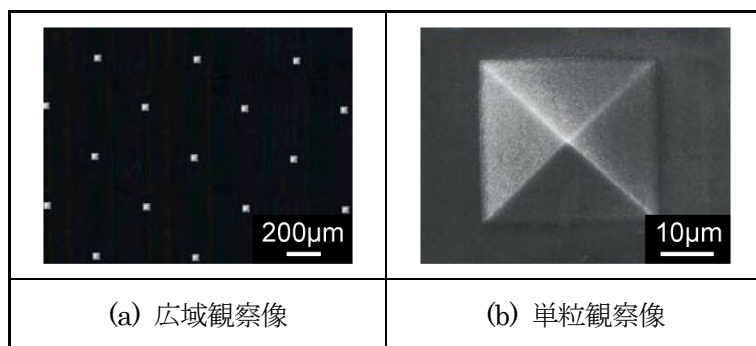


図 3.5 加工実験用ダイヤモンドアレイ工具

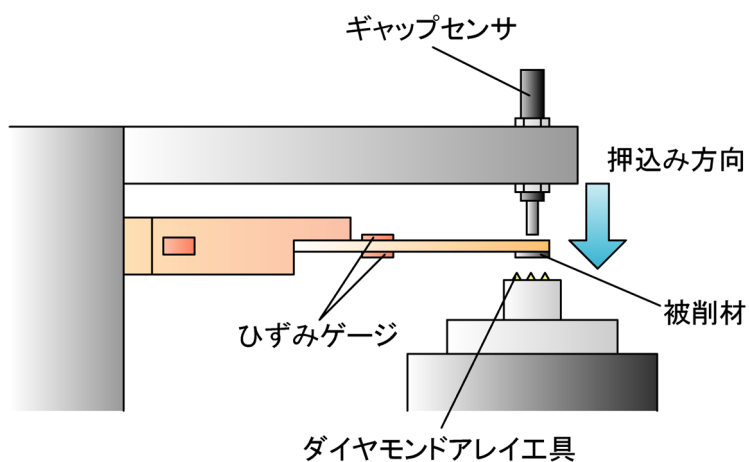


図 3.6 押し込み加工実験の模式図

ことにより、板バネ部分先端に貼付された被削材をダイヤモンドアレイ工具に押付ける。このときの押込み荷重は、ひずみゲージで計測されるひずみ量から求めた。押込み加工後の加工面や工具切れ刃の観察には、走査電子顕微鏡（SEM）を用いた。

図 3.7 は、押込み荷重 39.01mN と 74.95mN で押込みを行った場合の加工痕の SEM 観察像である。押込み荷重は、切れ刃一刃あたりの値である。広域観察像より、ダイヤモンドアレイ工具の配列に一致した加工痕（図中、白い輝点）が形成されていることがわかる。また、単痕観察像および 3 次元観察像より、加工痕の形状は、ダイヤモンド工具の形状を転写した四角錐形状となっていることがわかる。

図 3.8 は、図 3.7 で示した加工痕の断面形状である。図から、加工痕の形状は、開口部周辺では盛り上がっており、底部は丸くなっているものの、押込み荷重の大きさに関係なく、ほぼ一定であることがわかる。また、押込み加工面も平坦であることから、ダイヤモンドアレイ工具の形状が正確に転写されていることがわかる。

図 3.9 は、切れ刃一刃あたりの押込み荷重と加工痕深さの関係である。図より、荷重の増加にともない加工痕深さが増加していることがわかる。

以上のことから、ダイヤモンドアレイ工具を押込み加工用工具として用いることにより、規定された押込み加工痕形状と配列の加工が可能であることがわかった。

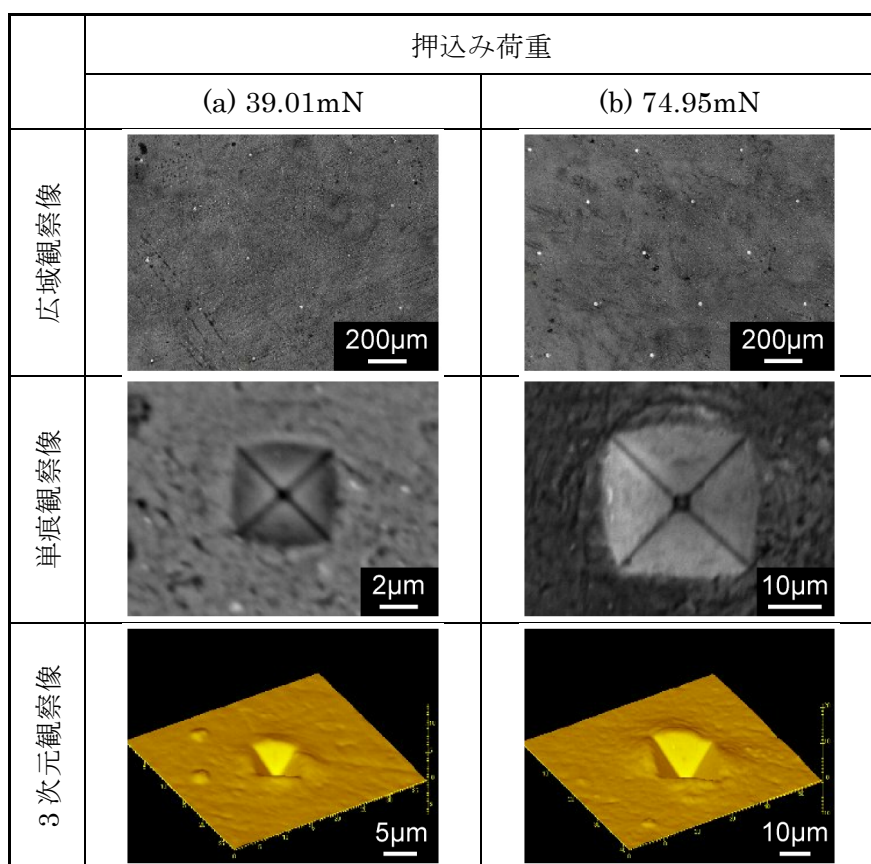


図 3.7 押込み加工痕の SEM 観察像

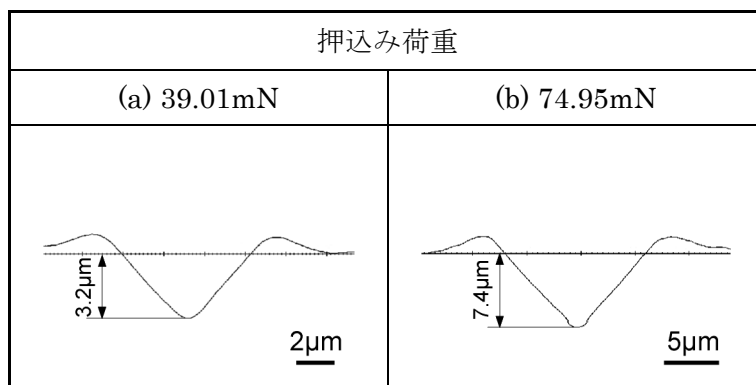


図 3.8 押し込み加工痕の断面形状

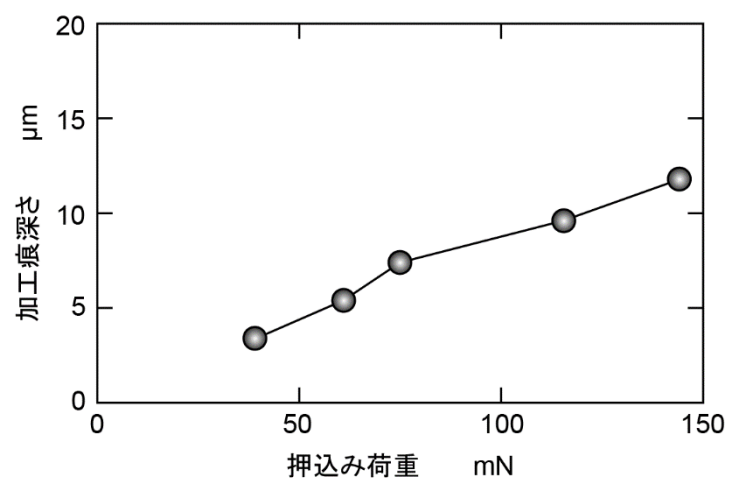


図 3.9 押し込み荷重と加工痕深さの関係

### 3.4 引っかき加工実験

#### 3.4.1 加工方向の検討

引っかき加工実験は、表 3.2 に示す条件で行った。図 3.10 は、引っかき加工実験の模式図である。引っかき加工実験は、まず押込み加工実験のように Z 軸ステージを押込み方向に移動してダイヤモンドアレイ工具の切れ刃を被削材に食い込ませた状態で Y 軸ステージを移動させることにより行った。また、本実験で用いたダイヤモンドアレイ工具の切れ刃は、四角錐形状であるため、加工方向によって加工特性が異なると考えられる。そこで回転ステージを回転させることにより加工方向を変化させ、引っかき加工実験を行った。被削材と工具は前節と同じものを用いた。

図 3.11 は、工具を Y 軸に対して $\alpha^\circ$ だけ回転させてから荷重 52.60mN で押込み、引っかき加工を行った場合の加工痕の SEM 観察像である。加工方向 $\alpha = 0^\circ$ および  $45^\circ$ の場合は、加工痕が直線的に形成されているが、 $\alpha = 15^\circ$ および  $30^\circ$ の場合は直線になっていない。これは、加工中の切れ刃と被削材の接触面積が、切れ刃稜線の両側で異なるためと考える。

図 3.12 は、図 3.11 で示した加工方向 $\alpha = 0^\circ$ および  $45^\circ$ の場合の引っかき加工痕の横断面形状である。加工痕深さはどちらの場合も約  $5\mu\text{m}$  とほぼ同じであるが、 $\alpha = 45^\circ$ の場合は開口部周辺で大きく盛り上がっていることがわかる。また、 $\alpha = 0^\circ$ の場合だけ、切りくず

表 3.2 引っかき加工実験条件

被削材		A1050
一刃あたりの押込み荷重	(mN/個)	41 ~ 184
引っかき速度	(mm/s)	0.8
切れ刃数	(個)	221

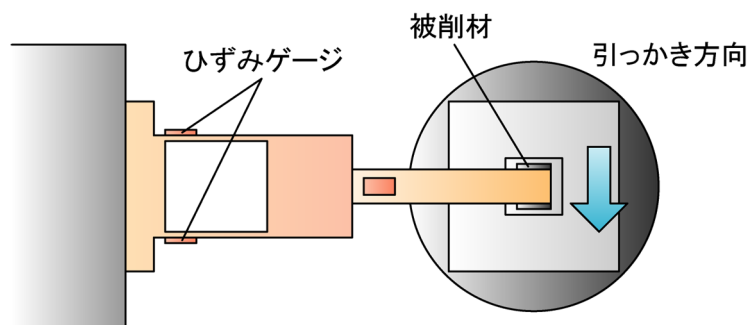


図 3.10 引っかき加工実験の模式図

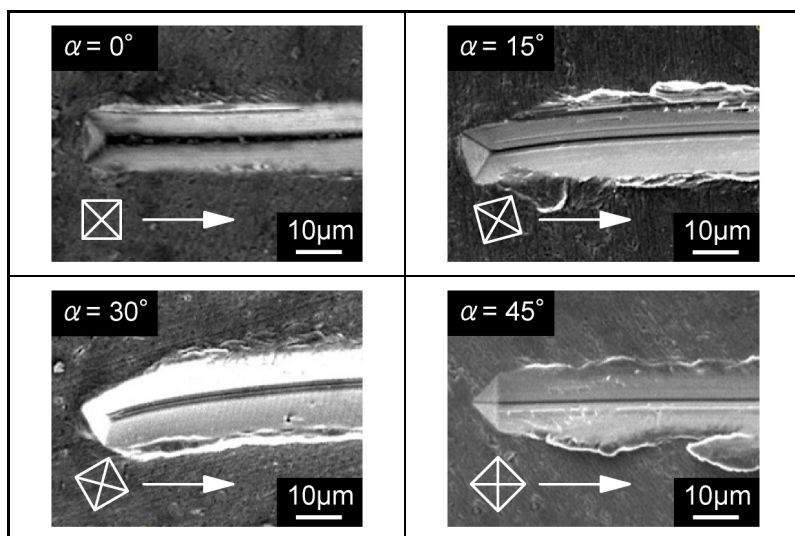


図 3.11 引っかき加工痕の SEM 観察像

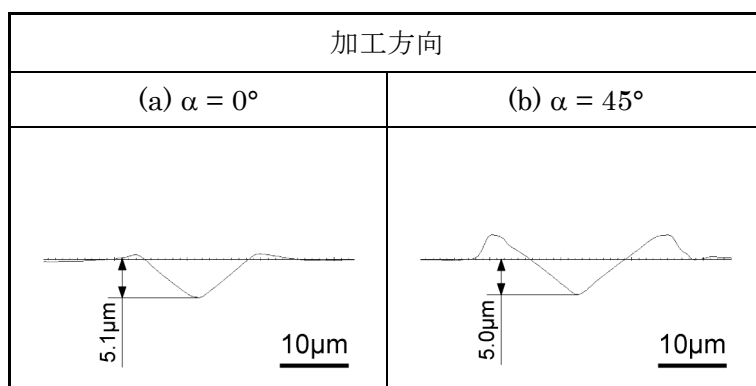


図 3.12 引っかき加工痕の横断面形状

の排出が確認された．このことから， $\alpha = 0^\circ$ のときは除去作用が支配的で， $\alpha$ の増加とともに押分け作用が支配的になっていくと考える．

図 3.13 は，加工方向と引っかき抵抗との関係である．加工方向の角度 $\alpha$ が大きくなるにつれて，引っかき抵抗は減少していく．

以上のことから，ダイヤモンドアレイ工具を加工用工具として用いる場合は，除去作用の最も大きい $\alpha = 0^\circ$ で加工を行うとよいと考える．

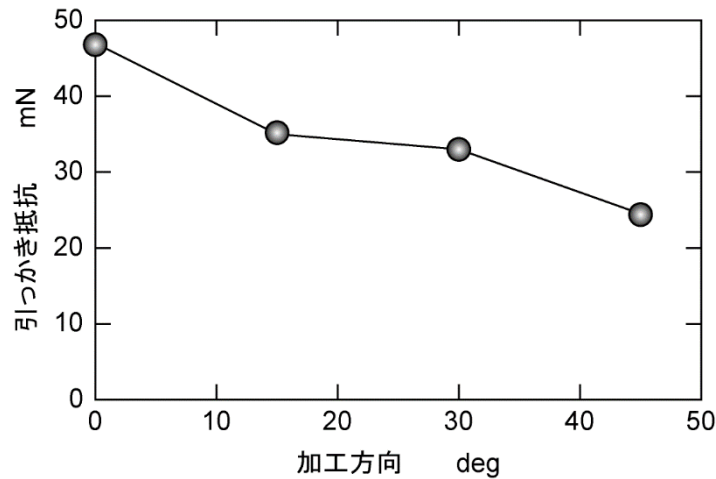


図 3.13 加工方向と引っかかり抵抗の関係

### 3.4.2 複数の切れ刃による引っかかり加工面の評価

複数の切れ刃で引っかかり加工面の評価を行う場合、加工面性状は加工方向と工具の配列に大きく影響を受ける。前節の結果から、加工方向については、除去能率を重視する場合は、 $\alpha = 0^\circ$ が最も適していた。これを踏まえて、以下のように検討を行った。

図 3.14 は、工具配列方向を変化させた時の加工方向 $\alpha$ と加工ピッチ $p$  ( $\mu\text{m}$ ) の模式図である。本実験で用いたダイヤモンドレイ工具の切れ刃間隔が  $500\mu\text{m}$  であることから、両者の間には以下の関係が成り立つ。

$$p = 500 \sin \alpha \quad (3.4)$$

したがって、 $\alpha$ を変化させることで任意の切れ刃間隔の加工が可能である。

図 3.15 は、異なる方法で引っかかり加工を行った場合の加工痕の SEM 観察像である。図中、(a) は加工方向  $\alpha = 0^\circ$ で加工を行った後、工具を引っかかり方向に対して垂直に  $15\mu\text{m}$  送り、加工を繰り返したものである（ピッチ加工）。また同図の (b) は、加工方向  $\alpha = 2^\circ$

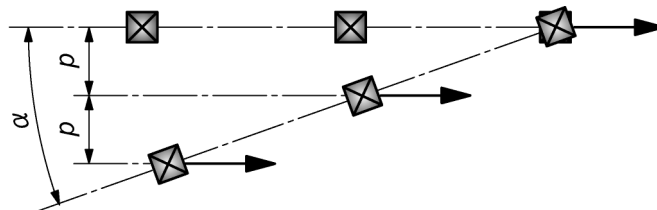


図 3.14 加工方向とピッチの関係

(ピッチに換算すると式 (3.4) より  $p=17.4\mu\text{m}$ ) で 1 回だけ加工を行ったものである (傾斜加工). このときの垂直荷重は, それぞれ  $52.60\text{mN}$ ,  $53.80\text{mN}$  である. 両加工法とも, 切れ刃が通過した様子がはっきりと観察され, 加工痕にもほとんど差異は見られない. したがって, ダイヤモンドアレイ工具を用いて広範囲の加工を行う場合,  $\alpha$  の値が小さい範囲では,  $\alpha = 0^\circ$  と同等の加工が可能であると考える.

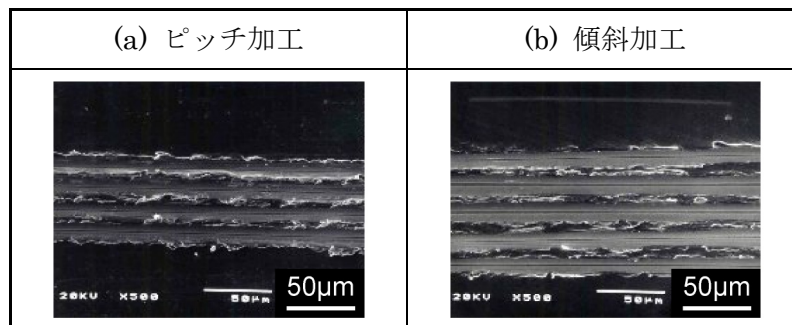


図 3.15 ピッチ加工と傾斜加工の加工痕

つぎに, 加工痕の相互干渉について検討を行った. 図 3.16 は, 工具の送り量を変化させ,  $\alpha = 2^\circ$  一定で加工を行ったときの加工痕を観察したものである. 工具送り量は, それぞれ (a) が  $90\mu\text{m}$ , (b) は,  $10\mu\text{m}$  である. 同図 (a) の場合, 加工痕に干渉は見られず, その加工形態も除去作用があるものの, 押分け作用が主であった. 一方, 同図 (b) の場合, 加工痕に干渉が見られ, また同一個所が複数回加工されるため, 切りくずも (a) の場合よりも多く発生した. 実際にダイヤモンドアレイ工具を加工用工具として用いる場合, 後者の加工条件に近い場合, 能率の高い除去加工が可能である.

図 3.17 は, 引っかき加工を行った直後の切れ刃を観察したものである. 図からわかるように, 加工後の切れ刃に破損は見られず, 他の条件で行った加工の場合も同様であった. このことから, ダイヤモンドアレイ工具は精密加工用工具としての性能を有していると考えられる.

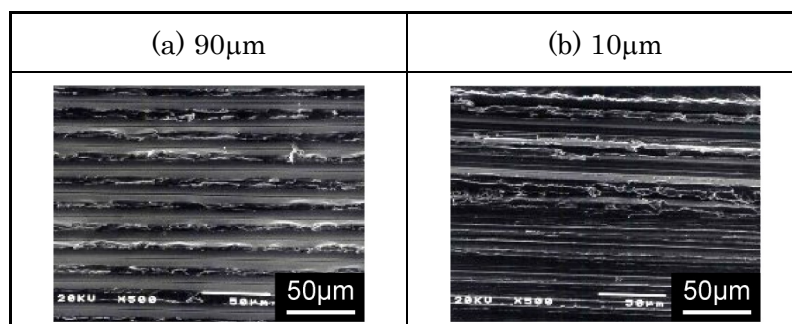


図 3.16 異なる工具送り量の加工痕

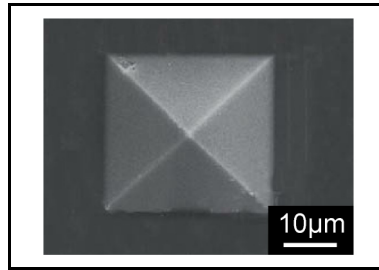


図 3.17 加工後のダイヤモンドアレイ工具

これまで示したように，ダイヤモンドアレイ工具を用いることで，切れ刃間隔や切り込み深さなどの因子を特定した加工を行うことができる．このことを利用して，研削抵抗や研削面あらさ等の理論解析の検証に有効であると考ええる．たとえば，工具形状から切削抵抗を算出する場合，松井ら<sup>1)</sup>は研削工具の切れ刃を円錐にみたてて理論式を算出している．この方法は切れ刃形状を円錐として仮定しているが，実際の切れ刃形状とは異なるため生じる誤差が大きい．しかし，ダイヤモンドアレイは工具形状が既知であり，その加工性も優れていることから，正確な切削抵抗の算出が可能であると考ええる．また，研削抵抗のみならず，砥粒切り込み深さ，平均切りくず断面積，研削面あらさなどの検証にも有用と考える．



### 3.5 結 言

本章では、前章で提案したダイヤモンドアレイ工具の工具性能を評価するために、押し込み加工と引っかき加工の 2 種類の加工を想定した工具性能評価装置を作製し、加工実験を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 押し込み荷重, 引っかき荷重ともに 200mN 以上の荷重を測定することが可能な工具性能評価装置を試作した。
- (2) ダイヤモンドアレイ工具を用いて押し込み加工を行った結果、規定された押し込み加工痕形状と配列の加工が可能であった。
- (3) ダイヤモンドアレイ工具の切れ刃が四角錐形状しているため、引っかき方向により加工形態が異なり、引っかき抵抗にも差異が見られるが、加工痕の深さはほぼ同じであった。
- (4) 複数の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具を用いて引っかき加工を行った結果、能率の高い除去加工が可能であった。
- (5) いずれの加工を行った場合でも、加工後のダイヤモンドアレイ工具に破損は見られなかった。

以上のことから、ダイヤモンドアレイ工具は、精密加工用工具としての性能を有していると考えられる。

## 参考文献

- 1) 松井正己, 庄司克雄: 精密機械, 35, 4 (1969) 235.

## 第4章 1立方インチサイズ超小型フライス盤と 微細加工用回転工具の開発

### 4.1 緒言

ナノメータスケールでの機械加工技術には、工作機械の高精度化とともに切削工具の高精度化が必須となる。第2章において、単結晶シリコンのエッチング技術と多結晶ダイヤモンドの CVD 技術を併用したダイヤモンドアレイ工具の作製方法について提案した。この工具は、切れ刃形状と配列を精密に規定できるという特徴をもっている。また第3章では、この工具を用いて押し込み加工と引っかき加工を行い、精密加工用工具としての基礎的な特性について検証を行い、その有用性について示した。

一方、超精密加工技術の発展とともに、ナノメータスケールの機械加工技術が求められている。このような背景から、FFM 機構の表面観察機能をベースに加工用探針の交換機能、位置決め制御機能や加工機としての機能の付加・充実を図るとともに、1nm 単位での機械加工と計測を同一機構上で安定して実現し、様々な操作環境や設置場所に対応可能な自立型3次元ナノ加工・計測システムの開発を進めている<sup>1)</sup>。

図4.1は、開発中の自立型ナノ加工・計測システムの概観である。現在、加工用探針と測定用探針の交換機構により加工と計測を行うことができる。この探針交換機構上にナノフライス盤を装着することにより、探針の切削機能だけでなくフライス機能を有する自立型3次元ナノ加工・計測システムが可能となると考える。

本章では、3次元ナノ加工機のカンチレバーのひつつとして、一辺が1インチの立方体内に収まる超小型フライス盤（以下、ナノフライス盤）の開発を行った。この開発したナノフライス盤にダイヤモンドアレイ工具を装着し、フライス加工実験を行い、ダイヤモンド

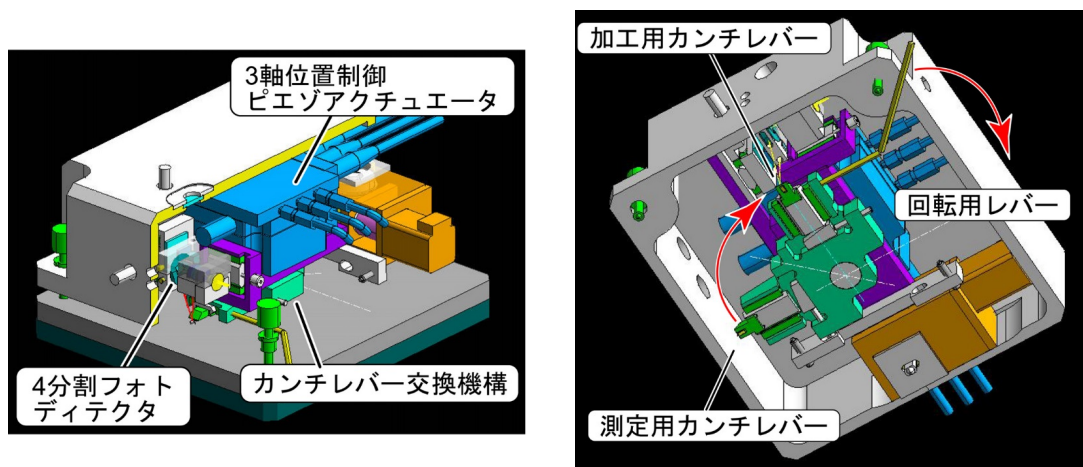


図 4.1 自立型3次元ナノ・加工システムの概観

アレイ工具の精密加工用工具としての有用性について検証した。

また，通常の精密加工用工作機械にも装着可能な微細加工用回転工具の開発についても検討を行った．超硬製シャンクの軸端に，切れ刃となるダイヤモンド切れ刃群あるいは 1 粒子を装着して微細加工用回転工具を作製した．さらに，工具精度を向上させるために，工具取り付け装置を新たに作製し，ダイヤモンド切れ刃とシャンクをマイクロメーターオーダーの精度で位置決めした微細加工用回転工具を試作し，その工具の評価を行った．

## 4.2 ナノフライス盤の開発

### 4.2.1 ナノフライス盤の仕様

表 4.1 および図 4.2 は，開発するナノフライス盤の仕様と模式図である．被削材に対してナノメートルオーダーの加工精度を実現するため，駆動には切り欠き弾性ヒンジとピエゾ素子を使用した．工具交換のプロセスを考慮して，Y ステージは取り外し可能な構造とし，その稼動部分に切削抵抗測定のために小型圧力センサを介して被削材を固定することとした．加工機本体の寸法を 1 辺が 1 インチの立方体内と想定し，その寸法内に収まるよう各ステージの構成を工夫した．加工機本体の小型化により，全体の重心を低位置にする必要があるため，横型フライスとした．そのため，Z ステージをベースとして，固定台を介して Y ステージを固定し，Z ステージの稼動部直上に X ステージを固定する構造とした．また，主軸モータは，X ステージの稼動部分に固定した．

表 4.1 ナノフライス盤の仕様

加工機寸法	23.0×25.4×25.0mm
主軸	ブラシレス DC モータ (φ1.9mm)
ステージ移動距離	X : 12μm, Y : 12μm, Z : 12μm
駆動源	ピエゾ素子 (最大ストローク : 9μm)
位置検出センサ	非接触式変位センサ (分解能 : 5nm)
切削力測定センサ	小型圧力センサ (定格容量 : 200kPa)
材質	アルミニウム合金 (A7075)

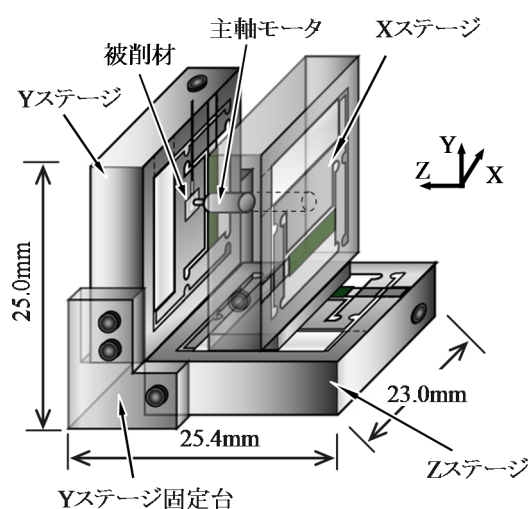


図 4.2 ナノフライス盤の模式図

ナノフライス盤の主軸には，超小型ブラシレス DC モータ（FAULHABER：0206B）を使用した．図 4.3 は，主軸モータの概観模式図，表 4.2 は，主軸モータの仕様である．外径 1.9mm，長さ 6.8mm，重量 91mg と非常に小型であるため，ナノフライス盤の小型化に最適であると考えた．最大回転数は  $100,000\text{min}^{-1}$  である．これに，スピードコントローラ（FAULHABER：SCBL 16002）を組み合わせ，主軸回転数を調整できるようにした．主軸モータの軸端に，ダイヤモンドアレイ工具を直接接着し，フライス用工具とした．

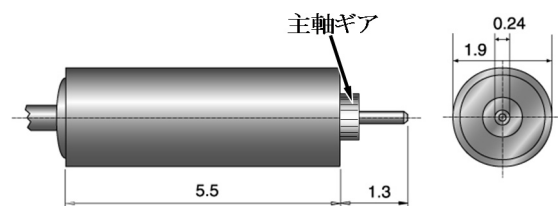


図 4.3 主軸モータ概観模式図

表 4.2 主軸モータの仕様

最大回転数	( $\text{min}^{-1}$ )	100,000
最大トルク	( $\mu\text{Nm}$ )	7.5
重量	(mg)	91

#### 4.2.2 ステージの構造解析

図 4.4 は、ナノフライス盤ステージの外観模式図である。各ステージの駆動には piezo 素子（piezomechanics : PSt150/2×3/7）と切欠き弾性ヒンジを組み合わせた平行板ばねを用いて、19×19×5mm の超小型ステージの微小駆動を可能とした。piezo 素子の寸法は 2×3×9mm で、印加電圧が 150V のとき最大ストローク 9μm を発生する。これを切欠き弾性ヒンジにより、ステージの最大ストローク 12μm を実現した。

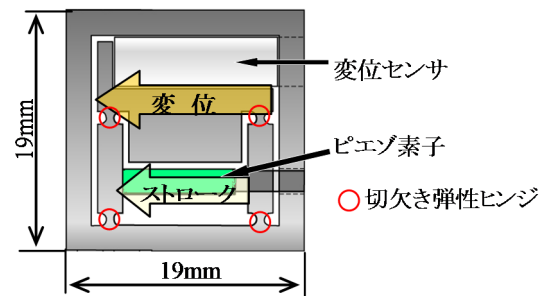


図 4.4 ステージ模式図

一般に、弾性ヒンジは摩擦によるスティックスリップがなく位置決め精度を向上でき、発熱が少なく移動速度を上げられるという長所を持っている。しかし剛性が低く、それを補うために切欠き部の肉厚を厚くすれば弾性変形のためのエネルギー損失が大きくなり、十分な性能が得られなくなる。そのため、精度を維持しつつ、損失を少なくする設計が必要となる。切欠き弾性ヒンジ機構を用いる上で最も重要となるのは、切欠き部の厚さの決定である。そこで、有限要素解析ソフト ANSYS による解析を行った。

図 4.5 は、切欠き厚さを 1.0mm, 0.8mm, 0.6mm, 0.4mm としたときの、ステージの 2 次元構造解析による相当応力分布図である。解析の結果、切欠き厚さ 1.0mm, 0.8mm では、切欠き部以外にも応力が分布している。0.4mm では、切欠き部に応力集中が生じている。一方、切欠き厚さが 0.6mm では、応力は切欠き部のみに集中し、切欠き部の最大応力が材料の降伏応力に達しないことから、切欠き厚さ 0.6mm が最も適当であると判断した。

ステージの稼動部の変位を X と Y 方向で考えた場合、切り欠き弾性ヒンジを利用しているため、ステージを X 方向へ変位させたときわずかに Y 方向の変位も生じる。そこで解析ソフト ANSYS によりステージの変位量を解析した。

図 4.6 は、ステージの X 方向および Y 方向の変位量である。解析の結果、Y 方向の変位量は X 方向の変位量の 5.45% であることがわかった。これはステージを 12μm 変位させた場合、Y 方向に 0.654μm 変位することになる。ナノフライス盤では、この Y 方向変位量を考慮し、各軸方向の変位量の制御を行うこととした。

各ステージの変位検出は、超小型の静電容量式変位センサ（ナノテックス : AX10-50）を各ステージ内に組込むことで行った。非接触静電容量方式変位センサは、対向金属の変

位を静電容量の変化として検出し、電圧に換算して出力する。変位センサの最高分解能は 5nm で、外径 4mm と小型であるため、ナノフライス盤のステージ位置検出機構として最適であると判断した。

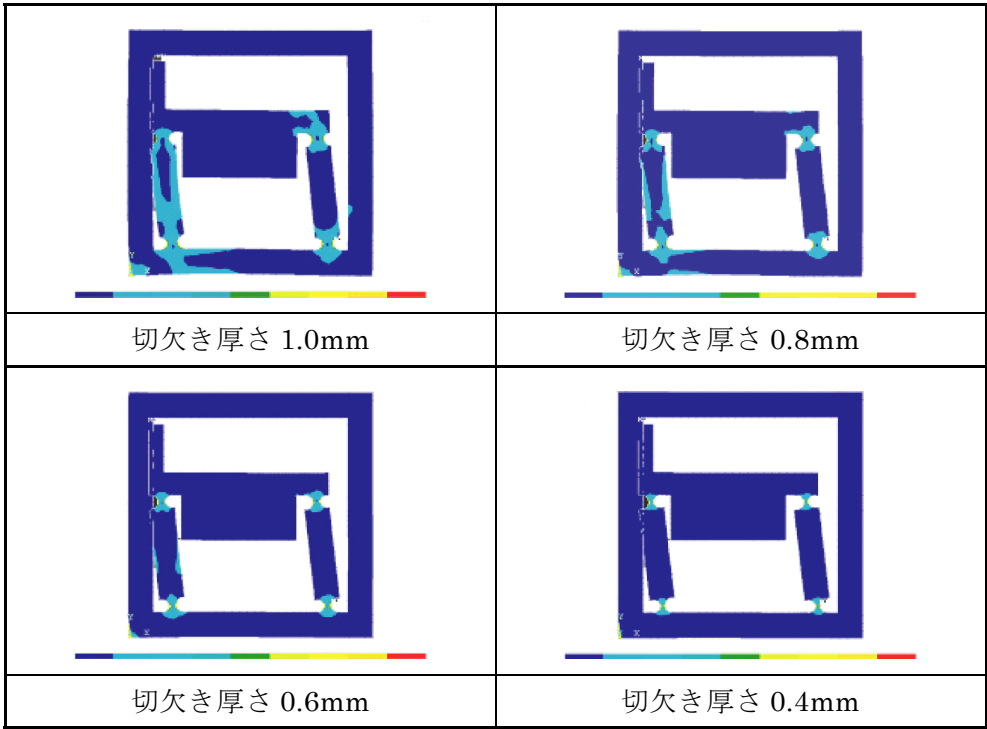


図 4.5 2次元構造解析結果

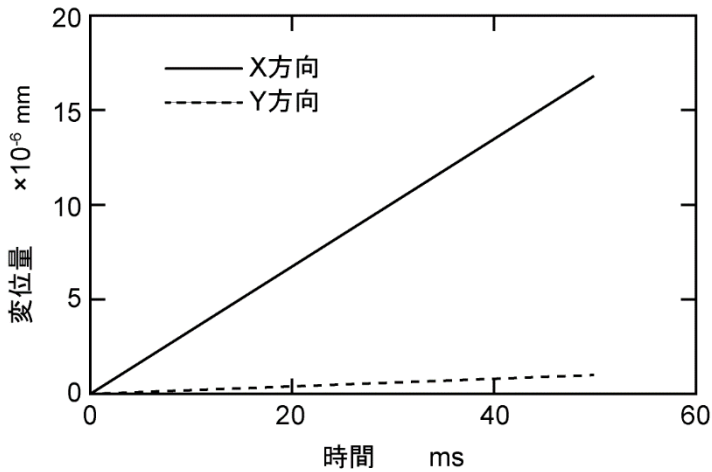


図 4.6 XおよびYステージの変位量



#### 4.2.3 Xステージの構造

前項の解析結果をもとに、各ステージの構造を決定した。図 4.7 は、X ステージの模式図である。駆動には切り欠き弾性ヒンジとピエゾ素子を利用する。ピエゾ素子をネジの押付で固定することにより、ネジを回すことで粗動を行うことができる。このステージの可動部の中心に、主軸モータを取り付ける構造とした。本ステージの最大ストロークは、駆動用のピエゾ素子とてこの原理より  $12\mu\text{m}$  となる。また、非接触式変位センサを組み込むことによりステージの位置検出を行うことができる。

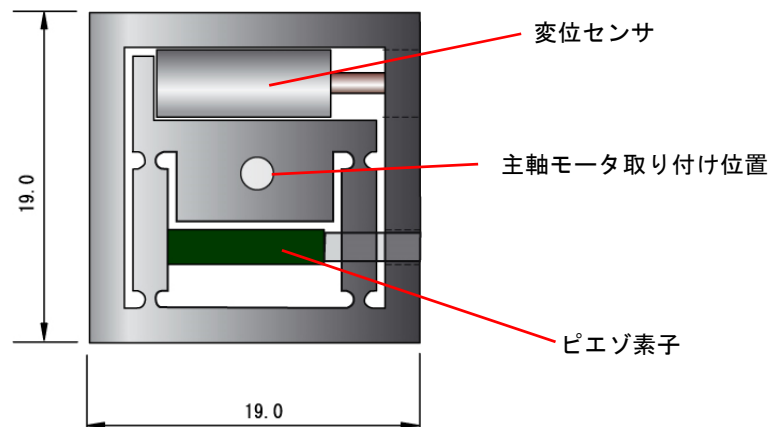


図 4.7 X ステージの模式図

#### 4.2.4 Yステージの構造

図 4.8 は、Y ステージの模式図である。このステージには、切削抵抗を測定するため小型圧力センサを搭載しており、それ以外は X ステージの構造と同様である。

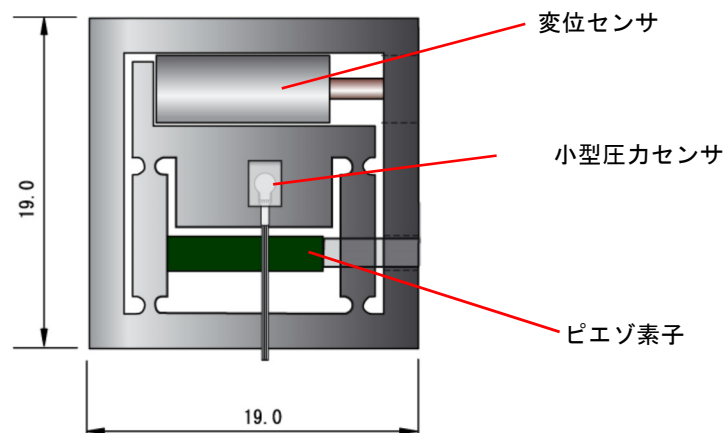


図 4.8 Y ステージの模式図

#### 4.2.5 Zステージの構造

図 4.9 は, Z ステージの模式図である. このステージには, X ステージの固定穴があり, それ以外は他のステージの構造と同様である.

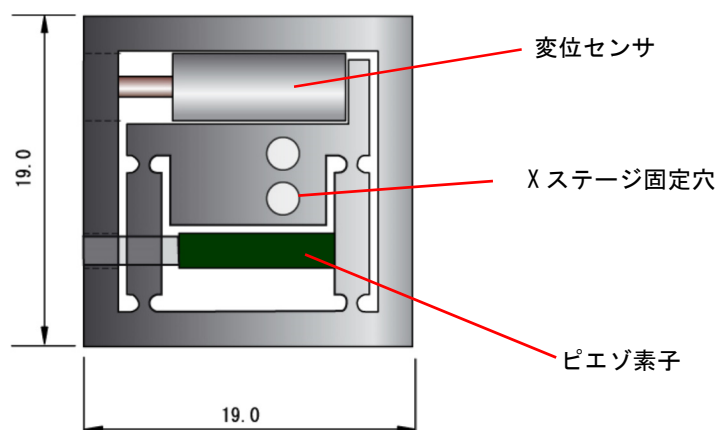


図 4.9 Z ステージの模式図

図 4.10 は, Y ステージ固定台を介して Z ステージと Y ステージを垂直に固定した図である. Z ステージはネジを用いて完全に締結するが, Y ステージはネジの押し付けにより固定する. そのため, Y ステージの取付け位置は, Z ステージに対して自由となり, 簡易的に粗動機構の役割を果たす.

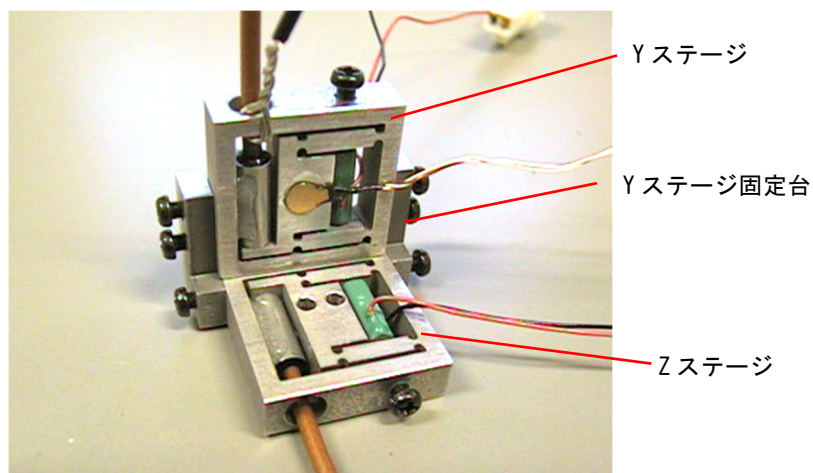


図 4.10 Z ステージと Y ステージの固定

#### 4.2.6 ナノフライス盤の試作

図 4.11 は，試作したナノフライス盤の概観図である．本体寸法は  $25.4 \times 23.0 \times 25.0\text{mm}$  となり，1 辺が 1 インチ ( $25.4\text{mm}$ ) の立方体内に収めることができた．各ステージが簡単に取り外せるため，フライス用工具（主軸モータ）や被削材の交換が容易にできる．X ステージと Y 軸ステージの距離は，Y ステージ固定台により調整できるため，被削材の寸法に応じて，適宜切削可能な距離まで近づけることができる．

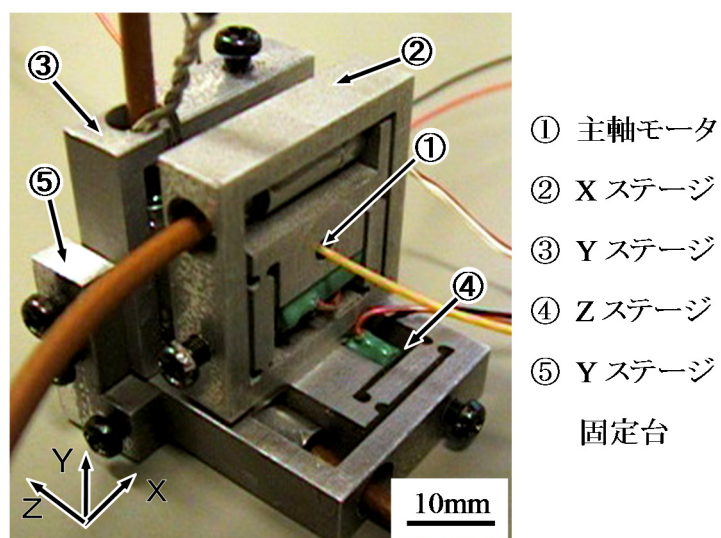


図 4.11 ナノフライス盤の概観図

### 4.3 ナノフライス盤制御システムの開発

#### 4.3.1 ナノフライス盤制御システムの構成

本ナノフライス盤は X, Y, Z ステージ駆動用に 3 個の圧電素子と、主軸にブラシレス DC モータを使用している。本節では、これら圧電素子とモータをパソコンから制御するシステムについて述べる。これにより、マウスを用いたマニュアル操作と NC プログラムによる動作を可能とした。

図 4.12 は、ナノフライス盤制御システムの構成図である。本フライス盤の制御は、パソコンを用いて CNC 制御で行った。開発した制御システムは、パソコンに内蔵した圧電ドライバ、変位センサアンプ、モータコントローラ、デジタルレコーダから構成されている。Visual Basic で作成した NC プログラムに従って、圧電ドライバから印加電圧を出力することにより、圧電素子の駆動を行った。ステージの位置決めは、変位量を非接触式静電容量変位センサで検出し、パソコン上で位置決め誤差を計算させ、誤差分の電圧を圧電素子に出力する自己フィードバック制御で行った。また、小型圧力センサからの電圧をデジタルレコーダに記録することで、切削抵抗の測定を行った。

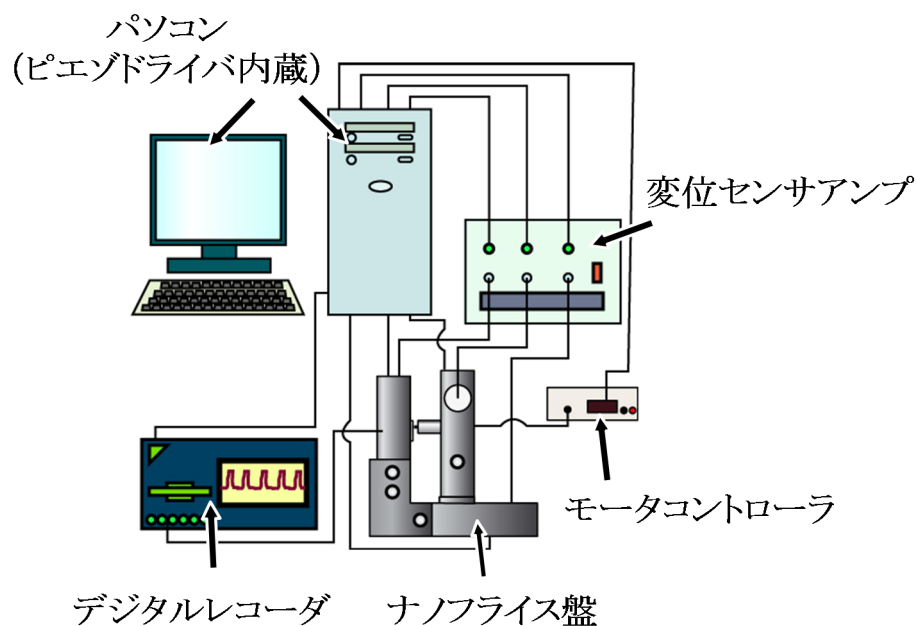


図 4.12 ナノフライス盤制御システムの構成

#### 4.3.2 主軸モータの制御

主軸モータは、コントローラ操作によるアナログ制御と、コントローラをパソコンに接続したパソコン制御がある。図 4.13 は、主軸モータと専用のスピードコントローラ（FAULHABER : SCBL 16002）の外観である。このコントローラは DC12V 電源を供給することにより、コントローラ単体で主軸モータを手動で駆動することができる。しかし、この場合はモータの回転数を確認できないため、正確な回転数で制御するためには、パソコン上で制御する必要がある。パソコンとの通信には、RS232C ケーブルを使用する。

主軸モータをパソコンで制御する場合、windows 上では問題があったため、DOS 上で制御を行うことにした。DOS 上のプログラムでは、パソコン制御とコントローラ制御の切り替え、モータの回転数、モータの回転方向、回転数の上昇速度、出力電圧を指令できる。このプログラムを使用すると、モータを最高 131,070rpm で回転させることができる。また、パソコンで回転数を指令するとき、コントローラに内蔵されているフィードバックシステムにより、モータの回転数を一定に保つことができる。パソコンに接続した状態で、アナログ制御とパソコン制御の切り替えを行うことができるため、パソコン上でアナログ設定を確認することにより、パソコンと接続しない状態でも任意の回転数でモータを回転させることが可能である。

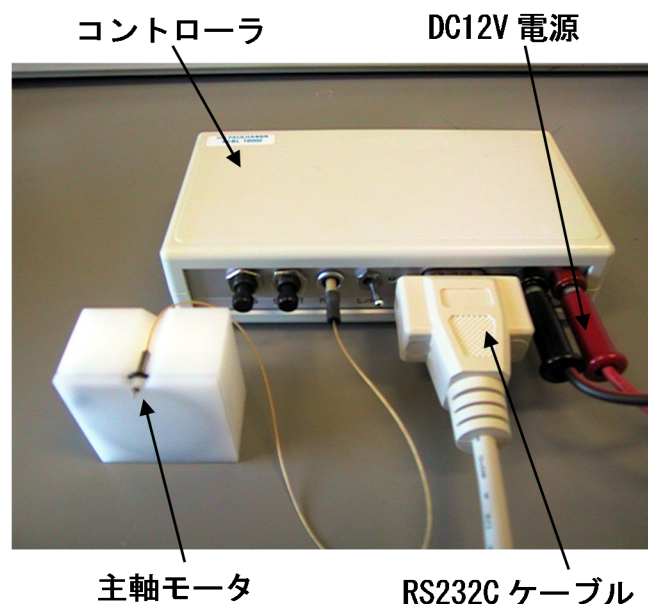


図 4.13 主軸モータとコントローラ

### 4.3.3 ピエゾ素子の制御

ピエゾ素子（ピエゾメカニック：PSt150/2x3/7）の駆動には、ピエゾ素子用の PCI ボード（ピエゾメカニック：PC-AHV+150/3）を使用した。ピエゾ素子は印加電圧を与えることにより伸張する。使用したピエゾ用 PCI ボードは、3 軸同時に制御が可能で、アンプを介さずに最大 150V の電圧を出力することができる。この PCI ボードの機能には、デバイスの認識、PCI ボードの検知、DA 変換、電圧の印加、電圧モニタの表示（エラー表示）などがある。電圧の印加機能は、指定した電圧をパルス信号で送るため、滑らかに上昇させる機能はない。また、この PCI ボードには内部カウンター機能がなく、ステージの送り速度を設定することができない。そのためプログラム上でステージの送り速度設定機能を付加する必要がある。電圧モニタの表示機能では、電圧を印加する際にエラーが生じた場合、エラー信号を検知することができる。このエラー検知機能は、プログラム上でのエラーの他、ピエゾ素子の配線不良によるエラーの場合にも有効である。

ピエゾ素子の制御システムに使用したプログラム言語は、Visual Basic を用いた<sup>3)</sup>。図 4.14 は、ピエゾ素子操作ウィンドウである。ウィンドウ上部では各軸ステージ用ピエゾ素子の印加電圧値を設定する。DAC は実際に PCI ボードの DA 変換器に入力するレジスタの値、Volt は出力電圧である。Volt の値を設定すると、自動的に DAC の値を Volt に対応した値に書き換え、PCI ボードに必要な情報を入力する。印加電圧を設定した後、Voltage On ボタンをクリックすることによりピエゾ素子に印加電圧を与えることができる。エラー表示部では各軸のピエゾ素子のエラー状態をモニタリング可能とした。

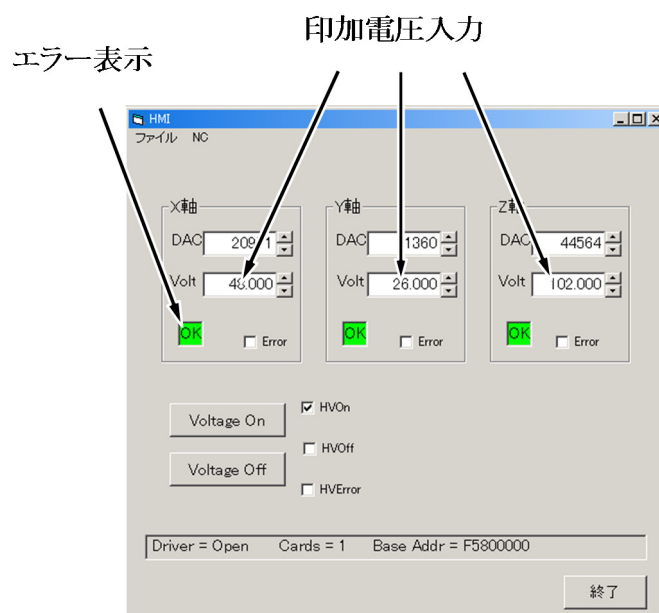


図 4.14 ピエゾ素子操作ウィンドウ

#### 4.3.4 パソコンによる NC 制御

ナノフライス盤のパソコン NC 制御を行うために、Visual Basic による NC 制御プログラムを開発した。図 4.15 は、NC 制御ウィンドウである。ここでは、テキスト形式で記述した NC プログラムをメニューから読み込み、実行することを可能とした。また、G コードボックスに直接書き込むことで、その NC プログラムの実行を可能とした。

ナノフライス盤のステージ変位量は、最大で  $12\mu\text{m}$  と非常に小さく、目視で変位量を確認することはできない。そこで、視覚的にステージの動きを確認できるよう、軌跡描画ボックスを製作した。ここでは、ナノフライス盤の X 方向および Y ステージの動きを拡大して描画する。これによりステージの変位量が目視で確認できる。NC 制御ウィンドウの下部では、マウスによるマニュアル操作を行うことができる。また、ウィンドウの下部右側には、そのときの印加電圧値を表示する。

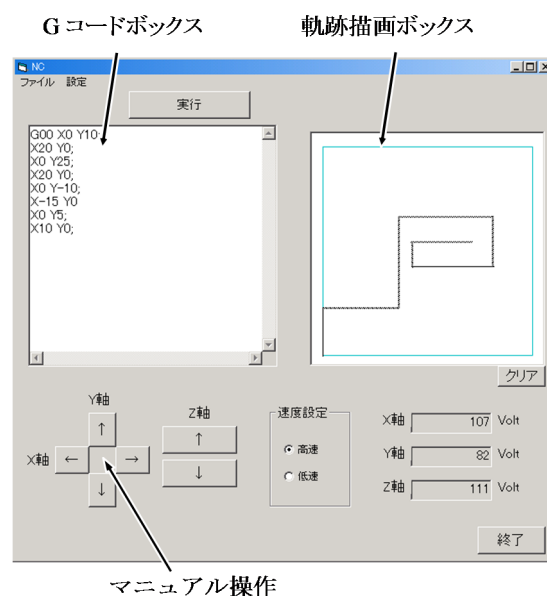


図 4.15 NC 操作ウィンドウ

#### 4.3.5 ステージの送り速度の設定

ナノフライス盤の機能として、切削を機能的に行うためステージの送り速度を設定する必要がある。しかし、ピエゾ用 PCI ボードには内部カウンターが存在しないため、そのままでは送り速度を設定することができない。そこで、プログラム上のカウンターを用いることで、送り速度設定機能を付加した。まず、この機能を Visual Basic に用意されているタイマーコントロールで行った。

図 4.16 は、Visual Basic に用意されているタイマーコントロールで送り速度設定を行ったときの時間とステージ変位量の関係である。時間を読み込むステップが粗いため、送り曲線は階段形状を描く。そこで本システムでは、Visual Basic のタイマーコントロールではなく、Windows に内蔵されている API の TimeSetEvent を用いて Windows 側から 1ms ごとに関数を呼び出し、印加電圧を加えることにした。

図 4.17 は、API の TimeSetEvent で送り速度設定を行ったときの時間とステージ変位量の関係である。時間を読み込むステップを短く、さらに正確に行うことができ、滑らかな送り曲線となった。この制御により、送り速度設定の精度を向上させることが可能となった。

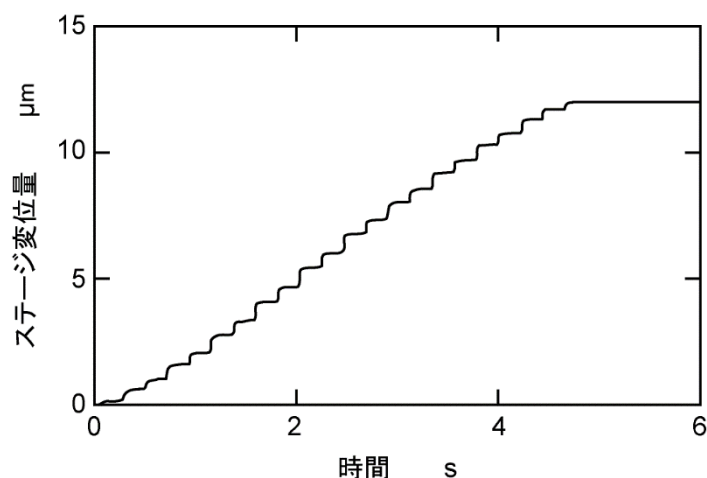


図 4.16 Visual Basic のタイマーによる送り速度設定



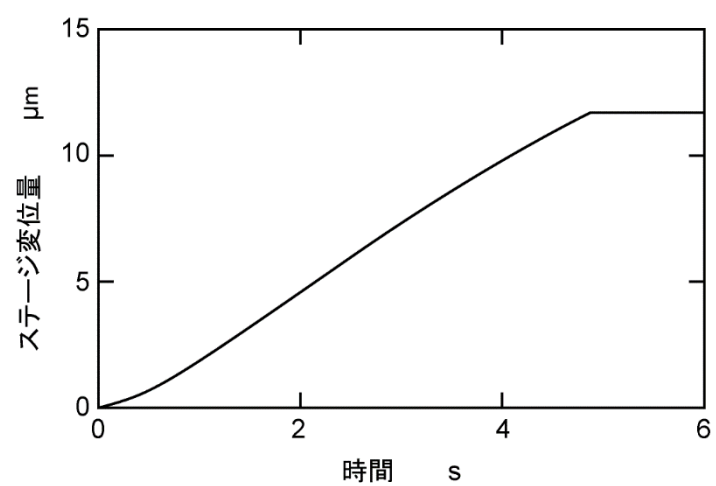


図 4.17 API の TimeSetEvent による送り速度設定

#### 4.3.6 変位量データの取り込み

本ナノフライス盤の各ステージには，ステージ位置検出のために非接触式静電容量変位センサを組み込んでいる．この変位センサはアンプ（ナノテックス：PS-Ⅲ）を介して，デジタルレコーダやパソコンに電圧信号を取り込むことができる．このアンプからの電圧信号をパソコンに取り込むためには，別途 AD 変換ボードが必要となる．そこで，分解能 16bit, サンプル周波数 200kHz, 入力チャンネル数 16 の性能を有する AD 変換ボード（NATIONAL INSTRUMENTS：NI PCI-6014）をパソコンに組み込んだ．この AD 変換ボードは Visual Basic に対応しているため，ピエゾ素子制御用プログラムに変位センサの信号を取り込む機能を付加することが可能である．

また，出力した電圧に対し実際の変位をリアルタイムで確認するため，変位センサ信号入力システムを作成した．図 4.18 は，作成した変位センサ信号モニタ部である．センサの信号を描画するためのグラフは Measurement Studio for Visual Basic を使用し，変位センサの出力値をリアルタイムで描画した．電圧の振幅に対して，グラフの電圧値の軸は自動的に伸縮する．ステージの変位が  $50\mu\text{m}$  のとき，変位センサからの出力電圧は 10V で，両者は良好な線形関係を示した．図 4.18 の波形は，ステージを停止状態にしているときの変位センサのノイズを描画した物である．最大振幅が 0.005V となっているので，測定時の誤差は最大で 25nm 程度になる．このことから，ノイズ対策が必要であることがわかった．そのため，ナノフライス盤にアース線を接続し，変位センサの測定精度を上げて動作させることにした．

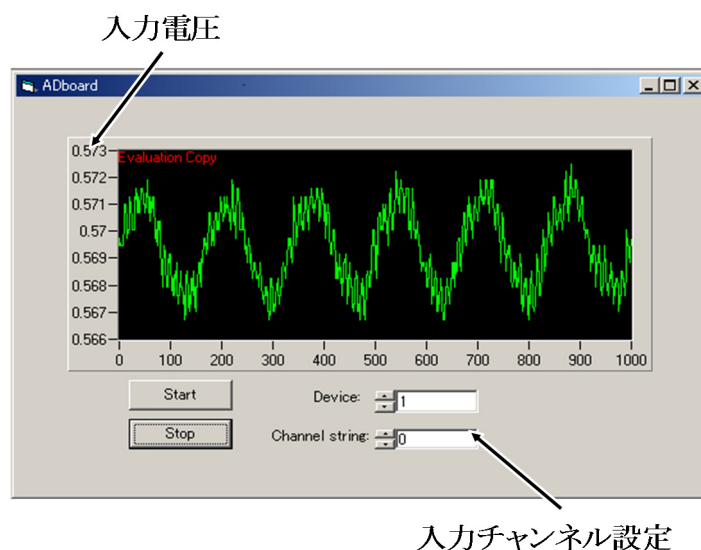


図 4.18 変位センサ信号モニタ部

## 4.4 ステージの性能評価

### 4.4.1 ステージの応答性

ステージの駆動に使用している piezo 素子のヒステリシス現象<sup>3)</sup>のため，伸びと戻りでは応答性が異なる．そこで，piezo 素子単体での応答性と，ステージに組み込んだ際のステージの応答性を比較した．

図 4.19 は，piezo 素子単体の変位量の測定装置の概観図である．変位量の測定には，ナノフライス盤のステージに使用する非接触式静電容量変位センサを使用した．静電容量変位センサは，レーザ変位計とは異なり，変位センサと piezo 素子とミクロン単位で近づけなければならないため，マイクロ旋盤の微動ステージを利用した．微動ステージ側には変位センサを固定し，対面には鉄の角材にロウで固定した piezo 素子を固定して，互いの距離を調整する．piezo 素子の端面にはアルミホイルを貼り付け，piezo 素子の端面を変位センサ用の対向金属とし検出できるようにした．また，アルミホイルに変位センサのアース線を取り付け，変位センサの測定精度を向上させている．

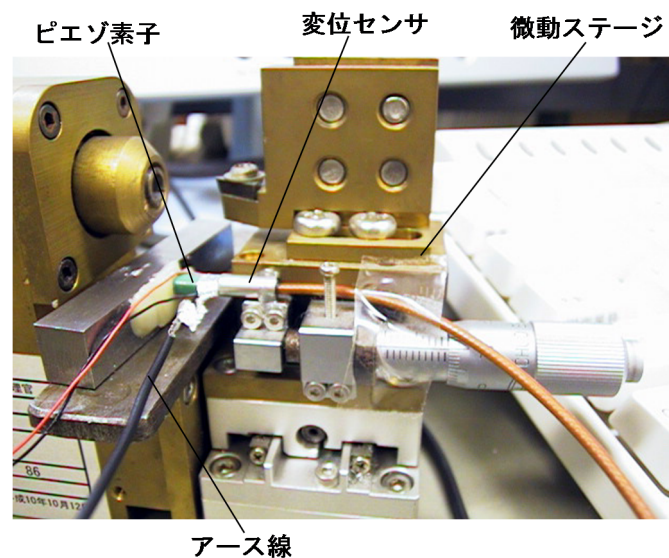


図 4.19 変位量の測定装置の概観図

図 4.20 は、ピエゾ素子の変位曲線である。グラフはピエゾ素子を最大変位 ( $9\mu\text{m}$ ) させたときの変位センサが出力した電圧を示している。ピエゾ素子単体の応答と比較するため、ステージに組み込んだピエゾ素子に最大変位を与えたときのステージの応答も測定した。

図 4.21 は、ピエゾ素子の伸びと戻りに対するステージの変位曲線である。ピエゾ素子単体で見た場合、ピエゾ素子の最大変位量まで達する時間は約  $0.05\text{s}$  と非常に早いものとなっているが、戻りの際は約  $1.5\text{s}$  の時間を要し、その後ゆっくりとゼロ点まで戻る。ステージ応答の軌跡と比較してみても、ピエゾ素子の応答の軌跡とほぼ同じ軌跡になっている。ステージの最大変位量に達する時間は約  $0.06\text{s}$  で、戻りに要する時間は約  $1.5\text{s}$  であり、その後ゆっくりとゼロ点に戻る。

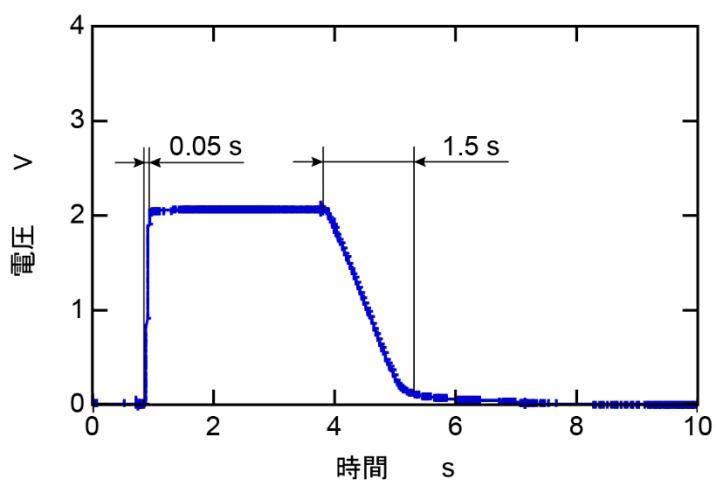


図 4.20 ピエゾ素子の変位曲線

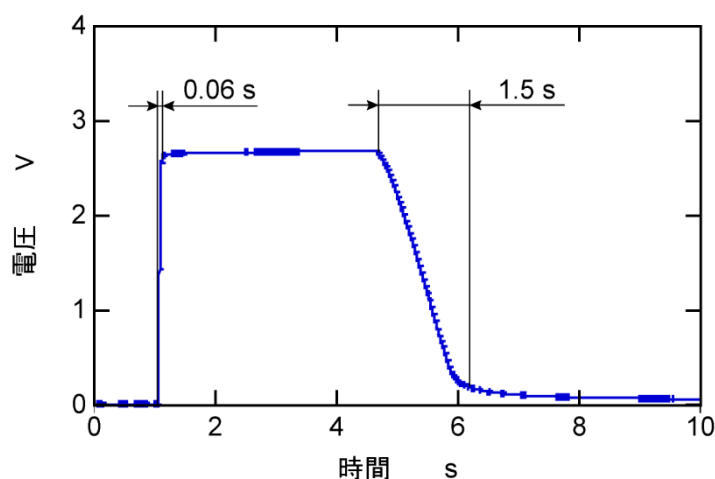


図 4.21 ステージの変位曲線

ピエゾ素子単体でも戻りの応答性が悪いことが確認できたが、ピエゾ素子自身よりもピエゾ素子に電圧を加える電源に問題があると考え、ピエゾ素子用電源の応答性を測定した。

図 4.22 は、ナノフライス盤に使用するピエゾ素子用 PCI ボードの印加電圧曲線である。測定に使用した変位センサ用 AD 変換ボードの入力電圧範囲  $\pm 0.05 \sim 10 \text{ V}$  であるため、ピエゾ用 PCI ボードから  $10 \text{ V}$  の電圧を出力したときの応答性を測定した。電圧を出力する際は最大電圧まで  $0.005 \text{ s}$  であるが、 $0 \text{ V}$  まで戻す際は約  $0.6 \text{ s}$  の時間を要する。このことから、電源ボード自身の戻りの応答性がピエゾ素子の応答性に影響していると考える。しかし、ナノフライス盤ではステージの送り速度を設定する必要から、パルス波ではなく三角波のような信号を送るので、応答性が悪い箇所も補償することができると考える。

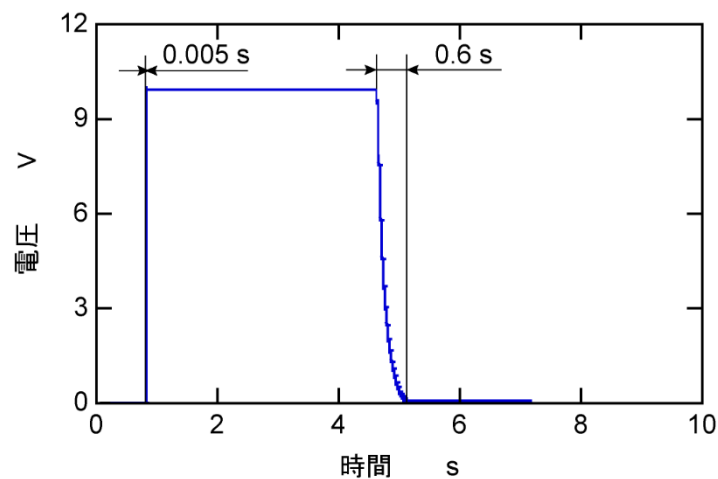


図 4.22 ピエゾ素子用 PCI ボードの印加電圧曲線

#### 4.4.2 ステージ変位誤差の補償

ピエゾ素子のヒステリシス現象や応答の遅れなどから、ステージを高精度に位置決めすることは困難である。そこで、制御システムに位置決め誤差を補償する機能を付加した。この補償機能は、実際に得たステージの変位量と理論変位量の誤差を測定し、その誤差から得た補償のための近似関数を制御文に組み込むことで、ステージの変位誤差を修正するものである。図 4.23 はステージを原点から最大変位  $12\mu\text{m}$  まで速度  $2.4\mu\text{m/s}$  で送ったときの、時間とステージ変位量の関係、図 4.24 は補償関数加えた場合の時間とステージ変位量の関係、図 4.25 は使用した補償関数である。補償前のステージ変位の理論送り量と実際の送り量の誤差は、最大で  $0.115\mu\text{m}$  となる。補償後のステージ送り変位は、理論送り量に対し最大で  $0.055\mu\text{m}$  となり、約 47%改善された。

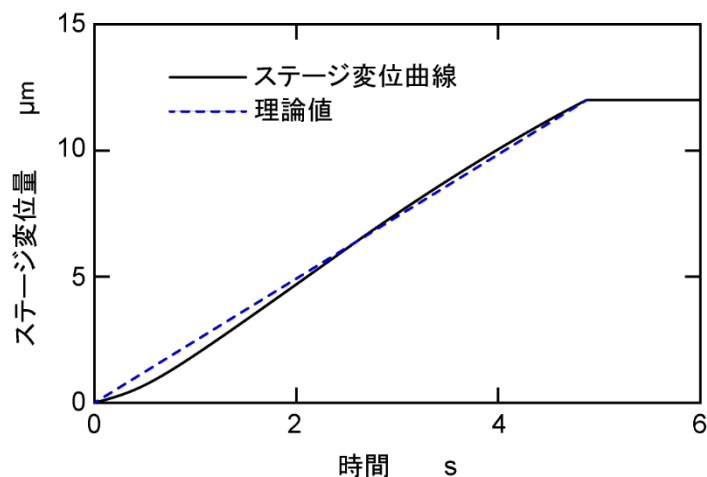


図 4.23 ステージの変位曲線

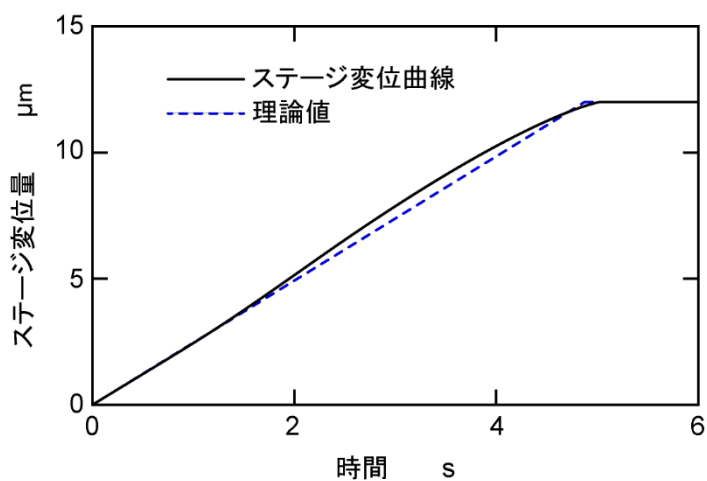


図 4.24 補償後のステージの変位曲線

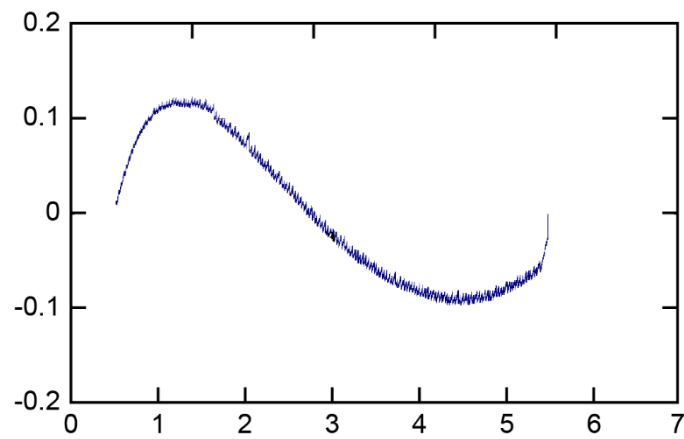


図 4.25 伸び補償関数

図 4.26 は，ステージを最大変位  $12\mu\text{m}$  から原点  $0\mu\text{m}$  まで，速度  $2.4\mu\text{m/s}$  で送ったときの時間とステージ変位量の関係，図 4.27 は，使用した補償関数である．補償前のステージ送り量と理論値との最大誤差は  $1.540\mu\text{m}$  であるが，補償後の最大誤差は  $0.658\mu\text{m}$  となり，約 43%改善された．すなわち，本制御方法が有効であることを示している．これらの近似関数をさらに追加していくことで，より高精度の位置決めが可能となると考える．

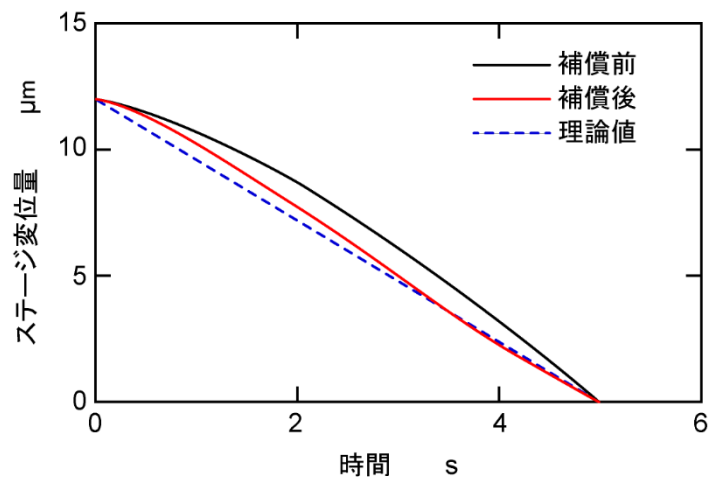


図 4.26 原点へ戻る場合のステージの変位曲線

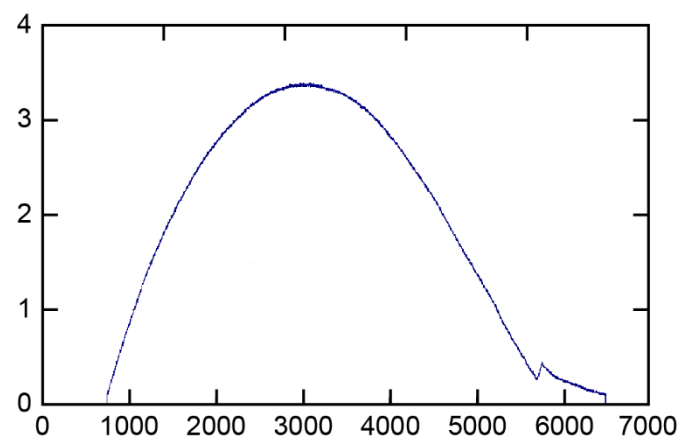


図 4.27 戻り補償関数



#### 4.5 ダイヤモンドアレイ工具による加工実験

開発したナノフライス盤を用いて加工実験を行った．工具はダイヤモンドアレイ工具を使用した．本工具は，切れ刃形状と配列を精密に規定でき，高硬度であるため，本装置用工具として最適である．図 4.28 は，使用したダイヤモンドアレイ工具の配列パターンである．今回の加工に使用したダイヤモンドアレイ工具は四角錐形状の底辺を  $50\mu\text{m}$  とし，それを図のように配列させたものである．図 4.29 は，主軸先端に取り付けた図 4.28 の配列パターンのダイヤモンドアレイ工具である．ダイヤモンドアレイ工具の接着にはエポキシ樹脂を使用した．図 4.30 は，加工方法の概略である．主軸を回転させながら，Z 方向に駆動することにより，加工を行った．表 4.3 は，加工条件である．被削材は単結晶シリコン (100)，切込み量は  $12\mu\text{m}$  である．なお，ステージの X，Y 方向の駆動は行わなかった．

図 4.31 は，加工痕の SEM 観察像である．また図 4.32 は，加工痕断面の SEM 観察像である．加工痕周辺には切りくずが観察でき，硬脆材料であるシリコンウェハに対しても良好な切削が可能であった．加工痕の平均深さは切込み量とほぼ同等の  $12\mu\text{m}$  となった．また，加工後の工具先端には切りくずが付着していたが，アセトン洗浄後，再度観察を行うと切れ刃に損耗は見られなかった．しかし，長時間続けて加工を行うと，切りくずの付着

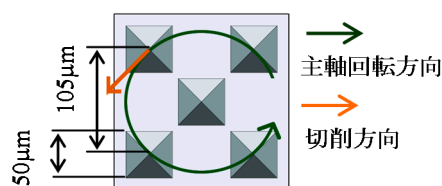


図 4.28 ダイヤモンドアレイ工具の配列パターン

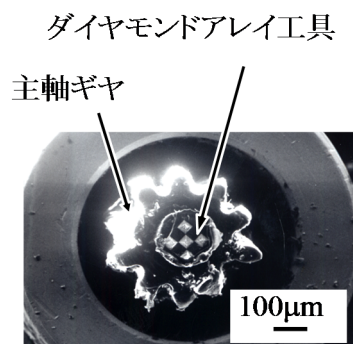


図 4.29 主軸先端 SEM 観察像

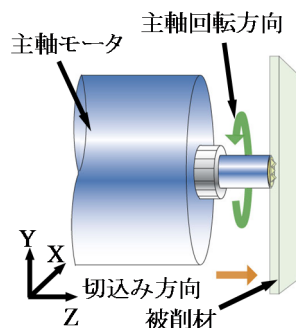


図 4.30 加工方法の概略

表 4.3 加工条件

被削材	単結晶シリコン (100)
工具	ダイヤモンドアレイ工具
主軸回転数 (min <sup>-1</sup> )	100,000
切込み量 (μm)	12

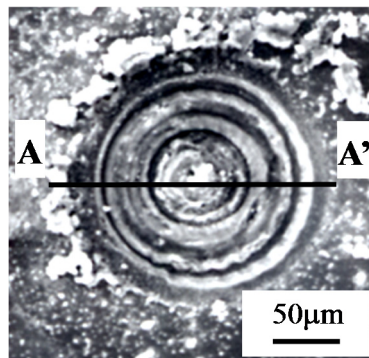


図 4.31 加工痕の SEM 観察像

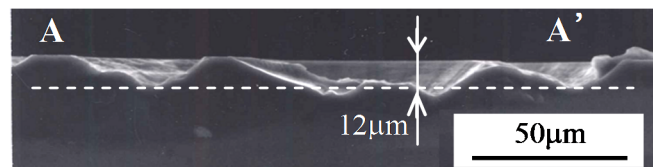


図 4.32 加工痕 A-A'断面の SEM 観察像

により先端の鋭利な工具形状が転写されず，良好な加工面が得られなくなる．今後，切りくずの排出方法について検討する必要がある．

## 4.6 微細加工用回転工具の開発

### 4.6.1 微細加工用回転工具の作製

前節では、5つの四角錐形状の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具を、直接主軸モータの軸端に装着し、開発したナノフライス盤でシリコンウェハに対して加工実験を行ったところ、切れ刃が破損することなく加工することができた。しかしながら、送りを与えず加工を行ったため、微細加工用回転工具としての評価は未知である。

そこで、通常の精密加工用工作機械にも装着可能な微細加工用回転工具を作製し、工具の性能評価を行う。本節で提案する微細加工用回転工具は、回転軸端に切れ刃となるダイヤモンド切れ刃群あるいは1粒子を装着して作製したものである。図4.33は、微細加工用回転工具の作製工程である。

- (1) 単結晶シリコンウェハ(100)の異方性エッチングにより作製したシリコンモールド上に、CVD法により多結晶ダイヤモンド薄膜を成膜する。
- (2) 単刃工具の場合は、多結晶ダイヤモンド薄膜の形成面を四角錐形状のダイヤモンドチップが独立するまでダイヤモンド砥石を用いて研磨する。一方、複刃工具の場合は、CW-QスイッチYAGレーザ加工装置(澁谷工業:SDL-100N)によりダイヤモンド薄膜を切断し、5つの四角錐形状の切れ刃群に分割する。
- (3) アルカリエッチングにより、シリコンモールドを完全に除去し、ダイヤモンドチップおよび切れ刃群を取り出す。
- (4) ダイヤモンドチップおよび切れ刃群を回転軸の軸端に接着し、微細加工用回転工具を得る。

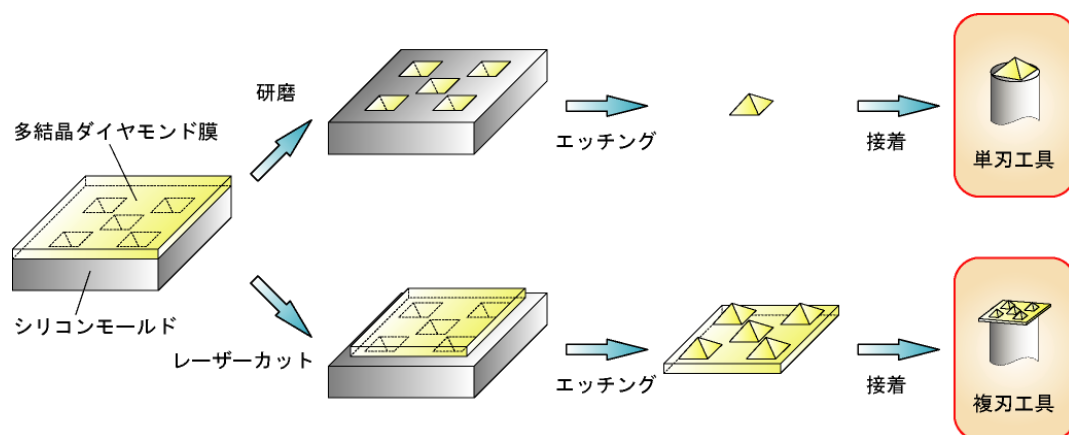


図 4.33 微細加工用回転工具の作製工程

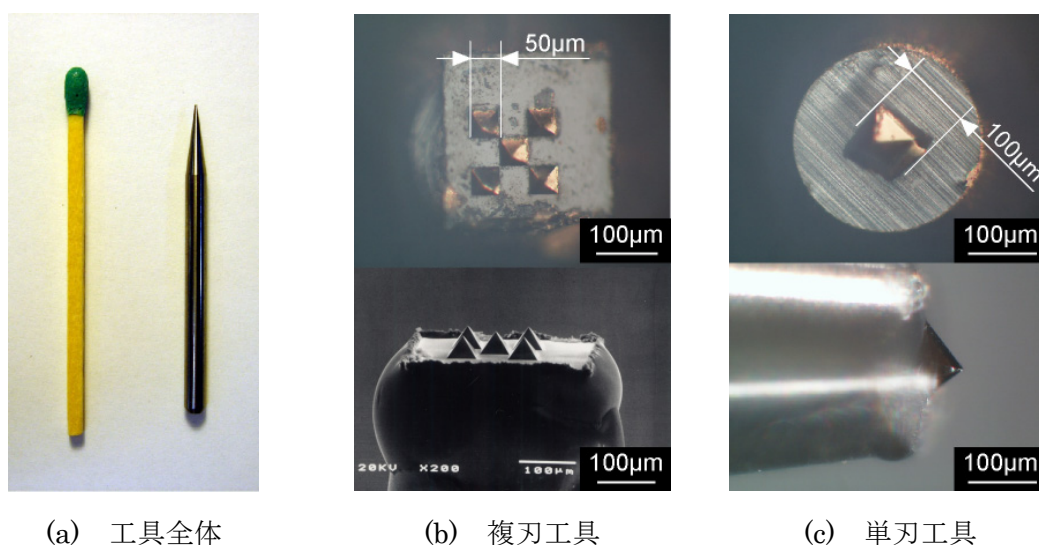


図 4.34 作製した微細加工用回転工具

図 4.34(a)は、作製した微細加工用回転工具の全体写真である．先端径 $\phi 0.3\text{mm}$ ，シャンク径 $\phi 3.0\text{mm}$ ，全長  $42\text{mm}$  の超硬製のテーパピンの先端に，エポキシ系接着剤を用いてダイヤモンドチップや切れ刃群を装着した．同図(b)は，底辺  $50\mu\text{m}$  の 5 つの四角錐形状のダイヤモンド切れ刃群が規則正しく配列している複刃工具である．また同図(c)は，底辺  $100\mu\text{m}$  の四角錐形状の切れ刃を装着した単刃工具である．

#### 4.6.2 微細加工用回転工具の評価

作製した微細加工用回転工具の性能を評価するため，単結晶シリコン，アクリル樹脂，金属ガラスに対して加工実験を行った．図 4.35 は，加工実験の概略と複刃の微細加工用回転工具を正面から見たときの模式図である．加工装置には，ジグ研削盤（HAUSER）を用いた．この装置のスピンドルに作製した微細加工用回転工具軸を装着し，切込みと送りを与えて乾式で加工を行った．表 4.4 は，加工条件である．

表 4.4 加工条件

被削材		単結晶シリコン (100)
		アクリル樹脂 金属ガラス
主軸回転数	( $\text{min}^{-1}$ )	10,000
送り速度	( $\text{mm/s}$ )	0.067, 0.200
切込み量	( $\mu\text{m}$ )	5, 10

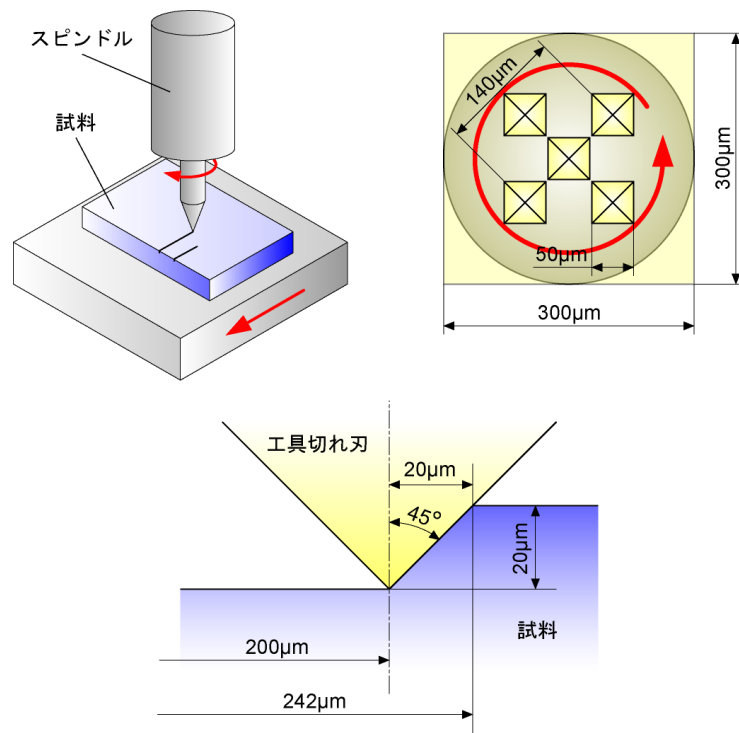
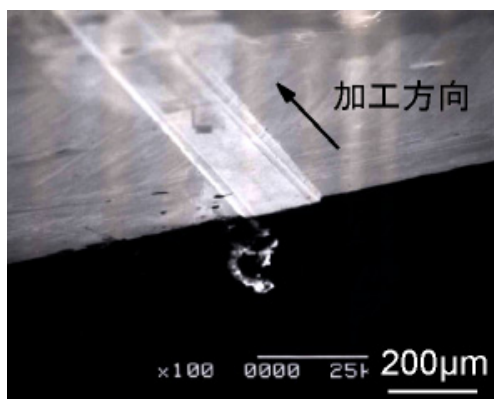
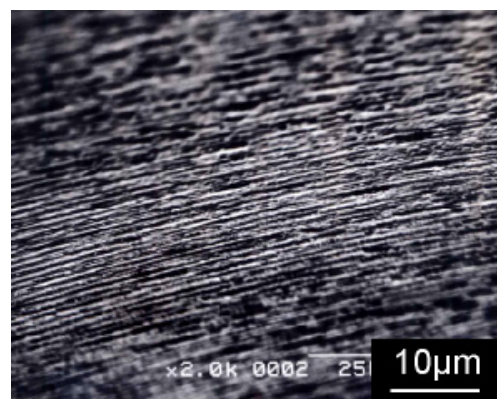


図 4.35 加工実験と工具の模式図

図 4.36 は、複刃工具を用いて単結晶シリコンに対して送り速度  $0.200\text{mm/s}$ 、切込み量  $5\mu\text{m}$  の条件でフライス加工を行った後の加工痕の SEM 観察像である。同図(a)より、加工によるマクロなクラックの発生も見られず、良好な加工が行われていることがわかる。また同図(b)より、加工痕底面には、切れ刃の規則正しい送りマークが観察される。これより本工具は、シリコンウェハのような硬脆材料の加工に対して有効であると考ええる。一方、



(a) 広域観察像

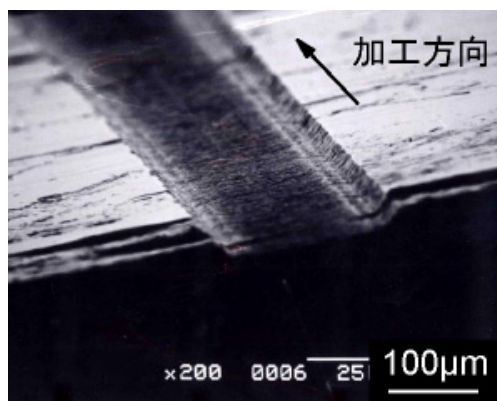


(b) 加工痕底面拡大観察像

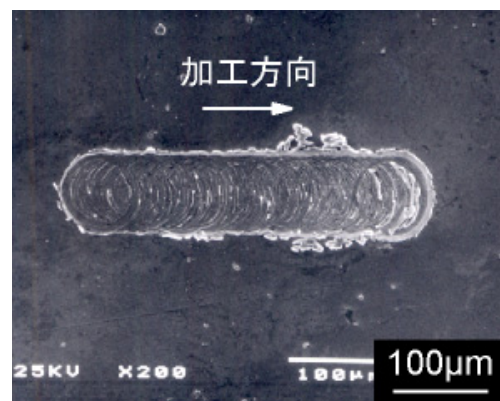
図 4.36 フライス加工痕の SEM 観察像（単結晶シリコン）



工具によっては加工痕底面に不規則な引っ掻き痕が観察された。これは、ダイヤモンドアレイ工具が回転軸面と平行ではないため、特定の切れ刃のみで加工が行われたためと考える。つぎに、加工痕の断面測定を行ったところ、その幅は底部で約  $200\mu\text{m}$ 、深さは約  $20\mu\text{m}$  であった。図 4.35 の工具正面の模式図より、工具回転時の切れ刃の最大間隔が  $140\mu\text{m}$  であることから、工具の偏心のためと考える。また、開口部の加工痕幅は約  $242\mu\text{m}$  であった。図 4.35 の工具側面の模式図より、切れ刃が (111) 結晶面で構成される四角錐形状をしているため、加工痕底部の深さを約  $20\mu\text{m}$  とすると、切れ刃稜線で切り取られる量は、開口部で底部よりも約  $20\mu\text{m}$  大きくなる。このことを考慮すると、工具形状もほぼ正確に転写していると考えられる。

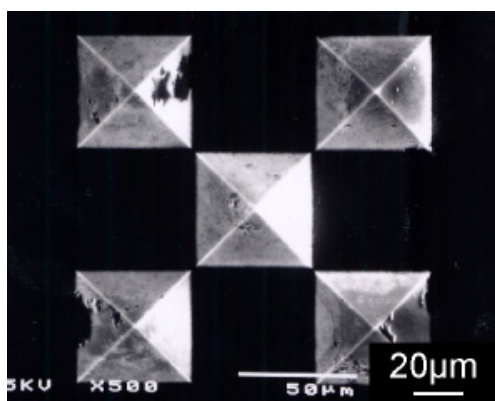


(a) アクリル樹脂

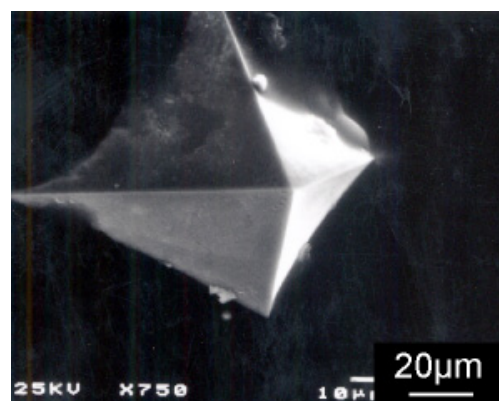


(b) 金属ガラス

図 4.37 フライス加工痕の SEM 観察像（単結晶シリコン）



(a) 複刃工具



(b) 単刃工具

図 4.38 加工後の工具先端の SEM 観察像

図 4.37(a)は、複刃工具を用いてアクリル樹脂に対して、送り速度  $0.067\text{mm/s}$ 、切込み量  $5\mu\text{m}$  でフライス加工を行った場合の加工痕の SEM 観察像である。加工痕底面には、むしれ状の痕が観察されるものの、樹脂のような軟質材料に対しても本工具は有効であると考えられる。同図(b)は、単刃工具を用いて金属ガラスに対して、送り速度  $0.067\text{mm/s}$ 、切込み量  $5\mu\text{m}$  でフライス加工を行った場合の加工痕の SEM 観察像である。単刃工具を用いたにもかかわらず、溝幅は約  $80\mu\text{m}$  と非常に広がった。

図 4.38 は、単結晶シリコンやアクリル樹脂をフライス加工した後の複刃工具および単刃工具の切りくずの除去後の工具先端の SEM 観察像で、工具に破損は観察されなかった。一方、金属ガラスの場合は、工具に切れ刃の欠けが観察された。

#### 4.7.1 工具取り付け装置と高精度微細加工用回転工具の作製

本節では、さらに工具精度を高めるため専用の工具取り付け装置を作製し、ダイヤモンド切れ刃とシャンクをマイクロメーターオーダーの精度で位置決めした微細加工用回転工具を開発するとともに、開発した工具の評価を行った。

CCD カメラ（ソニック：デジタルマイクロスコープ BS-D8000Ⅲ）は，パソコンモニター上でライン描画・計測が可能である．ズームレンズは 50～320 倍の倍率領域で，主軸光線が物体側，像側ともにレンズ光軸に平行で画角が限りなく 0°に近いので，対象物が上下しても寸法変動や位置変位がなく，高精度なモニタリングが可能である．描画，計測の分解能はともに 1 $\mu$ m である．

高精度 X ステージ（日本トムソン：ナノリニア NT）は、最大ストローク 65mm，分解能 0.1 $\mu$ m，繰り返し位置決め精度は 0.5 $\mu$ m であり，工具取付け装置の位置決めステージとして最適である．ステージは，ドライバを介し，パソコンにより制御する．ステージの位

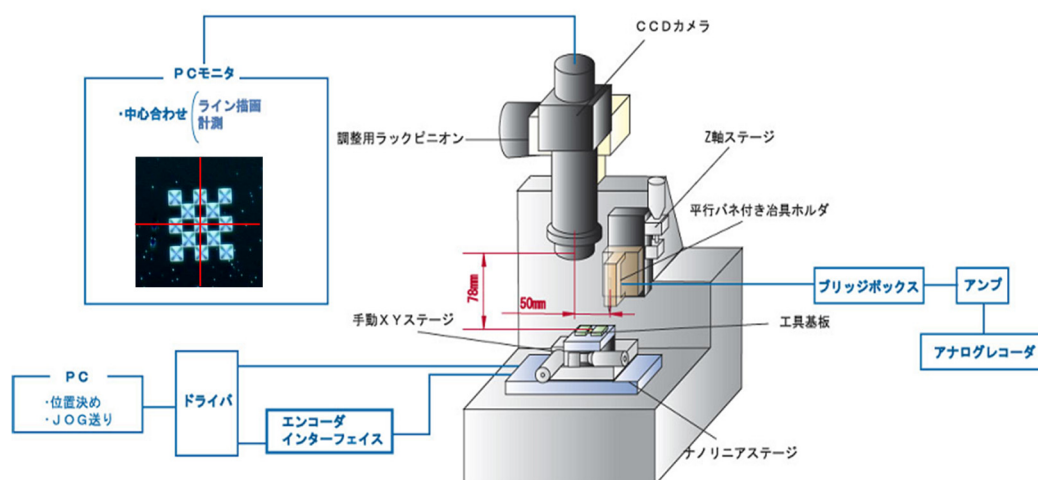


図 4.39 工具取り付け装置の概略



置は、エンコーダを介し、ステージ位置をリアルタイムで読み取り、フィードバック制御を行う。そのため、外力、振動による位置のずれを常に補償する。

シャンクホルダは、平行バネと一体型とした。ダイヤモンドアレイ工具は非常に微小であるため、シャンクと工具の接触を、平行バネに取り付けたひずみゲージで検出する。平行バネを用いることにより、定圧の荷重を加えながらの接着が可能となる。ひずみゲージは平行バネの各両面に貼り付け 4 ゲージ法とし、最小 0.5mN の接触を検知可能である。

ダイヤモンドアレイ工具は YAG レーザを用いて 212 $\mu$ m 角にカットし、同型のシリコンモールドの凹部に、ダイヤモンド切れ刃の凸部が納まるように、マニピュレータでセットする。工具を取り付けるシャンクは、先端径 $\phi$ 0.3mm の超硬製である。

図 4.40 は、作製した工具取り付け装置の概観である。この装置を用いて、微細加工用回転工具の作製を行った。

図 4.41 は、作製した微細加工用回転工具である。平行バネによって圧着を行うため、切れ刃はシャンク先端部の端面に対し平行に接合することができた。工具精度を評価するため、工具取付け装置に搭載されている CCD カメラで工具正面から観察し、描画・計測機能により、シャンクを中心を点 A、切れ刃先端を点 B とし、偏心量（距離 AB）を測定した。

図 4.42 は、偏心量と工具本数とのヒストグラムである。偏心量が 3 $\mu$ m 以下は 14 本、6 $\mu$ m 以下は 23 本、9 $\mu$ m 以下では 29 本と全 37 本中 80%も占めた。したがって、本装置

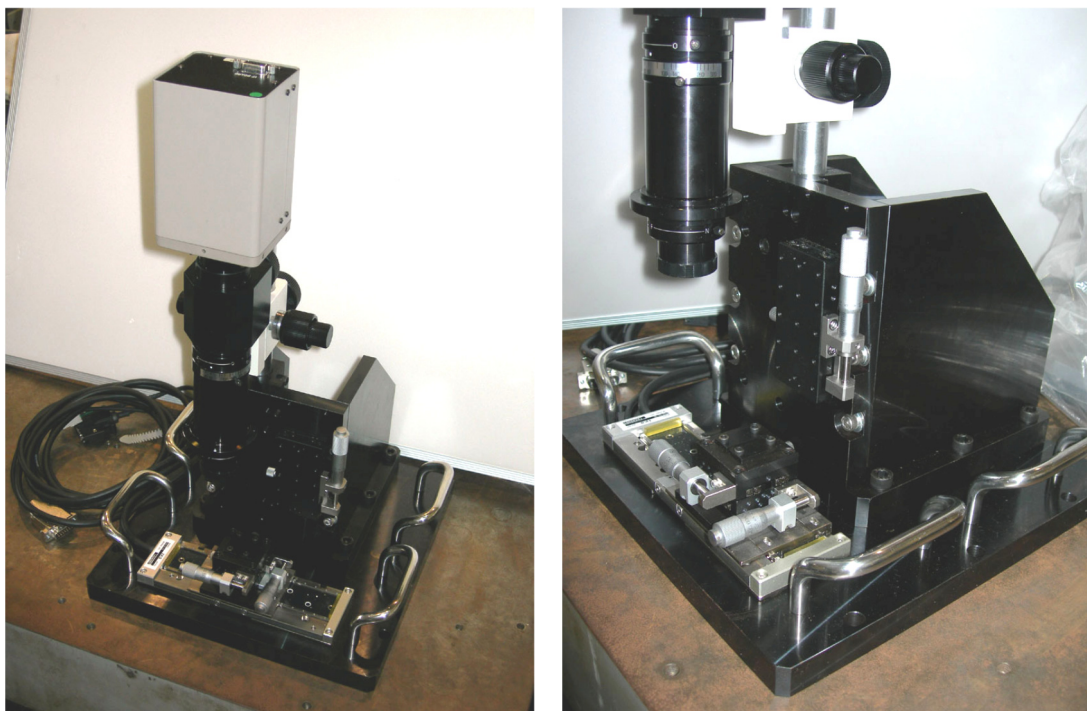


図 4.40 試作した工具取り付け装置

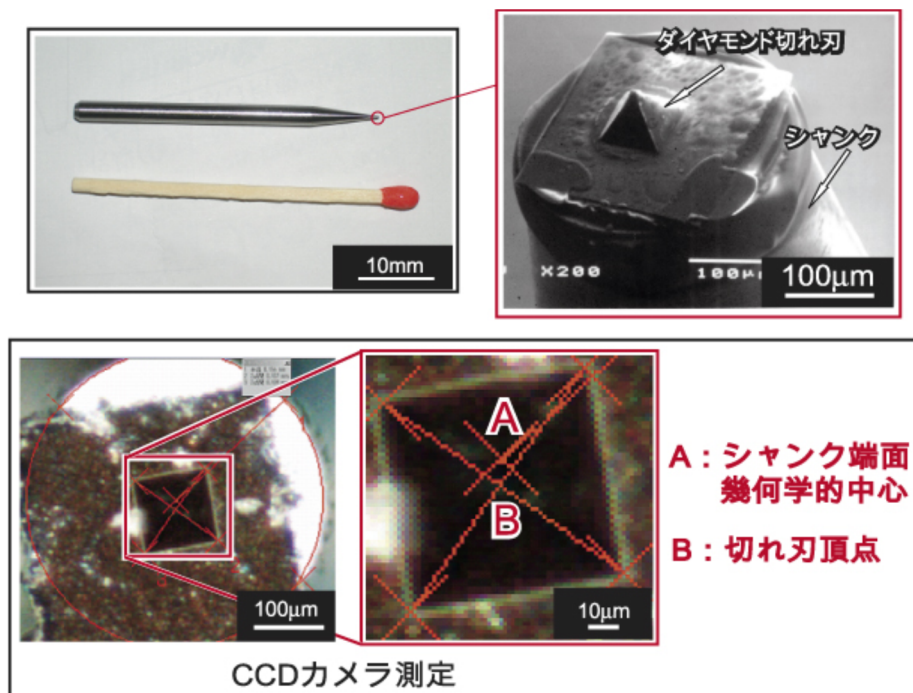


図 4.41 作製した微細加工用回転工具

を用いることにより，非常に高精度な微細加工用回転工具の作製が可能であった．また，目標位置を任意に軸心から偏心させることや，切れ刃の取付け角を任意に変化させることも可能となり，種々の形状の微細加工用回転工具が作製できる．

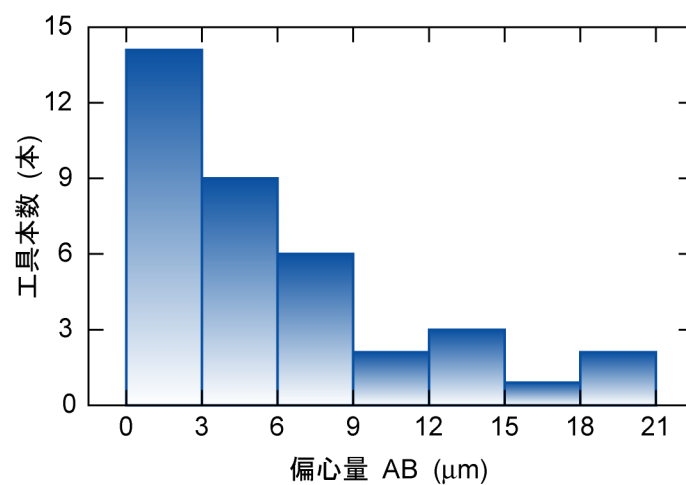


図 4.42 工具偏心量の分布

#### 4.7.2 高精度微細加工用回転工具の評価

開発した高精度微細加工用回転工具の加工評価を行うため，細溝加工を行った．表 4.5 は，加工条件である．加工機は主軸に高速エアスピンドル（ナカニシ：HES500）を装着した高精度マシニングセンタ（CITIZEN：cincomNF4）を使用した．

図 4.43 は，細溝加工痕の SEM 観察像である．同図左のように，一定量切り込んで直線溝を加工し，その終端で 1 辺が  $40\mu\text{m}$  の正形状の加工を行った．バリも少なく，一定幅の細溝加工が可能であった．

表 4.5 加工条件

被削材		金属ガラス
工具偏心量	( $\mu\text{m}$ )	3
主軸回転数	( $\text{min}^{-1}$ )	40,000
送り速度	( $\text{mm/s}$ )	0.083

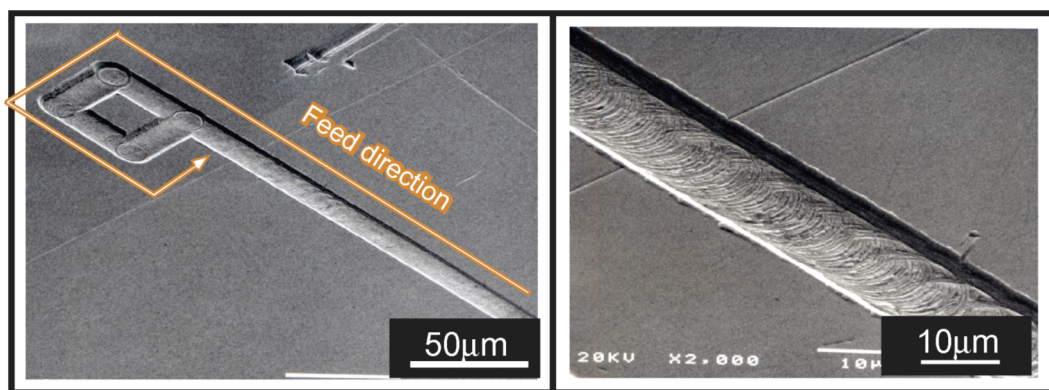


図 4.43 細溝加工痕の SEM 観察像

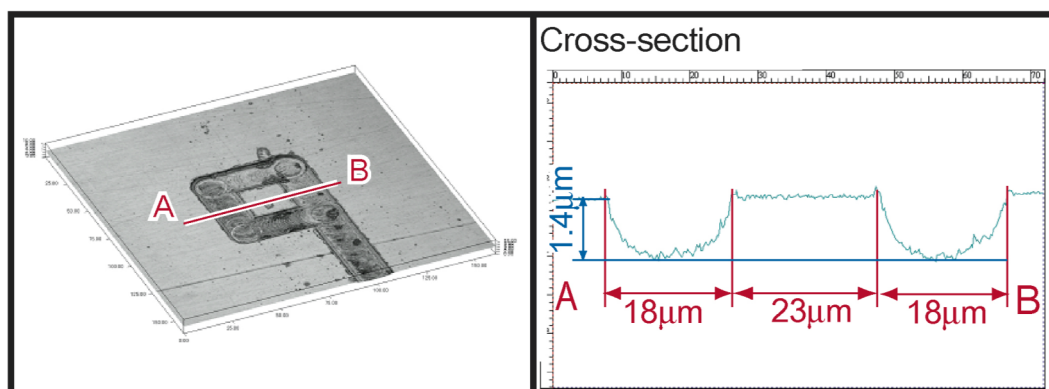


図 4.44 細溝加工痕の共晶点顕微鏡観察像

図 4.44 は、共晶点顕微鏡で正形状の加工痕とその断面を観察したものである。断面プロファイルを見ると、溝深さ  $1.4\mu\text{m}$ 、溝幅  $18\mu\text{m}$  であった。工具偏心量  $3\mu\text{m}$  と小さいにもかかわらず溝幅が  $18\mu\text{m}$  となったのは、工具のスピンドルへの装着時の偏心や、スピンドル自身の振れのためと考える。これらの問題を改善することにより、微細加工用回転工具を用いて、より細い溝加工が可能になると考える。

次に、3次元形状加工を目的として、階段形状の加工を行った。表 4.6 は、加工条件である。加工機は高精度マシニングセンタ（CITIZEN 製 cincomNF4）を使用した。

図 4.45 は、加工手順である。 $5\mu\text{m}$  の切込みで直線加工後、それと垂直方向に  $10\mu\text{m}$  工具を移動させ、さらに  $5\mu\text{m}$  切り込んで直線加工を行う。これを3回繰り返して3段の階段形状を作製した。

図 4.46 は、階段形状の SEM 観察像である。若干の割れ等が観察されるが、3段の階段形状の加工が可能であった。

図 4.47 は、共焦点顕微鏡観察像である。断面プロファイル測定結果から、階段形状は、ステップ幅はほぼ  $10\mu\text{m}$  であるのに対し、深さは約  $6.5\mu\text{m}$  となり、設定切り込み量より 30% も大きかった。

いずれの加工実験においても工具の破損や加工中の切れ刃の脱落はなく、微細加工用工具として十分な切れ刃強度と接合力があると考ええる。

表 4.6 加工条件

被削材		金属ガラス
工具偏心量	( $\mu\text{m}$ )	69
主軸回転数	( $\text{min}^{-1}$ )	40,000
送り速度	( $\text{mm/s}$ )	0.333

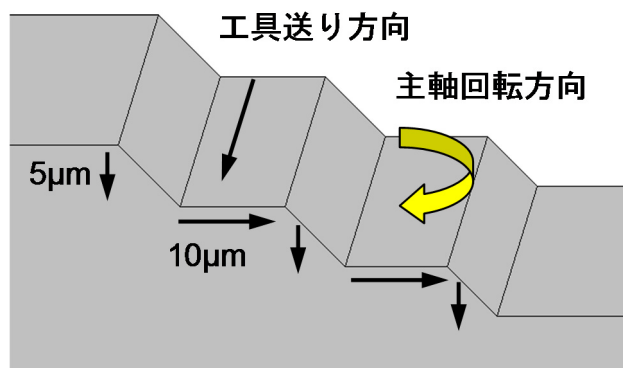


図 4.45 加工手順



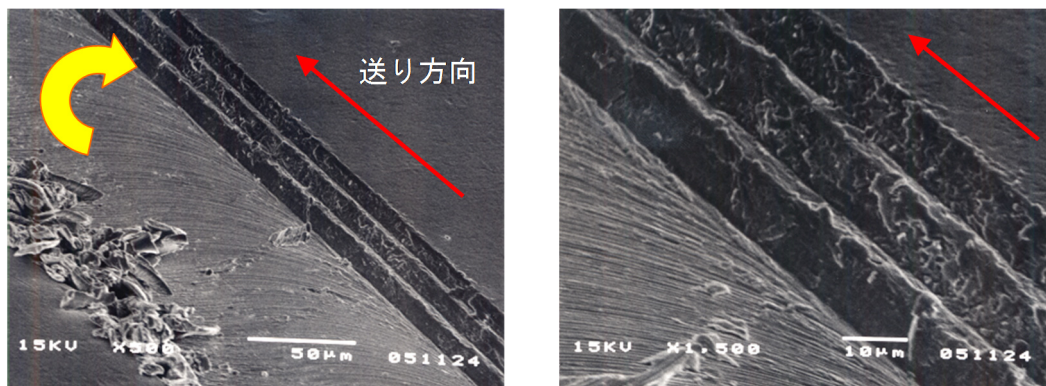


図 4.46 階段形状の SEM 観察像

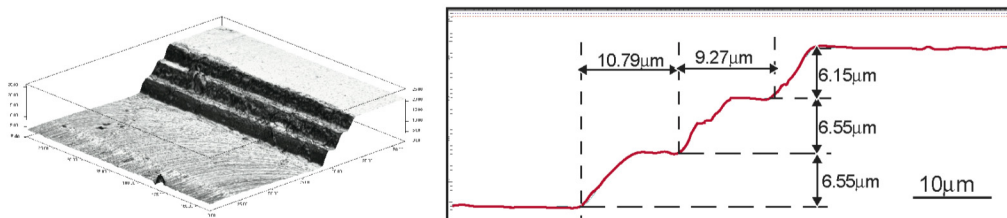


図 4.47 階段形状の共晶点顕微鏡観察像

## 4.8 結 言

本章では、1 辺が 1 インチの立方体内に収まるナノフライス盤の開発を行った。また開発した CNC 制御のナノフライス盤を使用し、ダイヤモンドアレイ工具によるフライス加工実験を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 切欠き弾性ヒンジとピエゾ素子を組み合わせた超小型ステージを作製した。さらに小型の構成部品を使用することにより、 $25.4 \times 23.0 \times 25.0\text{mm}$  の大きさの微細加工用回転盤を開発した。
- (2) 有限要素解析ソフト ANSYS による構造解析により、ステージ切欠き弾性ヒンジの切り欠き厚さは  $0.6\text{mm}$  が適当であることがわかった。これにより、ピエゾ素子を駆動源とした変位拡大機構で、各ステージの最大変位は  $12\mu\text{m}$  を達成した。
- (3) 各ステージ内部に組み込んだ変位センサでは、ステージの位置検出の最大誤差は  $25\text{nm}$  以下であった。
- (4) Y ステージと被削材との間に小型圧力センサを挟みこんで配置することにより、切削抵抗の測定を可能とした。また、これにより被削材とフライス用工具の接触確認も可能とした。
- (5) 微細加工用回転盤の制御をパソコンで行い、ステージ変位を可視化できる制御用ソフトウェアを開発した。
- (6) Windows に内蔵されている API の TimeSetEvent を用いることにより、ステージの送り速度設定高精度化を実現した。
- (7) ステージ駆動用のピエゾ素子のヒステリシス現象と応答の遅れによる位置決め誤差を補償する機能を付加した。その結果、伸びの場合で 47%、戻りの場合で 43%の改善がみられた。
- (8) ダイヤモンドアレイ工具を用いて加工実験を行ったところ、硬脆材料であるシリコンウェハに対しても良好な切削が可能であった。

今後の課題として、パソコンによる NC 制御において、このプログラムでは JOG 送り (G00)、直線補間 (G01) を解析し、実行することができるものの、円弧補間や工具径補正には、現在のところ未対応である。今後、工具径補正と工具長補正機能を付加することにより、3 次元構造の切削を行うことが可能になると考える。

また、通常の工作機械でも使用可能な微細加工用回転工具を作製し、加工実験を行い、工具の評価を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (9) 回転軸端に切れ刃となるダイヤモンド切れ刃群あるいは 1 粒子を装着して作製した微細加工用回転工具で、シリコンウェハ、アクリル樹脂、金属ガラスに対して加工実験を行ったところ、数  $10\mu\text{m}$  オーダーの切削加工が可能で、加工痕の両端では四角錐の切れ刃形状を転写した加工痕が形成された。
- (10) 工具取り付け装置を用いて微細加工用回転工具作製した場合、超硬シャンクへの切れ刃の取り付け精度が向上した。
- (11) 工具偏心量  $3\mu\text{m}$  の微細加工用回転工具を用いて、金属ガラスに対して溝加工実験を行ったところ、溝幅が  $18\mu\text{m}$  の加工溝が得られた。これは、工具のスピンドルへの装着時の偏心や、スピンドル自身の振れのためと考える。これらの問題を改善することにより、微細加工用回転工具を用いて、より細い溝加工が可能になると考える。

## 参考文献

- 1) 稲垣清紀, 森田 昇, 山田 茂, 高野 登, 大山達雄, 川堰宣隆, 芦田 極, 斎藤潤二 :  
ナノ加工計測システムの開発と応用 (第 2 報) —モバイル型ナノ加工・計測システム  
の開発—, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2003).
- 2) 熊谷英樹 : すぐに役立つ Visual Basic を活用した計測制御入門, 日刊工業新聞社,  
(2002).
- 3) 内野研二 : 圧電／電歪アクチュエータ —基礎から応用まで—, 正明社, (1988).



## 第 5 章 FIB により先鋭化した加工用 AFM カンチレバーを用いた微細 V 溝加工

### 5.1 緒 言

機械加工は高能率で精度の高い加工が可能なため、メートルオーダーからマイクロメートルオーダーまで幅広いスケールの加工に適用されている。しかしながら、 $1\mu\text{m}$  以下のような微細な切込みで加工する場合、機械の振動や熱変形、駆動機構の運動誤差、工具磨耗などにより、切込みの正確な制御が困難になる。そのため、正確な切込みを実現するには、高い運動精度を有する工作機械や、機械全体の温度を一定に保つシステム、高精度で測定が可能な計測・制御システムなど、高価な装置の導入やインフラストラクチャーの整備が必要となる。

一方、原子間力顕微鏡 (AFM) などの走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を利用した様々な微細加工の方法が提案されている<sup>1)~11)</sup>。SPM を微細加工に用いる利点は、元来原子オーダーの表面観察を目的として開発されたため、ナノメートルスケールの運動機構を有していること、測定用の探針を工具として利用できることである。また、加工時のカンチレバーのたわみやねじれを検出しフィードバック制御させることにより、加工力を一定に保つことができるため、切込みを正確に制御することが可能となる。さらに、恒温室などの大掛かりな装置も必要としないことから、超精密ナノ加工機や MEMS などと比較して低コストで高精度な微細加工が実現できると考える。

既報において筆者らは、シリコンモールド金型とダイヤモンド CVD 技術を併用し、切れ刃先端形状と分布を精密に規定できる微細加工工具（以下ダイヤモンドアレイ工具と呼ぶ）を作製し、マイクロ・ナノスケールの超精密加工への適用の可能性について検証を行

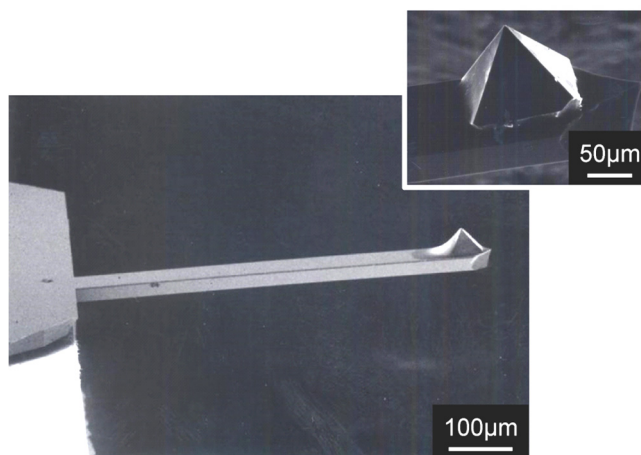


図 5.1 加工用 AFM カンチレバーの SEM 観察像

っている<sup>12)~18)</sup>。その応用例として、図 5.1 に示すようなダイヤモンドアレイ工具を用いた加工用 AFM カンチレバーを開発し、単結晶シリコンに対して微細加工実験を行ったところ、優れた加工性を示した<sup>9)</sup>。この加工用 AFM カンチレバーの特徴は、高剛性のシリコン製カンチレバーにダイヤモンドアレイ工具から切れ刃 1 つを抽出して装着している点である。そのため、加工時の垂直荷重を数千  $\mu\text{N}$  と高く設定することができ、加工距離が 1000mm を超えても安定した切削が可能となる<sup>10)</sup>。しかしながら、切れ刃の先端角が  $70.6^\circ$  であるため、加工溝の断面形状が限定される。これは、ダイヤモンドアレイ工具作製時のシリコンモールド金型を、単結晶シリコン (100) の異方性エッチングで作製した場合、(111) 面で構成される先端角  $70.6^\circ$  の四角錐形状になるためである。

本章では、この加工用 AFM カンチレバーを狭角の微細 V 溝加工用工具に適用するため、集束イオンビーム (FIB) を用いて、ダイヤモンド切れ刃の先端角、すくい角、横すくい角を設けた加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金に対して溝加工実験を行い、切れ刃形状が加工溝性状に及ぼす影響について検討を行った。

## 5.2 実験方法

### 5.2.1 FIB による加工用 AFM カンチレバー切れ刃の加工

ダイヤモンドアレイ工具を加工用 AFM カンチレバーの切れ刃として用いた場合，先端角  $70.6^\circ$  の四角錐形状に規定されるため，狭ピッチの微細溝加工は困難である．そこで，切れ刃先端部を先鋭化する手段として，集束イオンビーム加工装置（日立ハイテクノロジー：FB-2100，以下 FIB 装置と呼ぶ）を用いた．図 5.2 は，実験に用いた FIB 装置の外観である．FIB 装置を用いて凹加工を行った場合，加工底面よりも加工側面の方が加工面精度はよい．また，テーパ角やダレによる加工精度の低下は，ビーム電流を低くすることにより解決できる．以上のことを踏まえ，FIB 加工方法および条件を決定した．

表 5.1 は，FIB 加工条件である． $4.18\text{nA}$  のビーム電流で荒加工を行ったあと， $0.83\text{nA}$  のビーム電流で仕上げ加工を行う．図 5.3 は，ダイヤモンド切れ刃の先鋭化の概略図である．カンチレバー長手方向前面から，設定した角度で FIB 照射することにより任意の先端角の切れ刃を作製した．図 5.4 は，すくい角導入の概略図である．目的とする先端角の切れ刃を作製後，カンチレバー側面から設定した角度で FIB 照射することにより，任意のすくい角を導入した．

図 5.5 は，FIB 加工後の加工用 AFM カンチレバー切れ刃の SEM 観察像である．図のように，先端角  $35^\circ$ ，切れ刃先端丸み半径  $20\text{nm}$  のダイヤモンド切れ刃を得ることができた．



図 5.2 FIB 装置の外観

表 5.1 FIB 加工条件

加速電圧	(kV)	40
ビーム電流	(nA)	0.83, 4.18
ドエルタイム	( $\mu$ s)	10

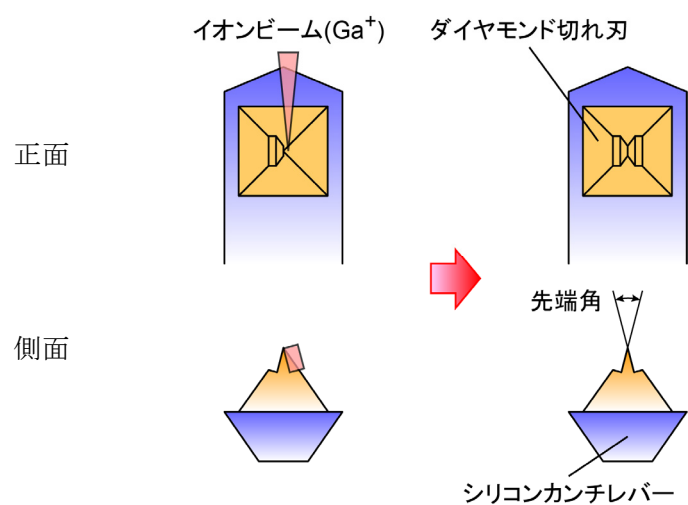


図 5.3 FIB 照射による先鋭化の方法

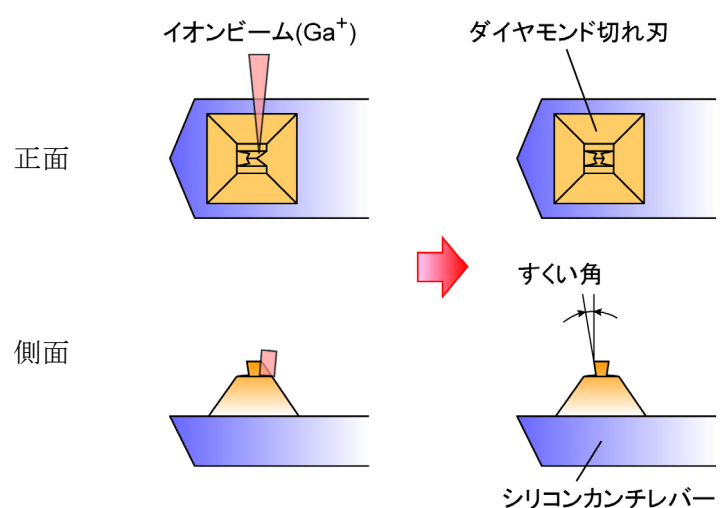


図 5.4 FIB 照射によるすくい角の導入方法

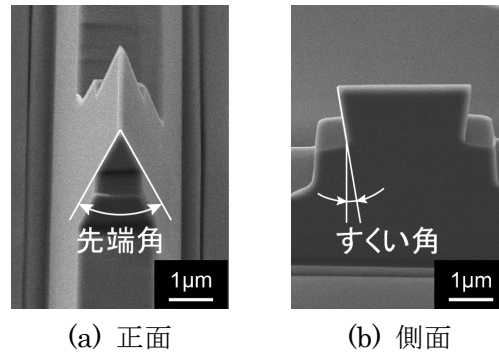


図 5.5 FIB 加工後のカンチレバー切れ刃の SEM 観察像

## 5.2.2 溝加工実験装置および実験条件

本章で作製した加工用 AFM カンチレバーの評価を行うため，原子間力顕微鏡（AFM）を加工装置として用いた．図 5.6 は，AFM（島津製作所：SPM-9500J2）の外観である．加工装置として AFM を用いる場合，カンチレバーが試料表面を走査する際に，直線往復運動と送り運動を交互に繰り返す．そのため，同線上を切れ刃が往復路で 2 度通過することになる．そのため，切れ刃先端部のすくい角は両側に形成した．また，AFM へのカンチレバーの取り付け角は装置の構造上，図 5.7 に示すように試料に対して  $13^\circ$  傾斜している．そのため，カンチレバーを  $13^\circ$  傾斜させた状態で FIB 加工を行うことで，切れ刃先端部と試料が平行に接触するようにした．以後，すくい角は，この傾斜を考慮した角度で表記する．



図 5.6 AFM の外観

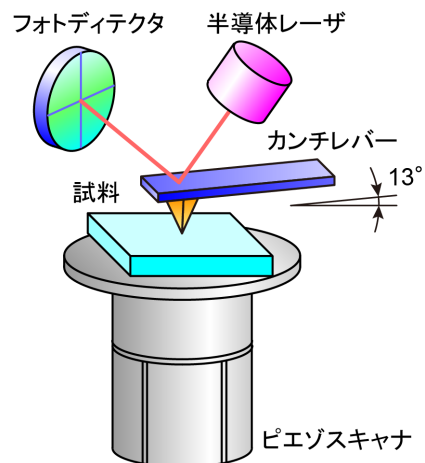


図 5.7 AFM 加工実験の概略

被削材は、微細金型での利用を想定して、ステンレス鋼 (SUS420J2) に厚さ  $150\mu\text{m}$  の Ni-P 合金めっきを施したものをを用いた。表 5.2 は、溝加工実験条件である。垂直荷重は、表の範囲内で 6 段階に変化させ、加工中のフォースカーブを測定し、得られたたわみとカンチレバーのたわみ剛性の積で求めた。加工実験前後のカンチレバー切れ刃先端および加工溝は、電界放射型走査電子顕微鏡（日本電子：JSM-6700F）にて観察を行った。加工溝形状の評価は、加工溝直上から FIB 装置により矩形状に断面加工し、断面形状の観察と、加工溝深さおよび幅の測定を行った。なお、加工溝深さは、V 溝の両斜面から底部方向への延長線の交点と被削材表面との距離とした。また幅は、V 溝両斜面からの表面方向への延長線と被削材表面との交点間の距離とした。

表 5.2 溝加工条件

被削材		Ni-P 合金
垂直荷重	( $\mu\text{N}$ )	150～1900
加工速度	( $\mu\text{m/s}$ )	125
溝間隔	( $\mu\text{m}$ )	4

### 5.3 AFM を用いた加工実験

#### 5.3.1 先端角の影響

まず先端角の影響を検討するため、 $25^\circ$  および  $35^\circ$  の切れ刃先端角を有するカンチレバーを作製し、溝加工実験を行った。すくい角は  $0^\circ$  とした。

図 5.8 および図 5.9 は、各先端角における垂直荷重に対する加工溝の深さ、幅、およびアスペクト比（深さ/幅）である。図中、アスペクト比 2.26 および 1.59 のラインは、それぞれ先端角  $25^\circ$  および  $35^\circ$  の切れ刃断面形状から算出した値を示している。どちらの先端角も、垂直荷重の増加とともに加工溝の深さ、幅ともに増加している。アスペクト比については先端角  $25^\circ$  の場合、垂直荷重の増加とともに 2.26 に近づいていくが、垂直荷重を大きくしていくと切れ刃が欠損したため、これ以降の変化は確認できなかった。欠損は、

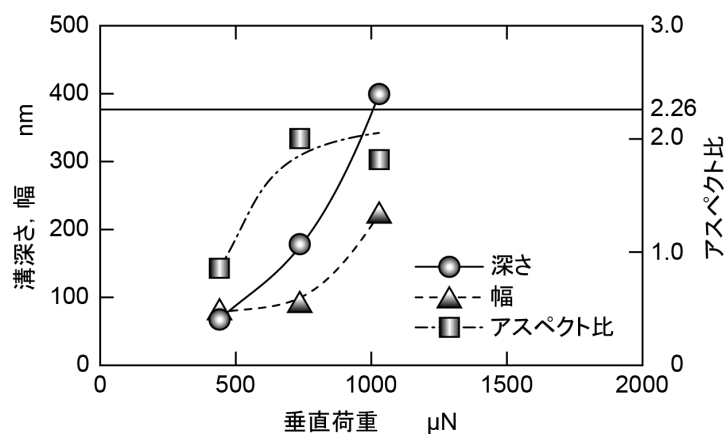


図 5.8 垂直荷重と溝深さ、幅およびアスペクト比の関係（先端角  $25^\circ$ ）

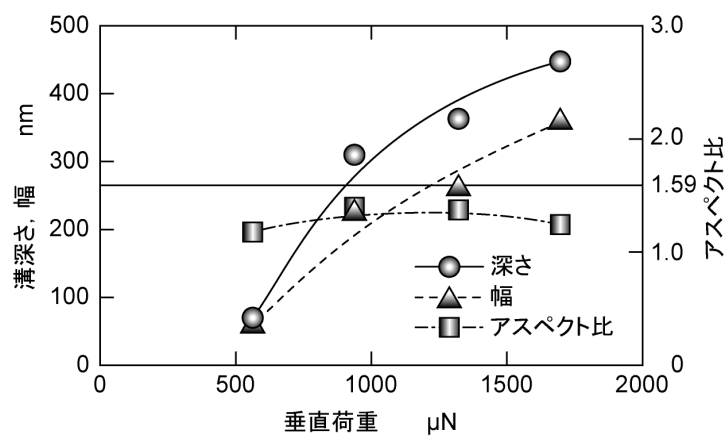


図 5.9 垂直荷重と溝深さ、幅およびアスペクト比の関係（先端角  $35^\circ$ ）

切れ刃強度が低いと考え．一方，先端角  $35^\circ$  の場合，垂直荷重に係らず，1.59 には達していないが，ほぼ一定値をとることがわかる．

図 5.10 は，加工前のカンチレバーの切れ刃先端，先端丸みと加工溝の SEM 観察像である．いずれも図 5.8 および図 5.9 において，最大荷重時（先端角  $25^\circ$  は  $1030\mu\text{N}$ ，先端角  $35^\circ$  は  $1692\mu\text{N}$ ）のものである．先端角  $25^\circ$  で加工した場合，加工溝の両側にバリ状の盛り上がりが見られる．これは，被削材を横に押し広げる塑性変形によると考える．一方，先端角  $35^\circ$  で加工した場合は，盛り上がりも少なく良好な加工が行われている．SEM 観察像から推定される切れ刃の先端丸み半径は，先端角  $25^\circ$  では  $100\text{nm}$  程度，先端角  $35^\circ$  では  $20\text{nm}$  程度である．これは，FIB 装置で先端角を導入するとき，いずれも同条件で加工を行ったため，先端角  $35^\circ$  よりも除去体積の大きな先端角  $25^\circ$  の方が加工時間を要し，切れ刃先端がだれたためと考える．図 5.8 において，先端角  $25^\circ$  のアスペクト比が一定にならず低垂直荷重域において低い値を示したのは，先端丸みが大きいため十分な切込みが得られなかったためと考える．

以上の結果から，十分な切れ刃強度を有し，塑性変形による盛り上がりが少なかったことを踏まえ，以降では先端角を  $35^\circ$  として実験を行う．

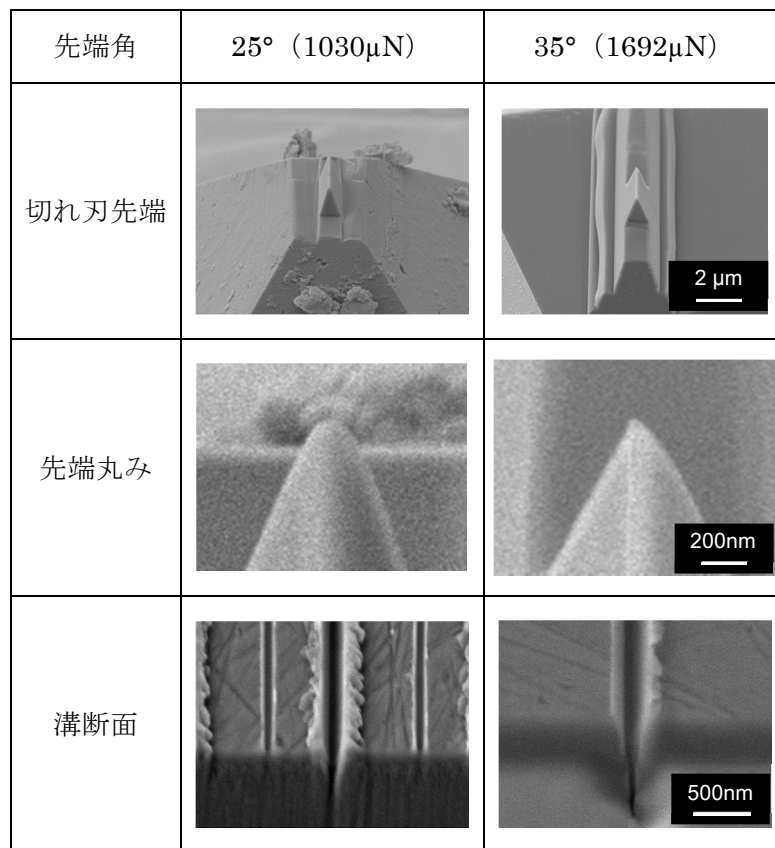


図 5.10 切れ刃先端，先端丸みおよび溝断面の SEM 観察像



### 5.3.2 すくい角の影響

次にすくい角の影響について検討した．すくい角は， $-20^{\circ}$  から  $20^{\circ}$  まで  $10^{\circ}$  間隔で設定した．図 5.11 は，各すくい角を設けた切れ刃での加工面，溝断面および切れ刃先端部の SEM 観察像である．いずれも各切れ刃において，垂直荷重を最大（1645～1943 $\mu$ N）に

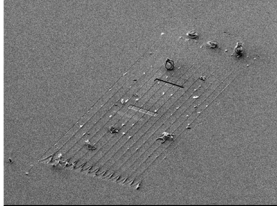
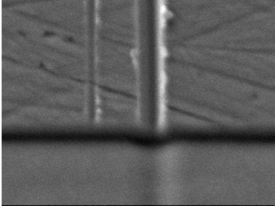
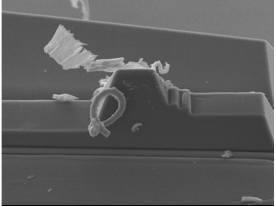
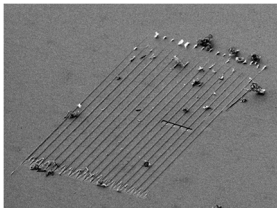
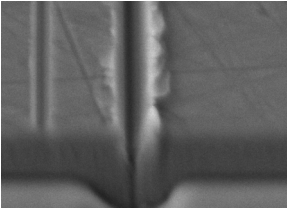
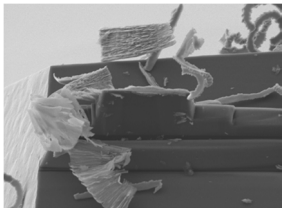
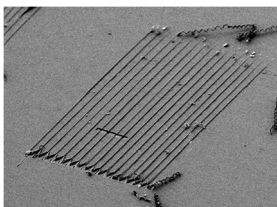
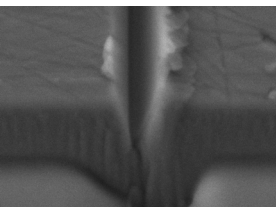
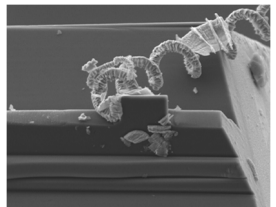
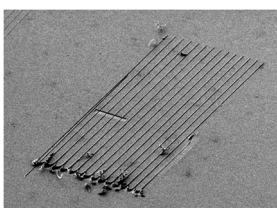
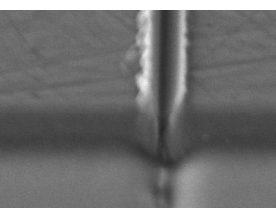
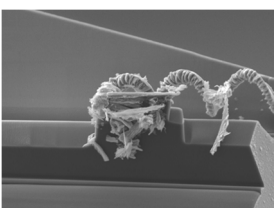
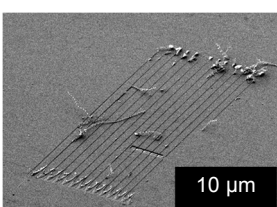
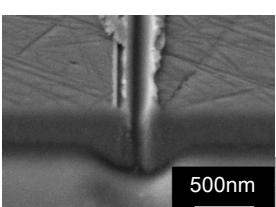
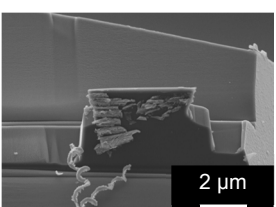
すくい角	加工面	溝断面	加工後の 切れ刃先端部
$-20^{\circ}$ (1698 $\mu$ N)			
$-10^{\circ}$ (1645 $\mu$ N)			
$0^{\circ}$ (1692 $\mu$ N)			
$10^{\circ}$ (1943 $\mu$ N)			
$20^{\circ}$ (1810 $\mu$ N)			

図 5.11 各すくい角を設けた切れ刃での加工面，溝断面および切れ刃先端部の SEM 観察像

して実験を行ったときのものである。図中、溝断面において黒い部分は断面、白い部分は溝断面観察のために矩形状に加工した部分の加工底面である。加工距離は各すくい角によって若干差異があるものの、すべて  $5000\mu\text{m}$  以上である。各加工面および切れ刃先端部において、流れ形の切りくずが生成されている。この切りくずは、すくい角  $-20^\circ$  および  $-10^\circ$  では  $5\sim 20\mu\text{m}$  の長さに短く分断されているのに対して、すくい角  $0\sim 20^\circ$  では  $50\sim 100\mu\text{m}$  の比較的長い切りくずとなった。また、溝周辺部には塑性変形による盛り上がりが見られた。すくい角  $-20^\circ$  が他のすくい角に比べて盛り上がりが少ないのは、加工溝深さが小さいためと考える。それ以外のすくい角については、差異はみられなかった。加工後の切れ刃先端部については、すべての切れ刃に摩耗や欠損などの形状変化はみられない。

図 5.12 は、図 5.11 の SEM 観察像から測定した各すくい角での最大荷重における溝深さ、溝幅およびアスペクト比の関係である。溝深さ、溝幅ともすくい角が  $-20^\circ$  から  $0^\circ$  までは増加し  $0^\circ$  で最大となり、そのときの溝深さおよび溝幅は、それぞれ  $447\text{nm}$ ,  $360\text{nm}$  であった。一方、すくい角が  $0^\circ$  以上ですくい角の増加とともに溝深さおよび溝幅が減少している。これは、図 7 に示すように、すくい角  $10^\circ$  や  $20^\circ$  の切れ刃の長さが、すくい角  $0^\circ$  のものに比べ長いため、加工時の垂直荷重を揃えても試料に切れ刃が食い込みにくかったためと考える。アスペクト比についてみると、すくい角  $-20^\circ$  を除いて、1.5 程度となった。切れ刃の断面形状のアスペクト比は 1.59 であることから、切れ刃形状が溝形状に精度よく転写されていることがわかる。これらの結果を踏まえ、刃先すくい角は、アスペクト比が 1.59 に近く、最も能率の高い加工が可能な  $0^\circ$  が適していると考ええる。

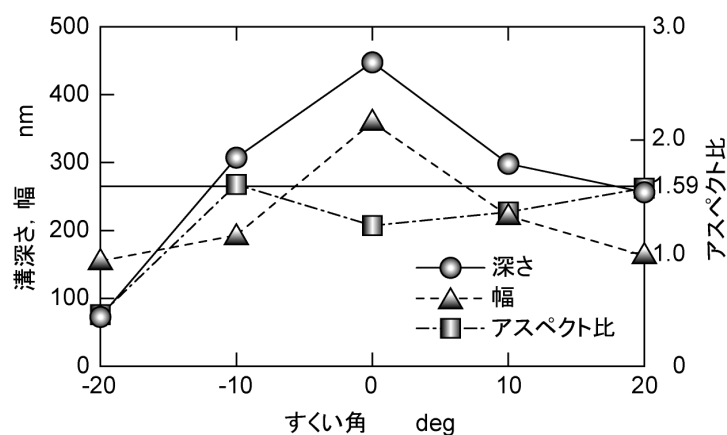


図 5.12 すくい角と溝深さ、幅およびアスペクト比の関係

### 5.3.3 横すくい角の影響

加工溝両側の盛り上がりを低減するため、切れ刃に横すくい角を設け、その有用性について検討を行った。

図 5.13 は、 $\pm 10^\circ$  の横すくい角を設けた切れ刃の SEM 観察像である。加工方向に対して、右側が正のすくい角 ( $+10^\circ$ )，左側が負のすくい角 ( $-10^\circ$ ) となる。先端角は  $35^\circ$ ，すくい角は  $0^\circ$  である。

図 5.14 は、垂直荷重と溝深さ、幅およびアスペクト比の関係である。垂直荷重の増加とともに溝深さ、幅ともに増加している。アスペクト比は、垂直荷重に係らずほぼ 1.59 に近い値をとっていることから、切れ刃の形状をよく転写した加工が行われていることがわかる。すなわち、横すくい角を導入しても、横すくい角のない切れ刃と同様に、垂直荷重に係らず一定のアスペクト比を有する溝加工が可能である。

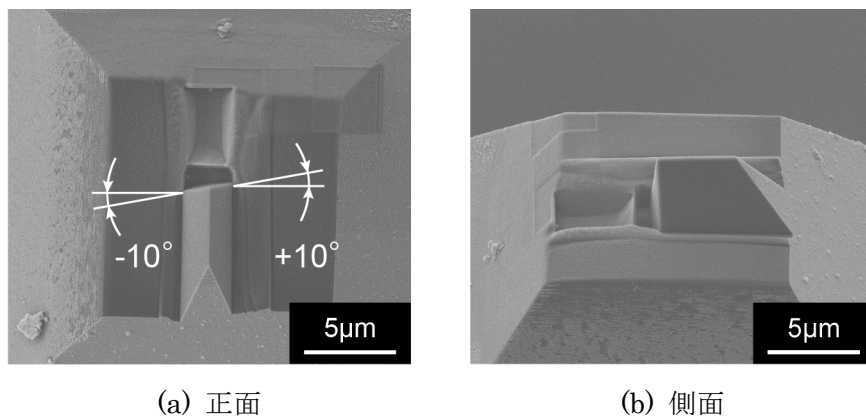


図 5.13 横すくい角を設けた切れ刃の SEM 観察像

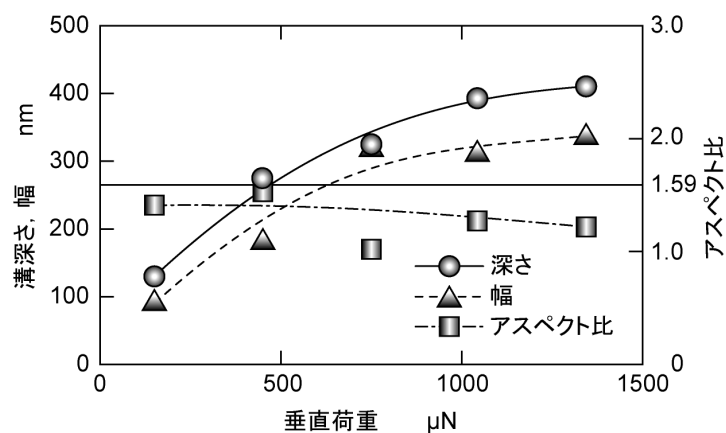


図 5.14 垂直荷重と溝深さ、幅およびアスペクト比の関係

図 5.15 は，垂直荷重  $746\mu\text{N}$  で加工した加工溝の SEM 観察像である．負の横すくい角側では，盛り上がりが発生しているのに対し，正の横すくい角側では，盛り上がりの発生が抑えられていることがわかる．以上のことから，切れ刃に正の横すくい角を設けることは，加工溝の盛り上がり低減に有用であることがわかった．

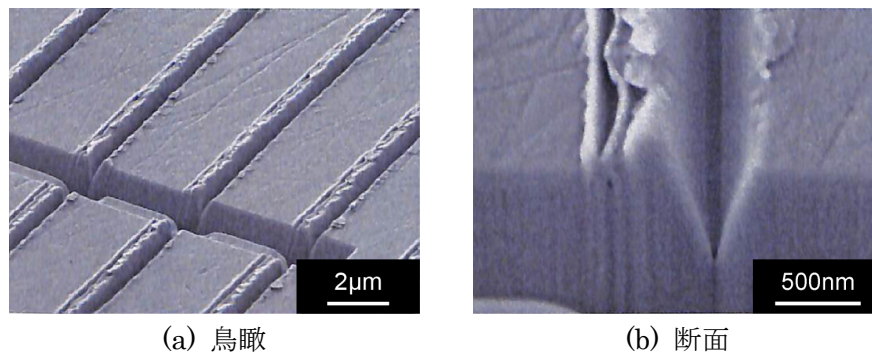


図 5.15 加工溝の SEM 観察像

## 5.4 結 言

本章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、微細かつ高精細な V 溝加工を行うことを目的として、集束イオンビームを用いて、ダイヤモンド切れ刃の先端角、すくい角、横すくい角を設けた加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金に対して溝加工実験を行い、切れ刃形状が加工溝性状に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (1) FIB を用いて加工用 AFM カンチレバー切れ刃の加工を行ったところ、先端角  $35^\circ$ 、切れ刃先端丸み半径 20nm のダイヤモンド切れ刃を作製することができた。
- (2) 切れ刃の先端角が  $35^\circ$  のカンチレバーは、すべてのすくい角において、本実験範囲内の加工距離では、摩耗や欠損などの形状変化は見られず、十分な強度と耐摩耗性を有することを示した。
- (3) すくい角が  $0^\circ$  のとき溝深さ、幅ともに最も大きくなり、切れ刃の断面形状のアスペクト比に近かった。
- (4) 正の横すくい角を設けることにより、加工溝の盛り上がりの低減に有用であることがわかった。

次章では、高能率な微細加工を実現する加工用 AFM カンチレバーを開発し、その性能評価を行っていく。

## 参考文献

- 1) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber : Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Lett., 56 (1986) 930.
- 2) R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong and C. A. Mirkin : “Dip Pen” Nanolithography, Science, 283 (1999) 661.
- 3) K. Ashida, N. Morita and Y. Yoshida : Study on Nanomachining Process Using Mechanism of a Friction Force Microscope, JSME Int. J., Ser. C, 44 (2001) 244.
- 4) 小野崇人, 浜中 均, 江刺正喜 : SPM とマイクロマシニング, 表面科学, 18, 4 (1997) 198.
- 5) 柴田隆行 : ダイヤモンド薄膜のマイクロマシニング, 表面技術, 50, 11 (1999) 961.
- 6) 小野崇人, 江刺正喜 : 走査型プローブ顕微鏡とナノメートル加工への応用, 計測と制御, 38, 12 (1999) 763.
- 7) 作原寿彦, 須田正之, 古田一吉, 渡邊直哉 : SPM によるマイクロ加工, 精密工学会誌, 68, 2 (2002) 197.
- 8) 吉田浩也, 松室昭仁, 岩田博之, 高木 誠 : SPM を用いた Si 単結晶のナノ加工と表面の構造変化, 精密工学会誌, 73, 10 (2007) 1149.
- 9) 清水 淳, 周 立波, 山本武幸, 津村貴史, 岡部秀光, 江田 弘 : 微小引っかきによるシリコンウエハ研削現象の解析, 砥粒加工学会誌, 52, 10 (2008) 601.
- 10) M. A. McCord and R. F. Pease : Scanning tunneling microscope as a micromechanical tool, Appl. Phys. Lett., 50 (1987) 569.
- 11) E. J. van Loenen, D. Dijkkamp, A. J. Hoeven, J. M. Lenssinck and J. Dieleman : Nanometer scale structuring of silicon by direct indentation, J. Vac. Sci. Technol., A8 (1989) 574.
- 12) 小森圭悟, 森田 昇, 高野 登, 山田 茂, 大山達雄 : 加工用 AFM カンチレバーによる LSI 多重層の単一層除去加工, 砥粒加工学会誌, 53, 6 (2009) 385.
- 13) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤 : シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用 (第 1 報) —シリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具の作製—, 精密工学会誌, 70, 11 (2004) 1402.
- 14) 川堰宣隆, 深瀬達也, 高野 登, 森田 昇, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤, 芦田 極 : シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用 (第 2 報) —任意切れ刃を持った加工用カンチレバーの作製—, 精密工学会誌, 72, 8 (2006) 1025.

- 15) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤 : ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 1 報 : 精密加工用工具としての性能評価) , 砥粒加工学会誌, 48, 9 (2004) 510.
- 16) 高野 登, 杉原英之, 岡 大輔, 森田 昇, 山田 茂, 大山達雄, 芦田 極 : ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 2 報 : 1 立方インチサイズ超小型フライス盤の開発) , 砥粒加工学会誌, 48, 12 (2004) 700.
- 17) N. Kawasegi, N. Takano, D. Oka, N. Morita, S. Yamada, K. Kanda, S. Takano, T. Obata and K. Ashida : Nanomachining of Silicon Surface Using Atomic Force Microscope with Diamond Tip, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 128 (2006) 723.
- 18) N. Kawasegi, N. Takano, D. Oka, N. Morita, S. Yamada, K. Kanda, S. Takano, T. Obata and K. Ashida : Nanomachining by Cantilever with Diamond Tip Using Atomic Force Microscopy, Proc. of The 2nd JSME/ASME Int. Conf. on Materials and Processing 2005 : NTM-6 (2005).





## 第 6 章 加工用 AFM カンチレバーを用いた高能率微細加工

### 6.1 緒 言

マイクロ・ナノメートルスケールの加工技術として、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) 利用した様々な微細加工の方法が提案されている<sup>1)~3)</sup>。SPM を微細加工に用いる利点は、元来原子オーダーの表面観察を目的として開発されたため、ナノメートルスケールの運動機構を有していること、測定用の探針を工具として利用できることである。

本研究では、切れ刃先端形状と分布を精密に規定できるダイヤモンドアレイ工具を作製し、マイクロ・ナノメートルスケールの超精密加工への適用の可能性について検証を行っている<sup>4)~10)</sup>。既報では、単結晶シリコンの異方性エッチングと多結晶ダイヤモンドの CVD 技術を駆使して開発したダイヤモンドアレイ工具について報告した<sup>4)</sup>。また本工具の切れ刃 1 つを抽出して高剛性のシリコンカンチレバーに装着することにより加工用 AFM カンチレバーを作製し、AFM にて加工実験を行ったところ、優れた加工性能、耐摩耗性を示した<sup>5)</sup>。さらに、単結晶シリコンの等方性エッチングを応用し、先端半径を変化させたダイヤモンド切れ刃を有する加工用カンチレバーを作製し、これを用いて試料表面を摩擦させることで内部にアモルファス相を形成後、エッチング処理を行うことで微細構造物の形成を行った<sup>6)</sup>。

第 5 章においても、加工用 AFM カンチレバーのダイヤモンド切れ刃を集束イオンビーム (FIB) により加工し、先端角、すくい角、横すくい角を変化させ、切れ刃形状が加工性に及ぼす影響について検討を行っている<sup>7)</sup>。しかしながら、いずれも 1 本のカンチレバーに 1 つのダイヤモンド切れ刃を装着しているため、同形状の加工を広範囲で行う場合、加工時間が長くなるという課題が残る。

本章では、AFM 機構を用いた高能率微細加工を想定し、2 種類の加工用 AFM カンチレバーを提案している。一つは、1 本のカンチレバー先端に複数の多結晶ダイヤモンド切れ刃を具備した加工用 AFM カンチレバー（以下、多刃カンチレバーと呼ぶ）である。もう一つは、剛性の異なるカンチレバーを複数本有する加工用 AFM カンチレバー（以下、マルチカンチレバーと呼ぶ）である。これら 2 種類の加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金および結晶シリコン (100) に対して溝加工実験を行い、高能率微細加工用工具としての評価を行った。

## 6.2 加工用 AFM 多刃カンチレバーの作製と評価

### 6.2.1 加工用 AFM 多刃カンチレバーの作製

既報で作製した加工用 AFM カンチレバーは、1 辺  $80\mu\text{m}$  の四角錐形状の切れ刃が  $160\mu\text{m}$  ピッチで整列しているダイヤモンドアレイ工具から抽出して装着されている<sup>4)</sup>。シリコンカンチレバーの幅は  $100\mu\text{m}$  であるため、切れ刃は 1 つしか装着することができない。そこで、1 本のカンチレバーに複数の切れ刃を装着するため、新たにシリコンモールドを作製し、切れ刃ピッチ  $22\mu\text{m}$ 、1 辺  $20\mu\text{m}$  の四角錐形状のダイヤモンド切れ刃列を作製した。シリコンモールド作製のシリコンウェハは、酸化膜厚さが従来の  $2\mu\text{m}$  のものから  $200\text{nm}$  のものに変更した。これは、切れ刃列間隔が狭いため、フォトリソグラフィーでの露光時に起きる拡散の影響を抑制するためである。これにともない、エッチャント濃度も  $20\text{mass}\%$  に変更して、シリコンモールドを作製した。

図 6.1 は、作製したダイヤモンド切れ刃列の SEM 観察像で、4 つの四角錐形状切れ刃が 1 列に並んでいる。

図 6.2 は、ダイヤモンド切れ刃列の装着方法の概略である。以下にその手順を示す。

- (1)  $22\mu\text{m}$  間隔で整列しているダイヤモンドアレイ工具から、4 つ分の切れ刃列を YAG レーザ加工装置（澁谷工業：SDL-100N、図 6.3 参照）により切断して抽出する。このレーザ加工装置は、パソコン上で G コードにより命令を与え、任意の形状に加工することができる。表 6.1 は、レーザ加工条件である。
- (2) 抽出した切れ刃列を、顕微鏡下でマニピレータによりカンチレバーにエポキシ系接着剤で装着する。
- (3) 加工用 AFM 多刃カンチレバーの完成。

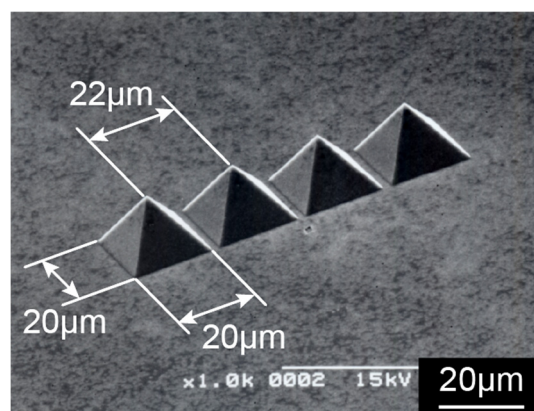


図 6.1 ダイヤモンド切れ刃列の SEM 観察像

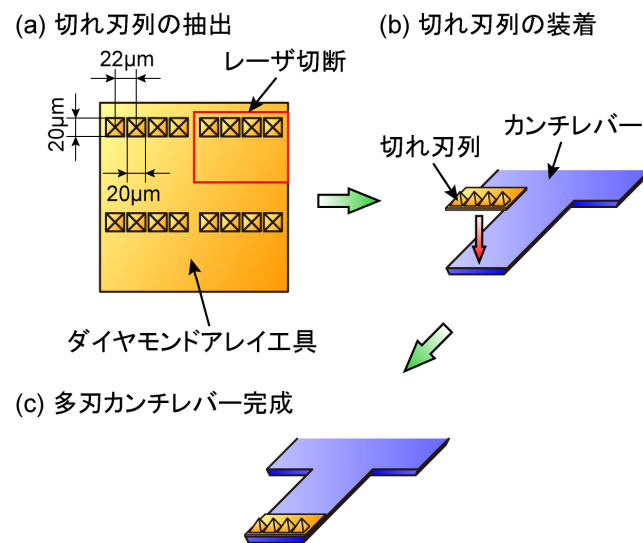


図 6.2 ダイヤモンド切れ刃列の装着方法の概略



図 6.3 レーザ加工装置の外観

表 6.1 レーザ加工条件

波長	(nm)	1030
レーザー出力	(W)	2.5
周波数	(kHz)	20.0
加工速度	(mm/s)	0.9

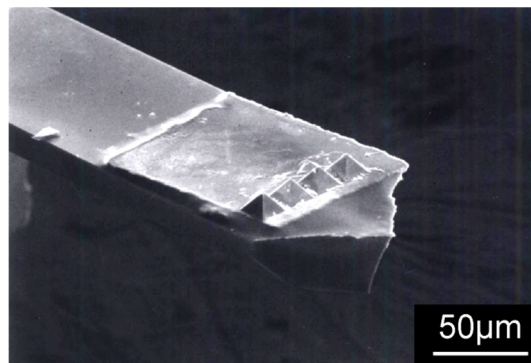


図 6.4 多刃カンチレバーの SEM 観察像

図 6.4 は，作製した多刃カンチレバーの SEM 観察像である．切れ刃列をカンチレバーの幅に合わせて切断することにより，接着の際に表面張力によって図のようにカンチレバーに対して平行に装着することができた．

### 6.2.2 引き切り加工実験

製した多刃カンチレバーの評価を行うため、AFM 加工装置(島津製作所:SPM-9500J2)を用いて引き切り加工実験を行った。

図 6.5 は引き切り加工実験の概略、表 6.2 は加工条件である。被削材は、ステンレス鋼 (SUS420J2) に厚さ  $150\mu\text{m}$  の Ni-P 合金めっきを施したものをを用いた。加工方向は、カンチレバー長手方向とし、長さ  $64\mu\text{m}$  の引き切り加工を  $2\mu\text{m}$  間隔で 10 回行った。垂直荷重は、カンチレバー背面からの反射レーザ光をフォトディテクタで検出することにより、カンチレバーのたわみを測定し、カンチレバーのたわみ剛性を乗じることにより求めた。カンチレバーのたわみ剛性は  $236\text{N/m}$  である。実験後の加工痕は、走査型電子顕微鏡 (日立製:S-2400) および加工実験にも用いた AFM にて観察を行った。

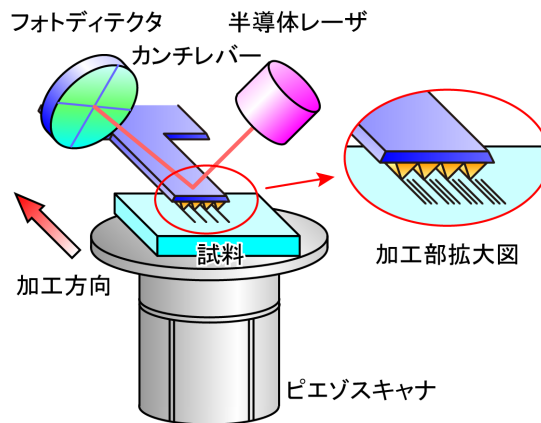


図 6.5 引き切り加工実験の概略

表 6.2 引き切り加工条件

被削材		Ni-P 合金
垂直荷重	( $\mu\text{N}$ )	1688
加工速度	( $\mu\text{m/s}$ )	64
加工ピッチ	( $\mu\text{m}$ )	2
加工範囲	( $\mu\text{m}$ )	$64 \times 18$

図 6.6 は、引き切り加工痕の SEM 観察像である。4 つ全ての切れ刃が、 $2\mu\text{m}$  間隔でそれぞれ 10 本の引き切り加工を行っており、異なる場所の同時加工が行われていることがわかる。

図 6.7 は、切れ刃ごとの加工痕の AFM 観察像とその断面で、図 6.6 の加工部(A)から(D)に対応している。加工部(B)の部分が最も深く、以下(C), (D), (A)の順に浅くなっている。これは、切れ刃先端形状や高さが各切れ刃間で異なるためと考える。今後、ダイヤモンド切れ刃列の製作精度や切れ刃列のカンチレバーへの装着精度を向上させることにより、高精度な微細加工の加工時間を大幅に短縮するツールになり得ると考える。また、切れ刃の配列パターンを変化させることにより、種々の形状を加工することも可能である。

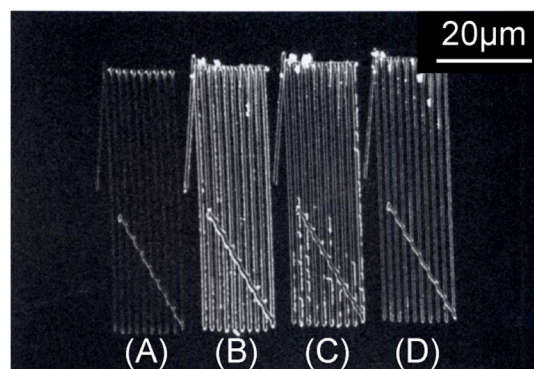
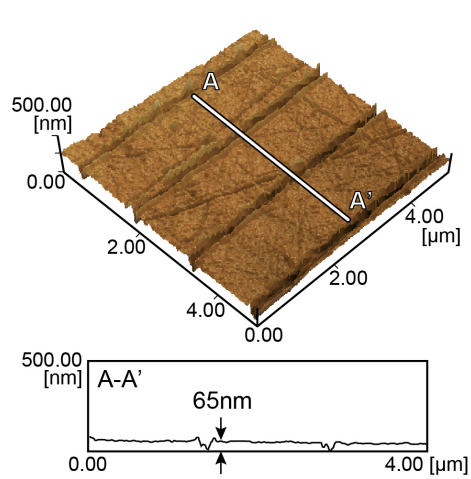
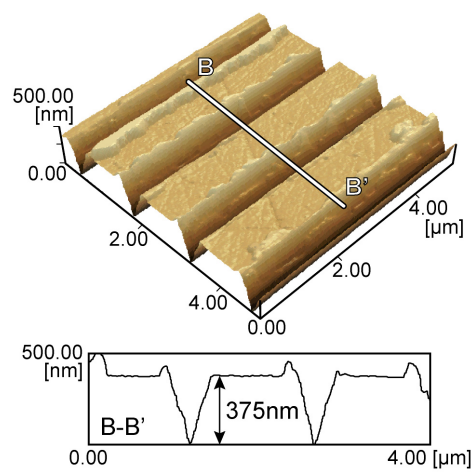


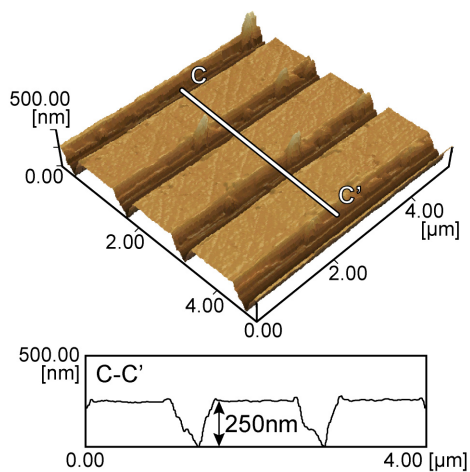
図 6.6 引き切り加工痕の SEM 観察像



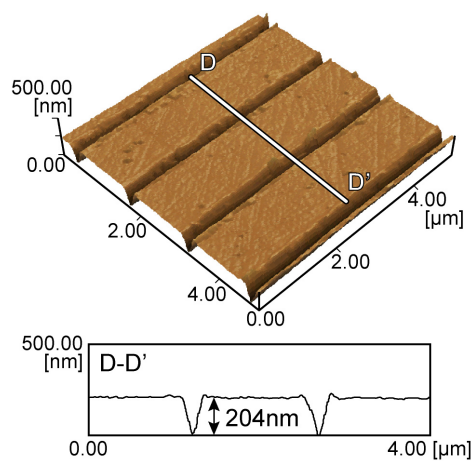
(a) 加工部(A)



(b) 加工部(B)



(c) 加工部(C)



(d) 加工部(D)

図 6.7 加工痕の AFM 観察像と断面

### 6.3 加工用 AFM マルチカンチレバーの作製と評価

#### 6.3.1 加工用 AFM マルチカンチレバーの作製

本項では，1 つの切れ刃を装着したレバーが複数本有するマルチカンチレバーの作製とその評価を行う．

本項で提案するマルチカンチレバーは，たわみ剛性の異なる 3 本のレバーを具備しており，剛性の高いレバーから低いレバーへと重畳加工することにより，一度で粗加工から仕上げ加工を実現するものである．

図 6.8 は，作製するマルチカンチレバーの模式図である．カンチレバーは単結晶シリコン(100)の異方性エッチングにより作製するため，レバー断面は同図(a)のように上底  $b$ ，底角  $54.7^\circ$  の等脚台形状となる．同図(b)はレバーの概略で，幅の異なる 3 本のレバーを配置した．各レバーの間隔は，ダイヤモンドアレイ工具の配列に合わせて  $320\mu\text{m}$  とした．レバーの長さを  $l$ ，厚さを  $t$  とすると，レバーのたわみ剛性  $k$  は次式で与えられる．

$$k = \frac{Et^3(6b^2 + 8.496bt + 2.005t^2)}{l^3(24b + 16.99t)} \quad (6.1)$$

ここで， $E$  は単結晶シリコンのヤング率で， $E=188\text{GPa}$  とした．3 本のレバーの幅  $b$  をそれぞれ  $70, 90, 110\mu\text{m}$ ，長さ  $l$  を  $1000\mu\text{m}$  とし，厚さ  $t$  は実際に作製したカンチレバーの SEM 観察像から  $45\mu\text{m}$  とした．これらの値を式(1)に代入し，各レバーのたわみ剛性  $k$  を計算すると，それぞれ  $422, 510, 601\text{N/m}$  となった．

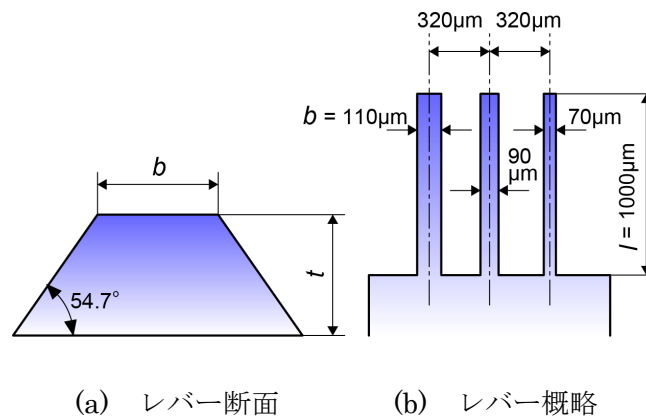


図 6.8 マルチカンチレバーの模式図



図 6.9 は、ダイヤモンド切れ刃の装着方法の概略である。以下にその手順を示す。

- (1) 160 $\mu\text{m}$  間隔で整列しているダイヤモンドアレイ工具から、5 つ分の切れ刃列を YAG レーザにより切断して抽出する。レーザ加工装置および加工条件は、多刃カンチレバーにおけるダイヤモンド切れ刃列の抽出のときと同様である。
- (2) カンチレバーにエポキシ系接着剤で装着する。この際、シリコンモールドのくぼみに合わせて切れ刃列を固定し、顕微鏡下で位置合わせを行うことにより、レバー先端に正確に切れ刃を装着することができる。
- (3) 集束イオンビーム (FIB) 加工装置により、レバー間の不要な部分を切断する。
- (4) 加工用 AFM マルチカンチレバーの完成。

図 6.10 は、作製したマルチカンチレバーの SEM 観察像である。太さの異なる 3 本のレバー先端に、切れ刃が正確に装着されている。以後、たわみ剛性の低いレバーから順に、レバー A、レバー B、レバー C とする。

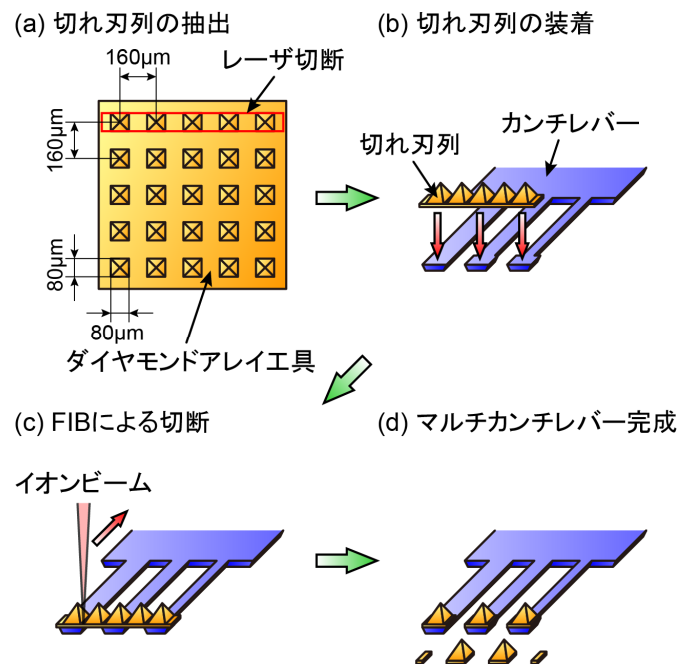


図 6.9 ダイヤモンド切れ刃の装着方法の概略

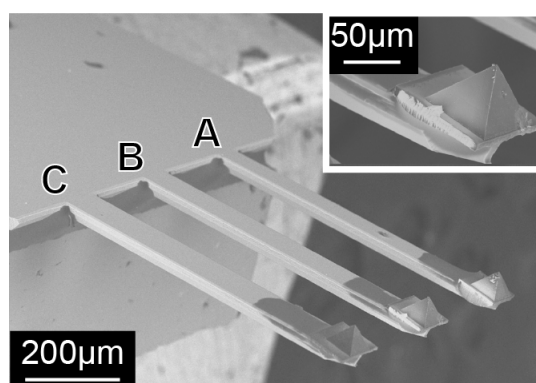


図 6.10 マルチカンチレバーの SEM 観察像

### 6.3.2 各レバーの加工特性評価実験

まず，たわみ剛性の異なる各レバーの加工特性を把握するため，AFM を用いて引き切り加工実験を行った．加工実験は，図 6.4 において多刃カンチレバーをマルチカンチレバーに替えて行った．加工時のレバーのたわみを検出するため，半導体レーザは，中心のレバーBに照射した．表 6.3 は，引き切り加工条件である．被削材は，単結晶シリコン(100)とした．垂直荷重は，表に示す範囲内で 6 段階に変化させて実験を行った．加工痕は，AFM を用いて観察を行った．

図 6.11 は，垂直荷重 1206 $\mu$ N で引き切り加工を行った時の各レバーによる加工痕の AFM 観察像とその断面である．いずれの加工痕断面見ても，加工溝の側に盛り上がりが見られるが，切れ刃形状を精度よく転写した V 溝加工が行われていることがわかる．また，たわみ剛性の高いレバーほど，加工溝の深さも大きくなっている．

表 6.3 引き切り加工条件

被削材		単結晶シリコン(100)
垂直荷重	( $\mu$ N)	176～1206
加工速度	( $\mu$ m/s)	250
加工距離	( $\mu$ m)	125
加工方向		<110>

図 6.12 は、各レバーの垂直荷重と溝深さの関係である。レバーA とレバーC の垂直荷重は直接測定していないため、レバーB の垂直荷重を基準としてプロットした。レバーA において、垂直荷重  $176\mu\text{N}$  のときの加工痕は観察されなかった。図より、いずれのレバーによる加工痕も垂直荷重の増加とともに、深さも大きくなっている。また、同一垂直荷重では、レバー剛性が高くなるにつれて、深さも大きくなっていることがわかる。

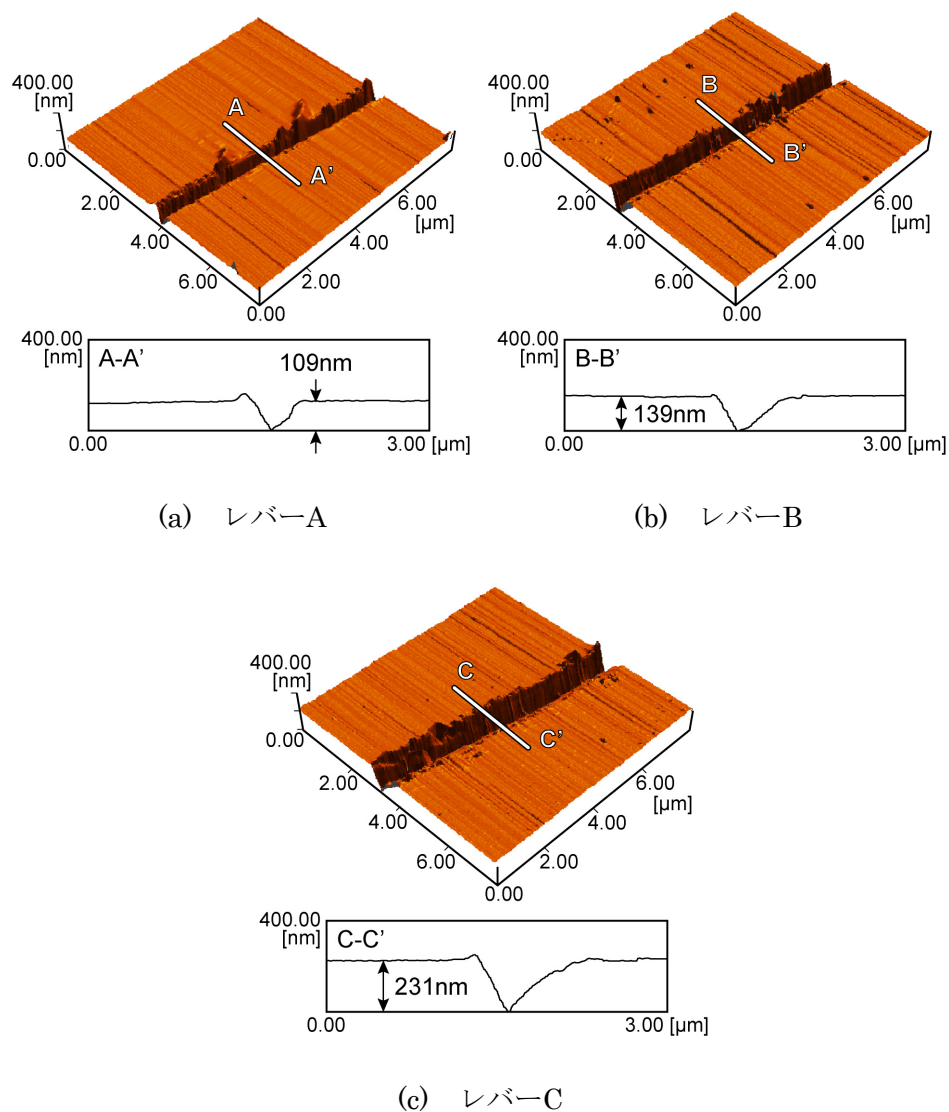


図 6.11 各レバーにおける加工痕の AFM 観察像と断面

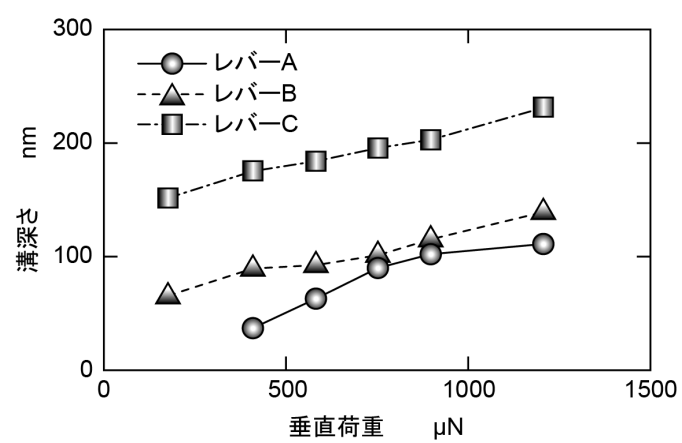


図 6.12 各レバーの垂直荷重と溝深さの関係

### 6.3.3 マルチカンチレバーによる重畳加工実験

たわみ剛性の違いにより，レバーごとに異なる加工特性を示したマルチカンチレバーを用いて重畳加工実験を行った．重畳加工実験を行う場合，工具となるマルチカンチレバー両端のレバー間隔が  $640\mu\text{m}$  であるため，市販の AFM のピエゾステージではストロークが不足する．そこで，新たに開発したナノ加工・計測システムを加工機として用いることにした<sup>11)</sup>．

図 6.13 は，ナノ加工・計測システムの概略である．装置本体は，主に工具位置決め機構部，4 種類の加工・計測機能（ナノフライス，ナノドリル，ナノシェーパ，AFM）を等分に配置したターンテーブルと，工具交換のための軸ステージ，被削材を固定する試料台と位置決め補正用のセンサユニットを搭載したスライダによる工具位置決め補正機構からなる．このシステム専用に開発した 3 軸ピエゾステージは，分解能  $1\text{nm}$ ，ストローク  $80\mu\text{m}$

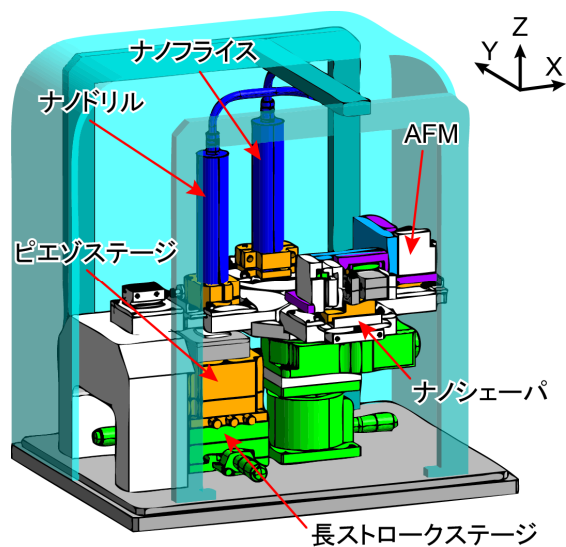


図 6.13 ナノ加工・計測システムの概略

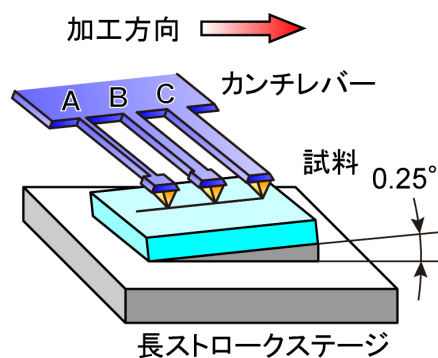
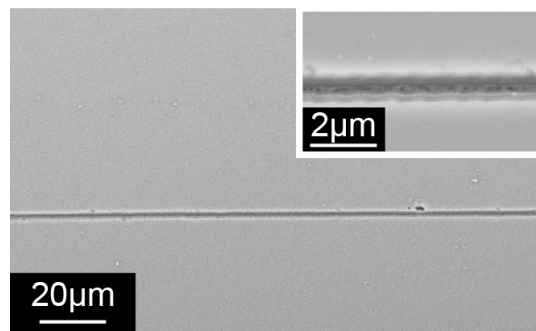


図 6.14 重畳加工の模式図

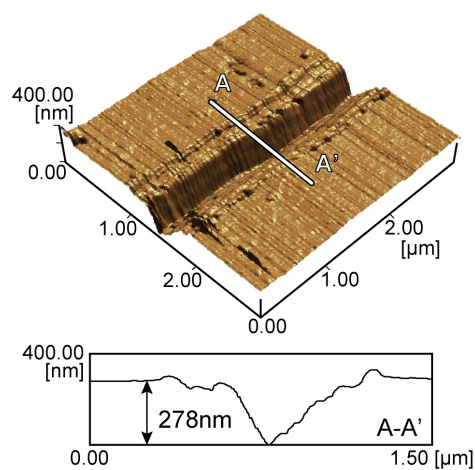
の性能を有する．加工実験には，このピエゾステージ直下に具備されている 150mm 移動可能な長ストローク X 軸ステージ機構を利用した．ピエゾステージは利用していないため，垂直荷重の測定は行っていない．

表 6.4 重畳加工条件

被削材		単結晶シリコン(100)
傾斜角	(deg)	0.25
加工速度	(mm/s)	120.7
移動距離	(mm)	5
加工方向		<110>



(a) 光学顕微鏡観察像



(b) AFM 観察像と断面

図 6.15 重畳加工痕の観察像

図 6.14 は、重畳加工の模式図である。加工方向に被削材固定ステージを  $0.25^\circ$  傾斜させることにより、切込みを徐々に増加させ、レバーC からレバーA へと加工を行った。表 6.4 は、重畳加工条件である。3 本のレバー配置の関係から、レバー長手方向に垂直な方向で加工実験を行った。加工痕は、光学顕微鏡と AFM で観察を行った。

図 6.15 は、重畳加工による加工痕の光学顕微鏡観察像および AFM 観察像である。同図 (a) より、たわみ剛性の異なる 3 本のレバーによる加工溝が重なっていることがわかる。また、加工痕の拡大図見ると、溝側面がうねっていることがわかる。これは、引き切り加工をカンチレバー長手方向と垂直な方向に行ったため、レバーのねじれ剛性が不足してステイックスリップを起こしたためと考える。同図 (b) から、加工溝のうねりが観察される。加工溝の形状については、本実験条件の範囲内では重畳加工による影響は見られなかった。

本章では、3 本のカンチレバーに同一形状の切れ刃を装着して重畳加工実験を行っている。今後の課題として、集束イオンビーム加工装置を用いて、ダイヤモンド切れ刃の形状加工を行い、より詳細な実験を行っていくとともに、レバーのねじり剛性を向上させたレバー配置についても検討を行っていく必要があると考える。

#### 6.4. 結 言

本章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、高能率な微細加工を行うことを目的として、1 本のカンチレバーに複数の多結晶ダイヤモンド切れ刃を具備した多刃カンチレバーと、剛性の異なるカンチレバーを複数本有するマルチカンチレバーを作製し、Ni-P 合金めっきと単結晶シリコン（100）に対して加工実験を行い、高能率微細加工用工具としての評価を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 切れ刃ピッチ  $22\mu\text{m}$ 、1 辺  $20\mu\text{m}$  の四角錐形状のダイヤモンド切れ刃列を新たに作製し、シリコンカンチレバーに装着することにより、1 本のレバーに複数のダイヤモンド切れ刃を有する加工用 AFM 多刃カンチレバーを作製することができた。
- (2) 多刃カンチレバーを用いて引き切り加工実験を行ったところ、同一形状の同時加工ができた。これにより加工時間の短縮が図れる。
- (3) カンチレバーの太さを変化させることにより、たわみ剛性の異なる加工用 AFM マルチカンチレバーを作製することができた。
- (4) マルチカンチレバーを用いて引き切り加工実験を行ったところ、各レバーはたわみ剛性に応じて異なる加工特性を示した。

今後、切れ刃形状やマルチカンチレバーのレバー配置を変化させた加工用 AFM カンチレバーの開発と評価を行い、本研究で提案しているダイヤモンドアレイ工具とそれを応用した工具の実用化を目指したい。



## 参考文献

- 1) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber : Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Lett., 56 (1986) 930.
- 2) R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong and C. A. Mirkin : “Dip Pen” Nanolithography, Science, 283 (1999) 661.
- 3) K. Ashida, N. Morita and Y. Yoshida : Study on Nanomachining Process Using Mechanism of a Friction Force Microscope, JSME Int. J., Ser. C, 44 (2001) 244.
- 4) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤: シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用(第1報)ーシリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具の作製ー, 精密工学会誌, 70, 11 (2004) 1402.
- 5) N. Kawasegi, N. Takano, D. Oka, N. Morita, S. Yamada, K. Kanda, S. Takano, T. Obata and K. Ashida : Nanomachining of Silicon Surface Using Atomic Force Microscope with Diamond Tip, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 128 (2006) 723.
- 6) 川堰宣隆, 深瀬達也, 高野 登, 森田 昇, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤, 芦田 極: シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用(第2報)ー任意切れ刃を持った加工用カンチレバーの作製ー, 精密工学会誌, 72, 8 (2006) 1025.
- 7) 高野 登, 清水大志, 山田 茂, 森田 昇: ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究(第3報: FIBにより先鋭化した加工用 AFM カンチレバーを用いた微細 V 溝加工), 砥粒加工学会誌, 58, 7 (2014) 446.
- 8) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤: ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究(第1報: 精密加工用工具としての性能評価), 砥粒加工学会誌, 48, 9 (2004) 510.
- 9) 高野 登, 杉原英之, 岡 大輔, 森田 昇, 山田 茂, 大山達雄, 芦田 極: ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究(第2報: 1立方インチサイズ超小型フライス盤の開発), 砥粒加工学会誌, 48, 12 (2004) 700.
- 10) 小森圭悟, 森田 昇, 高野 登, 山田 茂, 大山達雄: 加工用 AFM カンチレバーによる LSI 多重層の単一層除去加工, 砥粒加工学会誌, 53, 6 (2009) 385.
- 11) 稲垣清紀, 森田 昇, 芦田 極, 斉藤潤二: マシニングセンタ型ナノ加工・計測システムの開発に関する研究, 精密工学会誌, 74, 11 (2008) 1176.



## 第 7 章 結 論

### 7.1 本研究の成果と結論

本研究では、マイクロメートルからナノメートルオーダーの微細加工を、高精度で実現するための精密加工用ダイヤモンド工具の開発とその応用について検討を行った。まず、本研究における基幹技術である精密加工用ダイヤモンド工具（以下、ダイヤモンドアレイ工具）を提案・開発を行った。また、作製したダイヤモンドアレイ工具単体で性能評価を行った。次に、ダイヤモンドアレイ工具の応用について検討した。まず、ダイヤモンドアレイ工具の切れ刃を抽出し、マイクロモータの回転軸端に装着したスピンドルを搭載する超小型 3 軸ナノフライス盤の開発し、加工実験を行った。また、一般の精密工作機械で利用可能な微細精密加工用工具の開発と評価も行った。最後に、原子間力顕微鏡（AFM）を用いた微細加工用カンチレバーの開発し、加工実験を行うことで評価を行った。

第 1 章では、ナノテクノロジーの必要性を述べ、代表的な微細加工技術を挙げ、その特徴について述べた。本研究では、微細加工技術の中でも、微細加工用ダイヤモンド工具に焦点を絞り、従来にない新しい微細加工用工具を提案・開発するとともに、それを応用した工具の作製に取り組んだ。

第 2 章では、単結晶シリコンの異方性エッチングとダイヤモンド CVD 技術を用い、任意の切れ刃形状と配列を規定できるダイヤモンドアレイ工具を提案し、その作製方法を示した。また、作製方法について検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 単結晶シリコン（100）に対して、KOH 溶液を用いたシリコンモールド作製のための最適なエッチャント条件は、濃度 25～35mass%、温度 343～353K、時間 40min であった。
- (2) 単結晶シリコン（100）の異方性エッチングで作製したシリコンモールドを用いて、熱フィラメント CVD 法により作製したダイヤモンドアレイ工具は、シリコンモールドの形状を正確に転写しており、先端角約  $70.6^{\circ}$  の四角錐形状の切れ刃を有し、切れ刃先端も数 10nm と非常に鋭利であった。
- (3) マスクパターンを変化させることで、任意の切れ刃配列と大きさをもつダイヤモンドアレイ工具の作製が可能であった。
- (4) 面方位の異なるシリコンウェハを用いることで、切れ刃形状の異なるダイヤモンドアレイ工具の作製が可能であった。面方位（110）のシリコンモールドでは、六面体の屋根型形状、面方位（111）のシリコンモールドでは、正六角柱状の切れ刃を得ることが

できた.

- (5) 単結晶シリコン (100) を等方性エッチングすることにより, ドーム形状の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具が作製できた.
- (6) 異方性エッチング後のシリコンモールドを酸化させることにより, ダイヤモンドアレイ工具切れ刃の先鋭化が可能であった.
- (7) 単結晶シリコン (100) に対して収束イオンビーム照射を行うことで, 照射部が KOH 水溶液に対して難溶性となりマスクとして作用することを利用して, 一辺が約  $1\mu\text{m}$  の四角錐状の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具を作製することができた.

以上の結果から, シリコンモールドとして用いる単結晶シリコンの面方位, マスクパターン, 異方性/等方性エッチング, シリコンモールドの酸化, 収束イオンビームの利用などを適切に選択することにより, ダイヤモンドアレイ工具は精密な微細加工用工具として有効な利用が可能であると考え.

第 3 章では, 提案したダイヤモンドアレイ工具の工具性能を評価するために, 工具性能評価装置を作製し, 押し込み加工と引っかかり加工実験を行った. その結果, 以下の結論を得た.

- (1) 押し込み荷重, 引っかかり荷重ともに  $200\text{mN}$  以上の荷重を測定することが可能な工具性能評価装置を試作した.
- (2) ダイヤモンドアレイ工具を用いて押し込み加工を行った結果, 規定された押し込み加工痕形状と配列の加工が可能であった.
- (3) ダイヤモンドアレイ工具の切れ刃が四角錐形状しているため, 引っかかり方向により加工形態が異なり, 引っかかり抵抗にも差異が見られるが, 加工痕の深さはほぼ同じであった.
- (4) 複数の切れ刃を有するダイヤモンドアレイ工具を用いて引っかかり加工を行った結果, 能率の高い除去加工が可能であった.
- (5) いずれの加工を行った場合でも, 加工後のダイヤモンドアレイ工具に破損は見られなかった.

以上のことから, ダイヤモンドアレイ工具は, 精密加工用工具としての性能を有していると考え.

第 4 章では, 1 辺が 1 インチの立方体内に収まるナノフライス盤の開発を行った. また開発したナノフライス盤を使用しダイヤモンドアレイ工具によるフライス加工実験を行

った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 切欠き弾性ヒンジとピエゾ素子を組み合わせた超小型ステージを作製した。さらに小型の構成部品を使用することにより、 $25.4 \times 23.0 \times 25.0\text{mm}$  の大きさのナノフライス盤を開発した。
- (2) 有限要素解析ソフト ANSYS による構造解析により、ステージ切欠き弾性ヒンジの切り欠き厚さは  $0.6\text{mm}$  が適当であることがわかった。これにより、ピエゾ素子を駆動源とした変位拡大機構で、各ステージの最大変位は  $12\mu\text{m}$  を達成した。
- (3) 各ステージ内部に組み込んだ変位センサでは、ステージの位置検出の最大誤差は  $25\text{nm}$  以下であった。
- (4) Y ステージと被削材との間に小型圧力センサを挟みこんで配置することにより、切削抵抗の測定を可能とした。また、これにより被削材とフライス用工具の接触確認も可能とした。
- (5) ナノフライス盤の制御をパソコンで行い、ステージ変位を可視化できる制御用ソフトウェアを開発した。
- (6) Windows に内蔵されている API の TimeSetEvent を用いることにより、ステージの送り速度設定高精度化を実現した。
- (7) ステージ駆動用のピエゾ素子のヒステリシス現象と応答の遅れによる位置決め誤差を補償する機能を付加した。その結果、伸びの場合で 47%、戻りの場合で 43%の改善がみられた。
- (8) ダイヤモンドアレイ工具を用いて加工実験を行ったところ、硬脆材料であるシリコンウェハに対しても良好な切削が可能であった。

今後の課題として、パソコンによる NC 制御において、このプログラムでは JOG 送り (G00)、直線補間 (G01) を解析し、実行することができるものの、円弧補間や工具径補正には、現在のところ未対応である。今後、工具径補正と工具長補正機能を付加することにより、3次元構造の切削を行うことが可能になると考える。

また、通常の工作機械でも使用可能な微細加工用回転工具を作製し、加工実験を行い、工具の評価を行った。その結果、以下の結言を得た。

- (9) 回転軸端に切れ刃となるダイヤモンド切れ刃群あるいは 1 粒子を装着して作製した微細加工用回転工具で、シリコンウェハ、アクリル樹脂、金属ガラスに対して加工実験を行ったところ、数  $10\mu\text{m}$  オーダーの切削加工が可能で、加工痕の両端では四角錐の切れ刃形状を転写した加工痕が形成された。

- (10) 工具取り付け装置を用いて微細加工用回転工具作製した場合、超硬シャンクへの切れ刃の取り付け精度が向上した。
- (11) 工具偏心量  $3\mu\text{m}$  の微細加工用回転工具を用いて、金属ガラスに対して溝加工実験を行ったところ、溝幅が  $18\mu\text{m}$  の加工溝が得られた。これは、工具のスピンドルへの装着時の偏心や、スピンドル自身の振れのためと考える。これらの問題を改善することにより、微細加工用回転工具を用いて、より細かい溝加工が可能になると考える。

第 5 章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、微細かつ高精細な V 溝加工を行うことを目的として、集束イオンビームを用いて、ダイヤモンド切れ刃の先端角、すくい角、横すくい角を設けた加工用 AFM カンチレバーを作製し、Ni-P 合金に対して溝加工実験を行い、切れ刃形状が加工溝性状に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) FIB を用いて加工用 AFM カンチレバー切れ刃の加工を行ったところ、先端角  $35^\circ$ 、切れ刃先端丸み半径  $20\text{nm}$  のダイヤモンド切れ刃を作製することができた。
- (2) 切れ刃の先端角が  $35^\circ$  のカンチレバーは、すべてのすくい角において、本実験範囲内の加工距離では、摩耗や欠損などの形状変化は見られず、十分な強度と耐摩耗性を有することを示した。
- (3) すくい角が  $0^\circ$  のとき溝深さ、幅ともに最も大きくなり、切れ刃の断面形状のアスペクト比に近かった。
- (4) 正の横すくい角を設けることにより、加工溝の盛り上がりの低減に有用であることがわかった。

第 6 章では、AFM 機構と加工用 AFM カンチレバーを用いて、高能率な微細加工を行うことを目的として、1 本のカンチレバーに複数の多結晶ダイヤモンド切れ刃を具備した多刃カンチレバーと、剛性の異なるカンチレバーを複数本有するマルチカンチレバーを作製し、Ni-P 合金めっきと単結晶シリコン (100) に対して加工実験を行い、高能率微細加工用工具としての評価を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 切れ刃ピッチ  $22\mu\text{m}$ 、1 辺  $20\mu\text{m}$  の四角錐形状のダイヤモンド切れ刃列を新たに作製し、シリコンカンチレバーに装着することにより、1 本のレバーに複数のダイヤモンド切れ刃を有する加工用 AFM 多刃カンチレバーを作製することができた。
- (2) 多刃カンチレバーを用いて引き切り加工実験を行ったところ、同一形状の同時加工ができた。これにより加工時間の短縮が図れる。
- (3) カンチレバーの太さを変化させることにより、たわみ剛性の異なる加工用 AFM マルチ

カンチレバーを作製することができた.

- (4) マルチカンチレバーを用いて引き切り加工実験を行ったところ, 各レバーはたわみ剛性に応じて異なる加工特性を示した.

## 7.2 今後の展望

第2章から第6章までの実験結果から、本研究で提案したダイヤモンドアレイ工具ならびにそれを応用した工具は、精密微細加工用工具として有用である一方、より精度の高い工具の作製を行うためには、作製方法やプロセスの見直しを含めた検討が必要である。

第4章では、微細加工用回転工具について述べたが、現在の切れ刃は、単結晶シリコンの結晶異方性エッチングによりシリコンモールドを作製しているため四角錐形状であり、より汎用的な加工に対応するため、種々の切れ刃形状の工具の作製が必要である。そこで、反応性イオンエッチング（RIE）により、種々の形状のシリコンモールドを作製することにより、汎用性の高い工具の開発が可能となる。

図7.1は、RIEにより作製したシリコンモールドである。深さは約50 $\mu\text{m}$ で、柱状の切れ刃形状の工具の作製が可能である。これらのシリコンモールドにダイヤモンド成膜を行い、ダイヤモンドアレイ工具を作製し、微細加工用回転工具に応用していく。

第5章と第6章ではダイヤモンドアレイ工具の応用として、AFM加工用のカンチレバーを提案したが、より高能率な微細加工を行う手法として図7.2に示すような多刃マルチカンチレバーなどが考えられる。同図(a)は、切れ刃列のピッチを切れ刃ピッチの1/3ずつずらして配置することにより、より間隔の狭い溝加工を可能にするものである。同図(b)は、(a)の切れ刃群を異なるレバーに配置することにより、一度に広範囲の溝加工を実現するものである。同図(c)は、カンチレバーの太さを変化させることにより、レバー固定端から切れ刃までの距離が異なっても、レバー剛性が同じになるように設計したものである。同図(d)は、(c)と逆でレバー剛性を変化させ、重畳加工により溝の加工精度の向上を狙ったものである。このように、加工用AFMカンチレバー1つをとっても、ダイヤモンドアレイ工具の応用方法は無限にあると考える。

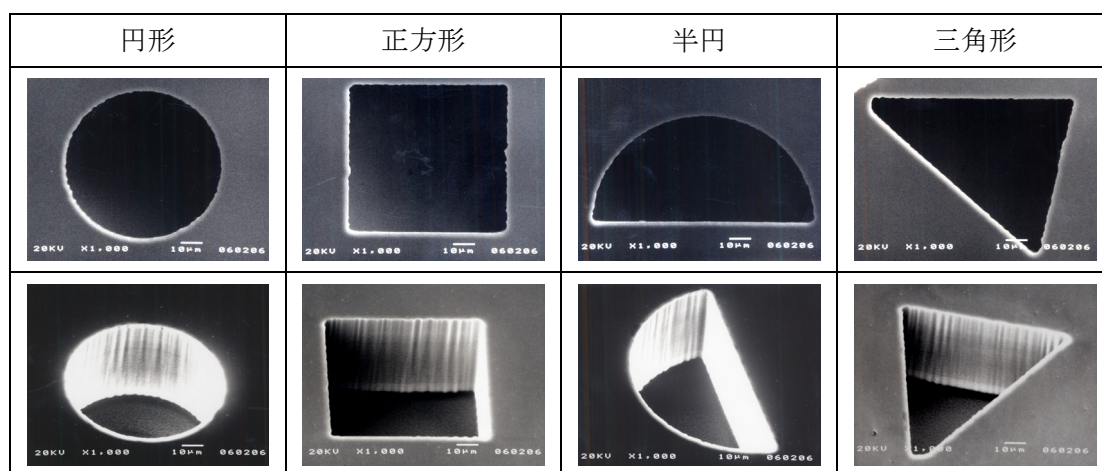


図 7.1 RIE により作製したシリコンモールド



本研究の期間中あるいはその後も，毎年種々の微細加工装置や方法が提案されており，それらの手法を積極的に本研究の開発プロセスに取り込むことにより，ダイヤモンドアレイ工具とそれらの応用工具も，より高精度化させるとともに，大量生産化することにより実用化に結び付けたいと考える．

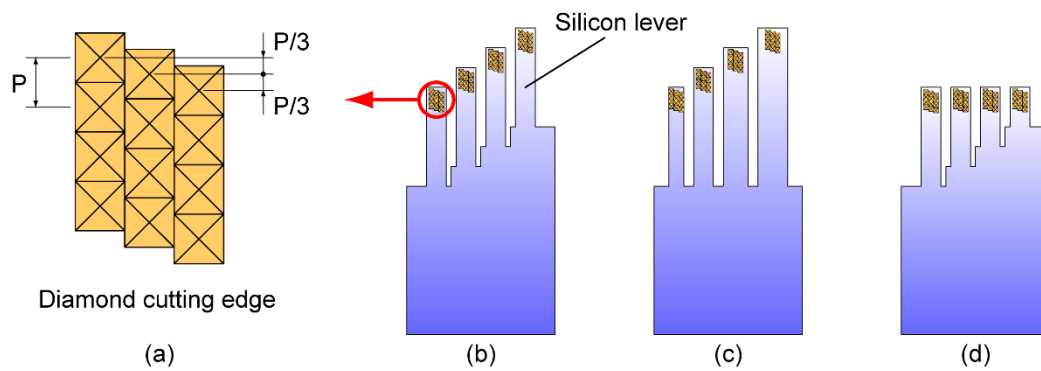


図 7.2 多刃マルチカンチレバーの例



## 本論文の関連研究論文および国際会議プロシーディング

- (1) N. Takano, N. Morita, S. Yamada, T. Oyama, K. Kanda, S. Takano, T. Obata, Development of Diamond Array Tool using Silicon Mold and Applications, Proceedings of the 4th euspen International Conference, pp.125 ~ 126, 2004 年 5 月
- (2) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤, ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 1 報: 精密加工用工具としての性能評価), 砥粒加工学会誌, 48 巻 9 号 (頁 510 ~ 514), 2004 年 9 月
- (3) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川堰宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤, シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用 (第 1 報) —シリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具の作製—, 精密工学会誌, 70 巻 11 号 (頁 1402 ~ 1406), 2004 年 11 月
- (4) 高野 登, 杉原英之, 岡 大輔, 森田 昇, 山田 茂, 大山達雄, 芦田 極, ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 2 報: 1 立方インチサイズ超小型フライス盤の開発), 砥粒加工学会誌, 48 巻 12 号 (頁 700 ~ 703), 2004 年 12 月
- (5) 高野 登, 清水大志, 山田 茂, 森田 昇, ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 3 報: FIB により先鋭化した加工用 AFM カンチレバーを用いた微細 V 溝加工), 砥粒加工学会誌, 58 巻 7 号 (頁 446 ~ 450), 2014 年 7 月
- (6) 高野 登, 園部修也, 山田 茂, 森田 昇, ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工に関する研究 (第 4 報: 加工用 AFM カンチレバーを用いた高能率微細加工), 砥粒加工学会誌, 58 巻 8 号 (頁 509 ~ 514), 2014 年 8 月
- (7) Noboru Takano, Keitarou Ooi, Shigeru Yamada, Noboru Morita, Nanometer-Scale Machining of Gallium Arsenide, Proceedings of the 4M/ICOMM2015 Conference, pp.418 ~ 421, 2015 年 3 月



## 謝 辞

本論文は、筆者が富山大学在職中に行った研究成果をまとめたものであります。本研究を遂行するにあたり、千葉大学大学院工学研究科 森田 昇 教授には、富山大学在職中から現在まで主指導教員として研究に対する心構えから論文執筆まで多くのご指導を賜りました。心から感謝申し上げます。

富山大学大学院理工学研究部 小熊規泰 教授には、本論文の主査をしていただくとともに、本論文を精査していただき、多くのご指摘を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。富山大学大学院理工学研究部 高辻則夫 教授には、副査として本論文の査読をしていただきご指導いただくとともに、論文申請に関してたいへんお世話になりました。深く感謝いたします。富山大学大学院理工学研究部 松田健二 教授には、ご多忙の中、副査として貴重な助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

この3月に定年退職された 山田 茂 元富山大学大学院理工学研究部准教授には、研究を遂行するにあたり貴重なご意見を賜りました。同じく、大山達雄 元富山大学技術専門職員には、研究への支援や激励を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

能登谷久公 元教授には、富山大学着任時から筆者の学位取得に関して終始お心配りいただきました。時間はかかりましたが、この度学位授与の運びとなりました。謹んで感謝の意を表します。

株式会社不二越 神田一隆 氏（現 福井工業大学）、高野茂人 氏には、多結晶ダイヤモンドの成膜技術についてご指導を賜りました。謹んで御礼申し上げます。

富山県工業技術センター 小幡 勤 氏には、エッチングマスク作製のためのフォトリソグラフィ技術についてご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。

産業技術総合研究所 芦田 極 氏には、特に加工用 AFM カンチレバーについてご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、経済産業省地域新生コンソーシアム事業の助成により遂行されました。この事業を通して多大なるご協力を賜りました立山マシン株式会社 斉藤潤二 氏、嶋 一史 氏、稲垣清紀 氏、深澤正樹 氏、中山 彰 氏、シグマ光機株式会社 水村峯夫 氏、山宮広之 氏、鶴谷 寛 氏、小林友博 氏、長田卓也 氏、富山県工業技術センター 松本岩男 氏、杉森 博 氏、清水孝晃 氏、石川県工業試験場 多加充彦 氏、舟田義則 氏、富山大学 篠原寛明 教授、豊橋技術科学大学 柴田隆行 教授、北陸経済連合会 谷内 博 氏に厚く感謝申し上げます。

富山大学工学部機械知能システム工学科生産精密加工工学研究室出身の川堰宣隆 氏（現富山県工業技術センター）、林 弘樹 氏、岡 大輔 氏、清水大志 氏、園部修也 氏、千葉大学大学院出身の杉原英之 氏はじめ、生産精密加工工学研究室内の学生の皆さんの熱心な協力を得たことを記すとともに心より感謝申し上げます。

また、同研究室の大学院博士課程 OB である飯塚 保 氏、山本 礼 氏、新井 亮一 氏には、社会人ということもあり研究面のみならず、学会活動や研究会でも多大なるご協力を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

最後に、静かに支えてくれた家族に感謝いたします。

平成 27 年 9 月

高 野 登

本研究は、多くの研究助成金、補助金等により実施されたものです。ここに記して、感謝の意を表します。

- (1) (財) 北陸産業活性化センター R&D 推進・研究助成金，シリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具の創成とマイクロ加工への応用，2003-2004. (研究分担者)
- (2) 経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業，ナノファクトリーのための自立型ナノ加工・計測システムの開発，2004-2005. (研究分担者)
- (3) 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(B)，超小型 3 次元ナノ加工・計測システムの開発とナノスケール造形への応用，2004-2005. (研究分担者)
- (4) (財) 富山県新世紀産業機構 新商品・新事業創出公募事業，高精度ダイヤモンドマイクロミリング工具の開発と応用，2006. (研究代表者)
- (5) 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C)，ダイヤモンドマイクロアレイ工具の創成と極微細加工に関する研究，2005-2006. (研究代表者)
- (6) 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C)，マイクロダイヤモンド工具の高精度化と実用化に関する研究，2007-2008. (研究代表者)
- (7) 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C)，加工用カンチレバーを用いた SPM 援用高アスペクト比微細 V 溝曲面加工に関する研究，2009-2011. (研究代表者)