

超硬合金製・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

研究報告者 仙波卓弥

～プロフィール～



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

所属団体名 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

遊び心でということになりますが、研究を進める過程でレーザ成形したナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製ノーズ R バイトに対してアルゴンプラズマを使ったイオンエッチングを行いました。その結果、縁だれが生じていた切れ刃が鋭利化されることを偶然に発見しました。もしも切れ刃の丸み半径を原子半径と同じサイズに成形することができれば、鋼の切削加工に費やされるエネルギーを $1 \times 10^3 \text{ erg/cm}^2$ (約 $1 \text{ gf} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2$) といった、鋼の表面エネルギーに相当する値に減らすことができると考えられます。今後は、NPD 製ノーズ R バイトの切れ刃の丸み半径を原子半径と同じサイズに成形することを目標に掲げ、モノづくりの原理・原則を見出すための研究を進めて参りたいと考えています。

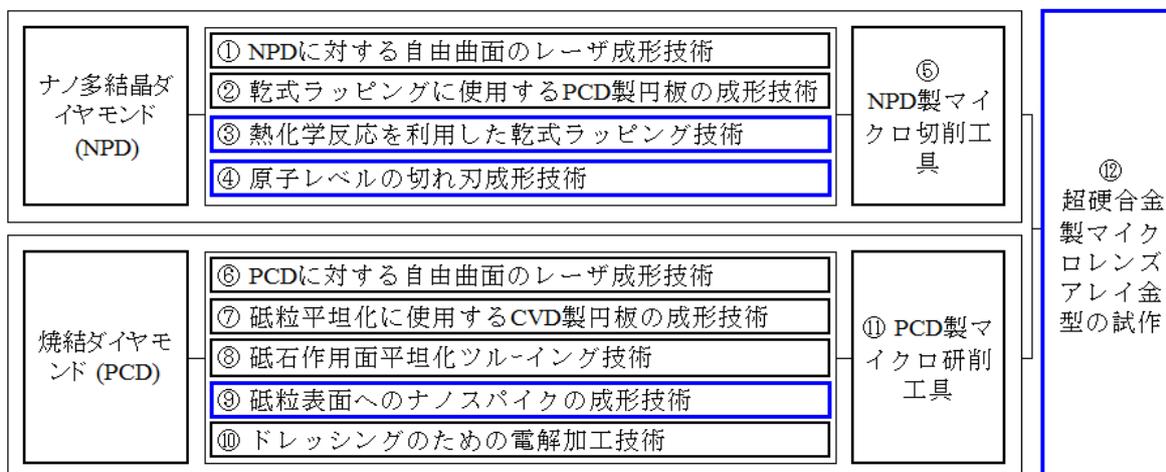
本研究の目標は、直径が 0.1 mm、粗さが 10 nm Rz、ならびに形状精度が PV 値で 20 nm 以下の超合金製・マイクロレンズアレイ金型を研磨レスで作ることができる、ナノマイクロ機械加工技術を開発することである。研究目標を達成するため、ナノ多結晶ダイヤモンド^①(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)製切削工具や焼結ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond: PCD)製研削工具の開発、ならびにこれらの工具を使ったナノマイクロ機械加工技術の開発を行った。

1. はじめに

1990 年代の初めにドイツでマイクロ機械加工^{②,③}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 に達しており、超精密微細と呼ぶにふさわしい加工面を作ることができる工作機械を入手できるようになった。一方、工具の開発は停滞しており現時点で以下の問題を抱えている。

1. チッピングや工具摩耗が生じるため、単結晶ダイヤモンド(Single Crystal Diamond: SCD)製の切削工具は硬さが 10 GPa Hv を超える高硬度材料の超精密切削には使えない。
2. 市販されている SCD 製切削工具の切れ刃の丸み半径は 50 nm 程度であり、工作機械の制御分解能に達していない^④。
3. 高硬度材料に対して研削加工を行い、研磨レスで粗さが 10 nm Rz、形状精度が PV 値で 50 nm 以下の加工面を作ることは難しい。また、研削工具の摩耗は避けられない。

これらの問題点を克服するため、2004 年度以降、図 1 に示すように NPD 製のマイクロ切削工具^⑤、PCD 製のマイクロ研削工具^⑥、ならびにこれらの工具を駆使したナノマイクロ機械加工技術^⑦の開発を行ってきた。本研究は、これらの工具成形技術やナノマイクロ機械加工技術を完成させるために実施した。NPD 製マイクロ切削工具については図 1 に示した③と④の研究、PCD 製研削工具については⑨の研究、ならびにナノマイクロ機械加工技術については⑫の研究を実施した。本報告書では、これら③、④、⑨、ならびに⑫に関する研究の成果を報告する。



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

図 1 高硬度金型材料に対するナノマイクロ機械加工を実現するために必要な工具開発と加工技術

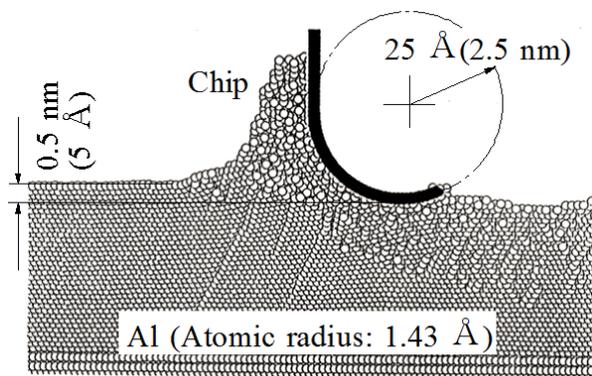


図 2 極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ^{(8),(9)}

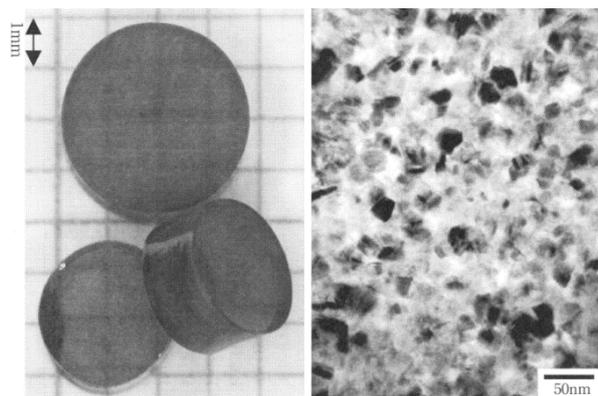


図 3 ナノ多結晶ダイヤモンドの外観(左)と透過電子顕微鏡画像(右)

2. NPD 製マイクロ切削工具

2.1 工具開発の目的

図 2 に示しているのは、切れ刃の丸み半径が 2.5 nm の SCD 製切削工具を使用した超精密切削時に、単結晶アルミニウムから排出される切りくずのようすを解析した井川先生の研究結果^{(8),(9)}である。市販の SCD 製切削工具の切れ刃の丸み半径は現時点で約 50 nm である⁽⁴⁾。したがって、現状の工具状技術では、超精密切削を行い原子配列に擾乱のない加工面を作ることは難しい。既に得られている研究の成果^{(10),(11)}を踏まえると、レーザ成形した NPD 製ノーズ R バイト⁽¹²⁾に対して熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行うと、切れ刃の丸み半径を約 0.5 nm にまでは成形できると考えられた。

本研究では、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、切れ刃の丸み半径を約 0.5 nm に成形するための研究を行った。また、レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイトに対してアルゴンプラズマを用いたイオンエッチングを行い、切れ刃の鋭利化にイオンエッチングが有効であることを確かめるための研究を行った。

2.2 熱化学反応を利用した乾式ラッピング^{(10),(11)}

図 3 に示しているのは、NPD の外観と透過電子顕微鏡画像である。高純度グラファイトをダイヤモンドに直接変換した多結晶ダイヤモンドで、サイズが数十ナノメートルのダイヤモンドの粒子内に生じた転移や滑り線が結晶粒界で止められるため、単結晶ダイヤモンドよりも硬いだけでなく劈開し難い性質を持っている⁽¹³⁾。

2007 年にこの NPD を使う機会に恵まれ、これまでに NPD に対するレーザ加工技術⁽¹²⁾や熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発を行ってきた^{(10),(11)}。図 4 に示しているのは、レーザ加工を行い成形した R が 0.2 mm、すくい角が 0°、ならびに逃げ角が 5° の NPD 製ノーズ R バイトである。レーザ成形後の切れ刃にはサイズが約 1 μm の縁だれが生じており、これを除去するために市販の PCD 製円板(トーメイダイヤ(株)製 TED98F)をラップに用いて NPD 製ノーズ R バイトのすくい面に対する乾式ラッピングを行った。

図 5 に示しているのは作用面の粗さを 30 nm Rz 以下に成形した PCD 製のラップ、図 6 に示しているのは NPD 製ノーズ R バイトのすくい面に対する乾式ラッピングの要領である。逃げ面に対しても同様の乾式ラッピング

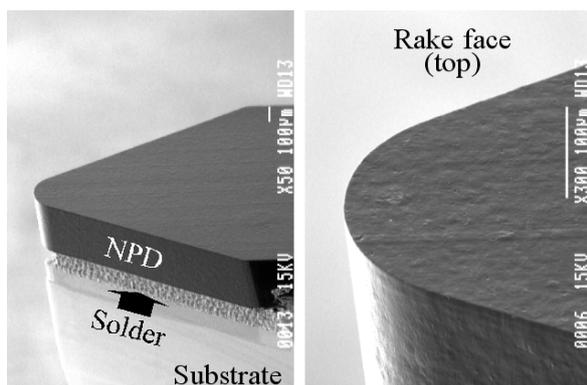


図4 レーザ成形した先端Rが0.2 mm, すくい角が0°, 逃げ角が5°のNPD製ノーズRバイト

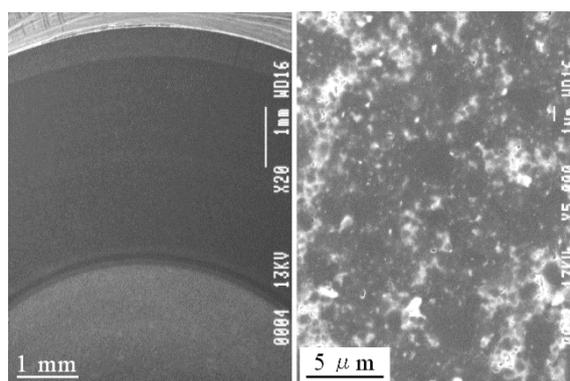


図5 乾式ラッピングに使用したPCD製円板の外観と砥石作用面(トーメイダイヤモンド(株)製TED98F)

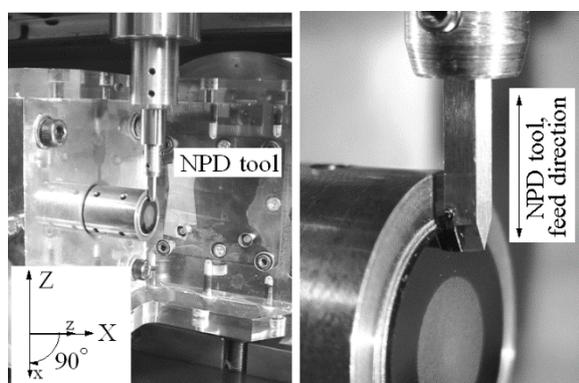


図6 すくい面に対する乾式ラッピングの要領

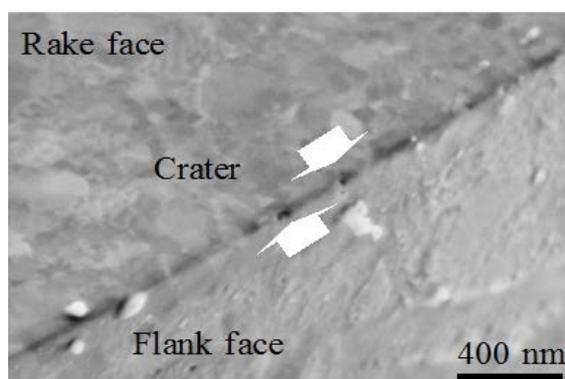


図7 乾式ラッピング後に観察した切れ刃のようす(2009年)

を行った結果、図7に示す切れ刃を2009年に成形することができた⁽⁶⁾。当時は成形技術が未熟であり、逃げ面にサイズが20 mm前後のクレータが生じていたため、切れ刃の丸み半径は20 mm程度に成形できたが切れ刃に20 mm前後の凹凸が残っていた。

図5に示したようにラップ作用面の粗さを30nmRz以下に成形すると、ダイヤモンドの粒子だけでなく焼結助剤として用いられているコバルト(Co)が作用面に露出する。このコバルトは他の元素から原子を奪う性質を持っている⁽⁴⁾。したがって、ダイヤモンドの共有結合に関与している電子がCoによって奪われて結合強度が低下した脆弱層がNPDの表面に生成され、これがダイヤモンドの粒子によって除去された可能性があると考えられた⁽⁵⁾。また、乾式ラップ時の摩擦熱によってダイヤモンド構造sp³の一部がグラファイト構造sp²に変化した熱変質層がNPDの表面に生成され、これがダイヤモンドの粒子によって除去された可能性も考えられた⁽⁶⁾。

そこで、図5のように成形したPCD製円板に対して電解加工と高周波スパッタを行い、Coを遷移金属や高比熱材料で置換したPCD製円板を試作した。また、図6と同様にすくい面に対する乾式ラッピングを行った。図8に示しているのはCoを置換した遷移金属や高比熱材料の比熱と原子間力顕微鏡(AFM)を用いて測定したすくい面の粗さである。Coを置換した遷移金属や高比熱材料の比熱が増すに従ってすくい面は平滑にされることが明らかになった。

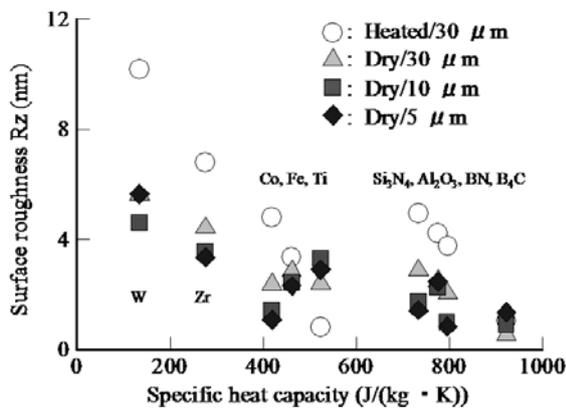


図 8 Co を遷移金属や高比熱材料で置換した PCD 製円板をラップに使用. 乾式ラッピング後に測定したすくい面の粗さ

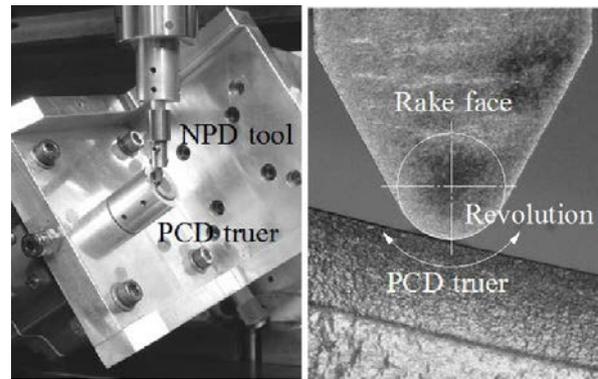
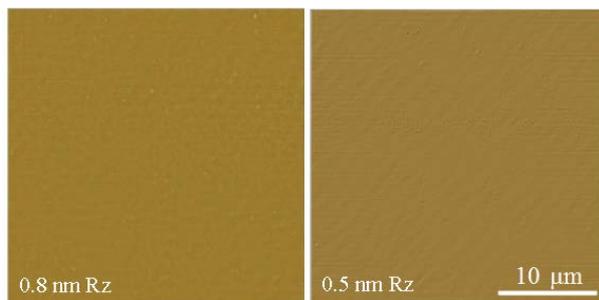
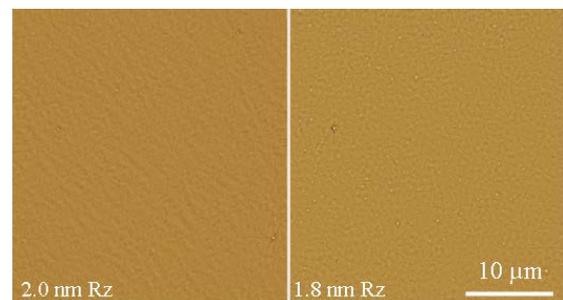


図 10 逃げ面に対する乾式ラッピングの要領



(a) PCD(BN) (b) PCD(B4C)

図 9 原子間力顕微鏡を用いて測定したすくい面のようすと粗さ



(a) PCD(BN) (b) PCD(B4C)

図 11 原子間力顕微鏡を用いて測定した逃げ面のようすと粗さ

このように、ダイヤモンド構造の一部がグラファイト構造に変化した熱変質層が NPD の表面に生成され、これがダイヤモンドの粒子によって除去されるといったメカニズムで NPD から切りくずが排出される場合には、粗さが 1nmRz 以下の加工面を作ることができる。図 9 に示しているのは、Co を窒化ホウ素(BN)や炭化ホウ素(B4C)で置換したラップを用いた場合に得られたすくい面の AFM 画像である。図 9(b)に示したように Co を B4C で置換した PCD 製円板 PCD(B4C)をラップに用いた場合には粗さが 0.5 nmRz のすくい面を作ることができた。

図 10 に示しているのは逃げ面に対する乾式ラップのようす、図 11 に示しているのはラップに PCD(BN)と PCD(B4C)を用いた場合に得られた逃げ面の AFM 画像である。すくい面とラップは面接触するのに対し逃げ面とラップは線接触するため、逃げ面の乾式ラッピング時における接触圧力は予想以上に大きくなっていると考えられる。また、逃げ面の乾式ラッピング時には NPD から排出された切りくずが逃げ面とラップとの間に巻き込まれる度合いが増加する。そのため、現時点で成形できる逃げ面の粗さは 2nmRz 前後にとどまっている。

逃げ面とラップとの接触圧を下げ NPD から排出される切りくずのサイズを小さくすれば、逃げ面についてもすくい面と同様に粗さを 0.5nmRz 程度に成形できると考えている。切削工具の切れ刃はすくい面と逃げ面とが交わる稜線である。したがって、熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行いこれらの面を 0.5 nmRz の粗さに成形することができれば、図 12 に破線で示すように切れ刃の丸み半径を 0.5 nm まで成形できる可能性がある。

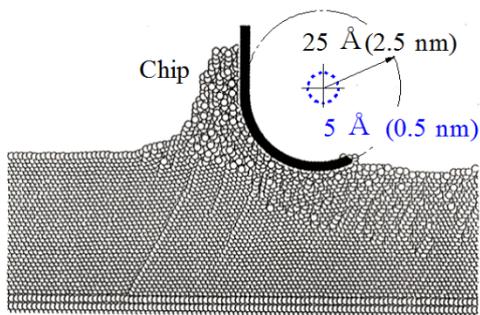


図 12 熱化学反応を利用した乾式ラッピングで成形できると思われる切れ刃の丸み半径

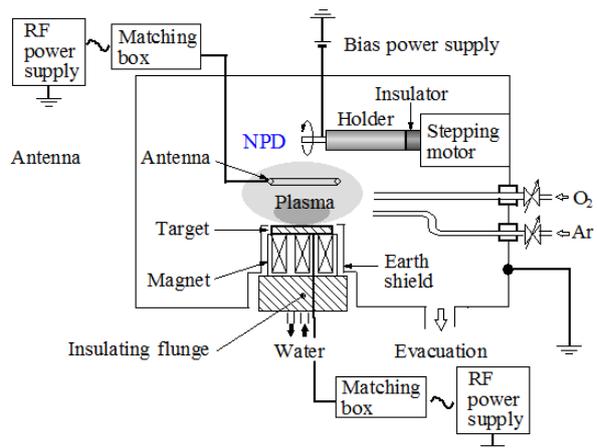


図 13 誘導結合型プラズマエッチング装置

2. 3 アルゴンプラズマを用いたイオンエッチング

NPD 製ノーズ R バイトとラップとの接触圧を減らし、NPD から排出される切りくずのサイズを微細化すれば切れ刃の丸み半径を 0.5 nm 以下に成形できる可能性は残されている。ただし、ラップの作用面の粗さを 30 nm Rz 以下の粗さに成形することは難しく、乾式ラッピングを行い切れ刃の丸み半径を原子半径と同じにまで成形することには無理があると感じていた。

そこで、PCD 製研削工具の砥粒鋭利化のために 2010 年より行っていたプラズマを用いたイオンエッチング⁽¹⁸⁾、⁽¹⁹⁾を、NPD 製ノーズ R バイトの切れ刃の鋭利化に応用することを試みた。図 13 に示しているのはイオンエッチングに使用した誘導結合型(Inductively Coupled Plasma: ICP)プラズマエッチング装置⁽²⁰⁾の模式図である。酸素(O₂)やアルゴン(Ar)を真空排気されたチャンバ内に入れ、ターゲット(T)やアンテナ(A)に高周波電圧を印加すると酸素分子やアルゴン分子は電子にたたかれて電離する。ステンレス製の工具ホルダに装着した NPD 製ノーズ R バイトに負のバイアス電圧をかけると、正に電離した酸素原子やアルゴン原子が NPD に衝突して NPD の表面から炭素原子がスパッタアウトする。すなわち、NPD がイオンエッチングされる。

図 14 に示しているのは、ターゲットやアンテナの出力を変えた場合に観察された酸素プラズマの発生状態である。ターゲットの出力を増加させると、出力が 20 W 前後でプラズマの発生量が急に増加する。アンテナの出力を増加させると、ターゲットの近傍に発生したプラズマは上方に誘導される。図 15 に示しているのは、レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイトに対して酸素プラズマとアルゴンプラズマを用いてイオンエッチング(Ion Etching: IE)した場合に観察された切れ刃のようすである。酸素プラズマを用いた場合には、工具ホルダからスパッタアウトして NPD に付着した鉄(Fe)がマスクの役割を果たしダイヤモンドが選択エッチングされ NPD の表面に微細な凹凸が発生した。一方、アルゴンプラズマを用いた場合には NPD を構成する炭素原子との間に化学反応が生じないため、切れ刃を鋭利に成形することができた。

このように、アルゴンプラズマを用いると NPD の表面に衝突したアルゴン原子によって NPD から炭素原子が除去され、切れ刃を鋭利に成形できることを発見した。おそらく、NPD 製ノーズ R バイトを取付けたステン

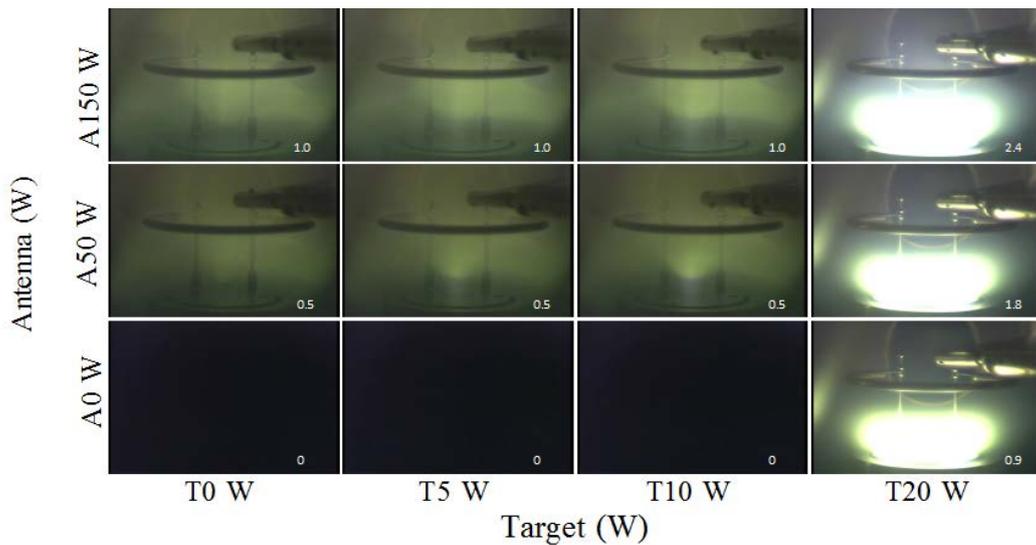


図 14 ターゲットやアンテナの出力を変えた場合に観察された酸素プラズマの発生状態 (真空度 0.3 Pa, バイアス電圧 0V)

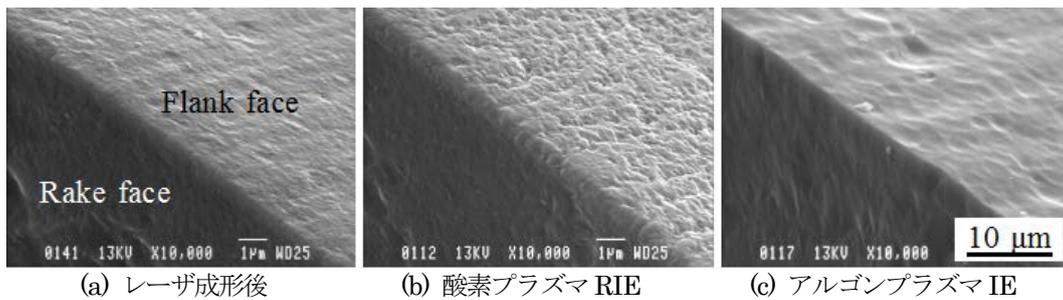


図 15 レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイトに対し酸素プラズマやアルゴンプラズマを使ってイオンエッチングした場合に観察された切れ刃のようす(RIE: 反応性イオンエッチング)

レス製の工具ホルダからスパッタアウトした Fe が NPD の表面に付着し、NPD に導電性を付与したために本来は導電性のない NPD がイオンエッチングされたのではないかと考えている。ただし、図 15(c)に示したようにすくい面や逃げ面にはサイズが $5\mu\text{m}$ 以上の凹凸が生じており、その発生要因を明らかにすると同時に凹凸を除去する必要が残されている。

3. PCD 製マイクロ研削工具

3.1 工具開発の目的

1995 年から 2005 年の 10 年間、ニッケル(Ni)/リン(P)アモルファスめっきとめっき皮膜に対する熱処理を行い、合金強化形のダイヤモンド電鍍工具の開発するための研究を行った⁽²¹⁾。既存の研削工具素材の中ではもともと耐摩耗性に優れた工具開発を目指したが、ダイヤモンド電鍍工具をマイクロ研削工具に成形するツールアとして市販の PCD 製円板(トーメイダイヤモンド(株)製、TED-98F)を使ったところ、ダイヤモンド電鍍工具が簡単に削れてしまった^{(22),(23)}。つまり、10 年を費やして開発したダイヤモンド電鍍工具よりも PCD の方が遙かに耐摩耗性に優れていることに気がついた。この実験事実気付いた 2006 年度以降、PCD を工具素材に用いたマイクロ研削工具の開発を行っている。

図16に示しているのは、これまでに試作した工具の先端半径が0.1 mmのPCD製マイクロ研削工具の半球部分と砥石作用面の状態である。図16(a)に示しているのは放電加工後の砥石作用面⁽⁶⁾、図16(b)に示しているのはダイヤモンドスラリを用いた湿式ラッピング後の砥石作用面⁽⁷⁾、図16(c)に示しているのは化学気相合成法(CVD)で作られた多結晶ダイヤモンド製の円板をツールアに用いて湿式研削を行い平坦に成形した砥石作用面⁽⁸⁾、ならびに図16(d)に示しているのは図16(c)に示した工具に対して電解加工を行い、半球状の砥石作用面にダイヤモンド砥粒を分離して露出させた工具⁽²⁴⁾である。

図16(d)に示した工具は、粗さが26.2 GPa Hvの超硬合金に対して平滑な加工面を短時間で作るのに極めて有効である。ただし、切れ刃として作用する砥粒のエッジに縁だれが生じていると砥石の切れ味が劣化する。また砥石を装着する工具スピンドルの剛性が低い場合には、加工面を平滑に成形する能力は持っているが形状創成能力は低い。本研究では、超硬合金製の基板上に焼結されたサイズが□2×20 mmの短冊状のPCD(住友電工(株)製 DA150)と、φ2×20 mmの円柱状のPCD工具素材(住友電工(株)製 DA150)に対してレーザ加工と湿式研削を行い、図16(c)のように成形した工具先端半径が0.1 mmのPCD製マイクロ研削工具に対して酸素プラズマを用いたイオンエッチングを行い、平坦に成形されたダイヤモンド砥粒の表面に切れ刃として作用するナノスパイクを成形するための研究を行った。

3. 2 短冊状のPCD試験片に対する反応性イオンエッチング^{(18),(19)}

図17に示しているのは、短冊状のPCD製試験片に対して行ったイオンエッチングの条件である。図18の上段に示しているのは、ターゲット出力を20 W、バイアス電圧を10 Vに設定した上で、アンテナ出力を変化させた場合に得られたPCD表面の電子顕微鏡(SEM)画像である。イオンエッチング後のPCD表面には灰化物が付着して

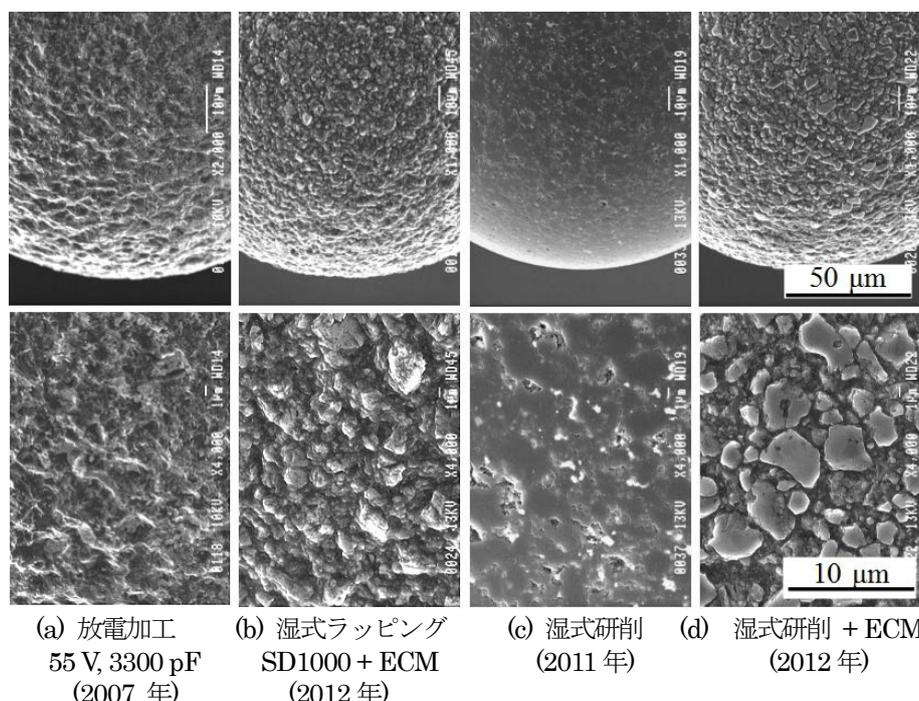


図16 これまでに試作した工具の先端半径が0.1 mmのPCD製マイクロ研削工具の半球部分と砥石作用面の状態(ECM: 電解加工)

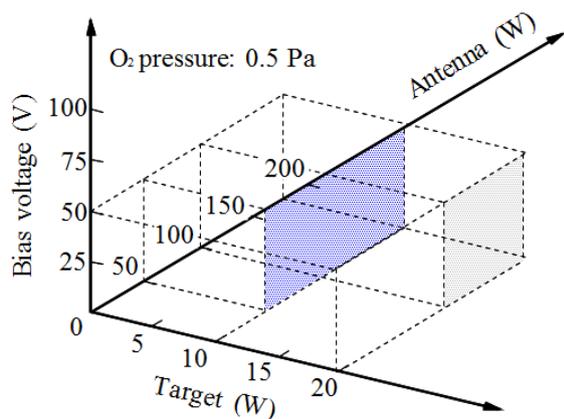


図 17 短冊状のPCD 製試験片やPCD 製マイクロ研削工具に対するイオンエッチングの条件

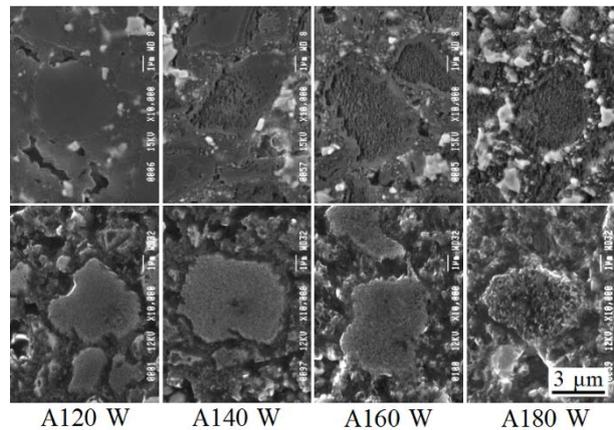


図 18 アンテナ(A)出力とPCD 表面の状態 (上段: イオンエッチング後, 下段: 電解加工後)

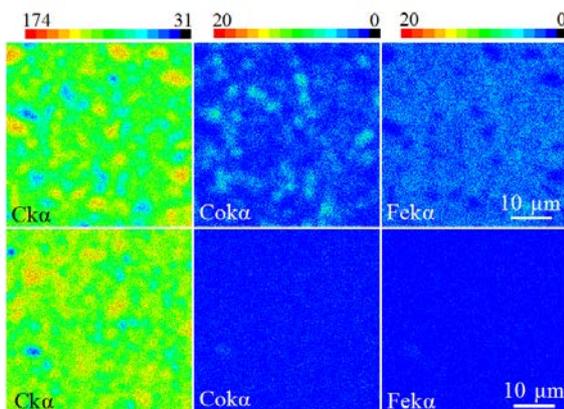


図 19 EPMA を用いて観察した C, Co, ならびに Fe の X 線画像(上段: イオンエッチング後, 下段: 電解加工後)

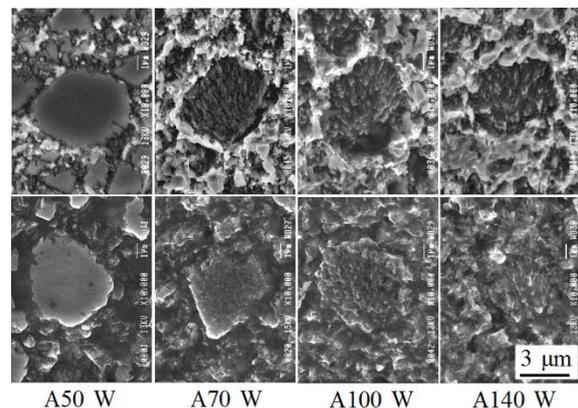


図 20 アンテナ(A)出力と砥石作用面の状態(ターゲット出力 10 W, バイアス電圧 1 V)

いる印象があった。そこで、波長分型の電子線マイクロアナライザ(EPMA)を使用してPCDの表面を観察した

図 19 の上段に示しているのは、ターゲット出力を 20 W、アンテナ出力を 180 W、ならびにバイアス電圧を 10 V に設定してイオンエッチングを行った PCD 表面の X 線画像である。PCD の表面には、コバルト Co だけでなく Fe も付着していることが確かめられた。供試材を取付けたステンレス製のホルダからスパッタアウトしてダイヤモンド砥粒の表面に付着した Fe がマスクの役割を果たし、C と酸素プラズマの化学反応が抑えられたためにダイヤモンド砥粒の表面に微細な凹凸が生成された可能性が高い。

図 18 と図 19 の下段に示しているのは、イオンエッチング後の供試材に対し電解加工とメッシュサイズが #3000 の WA スティックを使ったドレッシングを行った後に観察した、PCD 表面の SEM 画像と X 線画像である。イオンエッチング後の供試材に対して電解加工と WA スティックを使ったドレッシングを行うと、灰化物や金属付着物は PCD 表面から除去され、砥石作用面にダイヤモンド砥粒を分離して露出させることができた。

3.3 工具先端半径が0.1 mmのPCD製マイクロ研削工具に対するイオンエッチング^{(18),(19)}

図18と全く同じ条件で工具先端半径が0.1 mmのPCD製マイクロ研削工具に対してイオンエッチングを行ったところ、おそらく電力集中に似た現象が発生し砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒が過度にエッチングされてしまった。そこで、図17に示したようにターゲット出力を20 Wから10 Wに下げ、PCD製マイクロ研削工具に対するイオンエッチングを行った。

図20に示しているのは、ターゲット出力を10 W、バイアス電圧を1 Vに設定した上で、アンテナ出力を50~140 Wの範囲で変化させた場合に得られた砥石作用面のSEM画像である。イオンエッチング後に観察した砥石作用面を上段、電解加工とWAスティックを使ったドレッシングを行った後に観察した砥石作用面を下段に示している。上段に示したように、アンテナの出力を50 W以上に上げると、ダイヤモンド砥粒の表面に剣山のようなナノスパイクを作ることができた。上段の写真で白く見えているのは焼結助剤として用いられているコバルトCoであり、ダイヤモンド砥粒の粒界に析出している。

下段の写真によれば、電解加工とWAスティックを使ったドレッシングを行うとCoは完全に除去され、Coが偏析していた箇所には鋭利な切れ刃が露出していることがわかる。このように、PCD製マイクロ研削工具を取付けているステンレス製の工具ホルダからスパッタアウトしてダイヤモンド砥粒の表面に付着するFeだけでなく、焼結助剤として用いられているCoもマスクの役割を果たし電解加工やドレッシングを行うとCoの下層にあった破碎した砥粒が露出することが明らかになった。

図21に示しているのは、ターゲット出力を10 W、アンテナ出力を180 Wに設定した上で、バイアス電圧を50~1000 Vの範囲で変化させた場合に得られた砥石作用面の状態である。上段の写真はイオンエッチング後に観察した砥石作用面、下段の写真は電解加工とWAスティックを使ったドレッシングを行った後に観察した砥石作用面である。下段の写真に示したように砥石作用面は大きくあらされているが、砥粒サイズは5 μm 以下であり、しかも砥粒の先端は半球状の砥石作用面の放線方向に向かって鋭利に成形されている。

図22に示しているのは、現時点で仕上げ加工に適していると考えているPCD製研削工具の砥石作用面であ

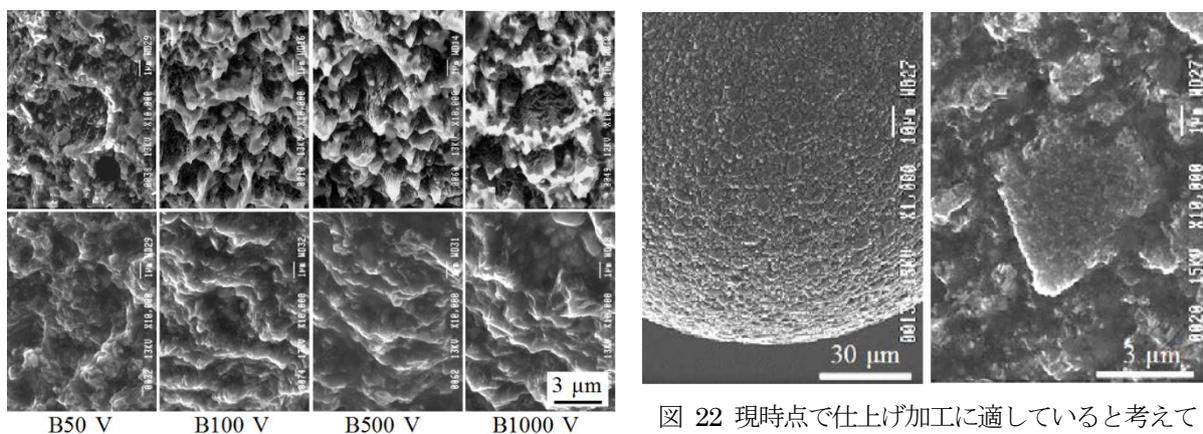


図21 バイアス(B)電圧を変化させた場合に得られた砥石作用面の状態(ターゲット出力10 W, アンテナ出力180 W)

図22 現時点で仕上げ加工に適していると考えているPCD製マイクロ研削工具(真空度0.5 Pa, ターゲット出力10 W, アンテナ出力70 W, バイアス電圧1 V, 酸素100%, エッチング時間5 h)

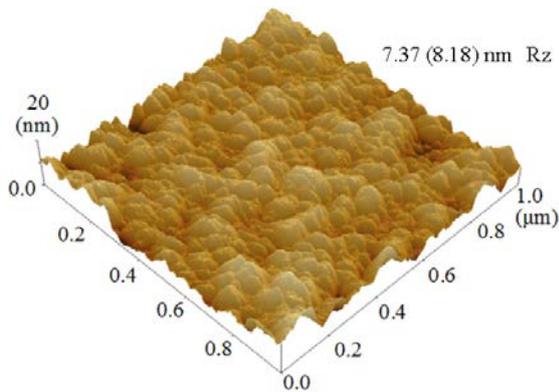


図 23 図 22 のようにイオンエッチングされたダイヤモンド砥粒のトポグラフ (AFM を用いて測定, 粗さ約 8 nm Rz)

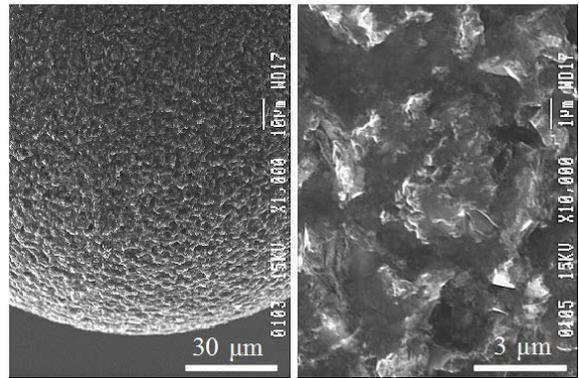


図 24 現時点で粗加工に適していると考えている PCD 製マイクロ研削工具(真空度 0.5 Pa, ターゲット出力 20 W, アンテナ出力 180 W, バイアス電圧 1 V, 酸素 100 %, エッチング時間 5 h)

る。本研究を開始した当初の目標どおり、平坦に予備成形したダイヤモンド砥粒の表面に切れ刃として作用する微細な凹凸を成形することができた。AFM を用いて測定した砥粒表面のトポグラフは図 23 に示すとおりである。凹凸の高さは約 8 nm であり、ダイヤモンドのメッシュサイズに換算すると #187,500 に相当する。砥石作用面ではなくダイヤモンド砥粒の表面に目詰まりが生じる可能性は高いが、目詰まりを防止できれば仕上げ加工用の工具として使用できると考えている。

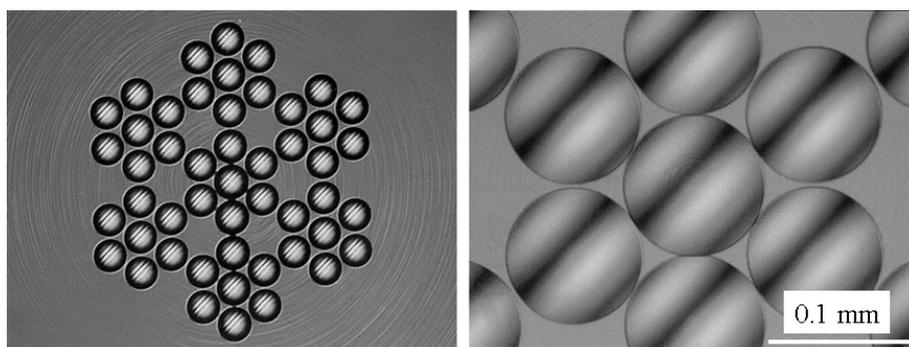
図 24 に示しているのは、現時点で粗加工に適していると考えている PCD 製研削工具の砥石作用面である。Co で被覆されていた破碎した砥粒が、電解加工と WA スティックを使ったドレッシングを行うことによって砥石作用面に露出した状態を表している。ただし、切れ刃として作用するダイヤモンド砥粒のエッジ部分は、電着工具とは異なり半球状の砥石作用面に対して法線方向を向いているように見える。この現象の発生原因については今のところ解明できていない。おそらく、イオンエッチング中に半球状の砥石作用面に付着する Fe と関係があるのではないかと考えている。

4. ナノ fp 加工技術

4.1 研究目的

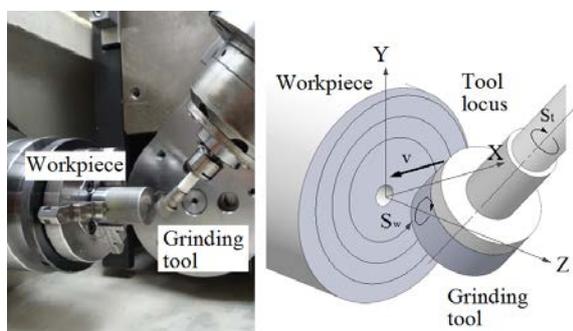
図 25 に示しているのは、2009 年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会において(株)ソディックエフ・ティが配布したパンフレットより複写した、樹脂製マイクロレンズアレイを量産するためのリン青銅製の金型である。リン青銅に対して超精密切削を行い成形した金型であり、個々のレンズのサイズは直径が 0.1 mm である。

2010 年度以降、硬さが 26.2 GPa の超硬合金に対してナノマイクロ機械加工を行い、形やサイズは同じ、ただし粗さが 10 nm Rz, 形状精度が 20 nm/0.1 mm のレンズ金型を研磨レスで作ることができる加工技術の開発を行ってきた⁶⁾。その結果、レンズの加工には図 22 や図 24 に示した PCD 製マイクロ研削工具が有効であることが確認できていた。ただし、過去 3 年の間に図 25(a)に示したレンズ基材表面の同心円状の傷を



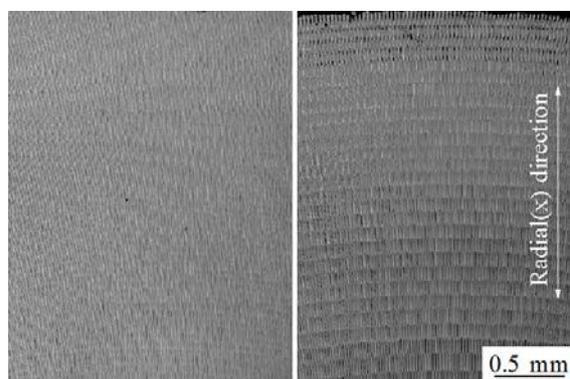
(a) レンズ全体像 (b) レンズ拡大像

図 25 樹脂製・医療用内視鏡複眼レンズの量産に用いられているリン青銅製の金型((株)ソディックメカテック(現(株)ソディックエフ・ティ)パンフレットより複写, 2009 年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会にて配布)



(a) 装置の外観 (b) 端面研削の要領

図 26 研削実験に使用した装置の外観と円柱状・超合金の端面に対する研削加工の要領



(a) 0.5 mm/min (b) 1 mm/min

図 27 工具回転数を 25000 rpm, ワーク回転数を 10 rpm に設定した上で送り速度を変化させた場合に得られた研削加工面

除去することができなかった。本研究は「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を開発」するために実施したが、ナノマイクロ機械加工技術の開発に関わるほとんどの研究時間はレンズ基材の表面に生じる同心円状の傷を除去することに費やした。

すなわち、硬さが 26.2 GPa Hv で直径が 20 mm の円柱状・超合金の端面に対して研削加工を行い、研磨レスで粗さが 10 nm Rz, 形状精度が PV 値で 20 nm の加工面を作ることができる、メッシュサイズが #600 のダイヤモンド電鍍工具や PCD 製研削工具に対するツルーイング技術や、これらの工具を使ったナノメータ研削加工技術の開発を行った。

4.2 研削加工に使用した装置

図 26 に示しているのは、研削実験に使用した装置の外観と円柱状・超合金の端面に対する研削加工の要領である。工作機械には制御分解能が 10 nm の非球面レンズ加工機(東芝機械(株)製 ULG-50A), 被削材には硬さが 26.2 GPa Hv で直径が 20 mm のバインダレス超合金(ダイジェット(株)製 CW500)を使用した。研削工具にはメッシュサイズが #600 で直径が 6 mm のダイヤモンド電鍍工具や、ダイヤモンドの一次粒子径が 4~6 μm で工具先端半径が 3 mm の焼結ダイヤモンド(PCD, 住友電工(株)製 DA150)を使用した。

4.3 ダイヤモンド電鍍工具に対するコンディショニング

まず初めに、砥石スピンドルをワークスピンドルと対向させて電鍍工具の外周と端面に対して機上放電加工を行い、電鍍工具の外形を6 mmに成形すると同時に工具の芯振れを除去した。次に、図26に示したようにYZ平面内で砥石スピンドルを45度傾斜させ、砥石作用面として作用する幅が100~150 μmのチャンファを成形した。化学気相合成法で作られた直径が15 mmのダイヤモンド製円板(CVD, (株)エレメントシックス製CDE R15005-360P)をツルアに使用、粒径が8-16 ~0-1/5 μmのダイヤモンドスラリを用いた湿式ラッピングを行うことによってチャンファの成形と、砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を揃えるためのツルーイングを行った。また、直径が15 mmの硬質ポリウレタンパッド(ニッタ(株)製IC1000)をポリシャに使用し、平均粒径が6 μmのWAスラリを用いた湿式ラッピングを行うことによってドレッシングを行った。ツルーイングとドレッシングに要した合計時間は約8時間である。

4.4 PCD製研削工具に対するコンディショニング

直径が6 mmの超合金製丸棒の先端にろう付けされた円柱状のPCD製工具素材に対してレーザ加工、酸素プラズマを用いた反応性イオンエッチング、ならびに電解加工を行うことによって工具先端半径が3 mmのPCD製研削工具を試作した。PCD製研削工具を砥石スピンドルに取付けた後、ワークスピンドルに取付けたCVD製ツルアに対して乾式研削を行い、芯振れを除去するためのツルーイングを行った。ツルーイングに要した時間は約10分である。

4.5 ナノfp加工技術

図27に示しているのは、砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端が揃っていないダイヤモンド電鍍工具を使用し、超合金に対する端面研削を行った場合に得られた典型的な加工面の様子である。図26(b)に示したように砥石スピンドルの回転数をSt、ワークスピンドルの回転数をSw、砥石の半径方向送り速度をv、ならびに被削材の直径をdと表すと、図27に見られる円周方向の砥粒の打撃間隔fpと半径方向の砥粒の打撃間隔frは、

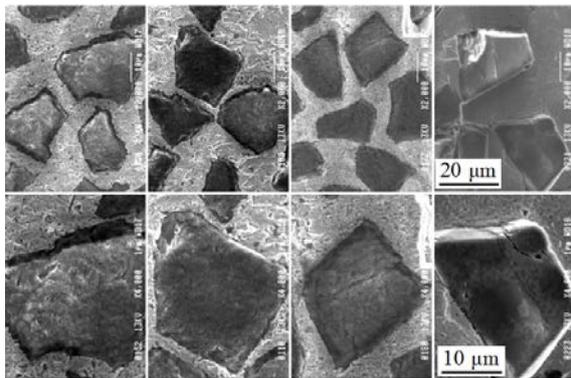
$$fp = \pi \cdot d \cdot Sw / St, \quad \dots(1)$$

$$fr = v / Sw, \quad \dots(2)$$

と求められる。本研究では、加工条件の目安としてfpをfrと等しく設定すると同時に、frやfpの値がメッシュサイズが#600のダイヤモンド砥粒の平均粒径(26.8 μm)よりも小さくなるように設定し、超合金の端面に対する研削加工を行った。

4.6 円柱状・超合金の端面に対するナノメートル研削

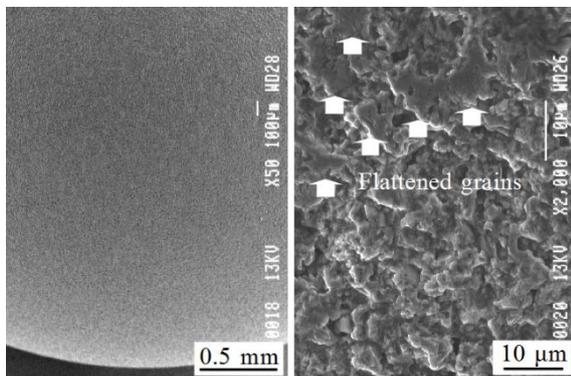
図28に示しているのは、メッシュサイズが#600のダイヤモンド電鍍工具に対し、ダイヤモンドスラリの粒径を変えツルーイングを行った場合に観察された砥石作用面の状態である。図28(a)~図28(c)に示しているのはツルーイング後に観察した砥石作用面、図28(d)に示しているのは図28(c)の砥石作用面に対してドレッシングを行った後にツルーイングを行った砥石作用面である。図28(d)のように成形したダイヤモンド電着工具を使用し、円柱状・超合金の端面に対して研削加工を行った場合に得られた加工面の様子を図29に示している。共焦点形のレーザ走査顕微鏡の微分干渉モードを用いて取得した画像である。レーザ走査顕微鏡で観察した加工面の粗さは20 nm Rz以下であり、過去3年の間に消すことができなかった。



(a) 4-6 (b) 2-3 (c) 1/2-2 (d) 0-1/5
 図 28 ダイヤモンドスラリの粒径を変えツルーイングを行った場合に得られたダイヤモンド砥粒のようす



(a) 内側 (19 nm Rz) (b) 外側 (20 nm Rz)
 図 29 図 28 に示したダイヤモンド電着工具を用いた場合に得られた研削加工面 ($f_p = f_r = 17 \mu\text{m}$)



(a) 工具の外観 (b) 砥石作用面の状態
 図 30 工具先端半径が 3 mm の半球状 PCD 製研削工具の外観と砥石作用面の状態



(a) 内側 (23 nm Rz) (b) 外側 (25 nm Rz)
 図 31 図 30 に示した PCD 製研削工具を用いた場合に得られた加工面 ($f_p = f_r = 12 \mu\text{m}$)

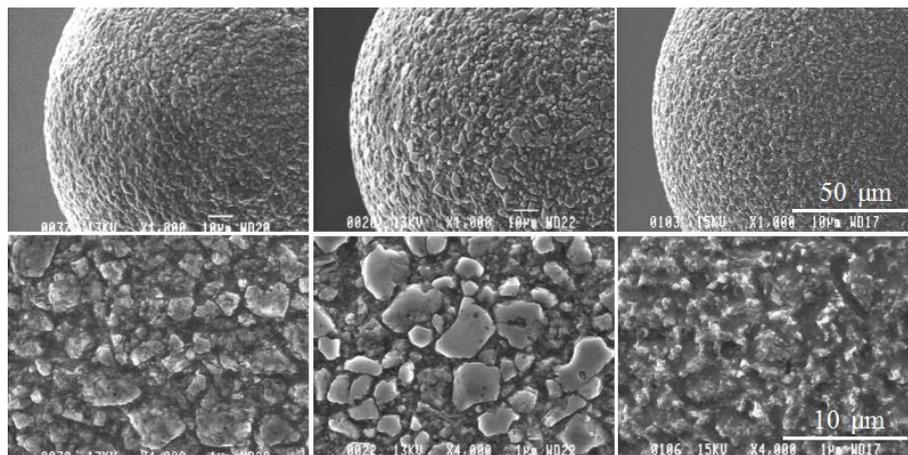
図 25(a)の写真に見られる同心円状の砥粒の条痕を完全に除去することができた。

工具回転中心から砥石作用面上にあるダイヤモンド砥粒の高さを揃えることができれば、ダイヤモンド電鍍工具よりも耐摩耗性に優れた PCD 製研削工具を用いた場合にも図 29 と同様に平滑な加工面が得られると考えられた。そこで、工具の先端半径が 3 mm の PCD 製研削工具を試作し、超硬合金の端面に対する研削実験を行った。図 30 に示しているのは、芯振れを除去するためのツルーイング後に観察した PCD 製研削工具の外観と砥石作用面の状態である。図 30(b)に矢印で示したダイヤモンド砥粒は CVD 製ツールと接触した砥粒であり、砥粒の先端が平坦に摩滅している。図 30 に示した PCD 製研削工具を用いて端面研削を行った場合に得られた加工面のようすを図 31 に示している。被削材の外周部には、程度は異なるが図 27 に示した量目状の砥粒の条痕が観察される。これは、平坦化された砥粒の摩滅幅に比べて f_p や f_r の値を大きく設定したためであり、 f_p や f_r の値を小さくすれば防止できる。以上のように得られた研削実験の結果やツルーイングやドレッシングに要する時間を併せて考えると、円柱状・超硬合金の端面成形には PCD 製研削工具が適していると考えている。

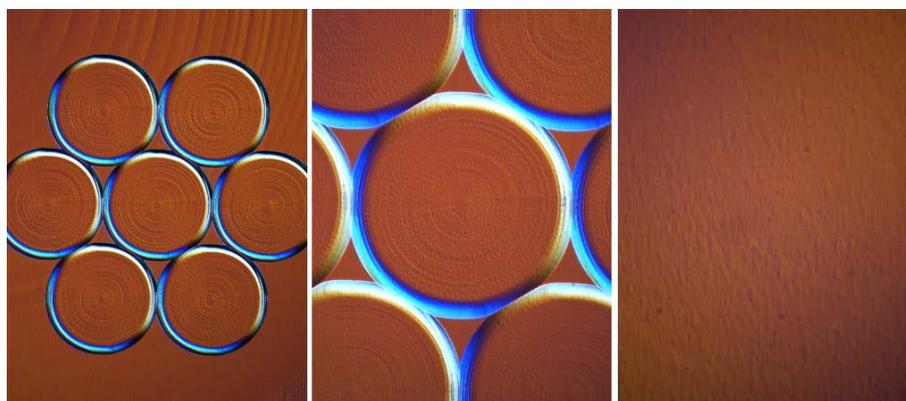
4.7 円柱状・超合金の端面に対するマイクロレンズの加工

粗さを 50nmRz 前後に成形した円柱状・超合金の端面に対してマイクロ研削加工を行い、直径が 0.3mm のレンズアレイを成形した。図 32 に示しているのは、レンズアレイの成形に使用した工具先端半径が 0.1 mm の PCD 製マイクロ研削工具の外観である。図 32(a)に示しているのはダイヤモンドスラリを用いた湿式ラッピングの後に電解加工と WA スティックを用いたドレッシングを行い成形した工具⁽⁶⁾、図 32(b)に示しているのは湿式研削を行うことによって砥石作用面を平坦に成形した後⁽²⁵⁾、電解加工と WA スティックを用いたドレッシングを行い成形した工具⁽²⁴⁾、ならびに図 32(c)に示しているのは湿式研削を行って砥石作用面を平滑に成形した後にイオンエッチングと WA スティックを用いたドレッシングを行い成形した工具の外観⁽¹⁹⁾である。

図 33 に示しているのは、図 32(c)に示した工具を用いて成形したレンズ型の光学微分干渉顕微鏡画像である。図 33(a)や図 33(b)に示した画像によれば、加工面には同心円状の砥粒の条痕が残っている。これは研削工具の切れ味が加工中に変化した場合に生じる現象であり、図 32(c)のように成形した砥粒の先端をわず



(a) 湿式ラッピング+ECM (b) 湿式研削+ECM (c) IE+ECM
 図 32 マイクロレンズの加工に使用した工具先端半径が 0.1 mm の PCD 製マイクロ研削工具(ECM: 電解加工, IE: イオンエッチング)



(a) ×10 (b) ×20 (c) ×100
 図 33 研削加工面の光学微分干渉顕微鏡画像(図 32(c)に示した工具を使用)

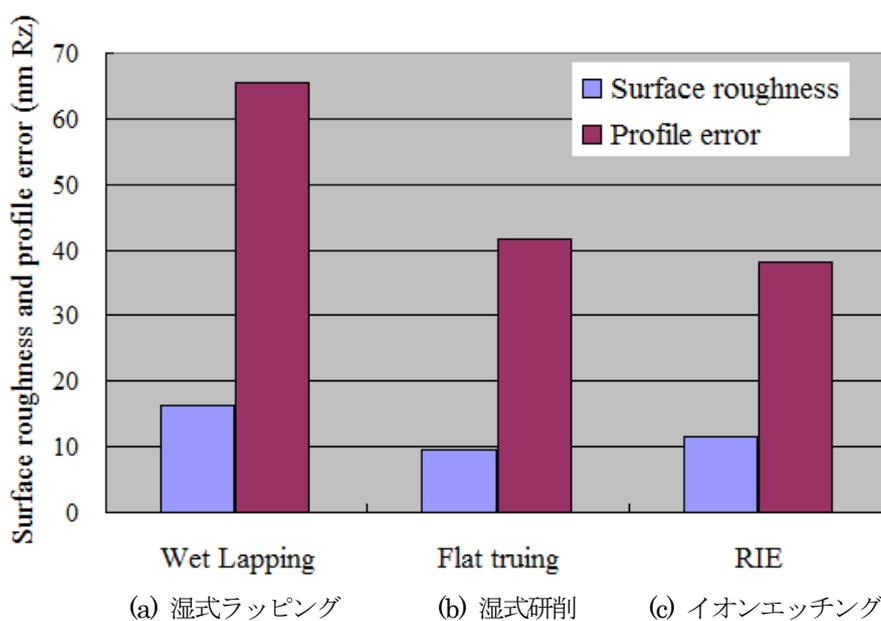


図 34 白色干渉顕微鏡を用いて測定した加工面の粗さと形状誤差

かに摩滅させることによって回避できる。また、レンズ中心部分の形状不正を除去するためには誤差修正加工を行う必要がある。図 34 に示しているのは、白色干渉顕微鏡(Zygo NewView 7200)を用いて測定した加工面の粗さと形状誤差である。粗さの発生要因は図 34(b)の写真に見られる同心円状の砥粒の条痕、形状誤差の発生要因は図 34(a)の写真に見られるレンズ中央部分の形状不正である。研削実験に使用した非球面レンズ加工機の制御分解能は 10 nm である。したがって、加工面の粗さはともかく形状誤差を 10 nm 前後の値に成形できるナノマイクロ機械加工技術を開発する必要があると残されている。

5. おわりに

ガラス製レンズを量産するために用いられている、硬さが 26.2 GPaHv の超硬合金に対して直径が 0.1 mm 以下、粗さが 10 nm Rz, ならびに形状精度が PV 値で 20 nm 前後のマイクロレンズを研磨レスで作るため、超硬合金に対してナノマイクロ機械加工を行うことができる切削・研削工具や、ナノマイクロ機械加工技術を開発するための研究を行った。

第 2 章には、ナノ多結晶ダイヤモンドに対してレーザ加工、熱化学反応を利用した乾式ラッピング、ならびにアルゴンプラズマを用いたイオンエッチングを行い、ナノ多結晶ダイヤモンド製切削工具の切れ刃の丸み半径を原子半径と同じサイズに成形するために行った研究の成果を示した。得られた研究の成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 焼結助剤として用いられているコズレトを炭化ホウ素で置換した PCD 製円板をラップに使用してレーザ成形した NPD 製ノーズ R バイトのすくい面や逃げ面に対して乾式ラッピングを行うと、すくい面の粗さを 0.5 nm Rz, 逃げ面の粗さを 2 nm Rz まで成形することができた。熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行い切れ刃の丸み半径を 0.5 nm 程度に成形するためには、逃げ面の粗さを 0.5 nm Rz 以下に成形できる乾式ラッピング技

術を開発する必要がある。

- (2) NPD に対してアルゴンプラズマを用いたイオンエッチングを行うと、NPD の表面に衝突するアルゴン原子によって NPD を構成する炭素原子が原子レベルでスパッタアウトするといった現象が発生する。したがって、乾式ラッピングを行い切れ刃の丸み半径を 0.5 nm 程度に成形した NPD 製ノーズ R ノایتに対してイオンエッチングを行えば、切れ刃の丸み半径を 0.5 nm 以下に成形できる可能性は高い。

第3章には、焼結ダイヤモンド製の研削工具に対して酸素プラズマを用いた反応性イオンエッチングを行い、ダイヤモンド砥粒の表面に微細な切れ刃として作用するナノスパイクを作るために行った研究の成果を示した。得られた研究の成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 砥石作用面を平坦に予備成形した PCD 製研削工具をステンレス製の工具ホルダに装着し、同工具に対して酸素プラズマを用いた反応性イオンエッチングを行うと、工具ホルダからスパッタアウトされて平坦に成形されたダイヤモンド砥粒の表面に付着した鉄がマスクの役割を果たすため、砥粒の表面に微細な切れ刃として作用するナノスパイクを作ることができる。
- (2) PCD を構成するダイヤモンド粒子の境界には焼結助剤として用いられているコバルトや破碎したダイヤモンド砥粒が偏析している。この PCD に対して酸素プラズマを用いたイオンエッチングを行うとコバルトがマスクの役割を果たしてコバルトの下層にあるダイヤモンド砥粒はエッチングされなくなる。したがってイオンエッチング後の PCD に対して電解加工や WA スティックを用いたドレッシングを行ってコバルトを除去すると、砥石作用面には鋭利な切れ刃を持つ破碎したダイヤモンド砥粒が露出する。

第4章には、ダイヤモンド電鍍工具や焼結ダイヤモンド製の研削工具を使用して円柱状・超合金の端面に対して研削加工を行い端面の粗さを 20 nm Rz 以下に成形できる、ナノマイクロ研削加工技術を開発するために行った研究の成果を示した。得られた研究の成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 工具の回転中心から砥石作用面上にあるダイヤモンド砥粒の先端までの距離を完璧に揃えるためのツールイングを行うと同時に、工具一回転あたりの円周方向送り量とワーク一回転あたりの工具の半径方向送り量を等しく設定し、しかもこれらの送り量がダイヤモンド砥粒の摩滅幅よりも小さい場合には、端面を 20 nm Rz 以下の粗さに成形することができる。
- (2) 工具スピンドルのラジアル方向の剛性が低い場合、切れ刃のよい研削工具を用いて超合金の端面に対して研削加工を行うと形状精度のよい加工面は作れるが、目詰まり等の要因で切れ味が微妙に変化すると同心円状の砥粒の条痕が加工面に残る。これに対して、(1)の項目で紹介した砥粒の先端を摩滅させた研削工具を用いて研削加工を行うと、形状創成能力は低下するが粗さが 20 nm Rz 以下の平滑な加工面を成形できる。
- (3) 現時点で成形できているレンズ金型の粗さは 10 nm Rz、形状精度は 40 nm 程度である。粗さの発生要因は(2)で紹介した同心円状の砥粒の条痕、形状誤差の発生要因は中央部分の形状不正である。同心円状の砥粒の条痕は砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端をわずかに摩滅させることによって防止できると、また、誤差修正加工を行いレンズ中心部分の誤差を除去することができれば、形状精度を 10 nm まで上げることは不可能でないと考えている。

参考文献

- (1) T. Irifune · A. Kurio · S. Sakamoto · T. Inoue · H. Sumiya, Ultra hard polycrystalline diamond from graphite, *Nature*, 421-6923 (2003), pp. 599-600.
- (2) T. Masuzawa · H. K. Tönshoff, Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools, *Annals of the CIRP*, Vol. 46/2(1997), pp. 621-628.
- (3) T. Masuzawa, State of the Art of Micromachining, *Annals of the CIRP*, 49/2 (2000), pp. 1-16.
- (4) 株式会社アライドマテリアル, "ダイヤモンド工具・CBN 工具", <http://www.allied-material.co.jp/products/diamond/cutting/upc/>, (2012/12/20) .
- (5) 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.
- (6) 伊東好樹・合屋尚子・原田武志・仙波卓弥, 焼結ダイヤモンド製マイクロ研削工具に対する砥粒平坦化ツルーイングとドレッシング技術, *日本機械学会論文集 C 編*, 76-771 (2010-11), pp.3134-3142,
- (7) 仙波卓弥・天本祥文, PCD 製マイクロ研削工具に対するツルーイングとドレッシング技術, *日本機械学会九州支部講演論文集 No.138-1* (2013-3), pp.351-352.
- (8) 井川直哉, *精密工学会誌* 59-4 (1993), pp. 673- 679.
- (9) S. Shimada · N. Ikawa · H. Tanaka · G.Ohmori · J.Uchikoshi, Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation, *Annals of the CIRP*, 42/1 (1993), pp. 91-94.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 角谷均・入船徹男, 直接変換焼結による高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの生成メカニズムと特性, *粉体および粉末冶金*, 53-5 (2006), pp.452-458.
- (14) Linus Pauling, *The Nature of the Chemical Bond, Third Edition*, (1960), pp. 93, Cornell University.
- (15) F. Furushiro · H. Tanaka · M. Higuchi · Y. Yamaguchi · S. Shimada, Suppression Mechanism of Tool Wear by Phosphorous Addition in Diamond Turning of Electroless Nickel Deposits, *CIRP Annals*, Vol. 59 (2010), pp.105-108.
- (16) 諸節祐子・松下孟・三木則尚, 鉄系金属/ダイヤモンドの熱化学反応を利用した単結晶ダイヤモンドの加工, *電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会資料*, Vol.MSS-08, No.2 (2008), pp.7-11.
- (17) 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イオンエッチング技術の開発, *NEW DIAMOND*, 17-3 (2001), pp.15-20.
- (18) 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イオンエッチング, *ABTEC2014 砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (USB)*, B04 (2014-9), pp.105-106.
- (19) 飯山 公太郎・仙波 卓弥・藤山博一, PCD 製研削工具に対する反応性イオンエッチング, *ABTEC2013 砥粒加工学会学術講演会講演論文集*, C29(2013-8), CD.
- (20) 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*, 71-8 (1995), pp.704-710.
- (21) 仙波卓弥・濱口元基・原田武志, 合金強化形・極微粒ダイヤモンド電鋳工具の開発, *日本機械学会論文集 C 編*, 73-726 (2007-2), pp. 626 - 631.
- (22) 原田武志・仙波卓弥・Brian J. STONE, 半球状極微粒ダイヤモンド電鋳工具に対する砥粒平坦化ツルーイング技術, *日本機械学会論文集 C 編*, 74-738 (2008-2), pp. 219 -224.
- (23) 合屋尚子・孫万福・天本祥文・仙波卓弥, 極微粒ダイヤモンド電鋳工具に対する砥粒平坦化ツルーイングのメカニズム, *日本機械学会論文集 C 編*, 77-782 (2011-10), pp. 3904-3915.
- (24) 木原敏貴・単承玉・天本祥文・仙波卓弥, PCD 製マイクロ研削工具に対する電解ドレッシング, 2012 年度精密工学会九州支部第 13 回学生研究発表会, (2012-12), pp.60.
- (25) 李佩霜・仙波卓弥・天本祥文, PCD 製マイクロ研削工具に対する砥粒平坦化ツルーイングのメカニズム, *ABTEC2014 講演論文集 (USB)*, B03(2014-9), pp.102-103.

(2014/12/24)

