

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月29日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560113

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Study on SPM Aided V-shaped Micro-grooving on Curved Surface by Cantilever for processing

研究代表者

高野 登 (TAKANO NOBORU)

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・助手

研究者番号：60251881

研究成果の概要（和文）：本研究では、サブ μm の溝幅かつ 90° より小さい挟角の微細V溝加工に有用なダイヤモンド工具の開発と応用化を目的としている。試作した鋭い先端角の切れ刃を有するカンチレバーにより、高アスペクト比の微細V溝加工が可能であった。能率の高い加工を実現するため、たわみ剛性の異なる3本のレバーを有するマルチカンチレバーを試作し、引き切り加工実験や凹加工実験から個々のレバーの加工特性を評価した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is a development of diamond tool for V-shaped micro-grooving and its applications. The V-shaped micro-grooving was processed by cantilever with sharpened cutting edge. A multi-cantilever with three different flexural rigidity levers was fabricated for processing with high efficiency. The characteristic of individual lever of multi-cantilever was estimated by line and concave processing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学・加工学

キーワード：極微細加工、マイクロダイヤモンド工具、高精度化

1. 研究開始当初の背景

特定の波長域の光を効率よく分光するための回折格子や、液晶ディスプレイ用のバックライト導光板などは、微細溝の形成が必要となる。超精密に微細溝を形成するための機械加工法として、ダイヤモンド工具の切れ刃を超精密に形成し、その工具を回転させながら加工を行うフライカット工法や、工具を回転させないでワークを送ることで加工を行

うシェーパ工法が一般的である。これらの工法では、溝ピッチ、溝幅ともに数 μm 、挟角 90° オーダーの微細溝加工は実現されているが、サブ μm の溝幅かつ 90° より小さい挟角の微細溝加工例は見られない。

申請者らは、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（ダイヤモンドアレイ工具）の創成方法を提案・

検証するとともに、これをマイクロ・ナノスケールの超精密加工への適用の可能性について研究を進めており、以下のような成果を挙げている。

その中で、原子間力顕微鏡 (AFM) 機構を用いたナノスケール切削用のカンチレバーへの応用について成果を挙げている。カンチレバーの作製は、先端角 70.6° の四角錐形状ダイヤモンド切れ刃を高剛性のレバー先端に装着することにより行っている。これまでに、作製したカンチレバーを用いて微細金型の材料である Ni-P に対して加工を行い、基礎的なデータ収集を行っている。

一方、複数の切れ刃を有するカンチレバーによる高能率微細加工についても研究を行っている。複数の切れ刃を有する多刃カンチレバーを試作し、Ni-P めっきに対して加工を行ったところ、5 つの切れ刃があるにもかかわらず、3 つの切れ刃しか加工に寄与していなかった。これは、5 つの切れ刃中、両端の切れ刃の高さが中央のものよりも低いためであった。

以上のように、開発した加工用カンチレバーは、Ni-P に対して微細溝加工に非常に有用であることがわかった。しかしながら、バリ発生抑制や切れ刃高さの制御に課題が残った。また、従来の SPM では、微小な平面領域しか加工できない欠点もあった。

2. 研究の目的

本研究では、サブ μm の溝幅かつ 90° より小さい挟角の微細 V 溝加工に有用なダイヤモンド工具の開発と応用化を目的とする。具体的には、ダイヤモンド切れ刃先端を FIB により先鋭化するとともに、すくい角等を種々変化させ、バリの発生を低減するダイヤモンドカンチレバーの開発とその加工法の確立を第一の目標とする。高能率で加工を行うため、多刃レバーを複数本有する多刃マルチカンチレバーの開発を行い、多刃マルチレバー加工における加工性を明らかにすることを第二の目標とする。さらに、曲面を広範囲で加工可能な SPM 加工ヘッドを提案・開発すること第三の目標とする。

3. 研究の方法

(1) 単刃あるいは多刃のダイヤモンド切れ刃を作製し、高剛性のカンチレバーに装着後、図 1 に示すように、 90° より小さな挟角の V 溝加工を行うため、集束イオンビーム (以下 FIB と呼ぶ) によりダイヤモンド切れ刃先端部分の加工を行う。

その後、図 2 に示すように、加工中のバリ発生を低減させるため、先鋭化したダイヤモンド切れ刃のすくい角を種々変化させ、微細 V 溝加工に最適な形状の切れ刃を有する加工用カンチレバーを開発する。

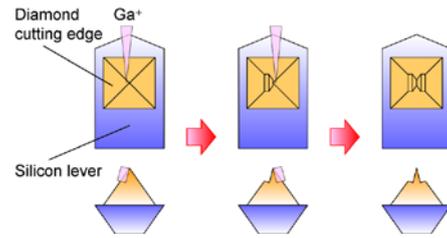


図 1 ダイヤモンド切れ刃先鋭化の概略

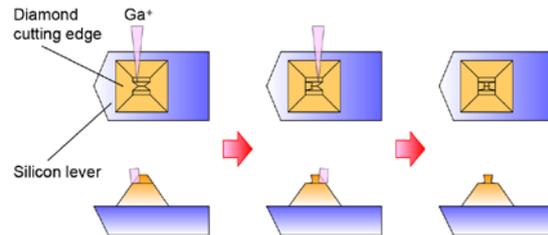


図 2 すくい角設定方法の概略

(2) 高能率で加工を行うため、多刃レバーを複数本有する多刃マルチカンチレバーの開発を行う。図 3(a) は、多刃ダイヤモンド切れ刃の例で、ピッチ P の 4 連切れ刃を $P/3$ だけずらして 3 列に配したものである。この切れ刃を加工物に均一に作用させるため、レバー支持端位置 (図 3(b)) を変化させ、そのバネ定数を一定に保つ。また、意図的にバネ定数を変化 (図 3(c)) させ、バネ定数の大きいものから小さいものへとオーバーラップ加工を行うことにより、一度で粗加工から仕上げ加工を実現する。開発したカンチレバーを用いて加工実験を行い、加工特性について評価を行う。

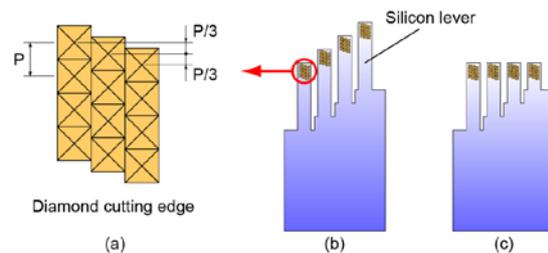


図 3 多刃マルチカンチレバー

(3) 従来の SPM では数 mm 四方の平面領域しか加工することができないため、曲面を広範囲で加工可能なプローブスキャン型の SPM 加工ヘッドの開発を行う。とくに、Z 軸については、粗動と微動のアクチュエータを組み合わせるとともに、全軸を NC 化し、加工用カンチレバーの 3 軸同時制御を可能にする。図 4 は、開発を予定している SPM 加工ヘッドの概略である。

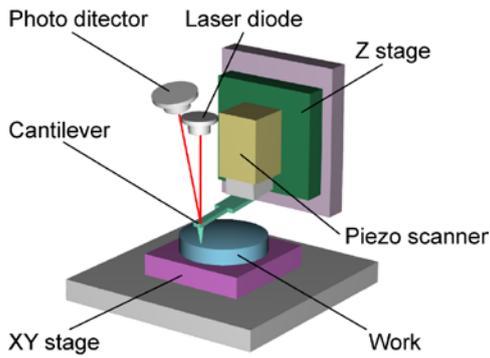


図4 SPM加工ヘッドの概略

4. 研究成果

(1) AFM機構と加工用AFMカンチレバーを用いてNi-P合金への微細V溝加工を行うことを目的とし、FIBにより切れ刃先端部を溝加工に適した先鋭な形状に加工した。まず、切れ刃のすくい角を変化させて溝加工を行い、すくい角が溝形状に及ぼす影響について検討を行った。

図5は、切れ刃先端部をFIB加工した加工用AFMカンチレバーのSEM観察像である。図のように、鋭い先端角とすくい角を有する切れ刃を得ることができた。切れ刃の先端角を 35° 一定とし、すくい角を $-20^\circ \sim 20^\circ$ の5段階に設定し、 4.18nA のビーム電流で荒加工を行ったあと、 0.83nA のビーム電流で仕上げ加工を行った。

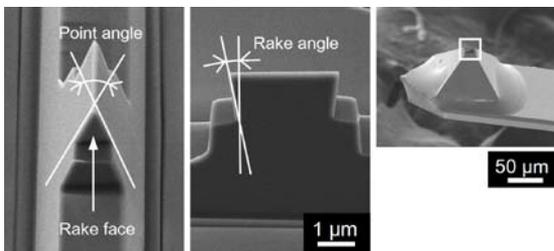


図5 FIB加工後の加工用AFMカンチレバー

図6は、各すくい角での加工面、溝断面および加工後の切れ刃先端部のSEM観察像である。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° および -10° 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発生した。各切れ刃とも摩耗やチッピングなどの形状変化はみられなかった。

図7は、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(深さ/幅)の関係である。溝深さ、溝幅ともにすくい角が 0° のとき最大となり、それぞれ 447nm 、

360nm となった。また、アスペクト比はすくい角 -20° 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。

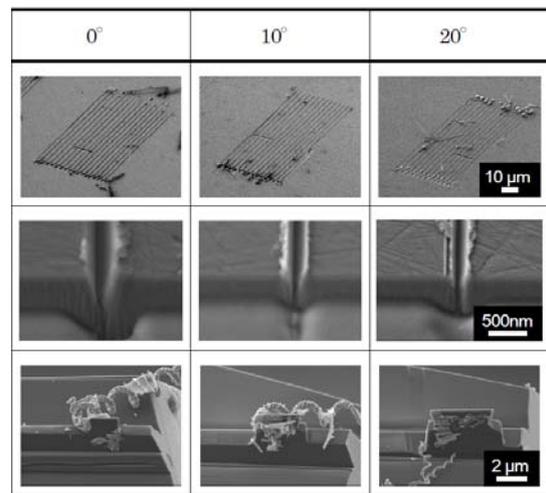
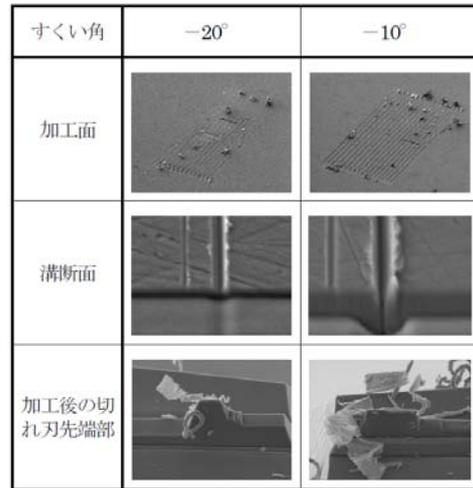


図6 加工面、切れ刃先端部のSEM観察像

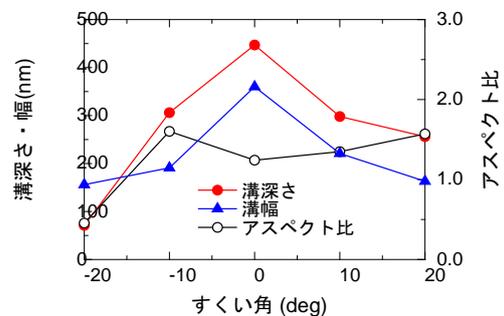


図7 すくい角の溝形状への影響

図8は、すくい角 0° での垂直荷重と溝深さ、溝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、溝幅ともに増加した。また、アスペクト比は1.3~1.5とほぼ一定の値となった。このことから切れ刃の先端丸み半径が溝深さ、溝幅に対して十分に小さく、軽荷重でも切れ刃形状が溝形状によく転写されることがわかる。

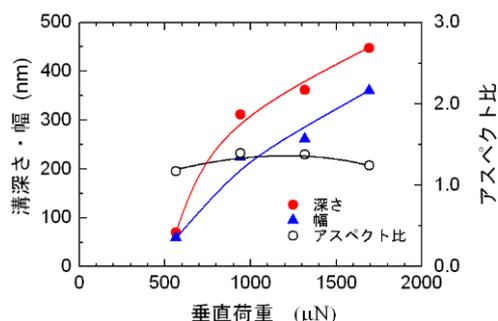


図8 垂直荷重の溝形状への影響

(2) 加工用 AFM カンチレバーによる加工能率の向上を目的として、たわみ剛性の異なる3本のレバーを有するマルチカンチレバー(図3(c)参照)を試作した。ダイヤモンド切れ刃は単刃とした。

図9は、作製したマルチカンチレバーである。このカンチレバーは、たわみ剛性の異なるレバーを3本具備しており、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、粗加工から仕上げ加工を一度に実現するものである。レバーの幅は、110 μm、90 μm、70 μmで長さはすべて1000 μmである。切れ刃配列の整っているダイヤモンドアレイ工具から複数の切れ刃を有する切れ刃列をYAGレーザー加工機により抽出し、レバーに装着後、不要部分を集束イオンビーム加工機により除去することで、高精度なマルチカンチレバーを作製することができた。

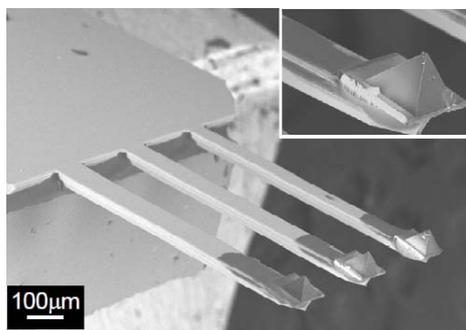


図9 加工用 AFM マルチカンチレバー

まず各レバーの加工性能を確認するため、直線の引き切り加工実験を行った。被削材は単結晶シリコン(100)を用いた。加工実験には、長ストロークステージを搭載したナノ加工・計測システムを用いた。引き切り加工は、

マルチカンチレバーの切れ刃と単結晶シリコンを接触させた後、切込みを与え、レバー長手方向に長ストロークステージを走査することで行う。

図10は、引き切り加工実験で得られた加工溝のSEM観察像である。レバー剛性が高くなるにともない、加工溝の幅も増大していることがわかる。



(a) レバー幅 110 μm



(b) レバー幅 90 μm



(c) レバー幅 70 μm

図10 引き切り加工による加工溝

たわみ剛性の高いレバーから低いレバーへと重畳加工を行った。重畳加工は、ステージを0.25°傾斜させレバー長手方向と垂直方向に走査することで、徐々に加工溝が深くなっていく。

図11は、重畳加工実験で得られた加工溝のSEM観察像である。たわみ剛性の異なる各レバーで一度に加工していることがわかる。また、図10の単一レバーによる加工溝と比べて、良好な加工溝が得られている。

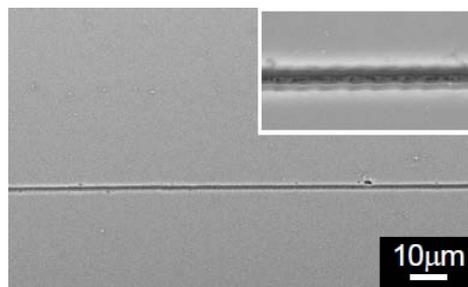
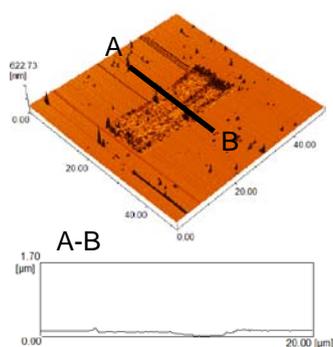


図11 重畳加工による加工溝

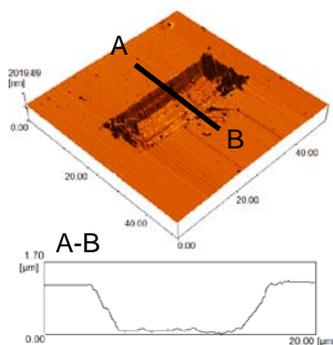
次に凹加工実験を行い、作製したマルチカ

ンチレバーの評価を行った。実験に用いたマルチカンチレバーは、各レバーによって剛性が異なり、剛性の低いレバーから順に、レバーA、レバーB、レバーCとし、バネ定数は、それぞれ422.04、510.03、601.48N/ μm である。凹加工実験は、単結晶シリコンに対して垂直荷重122、403、682 μN 、加工範囲30 \times 15 μm 、加工速度60 $\mu\text{m/s}$ の条件で行った。

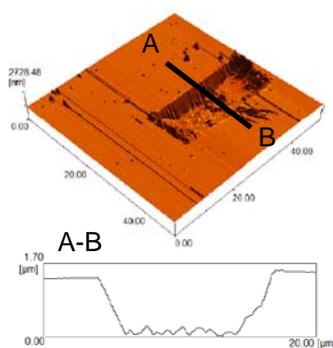
図12(a)、(b)、(c)は、垂直荷重403 μN で面加工を行った際の凹加工面のAFM観察像である。同図(a)はあまり良好な面加工が行われていないのに対し、同図(b)および(c)では加工面がほぼ均一である良好な面加工を行うことができた。その他の垂直荷重でも、同様に良好な加工面を得ることができた。面加工には、レバー垂直方向の加工が適しているということがいえる。



(a) レバーA



(b) レバーB



(c) レバーC

図12 凹加工痕のAFM観察像

図13は、面加工における垂直荷重と加工深さの関係である。垂直荷重122 μN で加工した際のレバーAの加工面は、本実験装置に備え付けられている光学顕微鏡により位置を特定するのが困難であったため、測定することができなかった。同図より、すべてのレバーにおいて、垂直荷重の増加にともない加工深さも増加していることがわかる。レバーAにおいて、レバーBおよびレバーCと比較すると、加工深さはとても小さな値となった。

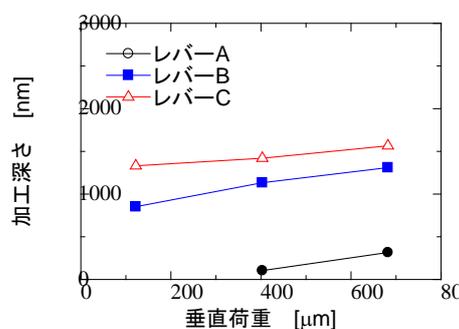


図13 垂直荷重と加工深さの関係

今後は、他のレバー形状や切れ刃先端形状を変化させたマルチカンチレバーの開発と、より高効率な微細加工用工具への応用化について検討を行っていくとともに、今年度着手できなかったSPMヘッドの開発・試作を行っていく。

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 登 (TAKANO NOBORU)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・
助手

研究者番号：60251881

(2) 研究分担者

山田 茂 (YAMADA SHIGERU)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・
准教授

研究者番号：00174714

(3) 連携研究者

森田 昇 (MORITA NOBORU)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30239660

(H21→H22：研究分担者)