

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360067

研究課題名(和文)高精度複合型ダイヤモンドツールの開発と微細構造デバイスへの応用に関する研究

研究課題名(英文)Development of precision hybrid diamond tool and its application to micro-device fabrication

研究代表者

森田 昇 (Morita, Noboru)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30239660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、各種極微細加工用の高精度複合型ダイヤモンドツールの開発と微細構造デバイスへの応用を目的としている。各種形状のシリコンモールド作製技術と、高緻密高速成膜可能なダイヤモンドCVD技術を駆使して、高精細のアレイ状ダイヤモンド薄膜から形状精度よく切れ刃(ダイヤモンドチップ)を抽出し、それを工具シャンクに高強度で装着する手法を確立し、ダイヤモンドチップとシャンクとを高精度で位置決め可能なステージやセンサを具備した工具作製装置を構築した。各種の微細加工機能を具備するダイヤモンドツールを開発するとともに、高アスペクト比の微細V溝加工を実現するツールを開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop high precision micro-diamond tool and to apply device fabrication with micro-structure. A diamond cutting tool was fabricated with silicon mold, and CVD diamond deposition, and then the edge with point, front, and side angles was conditioned with FIB. The diamond tool was attached to tool holders. In order to attach in desired position accurately, tool fabrication machine was fabricated. High-aspect ratio V-groove machining was demonstrated with the developed tools.

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：微細加工 AFM FIB カンチレバー

1. 研究開始当初の背景

超精密加工技術の発展とともに、ナノスケー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スケー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スケールオーダーが限界とされている。

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、切れ刃先端形状と砥粒分布を精密に規定できる微細工具（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あげている。

創成したダイヤモンドアレイ工具の切れ刃（ダイヤモンドチップ）一つを回転シャック端面に装着することにより、マイクロミリングツールを開発した。図 1 は、試作したマイクロミリングツールである。また図 2 は、高剛性のシリコンカンチレバー先端にダイヤモンドチップ装着して作製した加工用 AFM カンチレバーである。

このツールを用いて、アクリル板、金属ガラス、単結晶シリコンウェハなど種々の材料に対してミリング加工実験を行ったところ、ツールの破損もなく能率の高い微細加工が可能で、マイクロスケールオーダーの極微細加工に有用であるが、ダイヤモンドチップのシャックへの装着に人為的な作業が含まれるため生産性が劣るとともに、ナノスケールオーダーの微細加工への適用には難しいことがわかった。加工用 AFM カンチレバーについても、刃先角がシリコンモールドの形状で決定されるため、アスペクト比の高い V 溝加工は不可能であった。

2. 研究の目的

本研究は、各種極微細加工用の高精度複合型ダイヤモンドツールの開発と微細構造デバイスへの応用を目的としている。具体的には、以下の 4 項目を目標としている。

(1) 各種形状のシリコンモールド作製技術と、高緻密高速成膜可能なダイヤモンド CVD 技術を駆使して、高精細のアレイ状ダイヤモンド薄膜から形状精度よく切れ刃（ダイヤモンドチップ）を抽出し、それを工具シャックに高強度で装着する手法を確立するとともに、ダイヤモンドチップとシャックとを高精度で位置決め可能なステージやセンサを具備した工具作製装置を構築する。

(2) 試作した装置や CVD ダイヤモンドの直接・選択成長技術を用いて、各種の微細加工機能を具備するダイヤモンドツールを開発するとともに、高アスペクト比の微細 V 溝加工を実現するツールを開発すること。

(3) これらを用いた加工実験を通じてツ

表 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

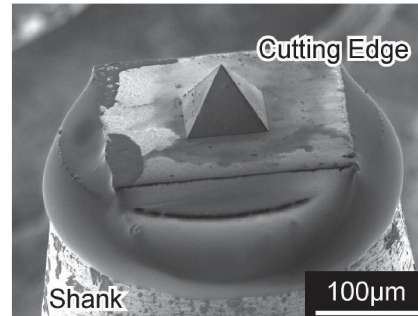


図 1 マイクロミリングツール

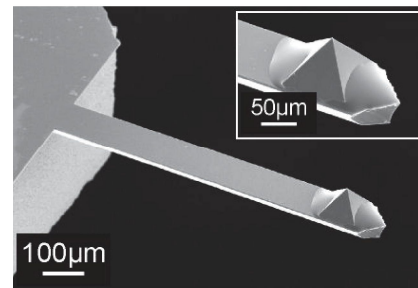


図 2 加工用 AFM カンチレバー

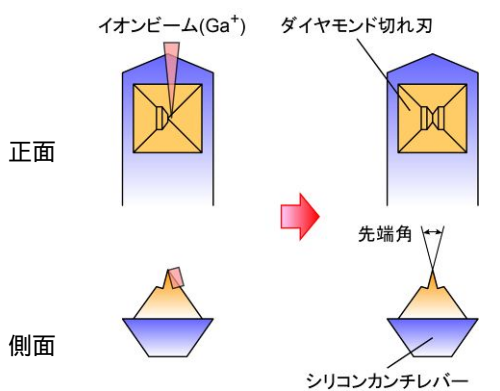
ルの性能評価を行い、精度を向上させる。

3. 研究の方法

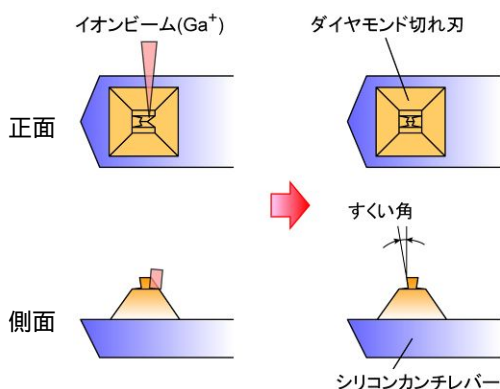
(1) FIB による加工用 AFM カンチレバー切れ刃の加工

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° 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ズ社製：FB-2100、以下 FIB 装置と呼ぶ）を用いた。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 1 は、FIB 加工条件である。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う。図 3(a) 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 3(b) 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 4 は、FIB 加工後の

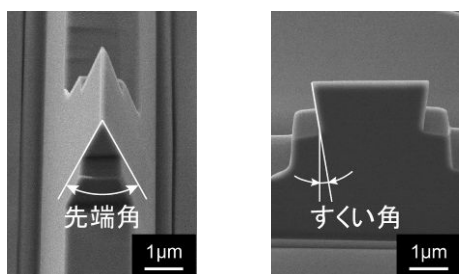


(a) 先鋭化の方法



(b) すくい角の導入方法

図3 ダイヤモンド切れ刃のFIB加工



(a) 正面

(b) 側面

図4 FIB加工後の切れ刃のSEM観察像

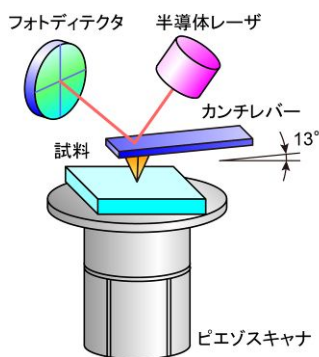


図5 加工装置の概略

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。

(2) 溝加工実験装置および実験条件

図5は、加工装置の概略である。加工装置として使用するAFM(島津製作所社製:SPM-9500J2)では、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されている。また、AFMへのカンチレバーの取り付け角は装置の構造上、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。

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、加工中のフォーカスを測定し、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(日本電子製: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。

4. 研究成果

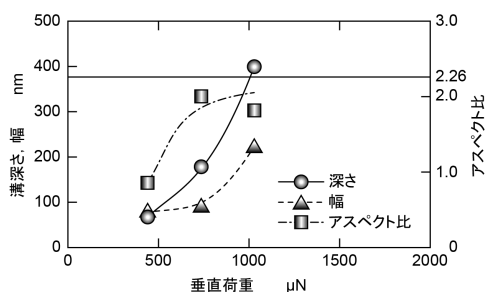
(1) 先端角の影響

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。

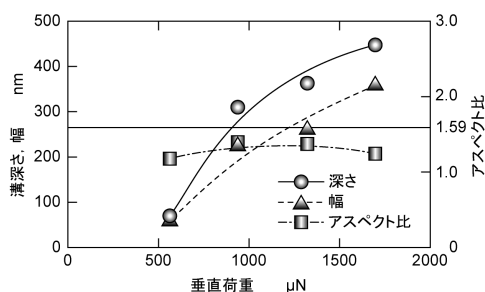
図6(a)および(b)は、各先端角における垂直荷重に対する加工溝の深さ、幅、およびアスペクト比(深さ/幅)である。図中、アスペクト比2.26および1.59のラインは、それぞれ先端角  $25^\circ$  および  $35^\circ$  の切れ刃断面形状から算出した値を示している。どちらの先端角も、垂直荷重の増加とともに加工溝の深さ、幅ともに増加している。アスペクト比については先端角  $25^\circ$  の場合、垂直荷重の増加とともに2.26に近づいていくが、垂直荷重を大きくしていくと切れ刃が欠損したため、これ以降の変化は確認できなかった。欠損は、切れ刃強度が低いためと考える。一方、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。

表 2 溝加工条件

被削材	Ni-P 合金
垂直荷重 (μN)	150 ~ 1900
加工速度 (μm/s)	125
溝間隔 (μm)	4



(a) 先端角 25°



(b) 先端角 35°

図 6 垂直荷重と溝深さ、幅、アスペクト比の関係

先端角	25° (1030μN)	35° (1692μN)
切れ刃先端		
先端丸み		
溝断面		

図 7 切れ刃先端、先端丸み、溝断面の SEM 観察像

図 7 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 において、最大荷重時(先端角

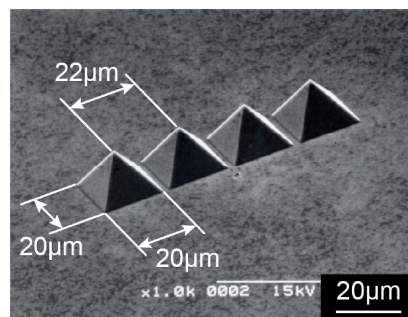


図 8 ダイヤモンド切れ刃列の SEM 像

25° は 1030μN、先端角 35° は 1692μN) のものである。先端角 25° 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° 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° では 100nm 程度、先端角 35° では 20nm 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° よりも除去体積の大きな先端角 25° 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 6 において、先端角 25° 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。

(2) 多刃工具の作製と結果

上記では 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。そこで AFM 機構を用いた高効率微細加工を想定し、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)での作製を行い、加工実験を行った。

シリコンモールド金型を作製し、切れ刃ピッチ 22μm、1 辺 20μm の四角錐形状のダイヤモンド切れ刃列を作製した。図 8 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 9 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。

(a) 22μm 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(澁谷工業製:SDL-100N)により切断して抽出する。

(b) 抽出した切れ刃列を、顕微鏡下でマニピュ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。

(c) 加工用 AFM 多刃カンチレバーの完成。

図 10 は、作製した多刃カンチレバーの SEM 観察像である。

作製した多刃カンチレバーの評価を行う

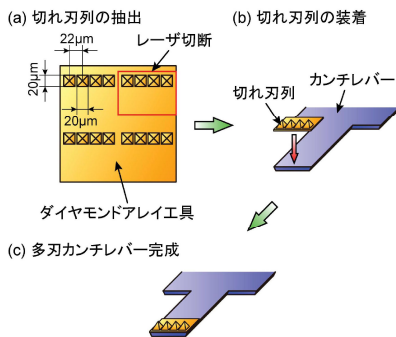


図 9 ダイヤモンド切れ刃列の装着方法

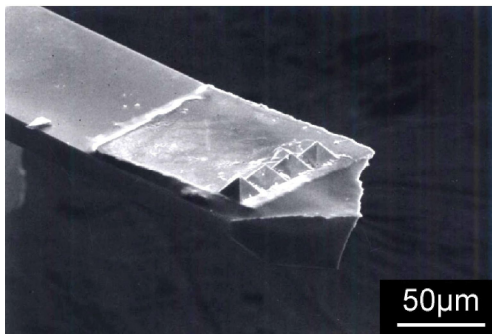


図 10 多刃カンチレバーの SEM 像

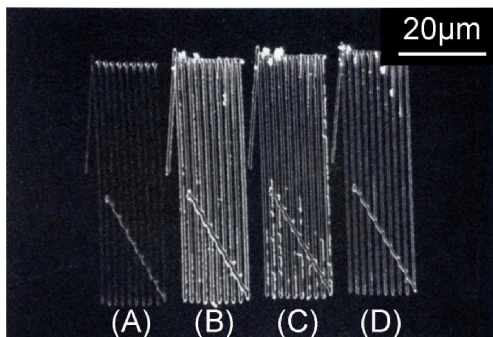


図 11 引き切り加工痕の SEM 像

ため、引き切り加工実験を行った。図 11 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、2µm 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。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

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、査読有、掲載決定 (2014)

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、査読有、掲載決定 (2014)

Noritaka Kawasegi、Tomoyuki Niwata、Noboru Morita、Kazuhiro Nishimura、Hideki Sasaoka、Improving machining performance of single-crystal diamond tools irradiated by a focused ion beam、Precis. Engin. 査読有、38 巻、1 号 (2013) 174-182.

〔学会発表〕(計 2 件)

庭田智行、川堰宣隆、森田昇、西村一仁、笹岡秀紀、集束イオンビーム (FIB) を用いたダイヤモンド切削工具の作製とその切削加工特性、2013 年度精密工学会春期大会学術講演論文集、(2013) 329-330、東京都目黒区、2013 年 3 月 13 日。

園部修也、高野登、山田茂、森田昇、加工用 AFM カンチレバーを用いた高能率微細加工に関する研究、2013 年度精密工学会春期大会学術講演論文集、(2013) 333-334、東京都目黒区、2013 年 3 月 13 日。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 件)

〔その他〕

なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

松坂 壮太 (SOUTA, Matsusaka)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：31334171

比田井 洋史 (HIDAI, Hirofumi)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60313334

(3) 連携研究者

なし