

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 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

2018 年 4 月 1 日から同年 12 月 25 日までの 9 ヶ月間、硬さが 10 000 Hv のナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトを使ったにもかかわらず硬さが 400 Hv の無酸素銅を切削すると切れ刃にチッピングが生じるといった『起りえない現象』が発生し、原因を解明することに四苦八苦していた。この問題を克服できたのは 2018 年 12 月 26 日で、その後 2019 年 8 月には研究目標をクリアできる粗さが 10 nm Rz 以下の加工面を作ることができた。本報告書を作成している時点では、理想的加工が具現化されたこと（設定切込み深さと切りくずの厚さが同じになっていること）を証明するための研究を行っている。神様がそばにいてくだされば、次年度には研究目標を達成できていると思っている。

1. はじめに

1978年に出版された「切削加工論」⁽¹⁾の中で、中山一雄先生は「理想的加工」と「革命的加工」について以下のように表現されている。

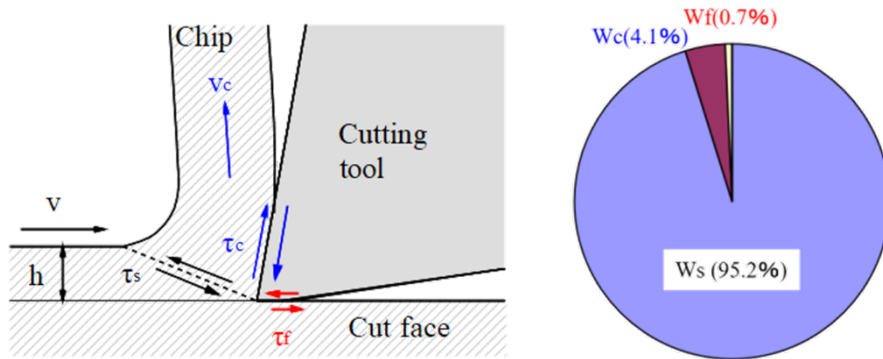
- ・ 切削加工の目的は工作物から不要な部分を排除して新生面を作ることであり、工作物の一部を塑性変形させ切りくずを排出するために費やされるエネルギーは無駄なエネルギーである。
- ・ 木材を木目に沿ってナタで割る時、二片を押しつけると元の形に戻る。これは（切りくずに相当する木材の破片を大きく変形させていないという意味で）「理想的加工」を行ったことになる。
- ・ しかし割れの位置や方向を十分な精度で制御することは困難である。もしそれができればエネルギーの面で「革命的な加工法」といえよう。

リンゴの皮むきに例えると、「理想的加工」と「革命的加工」は次のように説明できる。むいた皮が途中で切れないように上手にリンゴの皮をむくことができたとして、皮をリンゴの表面に巻き付けると皮はリンゴの表面を覆うことができる。また、皮の幅や厚さを人は無意識のうちに制御している。二片を押しつけると元の形に戻るという意味と、割れの位置や方向を十分な精度で制御しているという意味において、リンゴの皮をむくという行為は「理想的加工」と「革命的加工」を同時に行ったことになる。

これに対して鋼製リンゴの皮をむく場合、皮の幅や厚さは制御できる。しかし、皮を鋼製リンゴの表面に巻き付けても皮はリンゴ表面の約1/3しか覆うことができない。鋼製リンゴの例えと同じように、金属を切削すると設定切込み深さに比べて切屑の厚さが3倍程厚くなる。この場合、切削加工に費やされるほとんどのエネルギーは金属の原子配列を乱し、切りくずを作ることに費やされる。その結果、切りくずは加熱されるだけでなく、加工面には原子配列が乱された痕跡ともいえるバリが発生する。

2015年9月から開始した当該研究の目的は「理想的加工」と「革命的加工」を具現化することである。工具素材として使用したナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond)⁽²⁾に対してナノ秒パルスレーザーを使ったレーザー加工⁽³⁾、熱化学反応を利用した乾式ラッピング^{(4),(5)}、ならびに酸素プラズマを使ったドライエッチング^{(6)~(11)}を行い、刃先の丸み半径が炭素原子と同じNPD製ノーズRバイトを成形するための研究を行っている。2017年度からは、「理想的加工」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切削実験を始めている。

本報告書には、2018年9月から2019年8月の間に実施した研究の成果をまとめている。NPD製ノーズRバイトの刃先の丸み半径を炭素の原子半径と同じサイズに成形することに関しては、研究目標を達成できたと考えている。無酸素銅に対する切削実験に関しては、2018年12月25日までは、硬さが400 Hvの無酸素銅を硬さが10000 HvのNPD製ノーズRバイトで切削したにも関わらず、刃先に欠けが生じるといった現象を克服できなかった。2018年12月26日に欠



(a) エネルギーが消費される場所
 (b) エネルギーの消費割合
 図1 無酸素銅の端面切削に費されるエネルギー (h: 10 μm, v: 16 m/min, b: 1 μm/rev)

けの発生原因を突き止めることができ、研究目標を達成できる成果が得られつつある。

2. 研究目標

図1(a)に示しているのは、刃先の丸み半径に比べて設定切込み深さが大きい通常の切削加工時にエネルギーが費やされる箇所を示した模式図である。同図に示すように、切削加工に費やされるエネルギーは、せん断面でのせん断変形エネルギー W_s 、すくい面での摩擦エネルギー W_c 、ならびに逃げ面での摩擦エネルギー W_f 等に費やされる。これらのエネルギーの内、 W_s は次のように求められる。

$$W_s = \tau_s \cdot \gamma_s \cdot b \cdot h \cdot v \quad \dots(1)$$

ここで、 τ_s はせん断応力、 γ_s はせん断ひずみ、 b は被削材の幅、 h は設定切込み深さ、ならびに v は切削速度である。

同様にすくい面での摩擦エネルギー W_c や逃げ面での摩擦エネルギー W_f は、

$$W_c = \tau_c \cdot l_c \cdot b \cdot v_c \quad \dots(2)$$

$$W_f = \tau_f \cdot l_f \cdot b \cdot v \quad \dots(3)$$

と求められる。ここで、 τ_c は工具すくい面を切りくずが擦過する摩擦応力、 l_c は工具すくい面への切りくずの接触長さ、 v_c は切りくずの流出速度、 τ_f は工具逃げ面を新生面が擦過する摩擦応力、 l_f は工具逃げ面への新生面の接触長さである。

式(1)~(3)を使って無酸素銅の正面切削時(Turning)に消費されるエネルギーをシミュレーションすると、図1(b)のように求められる。切削加工時に費やされる95%以上のエネルギーは、工作物の一部をせん断変形させ、切りくずを排出させることに費やされる。「理想的加工法」、つまり切りくずの厚さが設定切込み深さと同じになるような加工技術を開発するためには、このせん断変形エネルギー W_s を限りなく0に近づける必要がある。式(1)から、 W_s を0に近づけるためには切削速度 v や設定切込み深さ h を0に近づければよいことがわかる。

図 2 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⁽¹²⁾である。0.5 nm の設定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 倍程度大きいため、刃先の丸み部分が新生面を擦過しているようすが伺える。現時点で入手できる市販の単結晶ダイヤモンド製切削工具の刃先の丸み半径は、図 2 に示したように約 10 nm である。したがって、前述したように、せん断変形エネルギーを 0 に近づけるためには設定切込み深さ h を 0 に近づける必要があるが、市販の切削工具を用いると刃先の丸み部分が新生面を擦過し、加工面には原子配列が乱された痕跡ともいえるバリが発生する。

図 3 に示しているのは、市販の単結晶ダイヤモンド製のノーズ R バイトを使って多結晶純アルミニウムを正面切削した小林先生の実験結果である⁽¹³⁾。刃先の丸み半径が大きく側方バリが生じることが原因で、送り速度が $30 \mu\text{m}/\text{rev}$ 以下の範囲では、粗さが 10 nm Rz 以下の加工面は作られていない。超精密切削に関する同様の研究は 1980 年代に盛んに行われており、当時の文献を調査すると「超精密切削を行い到達し得る粗さの限界は 10 nm 程度ではなかろうか」⁽¹⁴⁾と考察されている。

本研究の目標は、設定切込み深さと切りくずの厚さが同じになるような「理想的加工法」具現化することである。研究目標を達成するためには、切りくずを排出されるために消費されるせん断変形エネルギー W_s を限りなく 0 に近づける必要があり、そのためには設定切込み深さ h を小さくする必要がある。図 2 に示した円中央の赤丸は炭素原子である。もしも NPD 製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径を炭素の原子半径と同じサイズに成形できれば、設定切込み深さを原子半径と同じレベルにまで減らすことができ、設定切込み深さと同じ厚さの切りくずが排出される可能性がある。

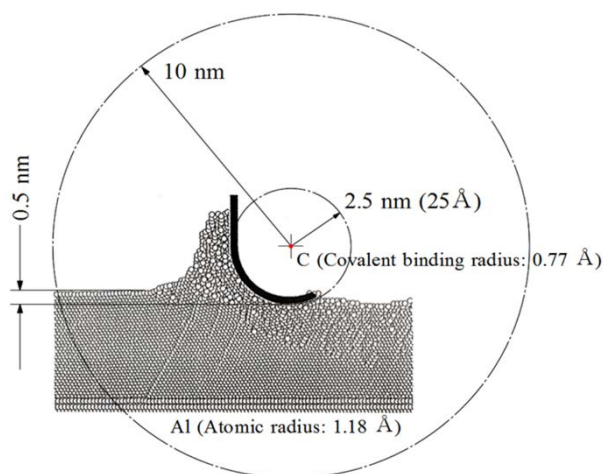


図 2 アルミの超精密切削時における原子配列の擾乱 (井川直哉, 極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ, 精密工学会誌 Vol. 59, No.4 (1993), pp.673-679.

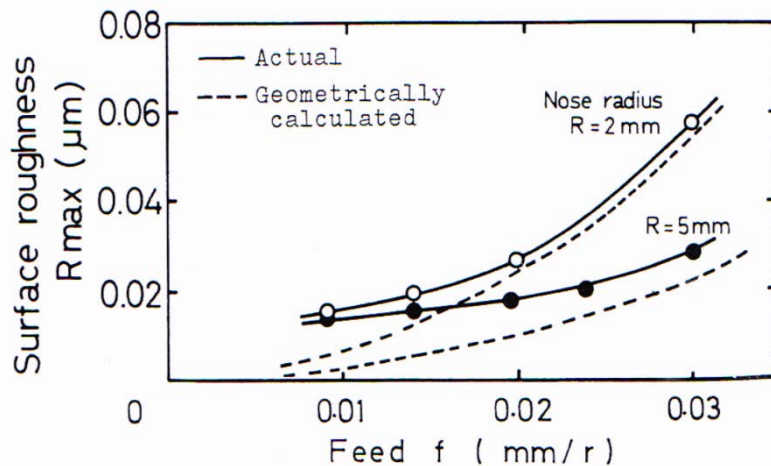


図3 従来の到達限界粗さ (A. Kobayashi・N. Hoshina・T. Tsukada・K. Ueda・, High Precision Cutting with a New Ultra Precision Spindle, Annals of the CIRP, Vol. 27/1(1978), pp. 283-287.)

3. 平成 30 年度に行った研究の内容

「1. はじめに」で述べたように、本研究では「理想的加工」を具現化するための研究を行っている。表1に示しているのは、平成30年度(2018年9月～2019年8月)に行った研究の内容である。「平成27年度研究成果報告書」⁽¹⁵⁾に記載した「表3 研究計課題とタイムスケジュール」と同じである。

「1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発」と題した研究では、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、すくい面や逃げ面を平坦に成形すると同時に刃先の丸み半径を1nmに成形することを研究目標に掲げた。平成30年度の研究を開始する前に、刃先の丸み半径を5～10nmに成形できていた。ただし、刃先に生じる欠けを防ぐことができなかった。平成30年度には、ラップに使用した焼結ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond)製円板に生じる面振れを0.5μm以下に成形し、欠けを防ぐための研究を行った。

「2. 切れ刃鋭利化のためのイオンエッチング技術の開発」と題した研究では、乾式ラッピングを行ったPCD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0.67Åに成形することを研究目標に掲げた。平成30年度の研究を開始する前に、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刃先に生じていた欠けが消滅し、刃先が鋭利化されるメカニズムは解明できていた。そこで、平成29年度と同様に平成30年度にも原子間力顕微鏡AFMを用いて刃先の丸み半径を測定し、刃先の丸み半径が0.67Åに成形されたことを証明するための研究を実施した。

表1 平成30年度(2018年9月～2019年8月)に行った研究実施内容

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020
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		→ 完了				
	② 乾式ラッピングに使用するモータの選定			→ 完了			
	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イオンエッチング技術の開発	④ イオンエッチングのメカニズムの解明			→ 完了			
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するイオンエッチング					→ 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 単結晶アルミニウムやレンズ用プラスチックに対する超精密精密切削					→ 継続	
	⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作					→ 完了	

「3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験」と題した研究では、無酸素銅に対して超精密切削加工を行い粗さが1 nm Rz以下の切削加工面を作ることを研究目標に掲げた。「1. はじめに」で述べたように、2018年12月25日までは、硬さが400 Hvの無酸素銅を硬さが10000 HvのNPD製ノーズRバイトで切削したにも関わらず、刃先に欠けが生じるといった現象を克服できなかった。2018年12月26日に欠けの発生原因を突き止めることができ、それ以降はNPD製ノーズRバイトの刃先の丸み半径と到達限界粗さとの関係を明らかにするための研究を実施した。

4. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術

4.1 ラップ

素材に対してナノ秒パルスレーザを用いた走査線加工⁽³⁾を行い、すくい角が0、逃げ角が10度ならびにノーズRが0.4 mmのNPD製ノーズRバイトを成形した。レーザ加工の後、すくい面や逃げ面を平坦に成形すると同時に刃先を鋭利に成形するために、熱化学反応を利用した乾式ラッピングを行った。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い成形した、直径が15 mmのPCD製円板（トーメイダイヤ、TDC-98F2とTDCF80）を使用した。

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、結合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砥粒によって機械的に擦過されるといった現象が発生するために、NPDを乾式ラッピングすることができる^{(4),(5)}。乾式ラッピング後に、電気マイクロメータを使って測定したラップの静的な面振れ

は $0.07\sim 0.2\ \mu\text{m}$ である.

4.2 すくい面と逃げ面に対する乾式ラッピング

図4に示しているのは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に示しているのは逃げ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製円板を圧入したジュラルミン製のホルダの芯振れと面振れは, ホルダの下部に設けた8本の止めボルトで調節した. またホルダの上部に設けた8本の止めボルトは, 自転系の動バランスをとり, エアスピンドルを高速回転させた場合に生じる振動を押さえるために使用した.

すくい面をラッピングする場合には図4に示したY軸の方向, 逃げ面をラッピングする場合にも図5に示したY軸の方向に工具を揺動させ, ラップの同じ位置に工具が長時間接触しない

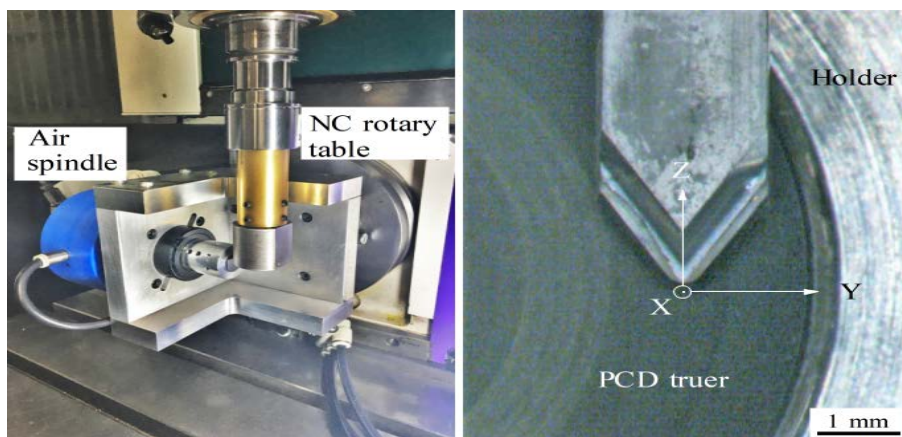


図4 すくい面に対して乾式ラッピングを行っているようす

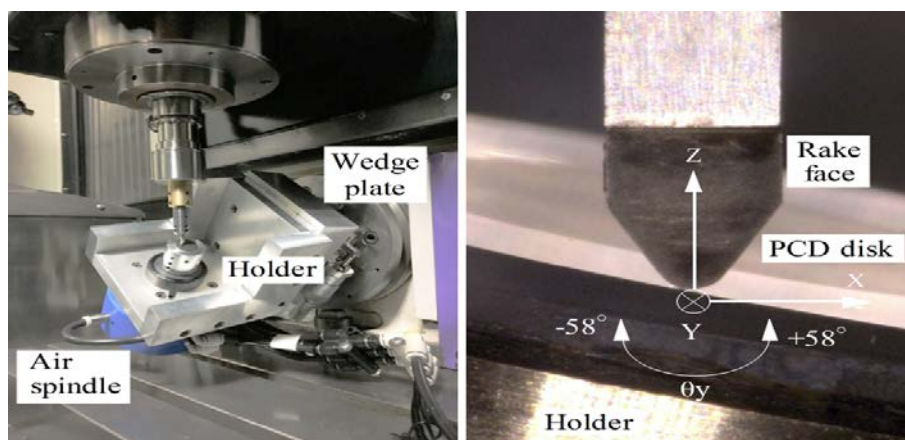


図5 逃げ面に対して乾式ラッピングを行っているようす

ようにした。揺動の振幅は $\pm 50 \mu\text{m}$ 、揺動速度は 1 mm/min とした。逃げ面が平滑になるまで先に5時間程度ラッピングした後、 $\times 1000$ の機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。

4.3 乾式ラッピングの結果

図6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 $4\sim 10 \text{ nm}$ で

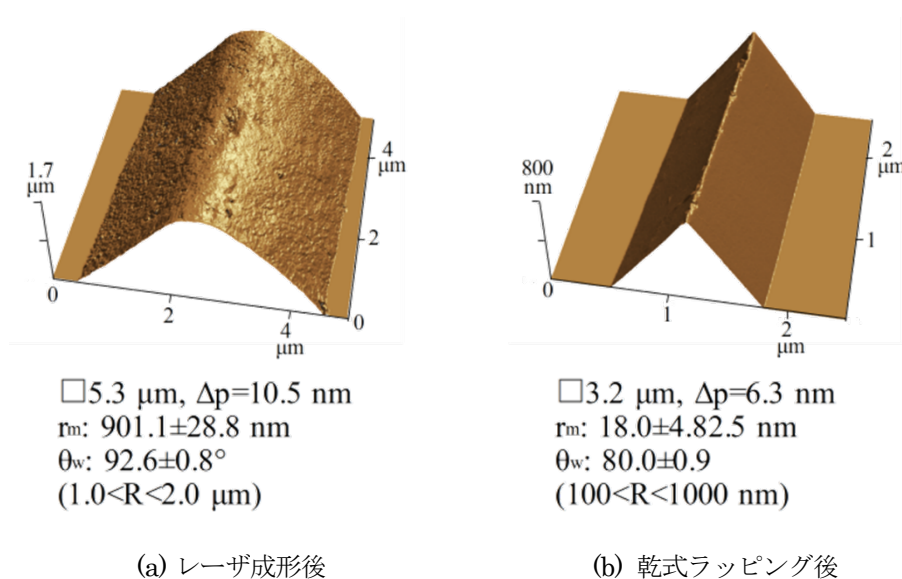


図6 レーザ成形後と乾式ラッピング後に観察した前切れ刃のAFM画像

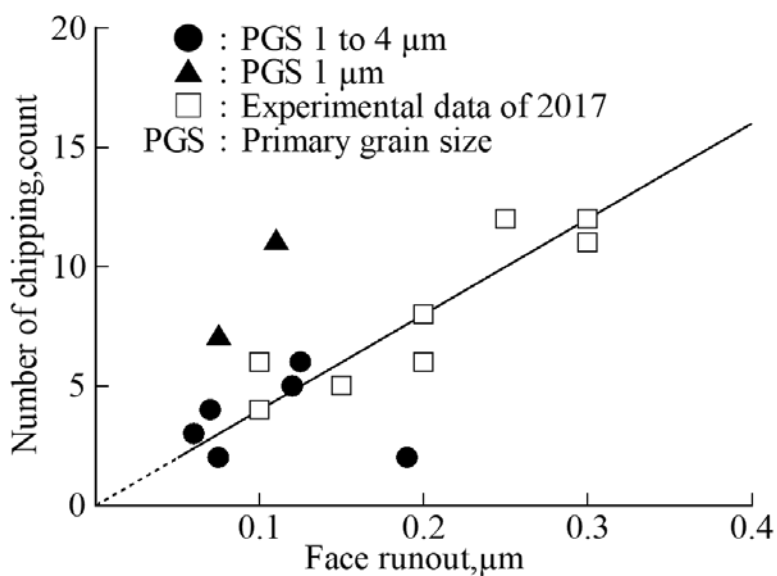


図7 ラップに生じていた面振れと工具軸を中心にして $\pm 20^\circ$ の範囲にある切れ刃に生じていた欠けの数(2019/3/E)

ある。レーザ成形後に測定値 r_m で $901 \pm 28.8 \text{ nm}$ あった刃先の丸み半径は、 $18 \pm 4.8 \text{ nm}$ まで鋭利化されている。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たことが原因で、 $\times 1\,000$ 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する。

図 7 に示しているのは、主切れ刃、前切れ刃、ならびに副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。10 000 倍で観察した電子顕微鏡 SEM の画像から、欠けの個数をカウントした。ラップの面振れが $0.1 \mu\text{m}$ 以下になるように意識してラップを成形した場合には、工具の中心軸から $\pm 20^\circ$ の範囲にある欠けの数は明らかに減少する傾向にある。ラップの面振れを $0.05 \mu\text{m}$ 以下に成形できる技術を開発できれば、欠けの数を 3 個以下に減らせる可能性はある。酸素プラズマを使ったドライエッチングを行うと、サイズが $1 \mu\text{m}$ 以下の欠けは容易に消すことができる。その上で、欠けがない刃先を成形できる乾式ラッピング技術については、次年度も継続して技術開発を実施する。

図 8 に示しているのは、AFM を用いて測定した乾式ラッピング後の前切れ刃に関する刃先の丸み半径である。図の縦軸には、測定値からカンチレバー先端の丸み半径を引いて求めた実刃形の丸み半径を示している。「4. 2 すくい面と逃げ面に対する乾式ラッピング」の項目で述べたとおり、逃げ面が平滑になるまで先に 5 時間程度ラッピングした後、 $\times 1\,000$ の機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。したがって、成形条件は図 8 に示した 5 本の工具で同じであるが、加工時間がそれぞれの工具で異なっている。NDZ③の工具では、偶然という感が強いが、刃先の丸みを 0.1 nm に成形できた。これは、乾式ラッピングを行うと刃先の丸み半径を 1 nm 以下に成形できる可能性があることを示唆している。

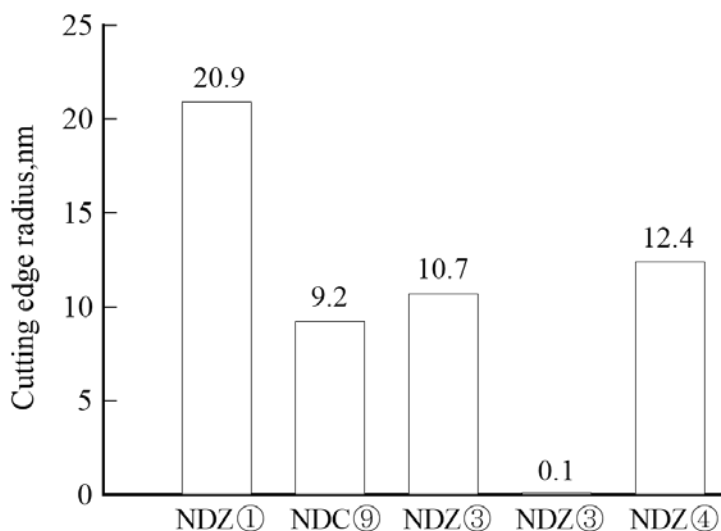


図 8 AFM を用いて測定した乾式ラッピング後の刃先の丸み半径 (測定値からカンチレバーの刃先の丸み半径を引いて求めた実刃形の丸み半径)

5. 切れ刃鋭利化のためのイオンエッチング技術

5.1 ドライエッチング装置とドライエッチングのメカニズム

乾式ラッピング後のNPD製ノーズRバイトに対するドライエッチングには、誘導励起型のドライエッチング装置⁽¹⁶⁾を使用した。図9に示しているのは、真空チャンバ内のような装置の模式図である。チャンバ内に酸素を入れ、チャンバ内を0.3Pa以上に排気した上でターゲットに高周波電圧を印加すると、ターゲット近傍の酸素分子が電子でたたかれ、ターゲットの近傍にプラスとマイナスに電離したプラズマが発生する。

NPD製ノーズRバイトをクランプしたS45C製のホルダにマイナスの電圧を印加すると、プラスに帯電した酸素プラズマがホルダに衝突して鉄の粒子がスパッタされる。この、スパッタした鉄の粒子がNPDに付着しNPDに導電性を付与するために、NPD製ノーズRバイトはプラスに帯電した酸素粒子にたたかれてドライエッチングされる。なお、アンテナはターゲットの近傍に発生したプラズマを上方に引き上げる、つまりプラズマを加速してNPDに衝突する酸素プラズマの速度を上げる役割を果たしている。

「平成28年度研究成果報告書」⁽¹⁷⁾に記述したように、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性質を持っている。その結果、レーザ成形を行い図6(a)のように成形された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刃先の丸みは消滅する。また、乾式ラッピングを行い図6(b)のように成形された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欠けは消滅する。平成30年度には、乾式ラッピング後に刃先の丸み半径が異なる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い、成形し得る丸み半径の限界を明らかにするための実験を行った、

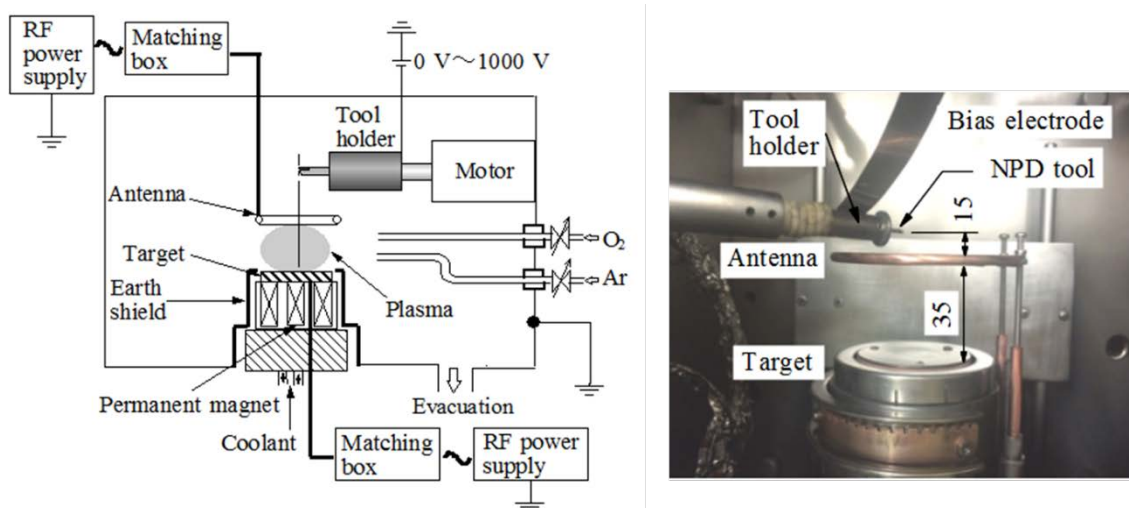


図9 NPD製ノーズRバイトのドライエッチングに使用した誘導励起型のドライエッチング装置（酸素プラズマを使った反応性イオンエッチングを実施）

5. 2 原子間力顕微鏡とカンチレバー先端の丸み半径

「平成 29 年度研究成果報告書」⁽¹⁸⁾に記述したように、ドライエッチングを行った NPD 製ノーズ R バイトの前切れ刃の刃先丸みの測定には原子間力顕微鏡 AFM(島津製作所, SPM-9500J3), カンチレバーにはオリンパス, OMCL-AC160TS を使用した。カンチレバー刃先の丸み半径は 4~10 nm である。事前にシミュレーションを行い、刃先の丸み半径を測定する場合の測定ピッチ Δp は 1 nm に設定した。

5. 3 逆オフセット法を使った刃先丸み半径の測定

図 10 に示しているのはシミュレーションの結果であり、測定される断面曲線に対して逆オフセット法を用いて求めた実刃形の断面形状である。測定される刃先の丸み半径 r_m を 7 nm に設定した上で、プローブの先端半径 r_p を 4~10 nm の範囲で変化させた場合の結果である。図 10(a) に示したように実刃形に関する刃先の丸み半径 r は、

$$r = r_m - r_p > 0 \quad \dots(4)$$

と求められる。ここで、プローブ先端の丸み半径 r_p は、4~10 nm の範囲でばらつきがある。ここで、式(4)の r_p に r_m を代入すると r は 0, r_p に 4 nm を代入すると r の最大値を求めたことになる。実刃形に関する刃先の丸み半径が 0 ということはない。そこで、本研究では式(4)の r_p に 4 nm を代入し、 r の最大値を求めることにした。

5. 4 成形し得る刃先の丸み半径

図 11 に示しているのは、「平成 29 年度研究成果報告書」⁽¹⁸⁾に記述した、エッチング時間と NPD 製ノーズ R バイトの刃先の丸み半径との関係である。同報告書の中で考察したように、刃先の丸み半径が炭素原子の原子半径よりも小さく成形されることはないが、原子半径と同じサイズにまでは成形される可能性がある。つまり、処理時間を長くしてドライエッチングを行うと、いつか実刃形に関する刃先の丸み半径は炭素原子の原子半径と同じ値に収束するのではないかと考えられた。

この場合、実刃形に関する刃先の丸み半径は炭素原子と同じサイズにまで成形されているはずなので $r \doteq 0$ と見なすことができる。これを式(4)に代入すると

$$r_m \doteq r_p \quad 4 < r_p < 10 \text{ nm} \quad \dots(5)$$

となる。この結果は、刃先の丸み半径が同じ値に収束するまでドライエッチングを行い、測定値 r_m から収束した測定値に相当する r_p を引けば、限りなく 0 に近い実刃形に関する刃先の丸み半径が求まることを意味する。

そこで、平成 30 年度には、乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対し処理時間を長くしてドライエッチングを行った。図 12 に示しているのは、ドライエッチングの処理時間と測定された刃先丸み半径との関係である。刃先丸み半径が収束する値は、使用したカンチレバー先端の丸み半径が異なると変化した。ただし、カンチレバー先端の丸み半径 r_p が異なる各場合とも、ドライエッチングを 10 時間以上行うと測定される刃先の丸み半径は r_p に相当する値に収

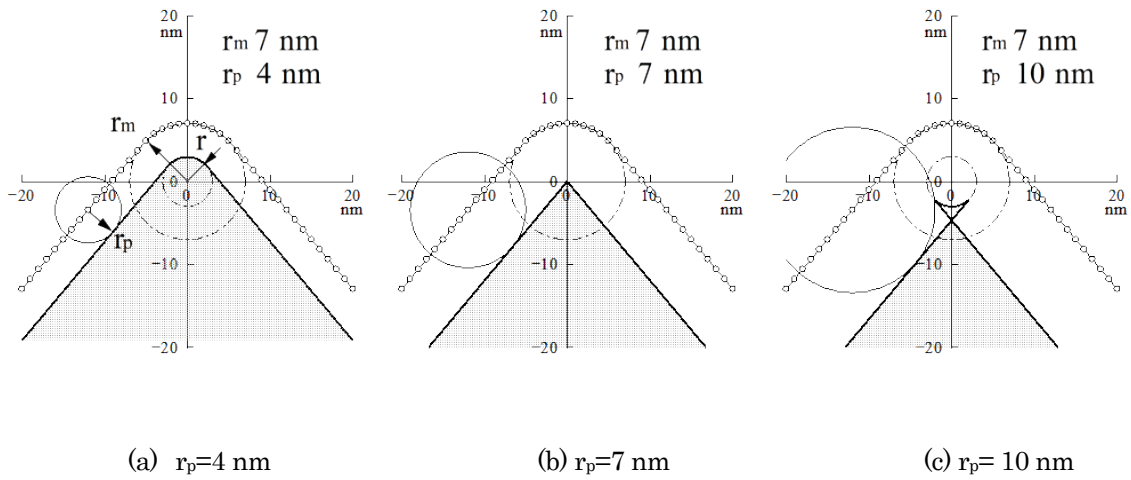


図 10 逆オフセット法を用いて推定した実刃形の断面形状 (測定した刃先の丸み半径 r_m : 7 nm)

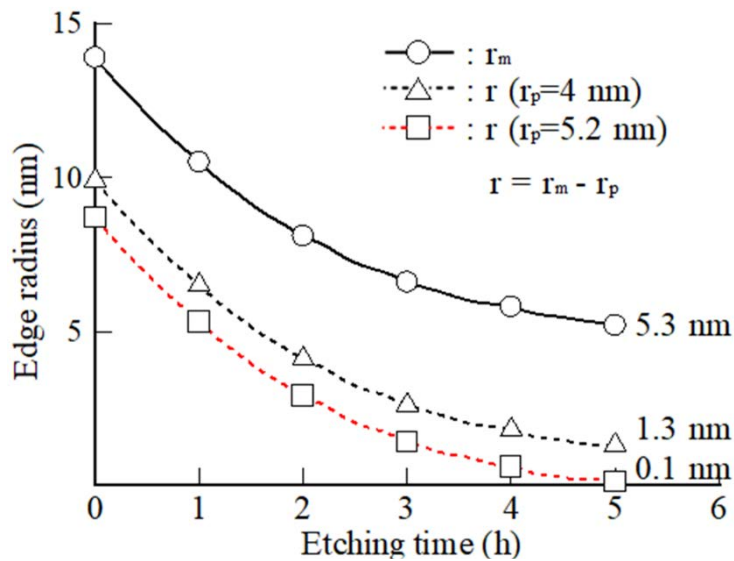


図 11 ドライエッチングの処理時間と刃先の丸み半径

束した. 図 12 に示した縦軸は, 刃先丸み半径が収束する値が 4 nm になるように測定値を上下にシフトした値である.

式(4)の r_p に刃先丸み半径が収束した値を代入し, 実刃形に関する刃先の丸み半径 r を求めると 0.1 nm 前後の値が得られた. ドライエッチングを 10 時間以上行い r_m が変化しなくなった領域では, 実刃形に関する刃先の丸み半径は 0.1 nm 前後の値に成形されているのではないかと考えている.

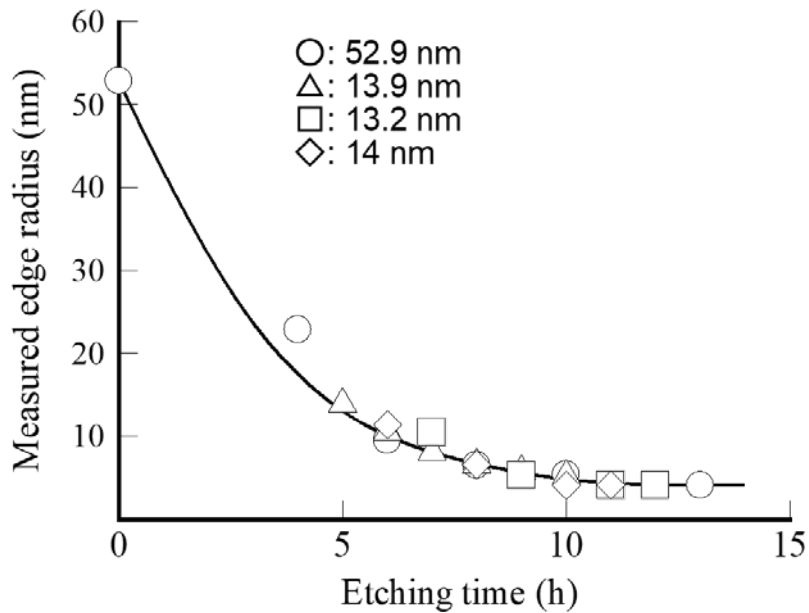


図 12 ドライエッチングの処理時間と刃先の丸み半径（測定値）

6. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験

6.1 検証の方法

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。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^{(19)~(23)}。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、当時から切削加工面の粗さが理論粗さと一致しないことには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 であると結論されている^{(14),(23)}。

図 13 に示しているのは、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⁽²⁴⁾である。実験事実について精緻な考察がなされている研究であり、以下の現象が生じるために切削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。

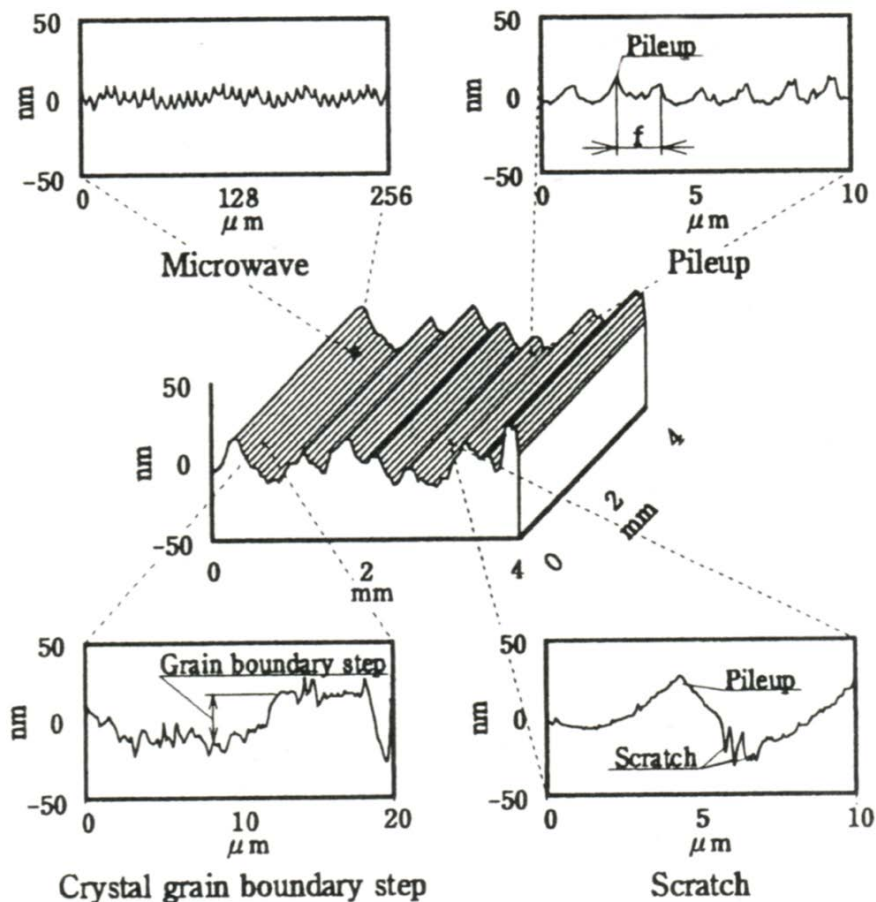


図13 単結晶ダイヤモンド製のノーズRバイトを使用し無酸素銅の超精密切削加工を行った場合に生じる粗さの発生要因

- (a) 図13に Pileup と表現されているのは主として切削工具の工具形状が転写された痕跡であり、無酸素銅の側方バリ（盛上がり）も含まれているために $R_{p/8R}$ と求められる理論粗さは得られない。
- (b) Crystal grain boundary step と表現されているのは粒界段差のことであり、加工面に露出している銅の結晶面が結晶ごとに異なり、結晶面によって被削性が異なるために発生する。
- (c) Scratch と表現されているのは、主として切れ刃に微細な欠けが生じていたために生じる引っ掻き傷のことである。加工中に切りくずを巻き込んだ場合にも発生する。
- (d) Microwave と表現されているのは、図面から判断するとノーズ R の形状が転写されたと思われる溝の中に生じているので、ノーズ R の輪郭に揺らぎがあるために生じた一種の形状誤差のことではないかと思われる。あるいは、工作機械主軸が振動している場合にも Microwave は発生する。

工作機械の振動はともかく、(a)の側方バリ、(b)の被削性、(c)の刃先に生じる微細な欠け、(d)のノーズ R 形状の揺らぎに起因して発生する粗さに関しては、本研究で開発した NPD 製ノーズ R バイトを用いると除去できる可能性が高い。そこで、直径が 20 mm の無酸素銅に対して正面切削を行った。

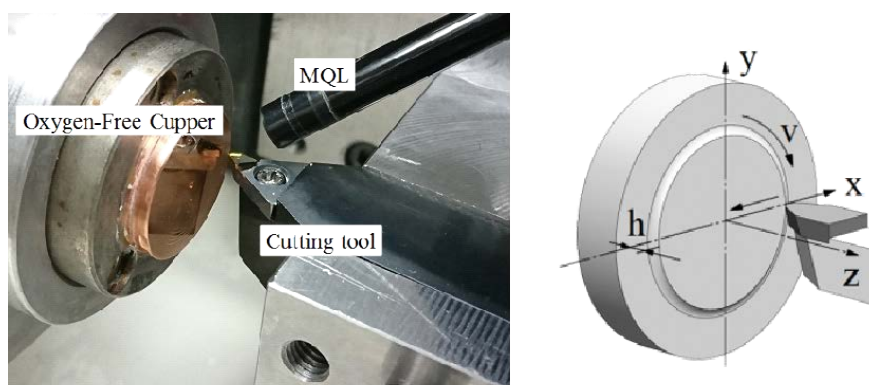
6.2 正面切削の要領と加工条件

図 14 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と加工の要領である。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), 切削工具には市販の単結晶ダイヤモンドバイト SCD 製ノーズ R バイト(アライドマテリアル, UPC)と、試作したノーズ NPD 製ノーズ R バイトを使用した。両方の工具とも、ノーズ R の半径は 0.4 mm である。また、被削材には純度が 99.999% で直径が 20 mm の多結晶純アルミニウム、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。

図 15 に示しているのは、「2. 研究目標」でも引用した、アルミ合金に対して正面切削を行った小林先生の実験結果である。横軸に示しているのは工作物一回転あたりの送り量、縦軸に示しているのは被削材の半径方向に測定した最大高さ粗さである。図中に破線で示しているのは、

$$R_z = f^2 / (8R), \quad f = v/s \quad \dots(6)$$

と求められる理論粗さである。ここで、 v は工具の送り速度、 s は被削材を装着した主軸の回転数である。ノーズ R バイトのノーズ半径を変えて実験されているが、送り速度が $20 \mu\text{m}/\text{rev}$ 以下の範囲では加工面の粗さは理論粗さよりも大きく、到達限界粗さは $15 \text{ nm } R_z$ 前後ではないかと思われる。本研究では、主軸の回転数を 120 rpm, 設定切込み深さ h を 200 nm に保った上で、工具の送り速度 f を $2.5 \sim 15 \mu\text{m}/\text{rev}$ ($1.5 \sim 9 \text{ mm}/\text{min}$) の範囲で変化させて正面切削を行った。つまり、図 15 に網掛けをした範囲で切削実験を行った。加工面粗さの測定には三次元光学プロファイラ(Zygo, Newview™ 9000)を使用した。



(a) 装置の外観

(b) 正面切削の要領

図 14 無酸素銅の正面切削に使用した装置の外観と加工の要領

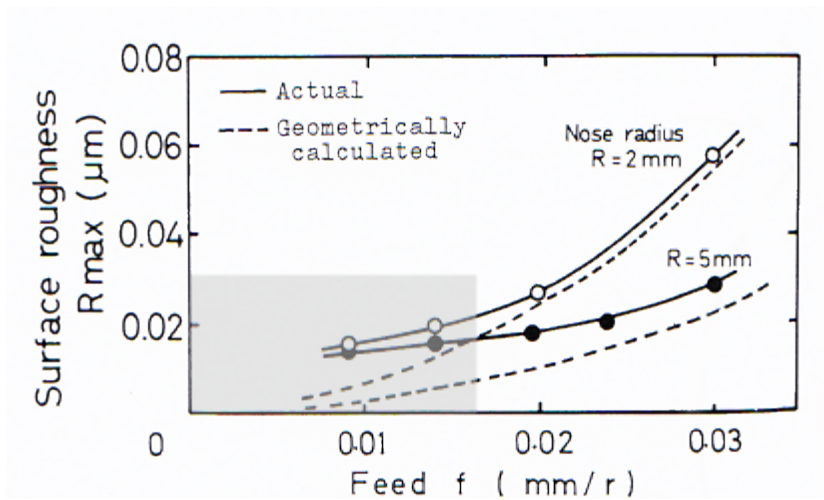


図 15 加工条件(A. Kobayashi・N. Hoshina・T. Tsukada・K. Ueda・, High Precision Cutting with a New Ultra Precision Spindle, Annals of the CIRP, Vol. 27/1(1978), pp. 283-287.)

6. 3 刃先の欠けと前加工面の成形

図 16 に示しているのは、切削実験に使用した被削材端面の加工領域である。2018 年 12 月 25 日までは、面振れを除去するために市販の PCD 製ノーズ R バイトを用いて図 16(a)に示した領域を加工した後、市販の SCD 製ノーズ R バイトを使用して同領域に対して切削実験を行っていた。図 17(a)と図 17(b)に示しているのは、加工後に観察した SDC 製ノーズ R バイトの刃先である。硬さが 400 Hv の無酸素銅を硬さが 10000 Hv の SCD 製ノーズ R バイトで切削するとノーズ R バイトの刃先が欠けるといった、信じられない現象が発生した。欠けの大小に違いはあったが、2018 年 12 月 25 日までは SDC 製ノーズ R バイトの刃先に欠けが生じていた。

PCD 製ノーズ R バイトを使って被削材の面振れを除去した際、同工具が摩耗するという現象が生じていた。また、被削材の外周に生じる芯振れを除去するための加工は行っていなかった。したがって、PCD 製ノーズ R バイトで外周部を切削すると刃先に衝撃力が作用し、ダイヤモンド粒子の結合力が弱くなっただけでなく、粒子の一部が脱落した可能性が考えられた。もしも PCD から脱落したダイヤモンドの粒子が加工面に突き刺さり、SDC 製ノーズ R バイトがこの粒子が突き刺さった被削材の表層を切削したのであれば、図 17(a)や図 17(b)に示したようにバイトの刃先に欠けが生じていても不思議ではない。

そこで、微分干渉顕微鏡を用いて PCD 製ノーズ R バイトを使って面振れを除去した加工面を観察した。図 17(c)に示しているのは加工面の顕微鏡画像である。思いもよらなかったが、予想したとおり加工面には PCD から脱落したダイヤモンドの粒子が突き刺さっていた。この、ダイヤモンドの粒子が突き刺さった被削材の表面を一度剥くために、図 16(b)に示した領域に対して熱間圧延材の表面に付着した黒皮を剥く要領で、つまり設定切込み深さを深くして正面切削を行い前加工面を成形した。また、SDC のノーズ R バイトを使用し、図 16(c)に示した領域に対し正面切削を行った。2018 年 12 月 26 日のことである。

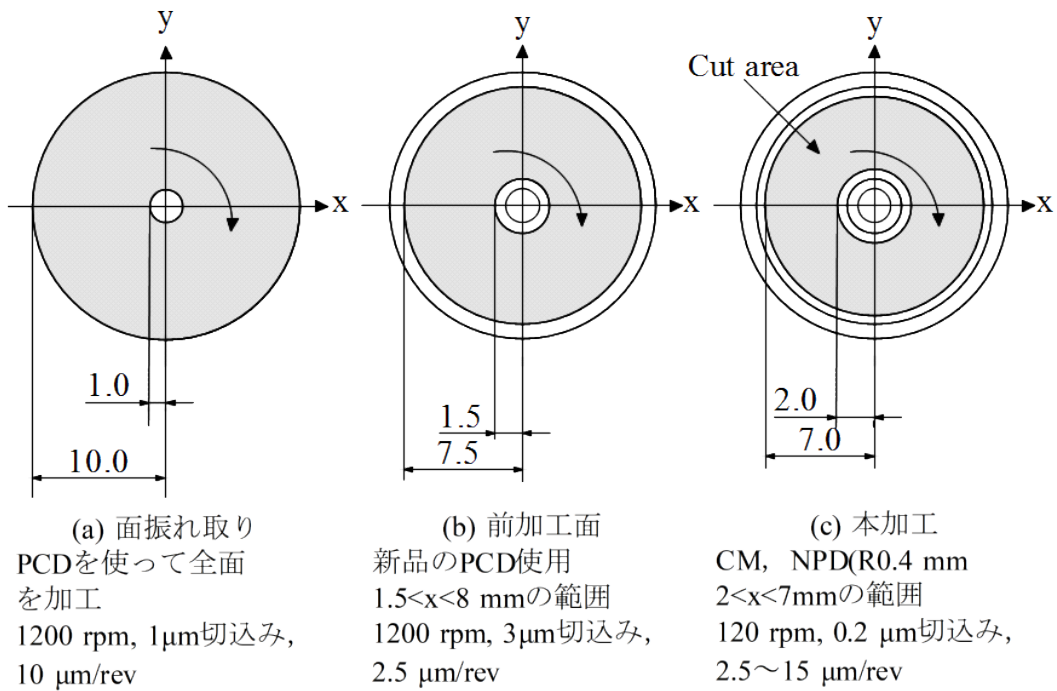


図 16 切削実験に使用した被削材端面の領域 (直径 20 mm)

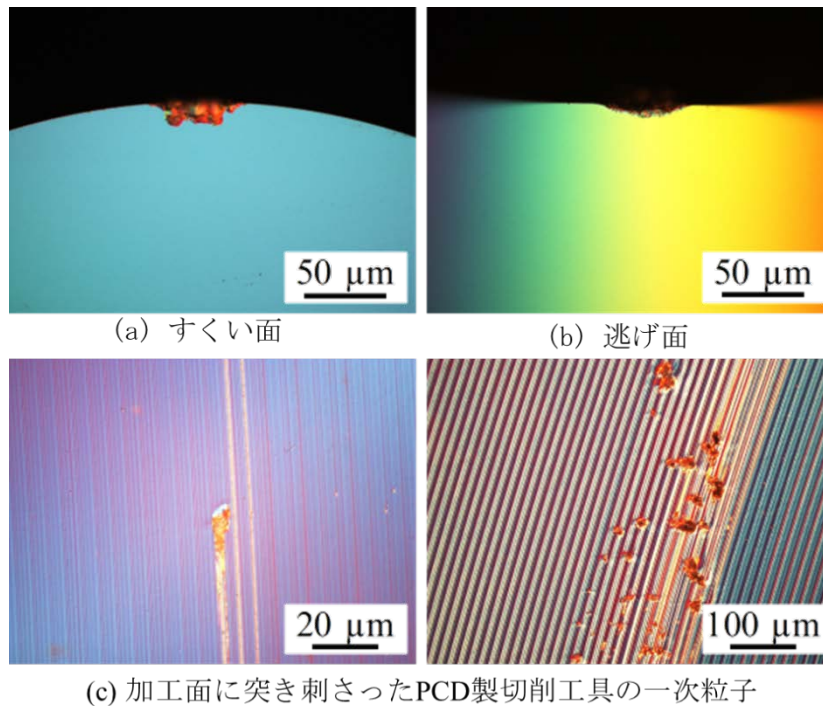


図 17 面振れを除去した後, 図 16(a)に示した領域を市販の単結晶ダイヤモンド製ノーズ R パイトを使って正面切削した後に観察した工具の刃先と加工面

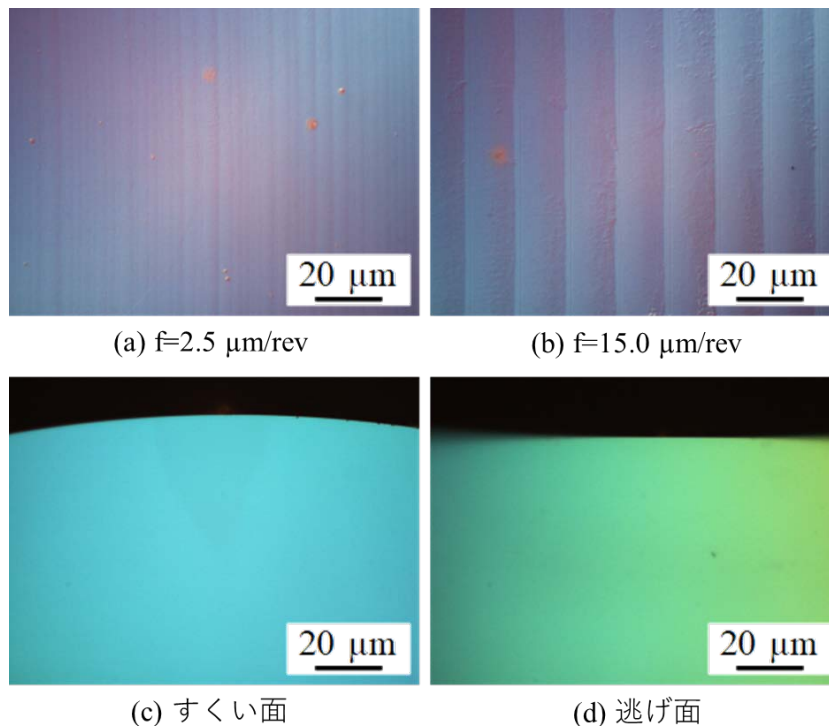


図 18 PCD 製ノーズ R バイトを使って図 16(b)の領域に対して前加工面を成形した後、SCD 製ノーズ R バイトを使って図 16(c)の領域を正面切削した後に観察した加工面と工具の刃先

図 18 に示しているのは、微分干渉顕微鏡を用いて加工後に観察した加工面と工具の刃先である。図 18(a)に示しているのは送り速度が $2.5 \mu\text{m/rev}$ の加工面、図 18(b)に示しているのは送り速度が $15 \mu\text{m/rev}$ の加工面である。約半年間悩まされていた工具の摩耗については、これを完全に克服できた。また、これまでに見たことがない、スクラッチが全くない加工面を作ることができた。2018 年 12 月 26 日以降、加工後に SDC 製ノーズ R バイトの刃先が欠けるという現象は生じていない。『ついに』という感が強いが、研究目標を達成するための加工技術を作ることができた。

6. 4 到達限界粗さ

図 19 に示しているのは、試作した NPD 製ノーズ R バイト(実刃先の丸み半径 $r:0.1 \text{ nm}$)と、市販の SDC 製ノーズ R バイト(実刃先の丸み半径 $r:20 \text{ nm}$ と 100 nm)を使用し、無酸素銅に対する正面切削を行った場合に得られた送り速度と、被削材の半径方向に測定した最大高さ粗さとの関係である。粗さの測定には三次元光学プロファイラ(Zygo, Newview™ 9000)を使用した。断面曲線からうねり曲線を除去して、最大高さ粗さを求めることにした。図 19 には、式(6)のように求められる理論粗さを実線で付記した。

試作した、実刃先の丸み半径 r が 0.1 nm の NPD 製ノーズ R バイトを用いた上で、送り速度を

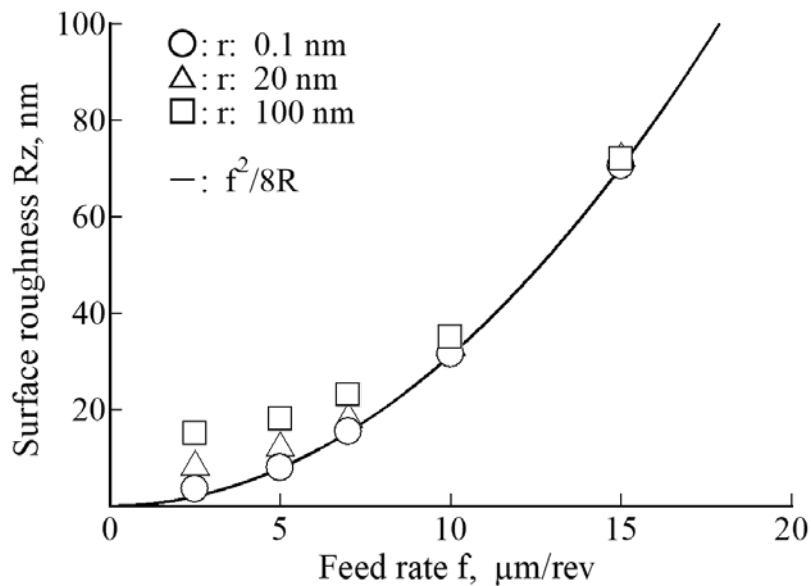


図 19 試作した NPD 製ノーズ R バイト(r0.1 nm)と市販の SDC 製ノーズ R バイト(r20, 100nm)を使って正面切削を行った場合に得られた送り速度と半径方向に測定した粗さ

2.5μm/rev に設定して正面切削を行った場合には、理論粗さが 2.5 μm Rz であるのに対し粗さが 3.3 μm Rz の加工面を作ることができた。粗さが 10 nm Rz の加工面を作るといった研究目標は達成できたと安堵している。一方、r が 20 nm のバイトを使った場合には粗さが 10 nm Rz 以下、r が 100 nm のバイトを使った場合には 20 nm Rz 以下の加工面を作ることができた。当初予想していたよりも平滑な加工面を作ることができた。

刃先の丸み半径 r が 0.1 nm と 10 nm 以上の刃物とでは、切りくずの厚さや長さが大きく異なると予想される。このような観点から、2019 年度には加工面の粗さだけでなく刃先の丸み半径と切りくずの厚さや幅との関係を明らかにするための基礎研究を行っている。これらの現象がすべて明らかになれば、本研究で開発した刃先の丸み半径が 0.1 nm 前後の NPD 製ノーズ R バイトは、樹脂製レンズを量産するニッケル/リンやリン青銅製金型のバリレス加工に貢献できると考えている。

7. 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作

7.1 研究の経緯

2012 年 1 月～2014 年 8 月までの間、当財団の研究助成を受け「超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」⁽²⁵⁾という課題の研究を実施する幸運に恵まれた。ビッカース硬さが 2 650 Hv の超合金に対してマイクロ研削加工を行い、個々のレンズの直径が 50 μm 以下、粗さが 10 nm Rz 以下の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、工具

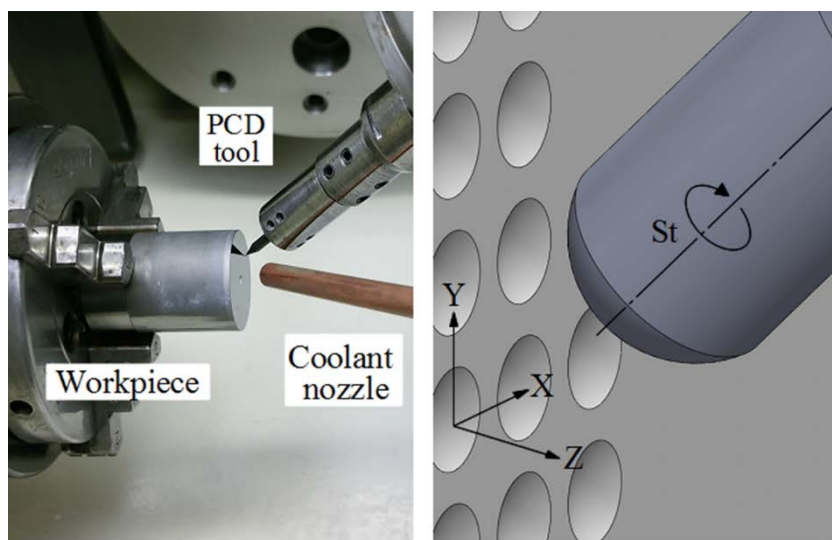
技術と加工技術を作ることが研究の目標であった。当該研究を立案した 2015 年 4 月の段階でも研究目標は達成できておらず、表 1 に示したように本研究でも継続して実施することを計画した。2018 年度には、レンズアレイの加工に使用する NPD 製マイクロ研削工具の切れ味を良くするための研究を継続して行った。足かけ 8 年を要したことになるが、やっと研究目標を達成できる成果を得ることができた。「理想的加工法」を具現化するといった本研究の主目的とは異なるが、研究の成果について簡単に報告する。

7.2 レンズアレイの加工に使用した装置と加工の要領

図 20 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、ビッカース硬さが 2 650 Hv で直径が 20 mm の超合金(ダイジェット, CW500)の端面に対してナノ fp 研削加工⁽²⁶⁾を行い、端面の粗さを 20 nm Rz 前後に成形した。研削工具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(住友電工, DA150)製の研削工具、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。端面を研削加工した後、工具先端の半径を 0.1 mm に成形した焼結ダイヤモンド(PCD)製のマイクロ研削工具やナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製のマイクロ研削工具を使用し、工具先端の形状を転写する方式で、直径が約 1 mm の領域に個々のレンズ直径が 30 μm でレンズピッチが 35 μm のマイクロレンズアレイを加工した。

7.3 マイクロ研削工具の成形と成形結果

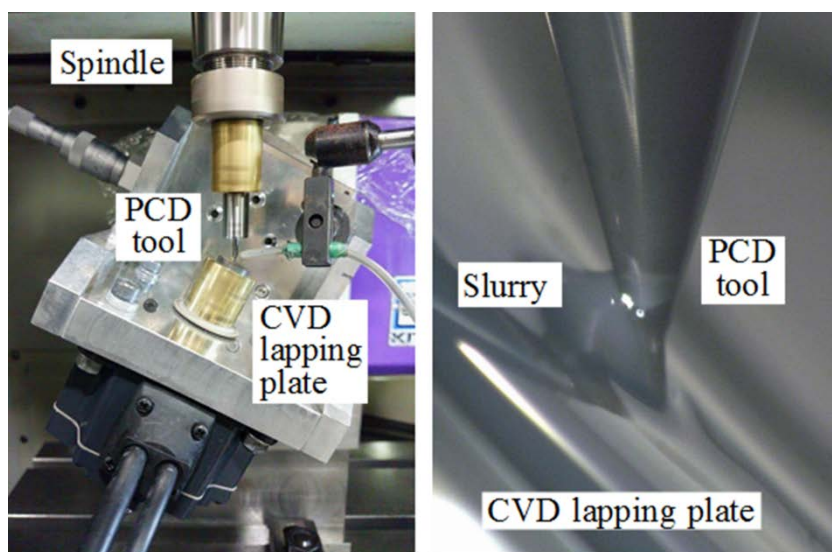
マイクロ研削工具の素材には、焼結後のダイヤモンドの粒子が約 50 nm のナノ多結晶ダイヤモンド NPD を使用した。工具素材に対してナノ秒パルスレーザを使ったレーザ加工と湿式ラッピングを行い、工具先端の半径を 0.1 mm に成形した。図 21 に示しているのは、湿式ラッピング



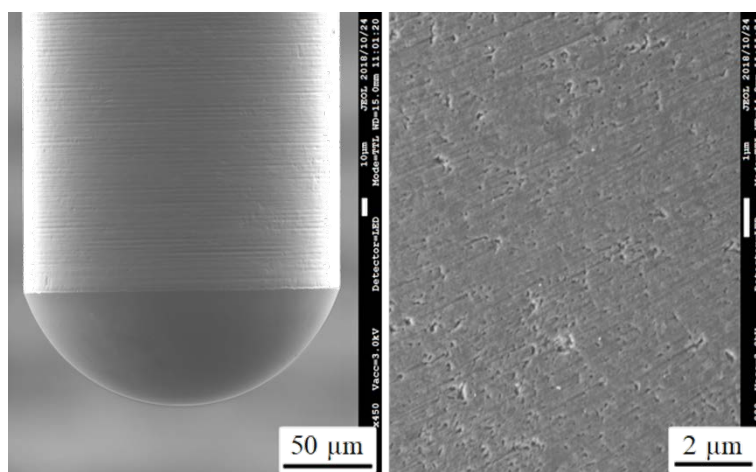
(a) 装置の外観 (b) 加工の要領
図 20 マイクロレンズアレイの加工に使用した装置の外観と加工の要領

に使った装置の外観である。レーザ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。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 μm のダイヤモンドスラリを使用した。

図 22 に示しているのは湿式ラッピング後に観察した NPD 製マイクロ研削工具の外観、図 23



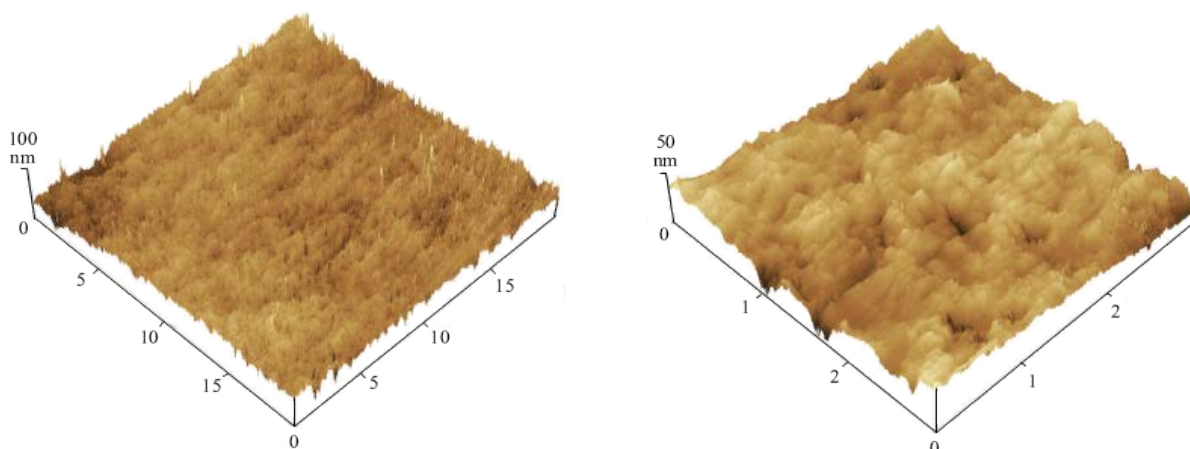
(a) 装置の外観 (b) 接触部分の拡大
 図 21 マイクロ研削工具の湿式ラッピングに使用した装置



(a) 工具外観 (b) 砥石作用面
 図 22 湿式ラッピング後に観察した NPD 製マイクロ研削工具の外観と砥石作用面
 (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)

に示しているのは AFM を用いて観察した砥石作用面の状態である。図 23(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ノメートル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#94 000 (15 000/3Sz)に相当する。ただし、砥粒の先端は鋭利でなく丸まっている。

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が良くなることを期待して、半径が 0.1 mm の半球状の砥石作用面に対してレーザー加工を行い、螺旋溝を成形した。



(a) 観察領域: □ 20 μm , Sz(Sa): 91.1(6.8) nm

(b) 観察領域: □ 3 μm , Sz(Sa):54.2(4.78) nm

図 23 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 μm)

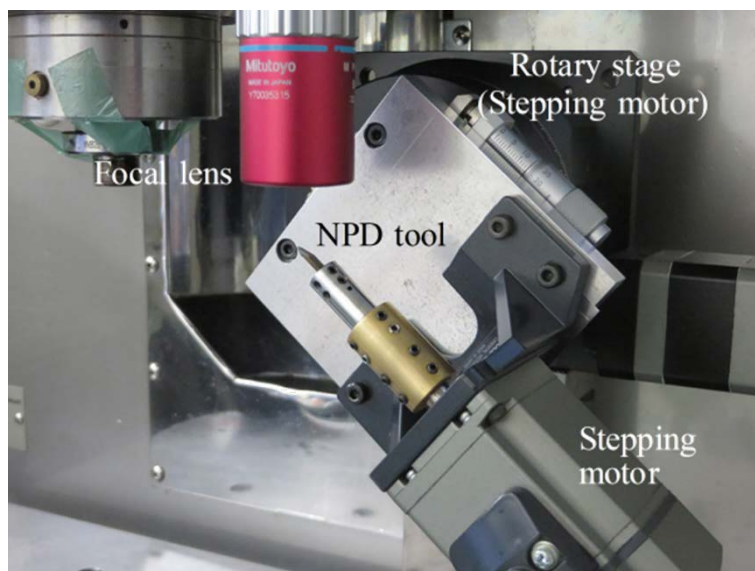


図 24 半球状の砥石作用面への螺旋溝の成形に使用した装置の外観

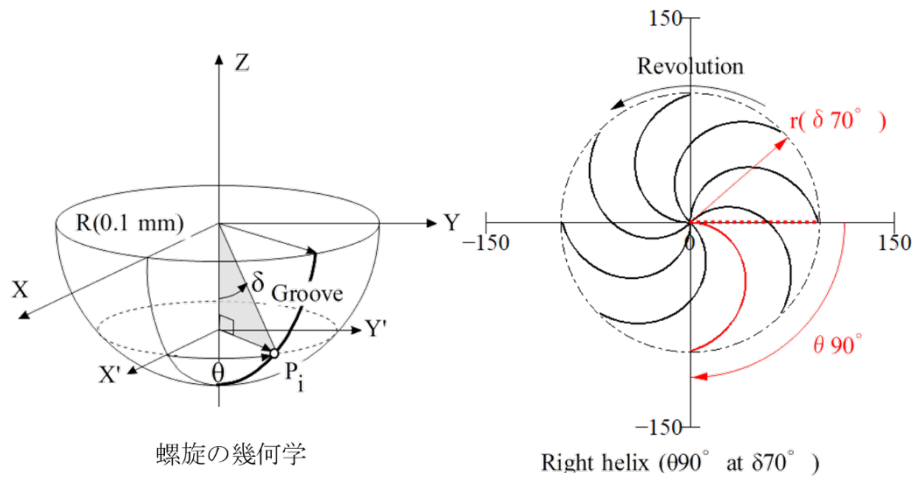


図 25 半球状の砥石作用面に成形した螺旋溝の形状

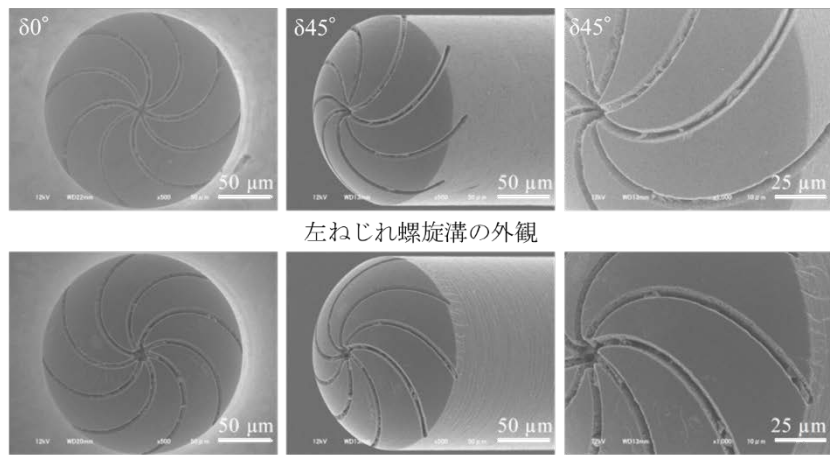


図 26 レーザ成形後に観察した右ねじれと左ねじれの螺旋溝(工具半径0.1 mm)

7. 4 螺旋溝の成形に使用した装置と螺旋の形状⁽²⁷⁾

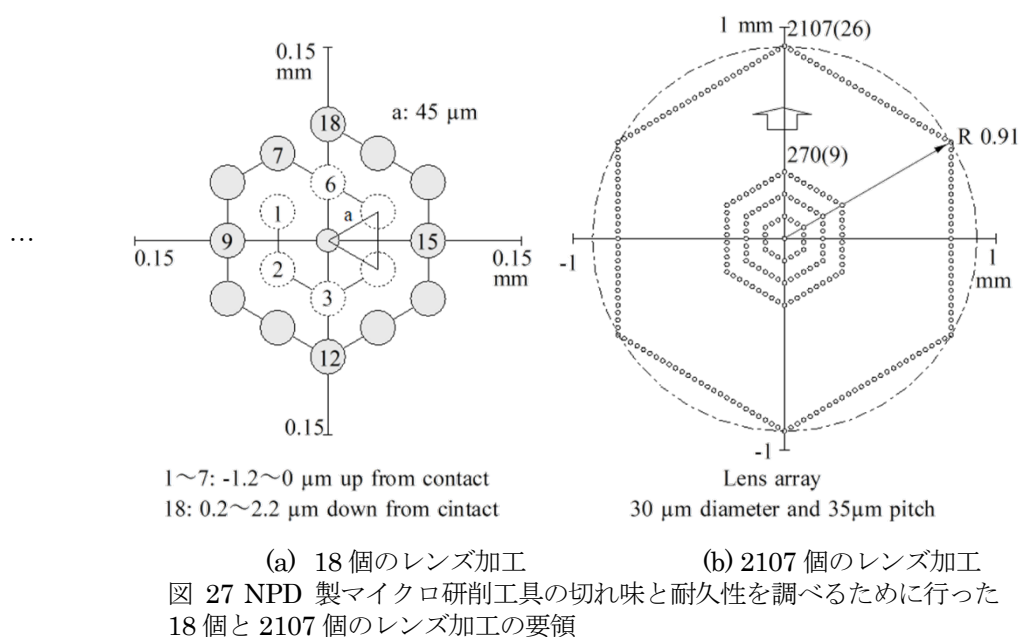
図 24 に示しているのは、螺旋溝の成形に使用した装置の外観である。湿式ラッピングを行い工具の先端を半径が 0.1 mm の半球状に成形した NPD 製研削工具は、真鍮製の芯ぶれ防止治具を回してステッピングモータに取付けた。また、ステッピングモータを取付けた L 字型の治具は、XY ステージを回してステッピングモータで駆動する回転テーブルに取付けた。NPD 製研削工具の自転運動と公転運動をこれらのステッピングモータを使って同時 2 軸制御することにより、半球状の砥石作用面に螺旋溝を成形した。なおレーザーには波長が 1060 nm のナノ秒パルスファイバーレーザーを使用した。

図 25 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 δ に 70° 度公転したときに、経線方向に 90° 自転 θ しているような螺

旋溝を成形した。図 25 の右側の図には、捻れていない溝を赤の破線、右方向に 90° 捻れている溝を赤の実線で示した。図 26 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 $7\ \mu\text{m}$ 、溝深さは約 $10\ \mu\text{m}$ である。

7.5 工具の切れ味と耐久性の評価法

図 27 に示しているのは、NPD 製研削工具の切れ味と耐久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て接触点を取った後、工具を接触点から $1.2\ \mu\text{m}$ 退避させて図 27(a) に示した①に工具を移動させた。次に切込みを $0.2\ \mu\text{m}$ 刻みで増加させ、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砥石接触点からの設定切込み深さを求めた。また、レンズの深さを測ることにより、実質切込み深さを求めた。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。



7.6 研削実験の結果

図 28 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 度目に 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 個付近のレンズピッチに変化はなく、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。螺旋溝には切りくずが詰まっており、チップポケットとして作用したことが確かめられた。

図 29 に示しているのは、図 27 に示した 18 個のレンズを加工し測定した、設定切込み深さと実切込み深さとの関係である。この設定切込み深さに対する実切込み深さの比を

$$\text{実切込み率} = \text{実切込み深さ} / \text{設定切込み深さ} \quad \dots(7)$$

と定義すれば、実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ことができる。

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、実切込み率とレンズの個数との関係を図29に示す。レンズアレイを2回加工した後の実切込み率に注目すると、実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

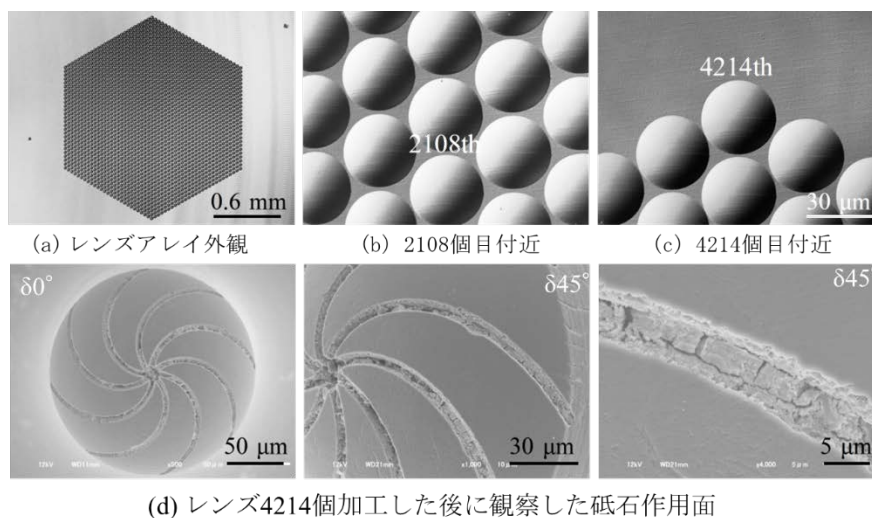


図 28 2 度目に 2107 個のレンズを加工した場合のレンズアレイ(上段)とレンズを 4214 個加工した後に観察した、右ねじれの螺旋溝を成形した砥石作用面(下段)

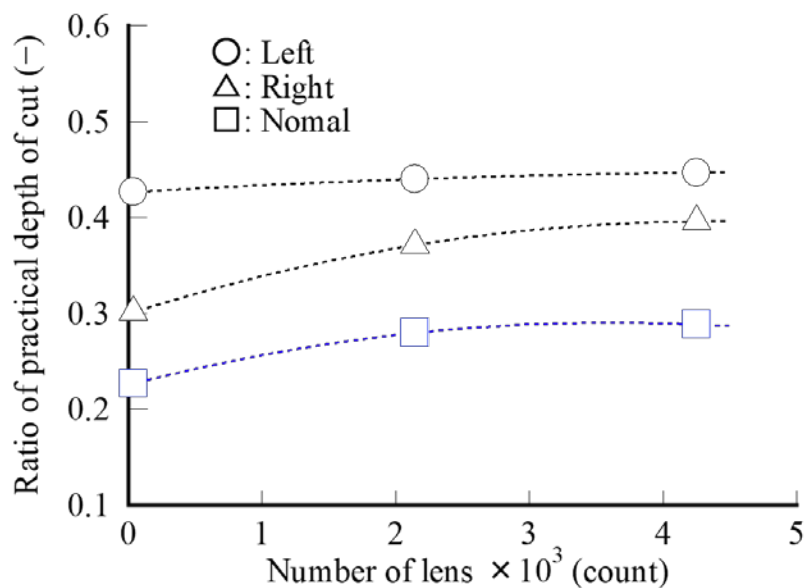


図 29 螺旋溝をつけた工具とつけていない工具を使用し、レンズアレイを2度加工する前後で測定した実切込み率とレンズの個数

れの螺旋溝を成形した工具の実切入み率は、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、螺旋溝は工具の切れ味をよくするという観点から有効であることが明らかになった。ここで、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。したがって、研磨レスでマイクロレンズアレイ金型を加工するということだけに工具の使用を限定すれば、工具の切れ味は過度に追求しない方がよいと考えている。

図 30 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、測定される三次元形状から球面を引き、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 30 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 2000 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。いずれにしても、ずいぶん時間はかかったが、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は達成できたと考えている。

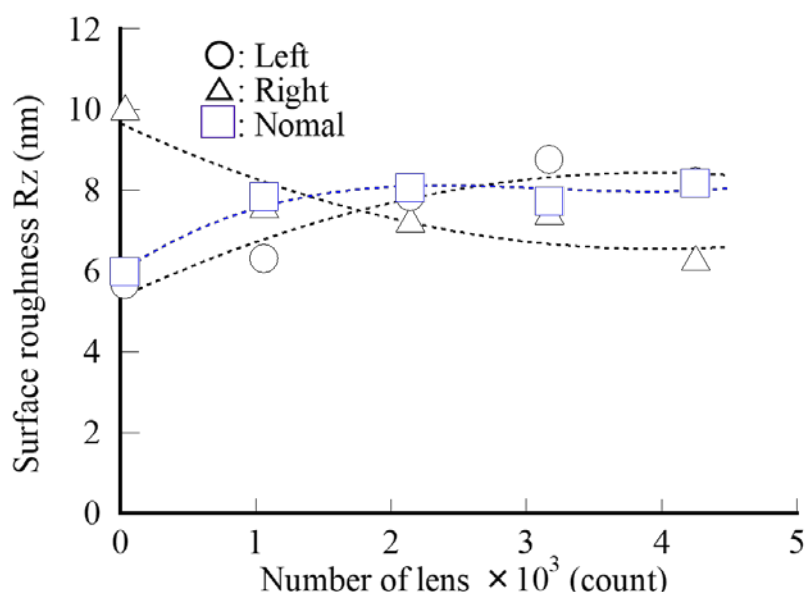


図 30 螺旋溝をつけた工具とつけていない工具を使用し、レンズアレイを 2 回加工した場合のレンズの個数とレンズ表面の最大高さ粗さとの関係 (工具の回転方向と直交する方向の粗さを測定)

8. 2019 年度の研究実施計画

表 2 に示しているのは、2019 年度(2019 年 9 月～2020 年 8 月)に実施する研究計画である。「1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発」と題した研究課題では、研究を開始した当初は刃先に欠けがなく刃先の丸み半径を 1 nm 前後に成形できるラッピング技術を開発することを目標にしていた。「4. 3 乾式ラッピングの結果」に記載したように、偶然という感は強いが、2018 年度には研究目標を上回る実験の結果を得ることができた。2019 年度には、偶然を再現性のある技術に結びつけるための研究を実施する。

表2 2019年度の研究実施計画

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020
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		→ 完了				
	② 乾式ラッピングに使用するモータの選定			→ 完了			
	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イオンエッチング技術の開発	④ イオンエッチングのメカニズムの解明			→ 完了			
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRバイトに対するイオンエッチング						→ 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 単結晶アルミニウムやレンズ用プラスチックに対する超精密精密切削						→ 継続
	⑦ 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作					→ 完了	

「2. 切れ刃鋭利化のためのイオンエッチング技術の開発」と題した研究では、研究を開始した当初、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使ったドライエッチングを行い、欠けを消すだけでなく刃先の丸み半径を 0.1 nm に成形することを研究目標に掲げた。「5. 3 逆オフセット法を使った刃先丸み半径の測定」に記載したように、当該研究については技術として確立することができた。ただし、2019 年度にも、鋭利化の効果を確認するための切削実験に使用する工具の刃先を鋭利化するだけでなく、実験データを蓄積するための研究を継続する。

「3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験」と題した研究では、研究を開始した当初、刃先の丸み半径を 0.1 nm に成形した NPD 製ノーズ R を用いて無酸素銅に正面切削を行い、粗さが 10 nm Rz 以下の加工面を作ることが研究目標に掲げた。研究目標を達成する実験の結果は得られているが、「6. 4 到達限界粗さ」に記載したように、刃先の丸み半径が 10 nm の切削工具を用いた場合にも研究目標を達成する 10 nm Rz 以下の粗さが得られている。2019 年度には切りくずの観察を行い、刃先の丸み半径を 0.1 nm に成形したことの有意性を証明するための研究を実施する。

参考文献

- (1) 中山一雄, 切削加工論, (1978), p.38, コロナ社
- (2) T. Irifune, A. Kurio, S. Sakamoto, T. Inoue, H. Sumiya, Ultra-hard polycrystalline diamond from graphite, *Nature*, 421-6923, (2003), pp. 599-600.
- (3) 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] .
- (4) 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, 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) 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.
- (7) 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 砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (USB), B04 (2014-9), pp.105-106.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 仙波卓弥・母里壮大・天本祥文・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するドライエッチング -成形し得る刃先の丸み半径-, BTEC2018 講演論文集 USB, B09(2018-8), pp.99-100.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 仙波卓弥・天本祥文・藤山博一, 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—, 三井金型振興財団平成 27 年度特別研究 (進捗状況報告①), http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no1.pdf, (2017-4), pp. 1-21.

- (16) 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.
- (17) 仙波卓弥・天本祥文・藤山博一, 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—, 三井金型振興財団平成 27 年度特別研究 (進捗状況報告②), http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no2_1.pdf, (2018-4), pp. 1-16.
- (18) 仙波卓弥・天本祥文・藤山博一, 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—, 三井金型振興財団平成 27 年度特別研究 (進捗状況報告③), http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no2.pdf, (2019-4), pp.1-23.
- (19) 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.
- (20) 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.
- (21) 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), pp.1321-1324.
- (22) 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.
- (23) 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.
- (24) 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.
- (25) 仙波卓弥, 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, 平成 24 年度研究助成対象・研究成果報告書, http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2012report_nol_final.pdf.
- (26) 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.
- (27) 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), pp.499-500.