

## 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



最終学歴 1982 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

「減らない工具」の開発と「理想的加工法」を具現化することは在職中に成し遂げたいと思っていた夢であり、振り返れば夢が夢で終わる可能性が高かった研究のテーマでした。こんな夢で終わるかもしれない研究のテーマに対し、三井金型振興財団からは 2012 年度以降、二度に渡って研究助成を賜うことができました。夢が完璧にかなったとは思っていませんが、少しは夢に近づくことはできたと考えています。「減らない工具の開発」はともかく、「理想的加工法」を具現化することに関しては、同加工法が具現化されたことを証明するための研究を継続して行い、完全無欠な形で在職中に完成させたいと考えています。

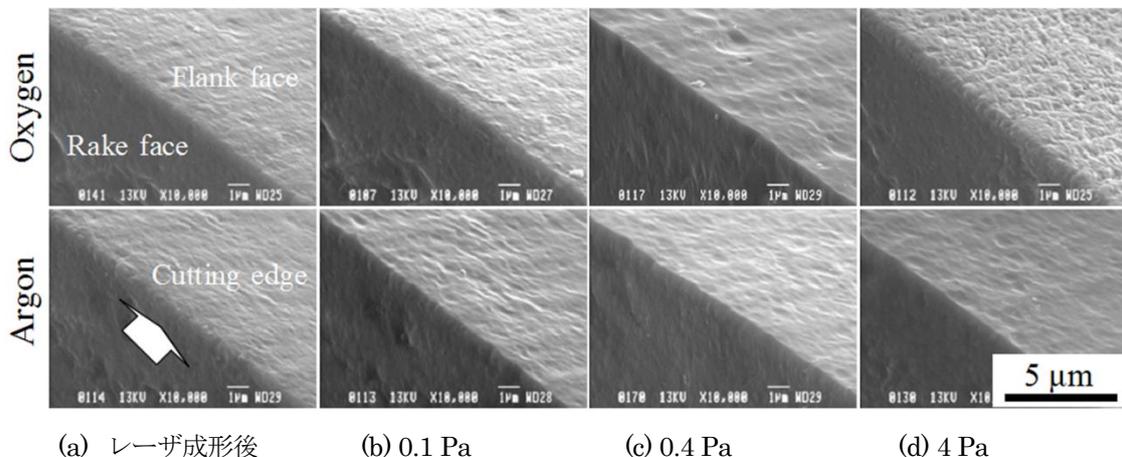
## 1. はじめに

1970年に出版された「切削加工論」<sup>(1)</sup>の中で、中山一雄先生は理想的加工について次のように表現されている。『切削加工の目的は工作物から不要な部分を排除して新生面を作ることであり、工作物の一部を塑性変形させ切りくずを排出するために費やされるエネルギーは無駄なエネルギーである。木材を木目に沿ってナタで割る時、二片を押しつげると元の形に戻る。これは、理想的加工を行ったことになる。』もしも切りくずの厚さが切込み深さと同じであれば、切りくずを新生面に押しつければ表面を覆うことができる。したがって、切りくずの厚さと切込み深さと同じになる切削加工のことを中山先生は理想的加工と表現されたのかもしれない。

1986年に弊学に着任して以来この「切削加工論」を教科書に使ってきた関係で、在職中に理想的加工法を具現化したいと思っていた。具体的には、工作物を構成する原子の半径よりも切削工具の刃先の丸み半径が小さければ、工作物から数原子層を切りくずとして除去できるのではないかと考えていた。そんな中、2012年1月から2014年8月までの間、三井金型振興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」という題目で研究を行った。

超微粒子超合金に対し、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(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)製の切削工具や、焼結ダイヤモンド(Poly-Crystalline Diamond: PCD)製の研削工具を開発するための研究を行った<sup>(2)</sup>。この研究を進める過程で、レーザ成形したNPD製ノーズRバイトに対してアルゴンや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、図1に示すように、導電性がないために本来はエッチングされるはずがないNPDがエッチングされ、切れ刃が鋭利化されることを発見した。

この現象を利用すれば、工作物を構成する原子の半径よりもNPD製ノーズRバイトの刃先の丸み半径を小さく成形できる可能性があると考え、本研究を立案した。幸いなことに「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-」と題した



(a) レーザ成形後 (b) 0.1 Pa (c) 0.4 Pa (d) 4 Pa

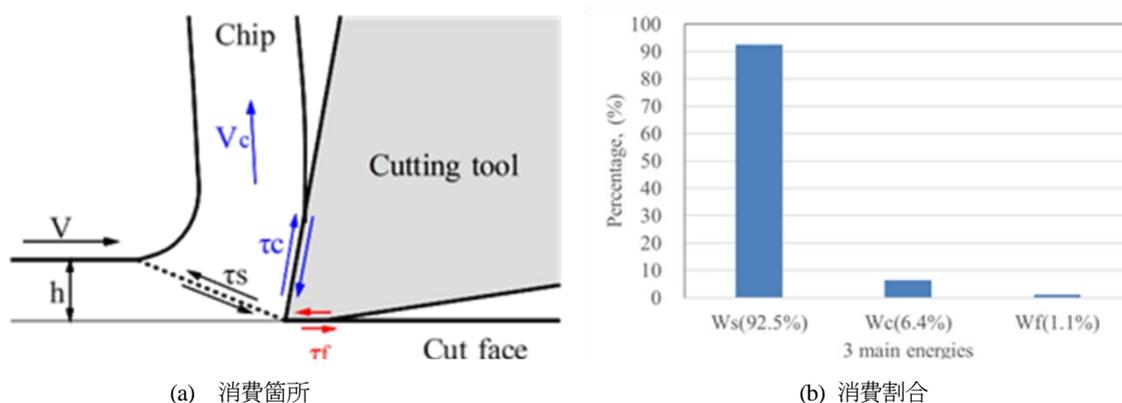
図1 レーザ成形したNPD製ノーズRバイトに対しドライエッチングした結果 (Antenna: 180 W, Target: 0 W, Bias: 1000 V, Vacuum: varied, Time: 10 h)

研究が三井金型振興財団の2015年度特別研究に採択され、2015年9月から2020年8月までの5年間、同研究を行う機会に恵まれた。本報告書には、主として2019年9月から2020年8月に行った研究の成果をまとめている。過去4年間の研究成果<sup>(3)~(6)</sup>は、同財団のホームページにアップロードされているので参考文献として引用した。

## 2. 理論的背景

図2(a)に示しているのは、切削加工時にエネルギーが消費される箇所を示した模式図である。剪断面での剪断応力を  $\tau_s$ 、切りくずとすくい面との摩擦応力を  $\tau_c$ 、ならびに逃げ面と新生面との摩擦応力を  $\tau_f$  とすれば、剪断面での剪断変形  $W_s$ 、切りくずとすくい面途の摩擦  $W_c$ 、ならびに逃げ面との摩擦  $W_f$  に費やされるエネルギーは以下のように求められる<sup>(7)</sup>。

$$W_s = \int (\tau_s \cdot \gamma_s) dv = \tau_s \cdot \gamma_s \cdot b \cdot h \cdot V \quad \dots (1)$$



(a) 消費箇所 (b) 消費割合

図2 切削加工時にエネルギーが消費される箇所と消費割合

表1 式(1)~(3)に使った記号の物理的な意味と記号に代入した値

Well known formula	statement of symbols
$W_s = (\tau_s \times \gamma_s) \times (b \times h \times v)$	$W_s$ : Energy used for plastic deformation at shear plane
$\tau_s = G \cdot \gamma_s$	$G$ : elastic shear modulus (59 Gpa), $\gamma_s$ : shear strain
$\gamma_s = \tan(\phi - \gamma) + \cot \phi$	$\phi$ : shear angle, $\gamma$ : rake angle(0°)
$b \doteq v/s$	$b$ : Chip width, $v$ : feed rate(1 mm/min), $s$ : work revolution speed(200 rpm)
$v = \pi \times D \times s$	$v$ : cutting speed, $h$ : applied depth of cut (5 μm), $D$ : work diameter(20 mm)
$W_c = \tau_c \times (l_c \times b \times v_c)$	$W_c$ : Energy used for friction on rake face
$\tau_c \doteq \tau_s / 2$	$\tau_c$ : frictional stress bwtween chip and rake face
$l_c = h \sin(\phi + \beta - \gamma) / \sin \phi \cos \beta$	$l_c$ : contact length between chip and rake face
$\beta = \pi / 2 + (\gamma - 2\phi)$	$\beta$ : frictional angle (Merchant)
$v_c = v \times Ch$	$v_c$ : chip velocity, $Ch$ : cutting ratio(0.3)
$W_f = \tau_f \times l_f \times b \times V$	$W_f$ : energy used for friction on clearance face
$\tau_f \doteq \tau_c / 2$	$\tau_f$ : frictional stress bwtween clearance face and cut face
$l_f \doteq l_c / 10$	$l_f$ : contact length between clearance face and cut face

$$W_c = \int \tau_c ds = \tau_c \cdot b \cdot l_c \cdot V_c \quad \dots (2)$$

$$W_f = \int \tau_f ds = \tau_f \cdot b \cdot l_f \cdot V \quad \dots (3)$$

式(1)~(3)において**b**は切りくずの幅、**h**は切込み深さ、**V**は切削速度、**l<sub>c</sub>**は切りくずがすく面と接触する長さ、**V<sub>c</sub>**は切りくずの流出速度、ならびに**l<sub>f</sub>**は新生面が逃げ面と接触する長さである。

これらの記号に表1に示した物理的に意味のある値を代入し、無酸素銅の正面切削に費やされるエネルギーを求めると、エネルギーの消費割合は図2(b)のようになる。エネルギーを計算する上で大胆な仮定をしているので、エネルギーの消費割合が正しい保証はない。しかし、切削加工時には大部分のエネルギーが剪断面での剪断変形エネルギーに使われていることに間違いはない。この剪断変形に費やされるエネルギーを0に近づけるためには、単位時間に排出される切りくずの体積に相当する(**b**・**h**・**V**)の値を0に近づければよい。

無酸素銅の正面切削を例にとれば、切りくずの幅**b**は

$$b \doteq f = v/s \quad \dots(4)$$

と求められる。ここで、**f**は工作物1回転当たりの送り速度、**v**は工具の送り速度、ならびに**s**は工作機械主軸の回転数である。したがって、加工条件を変えれば**b**や切削速度**V**は0に近づけることができる。切込み深さ**h**についても、工作機械の制御分解能と同じ程度にまでは下げることができる。しかし、現時点で超精密切削加工に用いられる工作機械の制御分解能は1nm以下に達しているのに対し、超精密切削に用いられる単結晶ダイヤモンド製切削工具の刃先の丸み半径は10nm前後である。この、刃先の丸み半径が大きいことが原因で、超精密切削を行ったとしても粗さを10nm Rz以下に成形することは難しい<sup>(8)・(11)</sup>。

### 3. 実験的背景

理想的加工法を具現化するための研究は2015年から開始したわけではなく、NPD製ノーズRバイトに対するレーザ加工技術<sup>(12)・(13)</sup>や、熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術<sup>(14)・(15)</sup>を開発するための研究は先に行っていた。図3に示しているのはナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工装置の模式図である。立形マシニングセンタのコラムにレーザを集光するだけでなく加工表面を観察するための光学素子を組込んだミラーボックスを取付けており、機械加工を行うのと同じ要領でNPDに対して3次元微細形状を加工できる。

NPDに対するナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工の利点は、NPDに対して高速・粗加工を行うことができることである。ただし、すくい面や逃げ面にレーザの走査軌跡が残るだけでなく、加工面にはダイヤモンド構造がグラファイト構造に変化した変質層が生成される。また、刃先を鋭利に成形することは難しいといった欠点を持っている。これらの欠点を克服するために、遷移金属とNPDとの間に生じる熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術を開発した。

図4に示しているのは、レーザ成形したNPD製ノーズバイトを立形マシニングセンタの主軸

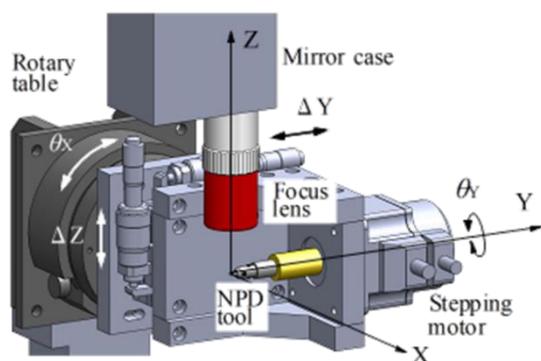


図3 ナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工装置の模式図

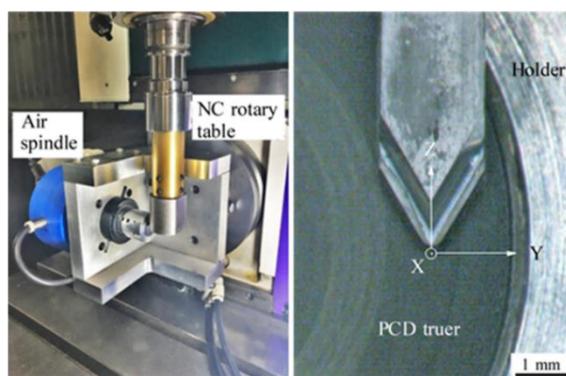


図4 NPD 製ノーズ R バイトのすくい面に対して乾式ラッピングを行っているようす

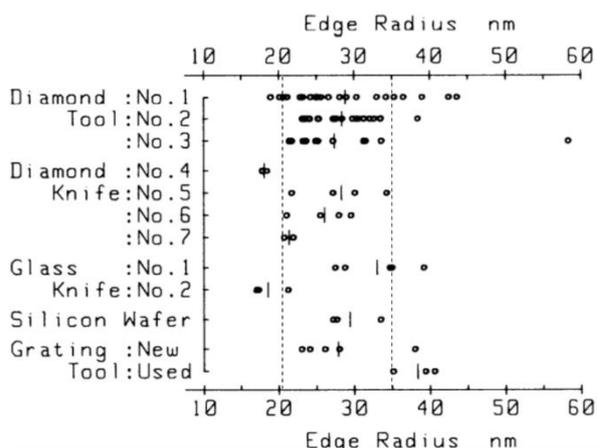


図5 改良型 SEM を使って測定した各種の切削工具刃先の丸み半径<sup>(16)</sup>

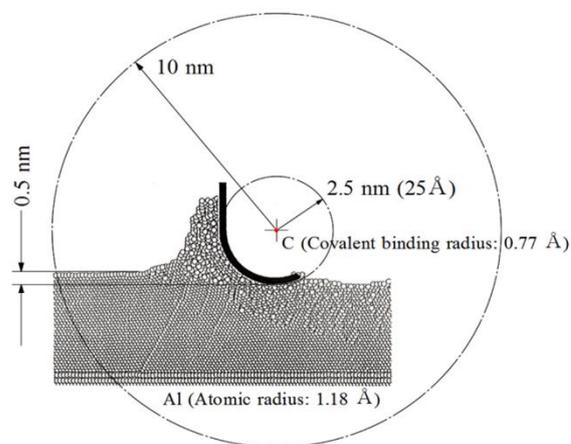


図6 分子動力学法を使って解析した切りくずの形態と刃先の丸み半径<sup>(17)</sup>

に取付け、すくい面に対して乾式ラッピングを行っているようすである。ラップには焼結助剤としてコバルト Co を使った PCD 製の円板を用いた。図4に示した写真では、このラップをエアスピンドルの主軸、エアスピンドルは治具を介して NC 円テーブルに取付けている。乾式ラッピングを行うと、すくい面や逃げ面を平坦かつ平滑にできるだけなく切れ刃を鋭利に成形できるが、刃先に欠けが残るという問題を抱えていた。

#### 4. 研究目標

図5に示しているのは、1990年に浅井先生達が改良型電子顕微鏡を使って測定した、各種切削工具の刃先の丸み半径である<sup>(16)</sup>。ダイヤモンド製切削工具(Diamond tool, No.1~No.3)の丸み半径は、当時25~30nmであったことがわかる。図6に示しているのは、純アルミニウムの超精密切削時に排出される切りくずの形態をシミュレーションした井川先生の研究成果<sup>(17)</sup>である。0.5

nm の切込み深さに比べて単結晶ダイヤモンド製切削工具の刃先の丸み半径が 2.5 nm と 5 倍程度大きいことが原因で、刃先の丸み部分は新生面を擦過するだけでなく工作物を構成する原子を前方に押し出し、これが切りくずとして排出されているようすが伺える。

図 7 に示しているのは、無酸素銅に対して超精密切削加工を行った加工面を詳細に観察した安井先生の研究成果<sup>(18)</sup>である。図 6 に示したように刃先の丸み半径が原子半径に比べて大きい場合には、加工面には粒界段差や側方バリが発生する。図 8 に示しているのは、純アルミニウム製の円板に対して正面切削を行い加工面の粗さを測定した小林先生の実験結果<sup>(19)</sup>である。工具の送り速度が 30  $\mu\text{m}$  以下の範囲では、粒界段差や側方バリが発生することが原因で粗さが 10 nm Rz 以下の加工面は作れていない。

本研究の目的は、究極の超精密切削加工法ともいえる、被削材を構成する原子の数原子層を切りくずとして除去できる理想的加工法を具現化することである。研究目的を達成するために、刃先の丸み半径が炭素の原子半径と同じ 0.1 nm 以下の NPD 製・ノーズ R バイトを試作した。また、理想的加工法が具現化されたことを証明するために無酸素銅に対する超精密切削を行った。加工面の粗さ、切りくずの形態、切りくずが発生し始める限界切込み深さ、ならびに切りくずの結晶構造を解析した。

## 5. 研究計画と実施した研究の内容

表 2 に示しているのは、2015 年 9 月から 2020 年 8 月までの間に実施した具体的な研究の内容と研究目標の達成度である。「4. 研究目標」を達成するため、以下に示す 1~3 の研究を実施した。

### 1 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発

#### ① PCD 製ラップの試作

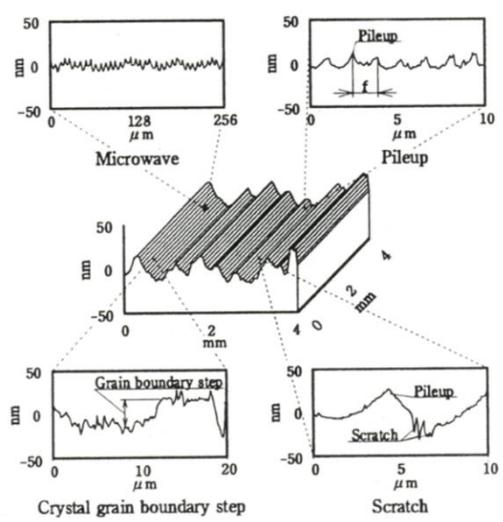


図 7 超精密切削加工面に生じる加工誤差の要因分析<sup>(18)</sup>

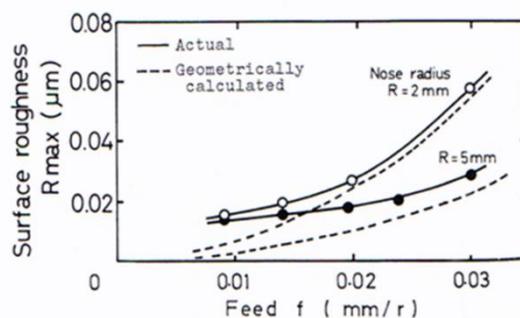


図 8 単折衝ダイヤモンド製の切削工具を使用し純アルミニウムに対して正面切削を行った場合に得られた加工面の最大高さ粗さ<sup>(19)</sup>

表2 2015年9月から2020年8月までの間に実施した具体的な研究の内容と達成度

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020	達成度%
1. 乾式ラッピング技術	① PCD製・ラップの試作		→					90
	② ラッピング装置の試作		→					90
	③ NPD製ノーズRバイトの成形						→	80
2. ドライエッチング技術	④ メカニズムの解明		→				→	50 (再開)
	⑤ NPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング						→	90
3. 切削実験	⑥ 無酸素銅に対する超精密精密切削						→	70 (継続中)
	⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作					→		100

レーザ成形した NPD 製ノーズ R バイトを乾式ラッピングするために、PCD 製のラップを試作するための技術開発を行った<sup>(20)</sup>。直径が 15 mm の PCD 製円板(トーメダイヤ, TCD98F)に対して放電加工, 湿式ラッピング, ならびに乾式ラッピングを行った。2016 年 8 月までに表面粗さが 40 nm Rz 以下, 形状精度が 0.1 $\mu$ m/7.5 mm で焼結助剤として使われている Co が表面に露出しているラップを試作できた<sup>(3)</sup>。

### ② 乾式ラッピング装置の試作

レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイトを, 乾式ラッピングする装置を試作するための技術開発を行った。PCD 製のラップを自転運動させるのに DC サーボモータを用いると, モータ軸のアキシャル方向に 0.5  $\mu$ m 前後の非同期振れが発生し, これが NPD 製ノーズ R バイトの刃先に欠けを発生させる原因になっていた。2016 年度には, DC サーボモータ, AC サーボモータ, ならびにタービン駆動方式エアスピンドルを用いた乾式ラッピング装置を試作した<sup>(4)</sup>。2016 年度に得られた研究の成果を踏まえ, 2017 年度以降はエアスピンドルを使った乾式ラッピング装置を使って NPD 製ノーズ R バイトを乾式ラッピングした。

### ③ NPD 製ノーズ R バイトの成形

熱化学反応を利用した乾式ラッピング時には, PCD 製ラップを取付けているモータのアキシャル方向に大きな負荷がかかるため, PCD 製ラップに対する乾式ラッピングは DC サーボモータを使って行い, NPD 製ノーズ R バイトに対する乾式ラッピングはエアスピンドルを使うことにした。エアスピンドルのアキシャル方向に生じる非同期振れは 50 nm 以下であったが, DC サーボモータで成形した PCD 製ラップをエアスピンドルに取付けるときに生じた面振れを除去することや, 回転振動を防ぐためにエアスピンドルの動バランスをとることに手間取った<sup>(21)</sup>。2020 年 3 月にやっと  $\times 10,000$  倍の電子顕微鏡で観察して前切れ刃に欠けが無い刃先を成形できるようになった。

## 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 メカニズムの解明

導電性がないNPDが、図1に示したようにドライエッチングされるメカニズムを解明するための研究を行った。NPD製ノーズRバイトをクランプするS45C製のホルダに石英ガラス板を取付け、ホルダからスパッタされたFeの分布を観察し、ドライエッチングの条件を決めていた<sup>(22)</sup>。この場合、ガラス板に付着したFe粒子の分布を撮影しやすいからという理由で、プラズマ源にはアルゴンガスを用いていた。この実験結果を受けて、2020年3月までは、NPD製ノーズRバイトをクランプしているS45C製のホルダからスパッタされたFeの粒子がNPDの表面に付着し、NPDに導電性を付与するためにNPDがドライエッチングされると信じていた<sup>(23)</sup>。

2020年4月にプラズマ源を酸素ガスに変えて同様の実験を行った結果、石英ガラス板に付着したFeの粒子は酸化され、絶縁皮膜に変化していることが明らかになった。つまり、これまで考えていたのは違うメカニズムでNPDがドライエッチングされていた可能性が高いことが明らかになった。このような経緯があり、当該研究については現在も継続して研究を行っている。

### ⑤ NPD製ノーズRバイトに対するドライエッチング

熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行った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い、刃先の丸み半径を炭素の原子半径と同じ0.77Åに成形することを目標に掲げて研究を行った。レーザ成形後や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と、刃先の丸みや欠けが消滅し、刃先が鋭利化されるメカニズムは2016年度に解明できていた<sup>(4),(24)</sup>。2017年度以降は原子間力顕微鏡AFMを用いて刃先の丸み半径を測定すると同時に、刃先の丸み半径を炭素原子の原子半径と同じ0.77Åに成形するための研究を行った<sup>(25)</sup>。また、AFMのカンチレバー探針の半径を測定するための標準試験片を作るための研究<sup>(6)</sup>も同時に行った<sup>(26)</sup>。

## 3 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験

### ⑥ 無酸素銅に対する超精密切削実験

酸素プラズマを用いたドライエッチングを行い、刃先を鋭利化することについての目処は2017年8月にほぼ立っていた<sup>(5)</sup>。そこで、2017年9月からは市販の単結晶ダイヤモンド製のノーズバイトを使用し、無酸素銅に対する超精密切削加工技術を修得するための基礎研究を開始した。研究を開始してから約1年の間は、時間をかけて成形したNPD製ノーズRバイトの刃先にチッピングが発生し、その原因を調べるための実験に没頭した。刃先に欠けが生じる原因が分かったのは2018年12月26日であり<sup>(6)</sup>、それ以降は、加工面の粗さ、切りくずの形態、切りくずが発生し始める限界切込み深さ、ならびに切りくずの結晶構造を解析するための研究を行った<sup>(25),(27)</sup>。

### ⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作

ダイヤモンド砥粒が強固に共有結合しているPCDは、既存のダイヤモンドホイールに比べ遙かに耐摩耗性に優れている。したがって、砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端

を平坦に摩滅させた PCD 製のマイクロ研削工具<sup>(28)-(30)</sup>を用いれば、研摩レスで直径が 0.1 mm 以下でキャビティの粗さが 30 nm Rz 以下の超合金製のマイクロレンズアレイ金型を作ることができると考えていた。本研究を立案した 2015 年 4 月の段階でも、PCD 製マイクロ研削工具の耐摩耗性はともかくレンズキャビティの粗さに関しては研究目標を達成できていなかった。そこで、表 2 に示したように本研究でも研究を継続した<sup>(31)-(6)</sup>。足かけ 8 年を費やしたことになるが、2019 年 8 月に研究目標を上回る研究の成果を得ることができた<sup>(31)-(35)</sup>。

本研究の最終年度にあたる 2019 年 9 月から 2020 年 8 月の間には、表 2 に示した「1.③NPD 製ノーズ R バイトの成形」、「2.④ドライエッチングのメカニズムの解明、⑤NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング」、ならびに「3.⑥無酸素銅に対する超精密切削実験」と題した研究を行った。本報告書には、主として最終年度に行った研究の成果をまとめた。

## 6. 熱化学反応を利用した NPD 製ノーズ R バイトに対する乾式ラッピング技術

### 6.1 レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイト

図 9 に示しているのは、素材に対してナノ秒パルスレーザを用いた走査線加工<sup>(13)</sup>を行い、すくい角を 0°、逃げ角を 10°、ならびにノーズ R を 0.4 mm に成形した NPD 製ノーズ R バイトの電子顕微鏡 SEM 写真である。すくい面や逃げ面を平坦かつ平滑に成形するだけでなく、刃先を鋭利に成形するため、レーザ成形後の NPD 製ノーズ R バイトに対してダイヤモンドと遷移金属との間に生じる熱化学反応<sup>(14),(15)</sup>を利用した乾式ラッピングを行った。

### 6.2 PCD 製ラップ

NPD 製ノーズ R バイトをラッピングするラップには、放電加工、ダイヤモンドスラリを用いた湿式ラッピング、ならびに乾式ラッピングを行って成形した直径が 15 mm の PCD 製円板（トーマイダイヤ(株)、TDC-98F2）を使用した。乾式ラッピング時には、ラップの表面に露出しているコバルト Co が NPD から電子を奪い、共有結合の強度が低下した脆弱層が NPD の表面に生成される。この脆弱層がラップの表面に露出しているダイヤモンド粒子によって擦過され除去されるといった現象が発生するため、NPD を乾式ラッピングできる。乾式ラッピングを終わった時点で測定したラップの静的な面振れは 0.07~0.2 μm、粗さは 40 nm Rz 以下である。

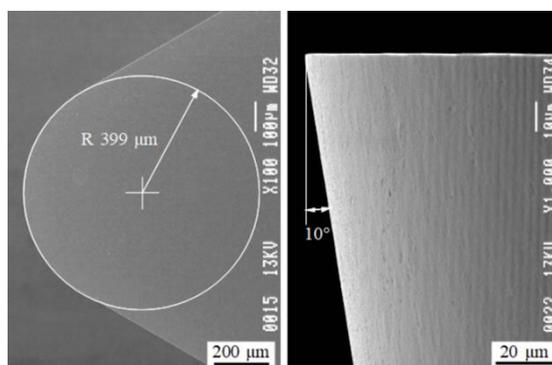


図 9 レーザ加工を行い成形したすくい角が 0°、逃げ角が 10°、ならびにノーズ R が 0.4 mm の NPD 製ノーズ R バイトの電子顕微鏡 SEM 写真

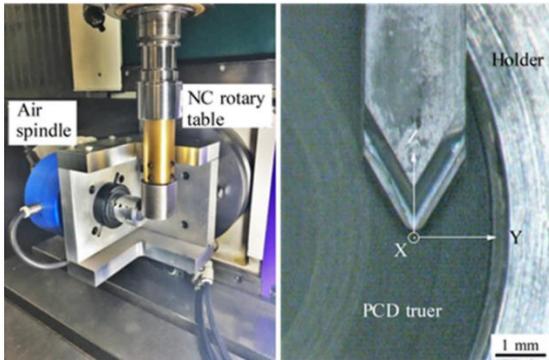


図 10 NPD 製ノーズ R バイトのすくい面を乾式ラッピングしているようす

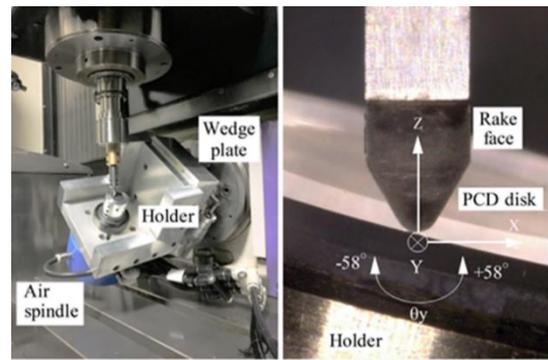
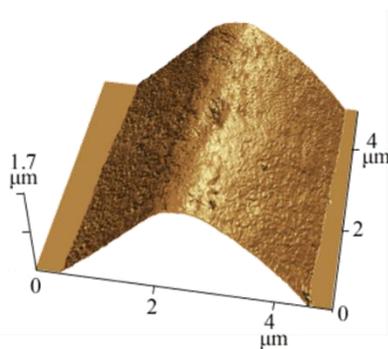
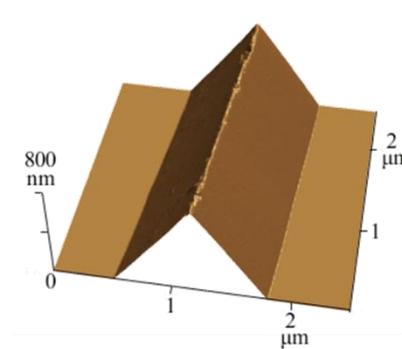


図 11 NPD 製ノーズ R バイトのすくいを乾式ラッピングしているようす



□  $5.3 \mu\text{m}$ ,  $\Delta p = 10.5 \text{ nm}$   
 $r_m: 901.1 \pm 28.8 \text{ nm}$   
 $\theta_w: 92.6 \pm 0.8^\circ$   
 $(1.0 < R < 2.0 \mu\text{m})$

(a) レーザ成形後



□  $3.2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta p = 6.3 \text{ nm}$   
 $r_m: 18.0 \pm 4.825 \text{ nm}$   
 $\theta_w: 80.0 \pm 0.9$   
 $(100 < R < 1000 \text{ nm})$

(b) 乾式ラッピング後

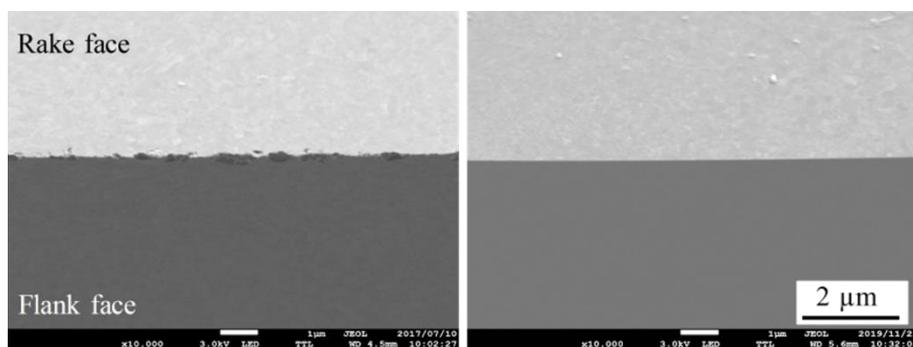
図 12 AFM を使って測定した NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃 ( $r_m$ : 刃先の丸み半径,  $\theta_w$ : くさび角,  $R$ : 刃先からの半径)

### 6.3 すくい面と逃げ面に対する乾式ラッピング

図 10 と図 11 に示しているのは、NPD 製ノーズ R バイトのすくい面と逃げ面を乾式ラッピングしているようすである。PCD 製のラップを自転運動させるためのモータにはタービン駆動方式のエアスピンドル(東芝機械, ABC25T), ラップの公転運動には NC 円テーブル(北川鉄工所, MR160)を使用した。PCD 製のラップはジュラルミン製のホルダに焼きばめし、ラップの面振れはホルダの下部に設けた 8 本の止めボルトで調節した。また、エアスピンドルの動バランスを取るために、ホルダの上部に設けた 8 本の止めボルトを使用した。すくい面をラッピングする場合には図 10 に示した X 軸の方向、逃げ面をラッピングする場合には図 11 に示した Y 軸の方向に工具を揺動させ、PCD 製のラップの同じ位置に NPD 製ノーズ R バイトが長時間接触しないようにした。揺動の振幅は  $\pm 50 \mu\text{m}$ , 揺動速度は  $1 \text{ mm/min}$  とした。逃げ面が平滑になるまで 5 時間程度ラッピングした後、 $\times 1000$  倍の机上顕微鏡で観察して刃先の欠けが見えなくなるまですくい面をラッピングした。

#### 6.4 乾式ラッピングの結果

図 12 に示しているのは、レーザ成形後と乾式ラッピング後に観察した NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃の AFM 画像である。測定に使用したカンチレバーの刃先の丸み半径は 4~10 nm である。レーザ成形後に測定値  $r_m$  で  $901 \pm 28.8$  nm あった刃先の丸み半径は、乾式ラッピング後には  $18 \pm 4.8$  nm に鋭利化された。すくい面や逃げ面も平坦に成形されている。ただし、主としてラップに面振れが生じていることが原因で、 $\times 1000$  の機上顕微鏡ではほとんど見えなかった欠けが AFM で観察すると顕在化した。図 13 に示しているのは、電界放出型走査電子顕微鏡 FE-SEM で観察した前切れ刃のようすである。過去 5 年間、この前切れ刃に生じる欠けを防ぐための研究を行った。



(a) 2015 年当時

(b) 2020 年 3 月

図 13 FE-SEM で観察した NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃( $\times 10000$  倍)

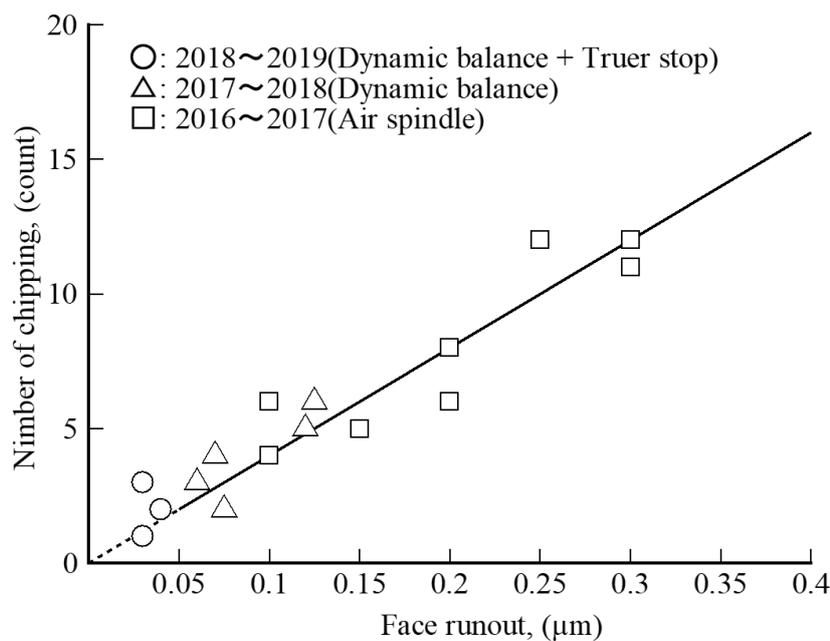


図 14 PCD 製ラップの面振れと前切れ刃に生じたチップングの数

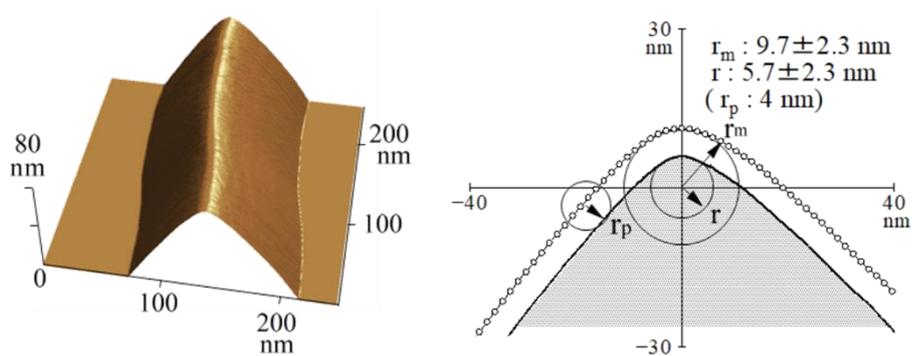


図 15 乾式ラッピング後に観察した AFM 画像と断面曲線( $r_m$ : 測定値,  $r_p$ : カンチレバー探針の丸み半径,  $r$ : 刃先の丸み半径)

図 14 に示しているのは、倍率が×10000 倍の FE-SEM で観察した、前切れ刃に生じていたサイズが 100 nm 以上の欠けの個数とラップの面振れとの関係である。2016 年度の研究では、ジュラルミン製の治具に取付けた止めボルトを使って PCD 製のラップの静的な面振れを 0.1  $\mu\text{m}$  前後にまで調整した。2017 年度には、ラップの静的な面振れを 0.1  $\mu\text{m}$  前後まで調整した上で、エアスピンドルの動バランスを取ることによって回転振動を抑えた。2018 年度には、面振れ調整と動バランスを取った後に機上で PCD 製のラップを乾式ラッピングした。

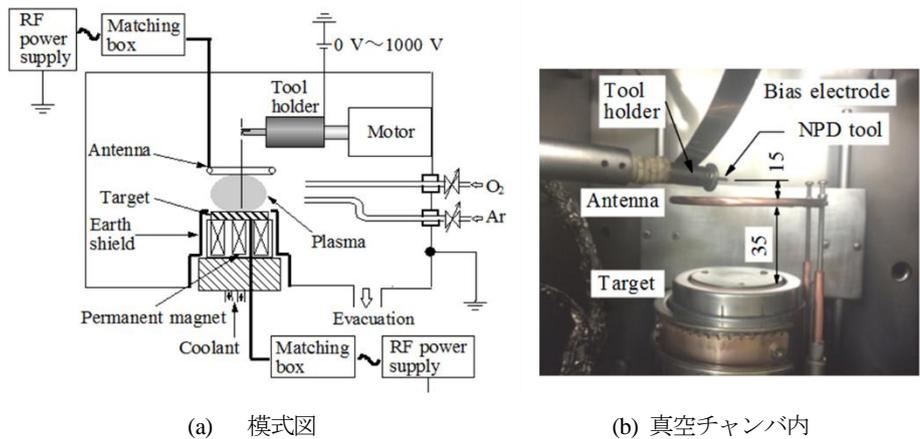
このように、PCD 製のラップに生じる面振れや回転振動を抑えることにより、図 13(b)に示したように、2020 年の 3 月には×10000 倍の電子顕微鏡で観察した前切れ刃に欠けがほとんど無い刃先を成形できるようになった。図 15 に示しているのは、前切れ刃の□250 nm の領域を観察した AFM 画像と断面曲線である。現時点で成形できている刃先の丸み半径は 5.7±2.7 nm である。2018 年度に得られた研究の成果<sup>6)</sup>によれば、乾式ラッピングを行い刃先の丸み半径をさらに小さく成形できる可能性が残されている。

## 7. NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング技術

### 7.1 ドライエッチング装置

図 16 に示しているのは、NPD 製ノーズ R バイトをドライエッチングするために使用した励起誘導型<sup>(36)</sup>と分類されているドライエッチング装置の模式図である。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。NPD ノーズ R バイトを S45C 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。S45C 製のホルダを DC サーボモータに接続し、10 rpm で自転させた。ターゲットやアンテナの中央にバイトの先端を位置調整すると同時に、ターゲットからアンテナまでの高さは 35 mm、ターゲットからバイト先端までの高さは 50 mm に設定した。

チャンバ内にガスを流入させた上でチャンバ内を 0.5 Pa 以下の真空に引き、電極に高周波(RF)電圧を印加すると電極近傍のガス分子は電子でたたかれてプラスとマイナスの原子に電離する。ホルダにはマイナスのバイアスが印加されているので、プラスに電離したガス原子はホルダに



(a) 模式図 (b) 真空チャンバ内

図 16 誘導励起型ドライエッチング装置

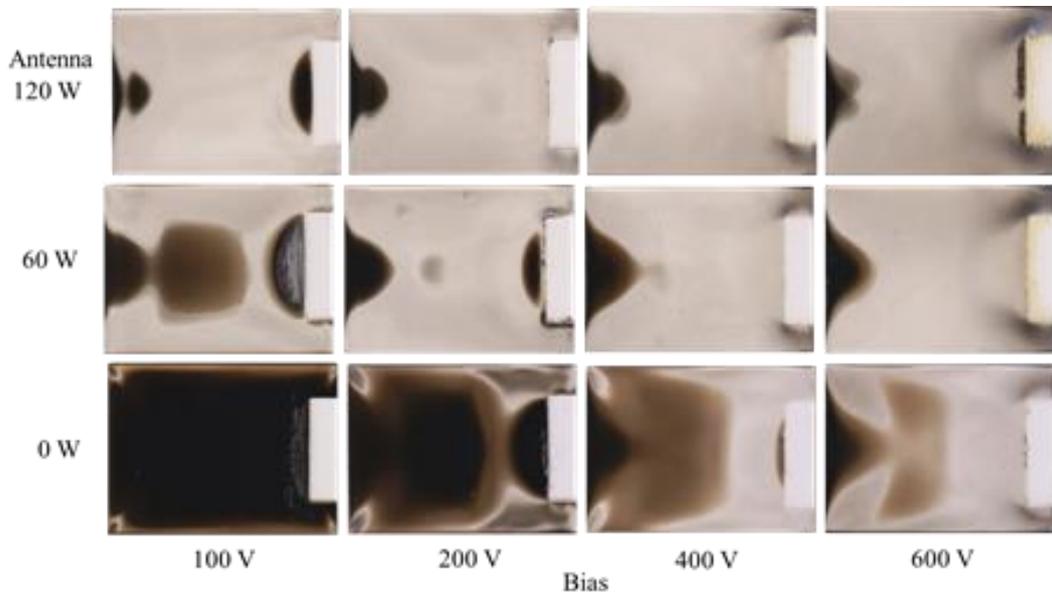


図 17 アルゴンプラズマを使って石英ガラス板に対してドライエッチングを行った結果  
(Vacuum: 0.3 Pa, Target :10 W, Ar/O<sub>2</sub>: 10/0, Time: 5 h.)

衝突しホルダから鉄粒子がスパッタされる。図 17 に示しているのは、アルゴンプラズマを使って S45C のホルダに取付けた石英ガラス板をドライエッチングした結果である。石英ガラスに付着しているのはホルダからスパッタされた Fe 粒子の分布である。2020 年 3 月までは、「ホルダからスパッタされた鉄の粒子が NPD に付着し NPD の表面に導電性が付与されると、プラスに電離したガス原子が NPD の表面に衝突するために Fe 粒子だけでなく NPD も同時にドライエッチングされる」と信じていた。

## 7.2 AFM を用いた刃先丸み半径の測定法

ドライエッチングを行った NPD 製ノーズ R バイトの刃先丸み半径の測定には、原子間力顕微鏡(島津, SPM-9500J3, AFM)を使用した。表 3 に示しているのはその仕様である。XY 方向の測

表3 原子間力顕微鏡とカンチレバーの仕様

Observation mode	Standard	Dynamic
Resolution	X, Y	0.2 nm
	Z	0.01 nm
SPM head	Detection system	Light source/Optical lever / Detector
	Light source	Laser diode
	Detector	Photodetector
Scanner	Drive element	Tube piezoelectric element
	Max. scanning size (X, Y, Z)	10 μm × 10 μm × 1 μm (standard) 2.5 μm × 2.5 μm × 0.3 μm (optional)
Canti lever	Tetrahedral	4~10 nm in probe radius



図18 三角錐形状のカンチレバー探針の高倍率 SEM 画像

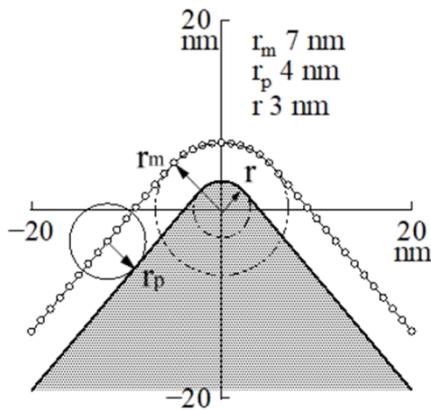


図19 頂角が80°で先端の丸み半径がrの楔を、AFM を使って測定した場合に得られる断面形状(r<sub>p</sub>: 探針の丸み半径, r<sub>m</sub>: 測定される刃先半径)

$$r_m = r_p + r \quad \dots(5)$$

r<sub>m</sub>: AFMで測定される楔丸み半径  
r<sub>p</sub>: プローブ先端の丸み半径  
r: 楔丸み半径

$$r = r_m - r_p, r_p \text{が既知の場合} \quad \dots(6)$$

$$r_m = r_p, r = 0 \text{の場合} \quad \dots(7)$$

定分解能は0.2 nm, Z軸方向の測定分解能は0.01 nm, ならびに最大走査範囲は標準で10×10×10 μm, オプションで2.5×2.5×0.3 μmである. 図18に示しているのは, カンチレバー探針の電子顕微鏡画像である. カンチレバーには単結晶シリコン製で, 形状が三角錐で先端の丸み半径が4~10 nmの探針(オリンパス, OMCL-AC160TS)を使用した.

図19に示しているのは, 頂角が80°で先端の丸み半径がrの楔を, AFM を使って測定した場合に得られる断面形状を解析した結果である. プローブ先端の丸み半径をr<sub>p</sub>, 測定される楔先端の丸み半径をr<sub>m</sub>と表している. 図19に○印で示したように, AFMでは楔の断面形状に対してr<sub>p</sub>だけ外側にオフセットした形状を測定する. したがって, 測定される楔先端の丸み半径r<sub>m</sub>は,

$$r_m = r_p + r \quad \dots(5)$$

と表される. したがってr<sub>p</sub>が分かっている場合には,

$$r = r_m - r_p \quad \dots(6)$$

求められる. また, rが0の場合には

$$r_m = r_p \quad \dots(7)$$

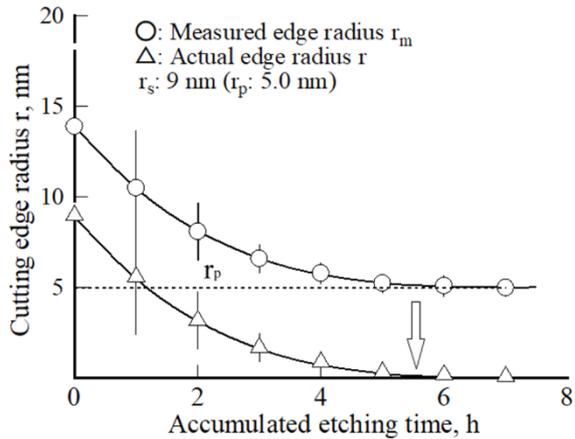


図 20 累積エッチング時間と刃先の丸み半径  $r_m$  との関係 (測定値  $r_m$  の半径方向移動)

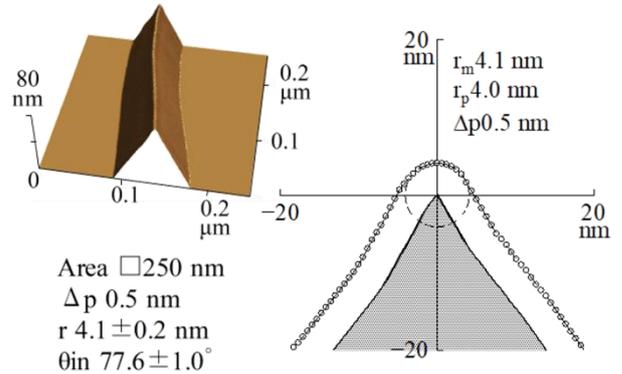


図 21 刃先の丸み半径  $r$  が 0 とと思われる前切れ刃の AFM 画像と断面曲線

になる。市販されているカンチレバー探針の丸み半径には 4~10nm の幅があり、式(6)を使って NPD 製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径  $r$  を測定できなかった。2019 年度に行った研究では、 $r_m$  が変化しなくなるまでドライエッチングを行った後、つまり  $r \doteq 0$  と見做されるまでドライエッチングを行った後、式(7)を使って NPD 製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径を求めることに挑戦した。

図 20 に○印で示しているのは、累積エッチング時間と図 19 に示した刃先の丸み半径  $r_m$  との関係である。1 枚の AFM 画像から 10 箇所の断面曲線を測定し、刃先端の丸み半径の平均値と標準偏差  $1\sigma$  を求めた。○印に細線で付記しているのは、この標準偏差である。累積エッチング時間が増すに従って  $r_m$  は減少し、累積エッチング時間が 7 時間を超えると同じ値に収束している。この結果は、累積エッチング時間が 7 時間を超えると  $r \doteq 0$  となり、 $r_m = r_p$  になっていることを意味する。

図 20 に○印で示した平均値  $r_m$  から図 20 に破線で示した  $r_p$  に相当する 4.9nm を引くと、刃先の丸み半径  $r$  は図 20 に示した△印のように求められる。△印で示した結果には標準偏差を付記していないが、○印で示したのと同じばらつきがある。 $r_m$  が同じ値に収束した、たとえば図 21 に示すように先端の丸み半径  $r$  が  $r \doteq 0$  とと思われる刃先に対して断面曲線を測定すると、式(3)よりカンチレバー探針の丸み半径  $r_p$  を測定することができる。

図 22 に丸印で示しているのは、ドライエッチング前に測定した刃先の丸み半径  $r_s$  が 48.8 nm の NPD 製ノーズ R バイトに対して 13 時間ドライエッチングを行った場合に得られた、累積ドライエッチング時間と刃先の丸み半径  $r$  との関係である。探針の丸み半径  $r_p$  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実験の結果を多項式で近似した結果である。また、図 22 に灰色で塗りつぶした△印は図 20 に白塗りの△印で示した結果である。成形し得る刃先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まとめて表示するため、図 22 に灰色で塗りつぶした実験の結果を図 22 に白塗りの三角印のように時間軸の方向に移動した。

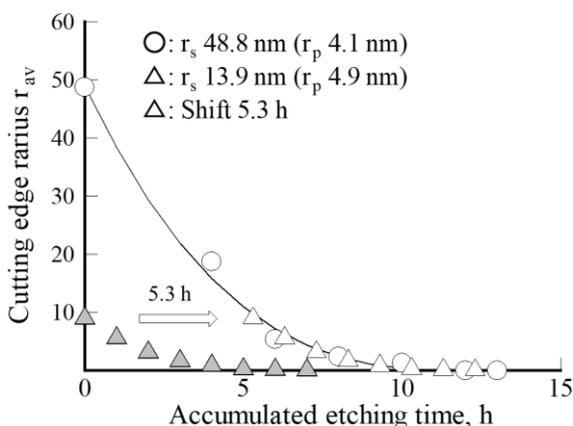


図 22 図 20 に△印で示した刃先丸み半径  $r$  を時間軸の方向に移動した結果

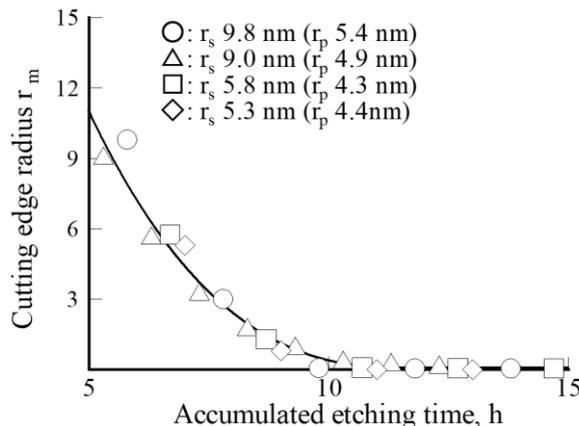


図 23 4 種類の NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行った場合に得られた、累積エッチング時間と刃先の丸み半径との関係

図 23 に示しているのは、ドライエッチング前の刃先の丸み半径  $r$  が 5.3~9.8 nm の範囲にある NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行った場合に得られた、累積エッチング時間と刃先の丸み半径  $r$  (平均値) との関係である。標準試験片を用いて測定したカンチレバー探針の丸み半径  $r_p$  は、図 21 に付記したとおりである。また、図 23 に実線で示しているのは図 22 に示した実験結果の近似曲線であり、4 種類の各工具ともこの実線に重な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 10 箇所断面曲線から測定した刃先丸み半径の平均値は、 $r_m$  が同じ値に収束するまでドライエッチングを行ったので 0 に収束する。

図 20 に示した丸印に細線で付記したように、同じ AFM 画像の中でも場所を変えて測定した刃先の丸み半径  $r_m$  にはばらつきがある。同じカンチレバーを使って画像を測定したので  $r_p$  がばらついているわけではない。したがって、 $r_m$  のばらつきは刃先の丸み半径  $r$  のばらつきである。図 24 に示しているのは、 $r$  が異なる 4 本の NPD 製ノーズ R バイトをドライエッチングした場合に得られた累積エッチング時間と刃先丸み半径のばらつきを表す標準偏差との関係である。刃先丸み半径が収束した領域での刃先丸み半径のばらつきは 0.5 nm 以下である。したがって、図 23 に示した刃先丸み半径の平均値と図 24 に示した刃先丸み半径のばらつきを合わせて判断すると、ドライエッチングを繰り返して行い刃先丸み半径が収束した領域では、刃先の丸み半径は 0.5 nm 以下に成形されている。

図 25 に示しているのは、探針の丸み半径  $r_p$  が 4.9 nm のカンチレバーを用いてドライエッチングを行う前に測定した刃先の丸み半径  $r_s$  が 9.0 nm の NPD 製ノーズ R バイトに対し、5 時間ドライエッチングを行った場合に観察された前切れ刃の AFM 画像と断面曲線である。断面曲線に示した刃先の丸み半径は 0.3 nm であるが、AFM 画像の 10 箇所から測定した刃先丸み半径のばらつきは 0.8 nm である。

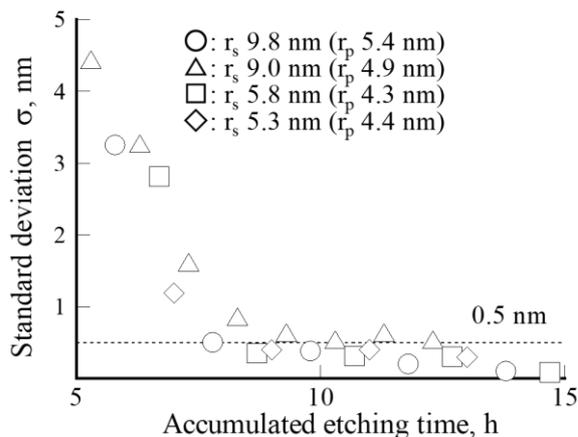


図 24 4 種類の NPD 製ノーズ R バイトに対してドライエッチングを行った場合に得られた、累積エッチング時間と刃先の丸み半径のばらつきとの関係

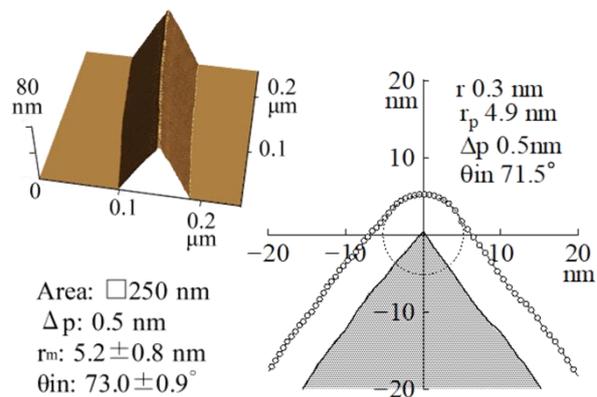


図 25 刃先の丸み半径  $r_s$  が 9.0 nm の NPD 製ノーズ R バイトに対し、5 時間ドライエッチングを行った場合に観察された前切れ刃の AFM 画像と断面曲線

### 7.3 NPD がドライエッチングされるメカニズム

「5. 研究計画と内容」で述べたように、2015 年 9 月から 2017 年 8 月までの 2 年間、導電性がない NPD が図 1 に示したようにドライエッチングされるメカニズムを解明するための研究を行った。NPD 製ノーズ R バイトをクランプする S45C 製のホルダに石英ガラス板を取付け、図 17 に示したように、ホルダからスパッタされた Fe 粒子の分布を観察し、ドライエッチングの条件を決めていた。この場合、「7.1 ドライエッチング装置」で述べたように、ガラス板に付着した Fe 粒子の分布を撮影しやすいからという理由でプラズマ源にはアルゴンガスを用いていた。この実験結果を受けて、2020 年 3 月までは、NPD 製ノーズ R バイトをクランプしている S45C 製のホルダからスパッタされた Fe の粒子が NPD の表面に付着し、NPD に導電性を付与するために NPD がドライエッチングされると考えていた。

2020 年 4 月にプラズマ源を酸素ガスに変えて同様の実験を行った結果、石英ガラス板に付着した Fe 粒子は酸化され絶縁皮膜に変化していた。つまり、これまで考えていたのとは違うメカニズムで NPD がドライエッチングされている可能性が高いことが明らかになった。そこで、2020 年 4 月以降 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再び行っている。図 26 に示しているのは、酸素プラズマを用いてドライエッチングした NPD 製ノーズ R バイトの表面を、電子線マイクロアナライザ EPMA を使って成分分析した結果である。ピーク波長はダイヤモンドよりもグラファイト側にシフトしており、ドライエッチングを行った NPD の表面には導電性を持つグラファイトが生成されていることが明らかになった。

図 1 に示したようにレーザー成形した NPD 製ノーズ R バイトがドライエッチングされたのは、NPD の表面に導電性を持つグラファイトが生成されていたためで、過去にレーザー成形した NPD の表面を成分分析した実験の結果<sup>(12)</sup>とも一致する。したがって、レーザー成形後の NPD 製ノーズ R バイトがドライエッチングされたのと同じ理由で、乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バ

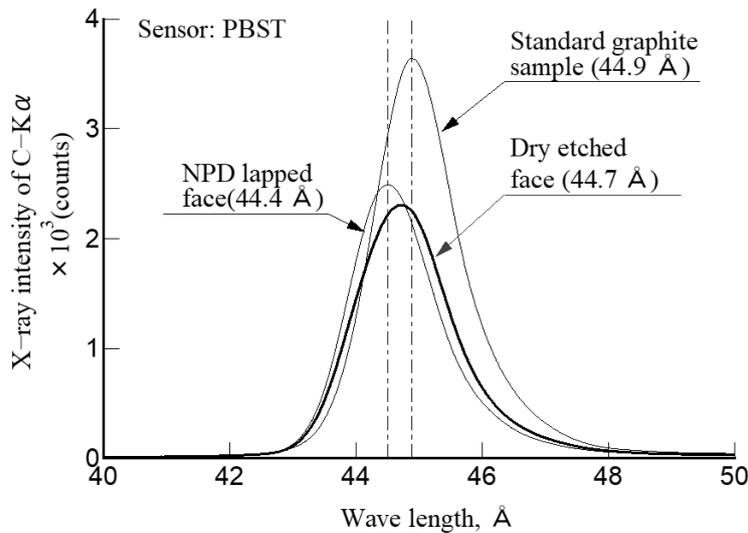


図 26 酸素プラズマを用いてドライエッチングした NPD 製ノーズ R バイトのすくい面を、電子線マイクロアナライザ EPMA を使って成分分析した結果

イトもまたドライエッチングされた可能性が高い。ただし、NPD ノーズ R バイトをクランプしている S45C のホルダから鉄がスパッタされ NPD に付着していることも事実である。NPD 製ノーズ R バイトがドライエッチングされるメカニズムを明確にするためには、ドライエッチングを行う装置内で起こっている現象とドライエッチング条件との関係を系統的に精査する必要があると残されている。

## 8. 無酸素銅に対する超精密切削

### 8.1 切削実験を行った理由

ポリゴンミラーや光学レンズを量産するために、1980 年代の初めに「超精密切削加工」という加工概念が提案された<sup>(7)</sup>。単結晶ダイヤモンド製の切削工具を使って純アルミニウムや無酸素銅に対して切削加工を行い、加工面の粗さを 30 nm Rz 以下の値に成形できる切削工具、工作機械、ならびに加工技術の開発が盛んに行われた。したがって、基礎研究と応用研究を含め、純アルミニウムや無酸素銅に対する超精密切削に関する研究はやり尽くされた感がある。ただし、切削加工面の粗さが理論粗さと一致しないことには当時から多くの研究者が気づいており、非鉄合金に対して超精密切削加工を行い作ることができる粗さの限界は 10 nm Rz ではないかと結論されている<sup>(8)・(11)</sup>。

図 7 に示したのは、無酸素銅の超精密切削加工時に生じる粗さの発生要因について分析された安井先生の研究成果<sup>(18)</sup>である。当時市販されていた単結晶ダイヤモンド製の切削工具を用いると、粒界段差や側方バリが生じるために加工面の粗さは理論粗さと一致しないと考察されている。「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-」という課題で研究を進めた以上、刃先の丸み半径を 1 nm 以下の本研究で試作した NPD 製

ノーズ R バイトを用いると粗さが 10 nm Rz 以下の加工面が作れることを証明する必要があった。また、同工具を用いると工作物を構成する原子の結合を切断できることを証明する必要があった。そこで、試作した NPD 製ノーズ R バイトを使って無酸素銅に対する正面切削を行い、成形し得る粗さの限界を明らかにするための実験を行った<sup>7)</sup>。また、切りくずの幅を測定し切りくずが発生し始める限界切込み深さを明らかにするための実験<sup>27)</sup>を行った。

## 8.2 被削材

被削材には、純度が 99.99 %、直径が 20 mm、ならびに厚さが 5 mm の無酸素銅を使用した。結晶粒のサイズは 50~500  $\mu\text{m}$  である。

## 8.3 加工装置

図 27 に示しているのは、無酸素銅の正面切削に使用した装置の外観である。工作機械には位置決めや送り運動に対する制御分解能が 10 nm の非球面レンズ加工機(東芝機械, ULG50A)を使用した。また、図 28 に示したように切削工具には刃先の丸み半径が異なる 3 本の NPD 製ノーズ R バイトを使用した。ノーズ R の半径は 0.4 mm である。また、切削液にはセミドライ加工 MQL 専用切削油(パレス化学, PS-ミストブル No9), ならびにミスト発生装置にはブルーベ給油機(フジ BC 技研, モデル MK)を使用した。真空チャックを使って工作機械の主軸に取付けた無酸素銅に対して正面切削を行った。



図 27 無酸素銅の加工実験に使った非球面レンズ加工機の外観

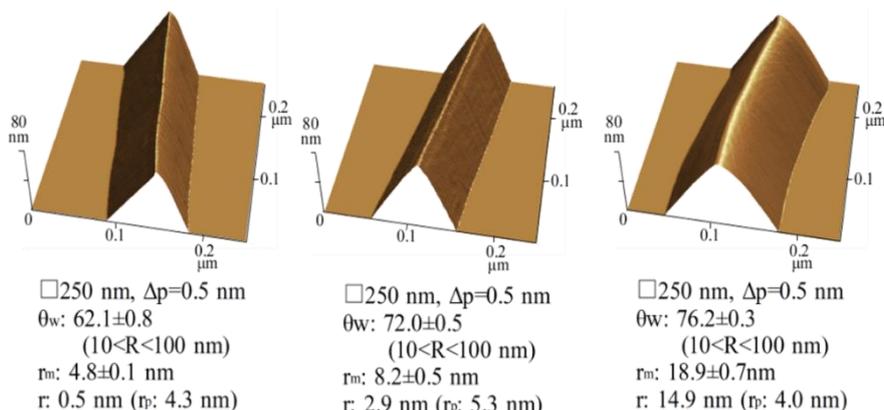


図 28 無酸素銅の正面切削に使用した、刃先の丸み半径が異なる NPD 製ノーズ R バイト ( $\theta_w$ : くさび角,  $r_m$ : AFM で測定した刃先の丸み半径,  $r_p$ : カンチレバー探針の丸み半径,  $r$ : 刃先の丸み半径  $r_m-r_p$ )

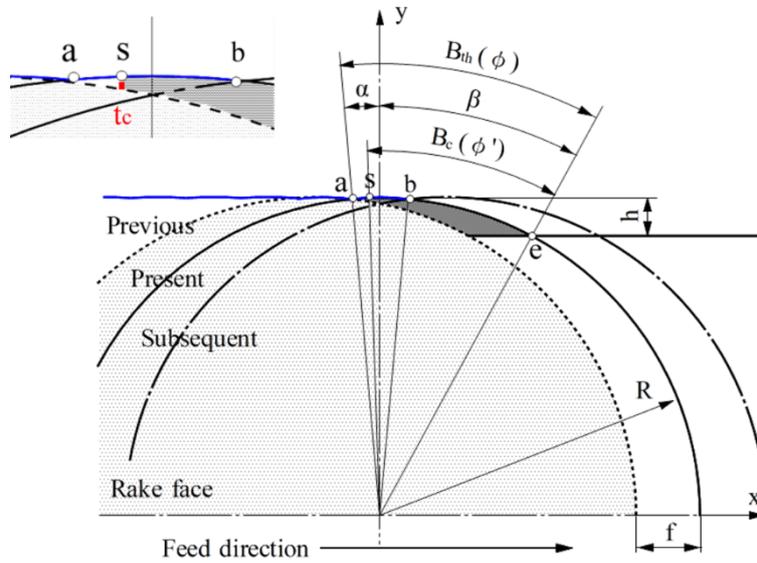


図 29 ノーズ R バイトを使って無酸素銅に対して正面切削を行っているようすを示した模式図

#### 8.4 実験方法

図 29 に示しているのは、ノーズ R バイトを使って無酸素銅に対して正面切削を行っているようすを示した模式図である。先行刃によって作られた加工面に対して現行刃は a の位置から切削を開始する。また、現行刃によって作られる加工面に対し後続刃は b の位置から切削を開始する。この場合、切りくずは a の位置から発生する訳ではなく、切り取り厚さが限界値を超えた s の位置から発生する。この、切りくずの発生限界に相当する切りくずの厚さは切りくずの最小切り取り厚さ  $t_c$  (uncut chip thickness) と呼ばれている<sup>(38),(39)</sup>。

この最小切り取り厚さ  $t_c$  は、図 28 に  $\phi$  や  $\phi'$  で示した切削関与角を用いると

$$t_c = f \sin(\phi - \phi') \quad \dots(8)$$

と求められる。ここで、 $f$  は工作物が一回転する間に工具が送られる送り量、 $\phi$  は幾何学的に求められる切削関与角、 $\phi'$  はノーズ R と切りくずの幅  $B_c$  から式(2)のように求められる切削関与角である。

$$\phi' = B_c / R \quad \dots(9)$$

本研究では、電子顕微鏡を使って切りくずの幅  $B_c$  を測定し、 $B_c$  から式(8)と式(9)を使って切りくずの最小切り取り厚さ  $t_c$  を推定した。

#### 8.5 加工面の粗さ

刃先の丸み半径が  $0.5 \pm 0.1$  nm の図 28 に示した NPD 製ノーズ R バイトを使用し、無酸素銅に対して正面切削を行った場合に得られた加工面の光学微分干渉顕微鏡画像を図 30 に示している。側方バリはともかく、加工面に粒界段差やスクラッチが生じたようすは見られない。ただし、切削実験に使用した工作機械の制御分解能が 10 nm であったことが原因で、送り量が  $2.5 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合には工作機械の制御誤差に起因すると思われるうねりが加工面に生じている。

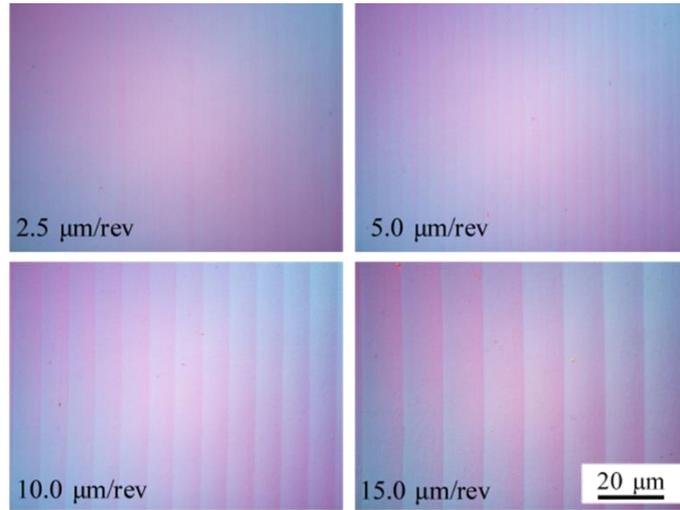


図 30 刃先の丸み半径が  $0.5 \pm 0.1$  nm の NPD 製ノーズ R バイトを使用. 送り速度を  $2.5 \sim 15.0$   $\mu\text{m}/\text{rev}$  の範囲で変化させた場合の加工面

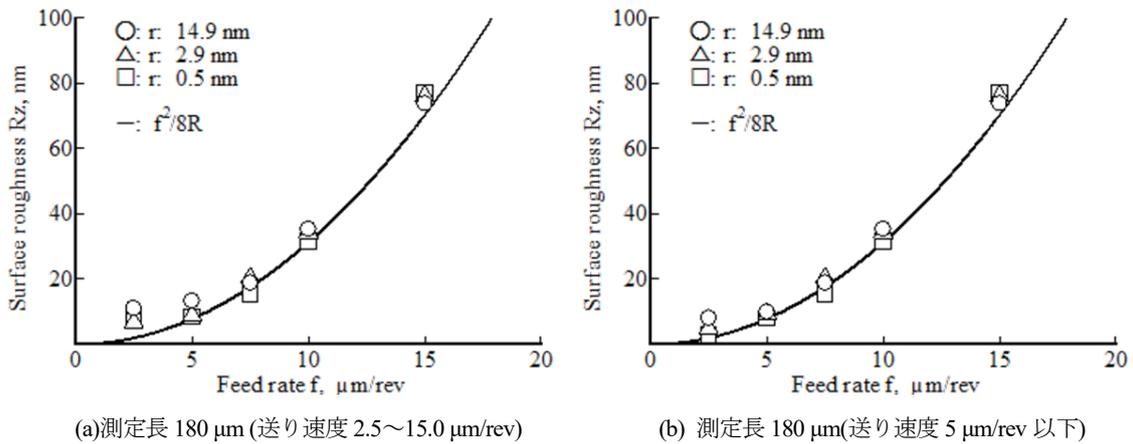
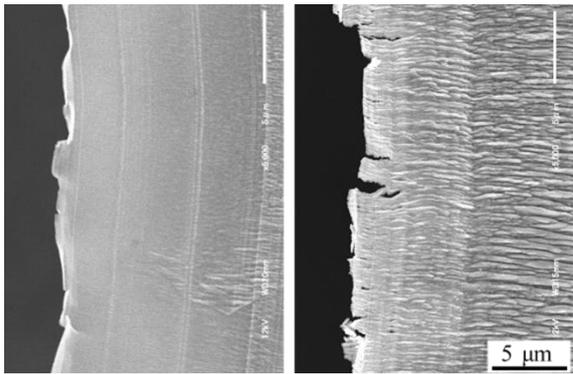


図 31 送り速度と加工面の最大高さ粗さ

図 31 に示しているのは、三次元元光学プロファイラ(Zygo, Newview™ 9000)を用いて測定した、ワーク一回転当たりの送り量  $f$  と半径方向に測定した最大高さ粗さとの関係である。図 31(a) に示しているのは測定長を  $180 \mu\text{m}$  に設定して測定した最大高さ粗さである。測定長を  $180 \mu\text{m}$  に固定すると  $f$  が  $15 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合には 12 本、 $2.5 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合には 72 本の溝に関する山と谷の段差を測ったことになる。図 31 (b)に示しているのは送り量  $f$  が  $5 \mu\text{m}/\text{rev}$  以下の範囲に限り測定長を  $40 \mu\text{m}$  に設定して測定した最大高さ粗さである。測定長を  $40 \mu\text{m}$  に設定すると、 $f$  が  $5 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合には 8 本、 $2.5 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合には 16 本の溝に関する山と谷の粗さを測ったことになる。図 31(b)に示したように、刃先の丸み半径を  $0.5 \text{ nm}$  に成形した NPD 製ノーズ R バイトを用いた場合、送り速度が  $2.5 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合の理論粗さが  $2.0 \text{ nm Rz}$  であるのに対して  $3.1 \text{ nm Rz}$  の加工面を作ることができた。



(a)  $r: 0.5 \text{ nm}$  (b)  $r: 19.9 \text{ nm}$

図 32 すくい面と接していない自由面側の切りくずの形態

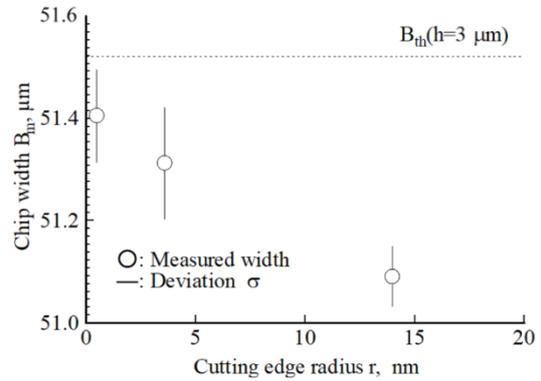


図 33 前切れ刃の刃先の丸み半径  $r$  と図 29 に示した切りくずの幅  $B_c$

## 8.6 切りくずの形態

図 32 に示しているのは、刃先の丸み半径が  $0.5 \text{ nm}$  と  $14.9 \text{ nm}$  のノーズ R バイトを用いた場合に排出された切りくずの、すくい面と接していない自由面側を観察した SEM 画像である。ワークの回転数は  $120 \text{ rpm}$ 、切込み深さは  $3 \mu\text{m}$ 、送り速度は  $5 \mu\text{m/rev}$  に設定した。同様の観察<sup>(40)-(42)</sup>は既に行われており、自由面側にはラメラ模様と呼ばれる凹凸が発生する。図 32(b) に示した画像にはこのラメラ模様が見られるが、図 32(a) に示した画像にはラメラ模様が見られない。この結果は、刃先の丸み半径が  $0.5 \text{ nm}$  のバイトを用いた場合には、切取り厚さが薄い領域で結晶粒が回転するような変形が生じなかったことを意味する。

## 8.7 切りくずの幅と最小切取り厚さ

図 33 に示しているのは、刃先の丸み半径と図 29 に示した切りくずの幅  $B_c$  との関係である。図 32 の縦軸に示した補助メモリは測定の分解能、破線で示しているのは図 29 に示した切りくずの幅  $B_{th}$  である。図 34 に示しているのは切りくずの幅を測定した要領である。糸くずのようにもつれた切りくずの中から大きく変形していない 10 本の切りくずを探し、合計 50 箇所の切りくずの幅を測定した。測定値に結構なばらつきがあるが、刃先の丸み半径が増すに従って切りくずの幅は明らかに減少している。

図 35 に示しているのは、刃先の丸み半径と式(8)を使って求めた切りくずの最小切取り厚さ  $t_c$  との関係である。図 33 と同様に、縦軸の補助目盛は測定の分解能を表している。刃先の丸み半径が  $0.5 \text{ nm}$  の R バイトを使った場合、 $t_c$  の平均値は  $1.44 \text{ nm}$  であるが、平均値から標準偏差を引いた最小値は  $0.31 \text{ nm}$  であった。被削材として使用した無酸素銅の格子定数は  $0.36 \text{ nm}$  である。したがって、最小値ではあるが  $t_c$  が  $0.31 \text{ nm}$  であったということは、銅の約一原子層が除去されたことを意味する。

## 8.8 切りくずの結晶構造

図 36 に示しているのは、切取り厚さが薄い部分の切りくずを透過型電子顕微鏡 TEM で観察

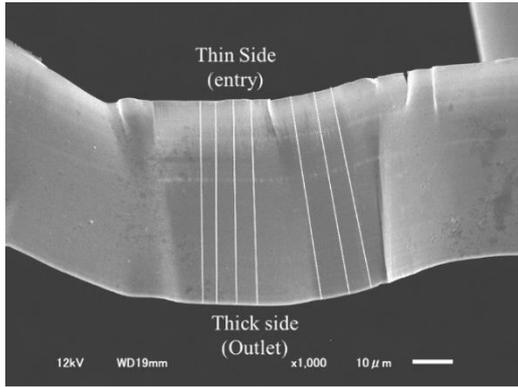


図 34 切りくずの幅の測定

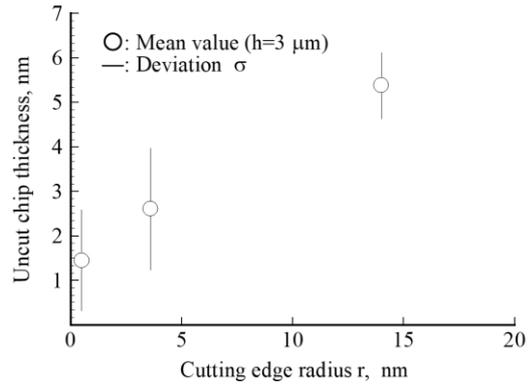
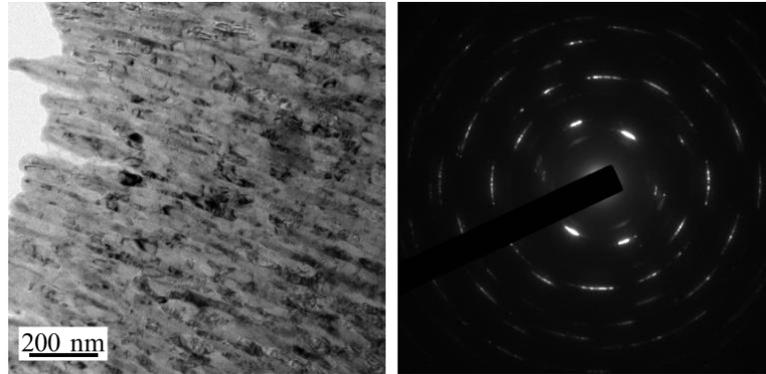


図 35 前切れ刃の刃先の丸み半径  $r$  と式(8)を使って求めた切りくずの最小切取厚さ  $t_c$



(a) 明視野画像

(b) 電子線回折画像

図 36 切り取り厚さが薄い部分の切りくずを観察した透過型電子顕微鏡画像と電子線回折画像

した明視野象と電子線回折画像である。TEM 画像から、切りくずはサイズが 50 nm 前後の結晶粒で構成されていることがわかる。また、電子線回折画像からは切りくずが微細な結晶粒で構成されていることや結晶粒が同じ向きに配向していることが分かる<sup>(43)</sup>。「8.2 被削材」で述べたとおり被削材として使用した無酸素銅の結晶粒のサイズは 50~500  $\mu\text{m}$  であり、切りくずに微粒化層が残っているとは考えてもいなかった。

本研究では被削材として使用した無酸素銅を、治具を介して工作機械の主軸に取付けたときに生じる面振れを除去するために、PCD 製のノーズ R バイトを使用した。主軸の回転数を 1200 rpm、切込みを 3  $\mu\text{m}$ 、工作物一回転当たりの送り量  $f$  を 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  に設定して面振れを除去した後、 $f$  を 2.5  $\mu\text{m}/\text{rev}$  に設定して前加工面を平滑に成形した。このように刃先の丸み半径が大きい PCD 製のノーズ R バイトを使って何度も加工すると、加工面には結晶粒が微細化した微粒化層が残っていた可能性が高い。

この微粒化層が残る前加工面に対して刃先を鋭利に成形した NPD 製のノーズ R バイトを用いて切削加工したため、前加工面に生成されていた微粒化層を切りくずとして排出したのではないかと考えている。2020 年 9 月以降にもこの仮説を証明するための研究を継続して行っている。

近い将来に、微粒化層が残っていない前加工面に対して試作した NPD 製のノーズ R バイトを用いて切削加工を行うと、図 37 に示した電子線回折画像ではなく単結晶材料を観察した場合に得られるデバイ環と同様のデバイ環が観察されることを証明する。

## 9. 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の加工技術

### 9.1 研究の経緯

「1. はじめに」で述べたように、2012 年 1 月～2014 年 8 月までの間、「超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の研磨レス製造技術の開発」という課題の研究を行った。ビッカース硬さが 2650 Hv の超微粒子超硬合金に対してマイクロ研削加工を行い、研磨レスで直径が 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作ることができる、工具技術とマイクロ研削加工技術を作ることを試みた。

砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を、平坦に摩滅させた PCD 製のマイクロ研削工具<sup>(28)・(30)</sup>を使えば、研磨レスで直径が 0.1 mm 以下でキャビティの粗さが 30 nm Rz 以下の超硬合金製のマイクロレンズアレイ金型を作ることができると安易に考えていた。しかし、本研究を立案した 2015 年 4 月の段階でも PCD 製マイクロ研削工具の耐摩耗性はともかく、レンズキャビティの粗さに関しては目標をクリアできる研究の成果が得られていなかった。そこで、理想的加工法を具現化するという本研究の主旨からは外れるが、研究目標を達成するための研究を継続して実施した。

### 9.2 レンズアレイの加工に使用した装置と加工の要領

図 37 に示しているのは、レンズアレイの加工に使用した装置の外観と加工の要領である。レンズを加工する前に、直径が 20 mm の超微粒子超硬合金(ダイジェット, CW500)の端面に対してナノ fp 研削加工<sup>(32)・(33)</sup>を行い、端面の粗さを 20 nm Rz 前後に成形した。端面の成形には工具先端を半径が 3 mm の半球状に成形した焼結ダイヤモンド製の研削工具(住友電工, DA150)、研削液には水溶性研削液(ネオス, ファインカット 980)を使用した。端面を成形した後、工具先端の半径を 0.1 mm に成形した PCD 製や NPD 製のマイクロ研削工具を使用し、工具先端の半球形状を工作物に転写する方式で、直径が約 1 mm の領域にレンズ直径が 30  $\mu\text{m}$  でピッチが 35  $\mu\text{m}$  のマイクロレンズアレイを加工した。

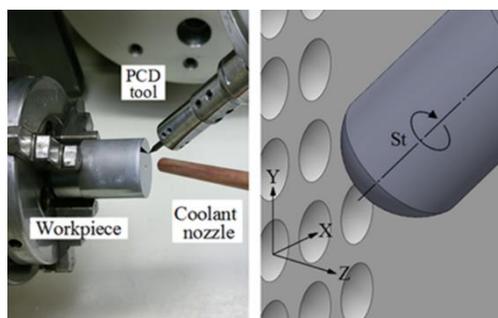


図 37 マイクロレンズアレイの加工に使用した装置の外観と加工方法

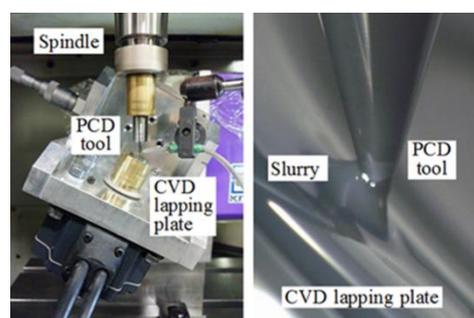


図 38 マイクロ研削工具の湿式ラッピングに使った装置の外観

### 9.3 マイクロ研削工具の成形と結果

マイクロ研削工具の素材には、PCD や焼結後のダイヤモンドの粒子が約 50 nm の NPD を使用した。工具素材に対してナノ秒パルスレーザーを使ったレーザー加工と湿式ラッピングを行い、工具先端の半径を 0.1 mm に成形した。図 38 に示しているのは、湿式ラッピングに使った装置の外観である。レーザー成形したマイクロ研削工具は立形マシニングセンタの主軸に装着した。マイクロ研削工具に対して湿式ラッピングを行うラップには、化学気相合成法(CVD)で作られた直径が 15 mm のダイヤモンド製円板を使用した。ラップの自転運動と公転運動を組み合わせることにより、工具の先端を半径が 0.1 mm の半球状に成形した。なお、ラップ剤には粒径が 1/20~0.1 $\mu$ m のダイヤモンドスラリを使用した。

図 39(a)に示しているのは PCD 製マイクロ研削工具、図 39(b)に示しているのは NPD 製マイクロ研削工具の外観と砥石作用面である。PCD 製マイクロ研削工具を用いると、加工中に発生する切りくずによってダイヤモンド粒子の粒界が湿式ラッピングされ、砥石作用面に露出したダイヤモンド粒子によってレンズのキャビティに擦過痕が発生した。この現象を克服するのに 6 年近くを費やしたが、工具素材に PCD を用いた場合には結局この擦過痕を消すことができなかった。そこで、最終的に図 39(b)に示した NPD 製のマイクロ研削工具を用いることにした。

図 40 に示しているのは、AFM を用いて観察した NPD 製マイクロ研削工具の砥石作用面である。図 40(b) に示したように砥石作用面には焼結後のダイヤモンド粒子と思われるサイズが数十ナ

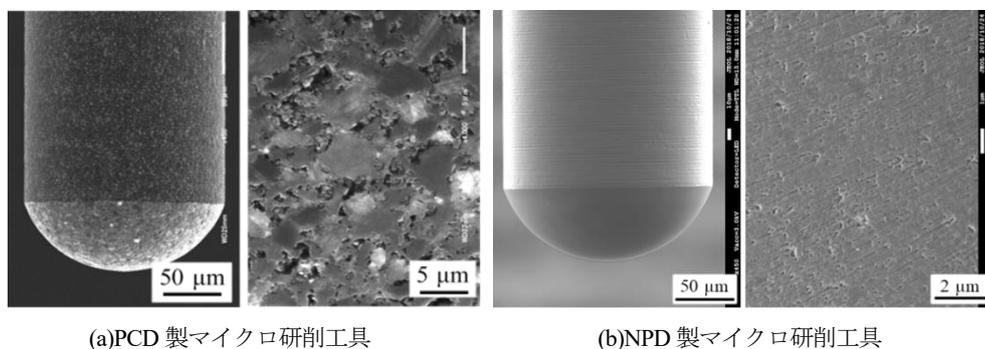


図 39 超硬合金製マイクロレンズアレイの加工に使った PCD 製と NPD 製のマイクロ研削工具 (湿式ラッピングに使ったダイヤモンドスラリの粒径: 0-1/2、工具先端の半径: 0.1 mm)

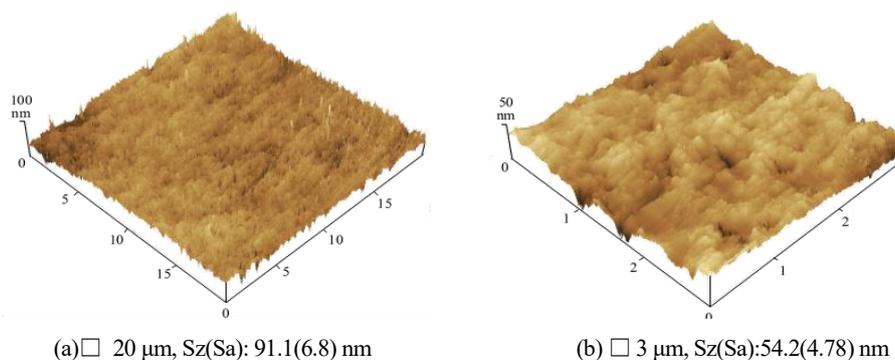


図 40 AFM を用いて観察した NPD 製マイクロ研削工具の砥石作用面 (湿式ラッピングに使用したダイヤモンドスラリの粒径: 0-1  $\mu$ m)

ノメータの凹凸が生じている。砥石作用面の粗さである 54.2 nm を単純にダイヤモンド砥粒の粒径と見なすと、砥粒のメッシュサイズは#280000 (15000/Sz)に相当する。ただし、砥粒の先端は丸まっている。砥粒の先端が鋭利でないために粗さが 10 nm Rz 以下の加工面は作れるが、切れ味が悪いという問題点を抱えていた。この問題点を克服するために、つまり NPD 製研削工具の切れ味を良くするために半径が 0.1 mm の半球状の砥石作用面に対してレーザ加工を行い、螺旋溝を成形した。

#### 9.4 螺旋溝の成形に使用した装置と螺旋の形状

図 41 に示しているのは、螺旋溝の成形に使用した装置の外観である。湿式ラッピングを行い工具の先端を半径が 0.1 mm の半球状に成形した NPD 製研削工具は、真鍮製の芯ぶれ防止治具を回してステッピングモータに取付けた。また、ステッピングモータを取付けた L 字型の治具は、XY ステージを回してステッピングモータで駆動する回転テーブルに取付けた。NPD 製研削工具の自転運動と公転運動をこれらのステッピングモータを使って同時 2 軸制御することにより、半球状の砥石作用面に螺旋溝を成形した。なおレーザには波長が 1060 nm のナノ秒パルスファイバーレーザを使用した。

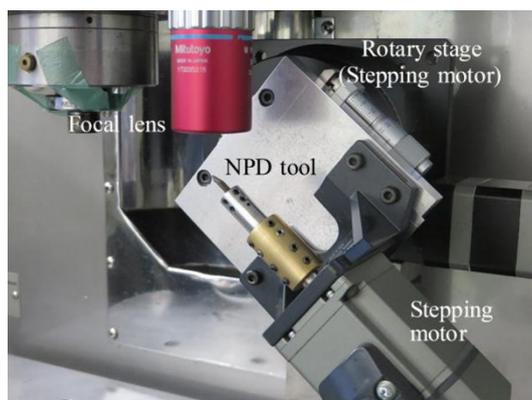


図 41 半球状の砥石作用面への螺旋溝の成形に使用した装置の外観

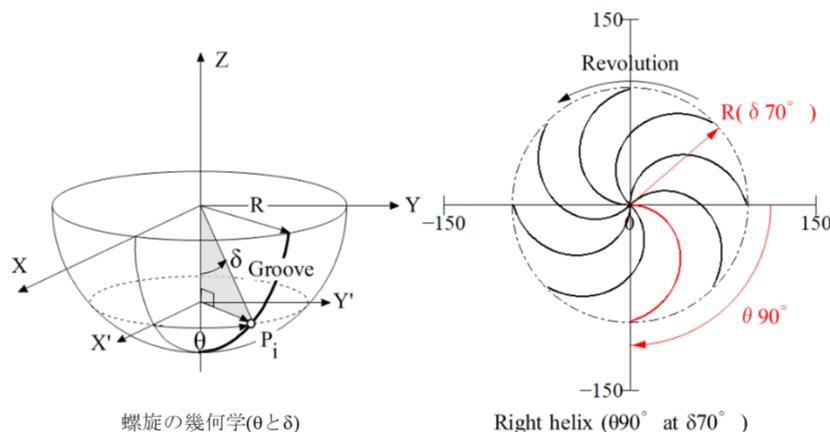
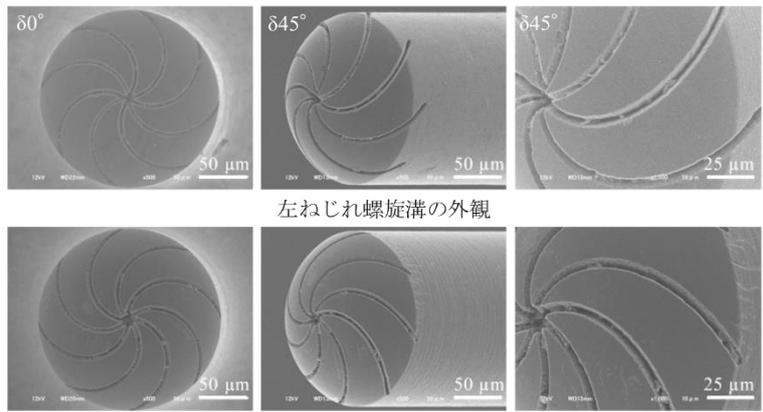


図 42 半球状の砥石作用面に成形した螺旋溝の形状



右ねじれ螺旋溝の外観 (溝の本数8, 溝幅約7 $\mu$ m, 溝深さ約10 $\mu$ m)

図 43 レーザ成形した右ねじれと左ねじれの螺旋溝 (工具半径 0.1 mm)

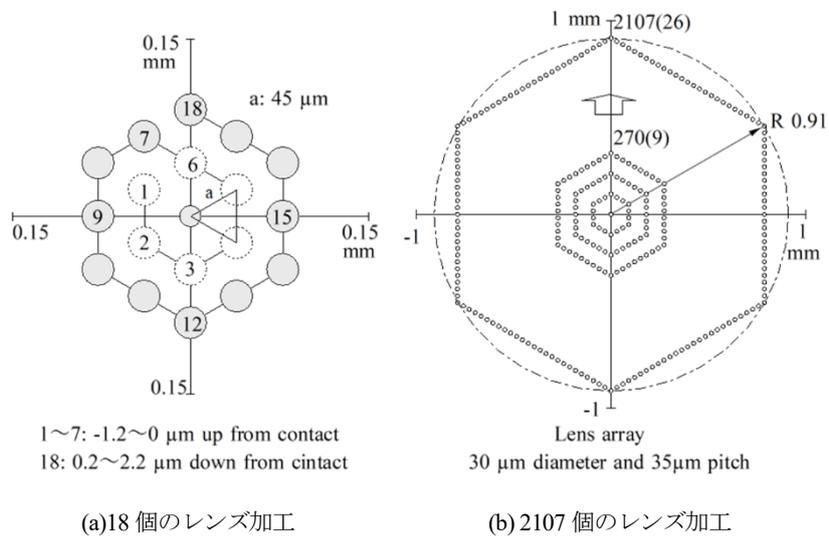


図 44 NPD 製マイクロ研削工具の切れ味と耐久性を調べるために行った 18 個と 2107 個のレンズ加工の要領

図 42 に示しているのは、半径が 0.1 mm の半球状の砥石作用面に成形した螺旋溝の形状である。工具の底から緯線方向に 70°公転したときに経線方向に 90°自転している形状の螺旋溝を成形した。図 42 の右側の図には右方向に 90°捻れている溝を赤の実線で示した。図 43 に示しているのは、レーザ成形後に観察した右ねじれと左ねじれの螺旋溝である。両方の工具とも、溝幅は約 7  $\mu$ m, 溝深さは約 10  $\mu$ m である。

### 9.5 工具の切れ味と耐摩耗性の評価方法

図 44 に示しているのは、NPD 製研削工具の切れ味と耐摩耗性を評価するために行った研削実験の要領である。工具を取付けたエアスピンドルを自然回転させ、エアスピンドルが工作物と接触して回転が止まった位置を仮の接触点とした。その後、工具を接触点から 1.2  $\mu$ m 退避させて図 44(a)に示した①の位置に移動させ、切込みを 0.2  $\mu$ m 刻みで増加させて①~⑱のレンズを加工

した。加工後にレンズの直径を計ることにより、直径が  $30\ \mu\text{m}$  のレンズを彫るために必要な接触点からの切込み深さを求めた。また、レンズキャビティの深さを測ることにより、実砥石切込み深さを求めた。図 44(b)に示した 2017 個のレンズを 2 回加工する前後に、18 個のレンズ加工を行うことによって工具の切れ味や耐摩耗性を評価した。

## 9.6 研削実験の結果

図 45 に示しているのは、右ねじれの螺旋溝を成形した工具を使用し 2 回目に 2107 個のレンズアレイを成形した場合に得られたレンズと、砥石作用面のようなものである。2018 個付近と 4214 個付近のレンズ間隔に変化はなく、工具が摩耗したようすは見られない。また、レンズの縦横比は 1 であり、研究を開始した当初に計画したレンズを掘ることができた。螺旋溝には切り屑が詰まっており、チップポケットとして作用したことを確かめることができた。

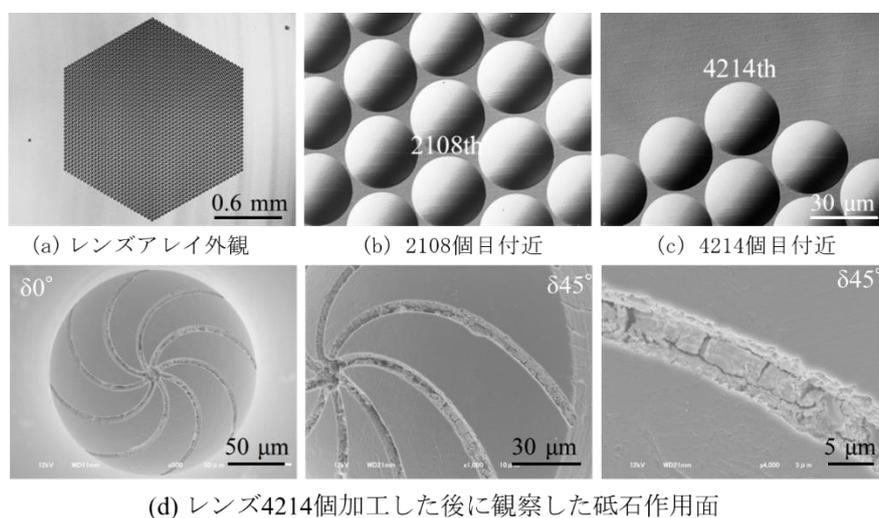


図 45 2 度目に 2107 個のレンズを加工した場合のレンズアレイ(上段)とレンズを 4214 個加工した後に観察した、右ねじれの螺旋溝を成形した砥石作用面(下段)

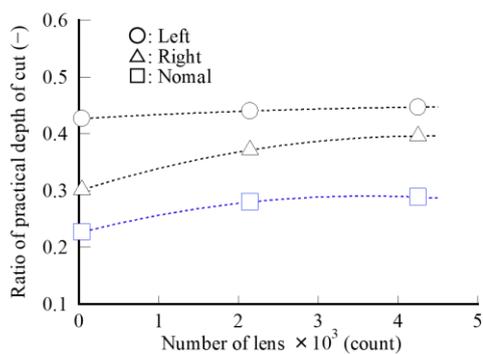


図 46 個数が 2107 個のマイクロレンズアレイを 2 度加工する前後で測定した実砥石切込み率とレンズの個数

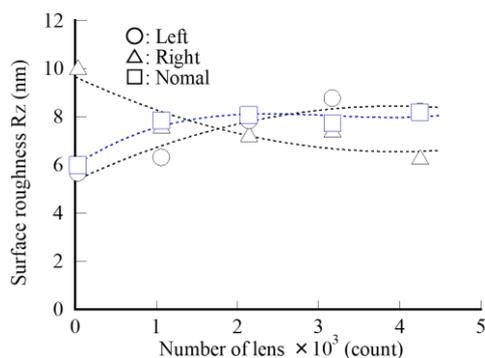


図 47 加工したマイクロレンズの個数とレンズアキャビテの最大高さ粗さ (工具の回転方向と直交する方向の粗さを測定)

図 45 に示した 18 個のレンズを加工して測定した，設定切込み深さと実砥石切込み深さとの比を

$$\text{実砥石切込み率} = \text{実砥石切込み深さ} / \text{設定切込み深さ} \quad \dots(10)$$

と定義すれば，実砥石切込み率が高い工具ほど切れ味がよい工具であるといえる．図 46 に示しているのは，螺旋溝を成形した工具と成形していない工具を使用し，2107 個のレンズアレイを 2 回加工する前後で測定した，実砥石切込み率とレンズの個数との関係である．レンズアレイを 2 回加工した後の実砥石切込み率は，（螺旋溝を成形していない工具 < 右ねじれの螺旋溝を成形した工具 < 左ねじれの螺旋溝を成形した工具）の順で増加している．とくに，左ねじれの螺旋溝を成形した工具の実砥石切込み率は，螺旋溝を成形していない工具に比べ 1.5 倍程度高くなっている．このように，工具の切れ味をよくするという観点で螺旋溝は有効であった．

図 47 に示しているのは，三次元光学プロファイラ(Zygo, Newview™ 9000)を用いて測定した，レンズの個数と表面粗さとの関係である．同プロファイラは，測定される断面曲線から球面を引き，形状誤差を含む最大高さ粗さを測定する機能を持っている．図 47 に示した縦軸には，この形状誤差を含む最大高さ粗さを示している．螺旋を成形した工具や成形していない工具とも，レンズを 2,000 個以上加工すると粗さは同じ値に収束する傾向が見られる．これは，工具に対する“ならし加工”が必要であることを意味する．

当該研究を行った 2012 年 1 月から 2019 年 8 月までの間，NPD 製の研削工具だけでなく PCD 製の研削工具を使った場合についても同様のレンズアレイを加工した．図 48 に示しているのは，式(10)に示したように定義した実砥石切込み率と粗さとの関係である．PCD 製の研削工具の場合，工具の切れ味と加工面の粗さにはトレードオフの関係がある．これに対し，NPD 製研削工具の場合両者の間にトレードオフの関係はなく，安定して粗さが 10 nm Rz 以下のキャビティを作ることができる．いずれにしても，ずいぶん時間を要したが，研磨レスで粗さが 10 nm Rz 以下の加工面を作るといった研究目標を達成できたと考えている．

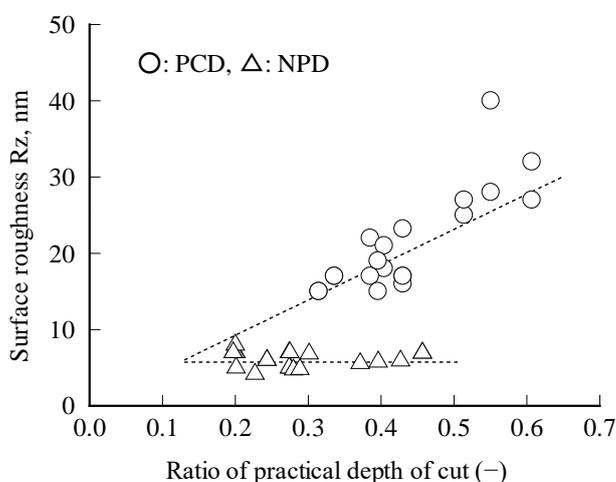


図 48 PCD 製と NPD 製のマイクロ研削工具を使用しマイクロレンズアレイを加工した場合の実砥石切込み率とレンズキャビティの最大高さ粗さ

## 10. おわりに

「1. はじめに」で述べたように、中山一雄先生は切りくずの厚さが切込み深さと等しくなるような切削加工法のことを理想的加工と表現されている。金属材料の切削加工時においては、被削材の一部がせん断変形するために切りくずが発生し、切りくずの厚さは切込み深さよりも3倍程度厚くなる。これに対し、切削加工を行うことによって被削材を構成する原子の数原子層を除去できれば、原子配列に擾乱は生じるが切りくずの厚さが切込み深さよりも3倍も大きくなるという現象は避けられる可能性が高い。したがって、中山一雄先生は被削材を構成する原子の数原子層を除去できる加工法をイメージされ、理想的加工法と表現されたのかもしれない。

本研究では、2015年9月から2020年8月までの間、この理想的加工法を具現化するための研究を行った。被削材を構成する原子の数原子層を除去するためには、被削材の原子半径よりも切削工具の刃先の丸み半径を小さくする必要があると考え、切削工具として使用したナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径を炭素原子と同じサイズに鋭利化することを試みた。既に修得できていた加工技術をフルに活用した上で研究目標を達成するためには、最低でも表2に示した技術を新たに開発する必要があると思われた。「5. 研究計画と内容」で述べた内容と重なるが、表2に示した1.~3.の研究項目について得られた研究の成果について報告する

### 1. 熱化学反応を利用した NPD 製ノーズ R バイトに対する乾式ラッピング技術

(1) レーザ加工後の 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うために使用する、PCD 製のラップを試作するための研究を行った。市販の直径が 15 mm の PCD 製円板に対して放電加工、湿式ラッピング、ならびに乾式ラッピングを行い、ラップの表面粗さを 40 nm Rz 以下、形状精度を 0.1 $\mu$ m/7.5 mm、ならに焼結助剤として用いられている Co が表面に露出しているラップを試作した。

(2) 乾式ラッピング時に NPD 製ノーズ R バイトの刃先に生じる欠けを防ぐため、PCD 製のラップを自転運動させるためのモータとして DC サーボモータ、AC サーボモータ、ならびにタービン駆動方式エアスピンドルを用いた乾式ラッピング実験を行った。モータ軸のアキシャル方向の非同期振れがほとんど無かったタービン駆動方式のエアスピンドルを使用し、乾式ラッピング装置を試作した。

(3) エアスピンドルに取付けた PCD 製のラップの静的な面振れを 0.1  $\mu$ m 前後の値に調節すること、エアスピンドルの動バランスを取ることで、さらに機上でラップに対して面振れを取るための乾式ラッピングを行うことにより、 $\times 10000$  の電子顕微鏡で観察して前切れ刃に欠けが無い NPD 製ノーズ R バイトを試作できた。現時点で成形できる刃先の丸み半径は 5 nm 前後である。

### 2. NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング技術

(1) NPD 製ノーズ R バイトに対して酸素プラズマを使ったドライエッチングを行うと、刃先が鋭利化されるメカニズムを解明するための研究を行った。研究を開始した当初は、NPD 製ノーズ

R バイトをクランプしている S45C 製のホルダからスパッタされた Fe の粒子が NPD の表面に付着し、NPD に導電性を付与するために NPD がドライエッチングされると考えていた。

(2) 一度中断していたメカニズムを解明するための研究を 2020 年 4 月に再開した。その結果、上記の現象の他に NPD の表面に導電性を持つグラファイトが生成されていることが明らかになった。このように、ドライエッチングを行う装置の中では、S45C 製のホルダから Fe 粒子がスパッタされ NPD に付着するといった現象や、NPD の表面にグラファイトが生じるといった現象が生じていることが確かめられた。

(3) ドライエッチングを行う装置の中では、最低でも以上 2 つの現象が起こっていることは間違いない。いずれにしても、NPD 製ノーズ R バイトがドライエッチングされるメカニズムを明確にするといった研究目標を達成するためには、ドライエッチングを行う装置内で起こっている現象とドライエッチング条件との関係を系統的に精査する必要があると残されている。

(4) 乾式ラッピングを行った 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、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るため刃先が鋭利化されるだけでなく、刃先に生じていた欠けは消滅する。AFM で測定した刃先の丸み半径にばらつきがあることは事実であるが、ばらつきを含め刃先の丸み半径を 0.5 nm 以下に成形できる。

### 3. 無酸素銅に対する超精密切削

(1) 無酸素銅に対する正面切削を行い、面粗さの測定、切りくずの形態の観察、切りくずが発生し始める限界切込み深さを推定するための実験、ならびに切りくずの結晶構造を解析するための研究を行った。刃先の丸み半径が 0.5 nm の NPD 製ノーズ R バイトを使った場合、切りくずの最小切取り厚さの平均値は 1.44 nm であるが、平均値から標準偏差を引いた最小値は 0.31 nm であった。無酸素銅の格子定数は 0.36 nm である。したがって、最小切取り厚さが 0.31 nm であったということは銅の約一原子層が除去されたことを意味する。

(2) 透過型電子顕微鏡を使って切りくずを観察すると切りくずは微細化した結晶粒によって構成されていることが明らかになった。微粒化層が残る前加工面に対して刃先を鋭利に成形した NPD 製のノーズ R バイトを用いて切削加工を行ったため、前加工面に生成されていた微粒化層を切りくずとして排出したのではないかと考えている。

(3) 2020 年 9 月以降にもこの仮説を証明するための研究を継続して行っている。近い将来に、微粒化層が残っていない前加工面に対して試作した NPD 製のノーズ R バイトを用いて切削加工を行うと、結晶配列に擾乱のない結晶によって切りくずが構成されていることを証明する。

### 4. 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の加工技術

2012 年 1 月～2014 年 8 月までの間、ビッカース硬さが 2650 Hv の超微粒子超硬合金に対してマイクロ研削加工を行い、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研摩レスで作ることができる、工具技術とマイクロ研削加工技術を作るための研究を行

った。本研究を立案した 2015 年 4 月の段階でも研究目標を達成できていなかったため、本研究でも継続して実施した。

(1) 足かけ 8 年を要したことになるが、2019 年 8 月には NPD 製の研削工具を使ったマイクロ研削加工をおこない、レンズの直径が 30  $\mu\text{m}$ 、ピッチが 35  $\mu\text{m}$ 、レンズキャビティの粗さが 5 nm Rz 前後、ならびに 2017×2 個のレンズ金型を研磨レスで成形できるようになった。

(2) NPD 製の研削工具だけでなく PCD 製の研削工具を使った場合についても同様のレンズアレイを加工した。PCD 製の研削工具の場合、工具の切れ味と加工面の粗さにはトレードオフの関係があるのに対し、NPD 製研削工具の場合両者の間にトレードオフの関係はなく、安定して粗さが 10 nm Rz 以下のキャビティを作ることができる。

## 謝 辞

1994 年、当時牧野フライス製作所 R&D センタの所長をされていた佐藤眞先生から『減らない工具が作れませんか』という助言を賜った。2012 年 1 月～2014 年 8 月までの間、「超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の研磨レス製造技術の開発」という課題で行った研究は、減らない工具が具現化されたことを証明するための研究であった。

また、1986 年に弊学に着任して依頼、当時横浜国立大学に勤務されていた中山一雄先生が執筆された『切削加工論』を教科書として使ってきた。この著書の中で中山先生は「理想的加工」という加工概念を提案されている。2015 年 9 月から 2020 年 8 月までの間、「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-」という課題で行った研究は、この理想的加工法を具現化するための研究であった。

「減らない工具の開発」と「理想的加工法の具現化」は在職中に実現したいと思っていた夢であり、振り返れば夢が夢で終わる可能性が高い研究のテーマであった。三井金型振興財団からは、このような研究のテーマに対して 2 度に渡って研究助成を賜った。夢に近づく機会を与えて下さった同財団の理事長様を始め関係各位の方々に、衷心よりお礼申し上げる。また、私の夢とわがままにつきあって下さった弊学の大学院と学部にて在籍していた学生諸君に対し、敬意を込めて謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 中山一雄, 切削加工論, (1978), p.38, コロナ社.
- (2) 平成 24 年度助成金給付者研究成果報告 [http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2012report\\_no1\\_final.pdf](http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2012report_no1_final.pdf).
- (3) 平成 27 年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告①), [http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report\\_no1.pdf](http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no1.pdf).
- (4) 平成 27 年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告②), [http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015reportno2\\_1.pdf](http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015reportno2_1.pdf).

- (5) 平成 27 年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告③), [http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report\\_no2.pdf](http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no2.pdf).
- (6) 平成 27 年度特別研究助成金給付者(進捗状況報告④), [http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report\\_no10.pdf](http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no10.pdf).
- (7) 時枝大輔, ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径と到達限界粗さ, 福岡工業大学大学院 知能機械工学専攻 修士論文(2020-3), pp.1-78.
- (8) 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.
- (9) 島田尚一, 加工と表面粗さ, トライボロジスト, Vol. 43, No. 11(1998), pp.951-958.
- (10) 井川直哉, 切削加工の精度限界, 機械の研究, Vol. 24, No. 12(1972), pp.1545-1551.
- (11) 井川直哉・島田尚一, 超精密切削加工用ダイヤモンド工具, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 50, No. 456(1984-8), pp.1321-1326.
- (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(2012-10), pp. 3583-3593.
- (13) 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, Vol.83, No.851(2017), [DOI: 10.1299/transjsme.16-00573].
- (14) 仙波卓弥・太田修平・天本洋文・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, Vol.77, No.784(2011-12), pp.4704 - 4717.
- (15) 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(2013-11), pp. 4513-4523.
- (16) 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.
- (17) 井川直哉, 極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ, 精密工学会誌, Vol. 59, No.4 (1993), pp.673-679.
- (18) 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 No. 968-2(1996-7-18, 九州支部熊本地方講演会), 401(1996), pp. 193-194.
- (19) A. Kobayashi・N. Hoshina・T. Tsukada・K. Ueda・, High Precision Cutting with a New Ultra Precision Spindle, Annals of the CIRP, Vol. 27/1(1978), pp. 283-287.
- (20) 張俊偉・仙波卓弥・天本祥文, 焼結ダイヤモンド製円板に対する超平坦化加工技術, JSPE 九州支部飯塚地方講演会, 202 (2015-12), pp. 45-46.
- (21) 時枝大輔・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～原子レベルの刃先成形することの可能性～, JSPE 九州支部北九州地方講演会講演論文集, (2018-12), pp.131-132.
- (22) 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.
- (23) 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 講演論文集 USB, B09(2017-8), pp.99-100.
- (24) 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, JSPE 九州支部熊本地方講演会, 112(2017-12), pp. 37-38.

- (25) 時枝大輔・仙波卓弥・天本祥文, 理想的加工法の具現化 - 刃先の丸み半径と到達限界粗さ -, JSPE 九州支部佐世保地方講演会講演論文集, 302(2019-12), pp.79-80.
- (26) 仙波卓弥・天本 祥文・角谷 均, NPD 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, ABTEC2020 講演論文集, A34(2020-9), 秋田県立大学 Zoom 講演, pp.70-71.
- (27) 仙波卓弥・天本 祥文・角谷 均, 理想的加工法の具現化 刃先の丸み半径と切りくずの切取り厚さ, ABTEC2020 講演論文集,A27(2020-9), 秋田県立大学 Zoom 講演, pp.54-55.
- (28) 合屋尚子・孫万福・原田武志・仙波卓弥, 極微粒ダイヤモンド電鑄工具に対する砥粒平坦化および平滑化ツルーイング技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010-11), pp.3126-3133.
- (29) 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,Vol.76, No.771, (2010-11), pp.3134-3142.
- (30) 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鑄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, Vol.77, No.782 (2011-10),pp.3904-3915.
- (31) 仙波卓弥・貝田博典・天本祥文, 焼結ダイヤモンド製研削工具を使った超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作, ABTEC2016 講演論文集 USB,C08(2016-8), pp.210-211.
- (32) 単炭承玉・貝田博典・仙波卓弥・天本祥文, 超硬合金製レンズ金型に対するナノ fp 加工技術, 精密工学会九州支部鹿児島地方講演会, 208 (2014-12), pp.51-52.
- (33) 高原均・花田智洋・天本祥文・仙波卓弥, 超硬合金に対するナノ fp 研削加工技術とマイクロレンズアレイ金型の試作,ABTEC2017 講演論文集 USB,E12(2017-8), pp.354-355.
- (34) 仙波卓弥・高原均・花田智洋・天本祥文・角谷均, 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の研削加工～ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロ研削工具の性質～, ABTEC2018 講演論文集, B33(2018-8), B33\_C000027\_1.pdf.
- (35) 仙波卓弥・天本 祥文・角谷均, 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の加工 ～NPD 製研削工具の切れ味と耐久性～, ABTEC2019 講演論文集,F18 (2019-8,埼玉大学), pp.499-500.
- (36) 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, Vol.17, No.3(2001), pp.15-20.
- (37) 小林昭, 超精密ダイヤモンド切削技術-歴史的展開, 現状, 将来への研究課題, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 12 (1986), pp.1-4.
- (38) 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 (1995.5), pp.1649-1654.
- (39) Z. J. Yuan, M. Zhou, S. Dong, Effect of Diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining, Journal of Materials Processing Technology, 62(1996), pp.327-330.
- (40) 田邊良美・清水浩樹・高野光央, Al-4.16%Mg 合金の音二次元切削切りくずの電子顕微鏡的考察,精密機械 42 巻 4 号, (1976), pp. 255-261.
- (41) 浅井昭一, 超精密ダイヤモンド切削における切りくずの観察と鏡面生成機構に関する研究, 精密工学会誌, Vol.55, No.10(1989), pp.1851-1856.
- (42) 井川直哉・島田尚一・R. R. Donaldson・V. 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取り厚さ, 精密工学会誌, Vol.59, No.4(1993), pp.673-679.
- (43) 柴田隆行・栗原賢二・牧野英司・池田正幸, 銅単結晶の超精密切削における加工変質層の結晶学的解析, 精密工学会誌 Vol. 61, No. 11 (1995), pp. 1569-1573.