

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630015

研究課題名(和文)ダイヤモンドマイクロ切削工具エッジ形状のサブナノメートル超高精度計測法の研究

研究課題名(英文) A study for sub-nanometer ultra-high precision measurement method of micro cutting edge of diamond tool

研究代表者

高 偉 (Gao, Wei)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70270816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究題目では、軟質金属表面に転写した単結晶ダイヤモンド切削工具マイクロ刃先の反転エッジの三次元精密形状測定より、マイクロエッジ絶対形状をサブナノメートルオーダーの超高精度で自律的に計測することを目的とした。

分子動力学(MD)シミュレーションに基づく原子スケールでの反転エッジ形成過程の最適化により、反転エッジ法を用いてサブナノメートルの超高精度三次元形状計測への有効性を示した。また工具運動と加工力を高分解能かつ高感度に測定可能な高感度加工力検出型工具サーボを構築し、提案手法の有効性について実験的な検証を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this research, an ultra-precision form measurement has been verified for three dimensional measurement of micro-cutting edge of the diamond cutting tools. A reversal edge of the cutting edge, which is made by the indentation of the diamond cutting edge on the soft material, is created for the canceling of the measurement errors due to the AFM probe scanning. A force-sensor integrated fast tool servo (FS-FTS) was constructed for single point diamond micro-cutting and in-process measurement of both of the cutting force and tool displacement. By using the FS-FTS, the micrometric reversal edge of the cutting tool can be created during the measurement of the cutting force. Molecular dynamics (MD) simulations were introduced for the investigation and optimization of the creation of the reversal edge on the soft materials. The results of MD simulation indicated that 3D surface form of the diamond micro cutting edge could be obtained with sub-nanometric accuracy by using the reversal edge.

研究分野：工学

 キーワード：ナノ計測 マイクロエッジ AFM 反転エッジ MDシミュレーション アクチュエータ 圧力センサ FT
   
S

### 1. 研究開始当初の背景

単結晶ダイヤモンド切削工具には、工作物表面を平滑に仕上げる高精度で鋭利なエッジが要求される。ピッチや幅が光波長に近い超微細形状の創成に必要な次世代マイクロ工具には 10 nm 以下の鋭利さが求められる。この次世代マイクロ工具の高精度高能率製造・使用技術を確立させるために、超精密加工機上で工具マイクロエッジ形状をサブナノメートルの精度で高速かつ高精度に計測することが不可欠となっている。プローブ先端チップを測定対象に沿って走査させ、形状を測定する原子間力顕微鏡(AFM)は原子レベルの分解能と三次元測定が可能であるため、ダイヤモンド切削工具エッジ形状の3次元測定への応用が盛んに研究されてきた。しかしながら、微細な AFM プローブ先端チップとマイクロ工具エッジのアライメントに非常に時間がかかるため、高速測定ができなかった。さらに AFM プローブチップの先端半径と工具エッジ丸み半径がほぼ同じ大きさであるため、AFM はマイクロ工具形状を正確に表現する絶対形状測定ができないという問題があった。

### 2. 研究の目的

測定対象のマイクロ工具エッジと、軟質金属表面にその形状が転写された反転エッジを同一の AFM プローブにより走査し、測定した二つのエッジ形状のデータの差動演算から、自律的に工具エッジ形状と AFM プローブチップ形状を分離して測定する絶対測定法(反転エッジ差動法)の基本原則を理論的に確立することを目的とした。工具先端マイクロエッジの AFM 計測に自律的絶対測定法を適用し、AFM スキャナの精度である 0.1nm までナノメートルエッジ形状の絶対測定ができることを実験的に検証した。また超精密加工機上で高速・高精度な計測を行うための加工工具制御装置を構築し、軟質金属表面上への反転エッジ創成を行い、反転エッジ差動法の有効性の確認を本研究題目の目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)反転エッジ差動測定法の開発

工具切れ刃丸み半径が 10 nm 程度のダイヤモンド工具エッジによる軟質金属表面への反転エッジの転写は原子オーダー領域の扱いとなるため、解析手法は分子動力学法を用いて反転エッジ形状の解析を行った。ダイヤモンド工具はコーナ半径が 1 $\mu$ m の円弧形状刃先タイプとし、解析は工具切れ刃頂点近傍の範囲に限定して行われた。表面に反転エッジが転写される軟質金属には、無酸素銅とアルミ合金を選択された。工具を軟質金属表面に押込むことによって反転エッジを作る方法において、ダイヤモンド原子と軟質金属表面原子間のポテンシャルの下に分子動力学方程式を解くことによって反転エッジ形状

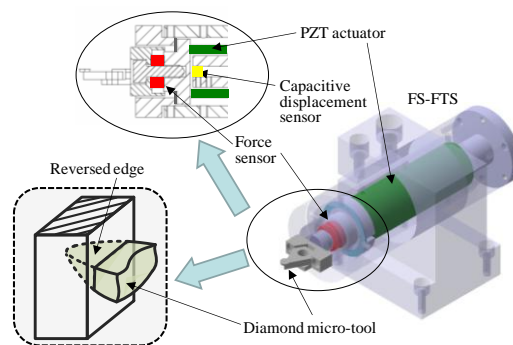


図 1. 接触力検出型高速工具制御サーボ (FS-FTS)による反転エッジ形状創生

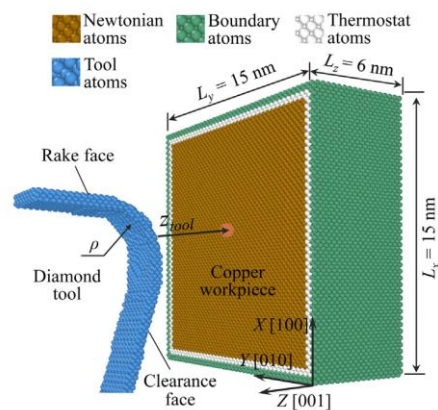


図 2. 分子動力学(MD)シミュレーションによる工具マイクロエッジ接触モデル

が計算された。また、温度、圧力のみならず、ケミカルポテンシャルなども考慮された。その解析結果に基づいて、工具エッジと反転エッジの三次元形状が評価され、反転エッジ差動法を理論的に確立させると同時に、最適なエッジ転写と AFM 形状計測の最適条件を理論的に検討する。

#### (2)反転エッジの創成実験

マイクロスケールの先端半径を有するダイヤモンドマイクロ工具により、超精密旋盤上で軟質金属材料表面への反転エッジ創成実験を行った。軟質金属試料を超精密旋盤のスピンドルに固定し、スライド上の工具台には高感度圧電型力センサが内蔵された高速工具サーボ(FS-FTS)を設置した(図 1)。単結晶ダイヤモンド工具は FS-FTS の工具ホルダに固定され、超精密旋盤のスピンドルと X 軸スライドを同期させて、軟質金属試料をダイヤモンド工具で鏡面切削した後、FS-FTS の圧電素子を使って、工具エッジをその表面に押込んで反転エッジを創成した。また、負荷および除荷時における押込み深さと荷重を X 軸スライドに搭載した FS-FTS の静電容量型変位センサと力センサにより連続して計測された。

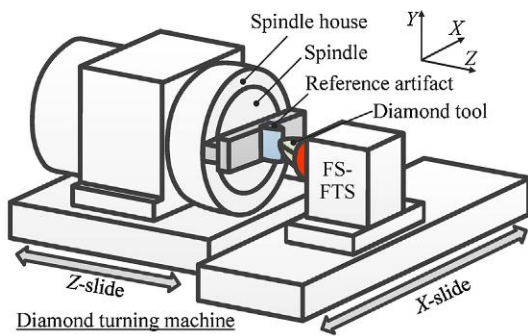


図 3. FS-FTS を用いた超精密加工機上工具先端マイクロエッジ形状測定システム

### (3) 工具エッジ形状の加工機上計測実験

本研究題目で構築した FS-FTS を超精密旋盤に取り付け、加工機上測定実験システムを構築し、マイクロ工具エッジ形状の加工機上測定を行う。FS-FTS によりダイヤモンドマイクロ工具エッジの接触力を一定に保った状態で超精密旋盤のスピンドル上に設置された測定用エッジにより工具エッジが走査された。FS-FTS を用いて測定される工具運動に基づいて、ダイヤモンド工具マイクロエッジ形状による走査のプロファイルが計測され、マイクロ工具エッジの形状を自律的に算出することが可能であった。

## 4. 研究成果

### (1) 分子動力学シミュレーションによる反転エッジ創成の検証

ダイヤモンド工具によって軟質金属表面に創生される反転エッジの形成では、軟質金属の弾性変形および塑性変形の両方を考慮し、反転エッジ創成条件の最適化を検討した。単一原子レベルでの挙動を明らかにするために分子動力学(MD)シミュレーションが導入された(図 2)。ダイヤモンド工具の押し込み量と接触力(加工力)の関係が詳細に調査され、加工条件と形成される反転エッジの関係が調べられた。また反転エッジ形成における加工条件について検討された。結果として、反転エッジ差動法がサブナノメートル精度でダイヤモンド工具マイクロエッジ形状の絶対測定を行える見込みを得ることができた。

### (2) 加工力検出型工具制御装置の開発

軟質金属上に反転エッジを転写するために、圧電素子を用いてダイヤモンド工具に精密な運動を与える高精度工具制御装置が構築された。本研究結果では、MD シミュレーションによる検討に基づいたダイヤモンド工具の押し込み量と接触力を実験的に評価するために、高分解能精密変位センサと高感度力センサを内蔵した加工力検出型高速工具サーボ装置(FS-FTS)を開発した。FS-FTS は超精密旋盤の刃物台に搭載可能な小型なサイズに設計され、超精密加工機上においても加工力と工具押し込み量を精

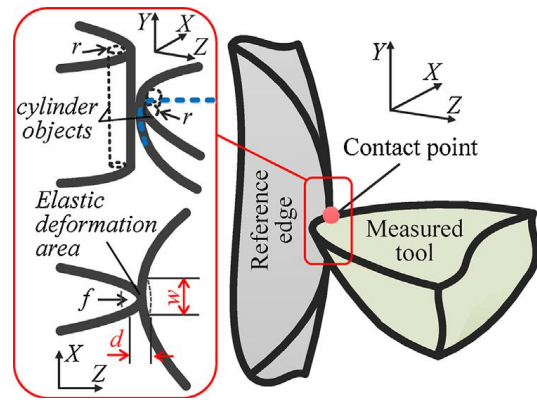


図 4. 校正用エッジによるダイヤモンド工具マイクロエッジ形状の加工機上計測

密に測定できる(図 3)。研究題目において構築された FS-FTS はナノメートルスケールのダイヤモンド工具押し込み量変位とマイクロニュートン接触力を同時に測定できることが確認され、加工機上において反転エッジ動作法を用いたマイクロエッジ形状に利用可能であることが確認された。

### (3) ダイヤモンド工具マイクロエッジ形状の測定

先述の FS-FTS では高感度に対象物との接触を検出できることから、ダイヤモンド工具エッジと対象物との間のごく微小な接触力を一定に保持するように工具先端の接触状態を圧電素子の変位により制御することで、対象物表面を傷つけることなくダイヤモンド工具先端で走査することが可能となる。ダイヤモンド工具エッジに対して垂直に配置された校正用試料のエッジ部分を走査することにより、ダイヤモンド工具マイクロエッジの形状を自律的に計測し、工具の摩耗やチップングを超精密旋盤上において光学顕微鏡などの機器を用いることなく実施できることが確認され、その有用性を実証した。

## 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 3 件)

1. Yuan-Liu Chen, Shu Wang, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Bing-Feng Ju, An in-process measurement method for repair of defective microstructures by using a fast tool servo with a force sensor, Precision Engineering, 査読有, Vol. 39, 2015, pp. 134-142.  
doi:10.1016/j.precisioneng.2014.08.001
2. Yuan-Liu Chen, Yuki Shimizu, Yindi Cai, Shu Wang, So Ito, Bing-Feng Ju, Wei Gao, Self-evaluation of the cutting edge contour of a microdiamond tool

with a force sensor integrated fast tool servo on an ultra-precision lathe, the International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 77, 2015, pp. 2257-2267. doi 10.1007/s00170-014-6580-2

3. Yuan-Liu Chen, Wei Gao, Bing-Feng Ju, Yuki Shimizu So Ito, A measurement method of cutting tool position for relay fabrication of microstructured surface, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 25, 2014, 0640018 (10 pp). doi:10.1088/0957-0233/25/6/064018

[学会発表] (計 9 件)

1. Yindi Cai, Yuanliu Chen, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Investigation of the deformation mechanism of a copper workpiece during nanoindentation by molecular dynamics, The 11st China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP2015), 2015 November 25-27, 板橋区立グリーンパーク, 東京
2. Yuanliu Chen, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, A new fast tool servo with integrated functions for in-process measurement and cutting of microstructured surfaces, The 11st China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP2015), 2015 November 25-27, 板橋区立グリーンパーク, 東京
3. Yuan-Liu Chen, Yindi Cai, Keisuke Tohyama, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Ductile cutting of a microstructure array on silicon surface by using a diamond tool with a negative rake angle, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, October 18-21, 京都リサーチパーク, 京都.
4. Yindi Cai, Yuanliu Chen, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Ying Chen, Molecular dynamics simulation on nano-contact between a diamond cutting tool and a copper surface, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, October 18-21, 京都リサーチパーク, 京都.
5. Yuan-Liu Chen, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, On-machine Edge Contour Measurement of a Micro Cutting Tool by Using a Diamond Edge Artifact, 12th International Symposium on

Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2015), 2015, September 22-25, Taipei, Taiwan.

6. 陳遠流, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, Detection and repair of micro defects in the process of diamond cutting of a microstructure array, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4-6 日, 東北大学, 仙台市, 宮城
7. 蔡引娣, 陳遠流, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, Molecular dynamics simulation on nanoindentation response of a copper workpiece, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4-6 日, 東北大学, 仙台市, 宮城
8. Y.D Cai, Y.L. Chen, S. Ito, Y. Shimizu, W. Gao, Investigation of surface damages in contact and form measurement with a force sensor-integrated fast tool servo, The 38th International MATADOR conference, 2015, March 28-30, Huwei, Yunlin, Taiwan.
9. Shu Wang, Yuan-Liu Chen, So Ito, Yuki Shimizu, Wei Gao, Cutting tool positioning by utilizing a force sensor-integrated fast tool servo, The 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT2014), 2014, November 18-21, 北九州国際会議場, 北九州市, 福岡.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高偉 (GAO, WEI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 70270816

(2)研究分担者

清水 裕樹 (SHIMIZU, YUKI)

東北大学・大学院・工学研究科・准教授

研究者番号 : 70606384

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :