

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

1986 年に弊学に着任して以来、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。過去 30 年に渡って「切削加工の原理原則」を講義している関係で、切りくずの厚さが設定切込み深さと等しくなる「理想的加工法」を、何時か実現したいと夢見るようになった。本研究はこの「理想的加工法」を具現化するための研究である。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の原子半径と同じ 0.1 nm 以下に成形するための研究と、鋭利化の効果を証明するための切削実験を行っている。過去半年くらいの間、無酸素銅の超精密切削時にノーズ R バイトが摩滅するといった『起こりえない現象』を克服することに頭を悩ませている。しばらくは闇の中をさまよひ、工具摩耗の発生原因を突き止め研究を一步前へ進めたいと考えている。

1. はじめに

1945 年以降、我国は産業構造の軸足を一次産業から二次産業へ移した。二次産業の中でも製造業の分野では、エネルギーは無尽蔵にあるという前提の下で、切削性能よりも耐摩耗性を優先したネガレーキの切削工具を使った高精度・高能率加工法が開発されてきた。世の中が高精度・高能率化を指向している中であって、中山一雄先生は 1978 年に出版された「切削加工論」⁽¹⁾で「理想的加工」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て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塑性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。

切りくずを排出させるために無駄なエネルギーを使わないためには、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必要がある。そのためには、工作物の一部を塑性変形させるのではなく工作物の原子配列を切断して切りくずを排出する必要があり、切削加工に使用する工具刃先の丸み半径を工具素材の原子半径と同じレベルに成形する必要があると判断した。

2015 年 9 月から開始した当該研究の目的は「理想的加工」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を使ったレーザ加工⁽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 0.1 nm の 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開始した。

本報告書には、2017 年 9 月から 2018 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、研究目標をクリアする成果が得られた。ただし、無酸素銅に対する切削実験に関しては本報告書をまとめている現時点で真っ暗な闇の中をさまよっており、研究目標をクリアできる研究の成果は得られていない。

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費やされるエネルギーの消費箇所を示した模式図である。同図に示すように、切削加工時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 は次のように求めることができる。

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

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

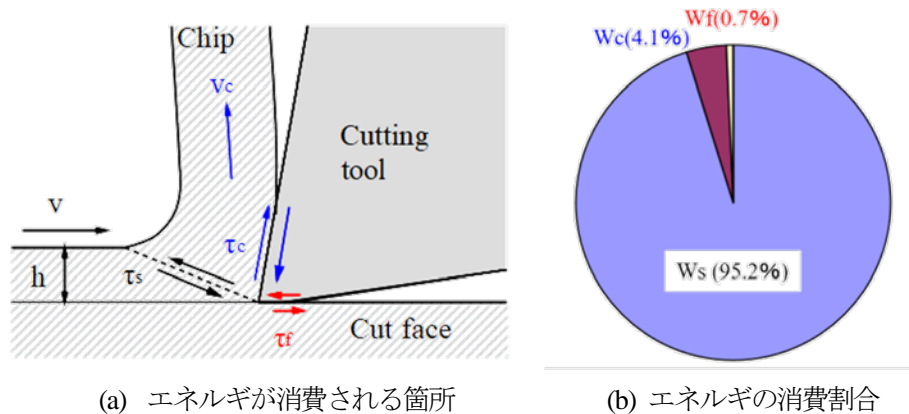


図1 無酸素銅の端面切削に費やされるエネルギー (h: 10 μm , v: 16 m/min, b: 1 $\mu\text{m}/\text{rev}$)

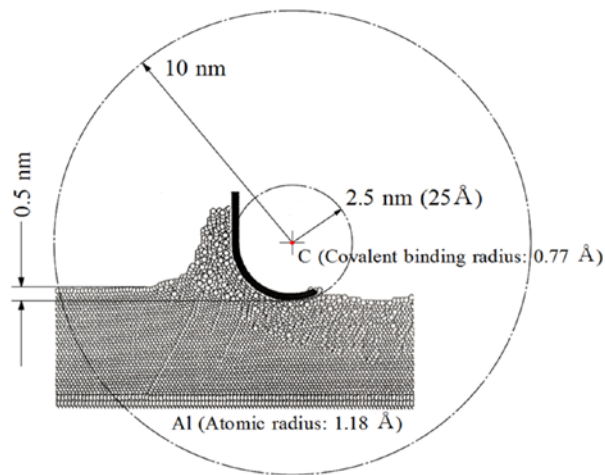


図2 アルミの超精密切削時における原子配列の擾乱 (井川直哉, 極微小切削における切りくず形態と最小切取厚さ, 精密工学会誌 Vol. 59, No.4 (1993), pp.673-679.)

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 は工具すくい面と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 は工具逃げ面と新生面の接触長さである。

式(1)~(3)を使用し、無酸素銅の端面切削時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ことを表している。ここで、シミュレーションの詳細を述べることに

については論旨を混乱させると思われたので省略する。

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、刃先の前方にせん断面は見られない。切削に費やされるエネルギーは、刃先の丸み部分が新生面を擦過し原子配列を乱すことに費やされている。図2に示した円中央の赤丸は炭素原子である。もしも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、刃先の丸み部分が新生面を擦過するという現象は回避できる。また、刃先の前方にせん断面が発生し、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。以上のように考え、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0.77 Åに成形するための実験を行った。

3. 平成 29 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29年度(2017年9月～2018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 p.3」⁽¹³⁾に記載した「表3 研究計課題とタイムスケジュール」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1 nm に成形することを研究目標に掲げた。平成29年度の研究を開始する前に、刃先の丸み半径を市販の超精密クラス(UPC)の単結晶ダイヤモンドバイトと同じ、5～10 nm に成形できていた。ただし、刃先に生じる欠けを完全に無くすると同時に刃先の丸み半径を1 nm に成形するためには、ラップ板として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完全に除去する必要があり、

表1 平成29年度(2017年9月～2018年8月)に行った研究実施内

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		→ 終了				
	② 乾式ラッピングに使用するモータの選定			→ 終了			
	③ NPD製ノーズRバイトの成形				→ 継続中		
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			→ 終了			
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRパイに対するイオンエッチング				→ 継続中		
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				→ 研究開発中		
	⑦ 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作			→ 中止、研削加工に変更			

容易ではないと予想された。当時、面振れを完全に除去するためのアイデアがなかったこともあり、平成 29 年度には研究目標を達成するための技術開発を一時中断した。ただし、酸素プラズマを用いたドライエッチングに使用する試料を作成するために当該研究を継続した。

「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 0.77 \AA に成形することを研究目標に掲げた。平成 29 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 年度には原子間力顕微鏡 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 0.77 \AA に成形するための研究を実施した。

「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ための切削実験を行った。主として 1980 年代に行われた同様の実験結果^{(14)~(20)}によれば、加工面に粒界段差や側方バリが発生するために加工面の粗さを 10 nm Rz 以下に成形することに成功した例は見られない。この粒界段差や側方バリは、当時の工具成形技術では刃先の丸み半径を 20 nm 前後にししか成形できなかった⁽²¹⁾ことが主な原因であり、刃先の丸み半径を 0.77 \AA に成形できればこれらの現象は回避できること考えられた。そこで、平成 29 年度から無酸素銅に対する切削実験を開始した。

4. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術

4.1 レーザ成形後の刃先

「1. はじめに」で述べたように、本研究では工具素材に対してレーザ加工を行い成形した NPD 製ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行った。図 3 に示しているのはレーザ加工に使用した実験装置の外観である。レーザには波長が $1,060 \text{ nm}$ 、繰返し周波数を 80 KHz 、パルス幅を 40 ns 、ならびに出力を 8 W

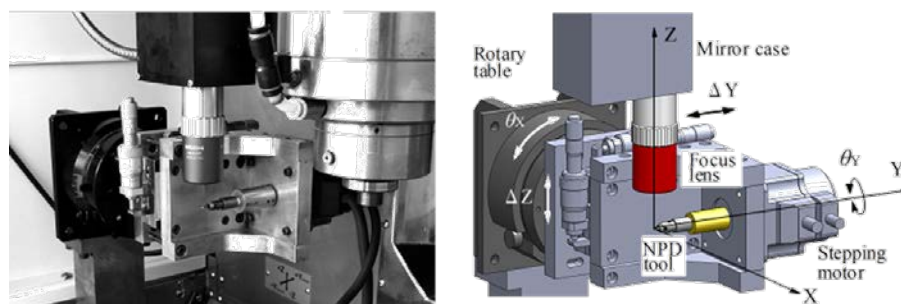


図 3 NPD 製ノーズ R バイトの成形に使用した加工装置の外観と模式図（レーザ：ナノ秒パルスファイバーレーザ、波長： $1,060 \text{ nm}$ 、繰返し周波数： 80 KHz 、パルス幅： 40 ns 、出力： 8 W ）

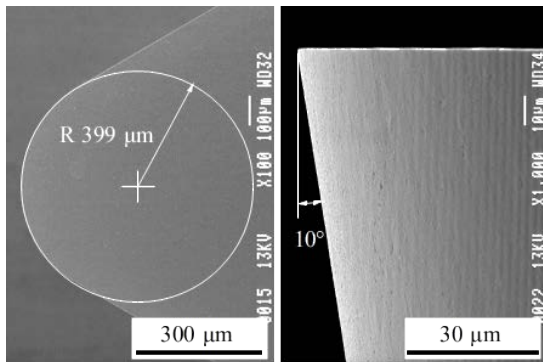


図4 レーザ成形後のNPD製ノーズRバイト(すくい角: 0° , 逃げ角: 10° , ノーズR: 0.4 mm)

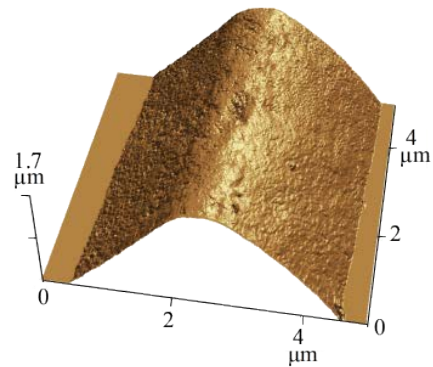


図5 前切れ刃のAFM画像(□ $5.3\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta_p=10.5\text{ nm}$, $r_m: 901.1\pm 28.8\text{ nm}$, $\theta_w: 92.6\pm 0.8^\circ$ ($1.0 < R < 2.0\text{ }\mu\text{m}$))

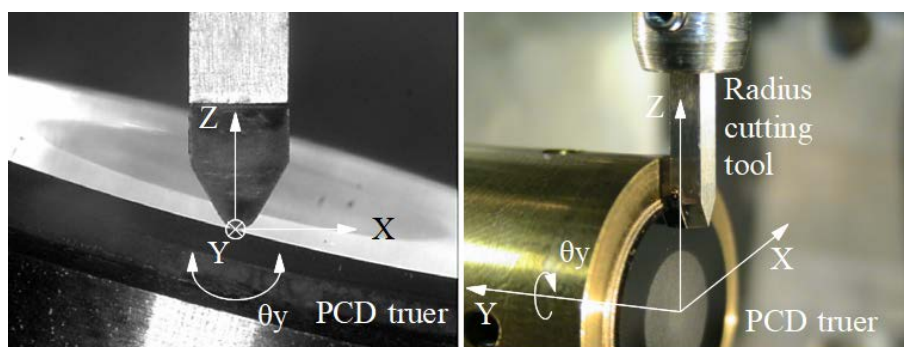
に設定した, ナノ秒パルスファイバーレーザー(JDS Uniphase, PFL9)を使用した. 光学レンズを使って集束したレーザー光を, 工作機械の運動を使って走査させることにした. 切削工具を使った機械加工に比べると切残しを除去するためのゼロカットを頻繁に行う必要があるが, CAD で形状が定義できるダイヤモンド製の切削工具であれば短時間で作ることができる⁽³⁾.

図4に示しているのは, ナノ秒パルスレーザーを用いて成形したすくい角が 0° , 逃げ角が 10° , ならびにノーズRが 0.4 mm のNPD製ノーズRバイトである. 図5に示しているのは, AFMを用いて測定した前切れ刃の画像である. 刃先の丸み半径は測定値 r_m で $901.1\pm 28.8\text{ nm}$, 刃先先端からの距離Rが $1.0 < R < 2.0\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で測定した楔角 θ_w は $92.6\pm 0.8^\circ$ である. 図4に示したように, レーザの走査軌跡が残るためにすくい面や逃げ面を平坦に成形することは難しい. また, 図5に示したようにレーザー加工を行うと縁だれが生じるため, 刃先を鋭利に成形することは難しい⁽³⁾.

4.2 乾式ラッピング後の刃先

図6に示しているのは, NPD製ノーズRバイトの逃げ面とすくい面を乾式ラッピングしているようすである. ラップ板には放電加工, 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, ダイヤモンドの一次粒子径のサイズが $1\text{ }\mu\text{m}$ で直径が 15 mm のPCD製円板(トーメイダイヤ(株), TDC-98F2)を使用した. また, ラップ板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), ラップ板の公転運動にはNC円テーブル(北川鉄工所, MR160)を使用した.

ラップ板の作用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板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除去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⁾. 図7に示しているのは, 乾式ラッピング後に前切れ刃を観察したAFM画像の一例である. 図4や図5に示したレーザー成形後の刃先に比べ, すくい面や逃げ面を平坦に成形できる. また, 刃先の丸み半径は測定値 r_m で 901.1



(a) 逃げ面 (b) すくい面
 図6 NPD製ノーズRバ이트の乾式ラッピングに使った装置の外観

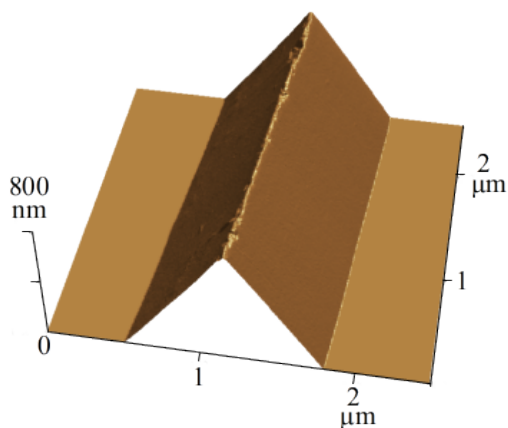


図7 前切れ刃のAFM画像 (□ 3.2 μm , $\Delta_p=6.3 \text{ nm}$, $r_m: 18.0\pm 4.8 \text{ nm}$, $\theta_w: 80.0\pm 0.9^\circ$ ($0.1 < R < 1.0 \mu\text{m}$))

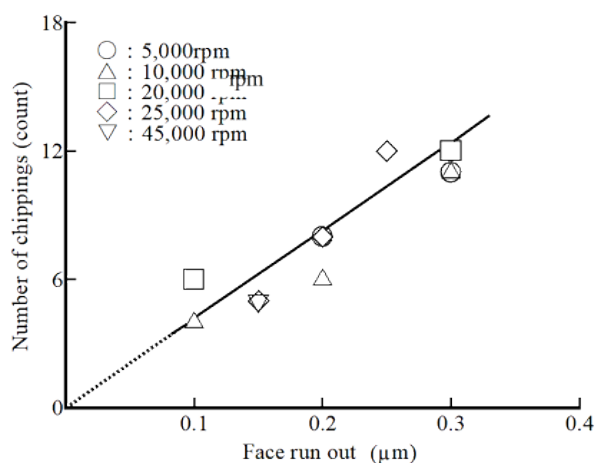


図8 ラップ板の面振れと刃先に生じたサイズが 100 nm 以上の欠けの数

± 28.8 から $18.0\pm 4.8 \text{ nm}$ に鋭利化されている。ただし、刃先には微細な欠けが生じた。

図8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板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。このように、乾式ラッピングを行い刃先に生じる欠けをなくするためには、ラップ板の面振れを 0 にする必要がある。「3. 平成 29 年度に行った研究の内容」に記述したように、平成 29 年度の研究を開始する時点で面振れを完全に除去するためのアイデアがなかった。また、平成 28 年度の研究を行った結果、サイズが 1 μm 程度の欠けであれば酸素プラズマを用いたドライエッチングを 2 h 行えば欠けを完全に除去できることが明らかになっていた⁽²²⁾。そこで、平成 29 年度には「乾式ラッピングを行い刃先の丸み半径を 1 nm に成形する」といった研究開始当初の目標を達成するための技術開発は一時中断した。ただし、酸素プラズマを用いたドライエッチングに使用する試料を作成するために当該研究を継続して実施した。

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⁽²³⁾ (アルバックテクノ, MB01)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0.3 Pa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」⁽²²⁾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5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7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に生じていた欠けは消滅する。平成29年度には、乾式ラッピングを行い図7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い、刃先の丸み半径を炭素原子の原子半径と同じ0.77 Åに成形するための研究を行った。

5.2 原子間力顕微鏡とカンチレバー先端の丸み半径

表2に示しているのは、刃先丸み半径の測定に使用した原子間力顕微鏡AFM(島津製作所, SPM-9500J3)の仕様、図10に示しているのはカンチレバー先端(オリンパス, OMCL-AC160TS)の高倍率顕微鏡写真で

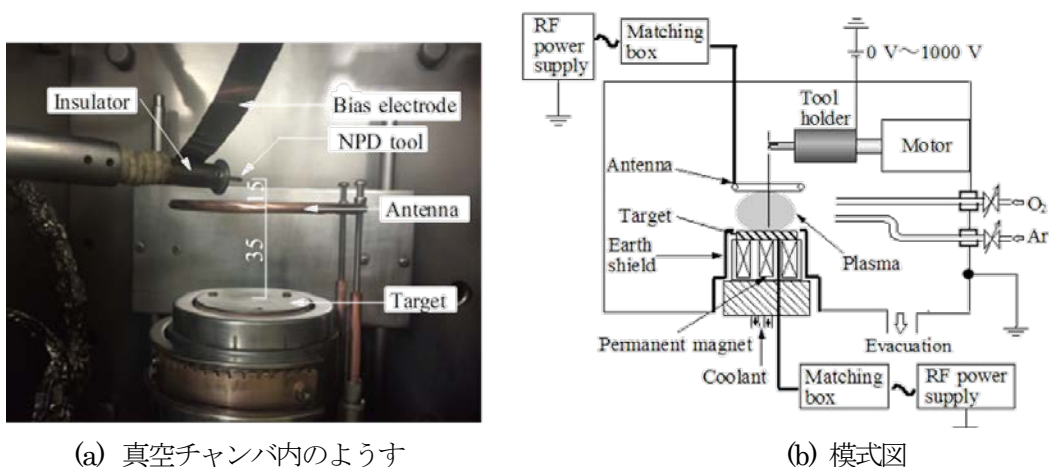


図9 NPD製ノーズRバイトに対するドライエッチングに使用したドライエッチング装置

表2 刃先丸み半径の測定に使用した原子間力顕微鏡の仕様

観察モード	標準	コンタクト
分解能	X, Y	0.2 nm
	Z	0.01 nm
AFMヘッド	変位検出系	光源/光てこ/検出器
	光源	レーザーダイオード
	検出器	フォトディテクター
スキャナ	最大捜査範囲	10 μ m \times 10 μ m \times 10 μ m (ST)
	(X \times Y \times Z)	2.5 μ m \times 2.5 μ m \times 0.3 μ m (OP)
ステージ	試料最大形状	ϕ 24 mm \times 8 mm



図10 カンチレバー先端の高倍率顕微鏡写真 (オリンパスからの写真提供 (OMCL-AC160TS), 先端球の半径 r_p : 平均7 nm, 最小4 nm, 最大10 nm)

ある。AFMの測定分解能はX,Y方向が0.2 nm, Z方向が0.01 nm(0.1 Å)であり, 炭素原子の原子半径(0.77 Å)を測る能力を持っている。ただし, 測定範囲は最大でも10 \times 10 \times 10 μ mであり, 広領域の測定には向いていない。また, カンチレバー先端の丸み半径 r_p は平均が7 nm(標準偏差ではなく最小が4 nm, 最大が10 nm)である。測定結果を観察しながら, 極力平均値と思われるカンチレバーを使用し, NPD製ノーズRバイトの刃先の丸み半径を測定した。

5.3 測定ピッチと逆オフセット法を使った刃先丸みの測定

図11に示しているのはシミュレーションの結果である。図11(a)と(b)に示しているのは, プロブの先端半径 r_p をその平均値である7 nmに設定した上で, 測定ピッチ Δp を変え丸みがない刃先を測定した場合

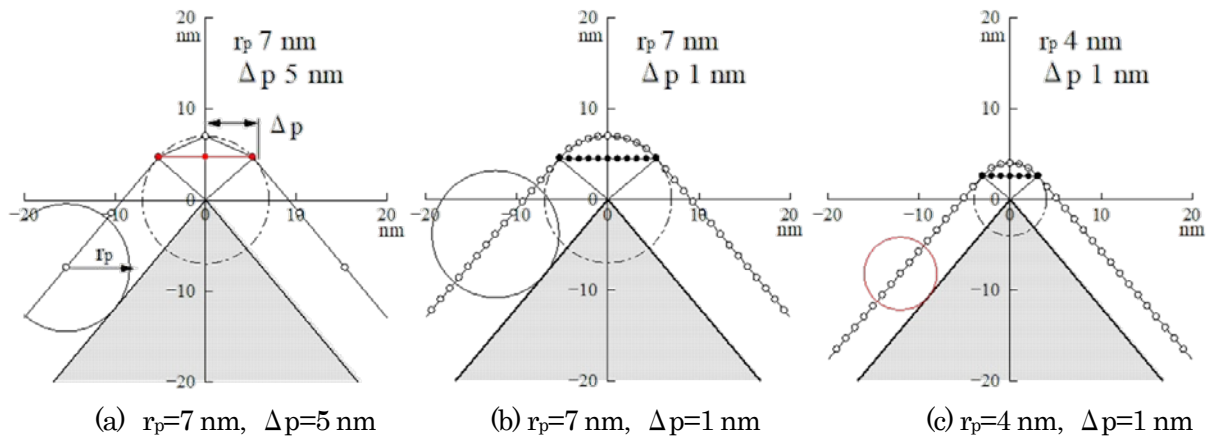


図 11 丸みのない刃先を測定した場合に得られる断面曲線 (シミュレーション結果)

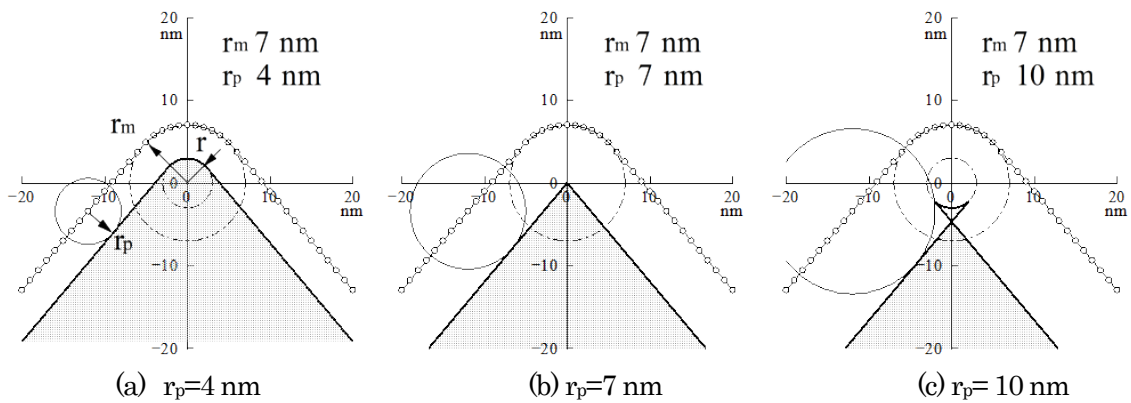


図 12 逆オフセット法を用いて推定した実刃形の断面形状 (測定した刃先の丸み半径 r_m : 7 nm)

合に得られる断面曲線を示している。また、図 11(b)と(c)に示しているのは、測定ピッチ Δp を 1 nm に設定しプローブの先端半径 r_p を変え丸みがない刃先を測定した場合に得られる断面曲線を示している。図 11(a)や(b)のように得られたシミュレーションの結果を踏まえ、刃先の丸み半径を測定する場合には測定ピッチ Δp を 1 nm に設定した。刃先丸み半径を正確に測定するためには Δp を極力小さく設定すればよいが、図 11(b)と(c)の結果から Δp を 1 nm に設定すれば炭素原子の原子半径を測定できると判断した。

図 12 に示しているのは、測定された断面曲線に対し逆オフセット法を用いて推定し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 12(a)に示したように実刃形に関する刃先の丸み半径 r は、

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

と求めることができる。ここで、 r が負になることはあり得ない。そこで、図 12 に示したように r_m が 10 nm 以下の場合には、以下の範囲で r_p を変化させ実刃形に関する刃先の丸み半径 r を求めることにした。

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

ここで、図 12(a)と(b)に示したように式(4)の r_p に r_m を代入すると r の最小値、 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 ということはありません。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 ドライエッチングの処理時間と刃先の丸み半径

「平成 28 年度研究成果報告書」⁽²²⁾に記述したように、NPD 製ノーズ R バイトのすくい面や逃げ面がドライエッチングされる深さは処理時間が増すに従って増加する。また、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。これら 2 つの実験事実から、刃先の丸み半径は、ドライエッチングの処理時間が増すに従って減少する可能性があると考えられた。そこで、ドライエッチングの処理時間を 1 時間刻みで 5 時間まで増加させ、実刃形に関する刃先の丸み半径を測定した。

図 13 に示しているのは、処理時間を 1, 3, ならびに 5h と増加させ変化させドライエッチングを行った場合に得られた前切れ刃の AFM 画像である。図 11 のように得られたシミュレーションの結果を踏まえ、測定ピッチ Δp を 1.2 nm に設定して $\square 612$ nm の領域を観察した結果である。処理時間が増すに従って刃先は鋭利に成形されている。図 14 に示しているのは、図 13(c)のように観察された刃先の断面曲線と、逆オフセット法を用いて求めた実刃形の形状である。図 10 に示したようにプローブ先端の丸み半径 r_p は $4 < r_p < 10$ nm の範囲で幅がある。図 14(a)に示しているのは r_p を 4nm, 図 14(b)に示しているのは r_p を 6.4 nm, ならびに図 14(c)に示しているのは r_p を 10 nm に設定した場合の結果である。

表 2 に示したように、X, Y, Z 方向とも AFM は 1 nm 以下の刃先の丸み半径 r を測定できる測定分解能を持っている。しかし、プローブ先端の丸み半径 r_p に幅があるために r を特定できないという欠点がある。図 14 に示したように、 r_p は特定できないが r_m は 6.5 nm と測定された。したがって、式(4)よりプローブ先端の丸み半径 r_p は $4 < r_p < 6.5$ nm, 式(3)より実刃形に関する刃先の丸み半径 r が $0 < r < 2.5$ nm の範囲にあることには間違いはない。

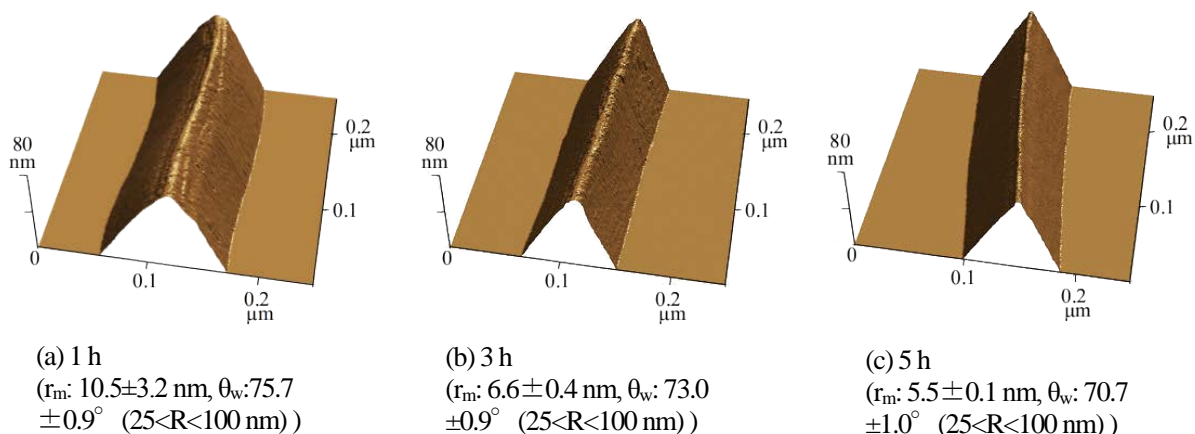


図 13 ドライエッチングの時間を 1, 3, ならびに 5h と変化させドライエッチングを行った場合に得られた前切れ刃の AFM 画像(測定領域： $\square 612$ nm, 測定ピッチ Δp : 1.2 nm)

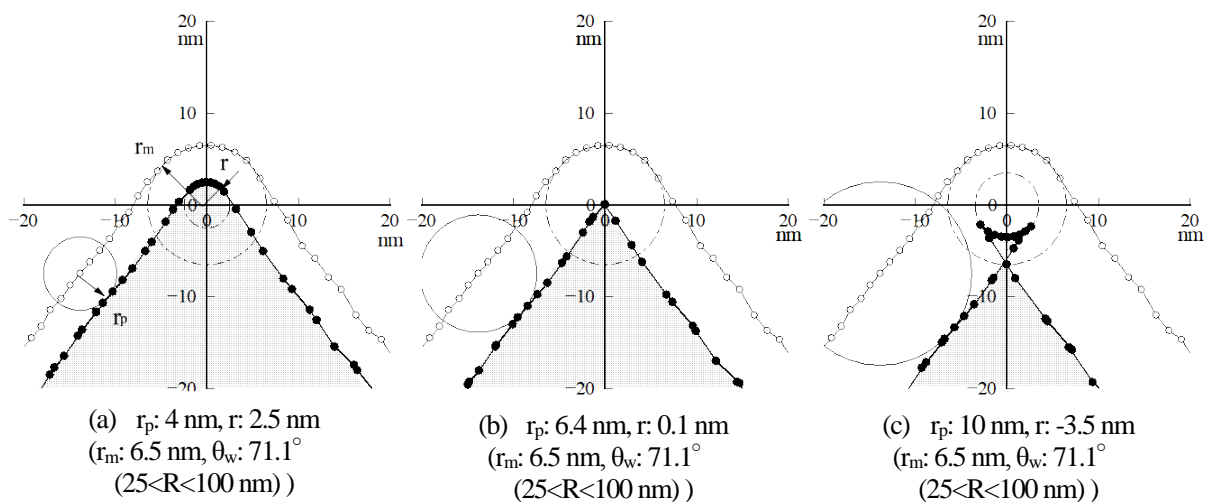


図 14 逆オフセット法を使って求めた刃先の断面形状 (処理時間: 5h, 測定領域: □612 nm, 測定ピッチ: $\Delta p 1.2 \text{ nm}$, プロブ先端の半径: $4 < r_p < 10 \text{ nm}$)

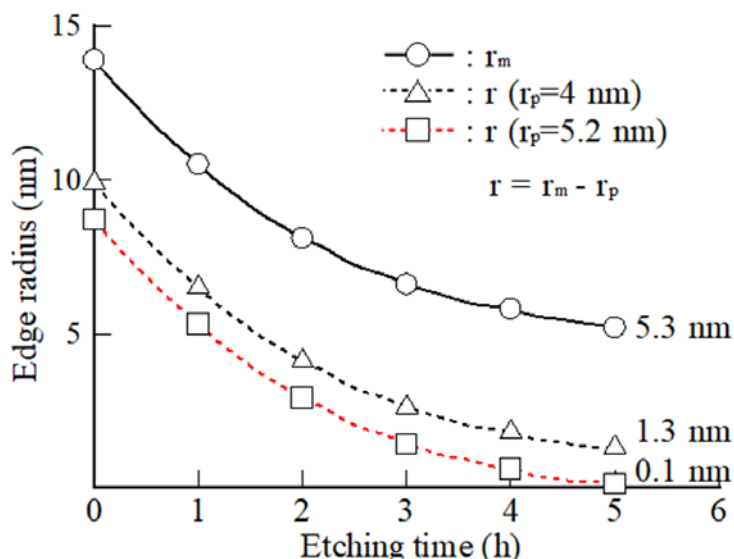
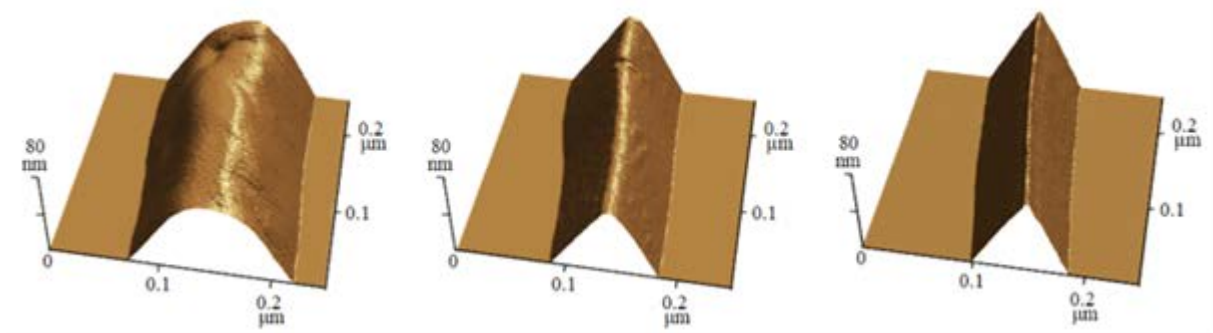


図 15 ドライエッチングの処理時間と実刃形刃先の丸み半径

5.5 成形し得る刃先の丸み半径

図 15 に示しているのは、ドライエッチングの処理時間と刃先の丸み半径との関係である。測定値を○印、プローブの先端半径 r_p を 4 nm と仮定して求めた実刃形刃先の丸み半径 r を△印、ならびに r_p を 5.2 nm と仮定した r を□印で示している。このように、刃先の丸み半径が測定値 r_m で 15 nm であった 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 5h 行くと、実刃形に関する刃先丸み半径 r を 1.3 nm 以下の値に成形することができた。ただし、図 15 に○印で示した測定値には処理時間が 5h 以上の領域でさらに減少する傾向が見られる。実刃形に関する刃先の丸み半径が、炭素原子の原子半径



(a) 精密(PC)クラス
(r_m : 64.8 ± 6.6 nm,
R: 60.8 ± 6.6 nm)

(b) 超精密(UPC)クラス
(r_m : 12.9 ± 1.9 nm,
R: 8.9 ± 1.9 nm)

(d) 5 hドライエッチング
(r_m : 5.5 ± 1.1 nm,
r: 1.5 ± 1.1 nm)

図 16 市販の単結晶ダイヤモンド製のノーズ R バイトと、5 h ドライエッチングを行った NPD 製ノーズ R バイトに関する AFM 画像 (測定領域: $\square 612$ nm, 測定ピッチ: $\Delta p 1.2$ nm, プローブ先端の半径 r_p : 5 nm)

よりも小さく成形されることはない。したがって、刃先の丸み半径が炭素原子の原子半径と同じ 0.77 \AA に成形された場合にはエッチングの処理時間さらに増加させたとしても刃先の丸み半径が変化しない、といった実験の結果が得られる可能性が高い。

図 16 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 バイトと、5 h ドライエッチングした NPD 製ノーズ R バイトに関する AFM 画像である。測定ピッチ Δp を 1.2 nm に設定し $\square 612 \text{ nm}$ の領域を観察した結果である。市販の単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測定すると結構広い範囲でばらついており、市販の工具がすべて図 16(a)や(b)と同じというわけではない。ただし、市販の工具に比べ図 16(c)に示した刃先は明らかに鋭利である。

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^{(14)~(20)}。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加工面粗さの限界は 10 nm Rz であると結論されている^{(15),(19)}。

図 17 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質の高い研究であり、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。

- (a) 図 17 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 $f/8R$ 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、微細な欠けやノーズ 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。
- (e) 「平成 28 年度研究成果報告書」⁽²²⁾ に記述したように、工作機械主軸が振動している場合には図 17 に見られるように工具形状が転写された痕跡にうねりが発生する。

(e)の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

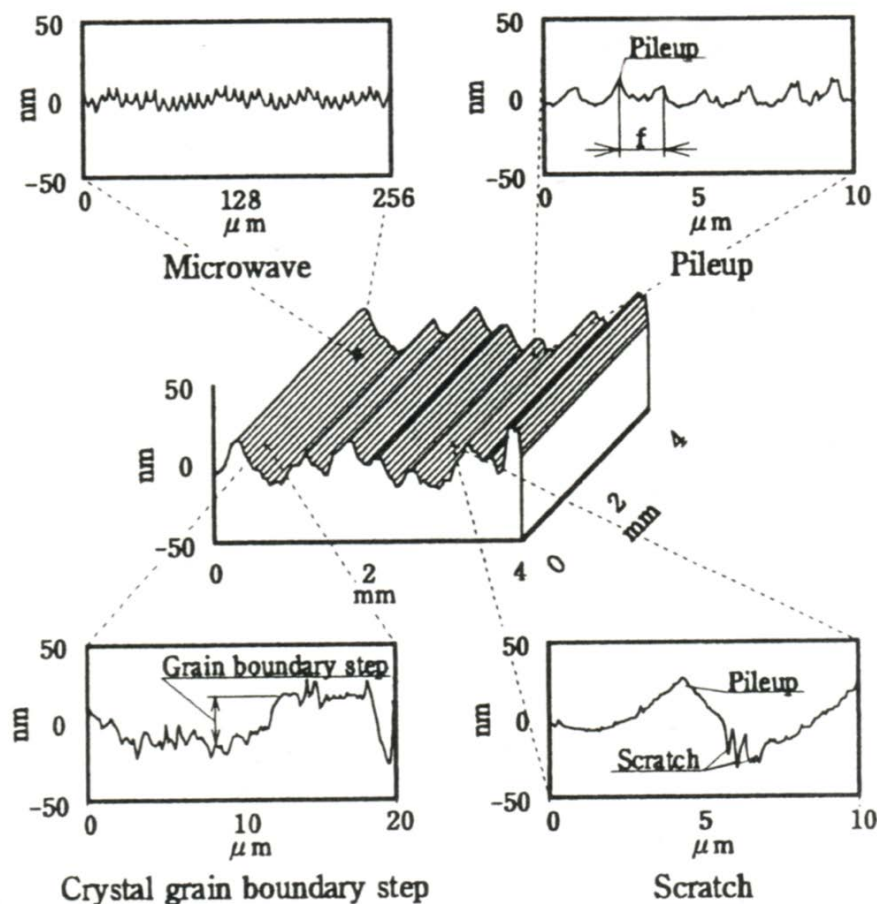
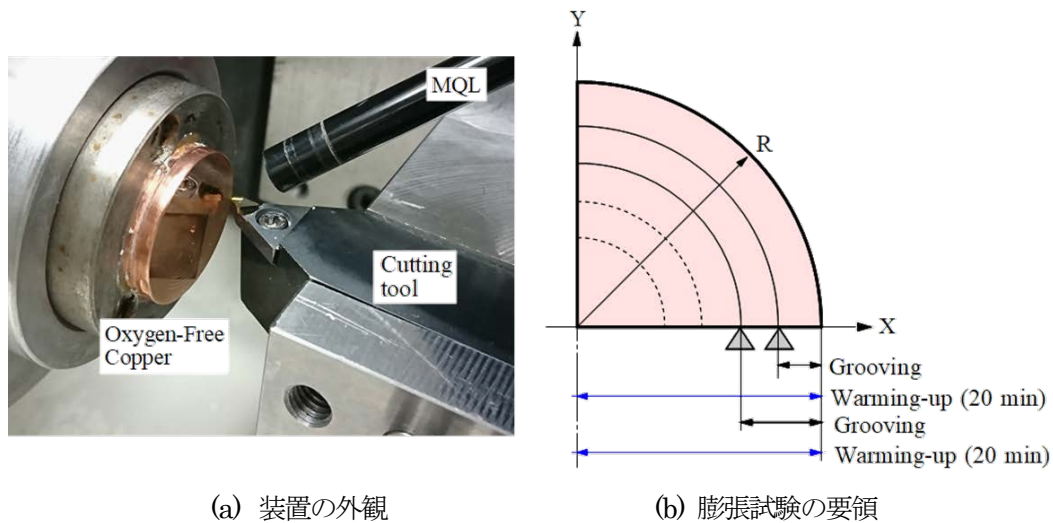


図 17 単結晶ダイヤモンド製のノーズ R バイトを使用し無酸素銅の超精密切削加工を行った場合に生じる粗さの発生要因



(a) 装置の外観 (b) 膨張試験の要領
 図 18 切削実験に使用した装置の外観とミスト温度を決めるために行った実験の要領

ると除去できる可能性が高い。そこで、本研究で開発した NPD 製ノーズ R バイトを用いて無酸素銅に対する超精密切削を行うと、1 nm Rz 以下の粗さが得られることを証明するための切削実験を行った。

6.2 加工装置

図 18(a)に示しているのは、切削実験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), 切削工具には刃先の丸み半径が 10~60 nm でノーズ半径 R が 0.2 mm の単結晶ダイヤモンドバイト((株)アライドマテリアル, UPC), 工作物には純度が 99.999%で直径が 20 mm の無酸素銅, 切削液にはセミドライ加工 MQL(Minimum Quantity Lubrication)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 18(b)に示しているのは、ミストの温度を決めるために行った実験の要領である。工作機械を設置した簡易恒温室の気温 T_a を 23°C に設定した上で、ミストの温度 T_w を 17~29°C の範囲で変化させ、2 時間の間に被削材が熱変位しないミストの温度を求めることにした。前加工面を成形した後、(設定切込み深さが 2 μ m の同心円の溝を成形+20 分間慣らし運転+被削材の内側に 1 mm 移動)といった操作を 5 回繰返し、5 本の同心円状の溝を成形した。加工後に溝の深さを測定し、最初に成形した最外周の溝の深さととの差を測定して 2 時間の間に生じた被削材の熱変位を求めた。

図 19 に示しているのは、(簡易恒温室の気温 T_a - ミストの温度 T_w) と被削材の熱変位との関係である。被削材が熱変位しないミストの温度を適正ミスト温度と表現すると、 T_w が適正ミスト温度よりも高い場合には被削材は気温によって冷やされ収縮する。これに反して T_w が適正ミスト温度よりも低い場合には被削材は気温によって暖められ膨張する。図 19 のように得られた実験の結果を踏まえ、ミストの噴射温度 21°C に設定することにした。

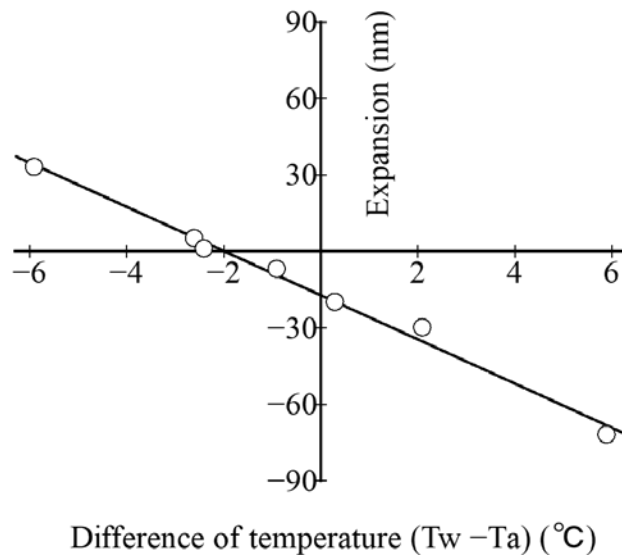
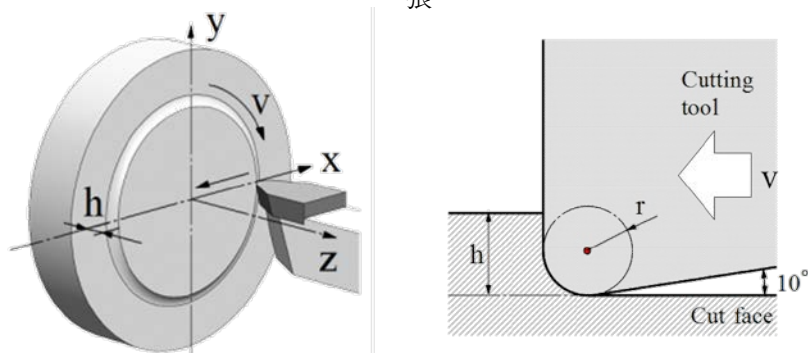


図 19 (ミスト温度 T_w - 簡易恒温室の気温 T_a) とワークの熱膨

張



(a) 端面切削の要領

(b) 設定切込み深さ h

図 20 無酸素銅に対する端面切削の要領と設定切込み深さ

6.3 端面切削の要領と加工条件

図 20(a)に示しているのは、無酸素銅に対する端面切削の要領である。被削材である無酸素銅の回転数は 600 rpm に固定し、工具の送り速度 f を $1 \sim 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ ($0.6 \sim 15 \text{ mm}/\text{min}$) の範囲で変化させて端面切削を行った。切削実験を主として行っていた 2018 年 4 月の時点では、工具として使用した単結晶ダイヤモンドのヌープ硬さ HK が 7,000 であるのに対して無酸素銅のヌープ硬さが 55~100 であり、単結晶ダイヤモンドが摩滅することはないと判断し被削材外周の外側から中心に向かって無酸素銅を切削した。図 20(b)に示しているのは、工具刃先の丸み半径 r と設定切込み深さ h との関係を示す模式図である。同様の切削実験を過去に行ったほとんどの研究では h を $1 \mu\text{m}$ に設定していたが、本研究では式(6)に示したように理論粗さよりも 50 nm 多くなるように $h(\mu\text{m})$ を設定した。

$$h = f^2 / (8R) + 0.05 \quad \dots(6)$$

ここで、 f は無酸素銅一回転当たりの送り量 ($\mu\text{m}/\text{rev}$)、 R は単結晶ノーズ R バイトに関する刃先の丸み半径 $R(\mu\text{m})$ である。

6. 4 加工面の粗さと工具摩耗

図 21 に示しているのは、無酸素銅 1 回転当たりの送り量 f と Z 軸方向の測定分解能が 10 nm の共焦点型のレーザ走査顕微鏡を用いて測定した加工面の粗さである。刃先の丸み半径 r が 60.8 ± 6.6 nm の精密クラス(PC)の単結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイト、同半径が 8.9 ± 1.9 nm の超精密クラスの単結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイト、ならびに同半径が 1.3 ± 1.1 nm のナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトを用いた場合の結果である。図 22 に示したように、ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトの逃げ面には『生じるはずがない』すり減り摩耗が生じており、その発生原因を突き止める必要があった。

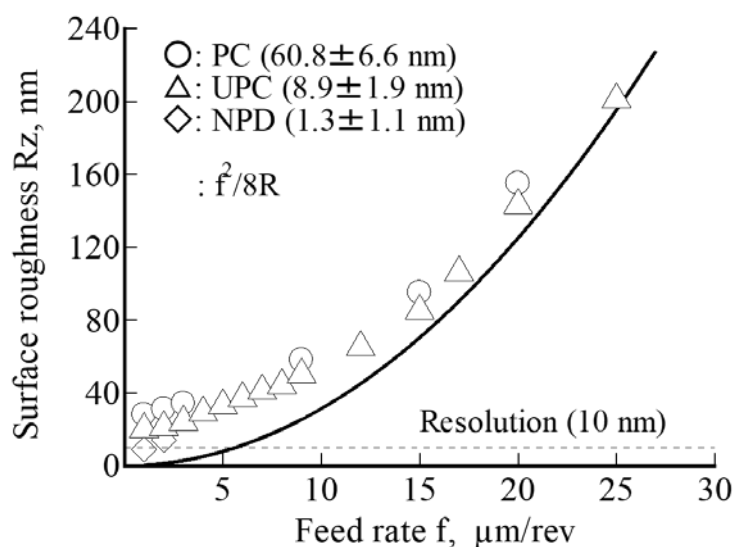


図 21 工具の送り速度 f と共焦点型のレーザ走査顕微鏡を用いて測定した加工面の粗さ（うねり成分は除去）

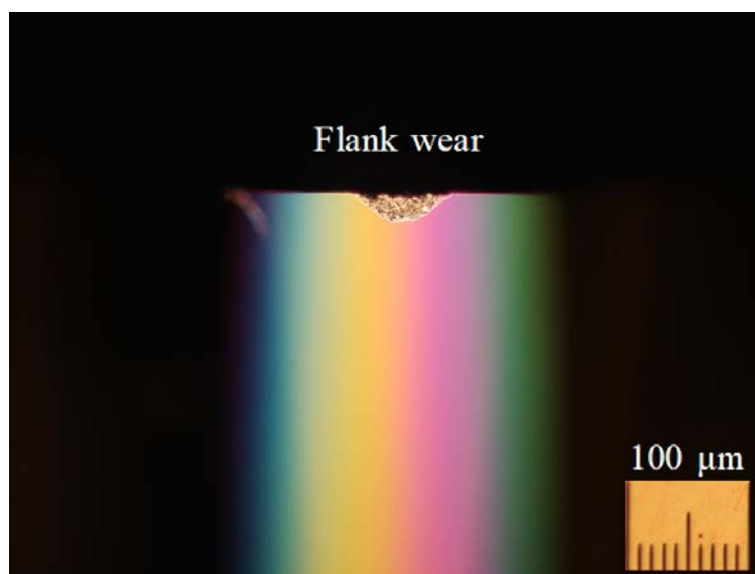


図 22 試作した NPD 製ノーズ R バイトに生じていた逃げ面摩耗

ただし、NPD 製ノーズ R バイトを用いた場合に得られた加工面の粗さは 15 nm Rz に達しており、共焦点形のレーザ走査顕微鏡の測定限界に達していた。この、15 nm Rz 以下の粗さを測定できる Z 軸方向の測定分解能が 0.1 nm の三次元光学プロファイラが 2018 年 10 月に弊学に導入されることが決まっていた。また、図 21 のように得られた実験の結果は過去に同様の実験を行った研究の成果とほぼ一致しており、研究目的を達成することは難しくないと思っていた。そこで、三次元光学プロファイラが導入されるまでの間、無酸素銅に対して超精密切削を行い 1 nm Rz 以下の粗さが得られることを証明するための実験は一時中断することにした。

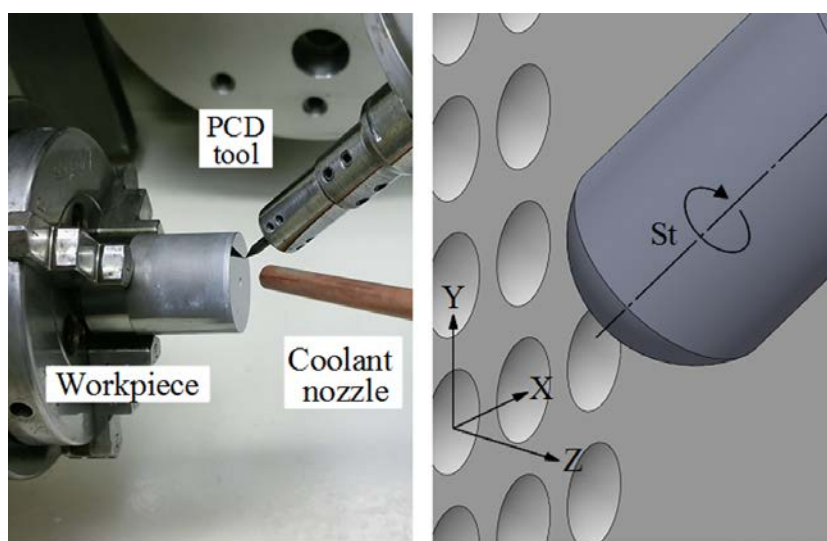
7. 超合金製マイクロレンズアレイ金型の試作

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。本研究を立案した 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。2017 年度にも当該研究を継続して行った結果足かけ 7 年を要したということになるが、やっと研究目標をクリアできる成果が得られるようになってきた。「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方法

図 23 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



(a) 装置の外観

(b) 加工の要領

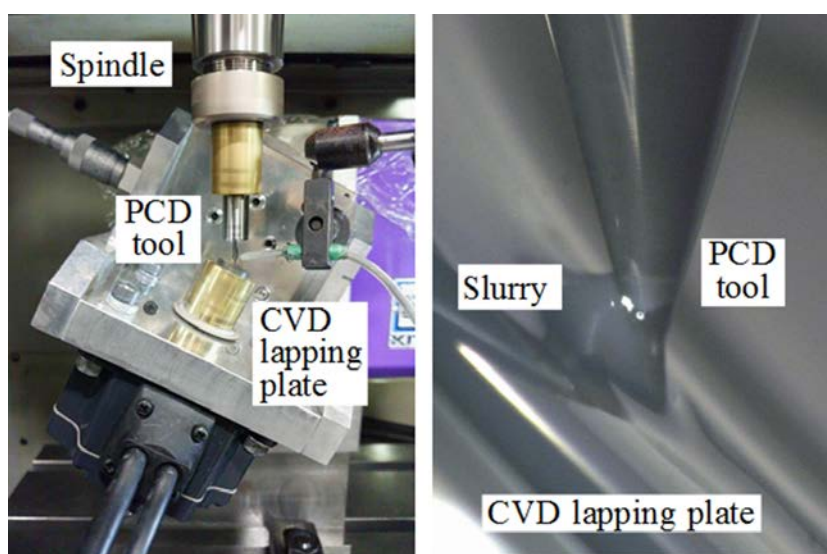
図 23 マイクロレンズアレイの加工に使用した装置の外観と加工の要領

してナノ fp 研削加工⁽²⁶⁾を行い、端面の粗さを 20 nm Rz 前後の値に成形した。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 のマイクロレンズを 1,027 個加工した。

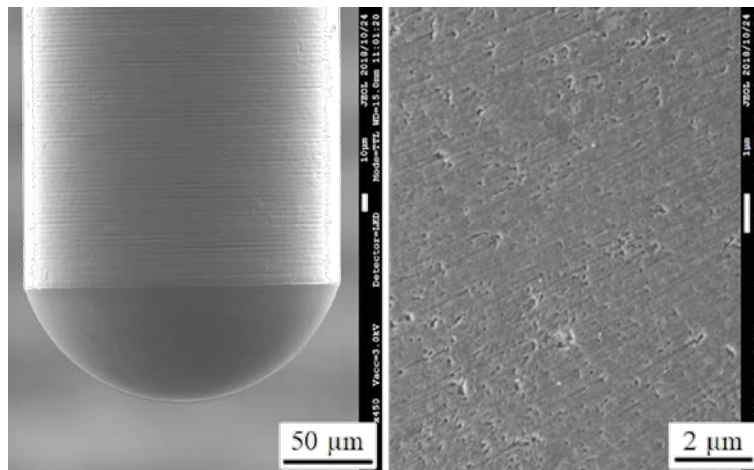
7.3 マイクロ研削工具の成形と成形結果

マイクロ研削工具の素材には, ダイヤモンドの一次粒子のサイズが 4~6 μm の焼結ダイヤモンド PCD(住友電工, DA150)と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 24 に示しているのは, 湿式ラッピングに使用し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。ラップ板には, 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。ラップ板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ーを使用した。

図 25 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 26 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 25 に示したように, NPD 製マイクロ研削工具の砥石作用面には大きなサイズのチップポケットは見られない。ただし, 図 26 に示した AFM 画像によれば砥石作用面は平坦かつ平滑に成形されているわけではなく, 作用面にはチップポケットとして作



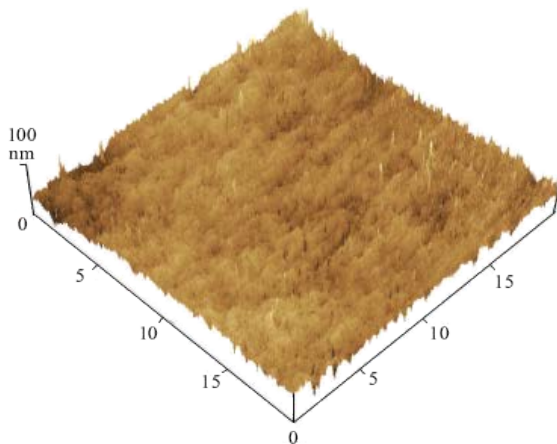
(a) 装置の外観 (b) 接触部分の拡大
図 24 マイクロ研削工具の湿式ラッピングに使用した装置



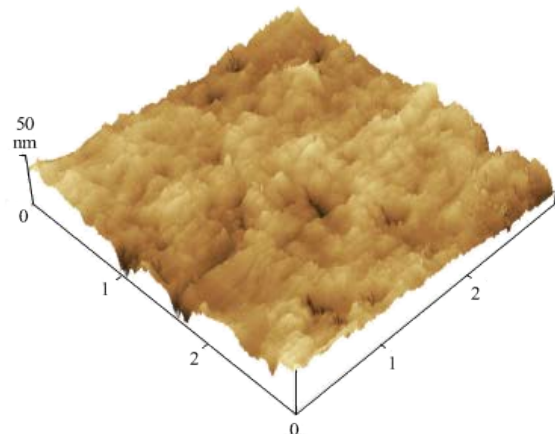
(a) 工具外観

(b) 砥石作用面

図 25 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)



(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 26 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)

用すると思われる凹部が生じている。なお、図 26(b)に示した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、ダイヤモンド砥粒のメッシュサイズは#280,000 (15,000/Sz)になる。

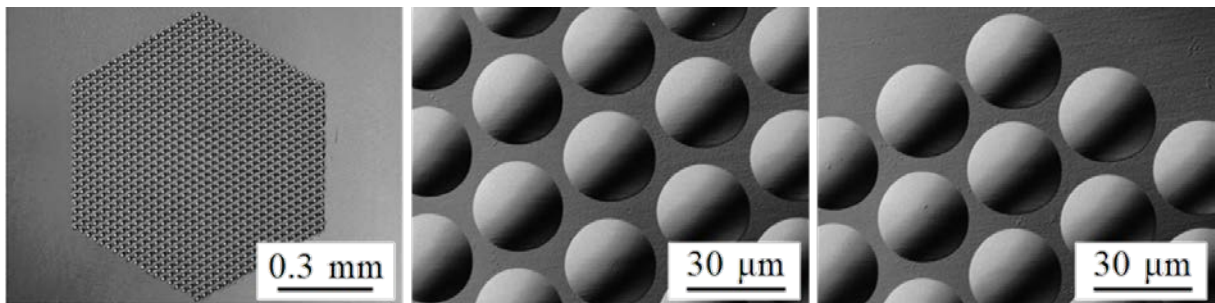
7. 4 研削液の水温とならし研削

レンズアレイを加工する場合、目標の粗さを達成することの他にレンズ直径やピッチが変化しない加工条件を見出す必要があった。そこで、被削材の熱変形を防ぐことができる研削液の水温を見出すための実験を行った。研削液を 3 時間給水して被削材の熱変形を安定させた後に 20 分ごとにレンズを計 12 個加工し、4h の間にレンズ直径が変化しない研削液の水温を見出すことにした。簡易恒温槽の気温±5°Cの範囲で水温を変化させて実験を行い、研削液の温度を(気温+2.6°C)に設定した。また、研削工具の初期摩耗が原因でレンズ直径やピッチが変化する

のを防ぐため、ならし研削を行った。レンズ直径が目標の $30\ \mu\text{m}$ になる設定切込み深さを求めるための実験を行った後、ならし研削としてレンズを 1,027 個加工した。

7.5 成形したマイクロレンズアレイと加工面の粗さ

図 27 に示しているのは、NPD 製マイクロ研削工具を使って超硬合金に成形した、直径が $30\ \mu\text{m}$ 、ピッチが $35\ \mu\text{m}$ 、ならびに個数が 1,027 個のマイクロレンズアレイである。また、図 28 に示しているのは NPD 製マイクロ研削工具の湿式ラッピングに使用したダイヤモンドスラリの粒径と、Z 軸方向の測定分解能が $0.5\ \text{nm}$ のピンホール共焦点形のレーザ走査顕微鏡（キーエンス、VK-X250）で測定したレンズ壁面の粗さである。レンズ壁面の粗さは $10\ \text{nm Rz}$ 以下であり、2012 年に研究に着手してから 7 年を要したが、よう



(a) 外観 (直径: $29.4\ \mu\text{m}$, 粗さ: $7.0\ \text{nm Rz}$) (b) 1 個目付近 (直径: $30.0\ \mu\text{m}$, 粗さ: $8.0\ \text{nm Rz}$) (c) 1027 個目付近

図 27 NPD 製マイクロ研削工具を使って超硬合金に成形した直径が $30\ \mu\text{m}$ 、ピッチが $35\ \mu\text{m}$ 、ならびに個数が 1027 個のマイクロレンズアレイ

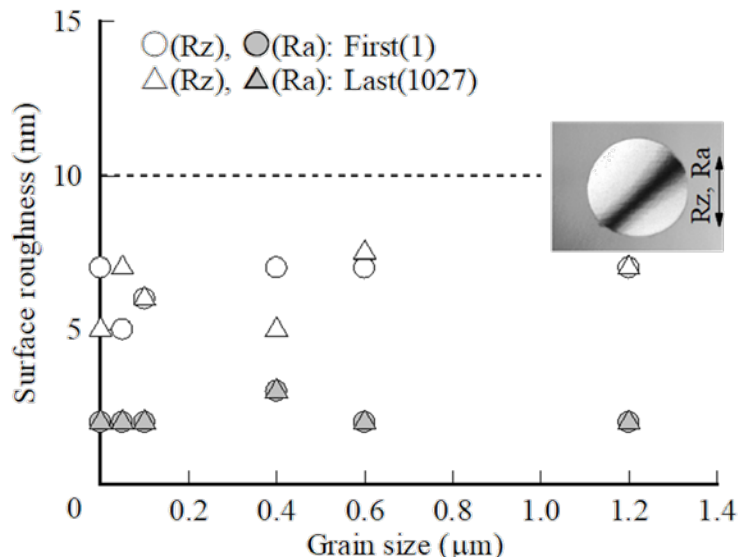


図 28 湿式ラッピングに使用したダイヤモンドスラリの粒径とレンズ壁面の粗さ

やく研究目標をクリアできる成果を得ることができた。

なお、マイクロレンズアレイの加工に PCD 製のマイクロ研削工具を用いた場合には、研削加工時に排出される切りくずによってダイヤモンドの粒界に析出しているコバルトが削られ、新たな切れ刃が砥石作用面に露出する。そのため、(PCD 製マイクロ工具が摩耗してレンズの形状が変化するという現象は生じないが,) 加工面に擦過痕が発生する。

8. 2018 年度の研究実施計画

表 3 に示しているのは、2018 年度(2018 年 9 月～2019 年 8 月)の研究実施計画である。「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、レーザ成形した NPD 製ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行い、×10,000 の電子顕微鏡で観察して切れ刃に欠けが生じない乾式ラッピング技術を開発することに再挑戦する。本研究を立案した 2015 年には、切れ刃に欠けがないだけでなく刃先の丸み半径を 1 nm に成形することを研究目標に掲げていた。

研究を続ける過程で、NPD 製ノーズ R バイトに対して機械的な乾式ラッピングを行い、欠けがないだけでなく刃先の丸み半径を 1 nm に成形することは不可能に近いことに気がついた。別の言い方をすると、NPD に対して乾式ラッピングを行い NPD から原子サイズの切りくずを出すことは不可能に近いと考えられるようになった。そこで、×10,000 の電子顕微鏡で観察して欠けがない刃先を成形できる乾式ラッピング技術を開発することに研究目標を修正する。

「2. 切れ刃鋭利化のためのイオンエッチング技術の開発」と題した研究については、研究目標をクリア

表 3 2018 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		→ 終了				
	② 乾式ラッピングに使用するモータの選定			→ 終了			
	③ NPD製ノーズRバイトの成形				→ 研究実施中		
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			→ 終了			
	⑤ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズRパイに対するイオンエッチング				→ 継続中		
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				→ 研究実施中		
	⑦ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作				→ 研削加工に集中		

できる研究の成果が得られたと考えている。つまり、切れ刃に欠けがないだけでなく、刃先の丸み半径を 1 nm 以下に成形できるドライエッチング技術を開発できた。「3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験」と題した研究に関連して、2018 年度には、切削加工を行い刃先にわずかな欠けが発生した工具の再生技術として当該技術を応用する予定である。

本研究では、刃先を原子と同じサイズに成形した NPD 製ノーズ R バイトを用いると粗さが 1 nm Rz 以下の切削加工面が成形できる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ている。無酸素銅のヌープ硬さ HK が 55~100 であるのに対し、ナノ多結晶ダイヤモンドのヌープ硬さが 10,000、単結晶ダイヤモンドのヌープ硬さ HK が 7,000 であり、工具が摩耗するとは考えられない。しかし、図 22 に示したようにナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトの逃げ面には、すり減り摩耗が生じている。

「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、まず始めに逃げ面にすり減り摩耗が発生した原因を明らかにするための研究を実施する。その後、当初の予定通り粗さが 1 nm Rz 以下の加工面を作るための研究を継続して実施する。瞬間最大風速ということになるが現時点でも 10 nm Rz 以下の加工面を作ることは成功している。したがって、すり減り摩耗の発生原因を明らかにすることができれば、研究を一步前へ進めることができるのではないかと考えている。

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, Ultrahard 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, B04 (2014-9), pp.105-106, USB.
- (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 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, C17(2015-9), pp.217-218, USB.

- (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砥粒加工学会学術講演会講演論文集, A13(2016-8), pp.37-38, USB.
- (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バイトに対するドライエッチング, ABTEC2017 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, B09(2017-8), pp.99-100, USB.
- (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 -, ABTEC2018 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, B09(2018-8), pp. 99-100, USB.
- (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) 仙波卓弥, 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 -, 2015 年度研究成果報告書, fokasemituikanehttp://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no1.pdf.
- (14) A. Kobayashi・N. Hoshina・T. Tsukada・K. Ueda, High Precision Cutting with Ultra Precision Spindle, Annals of the CIRP, Vol.27/1(1978), pp. 283-287.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) 浅井昭一, 超精密ダイヤモンド切削における切りくず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.
- (21) 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.
- (22) 仙波卓弥, 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 -, 2016 年度研究成果報告書, http://www.mitsui-zaidan.or.jp/2015report_no2.pdf.
- (23) 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.
- (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講演論文集, 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_no1_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講演論文集, 208 (2014-12), pp.51-52.