Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00354

Received date : 11 November, 2021

Accepted date : 25 February, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 4 March, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

酸素プラズマを使ったナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対する ドライエッチング (成形し得る刃先の丸み半径)

仙波 卓弥^{*1}, 天本 祥文^{*1}, 角谷 均^{*2}

Dry etching of single-point cutting tool made of nano-polycrystalline diamond using oxygen plasma (Shapeable cutting edge radius)

Takuya SEMBA^{*1}, Yoshifumi AMAMOTO^{*1} and Hitoshi SUMIYA^{*2}

^{*1} Department of Intelligent and Mechanical Engineering, Fukuoka Institute of Technology

3-30-1 Wajiro Higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295, Japan

^{*2} Advanced Materials R&D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1-1-1 Koya-kita, Itami-shi, Hyogo 664-0016, Japan

Abstract

Dry etching using oxygen plasma was conducted on a single-point cutting tool made of nano-polycrystalline diamond to clarify the shapeable cutting edge radius (CER). The CER of the tool was measured by atomic force microscopy (AFM). The cantilever employed was made of single crystal silicon and had a tetrahedral shape with a probe tip radius of 4 to 10 nm. The CER can be identified by subtracting the probe tip radius from a measured CER when the probe tip radius is fixed at a certain value. Dry etching tests revealed that the measured CER decreased and converged to a constant value equivalent to the probe tip radius with increasing etching time. Utilizing this phenomenon, a standard tool suitable for calibrating the probe tip radius was fabricated. The CER and the variation in the CER of the standard tool were less than 0.1 nm. This calibration using the standard tool made it possible to identify the CER from the measured CER. It became clear that the CER converged to less than 0.1 nm, and the variation in converged CER was less than 0.5 nm. Hence, it can be concluded that the shapeable CER that can be formed by dry etching using oxygen plasma is less than 0.5 nm.

Keywords: Dry etching, Oxygen plasma, Single-point cutting tool, Nano-polycrystalline diamond, Cutting edge radius

1. 緒 言

1980 年代の半ばから 10 年くらいの間、純アルミニウムや無酸素銅といった非鉄金属に対して超精密切削を行い、極微小切削のメカニズムを解明するための研究が盛んに行われた。工作機械の運動精度、単結晶ダイヤモンド (Single Crystalline Diamond: SCD) 製切削工具の刃先の丸み半径、ならびに加工メカニズムといった観点から加工精度に対する考察が行われ、成形できる粗さの限界は 10 nmRz 前後ではないかと考察されている (井川, 島田, 1986)。1990 年に改良型 SEM を使って刃先の丸み半径を測定した浅井らの研究によれば, SCD 製切削工具の刃先の丸み半径は 25~45 nm である (浅井他, 1990)。したがって, 1980 年代の半ばから 10 年くらいの間に行われた研究には, 刃先の丸み半径が 25~45 nm の SCD 製切削工具が使われたと考えられる。

1990 年代の半ば以降も超精密切削加工技術を確立するための研究は継続して行われており (池田他, 2009), 工作機械の位置決めや送り運動に対する制御分解能は現時点で 1 nm 以下に達している。また, 工作機械主軸の

No.21-00354 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00354]

^{*1} 正員, 福岡工業大学 工学部 (〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1)

^{*2} 住友電気工業 (株) アドバンスドマテリアル研究所 (〒664-0016 兵庫県伊丹市昆陽北 1-1-1)

E-mail of corresponding author: senba@fit.ac.jp

アキシャル方向やラジアル方向の振れは 3 nm 以下に達している。しかし、SCD 製の切削工具を使って非鉄金属を超精密切削した場合に生じる粒界段差や側方もり上りは解消されておらず、その結果として切削加工面の粗さを 10 nm Rz 以下に成形することや（安井他, 1996）、切りくずの切取り厚さ（井川他, 1993）を工作機械の制御分解能と同じ 1 nm 以下にすることに成功した例は見られない。

これら、切削加工面の粗さを 10 nm Rz に成形できない、加工面に粒界段差や側方もり上りが発生する、ならびに切りくずの切取り厚さを 1 nm 以下にできないといった問題点は、SCD 製の切削工具の刃先の丸み半径が 1 nm 以下に成形されていなかったことが主な原因ではないと思われる。その背景には、刃先の丸み半径を測定する手法が普及していなかったことが影響していると考えられる。一方で、分子動力学法を使って極微小切削時に排出される切りくずの形態を解析した島田の研究（島田, 1995）によれば、刃先の丸み半径を 2.5 nm 前後に成形できれば上記の問題点を解決できる可能性が示唆されている。

本研究では、ナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工（天本他, 2012）、電解加工、ならびに熱化学反応を利用した乾式ラッピング（仙波他, 2013）を行って成形したナノ多結晶ダイヤモンド（Nano-Poly Crystalline Diamond: NPD）製のノーズ R バイトに対し、酸素プラズマを使ったドライエッチングを行った。始めに、導電性がない NPD がドライエッチングされ、しかも刃先に生じていた欠けや丸みが除去されて刃先が鋭利化されるメカニズムを解明するための実験を行った。次に、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope: AFM）を用いて刃先の丸み半径を測定するための実験と、ドライエッチングを行い成形し得る刃先の丸み半径を明らかにするための実験を行った。

2. 供試材と実験装置

2・1 供試材

供試材には、ナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工、電解加工、ならびに熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行って成形した、NPD 製のノーズ R バイト（以下ノーズ R バイトと表現する）を使用した。ノーズ R の半径は 0.4 mm、すくい角は 0°、ならびに逃げ角は 10°である。図 1(a)に示しているのはレーザ加工後のノーズ R バイト、図 1(b)に示しているのはレーザ加工後のノーズ R バイトに対して電解加工を行い、熱変質層を除去したノーズ R バイトの電子顕微鏡 SEM 画像である。また、図 1(c)に示しているのは電解加工後のノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行い、すくい面や逃げ面を平坦に成形したノーズ R バイトである。ラップに使った焼結ダイヤモンド（Polycrystalline Diamond: PCD）製円板の面振れを 0.1 μm 以下に成形することが難しく、乾式ラッピング後の刃先には欠けが残っている（仙波, 2021）。

2・2 ドライエッチング装置

(a) LM (b) ECM (c) Dry lapping
Fig. 1 Rake and flank faces of single-point cutting tool made of NPD fabricated by laser machining (LM), electrochemical machining (ECM) and dry lapping.

Fig. 2 Schematic of dry etching apparatus using inductively coupled oxygen plasma.

図2に示しているのは、実験に使用した誘導結合型ドライエッチング装置(アルバックテクノ(株), SP-HC1FS)の模式図である。ターゲットはステンレス製で円板状の電極、アンテナは銅製でリング状の電極である。ノーズ R バイトは S45C 製のホルダに取付け、ホルダにマイナスのバイアス電圧を印加した。また、ホルダはステッピングモータに取付け 10 rpm で回転させた。ターゲットやアンテナの中央にノーズ R バイトの先端を位置合わせすると同時に、ターゲットからアンテナまでの高さは 35 mm, アンテナからノーズ R バイト先端までの高さは 15 mm に設定した。プラズマを発生させるためのエッチングガスには酸素を使用し、反応性イオンエッチング(Reactive ion etching: RIE)を行った。酸素を用いるとダイヤモンドの表面に生成された反応生成物がプラズマの衝突によって取り除かれ、化学的に不活性なアルゴンをを用いた場合に比べてエッチング速度が増加する(川上他, 2005)。チャンバ内を 0.2 Pa 以上の真空中に保ち電極に高周波 RF 電圧を印加すると、酸素分子は電子でたたかれプラズマが発生する。ホルダにマイナスのバイアス電圧を印加したので、プラスに電離したプラズマは静電力によってノーズ R バイトやホルダに向かって引き寄せられ、それらの表面に衝突する。アンテナはその近傍でプラズマを発生させるだけでなく、ターゲットの近傍で発生したプラズマを上方に引き上げる役割を果たしている(菅井, 1995)。

2・3 ホルダと供試材の形状

図3(a)に示しているのは、サイズが 26×35×1 mm の石英ガラス板をクランプするために使用した S45C 製のホルダである。ホルダからスパッタされ、ホルダの前方に飛散する鉄の分布を観察するために使用した。図3(b)に示しているのは、ノーズ R バイトをクランプするために使用した S45C 製のホルダである。端面が平面のホルダを用いると端面からスパッタされて NPD に付着する鉄の量が増加し、NPD の表面に凹凸が発生した(天本他, 2016)。この凹凸を避けるため、端面が球面のホルダを使用した。図3(c)に示しているのは、超硬合金製の基板にろう付けした NPD 製ノーズ R バイトの寸法である。

Fig. 3 Dimensions of holders used for clamping glass plate, cutting tool, and enlargement of single-point cutting tool.

Table 1 Specifications of AFM and cantilever.

Observation mode	Dynamic
Resolution	X,Y: 0.2 nm, Z: 0.01 nm
Displacement detection	Light source/Optical lever/Detector
Scanning size (X,Y,Z)	30 ×30 ×5 μm, 2.5×2.5×0.3 μm
Z-axis coarse adjustment	Fully automatic using stepping motor Max stroke: 10 mm
Number of pixels	1024×1024, 512×512
Image data analysis	AFM image and profile data pickup
File output	BID (Bitmap) and ASCII format
Cantilever	Dimensions: 160×40×3.7 μm, Shape: rectangular, Material: silicon
Tip	Shape: sharp tetrahedral, Length: 14 μm, Angle: front 0° and back 35°, Tip radius: 7 nm (typical), Material: silicon

Fig. 4 Overview of AFM and two optical microscopes used for measuring cutting edge radius of single-point cutting tool.

Fig.5 Schematic of aligning the cantilever tip on the edge and center of the front cutting edge using the coarse mode of AFM and two optical microscopes.

2・4 AFM と刃先の丸み半径の測定方法

ノーズ R バイト刃先の丸み半径の測定には、原子間力顕微鏡 AFM ((株)島津製作所, SPM-9500J3) を使用した。表 1 に示しているのは、AFM とカンチレバーの仕様である。X, Y 方向の測定分解能は 0.2 nm, Z 軸方向の測定分解能は 0.01 nm, ならびに最大の走査範囲は $30 \times 30 \times 5 \mu\text{m}$ である。カンチレバーと探針は単結晶シリコン製で探針の形状は三角錐、探針先端の丸み半径は 4~10 nm (オリンパス(株), OMCL-AC160TS) である。図 4 に示しているのは、AFM の外観である。ノーズ R バイトの前切れ刃の刃先の丸み半径を測定するため、倍率が 800 倍の光学顕微鏡を使って Y 軸と Z 軸の方向からノーズ R バイトの刃先とカンチレバーを観察した。

図 5 に示しているのは、前切れ刃の稜線の上にカンチレバーの探針を位置決めする方法を示した模式図である。図 5(a)や図 5(b)に示すように、ノーズ R バイトは Y 軸方向の光学顕微鏡ですくい面が観察できるように傾斜台上に接着剤で固定した。また、図 5(b)に示すように探針と刃先との間に約 $10 \mu\text{m}$ の隙間を空けた上で、図 5(c)に示すように探針が前切れ刃の稜線の上に位置するように粗動モードを使ってカンチレバーの位置を調節した。ここで、図 5(c)に破線で示したように切れ刃の稜線が Y 軸と平行になるようにノーズ R バイトを傾斜台上に設置すると、粗動モードを使って位置決めをする時に探針の背面と刃先とが接触して探針が欠損した。そこで、刃先の稜線が X 軸と平行になるようにノーズ R バイトを設置した上で、探針を Y 軸方向に走査させて刃先の断面形状を測定した。なお、刃先の断面形状の測定はダイナミックモードで行い、すくい面と逃げ面を同じ視野で観察できるようにカンチレバーの位置を Y 軸方向に微調整した。

3. 酸素プラズマを使った NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング

3・1 ドライエッチングの条件

表 2(a)に示しているのは石英ガラス板に対するドライエッチングの条件、表 2(b)に示しているのは電解加工後のノーズ R バイトに対するドライエッチングの条件、ならびに表 2(c)に示しているのは乾式ラッピング後のノーズ R バイトに対するドライエッチングの条件である。石英ガラス板に対するドライエッチングは、ホルダの前方に飛散する鉄の分布を観察するために行った。電解加工後のノーズ R バイトに対するドライエッチングは、ホルダの直径 d , 曲率半径 R , ならびにホルダ端面からのノーズ R バイトの突出し長さ L といったドライエッチングの条件を見出すために行った。乾式ラッピング後のノーズ R バイトに対するドライエッチングは、成形し得る刃先の丸み半径を明らかにするために行った。

3・2 ドライエッチングのメカニズム

石英ガラス板と乾式ラッピング後のノーズ R バイトに対し、表 2(a)に示した条件でドライエッチングを行った。図 6(a)に示しているのは酸素プラズマの発光状態、図 6(b)に示しているのはホルダからスパッタされ石英ガラス板に付着した鉄の分布、ならびに図 6(c)に示しているのは微分干渉顕微鏡で観察したノーズ R バイトのすくい面である。図 6(b)に示した画像で石英ガラス板の右端が白く抜けている箇所は、ホルダにクランプされていた部分である。石英ガラス板に付着しているのは鉄の酸化皮膜で絶縁体である。図 6 の上段に示した真空度が 0.6 Pa の

Table 2 Dry etching conditions.

Dry etching conditions	(a) Glass plate	(b) Wet-etched tool	(c) Dry-lapped tool
Vacuum (Pa)	0.2, 0.6	0.3	0.3
Target power (W)	10	20	20
Antenna power (W)	60	60	120
Bias voltage (V)	1,000	1,000	1,000
Gas flow rate (sccm)	10	10	10
Etching time (h)	1	10	varied
Holder diameter (mm)	14	10–30 (14)	14
Revolution speed (rpm)	10	10	10
Curvature radius (mm)	10	6–39 (10)	10
Tool extension (mm)	6	10 (3–10)	6

Fig.7 X-ray diffraction patterns obtained from standard graphite, dry-lapped and dry-etched NPD rake faces measured by EPMA.

(a) Luminescence (b) Adhered iron (c) Rake face
Fig. 6 Luminescence of oxygen plasma, adhered oxidized iron patterns on glass plate and dry-etched rake face.

(a) $R\ 6, d\ 10\ \text{mm}$ (b) $R\ 10, d\ 14\ \text{mm}$ (c) $R\ 39, d\ 30\ \text{mm}$
Fig.8 Side cutting edges observed when dry etching was conducted by varying curvature radius R and diameter d of tool holder ($L\ 10\ \text{mm}$).

(a) $L\ 3\ \text{mm}$ (b) $L\ 6\ \text{mm}$ (c) $L\ 10\ \text{mm}$
Fig. 9 Side cutting edges observed when dry etching was conducted by varying overhang of tool L from end face of holder ($R\ 10\ \text{mm}, d\ 14\ \text{mm}$).

場合、図 6(c)に示したようにノーズ R パイトのすくい面に凹凸が発生した。端面からスパッタされてすくい面に付着する鉄の量が増加し、鉄の酸化皮膜がマスクの役割を果たしたことが原因である。これに対し、図 6 の下段に示した真空度が $0.2\ \text{Pa}$ の場合にはすくい面に凹凸はなく、しかも微分干渉顕微鏡の倍率を上げて観察すると刃先に生じていた欠けのサイズは減少し、NPD はドライエッチングされていた。

真空度が $0.2\ \text{Pa}$ の場合に NPD がドライエッチングされた理由として、高温のプラズマ（菅原他，1998）が NPD に衝突し表面の極近傍にグラファイトが生成された可能性が考えられた。そこで、電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer：EPMA）を使ってすくい面の元素を分析した。図 7 に示しているのは、グラファイトの標準試験片、乾式ラッピング後、ならびにドライエッチング後のすくい面に対して行った定性分析の結果である。ドライエッチング後のすくい面から測定されたピーク波長はグラファイト側にシフトしており、すくい面の極近傍ではダイヤモンド構造がグラファイト構造に変化していることが判明した。NPD の表面にグラファイトが生成されると、ホルダと NPD とは導通しているのでプラスに帯電したプラズマはグラファイトに衝突し、グラファイトだけでなく NPD もまたドライエッチングされることになる。真空度が $0.2\ \text{Pa}$ の場合には、このような現象が生じたために導電性がない NPD がドライエッチングされたと考えられる。

3・3 ホルダの形状とノーズ R パイトの突出し長さ

電解加工後のノーズ R パイトに対し、表 2(b)に示した条件でドライエッチングを行った。図 8 に示しているのは、ホルダの直径 d や曲率半径 R を変化させた場合に得られたドライエッチングの結果である。工具の突出し長

さ L は 10 mm に固定した。図 8(c)に示したように、ホルダの直径 d が 30 mm で曲率半径 R が 39 mm の場合にはすくい面に凹凸が発生した。これは、他のホルダに比べてホルダの前方に飛散する鉄の量が多く、鉄の酸化皮膜がマスクの役割を果たしたためである。図 9 に示しているのは、直径 d が 10 mm、曲率半径 R が 6 mm のホルダを使用し、ホルダ端面からのノーズ R バイトの突出し長さ L を変化させた場合の結果である。図 9(a)に示したように L が 3 mm の場合には、すくい面に付着した鉄の酸化皮膜がマスクの役割を果たしたと考えられる突起が生じていた。図 8 や図 9 のように得られた実験の結果を踏まえ、ホルダの直径 d は 10 mm、曲率半径 R は 6 mm、ホルダ端面から工具の突出し長さ L は 10 mm に決定した。

3・4 NPD 製ノーズ R バイトの刃先の欠けや丸みが除去されるメカニズム

図 10(a)に示しているのはレーザ加工後、図 10(b)に示しているのは電解加工後、ならびに図 10(c)に示しているのは図 10(b)に示したノーズ R バイトを 10 時間ドライエッチングした前切れ刃の AFM 画像である。ドライエッチングの条件は表 2(b)に示したとおりである。図 10 に附記した Δp はサンプリングの間隔である。このように、電解加工後のノーズ R バイトをドライエッチングすると、すくい面や逃げ面が平坦化されるだけでなく刃先の丸みが除去された。図 11(a)と図 11(b)に示しているのは乾式ラッピング後の前切れ刃の AFM 画像、図 11(c)に示しているのは図 11(a)に示したノーズ R バイトを 3 時間ドライエッチングした前切れ刃の AFM 画像である。ドライエッチングの条件は表 2(c)に示したとおりである。このように、乾式ラッピング後のノーズ R バイトをドライエッチングすると刃先に生じていた欠けが除去された。ここで、図 11(a)や図 11(b)に示した AFM 画像で欠けの度合いが異なっているのは、乾式ラッピングに使ったラップの面振れが同じでなかったのが原因である。

図 12 に示しているのは、刃先に生じていた丸みや欠けが除去されるメカニズムについて考察した模式図である。すくい面や逃げ面が元の面に対して法線方向にエッチングされると、刃先に生じていた丸みや欠けが除去される可能性があると考えられた。そこで、この可能性を証明するための実験を行った。図 13(a)に示しているのは、すくい面や逃げ面にレーザ成形した標点である。すくい面の場合、工具の中心軸から $\pm 60^\circ$ の範囲に 20° 刻みで、1 辺の

Fig. 10 AFM views of front cutting edge formed by laser machining, laser plus electrochemical machining (ECM) and dry etching for 10 h (cantilever with mean tip radius of 7 nm was employed).

Fig. 11 AFM views of front cutting edges formed by dry lapping and dry etching for 3 h (cantilever with mean tip radius of 7 nm was employed).

(a) Roundness (b) Chipping
Fig. 12 Schematic of both rake and flank faces dry-etched orthogonal to original faces and diminished roundness and chipping on cutting edge.

(a) Reference points (b) Measuring process
Fig. 13 Laser-fabricated triangular reference points and measuring process of removal depth of rake and flank faces by overlapping two SEM images observed before and after dry etching.

(a) Views from flank face (b) Views from rake face
Fig. 14 Two overlapped SEM views observed after dry etching was conducted for 1 h and 2 h, shown in lower line, and for 3 h and 4 h, shown in upper line.

長さが 12 μm の三角形の頂点に直径が 7 μm のスポットを成形した。逃げ面の場合には、工具の中心軸上にある一箇所に標点を成形した。図 13(b)の上段に示しているのは、逃げ面の除去量 Δf を測定する要領を示した模式図である。ドライエッチングを行う前後にすくい面側から観察した 2 枚の SEM 画像の標点を重ねて透過編集し、逃げ面の刃直角方向の除去量 Δf を測定した。図 13(b)の下段に示しているのは、すくい面の除去量 Δr を測定する要領を示した模式図である。

以上のように標点を成形した乾式ラッピング後のノーズ R バイトを、1 時間刻みで 5 時間ドライエッチングした。ドライエッチングの条件は表 2(c)に示したとおりである。図 14(a)に示しているのは逃げ面側から撮影した SEM 画像であり、図 14(a)の下段に示しているのはドライエッチングを 1 時間行った後と 2 時間行った後で撮影した 2 枚の SEM 画像、図 14(a)の上段に示しているのはドライエッチングを 3 時間行った後と 4 時間行った後で撮影した 2 枚の SEM 画像である。また、図 14(b)に示しているのはすくい面側から撮影した SEM 画像であり、図 13(a)に示した θ が 0° と $\pm 60^\circ$ の 3 箇所で撮影した SEM 画像である。図 14(a)と同様にドライエッチングを 1 時間行った後と 2 時間行った後で撮影した 2 枚の SEM 画像を図 14(b)の下段、ドライエッチングを 3 時間行った後と 4 時間行った後で撮影した 2 枚の SEM 画像を図 14(b)の上段に示している。このように、2 枚の SEM 画像を透過編集することによってすくい面の除去量 Δr や逃げ面の除去量 Δf を測定した。

図 15 に示しているのは、図 14 のように得られた実験の結果から求めたエッチング時間とすくい面や逃げ面の

Fig.15 Relationship between etching time and removal depth of rake and flank faces.

Fig. 16 Simulated result of geometrical relationship between actual and measured wedge profiles obtained by AFM (actual edge radius r : 3 nm, tip radius of cantilever r_p : 4 nm, measuring interval Δp : 1 nm).

除去量との関係である。ノーズ R が $400\ \mu\text{m}$ であるのに対して工具の中心軸から $\pm 60^\circ$ の範囲で生じていた逃げ面の除去量の差は多くても $1\ \mu\text{m}$ であり、ノーズ R の輪郭の誤差は 0.25% 以下であった。つまり、逃げ面は元の輪郭に対して法線方向にドライエッチングされたことが明らかになった。すくい面については工具中心軸上でしか測定していないが、逃げ面と同様に元の面に対して法線方向にドライエッチングされたと考えられる。図 15 に附記したように測定結果を直線で近似して除去速度を求めると、すくい面の除去速度は $0.95\ \mu\text{m/h}$ 、逃げ面の除去速度は $2.04\ \mu\text{m/h}$ になる。

したがって、ノーズ R バイトに対して 3 時間ドライエッチングするとすくい面の除去量は $2.9\ \mu\text{m}$ 、逃げ面の除去量は $6.1\ \mu\text{m}$ になる。前述したように、図 11(a) に示した乾式ラッピング後のノーズ R バイトを 3 時間ドライエッチングしたのが図 11(c) に示した刃先であり、図 11(a) に示したように刃先に生じていた欠けのサイズは $1\ \mu\text{m}$ 以下である。したがって、すくい面や逃げ面の除去量が欠けのサイズを超えていたために欠けが除去されたと考えられる。図 10(b) に示した刃先の丸みが除去された理由についても同様である。ここで、図 15 に示したように、除去量はエッチング時間に比例して増加する。このように、除去量が刃先の丸み半径や欠けのサイズを超えるまで継続してドライエッチングすると、NPD 製ノーズ R バイトの刃先に生じていた丸みや欠けは除去される。

4. 成形し得る刃先の丸み半径

4・1 探針先端の丸み半径と刃先の丸み半径

図 16 に示しているのは、探針先端の形状を球と仮定して行った解析の結果である。探針先端の丸み半径 r_p が $4\ \text{nm}$ のカンチレバーを使用し、先端の丸み半径 r が $3\ \text{nm}$ で頂角が 80° のくさびを AFM で測定した場合に得られる断面曲線を表している。サンプリングの間隔に相当する解析の刻み幅 Δp は $1\ \text{nm}$ に設定した。図 16 に○印で示したように、AFM ではくさびの断面形状に対して r_p だけ外側にオフセットした形状を測定する。したがって、AFM で測定されるくさび先端の丸み半径 r_m は

$$r_m = r_p + r \quad (1)$$

と表される。本研究で使った r_p は $4\sim 10\ \text{nm}$ の範囲でばらついているが、 r_p にばらつきがなければ

$$r = r_m - r_p \quad (2)$$

と求められる。式(1)において、 r が 0 の場合には r_m は r_p と一致する。本研究では、この性質を利用して探針先端の丸み半径 r_p を測定した後、式(2)を使ってノーズ R バイトの刃先の丸み半径 r を測定した。

4・2 エッチング時間とくさび角

図 17 に示しているのは、乾式ラッピング後のノーズ R バイトを 5 時間ドライエッチングした前切れ刃の AFM 画像と断面曲線である。図 11 に示した結果と同様に、サンプリングの間隔 Δp を 6 nm に設定した場合の結果である。断面曲線を観察すると、刃先端からの半径 R が 100 nm 以下と 100 nm 以上の範囲とではくさび角 θ_w が違っている印象があった。そこで、刃先からの半径 R が $25 < R < 100$ nm と $100 < R < 500$ nm の 2 つの範囲で θ_w を測定した。図 17 に○印で示した測定点を直線で最小二乗近似し、直線の傾きを角度に換算して θ_w を求めた。ここで、 $25 < R < 100$ nm の範囲で測定したくさび角を θ_{in} 、 $100 < R < 500$ nm の範囲で測定したくさび角を θ_{out} と表現した。

図 18 に示しているのは、エッチング時間とくさび角との関係である。AFM 画像の 10 箇所から断面曲線を抜き出し、くさび角の平均値とばらつきを測定した。7 時間エッチングする間に θ_{in} は 80.0° から 73.8° 、 θ_{out} は 81.2° から 79.0° に減少していた。このように、ノーズ R バイトのくさび角はエッチング時間が増すにしたがって減少し、乾式ラッピング後に $\theta_{in} < \theta_{out}$ であったくさび角はエッチング時間が増すに従ってその差が拡大した。このように、くさび角が減少する度合いは $R < 100$ nm の範囲で大きく、エッチング時間が増すにしたがって刃先はとがってくる。

4・3 エッチング時間と刃先の丸み半径

図 19 に示しているのは、図 17 に示した前切れ刃と同じ場所に対し、サンプリングの間隔 Δp を 6 nm から 0.5

Fig. 17 AFM view and profile curve obtained when dry etching was conducted on dry-lapped tool for 5 h.

Fig.18 Relationship between etching time and wedge angles θ_{in} and θ_{out} .

Fig. 19 AFM view and profile curve when the same place as shown in Fig. 17 was measured by varying measuring pitch from 6 to 0.5 nm.

Fig.20 Relationship between etching time, measured cutting edge radius and cutting edge radius.

nm に変えて測定した AFM 画像と断面曲線である。図 17 に示した測定結果と異なり、サンプリングの間隔 Δp を 0.5 nm に減らすと刃先の円弧部に 10 個以上の測定点があり、点列を円弧で補間すれば刃先の丸み半径 r_m を測定することができた。ここで、点列を円弧で補間して r_m を求める計算は 0.1 nm の精度で行ったので、 r_m には ± 0.1 nm の誤差が含まれている。

図 20 に示しているのは、図 17 に示したのと同じ供試材に対して測定したエッチング時間と r_m との関係である。AFM 画像の 10 箇所から抜き出した断面曲線を解析し、 r_m の平均値とばらつきを求めた。図 20 に○印で示したのは r_m の平均値、縦線で示したのはばらつきの標準偏差 1σ である。エッチング時間が増すにしたがって r_m の平均値は減少し、エッチング時間が 6 時間を超えると図 20 に破線で示した 4.9 nm に収束した。この結果は、式 (1) で述べたようにエッチング時間が 6 時間を超えると $r_m \approx r_p$ になったことを意味する。そこで、図 20 に○印で示した r_m の平均値から r_p に相当する 4.9 nm を引くと、刃先の丸み半径 r の平均値は△印のように求められる。図 20 に附記した r_s は、乾式ラッピング後の刃先の丸み半径である。

4・4 探針先端の丸み半径を測定するために試作した標準試料

乾式ラッピング後のノーズ R バイトを長時間ドライエッチングすると、図 20 に△印で示したように r の平均値は 0 に漸近する。また、 r のばらつきも減少する。この現象を利用し、探針先端の丸み半径 r_p を測定するための標準試料を作製した。図 21 に示しているのは、乾式ラッピング後に測定した r_m が 13.2 ± 0.6 nm であったノーズ R バイトを、6 時間ドライエッチングした場合に得られた AFM 画像と断面曲線である。測定された r_m は 4.1 ± 0 nm、図 20 に示した方法で r_m が収束した値から求めた r_p は 4.0 nm であった。このように、 r_m の平均値が収束するまでドライエッチングを行い、収束時に r_m が測定精度の範囲内でばらついていなかったノーズ R バイトを選択し、探針先端の丸み半径 r_p を測るための標準試料として使用した。 r_p を測定した後、式(2)を使って図 20 に附記した乾式ラッピング後の刃先の丸み半径 r_s やドライエッチングを行った刃先の丸み半径 r を求めた。

4・5 成形し得る刃先の丸み半径

図 22 に○印で示しているのは、乾式ラッピング後の刃先の丸み半径 r_s の平均値が 48.8 nm であった NPD 製ノーズ R バイトを 13 時間ドライエッチングした場合に得られた、エッチング時間と r の平均値との関係である。探針先端の丸み半径 r_p が 4.1 nm のカンチレバーを使って測定した結果であり、図 22 に実線で示しているのは測定点を多項式で近似した結果である。ドライエッチングを行い成形し得る刃先の丸み半径を明らかにするために行った複数の実験結果を一つのグラフにまとめて整理するため、図 22 に実線で示した近似曲線に乗るように、図 20 に△印で示した実験の結果を灰色で塗りつぶした△印のように時間軸の方向へ移動した。

図 23 に示しているのは、乾式ラッピング後の刃先の丸み半径 r_s の平均値が 5.3~9.8 nm であった 4 種類のノーズ R バイトをドライエッチングした場合に得られた、エッチング時間と r の平均値との関係である。探針先端の

Fig. 21 AFM view and profile curve of standard tool fabricated to calibrate probe tip radius of cantilever (cutting edge radius was 0.1 nm and variation in cutting edge radius was less than 0.1 nm).

Fig.22 Shift of measured relationship between etching time and cutting edge radius to time axis.

Fig. 23 Relationship between etching time and cutting edge radius obtained from four test specimens where initial cutting edge radius was varied.

Fig. 24 Relationship between etching time and standard deviation representing variations in cutting edge radius measured from four test specimens where initial cutting edge radius was varied.

Fig. 25 Commercially available tools made of single-crystalline diamond for precision cutting (PC), ultraprecision cutting (UPC) and dry-etched NPD tool shown in Fig. 17.

丸み半径 r_p は図 23 に付記したとおりである。また、図 23 に実線で示したのは図 22 に実線で示した近似曲線であり、4 種類の各工具ともこの実線に乗るように測定値を時間軸の方向にシフトした。このように、刃先の丸み半径 r の平均値はドライエッチングを継続して行くと 0 に漸近する。ただし、図 20 に細線で示したように同じ AFM 画像の中でも場所を変えて測定した r にはばらつきがある。

図 24 に示しているのは、 r_s が異なる 4 本のノーズ R バイトをドライエッチングした場合に得られた、エッチング時間とばらつきの標準偏差 1σ との関係である。刃先の丸み半径が収束した領域でのばらつきは 0.5 nm 以下であり、エッチング時間が増すに従ってばらつきもまた 0 に漸近する傾向が見られる。したがって、AFM で測定できる刃先の形状を円弧で補間して求めた刃先の丸み半径 r_m の測定精度、図 23 に示した刃先の丸み半径 r 、ならびに図 24 に示した r のばらつき等を合わせて判断すると、ドライエッチングを行い成形し得る刃先の丸み半径は 0.5 nm 以下であると考えられる。

5. 市販の単結晶ダイヤモンド製切削工具との比較

図 25 に示しているのは、市販の SDC 製ノーズ R バイトの刃先と、図 19 に示した NPD 製ノーズ R バイトの刃先の比較である。図 25(a)に示しているのは精密切削加工 (Precision cutting: PC) 用のノーズ R バイト (アライドマテリアル(株), PC CM-RT0.4) , 図 25(b)に示しているのは超精密切削加工 (Ultraprecision cutting: UPC) 用のノ

ーズ R バイト (アライドマテリアル(株), UPC CM-RT0.4) である. 各場合とも, 探針先端の丸み半径 r_p は図 21 に示した標準試料を用いて測定した. PC 用の刃先の丸み半径 r が 50.3 ± 6.6 nm, UPC 用の r が 8.7 ± 1.9 nm であるのに対し, 乾式ラッピング後にドライエッチングした r は 0.4 ± 0.5 nm である. ここで, 平均値からばらつきの標準偏差を引いた r の値が負になってしまったのは, 測定点を円弧で補間し r_m を求める計算の精度が不足していたことが原因である. このように, 酸素プラズマを用いたドライエッチングはダイヤモンド製切削工具の刃先を鋭利化する手段として有効である. なお, 図 25(a) に示した AFM 画像は 2017 年に購入したノーズ R バイトの前切れ刃, 図 25(b) に示した AFM 画像は 2020 年に購入したノーズ R バイトの前切れ刃である.

6. 結 言

本研究では, ナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工, 電解加工, ならびに熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行って成形した NPD 製ノーズ R バイトに対し, 酸素プラズマを用いたドライエッチングを行った. まず始めに, 導電性がない NPD がドライエッチングされ, しかも刃先に生じていた欠けや丸みが除去されて刃先が鋭利化されるメカニズムを解明するための実験を行った. 次に, ドライエッチングを行い成形し得る刃先の丸み半径を明らかにするための実験を行った. 得られた研究の成果は以下のようにまとめられる.

(1) 酸素プラズマを使って NPD をドライエッチングすると, 表面の極近傍に導電性を持つグラファイトが生成される. NPD 製ノーズ R バイトをクランプした S45C 製のホルダにマイナスの電圧を印加すると, 静電力によってプラスに電離した酸素プラズマがグラファイトに衝突するために, グラファイトだけでなく導電性のない NPD も同時にドライエッチングされる.

(2) NPD 製ノーズ R バイトのすくい面や逃げ面は元の面に対して法線方向にドライエッチングされ, 除去量はエッチング時間に比例して増加する. したがって, 除去量が刃先の丸み半径や欠けのサイズを超えるまで継続してドライエッチングすると刃先に生じていた丸みや欠けは除去される.

(3) 探針先端の形状が球であれば, 刃先の丸み半径が同じ値に収束するまで NPD 製ノーズ R バイトをドライエッチングすると AFM で測定される刃先の丸み半径は探針先端の丸み半径と一致する. この現象を利用し, 探針先端の丸み半径を測定するための標準試料を試作した. 探針先端の丸み半径を測定できれば, 刃先の丸み半径は測定される刃先の丸み半径から探針先端の丸み半径を引けば求められる.

(4) NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃の刃先の丸み半径や丸み半径のばらつきは, エッチング時間が増すに従って 0 に漸近する. この実験事実と, AFM で測定できる刃先の形状を円弧で補間して求めた刃先の丸み半径の測定精度を合わせて判断すると, ドライエッチングを行い成形し得る刃先の丸み半径は 0.5 nm 以下であると考えられる.

謝 辞

本研究は, 2016~2020 年の 5 年間, 公益社団法人三井金型振興財団から助成を受けて行ったことを記し, 関係各位に深謝する. また, 本研究は福岡工業大学大学院修士課程に在籍していた, 姚雲校君と母里壮大君が行った基礎研究の成果に支えられている. 両名の努力に敬服する.

文 献

- 天本祥文, 姚 雲校, 仙波卓弥, 角谷均, レーザ成形したナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対する切れ刃鋭利化のためのドライエッチング, ABTEC 講演論文集, A13(2016), pp. 37-38.
- 天本祥文, 吉田昌史, 仙波卓弥, 角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するレーザ成形技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 794(2012), pp. 253-263.
- 浅井昭一, 田口佳男, 堀尾健一郎, 河西 敏雄, 小林 昭, 改良走査電子顕微鏡 (SEM) による単結晶ダイヤモンド工具の切れ刃稜丸み半径の測定と解析, 精密工学会誌, Vol. 56, No. 7(1990), pp. 145-150.
- 井川直哉, 島田尚一, 超精密切削加工の精度限界, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 12(1986), pp. 6-10.
- 井川直哉, 島田尚一, R. R. Donaldson, C. K. Syn, J. S. Taylor, 大森義市, 田中宏明, 吉永博俊, 極微小切削における切りくずの形態と最小切り取り厚さ, 精密工学会誌, Vol. 59, No. 4(1993), pp. 141-147.
- 池田雄一郎, 森田昇, 山田茂, 高野登, 大山達雄, 堀功, 微小切込みにおける 2 次元切削現象に関する研究 (切込

- み量に対する刃先丸みの影響), 砥粒加工学会誌, Vol. 53, No. 9(2009), pp. 30-35.
- 川上信之, 横田嘉宏, 林和志, ダイヤモンド薄膜の微細加工技術, 神戸製鋼技法, Vol. 55, No. 1(2005), pp. 6-10.
- 仙波卓弥, 理想的加工法の具現化 (原子の結合を切断できるNPD製ノーズRバイトの開発), 公益社団法人三井金
型振興財団特別研究最終報告書, https://www.mitsui-zaidan.or.jp/2018report_no3.pdf, (2021), pp. 1-34.
- 仙波卓弥, 天本 祥文, 藤山 博一, 橋本 親弥, 角谷 均, 熱化学反応を利用したナノ多結晶ダイヤモンドに対する
乾式研削, 日本機械学会論文集C編, Vol. 79, No. 807(2013), pp. 512-522.
- 島田尚一, 極微小切削機構の分子動力学解析, 日本機械学会論文集C編, Vol. 62, No. 597(1995), pp. 1-6.
- 菅井秀郎, 誘導結合型プラズマ(ICP)によるエッチング, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 71, No. 8(1995), pp. 704-
710.
- 菅原智明, 田谷嘉浩, 下野功, RFスパッタ成膜中の基板温度の解析, 北海道立工業技術センター研究報告, No.
5(1998), pp. 47-50.
- 安井平司, 遠藤貴徳, 近藤純久, 黒田龍一, 超精密切削加工における仕上げ面粗さの実験的解析- 無酸素銅の場
合-, 日本機械学会講演論文集, 九州支部熊本地方講演会, No. 968-2(1996), pp. 193-194.

References

- Amamoto, Y., Yao, Y., Semba, T. and Sumiya, H., Dry Etching Techniques to Sharpen Cutting Edge of Laser preformed Radius
Cutting Tool Made of Nano-Polycrystalline Diamond, Proceedings of the 2016 Abrasive Technology Conference,
A13(2016-8), pp. 37-38(in Japanese).
- Amamoto, Y., Yoshida, M., Semba, T. and Sumiya, H., Laser-forming technique of single-point cutting tool made of nano-
polycrystalline diamond, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 78, No. 794(2012), pp.
253-263(in Japanese).
- Asai, S., Taguchi, Y., Horio, K., Kasai, T. and Kobayashi, A., Measuring and Analysis on Cutting Edge Radius of Single Point
Diamond Tools using Newly developed Scanning Electron Microscope (SEM), Journal of the Japan Society for precision
Engineering, Vol. 56, No. 7(1990), pp. 145-150(in Japanese).
- Ikawa, N. and Shimada, S., Accuracy limits for ultra-precision cutting, T Journal of the Japan Society for precision Engineering,
Vol. 52, No. 12(1986), pp. 6-10(in Japanese).
- Ikawa, N., Shimada, S., Donaldson, R. R., Syn, C.K. and Taylor, J. S., Chip morphology and minimum thickness of cut in
micromachining, Journal of the Japan Society for precision Engineering, Vol. 59, No. 4(1993), pp. 141-147(in Japanese).
- Ikeda, Y., Morita, N., Yamada, S., Takano, N., Oyama, T. and Hori, I., Study on microscale orthogonal cutting phenomena
(Effects of sharpness of cutting edge on undeformed chip thickness in microscale orthogonal cutting), Journal of the Japan
Society for Abrasive Technology, Vol. 53, No. 9(2009), pp. 30-35(in Japanese).
- Kawakami, N., Yokota, Y. and Hayashi, K., Microfabrication of diamond thin films, Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 55,
No. 1(2005), pp. 6-10(in Japanese).
- Semba, T., Realization of idealistic machining (Fabrication of single-point cutting tool adaptable for separating atomic bond),
Mitsui public Interest Incorporated Foundation for the advancement of tool and Die Technology, final report, (2021), pp.
1-34(in Japanese).
- Semba, T., Amamoto, Y., Fujiyama, H., Hashimoto, S. and Sumiya, H., Dry Grinding of Nano-Polycrystalline Diamond Using
Thermochemical Reaction, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 79, No. 807(2013),
pp. 512-522(in Japanese).
- Shimada, S., Molecular dynamic approach to microcutting mechanism, Transactions of the Japan Society of Mechanical
Engineers, Series C, Vol. 62, No. 597(1995), pp. 1-6(in Japanese).
- Sugai, H., Dry etching by inductive coupled plasma, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 71, No. 8(1995), pp. 704-710.
- Sugawara, T., Taya, Y. and Shimono, I., Analysis of substrate temperature with RF Sputtering, Annual report of Hokkaido
industrial technology center, No. 5(1998), pp. 47-50(in Japanese).
- Yasui, H., Endou, T., Kondou, S. and Kuroda, R., Experimental analysis of the Surface roughness by Ultraprecision turning,
Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers, Kyushu Branch Kumamoto Lecture Meeting, No. 968-2(1996),
pp. 193-194(in Japanese).