
マイクロ・ナノ融合環境での表面機能の発現・創生と体系化に関する研究 —ダイヤモンドアレイ工具の微細加工への応用—

研究代表者 理工学研究部（工学系） 森田 昇

1 はじめに

本プロジェクトは、表面に設けた微細構造（表面テクスチャ）から期待される機能発現とその体系化を目的として、新たに開発したシリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具およびナノ加工計測システム等を用いて様々な表面テクスチャを創生するとともに、マイクロ・ナノ融合環境下での新しい光学的、機械的、化学的機能の創生とその応用化を目指す。

本プロジェクトの開発課題のひとつとして、単結晶シリコンの異方性エッチングと CVD ダイアモンド成膜法を併用し、任意の形状と配列を有す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とよぶ）の開発を行っている。これまでに、この技術を応用した加工用 AFM カンチレバーおよびマイクロリング工具を提案・作製した。また、作製した工具を用いて加工実験を行い、精密加工用工具としての有用性について示した。今年度は、これらの工具を用いたナノ切削をリアルタイムで観察するシステムと、加工と計測を同一機上で実現するナノ加工・計測システムを開発した。

2 ナノ切削のリアルタイム観察

これまでの研究で、AFM 機構を用いてナノ切削ができることは、基礎実験により確認できたものの、得られるデータは加工後の形や切りくずなどに関するものにとどまり、加工メカニズムの解明には加工中のより詳細な情報が求められる。そこで、ナノ切削加工の進行過程をリアルタイムで直接観測するために、走査型電子顕微鏡（SEM）内で動作するナノ機械加工システムを産業技術総合研究所との共同研究で構築した。図 1(a) はその構成図である。SEM の真空チャンバ内に、ナノ加工ユニットを導入し、カンチレバー先端部を拡大観察する。ナノ加工ユニットは、AFM コントローラにつながる信号線を通じて制御される。SEM では、観察対象をスペースの限られた真空チャンバに密閉する必要があるため、機構の設計には様々な工夫が要求される。また、ナノ加工の様子を

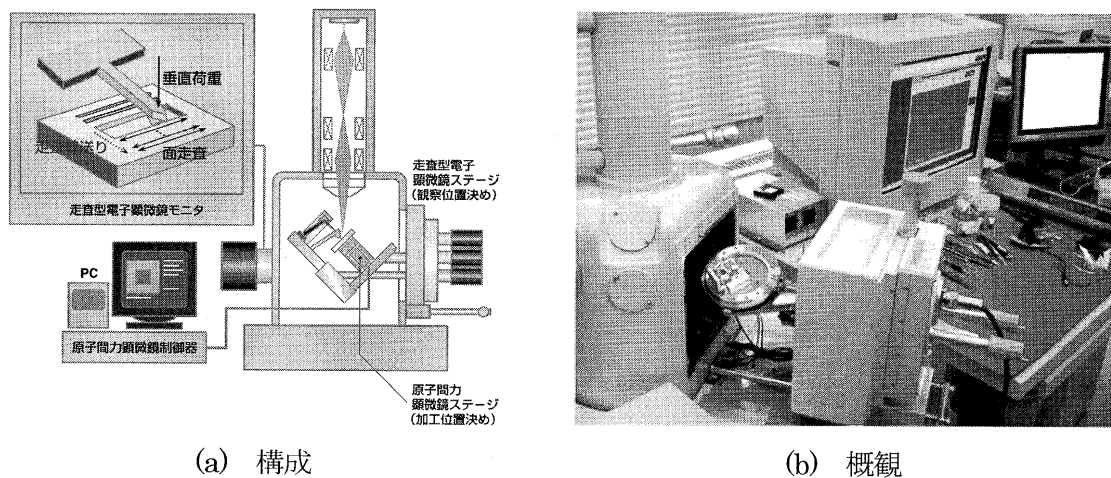


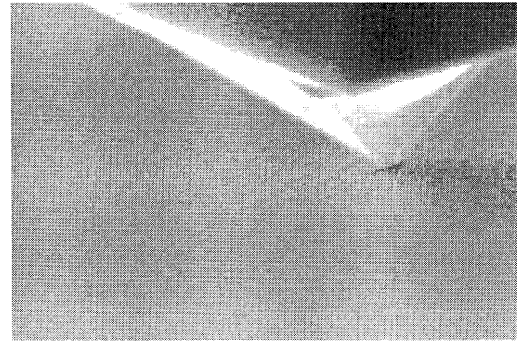
図 1 SEM 内 AFM 加工システム

観察するには、カンチレバーの斜め前方からの視界を確保するため、SEMのレンズ系との干渉を避け、目的とする観察姿勢を確保できるように、ナノ加工ユニットとそれを搭載するSEMステージの全てが独自の設計となっている（図1(b)）。ナノ加工ユニットの駆動機構には、非共振型超音波モータを用いて、機械的な駆動機構の軸数を減らしている。ナノ切削の様子を写した動画は、SEMのTVモードでビデオ信号として出力され、デジタルビデオレコーダに記録される。図3は、単結晶シリコンに対して、ナノ切削加工を行った様子で、動画から切り出した静止画である。図3(a)は、加工を行う前、カンチレバーの切れ刃先端部である。図3(b)の5本の溝状の加工痕は、手前側に向かって切れ刃の接触荷重を段階的に増加させて加工したもので、溝の深さがしだいに大きくなっている様子がわかる。除去加工は、カンチレバーの前方（手前）側で行われており、切れ刃のエッジ部で切りくずが生成している様子が観察される。切り込みの深さは、設定した走査線送り量から約100nmと推測される。図3(c)は、ナノ切削加工後の加工面周辺のSEM観察像である。ナノ切削によって被削材が除去されており、大量の切りくずが周囲に付着している。

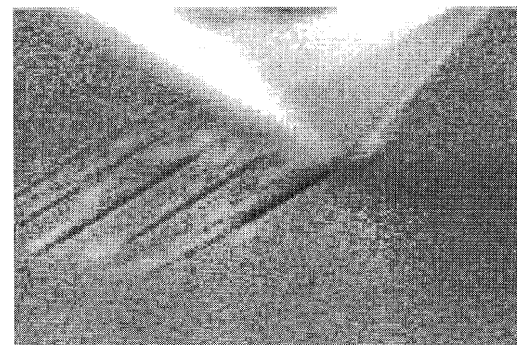
これまでの加工後に行ったSEM観察の結果から、ナノスケールの切り込みでも、切りくずの生成を伴う切削加工が行われていることは推測されていたが、この実験で得られた動画はその妥当性を証明し、さらに切れ刃と被削材の接触状態など、新たな情報を取得できた。被削材に用いた単結晶シリコンは、一般に硬ぜい材料と呼ばれ、比較的硬質で、大きなスケールの機械加工では、ガラスのように割れやすい性質をもっている。ナノ切削では、シリコンやガラスのような硬ぜい材料でも、一般の金属材料と同様に延性モード切削が行われていることを確認できた。単結晶シリコンは一般の金属材料よりも硬いことから、このシステムによるナノ機械加工は他の金属材料やガラスなど幅広い材料にも適用できる。

3 ナノ加工・計測システム

金属、半導体、ガラス、ポリマーなど固体物質全般を、数10nm～数10mの加工範囲において、数10nm～数100nmの加工寸法を1nmの加工精度にて3次元切削加工することが可能なコンパクトなシステムを開発した(平成16～17年度地域新生コンソーシアム開発事業)。本システムは、AFM



(a) 加工前



(b) 加工中



(c) 加工後

図3 単結晶シリコンのナノ切削の様子

測定機能, ドリル加工, フライス加工, ナノシェーパ加工の各ツールを任意に切り替えて使用可能な機能を有する. 図4は, ナノ加工・計測システムの概観である. 装置本体は, 主に工具位置決め機構部, 4種類の加工・計測機能(ナノフライス, ナノドリル, ナノシェーパ, AFM)を等分に配置したターンテーブルと工具切替のための軸ステージ, 被加工物を載せる試料台と位置決め補正用のセンサーユニットを搭載したY軸スライダによる工具位置決め補正機構からなる.

ナノ加工・計測システムを用いて, 単結晶シリコンの加工を行った. 図5は, ナノフライス工具により直径 $50\mu\text{m}$, 深さ $3\mu\text{m}$ の円を3つ重ねた形状に加工したものである. 加工痕のオーバーラップ部分の割れもなく, 加工後の工具破損も見られなかった. 図6は, ナノシェーパ工具により, 経済産業省(METI)のロゴマーク形状に加工したものである. また, 図7は, 本システム搭載のAFMを用いてグレーティングを測定した例である.

4 おわりに

本プロジェクトでは, 加工用AFMカンチレバーおよびマイクロリング工具を用いたナノ切削リアルタイム観察システムと同一機で加工・計測が可能なシステムの開発を行った. 前者では, 加工中の様子の観察が可能であり, 画像を高解像度化することにより, 詳細なナノ切削の様子の観察を可能とする. 後者では, 被加工材の品質向上や加工・測定時間の

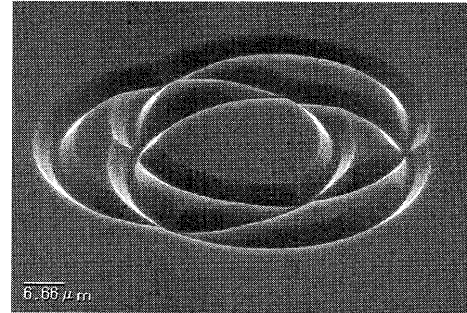


図5 ナノフライス工具による加工痕

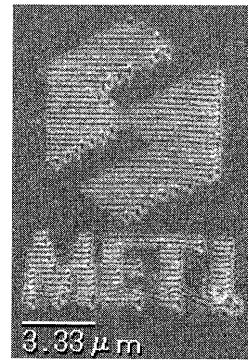


図6 ナノシェーパ工具による加工痕

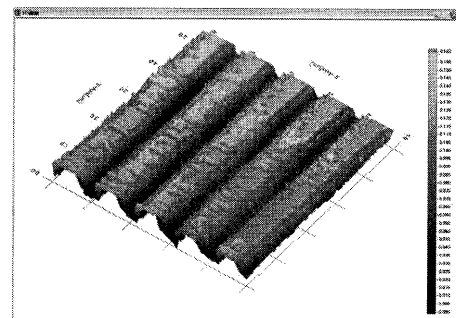
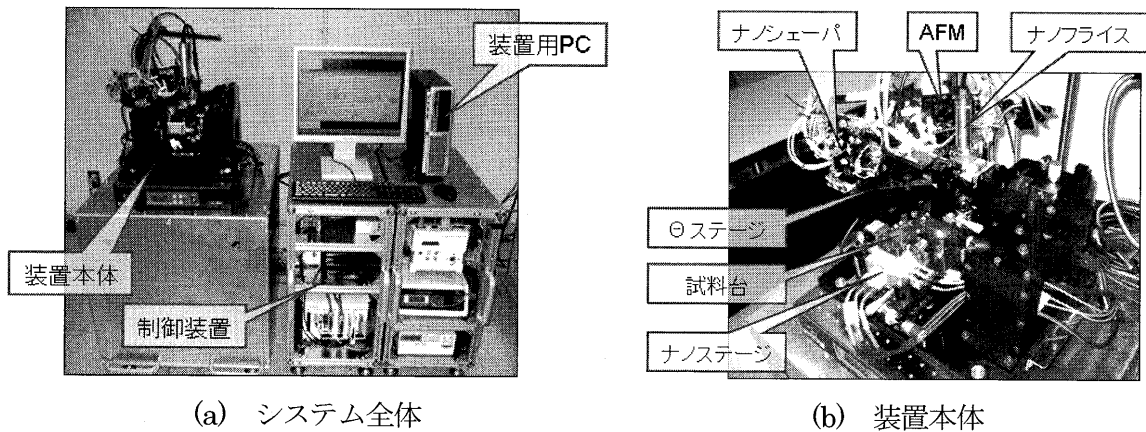


図7 AFMによるグレーティング測定



(a) システム全体

(b) 装置本体

図4 ナノ加工・計測システム

短縮化など種々の問題があるものの、同一機でナノ加工・計測を実現するものではなく、実用化に向けて性能を向上させることにより非常に有用な基盤ツールとなりうる。

最後に、本研究を進めるにあたり、(株)不二越の神田一隆氏、高野茂人氏、富山県工業技術センターの小幡勤氏に多大なご支援をいただきましたことを記して御礼申し上げます。

また本研究の一部は、経済産業省平成16年度地域新生コンソーシアム研究開発事業、平成18年度(財)富山県新世紀産業機構新商品・新事業創出公募事業、平成18年度大澤科学技術振興財団研究開発助成ならびに平成18年度科学研究費補助金基盤研究(C)を受けて行われたことを記してお礼申し上げます。

5 プロジェクト成果

5.1 特許

- 1) 特許出願/発明の名称：ダイヤモンド工具及びその製造方法
出願日：15年3月11日，出願番号：特願2003-65656，特開2004-268236
- 2) 特許出願/発明の名称：微細加工装置
出願日：15年3月17日，出願番号：特願2003-72051，特開2004-276177

5.2 学術誌掲載論文および国際会議発表論文

- 1) Nanomachining of Silicon Surface Using Atomic Force Microscope with Diamond Tip. N. Kawasegi, N. Takano, D. Oka, N. Morita, S. Yamada, K. Kanda, S. Takano, T. Obata, K. Ashida : ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol.128 : 723-729 (2006) .
- 2) シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用(第2報)ー任意切れ刃を持った加工用カンチレバーの作製ー.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, 72巻, 8号:1025-1029 (2006) .

6 プロジェクト成果の応用・効果・構想

本プロジェクトで得た成果を、信頼性の高い極微細加工が安定して実現できるようダイヤモンドアレイ工具の高精度化と加工装置のシステム化技術を中心に開発し、本プロジェクト終了後2年以内に実用型、汎用型「極微細加工システム」として安定性、信頼性、操作性を高めた後、製品化に移る。また4年程度後にはさらに多種機能を拡充、新市場を開拓していく計画である。

7 利用施設

走査型プローブ顕微鏡を、加工用カンチレバーの評価試験(加工用カンチレバーによる加工実験および測定用カンチレバーによる加工痕測定)およびマイクロミリング実験による加工痕測定のため、週1回8時間程度利用している。