

ナノスケール切削の進行過程をリアルタイム観察 新たなナノファブ리케이션技術の開発を目指して

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開発し、ナノスケールの切り込みで切削が進行する過程を、リアルタイムで観察することに成功した。このシステムは、原子間力顕微鏡 (AFM) を利用したもので、ピラミッド型のダイヤモンド切れ刃を先端に固定した加工用カンチレバーを用いて、単結晶シリコンなどの硬質材料をナノスケールで切削することができる。材料除去メカニズムの解明、ナノ機械加工における最適加工条件を探索する強力なツールとなり、ナノ金型の修正加工など実用化技術の開発に拍車がかかるものと期待される。

Nano-mechanical fabrication technology using atomic force microscopes (AFM) has been developed for practical applications, but the fabrication process has not been understood clearly yet, and thus optimal conditions for fabrication have been determined by trial and error. We have developed a nano-mechanical fabrication system using atomic force microscopes (AFM) which works in a scanning electron microscope (SEM), and thereby succeeded in the real-time observation of the nano-scale cutting process. This technique is expected to be a powerful tool for clarifying the removal mechanism of materials in cutting process, and for optimizing fabrication conditions, and to accelerate technological development for practical applications such as the fabrication and repair of nano-mold.

最古で最先端の機械加工

機械加工は、ものづくり技術として最も古く、また最も身近な加工技術である。産業革命以来、今日の産業界でも幅広いスケールで数多くの材料の加工に適用されており、高精度かつ高能率な加工技術として、様々な構造・機構部品の製作に活用されている。機械加工とは、固体工具、すなわち切削工具や砥石を用いて材料の不要な部分を削り取るという加工法であり、日常生活でもよく目にするハサミやナイフ、サンドペーパーなどと、基本原理は同じである。

このように表現すると、機械加工は完成された技術であり、もう研究要素は残っていないように感じられるかもしれないが、実は、究極の微小加工を実現できる可能性を秘めた最先端の加工技術でもある。また、加工原理も一見単純そうで、メカニズムもすでに分かりきっているようにも思えるが、機械加工の根本にある材料除去のメカニズムについては、未解明な部分が多く残されており、特にナノスケールでの機械加工の世界は、ほとんど未開拓の領域である。

産総研先進製造プロセス研究部門と富山大学工学部は、共同でこの未知の世界を探索するツールとして、電子顕微鏡内で動作するナノスケール機械加工システムを開発し、機械加工メカニズムの究明と、新たなナノファブ리케이션(ナノ製造)技術開発の研究を進めている。

ナノスケール機械加工の利点

現在、主流となっているナノファブ리케이션技術としては、イオンや電子、光子(レーザー)などの微粒子を用いた微細加工があげられる。ナノスケールの除去加工を行う場合、ビーム源で発生させたエネルギービームをレンズなどで絞って、焦点にエネルギーを集束させる。このとき、焦点が小さいほど微細な加工ができるが、ビーム源と被加工物が離れており、また微粒子には波動性(波としての性質)があるので、集束には限界がある。一般には確率的なばらつきを生じ、微粒子は狙った点から少し離れた所にも衝突することになる(図1)。日常生活のスケールでいうと、遠くから標的を狙う機関銃のようなイメージであろう。

一方で、集束ビームのかわりに固体工具を考えると、鋭い針の先端部を被加工材へ接触させ、材料を削るイメージとなる。理想的な究極の針があれば、先端は原子1個分となり、原子1粒を操作することができる¹⁾。狙った対象を、一点で確実に捉えることができることから、例えるなら、標的に至近距離まで近づいて斬る刀であろう。

一般の機械加工をナノスケールまで小さくしようとしても、単純な割り算のようにには行かず、現時点ではエネルギービーム加工に一日の長があるといえる。しかし、理想的な工具を精密に駆動できれば、理論的な微細加工の限界は高くなり、イオンの残留や加工熱などによる加工変質層も少ないといったメリットがある。

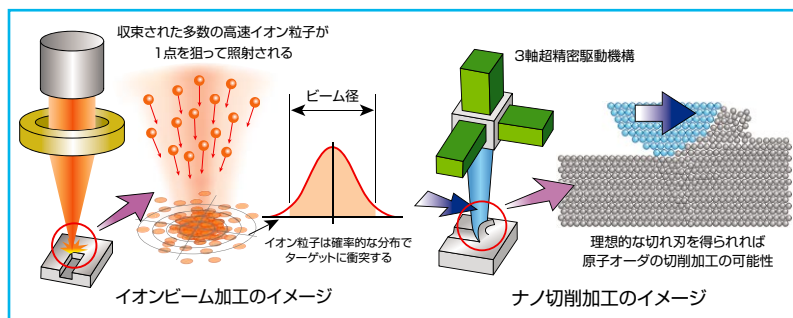


図1 エネルギービーム加工と機械加工

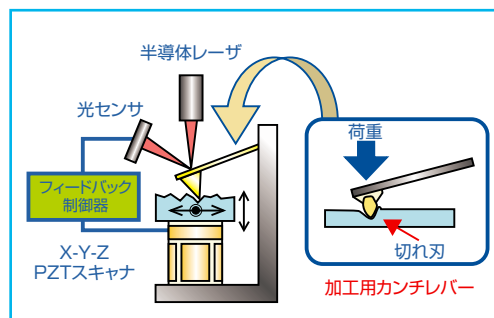


図2 AFM機構を用いたナノ機械加工の原理

原子間力顕微鏡を利用したナノ切削

ナノ切削を行うためには、ナノオーダの鋭利な切れ刃と、その切れ刃の位置をナノオーダで制御できる超精密駆動機構が必要となる。

ここで紹介するナノ機械加工システムでは、この超精密な切れ刃位置の制御に「原子間力顕微鏡」(AFM: Atomic Force Microscope)を用いている。図2はナノ機械加工の基本原則である。AFMはナノスケールで物質の表面を観察するための顕微鏡である。先端に非常に鋭い針(探針)を持ったカンチレバー(片持ち梁)を物質の表面に接触させ、針先で表面をスキャンすることで表面の凹凸を測定している。このとき、カンチレバーは非常に柔軟で、たわみを一定(接触荷重を一定)にするようにフィードバック制御が行われているため、針先が鋭くても物質表面はほとんどダメージを受けない。

このAFM機構に、剛性の高いカンチレバーを装着し、針の接触荷重を大きく設定すると、鋭い針先で表面に傷をつけることができる。針の先端部を切れ刃に見立てれば、切れ刃の位置をナノオーダで制御し、ナノスケールの除去加工、すなわちナノ切削加工を行うことができる。

ナノ切削を実現するには、工具、すなわち加工用のカンチレバーが重要な構成要素となる。ナノ切削加工に必要な接触荷重を得るには、市販のAFM観察用カンチレバーに比べ、1000倍程度の剛性が必要となる。この要求を満たす

ために、幅100 μm 、長さ1000 μm の加工用カンチレバーを設計し、単結晶シリコンの異方性エッチングにより製作した(図3)。加工用カンチレバーの太さは、ちょうど髪の毛と同程度である。

切れ刃については、開発初期には直径50 μm 程度のダイヤモンド砥粒を先端に固定する手法を採っていた。しかしながら、この方法では、砥粒の形が不規則で、ナノ切削工具としての安定した性能が得られず、定量的なデータの取得や加工位置を特定することが困難であった。そこで、CVDダイヤモンド膜と、ピラミッド形の穴を成形したシリコンモールドを用いて、ピラミッド形のダイヤモンド粒を製造する手法を開発した²⁾。新しい加工用カンチレバーは、幾何学的に形の整った切れ刃をもっており、従来のものより切れ味が良く、かつ安定した切れ味を長時間持続できることを確認した。

図4は、AFM機構を用いたナノ切削加工の基本的な実験方法である。AFMの面走査機能を用いると、図のように正方形領域の除去加工を行うことができる。垂直荷重と走査送り量によって切れ刃の切り込み条件を変化させ、材料の除去量を設定できる。図5は、単結晶シリコンを被削材として、ナノ切削加工を行った表面のAFM観察像である。面走査加工では、最大深さ約350nmの角穴が形成され、単一の走査線による切削加工でも、深さ25nm程度のV字溝が形成されている。

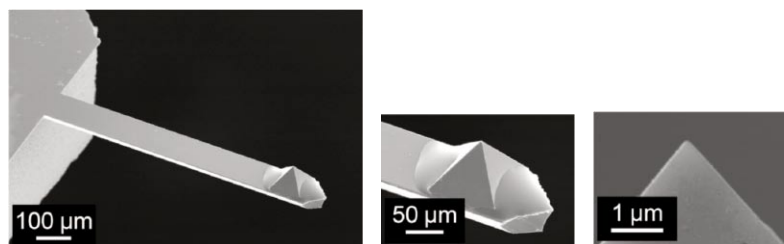


図3 加工用カンチレバー

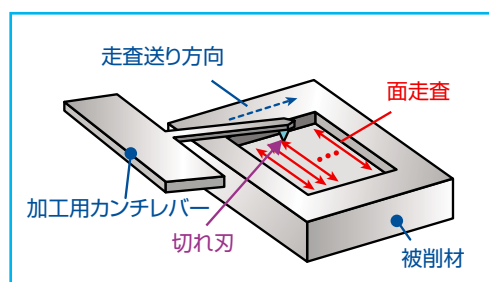


図4 ナノ機械加工の基本的な実験方法

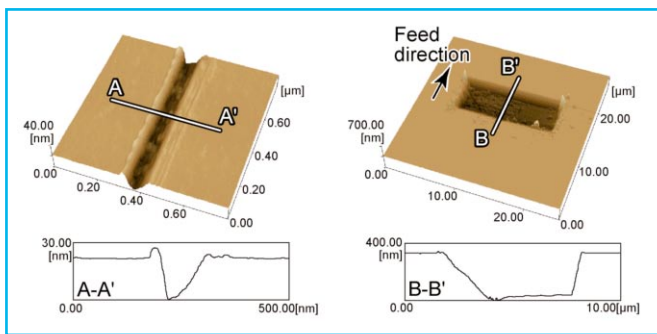


図5 ナノ切削加工を行った表面のAFM観察像

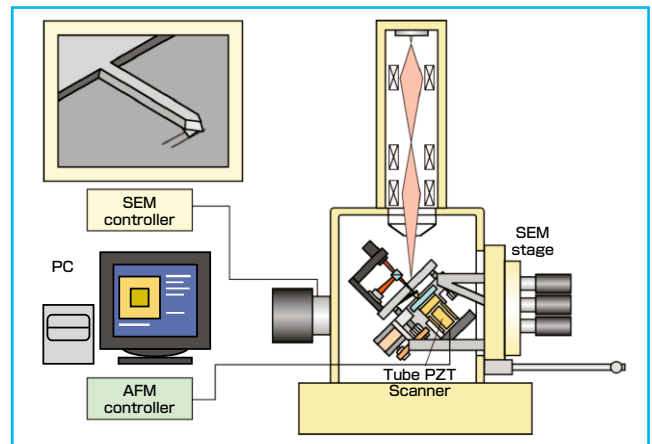


図6 SEM内ナノ切削加工システムの構成

ナノ切削のリアルタイム観察

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た。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構築した。図6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り、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必要があるため、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7)。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8に、単結晶シリコンを材料に、ナノ切削加工を行った様子を、動画から切り出した静止画で示す。図8(a)、(b)は加工を行う前で、カンチレバー全体から、加工が行われる切れ刃先端部へズームアップしている。加工を行う際は、材料側を駆動しているため、図8(c)では、材料表面に付着した切りくずが見えなくなり、うっすらと3本の溝状の加工痕が見られる。図8(d)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。切削加工は、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8(f)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。

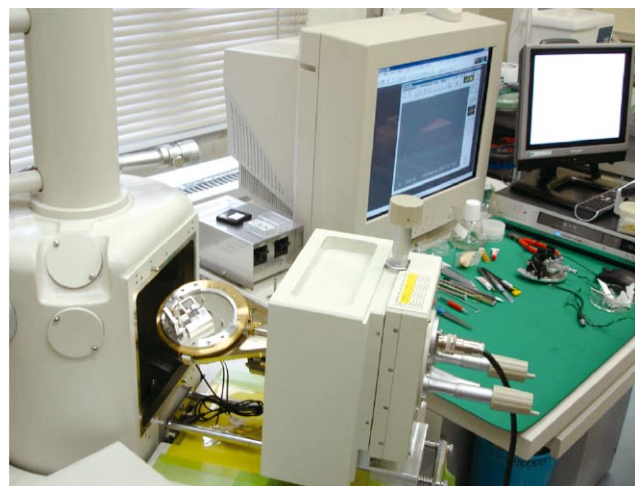
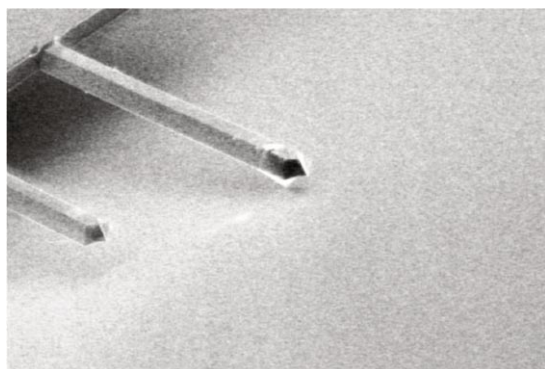
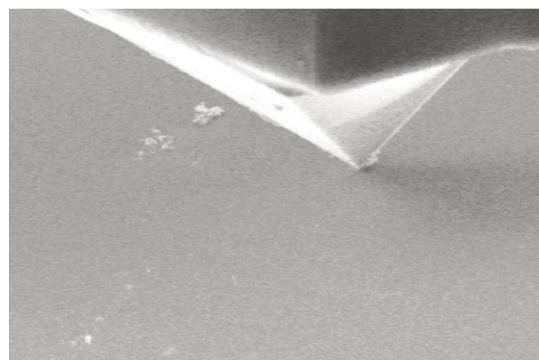


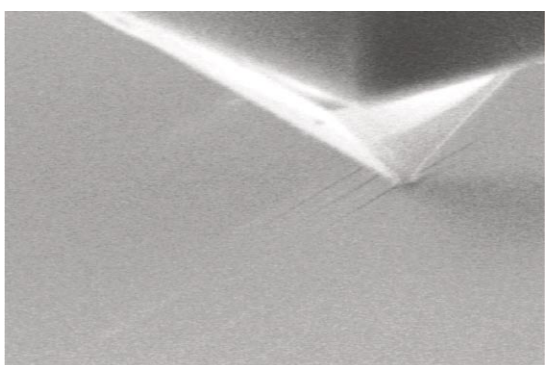
図7 専用設計のSEMステージに搭載されたナノ加工ユニット



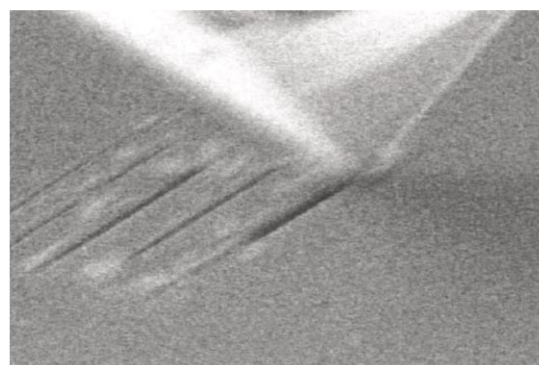
(a) 加工前カンチレバー全体



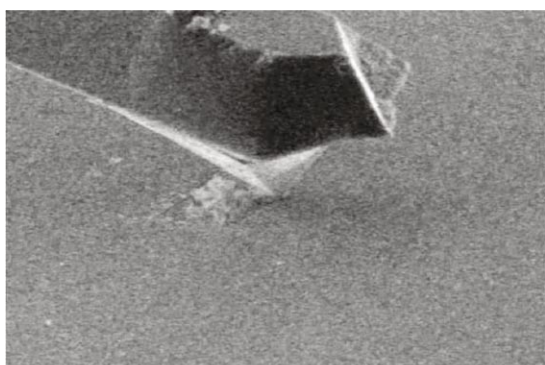
(b) 加工前切れ刃の先端



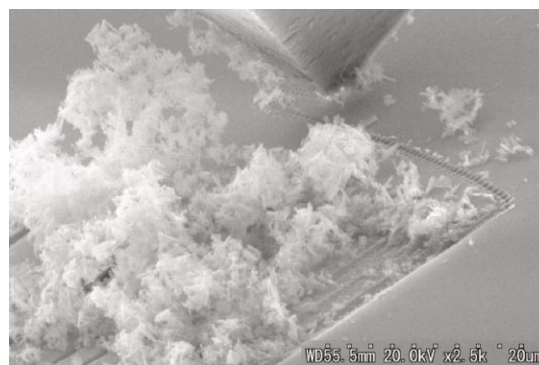
(c) 加工中切れ刃の先端



(d) 加工中粗動5段階移動後



(e) 加工終了直後



(f) 加工面の周辺に付着した切りくず

図8 単結晶シリコンのナノ切削加工を行っている様子 ((a) ~ (e) は動画よりキャプチャ、(f) は静止画)

これからの取り組み

「ナノスケール機械加工の直接観測」は、加工のスケールを問わず、機械加工の基礎的メカニズムの究明に有用なデータを生み出すものである。このような学術的な視点は、機械加工の原理を解明するための有力なツールとして期待される。一方で、産業界への応用に目を向けると、ナノ金型の修正加工など、新たな応用技術の開発への展開も期待される。このような実プロセスにおいても、加工の進行過程を把握することは、最適な加工条件の探索を迅速化し、技術開発の加速につながる。今後は、SEM内でのナノ機械加工システムの性能向上を図りながら、学術的な新発見、産業への新応用技術の開発を目指し、引き続きナノスケール切削技術に関する研究開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) D. M. Eigler & E. K. Schweizer: Nature 344 (1990) 524.
- 2) 高野登、ほか：精密工学会誌 70, 11 (2004) 1402.

関連情報

- プレス発表 2006年3月13日：「ナノスケール切削加工のリアルタイム観測に成功」

● 問い合わせ先

独立行政法人 産業技術総合研究所

先進製造プロセス研究部門 ファインファクトリ研究グループ

研究員 芦田 極

E-mail: ashida.k@aist.go.jp

〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1 つくば東