

氏名	たかの のぼる 高野 登
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	富理工博乙第 28 号
学位授与年月日	平成 27 年 9 月 28 日
専攻名	数理・ヒューマンシステム科学専攻
学位授与の要件	富山大学学位規則第 3 条第 4 項該当
学位論文題目	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
論文審査委員 (主査)	小熊 規泰 高辻 則夫 松田 健二 森田 昇

学位論文要旨

「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」

高野 登

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軸ナノフライス盤を開発し、加工実験を行った。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を開発し、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、従来には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技術とダイヤモンド CVD 技術を駆使した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) 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° 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。さらに、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。
- (2) 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。また、単結晶シリコン (100) に対して収束イオンビーム照射を行い、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。
- (3) 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。また、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。

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、押し込み荷重、引っかかり荷重ともに 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作製し、押し込み加工と引っかかり加工実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 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。

- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

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。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。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。

- (1) 切欠き弾性ヒンジと piezo 素子を組み合わせた最大変位 $12\mu\text{m}$ の超小型ステージと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) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

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、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° 、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° 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° 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．

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た．

【学位論文審査の結果の要旨】

当博士学位論文審査委員会は、当該論文を詳細に査読し、かつ公開による論文発表会を平成 27 年 8 月 4 日(火)に実施し、詳細な質疑と応答ならびに最終審査を行った。以下に、審査結果を要約する。

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・開発を行い、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するために、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。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い、その成果をまとめたものである。

本学位論文は、7 章から構成されている。各章の要旨は、以下の通りである。

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技術とダイヤモンド CVD 技術を駆使した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)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° 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。さらに、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。
- (2) 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。また、単結晶シリコン(100)に対して収束イオンビーム照射を行い、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。
- (3) 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。また、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。

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、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作製し、押し込み加工と引っかき加工実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

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。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。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最大変位 12 μm の超小型ステージと小型の構成部品を使用することにより、25.4 \times 23.0 \times 25.0mm の大きさの微細加工用回転盤を開発した。
- (2) 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。
- (3) 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 μm 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。
- (4) 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。

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、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 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° 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。

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た。

以上のように本論文は、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い、ダイヤモンドアレイ工具単体の性能評価、ダイヤモンドアレイ工具を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、並びに原子間力顕微鏡(AFM)を用いた微細加工用カンチレバーの開発し、ダイヤモンドアレイ工具の微細加工への応用に成功している。

これらの研究成果には高い工学的価値と工業的価値が認められ、当博士論文審査委員会では本申請論文が博士(工学)の学位を授与するに値するものと認め、合格と判定した。