

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05738

研究課題名(和文) 原子の結合を切断できるナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の開発

研究課題名(英文) Single point cutting tool made of nano-polycrystalline diamond adaptable for removing chips in an atomic level

研究代表者

仙波 卓弥 (Senba, Takuya)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：30154678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：アルミや銅合金の超精密切削に使われている単結晶ダイヤモンド製切削工具の刃先の丸み半径は10 nm前後であり、側方バリが生じることが原因で理論どおりの加工面粗さは得られない。また、切削加工に費やされるエネルギーの約95%は切りくずを排出することに使われている。本研究では、ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製ノーズRバイトの刃先の丸み半径を、アルミや銅合金の原子半径と同じ、0.1 nmに成形するための研究を行った。レーザ加工後のNPD製ノーズRバイトに対して乾式ラッピングと酸素プラズマを用いたドライエッチングを行うことにより、刃先の丸み半径を研究目標のとおり0.1 nmに成形することができた。

研究成果の概要(英文)：A cutting edge radius of a commercial single point cutting tool made of the single crystalline diamond is about 10 nm, while a resolution of the ultra precision machine tool is less than 1 nm. This means that a surface roughness presumed by the theoretical estimation can not be obtained in the ultra precision cutting whereby the feed rate is less than 0.5 mm/min. In addition, over 95% of the energy used for the cutting operation is consumed to a plastic deformation at the shear plane in the process to remove chips from the work material.

A research project to sharpen cutting edge of a laser preformed single point cutting tool made of nano-polycrystalline diamond was conducted by means of dry lapping and dry etching using oxygen plasma. The rake and the clearance faces were dry etched to the normal direction against to the original faces so that not only nano size chippings diminished and cutting edge radius with a size of 0.1 nm could be fabricated.

研究分野：超精密微細加工学

 キーワード：ナノマイクロ機械加工 ナノ多結晶ダイヤモンド レーザ加工 反応性イオンエッチング 乾式ラッピング
 ノーズRバイト 刃先丸み半径

1. 研究開始当初の背景

(1) 1990年代の初めにドイツでマイクロ機械加工という加工概念が提案されて以降、同概念を具現化できる工作機械や工具の開発が行われてきた。その結果、工作機械の制御分解能は現時点で 1 nm に達しているが、単結晶ダイヤモンド製切削工具の刃先の丸み半径は 50 nm 前後にとどまっている。

(2) したがって、送り速度が 0.5 mm/min 以下の超精密切削加工時においては側方バリが生じることが原因で理論粗さどおりの加工面は作れない。また、切削加工に費やされるエネルギーの約 95 % は、本来は無駄ともいえる被削材をせん断変形させ切りくずを排出することに使われている。

2. 研究の目的

(1) 図 1 に示すように、切削加工に費やされるエネルギーはせん断面でのせん断変形エネルギーや、すくい面と逃げ面での摩擦エネルギーに費やされる。これらエネルギーの中でも、切りくずを排出させるために使われる剪断変形エネルギー E_s は、

$$E_s = s \cdot s \cdot b \cdot h \cdot V \quad \dots (1)$$

と求められる。ここで、 s はせん断応力、 s はせん断ひずみ、 b は紙面に垂直な方向の切りくずの幅、 h は切削速度、ならびに V は切削速度である。

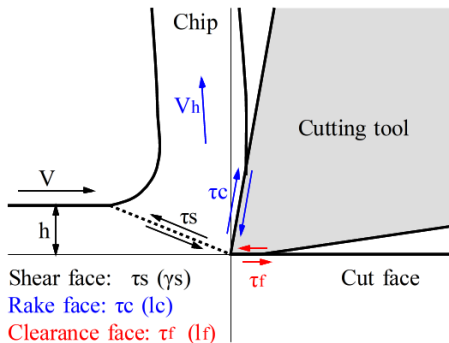


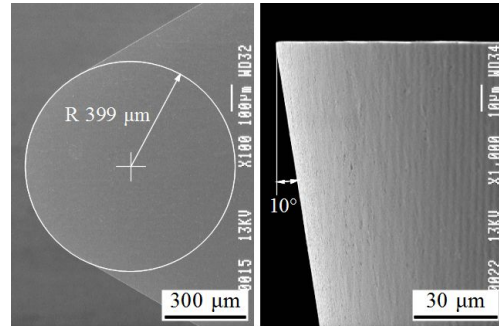
図 1 切削加工に費やされるエネルギー

(2) 本研究の目的は、乾式ラッピングを行い切れ刃の丸み半径を 1 nm 前後の値に成形したナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製のノーズRバイトに対して酸素プラズマを用いたドライエッチングを行い、刃先の丸み半径を被削材の原子半径と同じ 0.1 nm に成形することである。この切れ刃鋭利化成形技術を開発できれば、式(1)の E_s を 0 に近づけることができるだけでなく、加工面の粗さを 1 nm R_y 以下に成形できる可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 図 2 に示しているのは、ナノ秒パルスレーザーを用いて成形した、すくい角が 0 度、刃直角逃げ角が 10 度、ならびにノーズ R が 0.4 mm の NPD 製ノーズ R バイトの電子顕微鏡(SEM)画像である。図 3 に示しているのは、

レーザー加工後に電解加工を行い、グラファイト層を除去した後に観察した前切れ刃の原子間力顕微鏡(AFM)画像である。本研究では、レーザー加工と電解加工を行い、図 2 や図 3 に示したように予備成形した NPD 製ノーズ R バイトに対し、熱化学反応を利用した乾式ラッピングと酸素プラズマを用いたドライエッチングを行った。



(a) すくい面 (b) 横逃げ面
 図 2 ナノ秒パルスレーザーを用いて成形した NPD 製ノーズ R の外観

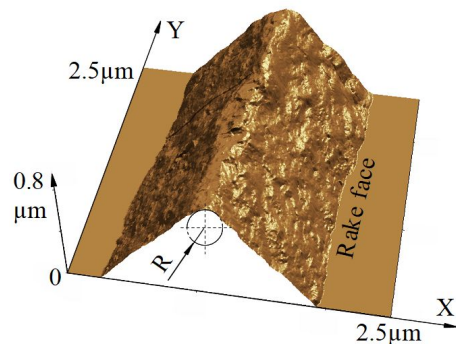
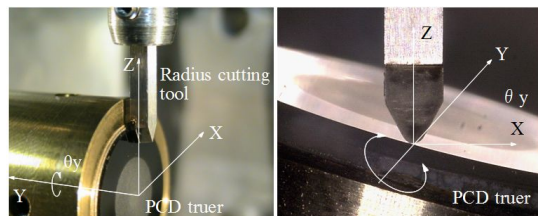


図 3 レーザ加工と電解加工の後に観察した前切れ刃の AFM 画像(刃先の丸み半径 R: 53 ~ 223 nm)

(2) 図 4 に示しているのは、熱化学反応を利用した乾式ラッピングに使用した装置の外観である。ラップ板には、主としてダイヤモンドの一次粒子径が 1 μm で焼結助剤としてコバルト Co を用いている、直径が 15 mm の焼結ダイヤモンド(PCD)製円板を使用した。遷移金属である Co が NPD を構成するダイヤモンドから電子を奪い、NPD の擦過面には共有結合の強度が低下した脆弱層が生成される。この脆弱層がラップ板の表面に露出して



(a) すくい面 (b) 逃げ面
 図 4 熱化学反応を利用した乾式ラッピングに使用した装置の外観

いるダイヤモンドの粒子によって擦過され除去される、といった現象が生じるために NPD を乾式ラッピングすることができる。ここで、ラップ板の自転運動と公転運動には、それぞれタービン駆動方式のエアスピンドルと NC 円テーブルを使用した。

(3) 図 5 に示しているのは、酸素プラズマを用いたドライエッチングに使用した励起誘導形ドライエッチング装置の模式図である。真空中に排気したチャンバ内に酸素ガスを入れ、ターゲットやアンテナと呼ばれている電極に高周波電圧を印加すると酸素ガスが電子でたたかれ、酸素プラズマが発生する。

(4) NPD 製ノーズ R バイトを把持した S45C のホルダにマイナスのバイアス電圧を印加するとホルダからスパッタされた鉄の粒子が NPD 製ノーズ R バイトに付着し、バイトに導電性を付与する。その結果、プラスに帯電した酸素プラズマがマイナスに帯電したバイトに衝突するために、本来は導電性のない NPD がドライエッチングされる。

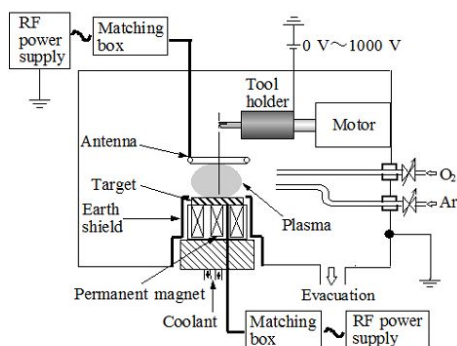


図 5 励起誘導形ドライエッチング装置の模式図

4. 研究成果

(1) 平成 27 年 4 月に作成した「交付申請書 今後の研究の推進方策」に記載したとおり、平成 27 年度にはレーザー成形した NPD 製ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行い、刃先の丸み半径を 5 nm 以下に成形するための研究を実施した。刃先の丸み半径を 1 nm 前後の値に成形することはできたが、刃先に生じるサイズが 100 nm 以下のチップングを防ぐことができなかった。

(2) そこで、平成 28 年度にはチップングを防止するための研究を行った。乾式ラッピングの方式を圧力切込み方式から強制切込み方式に変更した。また、ラップ板を自転運動させるために使用していたモータを DC サーボモータから、アキシャル方向に非同期振動が無いタービン駆動方式のエアスピンドルに代え乾式ラッピングを行った。この場合、ラップ板の面振れを 0.1 ~ 0.3 μm の範囲で変化させ、乾式ラッピングを行った。

(3) 図 6 に示しているのは、ラップ板の面振れと ×10000 の SEM 画像から読取った、サイズが 100 nm 以上のチップングの数との関係である。図 6 のように得られた実験の結果より、刃先に生じるチップングを防ぐためにはラップ板の面振れを無くする必要があることが明らかになった。

(4) この刃先に生じるチップングは、研究を進める過程で酸素プラズマを用いたドライエッチングを行うと完全に除去できることが明らかになった。そこで、乾式ラッピングを行いラップ板の面振れを無くすることについては次の研究課題として残すことにした。図 7 に示しているのは、乾式ラッピングを行い成形することができた、NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃の AFM 画像である。

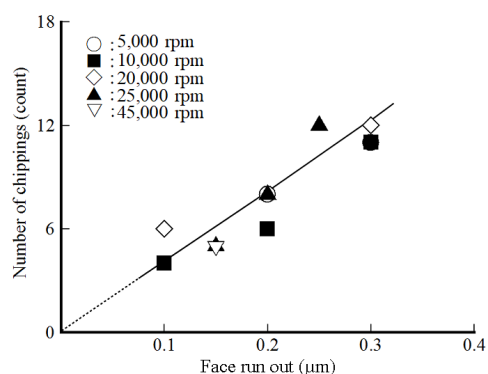


図 6 ラップ板の面振れと ×10000 の SEM 画像から読取ったサイズが 100 nm 以上のチップングの数

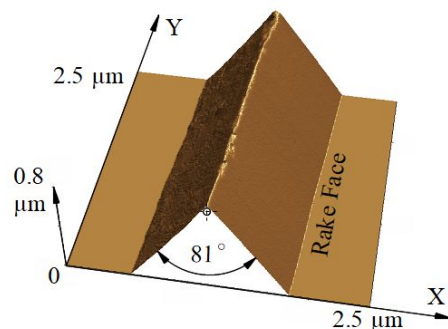
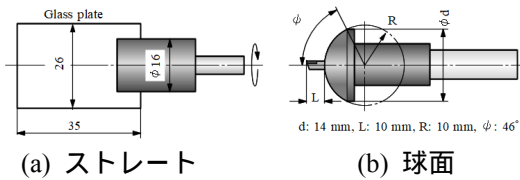


図 7 乾式ラッピング後に観察した前切れ刃の AFM 画像(刃先の丸み半径 R: 0.1 ~ 5 nm)

(5) NPD 製ノーズ R バイトに対する乾式ラッピング技術を開発することの他に、平成 27 年度には、導電性のない NPD がドライエッチングされるメカニズムを解明するための実験を行った。また、プラズマの種類を変え、図 3 に示した電解加工後の NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行った。メカニズムを解明するための実験には、図 8(a)に示すように S45C 製の工具ホルダに石英ガラスを取付け、ガラスに付着した Fe の



(a) ストレート (b) 球面
 図 8 ドライエッチングに使用したホルダ

分布を観察した。また、NPD 製ノーズ R バイトのドライエッチングには、図 8(b)に示す端面が球状のホルダにバイトを取付けた。

(6) 図 9 に示しているのは、バイアス電圧とアンテナ出力を変えドライエッチングを行った場合に観察された、ガラスに付着した鉄粒子の分布である。プラズマにはアルゴンを使用した。ガラスに付着しているのはホルダからスパッタアウトした鉄の粒子であり、この鉄の粒子はアンテナ出力やバイアス電圧を上げると除去されている。この結果は、ガラスに付着した鉄の粒子がガラスに導電性を付与し、ガラスに衝突したアルゴンプラズマによって鉄の粒子がエッチングされたことを意味する。

(7) この現象を利用し、図 3 に示した電解後の NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行った。図 10 に示しているのは、

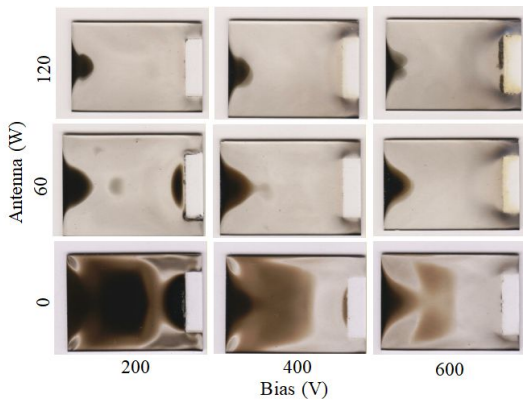


図 9 ホルダからスパッタアウトしてガラス基板に付着した鉄粒子の分布

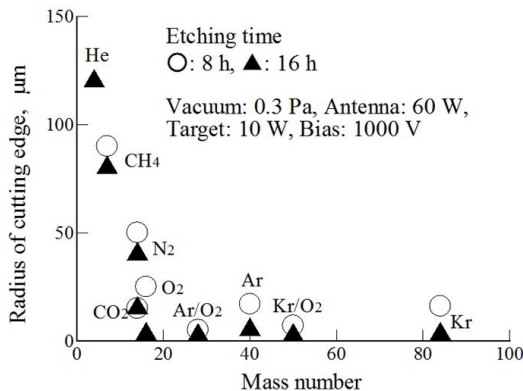
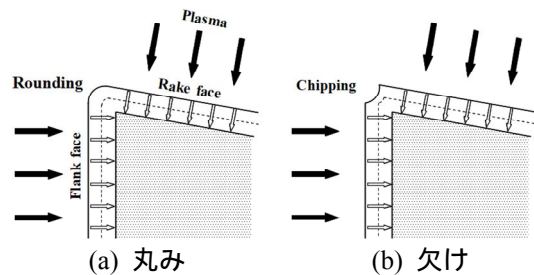


図 10 ガスの質量数と前切れ刃に関する刃先の丸み半径

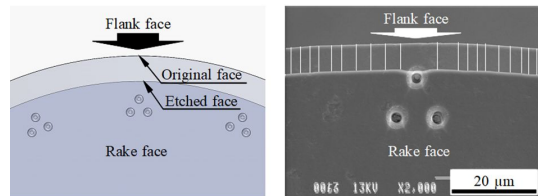
ドライエッチングに使用したガスの質量数と AFM を用いて測定した刃先の丸み半径との関係である。ガスの種類を変化させた各場合とも、合計で 16 時間ドライエッチングを行い、8 時間毎に刃先の丸み半径を測定した。このように、ガスの質量数が増すに従って刃先の丸み半径は鋭利化されることが明らかになった。

(8) 平成 27 年度には、レーザ加工と電解加工を行い図 3 のように成形した NPD 製ノーズ R バイトの他に、乾式ラッピングを行い図 7 のように成形した NPD 製ノーズ R バイトについても酸素プラズマを用いてドライエッチングを行った。その結果、2 時間程度のドライエッチングを行うと、刃先に生じていた欠けが除去されるだけでなく、刃先の丸み半径が 0.1 nm に成形されていることを偶然に発見した。そこで、平成 28 年度と平成 29 年度には、刃先の欠けが無くなるだけでなく、刃先が鋭利化された原因を解明するための実験を行った。また、ドライエッチングで成形し得る刃先丸み半径の限界を明らかにするための研究を行った。

(9) 刃先の欠けが無くなり鋭利化された原因として、図 11 に示すようにプラズマがすくい面や逃げ面に垂直に衝突し、これらの面が元の面に対して平行にドライエッチングされた可能性が考えられた。そこで、たとえば逃げ面の後退量を測定する場合には、図 12 に示すようにすくい面に位置合わせのための目印をレーザで成形し、ドライエッチングの前後で撮影した 2 枚の SEM 画像を重ね合わせることで後退量を測定した。すくい面の後退量についても、同様に測定した。



(a) 丸み (b) 欠け
 図 11 刃先の欠けが無くなり鋭利化されるメカニズム



(a) CAD イメージ (b) SEM 画像
 図 12 すくい面側から逃げ面の後退量を測定しているようす

(10) 実験を行う前に予想したとおり、逃げ面

については図 12(b)に示したように、すくい面や逃げ面は元の面に対して平行にドライエッチングされていることが確かめられた。また、合計 5 時間ドライエッチングを行い 1 時間毎にすくい面や逃げ面の後退量を測定すると、図 13 に示す実験の結果を得ることができた。すくい面に比べ逃げ面の後退量は 2 倍程度大きくなっているのは、NPD 製ノーズ R バイトに衝突するプラズマの流れに指向性があったことが原因であると考えている。

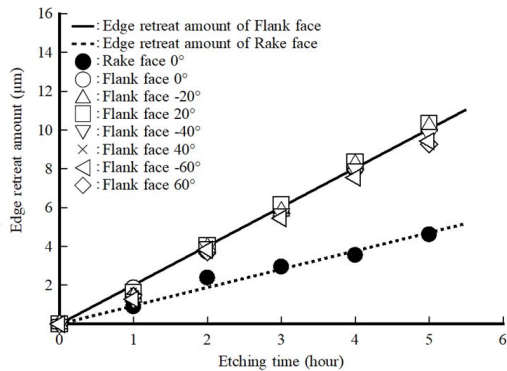


図 13 酸素プラズマを用いたエッチング時間と元の面に対するすくい面や逃げ面の後退量

(11) 何れにしても、プラズマがすくい面や逃げ面に垂直に衝突し、これらの面が元の面に対して平行にドライエッチングされたため、刃先の欠けが除去されるだけでなく刃先の丸みが鋭利化されることが明らかになった。そこで、平成 29 年度には乾式ラッピングした NPD 製ノーズ R バイトに対して酸素プラズマを用いてドライエッチングを行い、成形し得る刃先丸み半径の限界を明らかにするための実験を行った。

(12) 図 14 に示しているのは、合計して 5 時間ドライエッチングを行い、1 時間毎に AFM を用いて刃先の丸み半径を測定した結果である。乾式ラッピング後の刃先の丸み半径が 1.72 ± 1.54 nm であったのに対し、5 時間ドラ

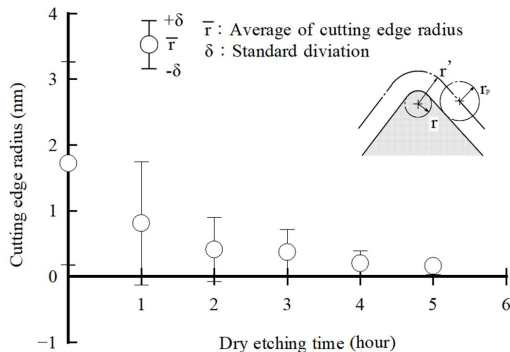


図 14 酸素プラズマを用いたドライエッチング時間と NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃に関する刃先の丸み半径

イエッチングを行うと 0.16 ± 0.13 nm に減少することが明らかになった。つまり、刃先の丸み半径だけで無く、丸み半径のばらつきもまた減少することが明らかになった。

(13) 図 15 に示しているのは、ドライエッチングを 5 時間行った後に観察した刃先の AFM 画像である。熱変質層が付着した刃先の丸み半径が $1.5 \sim 2.1$ μm、電解加工後の刃先の丸み半径が $53 \sim 223$ nm、ならびに熱化学反応を利用した乾式ラッピング後の刃先の丸み半径が $0.1 \sim 5$ nm であったのに対し、乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対して酸素プラズマを用いたドライエッチングを行うと、 $0.03 \sim 0.29$ nm に成形することができた。この値は、「2. 研究の目的(2)」の項目に既述した目標値を満たしており、研究目標を達成できたと考えている。

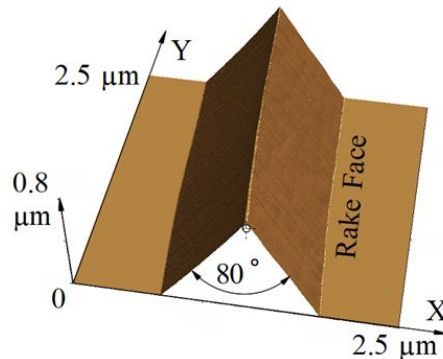


図 15 ドライエッチングを 5 時間行った後に観察した前切れ刃の AFM 画像 (刃先の丸み半径 R : 0.16 ± 0.13 nm)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均, ナノ秒パルスレーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対する走査線加工技術, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.83, No.851, 2017, 16-00573.

DOI: 10.1299/transjsme.16-00573

天本祥文, 仙波卓弥, NPD 製マイクロボールエンドミルに対するレーザ/プラズマ複合加工技術, 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報, 査読無, Vol. 34, 2017, pp. 31-34.

〔学会発表〕(計 17 件)

母里壮大, 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均, NPD 製ノーズ R バイトと成形し得る刃先の丸み半径, 精密工学会九州支部熊本地方講演会, 2017 年 12 月 2 日, 熊本大学.

母里壮大, 天本祥文, 仙波卓弥, 角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するライエッチング, ABTEC2017, 2017 年 8 月 30 日, 福岡工業大学.

天本祥文, 母里壮大, 花田智洋, 仙波卓弥, 角谷均, NPD 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,
精密工学会九州支部北九州地方講演
会, 2016年12月10日, 北九州工業高等専
門学校.

〔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.fit.ac.jp/~senba/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

仙波卓弥 (SENBA Takuya)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：30154678

(2)研究分担者

天本祥文 (AMAMOTO Yoshifumi)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00505670

藤山博一 (FUJIYAMA Hirokazu)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：50148912