

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **15A2**
Feb/2008

マシニング事業

機械工具
プレジジョン

■ 寄稿・論文・報文・解説

「**微細加工用ダイヤモンド工具の
開発と応用**」

"Development and Application
of Diamond Tools for Micromachining"

〈キーワード〉 ダイヤモンドアレイ工具・マイクロ/ナノ加工・
ダイヤモンドCVD・異方性エッチング・単結晶シリコン

富山大学大学院

教授 **森田 昇**

Prof.Dr.Noboru Morita, University of Toyama

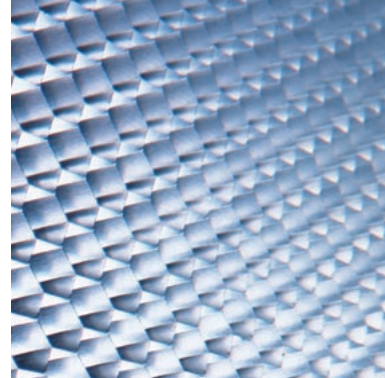
富山県工業技術センター

研究員 **川堰 宣隆**

Dr.Noritaka Kawasegi, Toyama Industrial Technology Center

工作機械技術振興賞(論文賞)受賞

株式会社 **不二越**



要 旨

超精密加工技術の発展にともない、機械加工においてもマイクロ・ナノメートルオーダーの微細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、微細化が必須となる。

本稿では、^{※1}単結晶シリコンの異方性エッチングと^{※2}ダイヤモンドのCVD成膜技術を応用して、任意の切れ刃形状と配列を精密に規定できるダイヤモンドアレイ工具について述べる。

さらに、それを応用したマイクロ・ナノメートルオーダーの微細加工技術について概説する。

Abstract

With the development in ultraprecise machining technology, micromachining technology is required for the micro/nanometer level of machining. As machine tools have become highly precise, the high-precision, microscopic cutting tools are necessary to achieve this level.

Explained in this text is Diamond Array Tool with which an arbitrary form for a cutting edge and the array can be controlled precisely by using anisotropic etching of single crystal silicon and the diamond's CVD film-forming technology. Furthermore, the applied micromachining technology for micro/nanometer level is briefly explained

1. 微細加工用工具の必要性

近年、電子・光学・バイオをはじめとした様々な分野で、マイクロ・ナノメートルオーダーの微細構造の製造技術が注目されている。とりわけ現在、機械的な微細加工技術に対する期待は高い。機械加工は、多様な材料に対して効率よく、自由度の高い加工を行なうことができる。このため、現在の半導体製造技術をベースとしたプロセスでは困難な、微細部品の作製技術として期待されている。

機械加工において、マイクロ・ナノメートルオーダーの加工を実現するためには、工作機械の高精度化とともに、加工用工具の高精度化、微細化が必須となる。現在、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は存在するものの、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。このため、マイクロ・ナノメートルオーダーの機械加工を実現するうえで、加工用工具の開発が極めて重要な課題となっている。

このような背景から、著者らは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、任意の切れ刃形状と配列を精密に規定できる微細加工用ダイヤモンド工具（以下、ダイヤモンドアレイ工具）を開発した。本稿では、ダイヤモンドアレイ工具の作製と、それを利用したマイクロ・ナノメートルオーダーの微細加工技術について述べる。

本工具の開発は、主に富山大学、富山県工業技術センターおよびNACHIの3機関で行なっている。富山大学では工具の設計・製作および加工実験、富山県工業技術センターではフォトリソグラフィーによるシリコンモールドの作製、NACHIではダイヤモンドの成膜をそれぞれ分担している。

2. ダイヤモンドアレイ工具の作製¹⁾

マイクロ・ナノメートルオーダーの機械加工を実現するには、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なく、工具自体の大きさがマイクロメートルオーダーであることが要求される。このため、ダイヤモンドアレイ工具の作製には、独自の工具作製方法を考案・開発している。図1は、単結晶シリコン{100}を用いた場合の、ダイヤモンドアレイ工具の作製プロセスである。以下に、その手順を示す。

- ① フォトリソグラフィーにより、モールドとなるシリコンウエハ{100}上にマスクパターンを作製する。
- ② 水酸化カリウム(KOH)水溶液により単結晶シリコンの異方性エッチングを行ない、{111}面で構成された四角錐状の凹みを形成する。
- ③ バッファードフッ酸により、酸化膜を除去する。
- ④ CVD法により、シリコンモールド表面に多結晶ダイヤモンドを成膜する。
- ⑤ アルカリエッチングによりシリコンモールドを除去し、ダイヤモンドアレイ工具をとり出す。

図2は、上記の手法を用いて作製した、シリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具のSEM観察像である。一边が80 μm の四角錐状の切れ刃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。その先端半径は10nmオーダーであり、鋭利な切れ刃を有している。

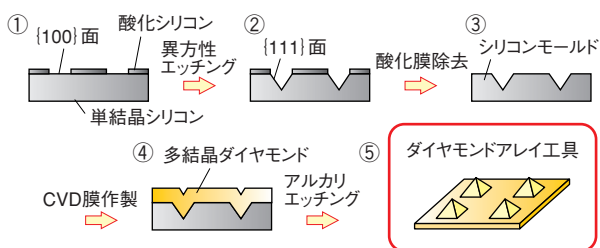


図1 ダイヤモンドアレイ工具の作製方法

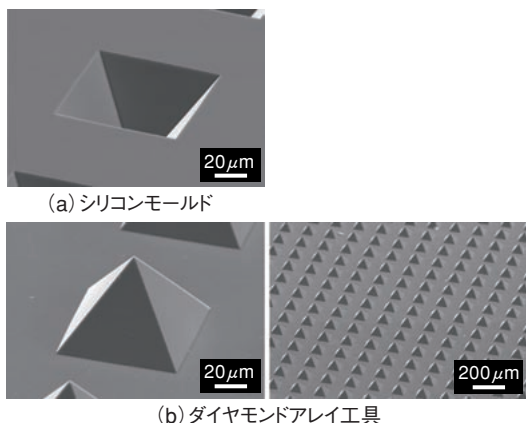


図2 シリコンモールドとダイヤモンドアレイ工具

(マスクパターンによる工具形状の変化)

ダイヤモンドアレイ工具の大きさ、配列や形状は、使用するマスクパターン、シリコンの結晶方位やエッチング方法によって変化する。図3は、3種類のマスクパターンを用いて作製した、ダイヤモンドアレイ工具のSEM観察像である。上段はマスクパターン、下段はダイヤモンドアレイ工具である。パターン形状によって、切れ刃の大きさ、配列を変化させることができる。

(作製方法による工具形状の変化)

図4(a)と(b)は、面方位がそれぞれ{110}、{111}のシリコンウエハを用いて作製したダイヤモンドアレイ工具である。六面体の屋根型形状、六角柱状の切れ刃を作製できる。同図(c)は、モールドのエッチングに等方性エッチングを利用して作製した工具である。等方性エッチングでは、エッチングが全方位に等速で進行し、ドーム型の切れ刃を作製できる。同図(d)は、切れ刃のさらなる微細化を図るため、集束イオンビーム(FIB)を利用した、1辺の大きさが1 μm の工具である。単結晶シリコンにFIB照射すると、照射部がKOH水溶液に対して耐エッチング性を示す²⁾。この領域をマスクとして使用することで、微細な工具の作製が可能となる。さらに、リアクティブイオンエッチングを利用することで、角柱状の切れ刃の作製も可能である。

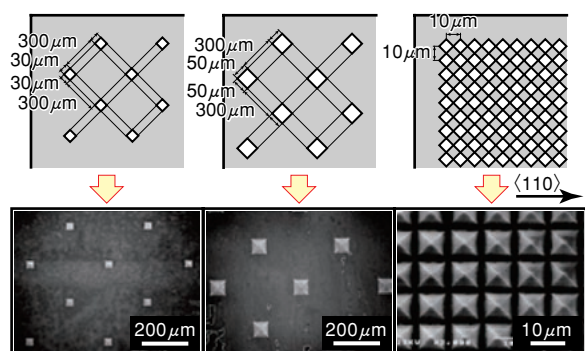


図3 マスクパターンによる工具形状の変化

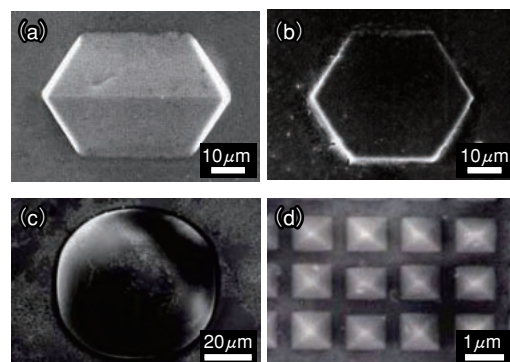


図4 作製方法による工具形状の変化

3. マイクロ加工用工具への応用

1) ダイヤモンドアレイ工具を用いたマイクロ加工

ダイヤモンドアレイ工具は、既知の形状、配列を有している。この特長を生かして、様々な微細加工へと応用可能である。ここでは、本工具を押込み加工、スクラッチ加工やフライス加工などのマイクロ加工へと応用した事例について述べる。

2) 押込み加工³⁾

図5は、一刃あたりの押込み荷重75.0mNで押込み加工を行なったアルミニウム表面のSEM観察像である。工具は、一辺30 μ mの四角錐状の切れ刃を500 μ mピッチで配列したものである。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)が形成されることがわかる。加工痕の形状は、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。その深さは、押込み荷重によって変化させることができる。

3) スクラッチ加工³⁾

スクラッチ加工では、工具の形状や方向によって加工特性が変化する。図6は、荷重52.6mNでアルミニウム合金に対してスクラッチ加工を行なったときの、加工痕のSEM観察像である。図中の模式図は、加工時の工具の方向を示している。切れ刃の方向によって、加工痕形状は異なる。加工方向が工具の刃と平行な場合、加工痕周辺は平滑である。一方、45°回転させて加工した場合、加工部周辺で盛り上がりが生じる。また、切りくずは観察されなかった。前者の場合は被削材の除去作用が支配的となり加工

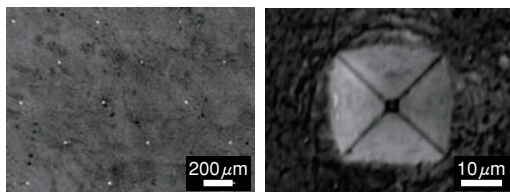


図5 ダイヤモンドアレイ工具による押込み加工痕

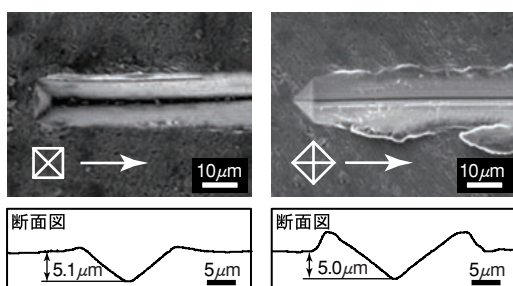


図6 ダイヤモンドアレイ工具によるスクラッチ加工痕

が進行するのに対して、後者の場合は押分け作用が支配的となる。すなわち、除去加工を行なう上では、前者の場合が有効であるといえる。

4) 回転工具によるフライス加工への応用⁴⁾ (マイクロ加工用回転工具)

図7は、作製した回転工具のSEM観察像である。回転工具は、先端径 ϕ 300 μ mの超硬製シャンクの先端にダイヤモンド切れ刃群、あるいは1刃をとり付けることで作製している。同図(b)は、底辺50 μ 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た複刃工具である。同図(c)は、底辺100 μ mの四角錐形状のダイヤモンド切れ刃を装着した単刃工具である。加工範囲は、切れ刃の数や回転中心からの距離によって調整することが可能であり、フライス加工や微細溝加工へと応用できる。

(金属ガラスの微細溝加工)

図8は、^{※5}金属ガラスに対して微細溝加工を行なった結果である。切れ刃をシャンクの軸中心から5 μ mの距離を置いてとり付け、主軸回転数40,000rpm、送り速度20mm/minで加工を行なっている。加工部周辺のバリは少なく、一定の溝幅18 μ mを持った加工痕が形成されている。

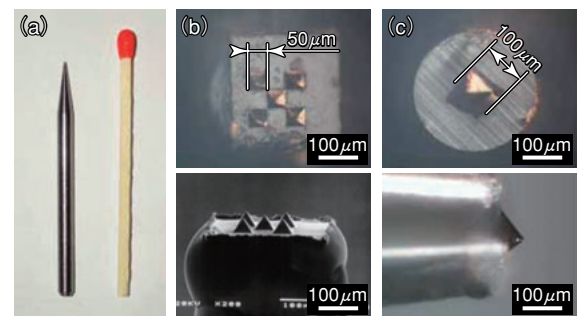


図7 マイクロ加工用回転工具

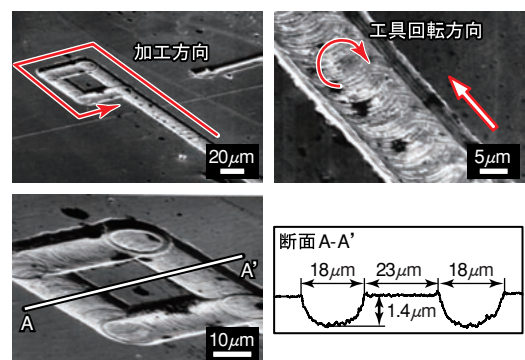


図8 回転工具による微細溝加工(金属ガラス)

(単結晶シリコンのフライス加工)

図9は、複刃工具を用いて単結晶シリコンに対してフライス加工を行なった加工部のSEM観察像である。加工部には、幅 $242\mu\text{m}$ の加工痕が形成される。また加工痕底面には、規則正しい工具マークが観察される。加工によるクラックの発生は見られず、延性モードでの加工が行なわれている。

このことから、本工具はシリコンなどの硬脆材料のマイクロ加工に対しても有効であるといえる。また難

加工材である金属ガラスやシリコンの加工後にも切れ刃の破損などは見られず、フライス加工のような過酷な条件においても十分な強度を有している。

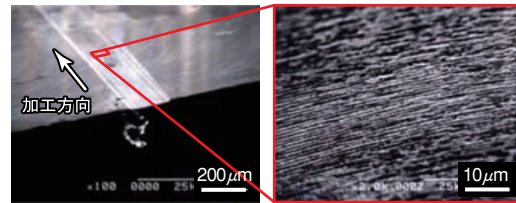


図9 フライス加工痕のSEM観察像(単結晶シリコン)

4. ナノ加工用工具への応用

1) 原子間力顕微鏡を利用したナノスケール機械加工

ナノスケールの微細加工を実現するためには、走査型プローブ顕微鏡(SPM)が有効である。SPMでは、表面観察に用いるプローブを工具として利用することで、様々なナノスケール加工が可能となる⁵⁾。

筆者らは、従来から原子間力顕微鏡(AFM)機構を用いたナノスケール機械加工に関する研究を行ってきた^{6,7)}。AFM機構に工具となる高剛性の加工用カンチレバーをとり付けることで、切込みが数十～数百nm単位のナノスケール機械加工が可能となる。

マイクロメートルオーダーの機械加工と同様に、ナノメートルオーダーの機械加工においても工具切れ刃の形状は、加工特性・精度などを決定する上で、重要な因子となる。このため、既知の切れ刃形状を持つダイヤモンドアレイ工具は、ナノスケールの機械加工を実現する上で有効な工具となる。

2) 加工用カンチレバーの作製

図10は、ダイヤモンドアレイ工具単粒を切れ刃として用いた、加工用カンチレバー⁸⁾である。フォトソグラフィ技術を用いて作製したシリコンレバー上に、ダイヤモンドアレイ工具単粒をとり付けてある。このカンチレバーは、市販の測定用カンチレバーと比較して千倍以上の剛性を有しており、これによって任意の垂直荷重による機械加工が可能となる。

切れ刃の形状は、シリコンモールドの作製時に等方性エッチングを組み合わせることで変化させることができる⁹⁾。図11(a)は、異方性エッチングのみを用いて作製した、シリコンモールドのSEM観察像である。シリコンのエッチングは{111}面で停止し、四角錐状の凹みが形成される。同図(b)は、異方性エッチング後に等方性エッチングを行ない作製したシリコンモールドである。等方性エッチングを組み合わせることでモールドの底面幅は増加し、稜線部は丸みを帯びる。

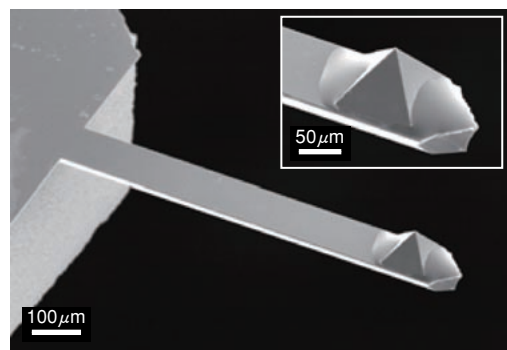


図10 加工用カンチレバー

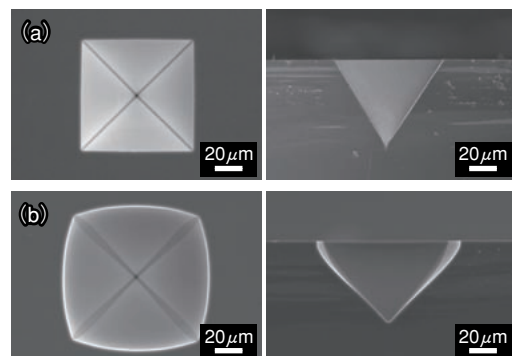


図11 等方性エッチングによるシリコンモールドの変化

図12 (a)と(b)は、それぞれ図11 (a)と(b)で示したシリコンモールドを用いて作製した、ダイヤモンド切れ刃である。シリコンモールドの形状が正確に転写されている。異方性エッチングにより作製した切れ刃の先端半径は、100nm以下である。一方、等方性エッチングを組み合わせることで、先端半径は1.7 μ mとなる。この先端半径は、エッチング処理時間によって任意に規定することができる。

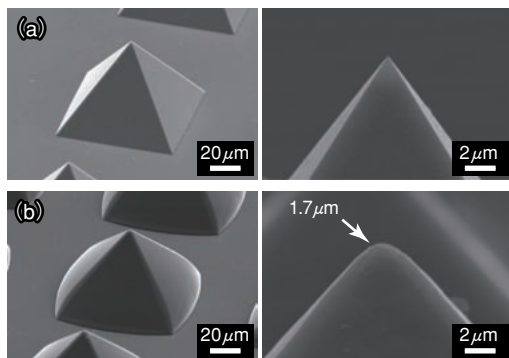


図12 異なる先端半径を有するダイヤモンド切れ刃

3) ダイヤモンド切れ刃によるナノスケール機械加工⁸⁾

図13 (a)は、異方性エッチングにより作製した切れ刃を用いて、垂直荷重80 μ Nで単線加工を行なった後のAFM観察像である。被加工材料は、単結晶シリコンである。加工部に、深さ20nmの加工痕が形成される。同図 (b)は、垂直荷重397 μ N、送り量59nmで面加工を行なった試料のAFM観察像である。加工部に、深さ最大294nmの加工痕が形成されることがわかる。開発した加工用カンチレバーを用いることで、単結晶シリコンに対して切込み数十~百nm単位の機械加工が可能となる。

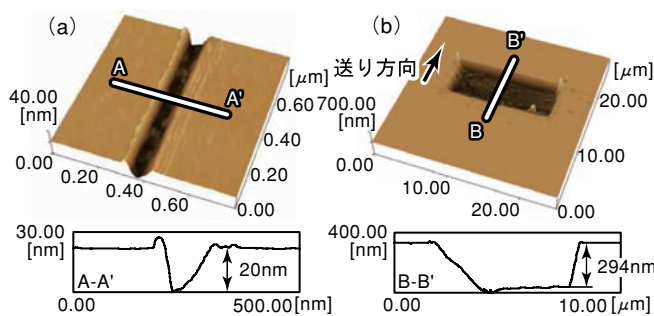


図13 加工痕のAFM観察像

図14は、垂直荷重637 μ Nで面加工を行なった加工部周辺のSEM観察像である。加工部周辺には流れ型の切りくずが観察され、脆性材料である単結晶シリコンの場合でも延性モードでの切削加工が行なわれることがわかる。

4) ダイヤモンド切れ刃の耐摩耗性

図15は、垂直荷重610 μ Nで面加工したときの、加工距離に対する加工深さおよび表面あらさの変化である。加工開始時の加工深さは、350nmである。加工距離の増加にともない加工深さは急激に低下し、加工距離157mmの時に244nmとなる。それ以降、加工深さの変化は小さくなる。

加工開始直後は、切れ刃の初期摩耗によって加工深さが急激に低下する。その後、定常摩耗域になり加工深さの低下量は小さくなる。また、加工距離が1,700mmに達するにもかかわらず加工深さは約150nmを示しており、本工具は極めて優れた耐摩耗性を持つことを示している。一方、加工部の表面あらさは加工開始直後に大きく、加工距離の増加にともない小さくなる。

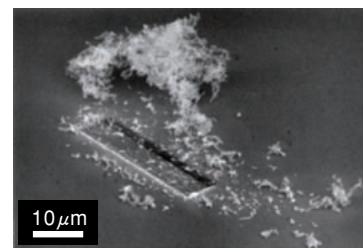


図14 加工痕周辺のSEM観察像

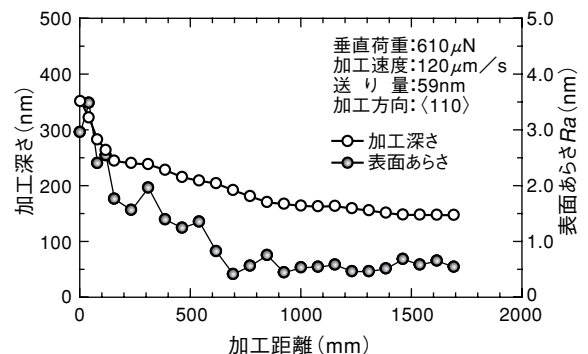


図15 加工距離に対する加工深さおよび表面あらさの変化

図16(a)と(b)は、それぞれ加工距離3.8mm、1,540mmの時の加工表面のAFM観察像である。加工部には、送り量と同様の間隔で工具マークを観察できる。その高さは、加工距離3.8mm、1540mmの時に、それぞれ7nm、1.5nmである。加工初期の場合、切れ刃は鋭利であるため工具マークが大きくなる。加工距離が大きくなると、切れ刃の鈍化によって工具マークの高さは小さくなることからわかる。

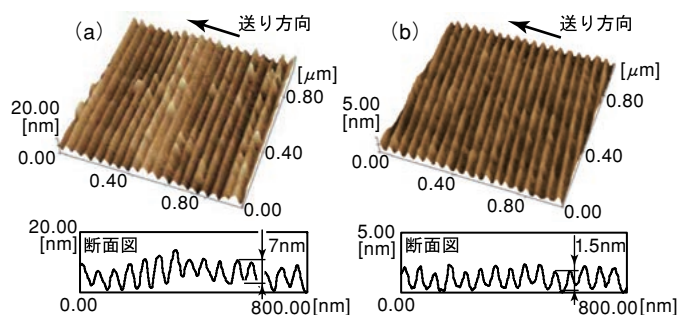


図16 加工距離による表面形状の変化

5) 切れ刃形状による加工形態の変化

図17は、異方性エッチングを利用して作製した切れ刃を用いて、垂直荷重331 μ Nで単線加工を行なった試料のAFM観察像である。加工部では除去加工が行なわれ、幅283nm、深さ115nmの加工痕が形成される。同図(b)は、等方性エッチングを併用して作製した切れ刃(先端半径1.7 μ m)を用いて垂直荷重340 μ Nで単線加工を行なった試料のAFM観察像である。

垂直荷重はほぼ同様であるにもかかわらず、加工形態は大きく変化する。加工部で除去加工は行なわれず、高さ1.5nmの微小な隆起が生じることがわかる。この現象は、ダイヤモンド切れ刃と試料の摩擦によって生じるシリコンのアモルファス化に起因している¹⁰⁾。切れ刃の形状によって加工形態は大きく変化し、先端半径の増加にともない除去加工から隆起加工へと変化する。

(トライボナノソグラフィーによるマスクレス微細構造の形成)

ここで示した先端半径の大きな切れ刃は、著者が提案するトライボナノソグラフィー^{10,11)} 9) 用工具として有効である。単結晶シリコン表面をダイヤモンド切れ刃で加工あるいは摩擦すると、加工時の応力によってシリコンはアモルファス相へと相転移する。このアモルファス相は、KOH水溶液に対して耐エッチング性を持っており、これを応用することで単結晶シリコン表面に、マスクレスで微細構造を形成できる¹⁰⁾。

図18は、垂直荷重340 μ N、加工速度120 μ m/sで加工後、5mass%のKOH水溶液で3分間エッチング処理を行ない作製した微細構造のAFM観察像である⁹⁾。加工部にマスクング作用が発現し、非加工部が選択的エッチングされることで、グレーティング状の微細構造の作製が可能である。またそのライン幅は120nmであり、作製したダイヤモンド切れ刃を用いることで、高精細な微細構造の形成が可能である。

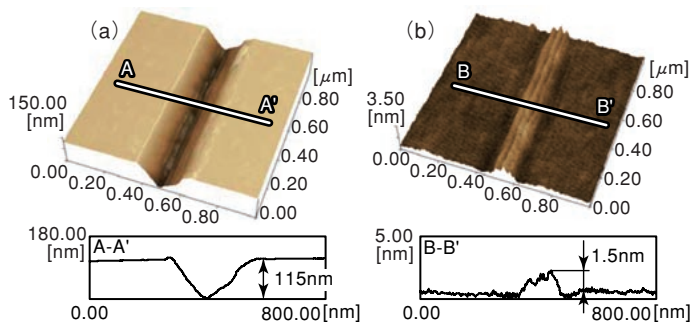


図17 切れ刃先端半径による加工痕形状の変化

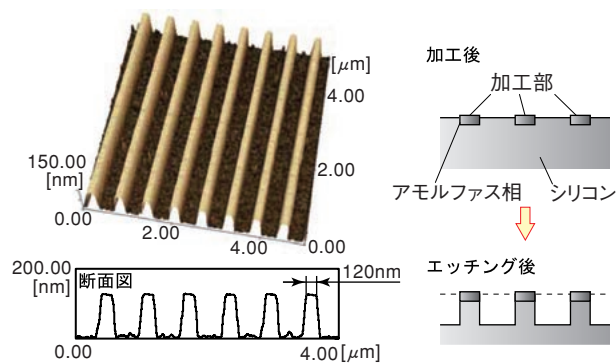


図18 トライボナノソグラフィーにより作製した微細構造

5.ダイヤモンドアレイ工具による微細加工の実現

本稿では、切れ刃の形状と配列を精密に規定できるダイヤモンドアレイ工具と、それを利用したマイクロ、ナノメートルオーダーの微細加工技術について述べた。今後は、工具のさらなる高精度化、応用化について検討していきたいと考えている。

本稿が、微細加工を目指す研究者・技術者の一助になれば幸いである。なお本工具の開発成果の一部⁹⁾については、川堰宣隆、深瀬達也、高野登、森田昇、山田茂、大山達雄(富山大学)、神田一隆、

高野茂人(NACHI)、小幡勤(富山県工業技術センター)、芦田極(産業技術総合研究所)のメンバーで、(財)工作機械技術振興財団より平成18年度工作機械技術振興賞(論文賞)を受賞している。

本稿の執筆および研究の遂行に際し、ご協力いただいた富山大学の山田茂准教授、高野登助手、大山達雄氏、NACHIの神田一隆氏、高野茂人氏、富山県工業技術センターの小幡勤氏、産業技術総合研究所の芦田極氏にお礼申し上げます。

用語解説

※1 単結晶シリコンの異方性エッチング

結晶方位による加工速度の違いを利用したエッチング技術。KOHによるエッチングでは、他の結晶方位と比較して、{111}のエッチングレートが著しく低いため、{111}で構成された構造が形成される。

※2 CVD

Chemical Vapor Depositionの略。原料物質を含むガスを導入し、化学反応させることで薄膜を作製する方法。主に切削工具や半導体材料への薄膜作製に利用されている。

※3 集束イオンビーム

Focused Ion Beam (FIB)。細く絞ったイオンビームを試料に照射することで、スパッタ、堆積や表面観察を行なうことができる。主に、透過型電子顕微鏡の試料作製や微細加工分野で利用されている。

※4 リアクティブイオンエッチング

Reactive Ion Etching (RIE)。反応ガスをプラズマ化させ、それによって生じたイオンやラジカルを試料に衝突させ、物理的なスパッタと化学反応による加工を同時に行なうことで、高精度に異方性エッチングを行なう方法。とくに、高アスペクト比の構造の作製に、多く利用される。

※5 金属ガラス

アモルファス合金の一種。通常のアモルファス材料よりも極めて遅い冷却速度でアモルファス状態となるため、バルク状の合金を作製できる。結晶材料と比較して、機械強度、耐食性、精密鑄造性に優れる。

※6 延性モード加工

シリコンなどの脆性材料において、表面にクラックやチャIPPINGなどを起こさずに加工する加工方法。シリコンやガラスなどの脆性材料でも、切込みをサブミクロン以下にすることで、延性モード加工が可能である。

※7 走査型プローブ顕微鏡

Scanning Probe Microscope (SPM)。走査型トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) などをはじめとした顕微鏡群の総称。探針と試料に働く相互作用を検出することで、物体の性質を測定することができる。

※8 カンチレバー

原子間力顕微鏡において、表面を走査するために使用するプローブ。通常の測定用カンチレバーは、プローブ・試料間の微小な力を検出するため、剛性が極めて小さく設計されている。

※9 トライボナノリソグラフィ

Tribo-Nanolithography (TNL)。著者らが提案する、微細構造形成法。単結晶シリコン等の表面にAFMを用いてナノ加工あるいは摩擦すると、加工部がアモルファス相へと相転移する。この領域をマスクとしてエッチングすることで、高さ数十～百nm単位の3次元微細構造をマスクで形成できる。

参考文献

- 1) 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：精密工学会誌、70 (11)、p.1402 (2004)
- 2) 川堰 宣隆・柴田 浩一・森田 昇・芦田 極・谷口 淳・宮本 岩男：日本機械学会論文集 (C編)、70 (696)、p.2541 (2004)
- 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：砥粒加工学会誌、48 (9)、p.510 (2004)
- 4) 岡 大輔・高野 登・森田 昇・山田 茂・大山 達雄・川堰 宣隆・神田 一隆・高野 茂人・小幡 勤・稲垣 清紀：2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、p.351 (2006)
- 5) A. A. Tseng・A. Notargiacomo and T. P. Chen：J. Vac. Sci. Technol., B 23 (3)、p.877 (2005)
- 6) 芦田 極・森田 昇・吉田 嘉太郎：日本機械学会論文集 (C編)、64 (626)、p.4072 (1998)
- 7) 芦田 極・森田 昇・吉田 嘉太郎：日本機械学会論文集 (C編)、64 (626)、p.4079 (1998)
- 8) N.Kawasegi・N.Takano・D.Oka・N.Morita・S.Yamada・K.Kanda・S.Takano・T.Obata and K.Ashida：ASME J. Manuf. Sci. Eng., 128 (3)、p.723 (2006)
- 9) 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：精密工学会誌、72 (8)、p.1025 (2006)
- 10) N.Kawasegi・N.Morita・S.Yamada・N.Takano・T.Oyama and K.Ashida：Nanotechnology, 16 (8)、p.1411 (2005)
- 11) 陳 利益・森田 昇・芦田 極：精密工学会誌、66 (11)、p.1807 (2000)