

理想的加工法の具現化

- 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 -

研究報告者 仙波卓弥

プロフィール



生年月日	昭和30年3月20日
最終学歴	昭和57年6月 同志社大学大学院 工学研究科 機械工学専攻博士課程後期 単位取得退学
専門分野	超精密・微細加工学
学位	工学博士
所属団体	福岡工業大学 工学部知能機械工学科
役職名	教授

今後の抱負

真に「ナノ・マイクロ機械加工」と呼べる加工技術を作るためには、工具に切削抵抗が作用しない「理想的加工法」を開発する必要がある。平成27年度には、この理想的加工を具現化するための研究を行った。乾式ラッピングを行い成形したナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズRバイトに対して酸素プラズマを用いたドライエッチングを行った。その結果、刃先に生じていた欠けが消えるだけでなく、刃先の丸み半径を1 nm以下に成形できることが明らかになった。平成28年度には、これらの現象の発生メカニズムを解明すると同時に、刃先の丸み半径を原子の結合半径と同じ1 Åに成形するための研究に挑戦する。

1. はじめに

平成24年1月から平成26年8月までの間、貴財団から研究助成を受け「超合金製・マイクロレンズアレイ金型に対する研磨レス製造技術の開発」という課題での研究を実施した。研究実施内容は表1に示すとおりである。硬さが2600 Hvの超合金に対して直径が0.1 mm以下で粗さが30 nm Rz以下のマイクロレンズアレイ金型を成形できる、ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製切削工具⁽¹⁾や、焼結ダイヤモンド(PCD)製研削工具⁽²⁾を開発するための研究を行った。この研究を進める過程で、レーザ成形したNPD製ノーズRバイトに対しアルゴンや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、図1に示すように導電性がないNPDがドライエッチングされるだけでなく、切れ刃が鋭利に成形されるといった予想もしない実験結果が得られた。

「切削加工論」⁽³⁾の中で、中山一雄先生は「切削加工の目的は不要な部分を除去して新表面を作ることであり、不要部分を変形させて切りくずを作ったり、これを工具すくい面と摩擦させたりすることは本来の目的以外の仕事である。もしもこのような余計な仕事は全くせずに、本当に必要

表1 超合金製マイクロレンズアレイ金型を作るための工具開発

ナノ多結晶 ダイヤモンド (NPD)	NPDに対する自由曲面のレーザ成形技術	NPD製マイ クロ切削工具	超合金製マ イクロレンズア レイ金型の試作 (直径0.1 mm以 下, 粗さ30 nm (λ/10) Rz 以下)
	熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術		
	切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術		
焼結ダイヤ モンド (PCD)	PCDに対する自由曲面のレーザ成形技術	PCD製マイク ロ研削工具	
	砥石作用面平坦化加工に使用するCVD製円板の成形技術		
	砥石作用面平坦化加工技術		
	砥粒表面へのナノスパイクの成形技術		
	ドレッシングのための電解加工技術		

CVD: 化学気相合成法(Cheical Vapour Deposition)で作られた多結晶ダイヤモンド

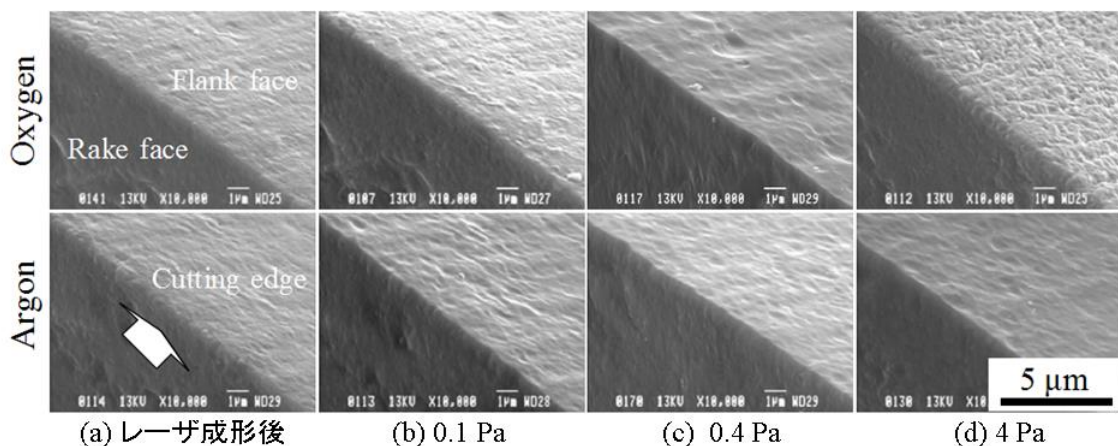


図1 レーザ成形後のNPD製ノーズRバイトに対し、真空度とプラズマの種類を変えドライエッチングを行った後に観察した刃先の様子

な最小限の仕事だけをする加工法があれば理想的加工法と呼べる」と表現されている。この理想的加工法を実現するためには、切削工具の刃先の丸み半径を原子レベルと同じサイズに鋭利化する必要があると考え、平成 20 年度からレーザ成形した NPD 製ノーズ R バイトに対して熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行い、切れ刃を鋭利化するための研究を行っていた^{(4), (5)}。

図 1 に示した実験の結果に出会って以降、乾式ラッピングを行った NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行うことに研究の方向を転換し、平成 26 年 9 月以降メカニズムを解明するための基礎研究を行っていた。幸運なことに平成 27 年 9 月に貴財団から特別研究助成を受け、理想的加工法を具現化するための研究を実施する機会に恵まれた。表 2 に示しているのは、平成 27 年 9 月から平成 32 年 8 月までの研究期間内に実施することを計画した研究内容である。

①と②は、熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術を開発するための研究である。なかでも①は、NPD 製ノーズ R バイトを乾式ラッピングする PCD 製ツルアを試作するための研究である。焼結助剤として使用されているコバルト Co を窒化硼素 BN や炭化硼素 B₄C で置換するだけでなく、ツルアの表面を 30 nm Rz 前後の粗さに成形することを研究目標に掲げた。②は熱化学反応を用いた乾式ラッピング技術を開発するための研究である。レーザ成形後の 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 1 nm 以下に成形すると同時に欠けのない刃先を成形できる加工技術を開発することを研究目標に掲げた。

④と⑤は、乾式ラッピング後の NPD に対するドライエッチング技術を開発するための研究である。中でも④は導電性のない NPD が図 1 に示したようにドライエッチングされたメカニズムを解明するための研究である。⑤は乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行うための研究であり、刃先の丸み半径を原子半径と同じ 0.1 nm に成形することを研究目標に掲げた。

表 2 平成 27 年 9 月から平成 32 年 8 月までの研究期間内に実施する研究内容

ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD)	NPD に対する自由曲面のレーザ成形技術	③ NPD 製マイクロ切削工具	⑥ 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削試験 ⑦ 超合金製マイクロレンズアレイン型の試作 (直径 0.1 mm 以下, 粗さ 30 nm (Rz /10) 以下)
	熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術 ① Co を BN や B ₄ C で置換した PCD 製ツルアの成形 ② 乾式ラッピング技術の開発		
焼結ダイヤモンド (PCD)	切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術 ④ エッチングのメカニズムの解明 ⑤ NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチ	PCD 製マイクロ研削工具	
	PCD に対する自由曲面のレーザ成形技術		
	砥石作用面平坦化加工に使用する CVD 製円板の成形技術		
	砥石作用面平坦化加工技術		
	砥粒表面へのナノスパイクの成形技術 ドレッシングのための電解加工技術		

表3 研究課題とタイムスケジュール

研究課題	研究実施項目	H27	H28	H29	H30	H31
1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発	① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作	→	→			
	② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発	→				
	③ NPD製ノーズRバイトの成形	→	→	→		
2. 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術の開発	④ ドライエッチングのメカニズムの解明	→	→			
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング	→	→	→	→	
3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験	⑥ レンズ用プラスチックに対する超精密精密切削				→	→
	⑦ 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作	→	→	→	→	→

→ : H27年研究計画立案時, → : H27年度研究実施内容

⑥と⑦は、切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験である。⑥は、光学部品用の素材として使われているプラスチックに対して切込み深さを10 nm以下の値に設定して切削実験を行い、切りくずが排出されることとバリが生じないことを検証するための実験である。⑦では試作したNPD製マイクロボールエンドミルを用いて硬さが2600 Hvの超合金に対して切削加工を行い、マイクロレンズアレイ金型を試作することを計画した。

表3に示しているのは、表2に示した研究課題と研究実施時期との関係である。表3に①～⑦で示した研究課題は表2の課題と一致している。表3に黒色で示した矢印は平成27年7月に研究計画を立案したときに考えていたタイムスケジュール、赤色で示した矢印は研究を開始した後に変更したタイムスケジュールである。技術的に難しいと思われる課題には早い時期に着手しておくのが無難かと考え、平成27年度には①～⑤と⑦の研究課題を実施した。本報告書では、平成27年度に行った研究の成果と、平成28年度の研究目標について報告する。

2. 研究の成果

2・1 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術

① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作

図2に示しているのは、平成20年度から継続して行っているNPD製ノーズRバイトのすくい面と逃げ面に対する乾式ラッピングの要領である。ツールには放電加工、湿式ラッピング、乾式ラッピング、電解加工、高周波スパッタ、ならびに余分に付着した皮膜を除去するための湿式ラッピングと乾式ラッピングを行い、Coを遷移金属や高比熱材料で置換したPCD製円板を用いていた。図3に示しているのは、試作したPCD製円板を用いてNPD製ノーズRバイトのすくい面に対して乾式ラッピングを行った場合に得られた、遷移金属や高比熱材料の比熱とすくい面の粗さとの関係である。このように、CoをBNやB₄Cで置換したPCD製円板を用いるとすくい面を1 nm Rz以下の粗さに成形することができていた⁽⁶⁾。

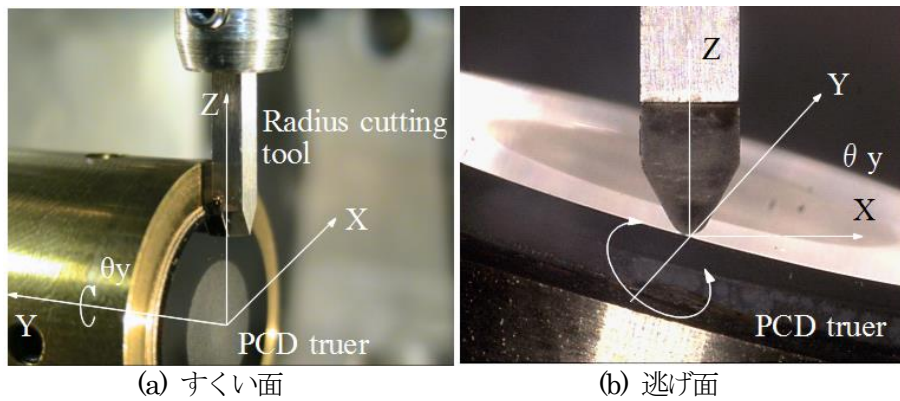


図2 NPD製ノーズRバイトに対する乾式ラッピングの要領

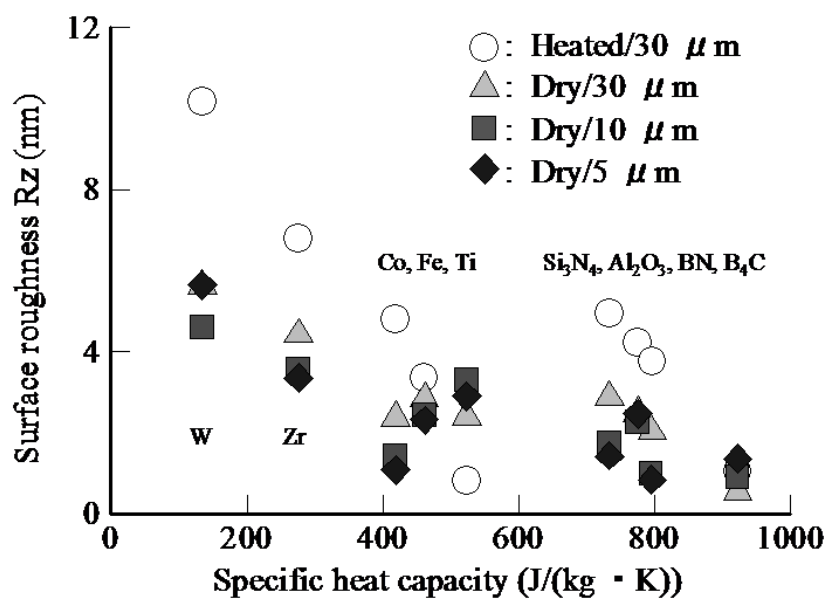


図3 Coを置換した遷移金属や高比熱材料の比熱とすくい面の粗さ

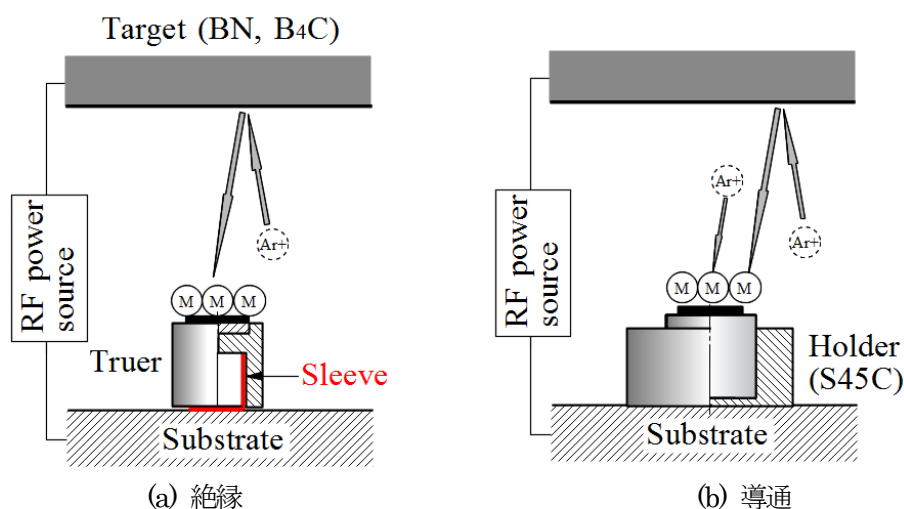


図4 高周波スパッタ時のPCD製ツルアと基板との導通状態

平成26年度からすくい面と逃げ面に対して乾式ラッピングを行い、切れ刃を鋭利化するための研究に着手した。その結果、平成26年度以前には正常にBNやB₄Cを成膜できていたにもかかわらず、厚さが均一でないという問題点や皮膜の付着強さが弱いといった問題が突然発生した。熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行うためにはこれらの問題点を克服する必要があると考え、平成27年度にはCoをBNやB₄Cで置換したPCD製円板を成形するための研究を行った。

先に紹介したとおり、CoをBNやB₄Cで置換するための高周波スパッタは、放電加工、湿式・乾式ラッピング、ならびに電解加工後のPCD製円板に対して行った。放電加工時にPCD製ツルアとそれを回転運動させるDCサーボモータを絶縁するため、PCD製ツルアの内部には耐熱樹脂製のスリーブを組み込むことにした。皮膜が異常成長したPCD製ツルアを観察すると、図4(a)に示すようにツルアの底部からこの耐熱樹脂がはみ出しており、PCD製ツルアと基板とが導通していないことが明らかになった。

この場合、アルゴンプラズマAr⁺に叩かれてターゲットからスパッタアウトしたターゲットの粒子は確かにPCD製円板の表面に堆積するが皮膜の表面に降り積もるのみであり、付着強度や結合強度が弱い皮膜が成膜されてもおかしくはないと考えられた。そこで、図4(b)に示すようにPCD製ツルアをS45C製のホルダに装着し、PCD製ツルアと基板とを電氣的に導通させることを試みた。その結果、厚さが均一で付着強さが強い皮膜を成膜することができた。

この場合、基板には高周波電圧が印加されており極性が正負に入れ替わるため、PCD製円板の表面に堆積したターゲットの粒子にはアルゴンプラズマが衝突する。したがって、地面に降り積もった粉雪を踏み固めると雪が地面にくっつくだけでなく雪が固められるのと似た現象が発生し、厚さが均一で付着強さが強い皮膜を成膜することができたのではないかと考えている。このように、表3に示した①の研究については、平成27年度に問題点を克服できた。

② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発

「2・1①」でも述べたとおり，平成 26 年度からすくい面と逃げ面に対して乾式ラッピングを行い，NPD 製ノーズ R バイトの切れ刃を鋭利化するための研究に着手した．図 5(a)に示しているのは，その当時に使っていた装置の模式図である．PCD 製ツルアを DC サーボモータの軸に固定し，強制切込み方式での乾式ラッピングを行っていた．図 2 に示した要領で逃げ面に対する乾式ラッピングを行うと，加工時に排出される切りくずが逃げ面と PCD 製ツルアとの接触点に巻き込まれ，逃げ面があれるといった現象が生じていた．

切りくずによって逃げ面があれるといった現象を回避するためには，切りくずのサイズを小さくすると同時に切りくずの量を減らす必要があると考えられた．そこで，PCD 製ツルアのモータ軸への取付け方法を図 5(b)のように変更し，圧力切込み方式での乾式ラッピングを行うことを試みた．PCD 製円板を取付けた T 字形の治具の内部に圧縮バネを組み込み，PCD 製円板と逃げ面とを弾性接触させることにした．T 字形の治具はピンでツルアに仮止めすることにし，Z 軸方向の可動範囲は 0.1 mm にした．また，T 字形の治具とツルアには半径方向に 20 μm の隙間を空けることにした．

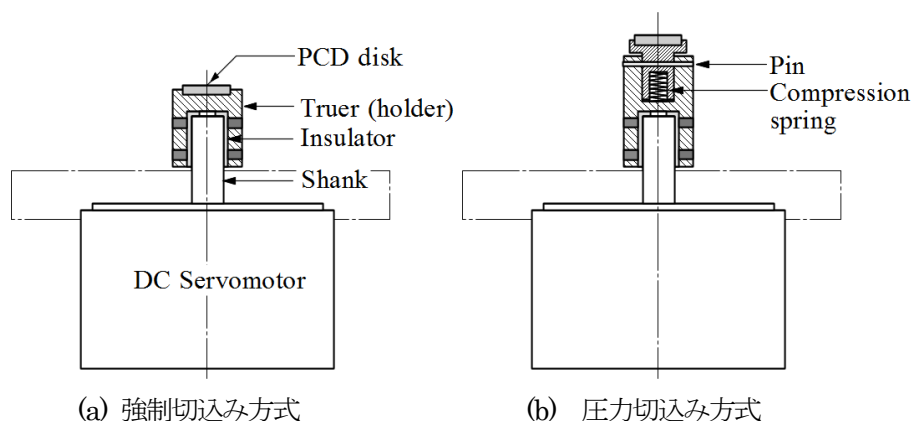
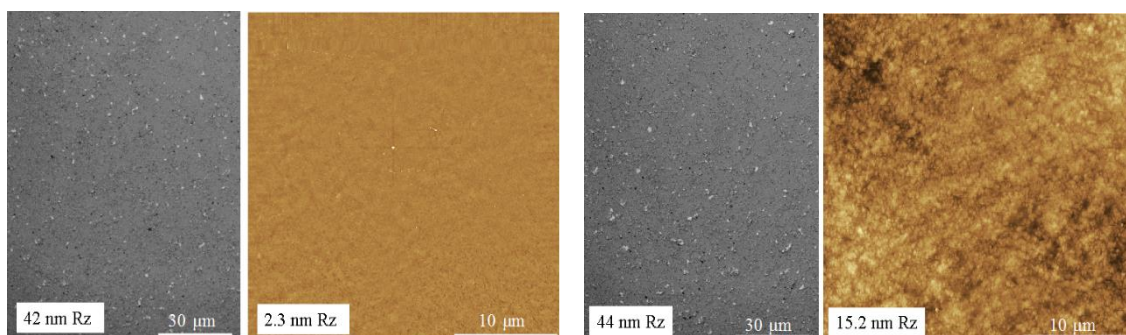


図 5 PCD 製ツルアの DC サーボモータへの取付け方法



(a) PCD 作用面 (b) 逃げ面の AFM 画像

図 6 強制切込み方式の乾式ラッピングを行った場合に得られた逃げ面のようす

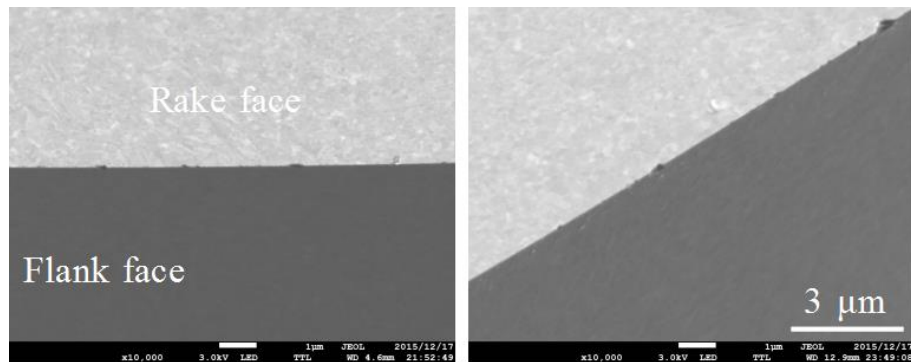
(a) PCD 作用面 (b) 逃げ面の AFM 画像

図 7 圧力切込み方式の乾式ラッピングを行った場合に得られた逃げ面のようす

図 6 に示しているのは強制切込み方式で逃げ面を乾式ラッピングした場合に得られた加工面のようす、図 7 に示しているのは圧力切込み方式で逃げ面を乾式ラッピングした場合に得られた加工面のようすである。ツルアには Co を焼結助剤として用いている、市販の PCD 製円板 PCD(Co) を使用した。圧力切込み方式での乾式ラッピングを行うと、T 字形の治具とツルアとの間に設けた隙間が原因で PCD 製円板に面ぶれが発生し PCD 製円板によって逃げ面が叩かれるため、切りくずが大量に発生した。また、切りくずが逃げ面と PCD 製ツルアとの接触点に巻き込まれ、逃げ面はあれてしまった。

③ NPD 製ノーズ R バイトの成形

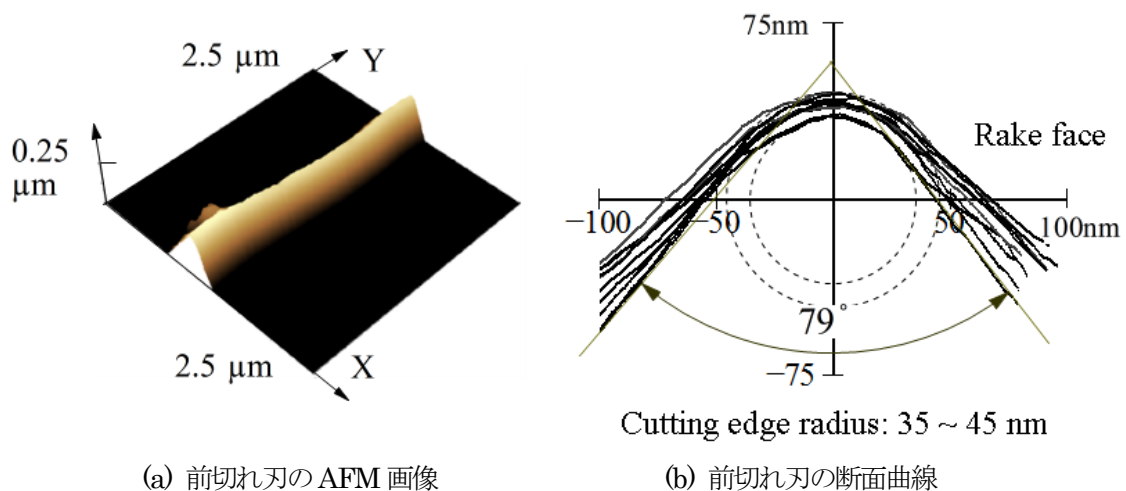
切りくずのサイズや量を減らすために図 5 (b) に示した方法で圧力切込み方式での乾式ラッピングを行ったが、結果は大失敗であった。そこで、乾式ラッピングの方法を図 5 (a) に示した強制切込み方式に戻し、レーザ成形後の NPD ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行った。図 8 に示しているのは電界放出型の電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いて観察した前切れ刃と横切れ刃の画像、



(a) 前切れ刃

(b) 横切れ刃

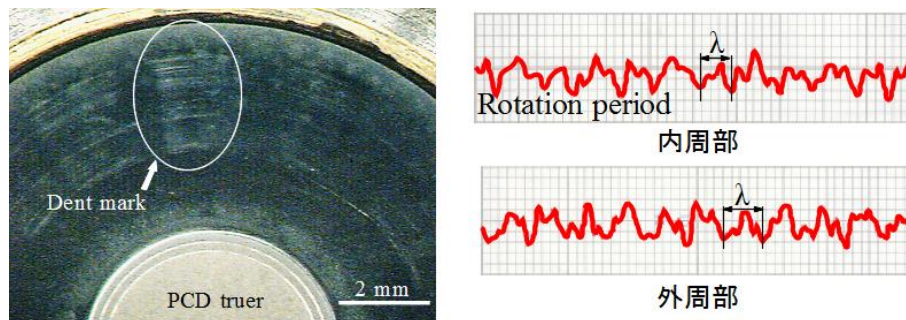
図 8 ツルアに PCD(BN) を使用. FE-SEM を用いて観察した乾式ラッピング後の切れ刃のようす



(a) 前切れ刃の AFM 画像

(b) 前切れ刃の断面曲線

図 9 プローブ半径が 7 nm の探針を使用. 図 8 に示した前切れ刃に関する AFM 画像と断面曲線



(a) 乾式ラッピング後のツルア表面 (b) ツルアの面振れ(PV 0.3 μm)

図 10 PCD 製ツルアの表面に残っていた擦過痕とツルアの面振れ

図 9 に示しているのは原子間力顕微鏡(AFM)を用いて観察した前切れ刃の画像と断面曲線である。ツルアに Co を BN で置換した PCD 製円板 PCD(BN)を用いて乾式ラッピングを行った場合に得られた刃先である。

PCD(BN)だけでなく、PCD(Co)や PCD(B4C)を用いた場合についても同様の乾式ラッピングを行ったが、刃先に欠けが生じてしまった。また、刃先の丸み半径を研究目標である 1 nm 以下に成形することができなかった。図 10 に示しているのは、平成 28 年 3 月に偶然発見することができた PCD 製ツルアの表面に残っていた擦過痕と、その原因になったと考えているツルアの面振れである。ツルアの表面に放射状の擦過痕が残っていることに疑問を感じ、電気マイクロメータを使って面振れを測定した。その結果、図 10(b)に示したように面振れに周期性はあるが振幅が回転毎に異なっていることが明らかになった。つまり、面振れがツルアの回転に同期していないことを発見した。NPD 製ノーズ R バイトの刃先に生じた欠けは、この回転に同期しないツルアの面ぶれが原因で生じたのではないかと考えている。

2・2 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術のまとめ

「熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術」を開発することを目標に掲げて行った研究の成果は、以下のようにまとめられる。

① 乾式ラッピング用 PCD 製円板の試作

本研究を開始した当初、電解加工を行った PCD 製円板に対して Co を BN や B4C で置換するための高周波スパッタを行うと、スパッタされた皮膜の厚さが均一でないという問題点や皮膜の付着強さが弱いといった問題が生じていた。これは PCD 製ツルアと電極とが電氣的に絶縁されていたことが原因であり、両者を導通させることによって問題点を克服することができた。

② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発

本研究を開始した当初、逃げ面に対して乾式ラッピングを行うと加工時に排出される切りくずが逃げ面と PCD 製ツルアとの接触点に巻き込まれ、切りくずによって逃げ面があらされるといった問題が生じていた。この問題を克服するために図 5(b)に示した方式で圧力切込み方式

での乾式ラッピングを行ったが、試作した装置に問題があり研究目的を達成できなかった。

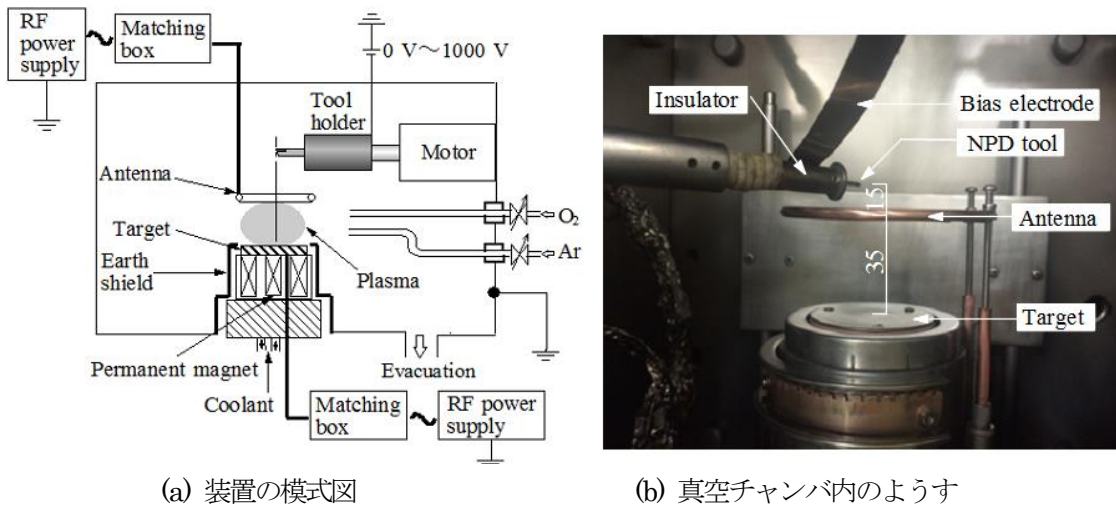
③ NPD 製ノーズ R バイトの成形

本研究を開始した当初、レーザ成形した NPD 製ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行うと刃先に欠けが生じるという問題が生じていた。刃先の丸み半径を 1 nm 以下に成形すると同時に欠けのない刃先を成形できる乾式ラッピング技術を開発することを目標に掲げて研究を行ったが、目標を達成できなかった。ただし、欠けについてはその発生原因になったと思われる現象を見出すことができた。

2・3 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術の開発

④ ドライエッチングのメカニズムの解明

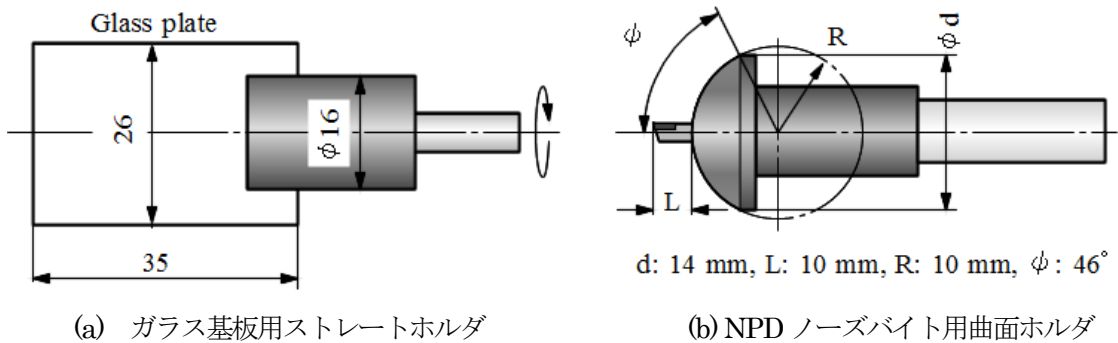
導電性がない NPD ノーズ R バイトが図 1 のようにドライエッチングされたメカニズムを解明するための基礎実験を行った。図 11 に示しているのは、誘導励起型と呼ばれているドライエッチング装置⁶⁾である。図 11 (a) に示した模式図において、ターゲットとアンテナはプラズマを発生させる役割を果たしている。工具ホルダにマイナスに帯電したバイアス電極を接触させてドライエッチング



(a) 装置の模式図

(b) 真空チャンバ内のようす

図 11 誘導励起(ICP)型ドライエッチング装置



(a) ガラス基板用ストレートホルダ

(b) NPD ノーズバイト用曲面ホルダ

図 12 ドライエッチングのメカニズムを解明するために使用したホルダの形状

を行うことにした。この場合、プラスに電離したプラズマは静電力によって工具ホルダに衝突することになる。

図 12 に示しているのは、実験に使用した S45C 製のホルダである。ホルダからスパッタアウトする鉄粒子の分布を調べるため、図 12(a) に示すようにストレートホルダの端面にガラス基板を装着し、ガラス基板に付着する鉄粒子の分布を観察した。また、平成 26 年度に行った基礎実験の結果を踏まえ、NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行う場合には、図 12(b) に示した曲面ホルダを使用した⁽¹⁾。

図 13 に示しているのは、バイアス電圧とアンテナ出力を変化させドライエッチングを行った場合にガラス基板に付着した鉄粒子の分布である。エッチング条件は図題に付記したとおりである。このように、ガラス基板には S45C 製のホルダからスパッタアウトした鉄の粒子が付着していることが明らかになった。アンテナ出力を 0 W に設定してバイアス電圧を上げていった場合、ガラス基板に付着する鉄粒子は減少している。また、バイアス電圧を 100 V に設定してアンテナ出力を上げていった場合にもガラス基板に付着する鉄粒子は減少している。

これらの結果は、S45C 製の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の粒子がガラス基板の表面に導電性を付与し、ガラス基板の表面がマイナスに帯電するため、プラスに電離したプラズマがガラスの表面に衝突して鉄の粒子が除去されたことを意味する。これと同様の現象が生じたため、導電性がない NPD 製ノーズ R バイトが図 1 のようにドライエッチングされた可能性が高い。

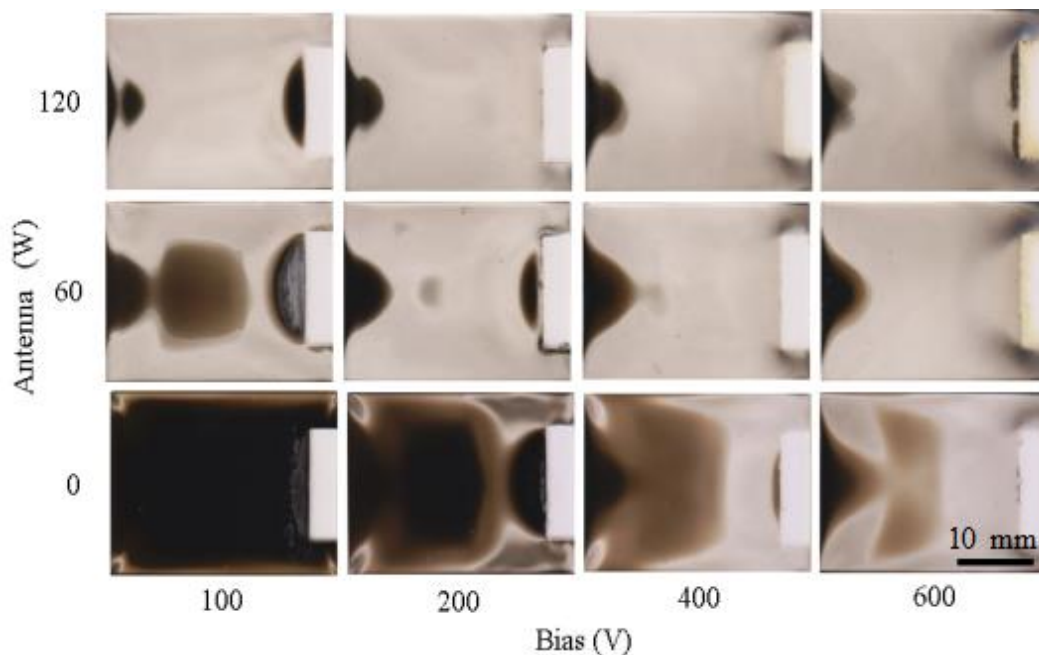
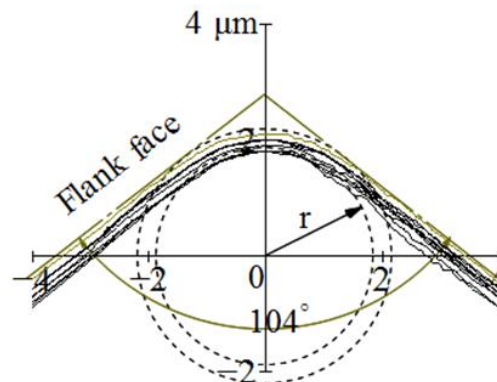
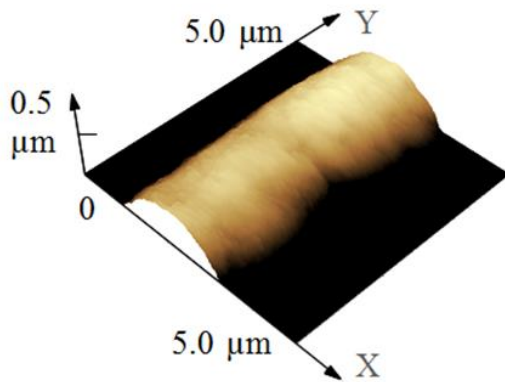


図 13 バイアス電圧とアンテナ出力を変化させドライエッチングを行った場合にガラス基板に付着した鉄粒子の分布 (真空度: 0.3 Pa, ターゲット出力: 10 W, Ar/O₂ 流量比: 10/0, エッチング時間: 5 h)

表4 NPD製ノーズRバイトのドライエッチングに使用したプラズマと質量数

SN	Gas	Symbol	Mass number	Average mass number
1	Krypton	Kr	84	84
2	Argon	Ar	40	40
3	Oxygen	O ₂	16	16
4	Nitrogen	N ₂	14	14
5	Helium	He	4	4
6	Carbon dioxide	CO ₂	12(16)	15
7	Methane	CH ₄	12(1)	3
8	Tetrafluoromethane	CF ₄	12(19)	18
9	Krypton+Oxygen	Kr/O ₂ : 8/2	84(16)	84
10	Argon + Oxygen	Ar/O ₂ : 8/2	40(16)	40

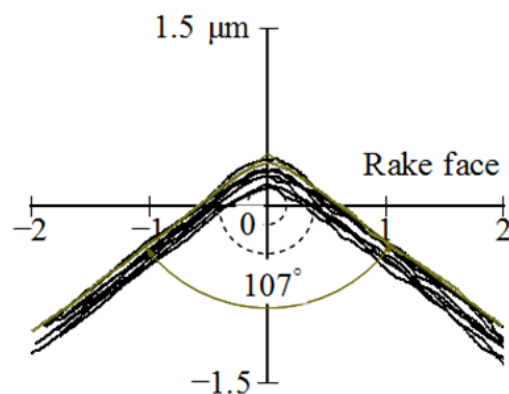
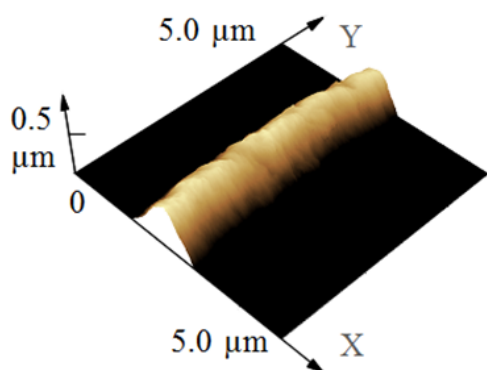


Cutting edge radius: 1.8 ~ 2.1 μm

(a) 前切れ刃のAFM画像

(b) 前切れ刃の断面曲線

図14 レーザ成形後の前切れ刃に関するAFM画像と断面曲線



Cutting edge radius: 161 ~ 398 nm

(a) 前切れ刃のAFM画像

(b) 前切れ刃の断面曲線

図15 電解加工後の前切れ刃に関するAFM画像と断面曲線

NPDに付着した鉄の粒子にプラズマが衝突し、鉄だけでなくNPDも同時にスパッタアウトされるといったメカニズムでNPD製ノーズRバイトがドライエッチングされる場合、刃先の丸み半径はプラズマの質量が異なると変化する可能性が考えられた。そこで、表4に示す10種類のプラズマを使用してNPDノーズRバイトに対してドライエッチングを行った。工具ホルダには、図12(b)に示した曲面ホルダを使用した。真空度は0.3 Pa、バイアス電圧は1000 V、ターゲット出力は10 W、ならびにアンテナ出力は60 W、エッチング時間は8 h×2回に設定した。

図14に示しているのは、ナノ秒パルスレーザを用いたレーザ加工を行い成形したNPD製ノーズRバイトの前切れ刃のAFM画像と断面曲線である。同図に示したように、レーザ加工を行い成形できる切れ刃の丸み半径は2 μm前後の値である。図15に示しているのは、図14に示したNPD製ノーズRバイトに対して電解加工を行った後に観察した前切れ刃のAFM画像と断面曲線である。電解加工後の刃先の丸み半径は、レーザ成形後の2 μm前後から400 nm以下の値に減少した。これは、加工表面に残っていた熱変質層が除去されたためである。

図15に示したようにレーザ加工の後に電解加工を行い、刃先の丸み半径を400 nm以下の値に成形した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⁽⁷⁾。図16に示しているのは、プラズマの種類を変えドライエッチング16 h行った場合に得られた横切れ刃の電子顕微鏡画像である。質量数大きいクリプトンKr、アルゴンAr、ならびにKr/O₂、Ar/O₂プラズマを用いた場合には逃げ面が平坦に成形されていることが特徴である。図17に示しているのは、ドライエッチングに使用したプラズマの質量数とAFMを用いて測定した前切れ刃に関する刃先の丸み半径である。電解加

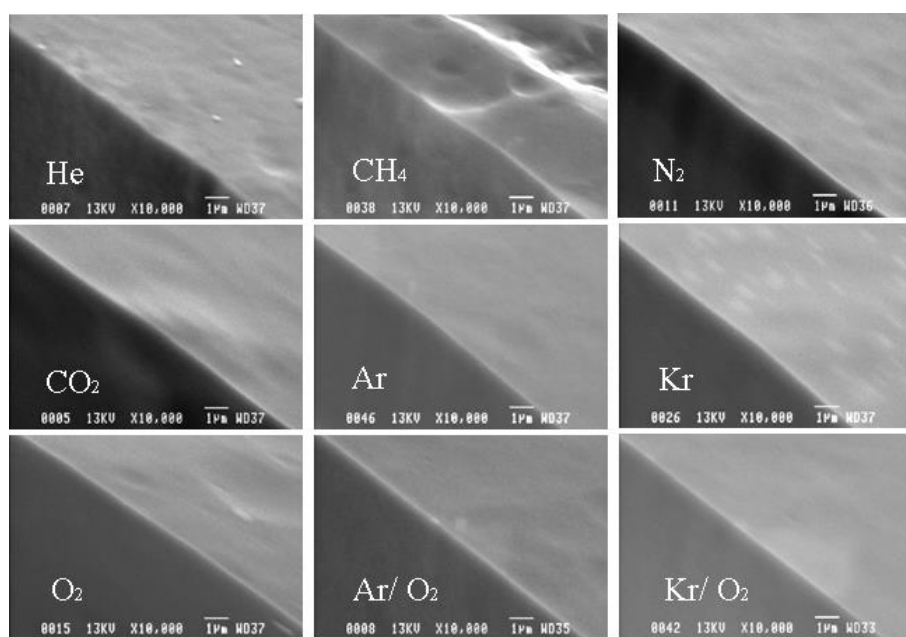


図16 プラズマの種類と16hドライエッチング後に観察した横切れ刃のSEM画像

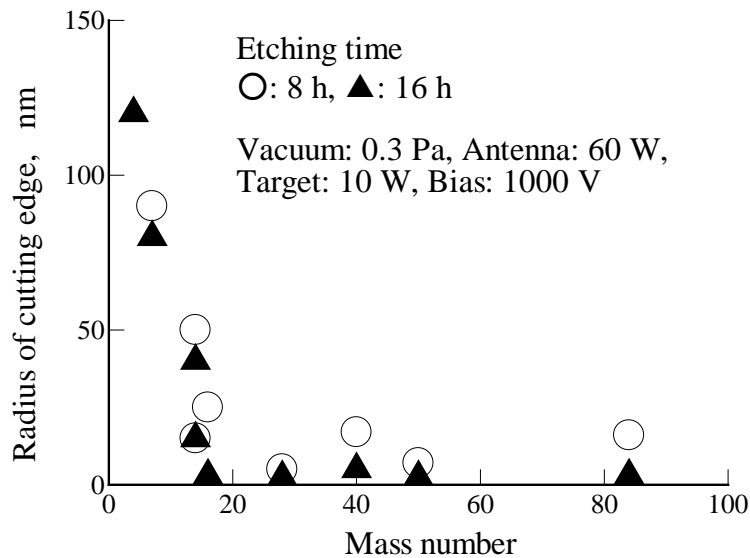


図17 プラズマの質量数とAFMを用いて測定した前切れ刃に関する刃先の丸み半径

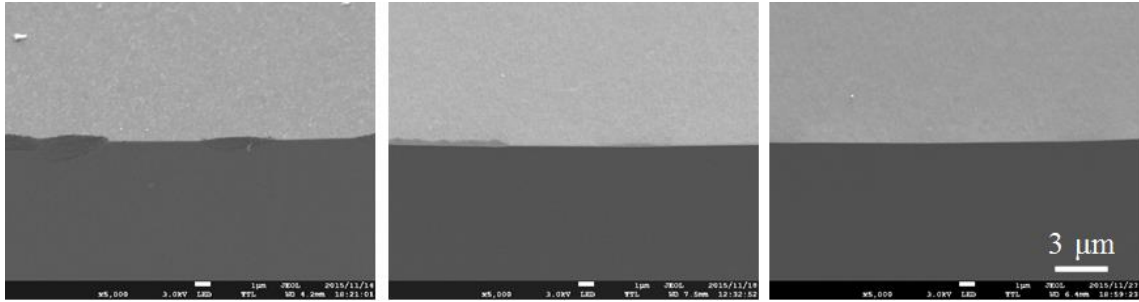
工後に測定した刃先の丸み半径が400 nm前後であったのに対し、ドライエッチングを行うと刃先の丸み半径を150 nm以下に成形できた。中でも質量数が大きいクリプトンKr、アルゴンAr、ならびにKr/O₂、Ar/O₂プラズマを用いて16 hドライエッチングを行うと、刃先の丸み半径を1 nm前後に成形できた。

⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング

現時点では乾式ラッピング技術が未熟であり、レーザ成形後の刃先に対して乾式ラッピングを行うと図8に示したように刃先に欠けが発生する。また、図9に示したように刃先の丸み半径50 nm前後である。それはともかく、乾式ラッピングした刃先に対してドライエッチングを行うと、欠けが生じていない部分に関しては刃先の丸み半径を1 nm以下に成形できる可能性が考えられた。また、断面曲線のばらつきも減少する可能性があると考えられた。

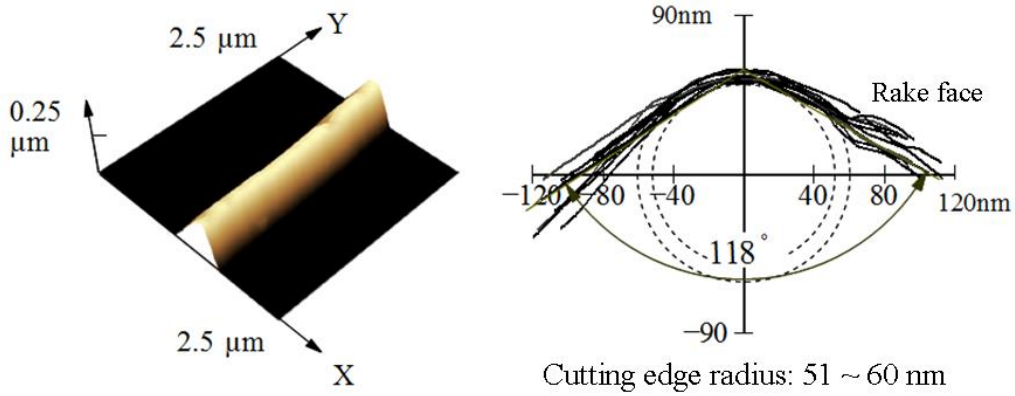
そこで、ツルアにPCD(Co)製円板を用いて乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行った。工具ホルダには、図12(b)に示した曲面ホルダを使用した。プラズマにはAr/O₂ (8/2)を使用、真空度は0.3 Pa、バイアス電圧は1000 V、ターゲット出力は10 W、ならびにアンテナ出力は60 W、エッチング時間は2 h×3回に設定した。図18に示しているのは、乾式ラッピング後、2 h、ならびに6 hドライエッチングした後に観察した前切れ刃のFE-SEM画像である。ドライエッチングを行う前には全く期待していなかったことであるが、Ar/O₂プラズマを用いてドライエッチングを行うと欠けが消えることが明らかになった。

図19、図20、ならびに図21に示しているのは、乾式ラッピング後、2 hドライエッチングした後、ならびに6 hドライエッチングした後に観察した前切れ刃のAFM画像と断面曲線である。乾



(a) 乾式ラッピング後 (b) 2h ドライエッチング後 (c) 6h ドライエッチング後

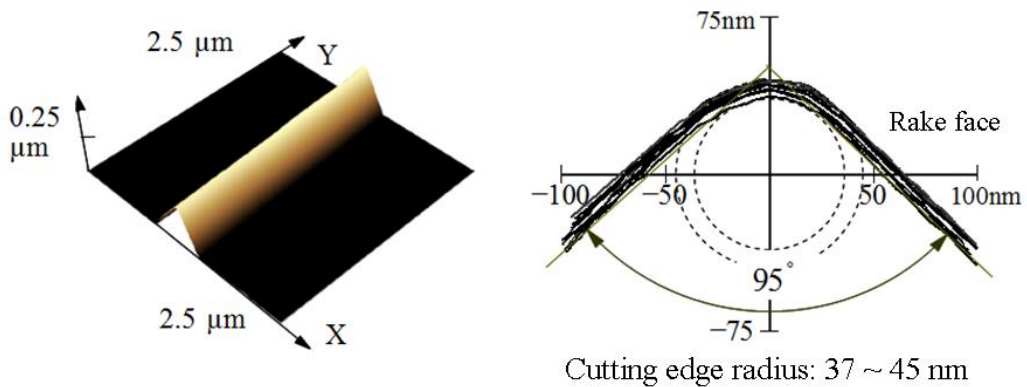
図 18 ツルアに PCD(Co)を用いて乾式ラッピングを行った後, Ar/O₂ (8/2)プラズマを用いてドライエッチングを実施. FE-SEM を用いて観察した NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃の画像



(a) 前切れ刃の AFM 画像

(b) 前切れ刃の断面曲線

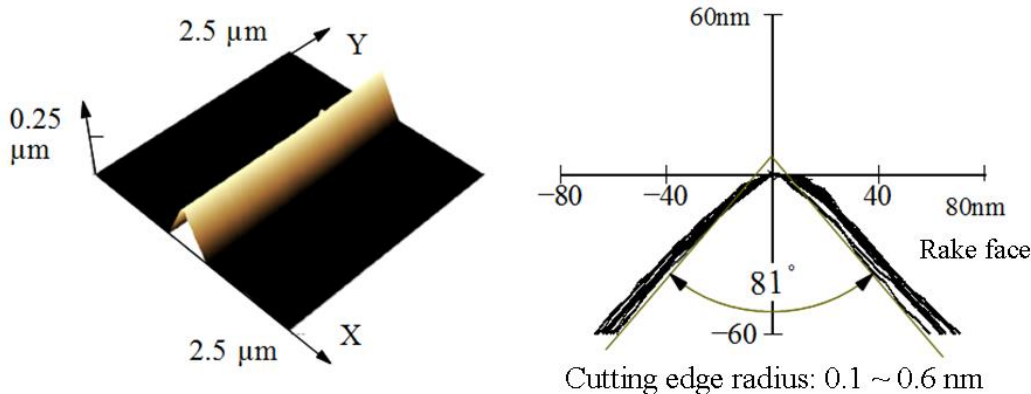
図 19 PCD(Co)をツルアに使用. 乾式ラッピング後の前切れ刃に関する AFM 画像と断面曲線



(a) 前切れ刃の AFM 画像

(b) 前切れ刃の断面曲線

図 20 Ar/O₂ プラズマを使用. 2h ドライエッチングを行った前切れ刃に関する AFM 画像と断面曲線



(a) 前切れ刃の AFM 画像 (b) 前切れ刃の断面曲線
 図 21 Ar/O₂ プラズマを使用. 6h ドライエッチングを行った前切れ刃に関する AFM 画像と断面曲線

式ラッピング後の刃先の丸み半径は 60 nm 程度であったのに対し 2 h ドライエッチングを行うと 50 nm, 6 h ドライエッチングを行うと 1 nm 以下に減少した. また, 乾式ラッピング後に 120° 前後であった楔角は 2 h ドライエッチングを行うと 95°, 6 h ドライエッチングを行うと 81° に減少した. また, エッチング時間が増すに従って断面曲線のばらつきもまた減少した. ここで, 乾式ラッピング時に成形しようとした楔角は 80° である.

このように, ドライエッチングを行う前には全く期待していなかったことであるが, Ar/O₂ プラズマを用いてドライエッチングを行うと, 乾式ラッピング時に刃先に生じていた欠けが消滅した. また, 乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対し Ar/O₂ プラズマを用いたドライエッチングを行うと, 刃先の丸み半径を 1 nm 以下, 楔角を 81°, ならびに断面曲線のばらつきがほとんど無い刃先を成形することができた.

2・4 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術のまとめ

「切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術」を開発にすることを目標に掲げて行った研究の成果は, 以下のようにまとめられる.

④ ドライエッチングのメカニズムの解明

平成 27 年度には導電性がない 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と, NPD 製ノーズ R バイトの表面に衝突するプラズマの質量数と刃先の丸み半径との関係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次のようにまとめられる.

- ・ S45C 製のホルダからスパッタアウトして NPD に付着した鉄の粒子は NPD の表面に導電性を付与し, NPD の表面がマイナスに帯電するため, プラスに電離したプラズマが NPD の表面に衝突し鉄の粒子だけでなく NPD も同時に除去するために NPD はドライエッチングされた可能性が高い.
- ・ レーザ加工と電解加工を行い刃先の丸み半径を 400 nm 前後に成形した NPD 製ノーズ R バイト

に対し、質量数が異なるプラズマを用いてドライエッチングを行った結果、刃先の丸み半径を 150 nm 以下に成形できた。中でも質量数が大きいクリプトン Kr, アルゴン Ar, ならびに Kr/O₂, Ar/O₂ プラズマを用いて 16 h ドライエッチングを行うと、刃先の丸み半径を 1 nm 前後に成形できた。

⑤ 乾式ラッピングした NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング

現時点では乾式ラッピング技術が未熟であり、刃先に欠けがない NPD 製ノーズ R バイトを成形することに成功していない。それはともかく、乾式ラッピング後に欠けが残っている NPD 製ノーズ R バイトに対して Ar/O₂ プラズマを用いてドライエッチングを行った。得られた研究の成果は、以下のようにまとめられる。

- ・ドライエッチングを行う前には全く期待していなかったことであるが、Ar/O₂ プラズマを用いてドライエッチングを行うと欠けが 消滅することが明らかになった。
- ・Ar/O₂ プラズマを用いて 6 h ドライエッチングを行うと、刃先の丸み半径を 1 nm 以下、楔角を 81° , ならびに断面曲線のばらつきがほとんど無い刃先を成形することができた。

2・5 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験

⑦ 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作

平成 27 年 7 月に研究計画を立案した当時、超合金製のマイクロレンズアレイ金型を試作するといった実用研究は、表 3 に示したように平成 31 年度に実施することを計画していた。レーザ加工、乾式ラッピング、ならびにドライエッチングを行い刃先が鋭利な NPD 製マイクロボールエンドミルを作るためには、最低でも 4 年の研究期間を費やす必要があると考えた次第である。これに対し、「2・2 ④ ドライエッチングのメカニズムの解明」で紹介したとおり、平成 27 年度にはレーザ成形した 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。その結果、刃先に揺らぎはあるが刃先の丸み半径を 1 nm 以下に成形できることが明らかになった。また、レーザ加工を行い NPD 製のボールエンドミルを成形する技術は既に開発できていた。そこで、平成 27 年 11 月頃から超合金製のマイクロレンズアレイ金型を作るための研究に着手した。

図 22 に示しているのは、NPD 製のマイクロボールエンドミルを成形するのに使用したレーザ加工装置の外観と模式図である^⑧。レーザには波長が 1060 nm, 繰返し周波数が最大で 80 KHz, パルス幅が最短で 40 ns, 出力が最大で 8 W のナノ秒パルスレーザを使用した。レーザを集光するための鏡筒を制御分解能が 10 nm の立形マシニングセンタのコラムに取付け、レーザ光を機械走査することによって NPD 製のマイクロボールエンドミルを成形した。既存の CAD/CAM を使ってレーザの走査軌跡を求めた。

図 23 に示しているのは、レーザ加工とドライエッチングを行い成形した、工具半径が 0.1 mm, すくい角が 0° , 刃直角逃げ角が 10° の NPD 製 1 枚刃ボールエンドミルの外観である。ドライエッチングの条件は NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチングの条件と同じであり、図 12(b) に示した曲面ホルダを用いた上で、真空度を 0.3 Pa, バイアス電圧を 1000 V, ターゲット出力を 10 W,

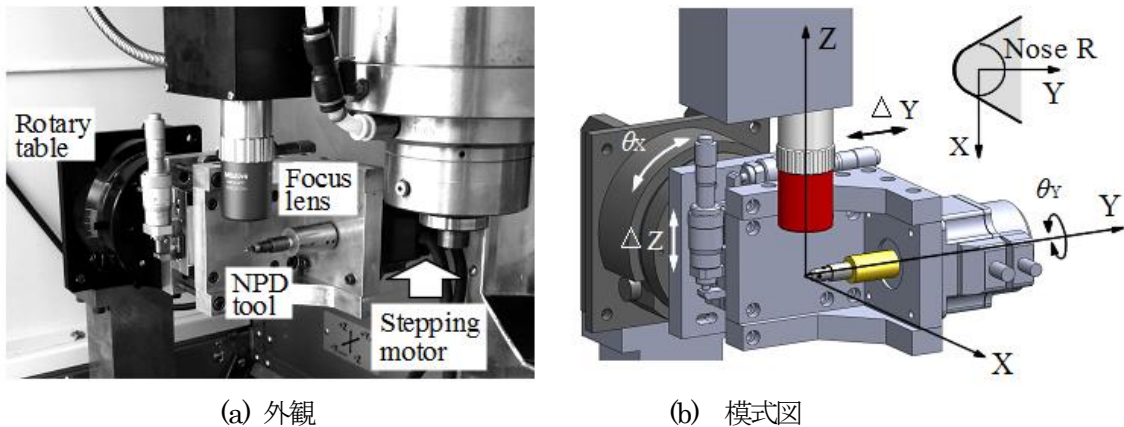


図 22 NPD 製マイクロボールエンドミルの成形に使用したレーザ加工装置の外観（波長 1060 nm, 周波数 20~80 KHz, パルス幅 40~120 ns, 出力 1 ~8 W）

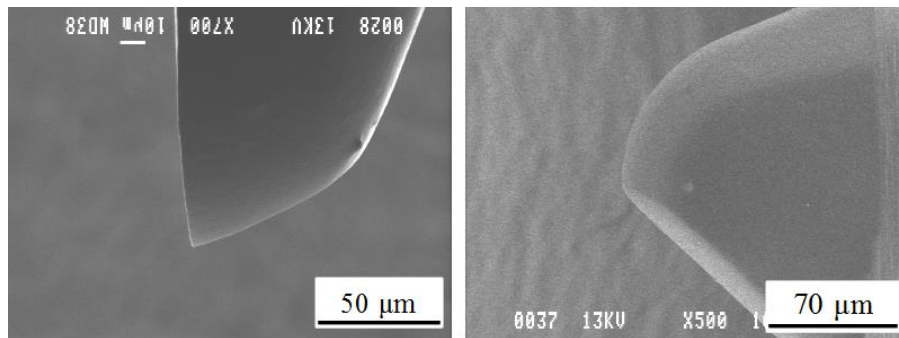


図 23 レーザ加工とドライエッチングを行い成形した，工具半径が 0.1 mm, すくい角が 0° , 刃直角逃げ角が 10° の NPD 製 1 枚刃ボールエンドミルの外観

ならびにエッチング時間を 8 h×2 回に設定した。プラズマには Ar/O₂ (8/2) を使用した。

図 23 に示した NPD 製マイクロボールエンドミルを使用し，レンズ径が 40 μm, レンズ間隔が 45 μm の超合金製マイクロレンズアレイ金型を加工した。硬さが 1800 Hv の超合金に対し，1027 個のレンズ型を加工した。図 24 に示しているのは，光学微分干渉顕微鏡を用いて測定したレンズの外観と中央部分の拡大写真である。外周部分に比べて中央部分のレンズ径が大きくなっているのは深く切入すぎたため，外周部分の直径が小さくなっているのは，エンドミルの刃先が摩滅したためである。

図 25 に示しているのは，最初と最後に加工したレンズ型の表面である。1 個目に加工したレンズ型の表面には工具が半径方向に振動したような痕跡，1027 個目に加工したレンズの表面には工具が半径方向に振動したような痕跡と工具の回転方向と一致する方向に引っ掻き傷が生じていた。図 26 に示しているのは，加工後に観察した刃先の電子顕微鏡画像である。レンズの加工に関与した図 26 に矢印で示した範囲では，刃先が筋状に摩滅していた。レンズの表面に引っ掻き傷が生じたのはこの筋状の摩擦痕が原因である。

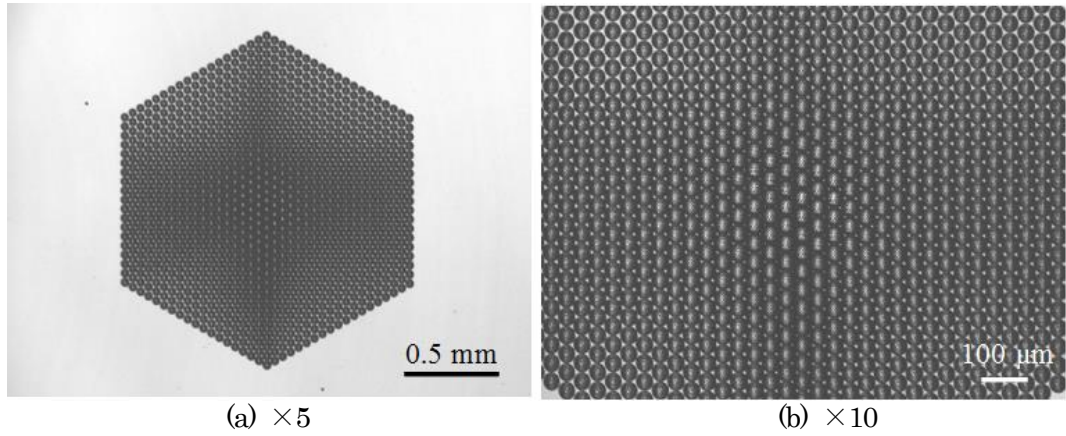


図24 硬さが 1800 Hv の超硬合金に加工したレンズ径が 40 μm, レンズ間隔が 45 μm, 個数が 1027 個のマイクロレンズアレイの光学微分干渉顕微鏡画像

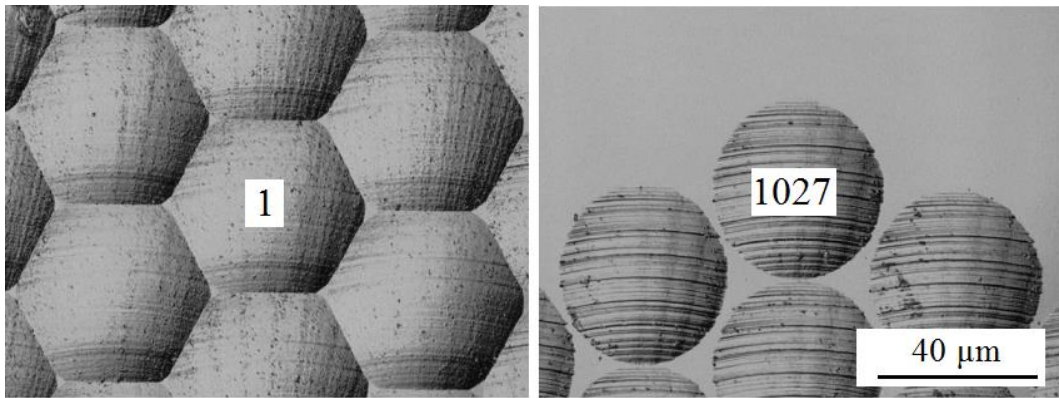


図25 最初と最後に加工したレンズ型の加工面

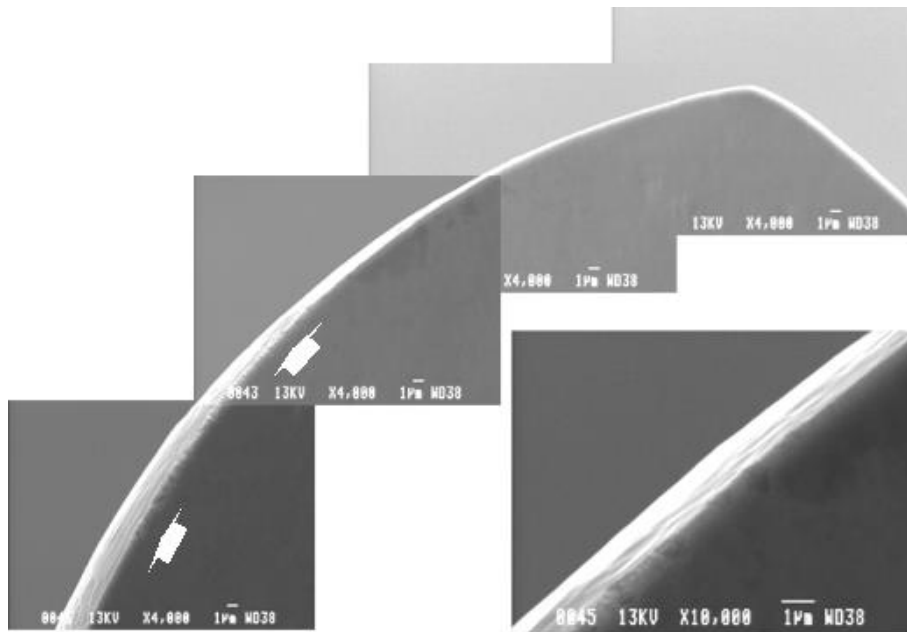


図26 レンズの加工に関与した刃先に生じていた筋状の摩擦痕 (矢印の範囲)

2009年にレーザ加工と乾式ラッピングを行い成形したNPD製のマイクロボールエンドミルを試作し、硬さが2600 Hvの超硬合金に対して断続切削を行った⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾。そのとき、加工面に工具が半径方向に振動したような痕跡や全く観察されなかった。また、工具が摩耗した痕跡は全く観察されなかった。加工面に工具が半径方向に振動したような痕跡については、その発生原因を明らかにする必要があると残されている。刃先に生じた筋状の摩耗痕については、刃先の丸み半径を変え切削実験を続ける必要があると考えている。

2・6 切れ刃鋭利化の効果を検証するために行った切削実験のまとめ

平成27年7月に研究計画を立案したとおり、平成27年度にはレーザ成形した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。その結果、刃先に揺らぎはあるが刃先の丸み半径を1 nm以下に成形できることが明らかになった。また、レーザ加工を行いNPD製のボールエンドミルを成形する技術は既に開発できていた。そこで、本来は平成31年度に実施することを計画していた超硬合金製のマイクロレンズアレイ金型を作るための研究を、平成27年11月から実施した。得られた研究の成果は以下のようにまとめられる。

⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作

- ・ 2006年にレーザ加工と乾式ラッピングを行い成形したNPD製のマイクロボールエンドミルを試作し、硬さが2600 Hvの超硬合金に対して断続切削を行った。そのとき、加工面に工具が半径方向に振動したような痕跡や全く観察されなかった。また、工具が摩耗した痕跡は全く観察されなかった。
- ・ これに対し、レーザ加工とドライエッチングを行い刃先の丸み半径を1 nm以下に成形したマイクロボールエンドミルを使用し、硬さが1800 Hvの超硬合金に対して断続切削を行うと、工具が半径方向に振動したような痕跡や、刃先の摩耗痕が加工面に転写されたと考えられる引っ掻き傷が加工面に観察された。工具が半径方向に振動したような痕跡については、その発生原因を明らかにする必要があると残されている。また、刃先に生じた筋状の摩耗痕については刃先の丸み半径を変え刃先の耐摩耗性を増す必要がある。

表4 平成28年度の研究実施項目

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019
1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発	① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作	→	終了			
	② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発	→		継続		
	③ NPD製ノーズRバイトの成形	→			継続	
2. 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術の開発	④ ドライエッチングのメカニズムの解明	→		継続		
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング	→			継続	
3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験	⑥ レンズ用プラスチックに対する超精密精密切削		→			
	⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作					→

3. 平成28年度の研究実施計画

切れ刃の丸み半径が0.1 nmのNPD製切削工具を開発するといった本研究の目標を達成するため、平成28年度には表4に示す①～⑥の研究を実施する。具体的な研究実施内容は以下のとおりである。

1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発

① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作

市販のPCD製円板に対して放電加工、湿式ラッピング、乾式ラッピング、電解加工、高周波スパッタ、湿式ラッピング、ならびに乾式ラッピングを行うことによりCoをBNやB4Cで置換したPCD製円板を試作することについての技術開発は平成27年度に終了した。平成28年度には、試作したPCD製円板をNPD製ノーズRバイトの乾式ラッピングに使用する。

② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発

図5(b)に示した方式での圧力切込み方式の乾式ラッピングは中止する。その代わりにアキシャル方向の剛性やトルクはDCサーボモータに劣るが、アキシャル方向に回転に同期しない振動がほとんど無いタービン駆動方式のエアスピンドルを使用して圧力切込み方式での乾式ラッピング技術を開発する。

③ NPD製ノーズRバイトの成形

刃先に欠けが生じる原因を解明するための研究を優先して実施する。現時点では、乾式ラッピングに使用しているDCサーボモータの回転精度の不良、適切な乾式ラッピングの条件や加工時間が見出せていないことが原因ではないかと考えている。刃先に欠けが無くなった後、刃先の丸み半径を1 nm以下に成形することを目指す。

2. 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術の開発

④ ドライエッチングのメカニズムの解明

刃先に欠けがあるNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行うと欠けが消えること、刃先の丸み半径が100 nm前後のNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行うと丸み

半径が1 nm以下に成形されること、ならびに刃先近傍の楔角が100°以上に成形されたNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行うと楔角を80°に成形されることの原因を明らかにする。

⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング

欠けが生じていない乾式ラッピング後のNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行い、刃先の丸み半径を0.1 nm、刃先近傍の楔角を80°に成形できるエッチング条件を見出すための研究を実施する。

3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験

⑥ レンズ用プラスチックに対する超精密切削

金型で量産する前に試作品として作られているレンズ用プラスチックの超精密切削に⑤のNPD製ノーズRバイトを使用し、切込み深さを10 nm以下に設定した超精密切削時に切りくずが排出されること、バリが発生しないことを確かめるための切削実験を実施する。

参考文献

- (1) 姚 雲校・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バイトに対する切れ刃鋭利化のためのドライエッチング, ABTEC2015 講演論文集(USB), C17(2015-9), pp. 217-218.
- (2) 飯山公太郎・仙波卓弥・天本祥文・藤山博一、酸素プラズマを用いたPCD製マイクロ研削工具に対するドライエッチング ABTEC2014 講演論文集(USB), B04 (2014-9), pp. 105-106.
- (3) 中山一雄, 機械工学大系 36 切削加工論, (1978), p. 38, コロナ社.
- (4) 仙波卓弥・太田修平・天本祥文・藤山博一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンドと焼結ダイヤモンド製研削工具との間に生じる熱化学反応のメカニズム, 日本機械学会論文集 C 編, 77-784(2011-12), pp. 4704 - 4717.
- (5) 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, 79-807(2013-11), pp. 4513-4523.
- (6) 西林良樹・安藤豊・小橋宏司・目黒貴一・今井貴浩・平尾孝・尾浦賢治郎, ダイヤモンドの高度ドライエッチング技術の開発, NEW DIAMOND, 17-3(2001), pp. 15-20.
- (7) 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, ABTEC2016 講演論文集(USB), A13(2016-8), pp. 37-38.
- (8) 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, 78-794(2012), pp. 3583-3593.
- (9) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, 76-763, (2010-3), pp. 768-776.
- (10) Takuya SEMBA・Ryuich OKAZAKI・Hitoshi SUMIYA, Ultraprecision Cutting of Cemented Carbide Using Microball Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2010 Proceedings, B01(2010-10), pp. 75-78.