

機関番号：13201
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20360067
 研究課題名（和文） 多機能型ダイヤモンドツールの開発とマイクロ・ナノスケール加工への応用に関する研究
 研究課題名（英文） The study on development of multifunctional diamond tools and its applications for micro/nano scale machining
 研究代表者
 森田 昇（MORITA NOBORU）
 富山大学・大学院理工学研究部（工学）・教授
 研究者番号：30239660

研究成果の概要（和文）：本研究は、各種の極微細加工用の高精度多機能型ダイヤモンドツールの開発とマイクロ・ナノスケール加工への応用化を目的としている。まず、高速にダイヤモンドを合成できる装置を設計・試作し、緻密なダイヤモンドチップを得ることができた。つぎにこのチップを精度よくシャンクに装着するための装置を試作し、高精度のダイヤモンドツールを作製することができた。このツールを用いて加工実験を行い、数 μm スケールの微細加工が可能であることを検証した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is a development of various multifunctional diamond tools and its application for micro/nano scale machining. First of all, a diamond synthetic apparatus has designed and manufactured. The precise diamond tip has obtained. The next, an apparatus has manufactured for bonding diamond tip to shank, then the diamond tools with high accuracy. The tools have accomplished a few micrometer scale machining.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	7,500,000	2,250,000	9,750,000

研究分野：精密工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：多機能ダイヤモンド工具、マイクロ加工、ナノ加工、

1. 研究開始当初の背景

超精密加工技術の発展にともない、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。図2は、単結晶シリコンに対して直径50 μm 、深さ3 μm の延性モードの微細円加工を行った例である。

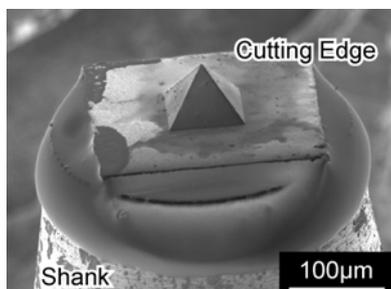


図1 マイクロミリングツール

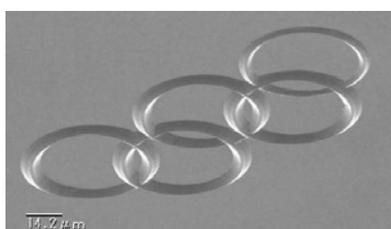


図2 微細加工例

また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あった。開発したマイクロミリングツールは、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。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに得た知見と技術シーズをさらに発展させ、各種の極微細加工用の高精度多機能型ダイヤモンドツールの開発とマイクロ・ナノスケール加工への応用化を目的とする。さらに開発したダイヤモンドツールによる微細構造デバイス技術製造の開発を行う。

具体的には、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

ことを第一の目標とする。また、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し、加工実験を通じてツールの性能評価を行い、精度を向上させること第二の目標とする。さらに、微細構造デバイス加工への可能性について検討するとともに、医療、光学分野への応用を図ることを第三の研究目標とする。

3. 研究の方法

(1) CVDダイヤモンド合成装置の試作

現状のダイヤモンド合成に比べ、シリコンモールドへの転写性が高く、高速にダイヤモンドを合成できる装置（図3参照）を設計・試作し、CVDダイヤモンド合成技術を確立する。

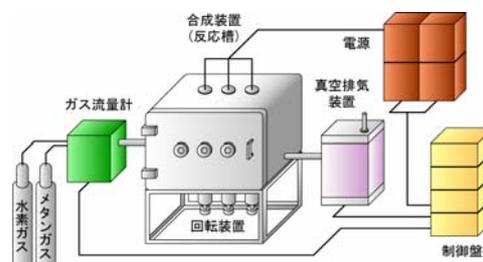


図3 CVDダイヤモンド合成装置の概略

(2) ダイヤモンドツール作製装置の試作

CVDダイヤモンドチップをシャック部に取り付けたダイヤモンドツールを作製するため、シャック先端とCVDダイヤモンド刃先を正確に位置決めする装置（図4参照）の設計と試作を行う。

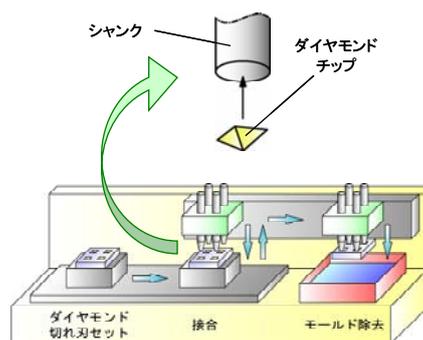


図4 ダイヤモンドツール作製装置の概略

(3) 多機能型CVDダイヤモンドツールの試作

超硬合金製のシャックに対して直接ダイヤモンドを合成し、反応性イオンエッチング（RIE）やレーザでダイヤモンドを直接加工することによりダイヤモンドツールを作製する。図5は、レーザによるダイヤモンドツール作製の概略である。

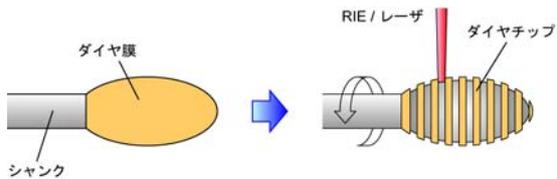


図5 ダイヤモンドツールの作製方法の概略

(4) 開発したダイヤモンドツールの評価

上記で開発したダイヤモンドツールを用いて微細加工を行い、評価を行うとともに、微細加工技術を確立する。

4. 研究成果

(1) CVD ダイヤモンド合成装置

図6は、開発したダイヤモンドCVD合成装置である。本装置は、ダイヤモンド合成を行うチャンバー、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ポンプから構成されている。ダイヤモンドの合成は、超硬丸棒(直径φ3mm、長さ40mm)に対して、試料温度820~900℃、フィラメント電流30~50A、成膜時間10h、メタン濃度0.5~1%の条件で熱フィラメント法により行った。

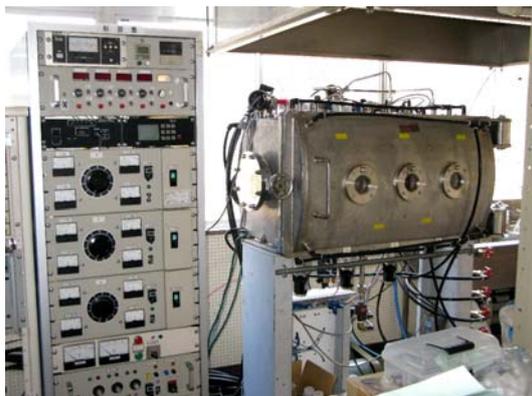
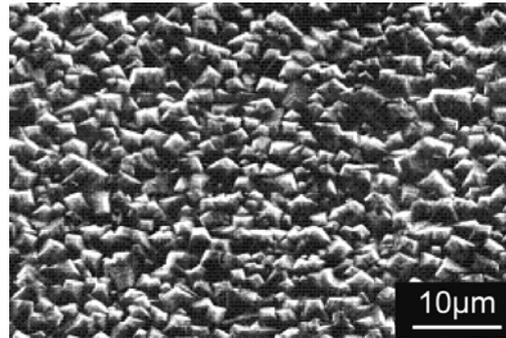
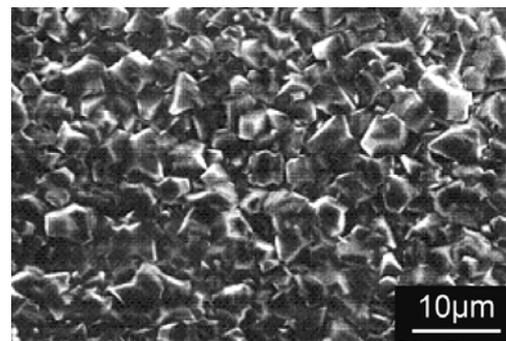


図6 CVD ダイヤモンド合成装置

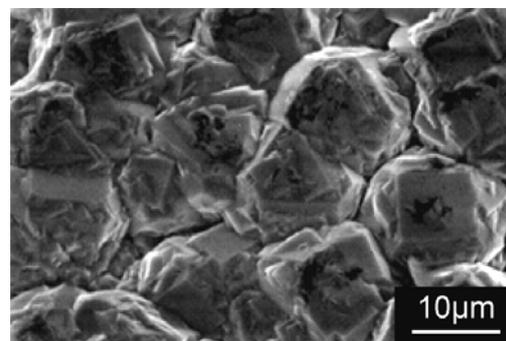
図7は、各試料温度におけるダイヤモンドCVD膜の表面SEM観察像である。試料温度が高くなるにともない、ダイヤモンド粒径が大きくなっていることがわかる。また、試料温度が900℃のものは粒径が大きだけでなく、合成後ののはく離も観察された。これまで行ってきたシリコンモールドを使ったマイクロダイヤモンドチップの作製において、半径が数十~数百ナノメートルオーダーのシリコンモールド先端に緻密な膜を形成するためには、ダイヤモンドの粒径は小さいことが望ましい。したがって、合成時の試料温度は820℃が適当であると考えられる。合成速度は、現状では1μm/hであった。今後は、より高速度で成膜可能な条件について検討を行っていく。



(a) 試料温度：820℃



(b) 試料温度：850℃



(c) 試料温度：900℃

図7 ダイヤモンドCVD膜の表面観察像

(2) ダイヤモンドツール作製装置

ダイヤモンドツールは、ダイヤモンド切れ刃を超硬シャック端面に装着して作製する。このとき、精度よく高強度で切れ刃をシャックに接合させるため、その作製装置を開発した。

図8は、試作したマイクロ工具作製装置の概略で、工具位置を観察するためのCCDカメラ、高精度な位置決めを行うためのXステージ、超硬シャックを保持するためのシャックホルダ等から構成されている。

CCDカメラ(ソニック社製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° に近いため、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 μ m である。

高精度 X ステージ（日本トムソン社製ナノリニア NT）は、最大ストローク 65mm、分解能 0.1 μ m、繰り返し位置決め精度は 0.5 μ 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。ダイヤモンド切れ刃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。

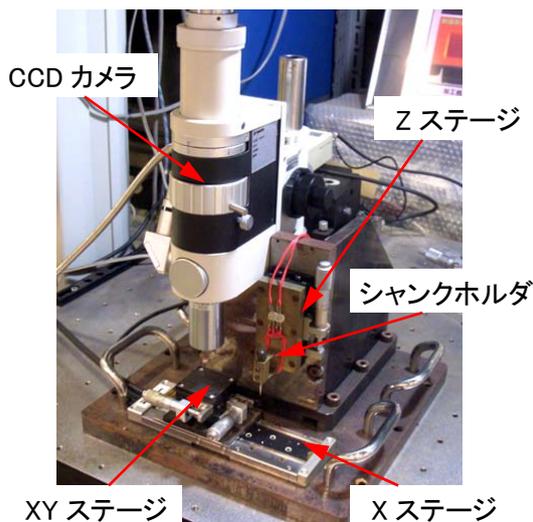


図 8 ダイヤモンドツール作製装置

(3) 多機能型 CVD ダイヤモンドツール

超硬シャンクにダイヤモンドを成膜後、そのダイヤモンドをレーザにより直接加工することにより、微細研削加工用ダイヤモンドツールを作製した。

現有のレーザ加工機（澁谷工業社製 SDL100N）には、PC 制御の XY ステージが装備されており、任意の 2 次元形状の加工が可能である。この XY ステージ上に DC モータを装着し、ダイヤモンド成膜した超硬シャンクを回転させながらステージを送ることにより、格子状の溝を作製した。図 9 は、レーザ加工機の XY ステージと DC モータ部である。

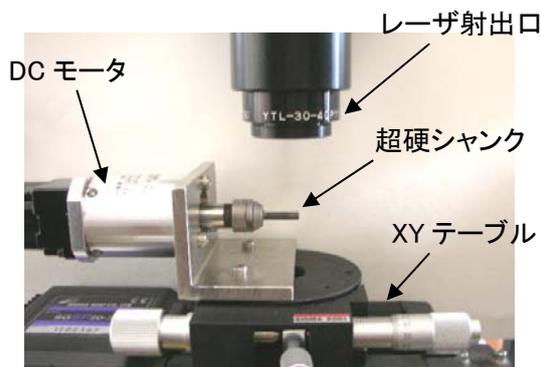


図 9 レーザ加工部

まず、レーザ光によるダイヤモンド表面への加工特性について検討した。図 10 は、レーザ出力およびモータ回転数を変化させて得られたレーザ加工後の SEM 観察像である。得られた溝幅は回転数に依存せず、出力が 10.4W では約 40 μ m、出力が 6.0W では約 20 μ m となり、出力の増加にともない溝幅が増加することがわかる。これは、出力が高いレーザを集光させると、焦点付近でのパワー密度がより高くなる。すると、加工物へのエネルギー吸収量が大きくなるため、より広範囲に渡って溶融が生じると考える。

つぎに、レーザ照射部を観察すると、出力が 10.4W では、溝は形成されていない。このときレーザ照射部を真上から観察すると、レーザ照射中心部では溝が確認でき、端部ではレーザ加工時に溶融、蒸発することで生じた蒸気圧により押し退けられたダイヤモンドが凝固し、隆起していた。これに対して出力が 6.0W では、ダイヤモンドが端部で凝固することなく、比較的良好な溝の形状が得られた。また、モータ回転数が 8.5rpm では、5.0 rpm と比較して隆起が小さく、良好な溝の形状が得られた。

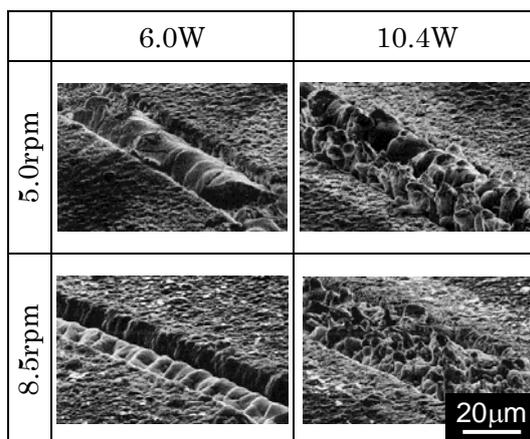


図 10 レーザ加工結果

図 11 は、良好な加工溝が得られたレーザ加工条件(出力 6.0W、DC モータ回転数 8.5rpm)

でダイヤモンド成膜部分を加工して作製したダイヤモンドツールで、ピッチ $180\mu\text{m}$ 、溝幅 $20\mu\text{m}$ 、溝深さ $6\mu\text{m}$ のものが得られた。

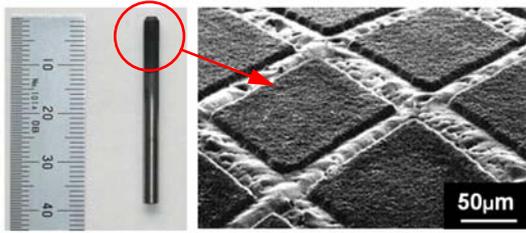


図 11 ダイヤモンドツール

作製したダイヤモンドツールを用いて研削加工実験を行い、加工前後でのツール表面、被削材加工面、および研削抵抗の観察から、作製したツールの有用性について検討した。

図 12 は、加工実験の概略である。加工実験には前節と同様、立形マシニングセンタに高速スピンドルを装着し、主軸回転数 $15000\sim 35000\text{rpm}$ 、送り $2\text{mm}/\text{min}$ 、切込み $5\mu\text{m}$ で、被削材は金属ガラスである。

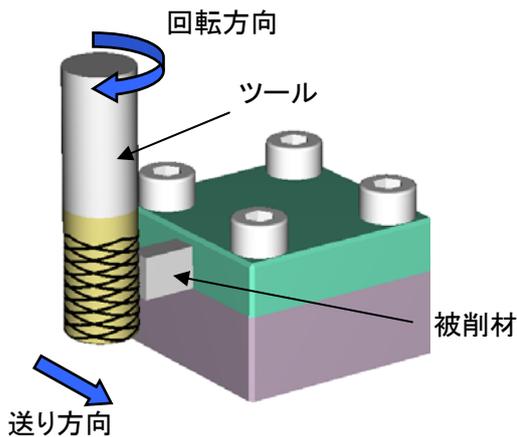


図 12 加工実験の概略

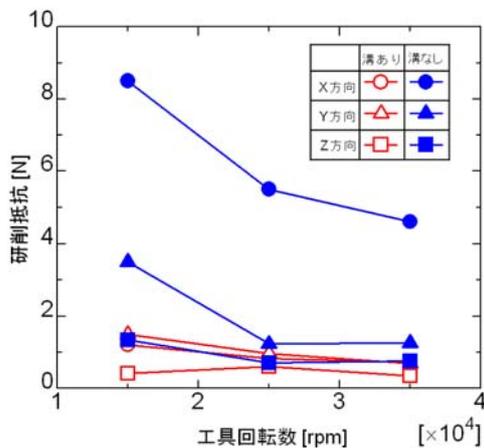


図 13 研削抵抗

図 13 は、工具回転数と研削抵抗の関係である。図より、工具回転数の増加にともない研削抵抗が小さくなることがわかる。また、溝のあるツールは、溝のないツールと比較して研削抵抗が小さいことから、溝の導入が有効であることがわかる。

図 14 は、研削加工実験前後のダイヤモンド膜の SEM 観察像である。図より、加工後は、ダイヤモンド膜が摩耗、はく離している部分が観察される。このことから、ダイヤモンド膜と超硬合金との密着性をさらに向上させる必要がある。

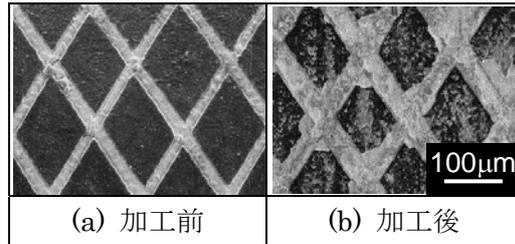


図 14 加工前後のダイヤモンド膜の比較

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 2 件)

- ① 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、査読有、74 巻、11 号、2008、pp. 1176 - 1181 (精密工学会論文賞受賞)
- ② K. Inagaki, N. Morita, K. Ashida, J. Saito, Development of a Small Machining Center Equipped With Nanomachining and Measurement Functions, 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing, 査読有、2008

[学会発表] (計 1 件)

- ① 稲垣清紀、森田 昇、山田 茂、高野 登、大山達雄、マイクロダイヤモンドツールによる単結晶シリコンのマイクロ加工、砥粒加工学会北信越ハイテク加工研究分科会 2008 年度研究・開発成果発表会、2008. 7. 4、金沢工業大学

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計◇件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

- ① 森田 昇、高野 登、ダイヤモンドアレイ工具の微細加工への応用、日本機械学会 RC240 多軸複合工作機械の高度化技術に関する研究分科会研究報告書、2010、pp. 159-162

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 昇 (MORITA NOBORU)
富山大学・大学院理工学研究部（工学）・
教授
研究者番号：30239660

(2) 研究分担者

山田 茂 (SHIGERU YAMADA)
富山大学・大学院理工学研究部（工学）・
准教授
研究者番号：00174714
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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：