

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

銅やアルミの超精密切削に使われている市販の単結晶ダイヤモンドバイトの刃先の丸み半径は、現時点で 1 nm に達している。この値は、銅やアルミの原子半径に比べて 10 倍程度大きく、超精密切削と言いながらも加工に費やされる 90 %以上のエネルギーは、原子配列を乱し被削材から切りくずを排出することに費やされている。本研究では、中山一雄先生が提案された理想的加工を具現化するための研究を行っている。研究目標を達成するために必要不可欠であると思われた、バイトの刃先の丸み半径を銅やアルミの原子半径と同じ約 0.1 nm に成形するための技術開発はほぼ完成した。次年度以降、原子の結合が切断できたことを証明するための加工技術を開発致す予定である。

1. はじめに

1986年に福岡工業大学に着任して以来、中山一雄先生が執筆された「切削加工論」⁽¹⁾を講義に使ってきた。この教科書の中で、中山先生は理想的加工について以下のように表現されている。

- ・ 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“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

図1に示しているのは、本物のりんごと鋼製りんごの皮をむいているようすである。本物のりんごの場合、むいた皮を表面に巻き付けると全表面を覆うことができる。また、無意識のうちに人は皮の幅や厚さを制御している。したがって、本物のりんごの皮をむくという行為は理想的かつ革命的加工を行っていることになる。これに対し、鋼の切削加工では設定切込み深さに対し切りくずの厚さが3倍程度厚くなる。したがって鋼の切りくずを新生面に巻き付けたとしても、1/3程度しか表面を覆うことができない。鋼の切削加工に費やされる95%以上のエネルギーは、新生面を作るといった本来の目的からすれば全く無駄ともいえる、原子配列を乱し切りくずを作ることに費やされている。

図2に示しているのは、単結晶ダイヤモンドバイトを使った超精密切削時に単結晶純アルミニウムから排出される切りくずのようすを解析した、井川先生の研究成果⁽²⁾である。刃先の丸み半径が2.5 nmの単結晶ダイヤモンドバイトを使った場合、0.5 nmの設定切込み深さに対し切りくずの厚さは3倍程度厚くなっている。これは、超精密切削を行ったとしても理想的加工は具現化されていないことを意味する。本研究の目的は、理想的加工を実現できる工具技術と加工技術を開発することである。

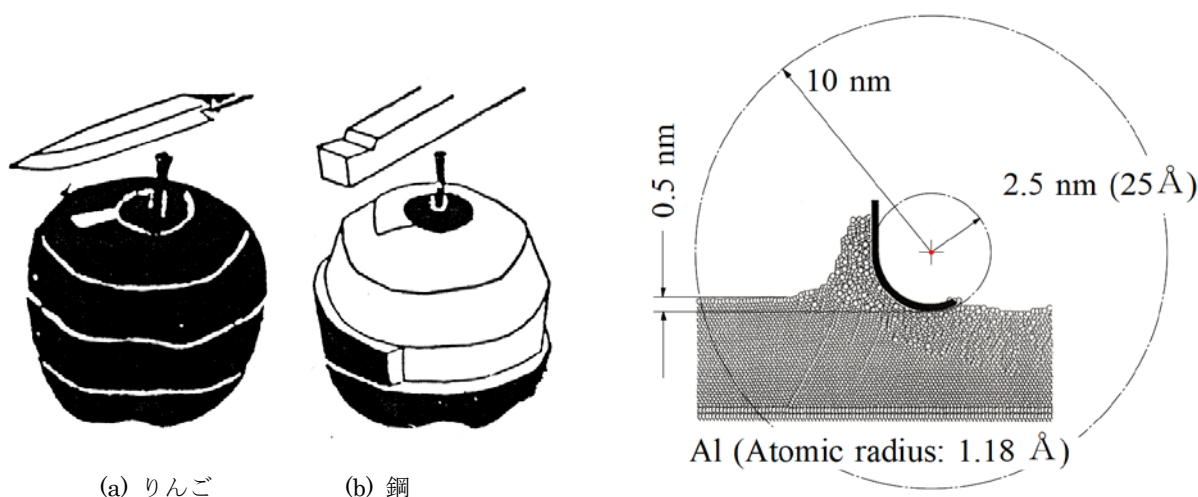


図1 りんごの皮むきと理想的加工

図2 単結晶ダイヤモンドバイトを使った超精密切削時に単結晶純アルミニウムから排出される切りくず

表 1 2016 年度 (2016 年 9 月～2017 年 8 月)の研究実施計画

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019
1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発	① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作	→ 終了				
	② 圧力切込み方式での乾式ラッピング技術の開発	→ 中止				
	③ 乾式ラッピングに使用するモータの選定			→ 新規		
	④ 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	⑤ イオンエッチングのメカニズムの解明				→ 継続	
	⑥ 乾式ラッピングしたNPD製ノーズR				→ 継続	
3. 切れ刃鋭利化の効果を検証するための切削実験	⑦ 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			→ 開始		→
	⑧ 超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の試作			→ 継続		→

この研究目的を達成するため、工具技術に関しては刃先の丸み半径を工作物の原子半径と同じ 0.1 nm に成形する必要があると判断した。表 1 に示しているのは、2016 年 9 月に開催された研究成果報告会で紹介した 2016 年度の研究実施計画である。2015 年度に研究を行った結果⁽³⁾、レーザ成形したナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)製ノーズ R バイトに対して乾式ラッピングを行うと、ラップ板に使用した焼結ダイヤモンド(Poly Crystalline Diamond: PCD)製円板に生じる面振れが原因で、バイトの刃先に欠けが生じることが明らかになった⁽⁴⁾。また、レーザ成形後や乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対して酸素プラズマを用いたドライエッチングを行うと、刃先に生じていた丸みや欠けが無くなり、刃先の丸み半径が 1 nm 以下に鋭利化されることが明らかになった⁽⁵⁾。

以上のように得られた研究の成果を踏まえ、表 1 に示した 1. の研究では、ラップ板を自転運動させるために使っているモータのアキシャル方向の振動を無くするため、同方向の非同期振動が少ないモータを選ぶための実験を行った。その上で、刃先に生じる欠けを防ぐための研究を行った。また、表 1 に示した 2. の研究では、ドライエッチングを行うと刃先に生じていた丸みや欠けがなくなる原因を解明すると同時に、刃先の丸み半径を 0.1 nm に成形するための研究を行った。さらに、表 1 に示した 3. の研究では、市販の UPC(Ultra Precision Class)クラスの単結晶ダイヤモンドバイトを用いて多結晶純アルミニウムに対する超精密精密切削を行い、理想的加工を具現化するための加工技術を修得するための研究を行った。本報告書には、表 1 に示した 1. ～3. の項目に対して行った研究の成果を記述している。

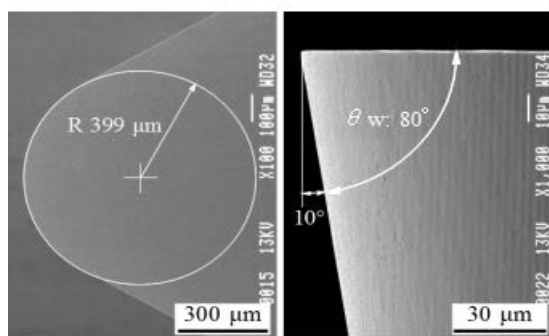
2. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発

2. 1 供試材

図3に示しているのは、ナノ秒パルスレーザ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0.4mmのNPD製ノーズRバイトである。図4に示しているのは、原子間力顕微鏡を用いて測定した前切れ刃の画像である。断面曲線から測定した刃先の丸み半径は $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 、楔角は 110° 前後の値である。このように、レーザ加工を行うことによって刃先を鋭利に成形することは難しい^{(6),(7)}。

2. 2 乾式ラッピングに使用した装置

図5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様子である。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 $1\ \mu\text{m}$ で直径が15mmのPCD製円板を使用した。乾式ラッピング時には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、NPDを乾式ラッピングすることができる^{(8),(9)}。



(a) すくい面 (b) 横切れ刃
図3 レーザ成形後のNPD製ノーズRバイト

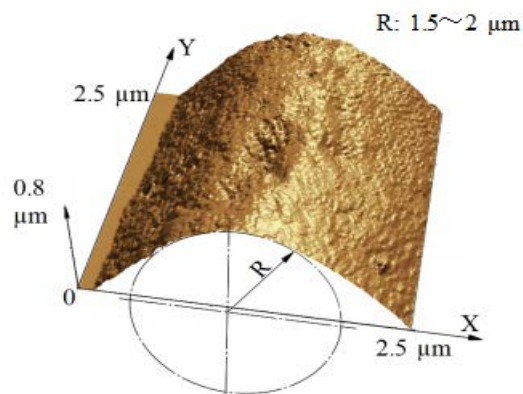
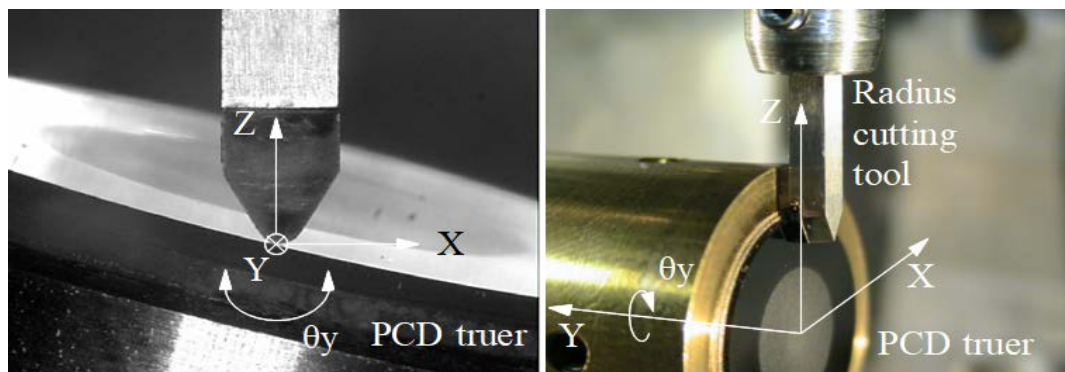


図4 前切れ刃のAFM画像(R: $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$)



(a) 逃げ面 (b) すくい面
図5 NPD製ノーズRバイトの乾式ラッピングに使った装置の外観

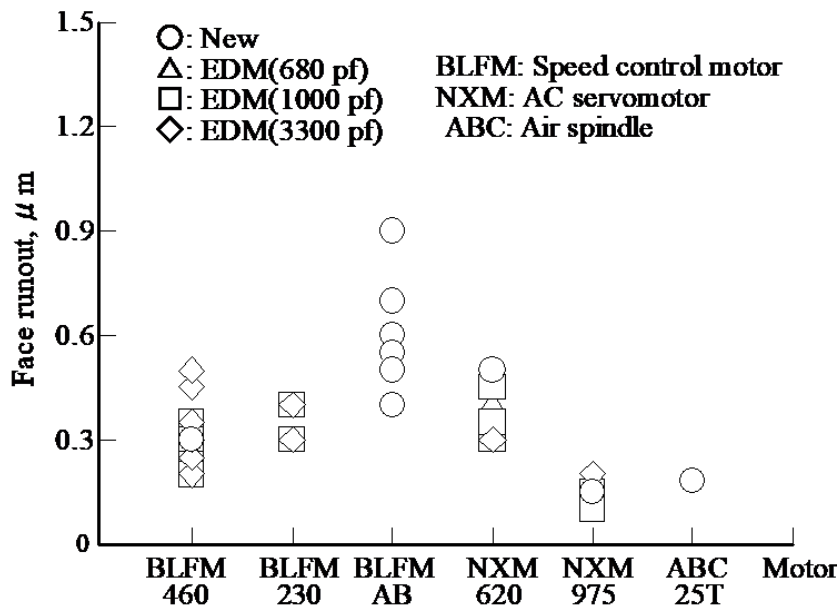


図6 ラップ板を自転運動させるために使用したモータとラップ板の面振れ

2. 3 乾式ラッピングに使用するモータの選定

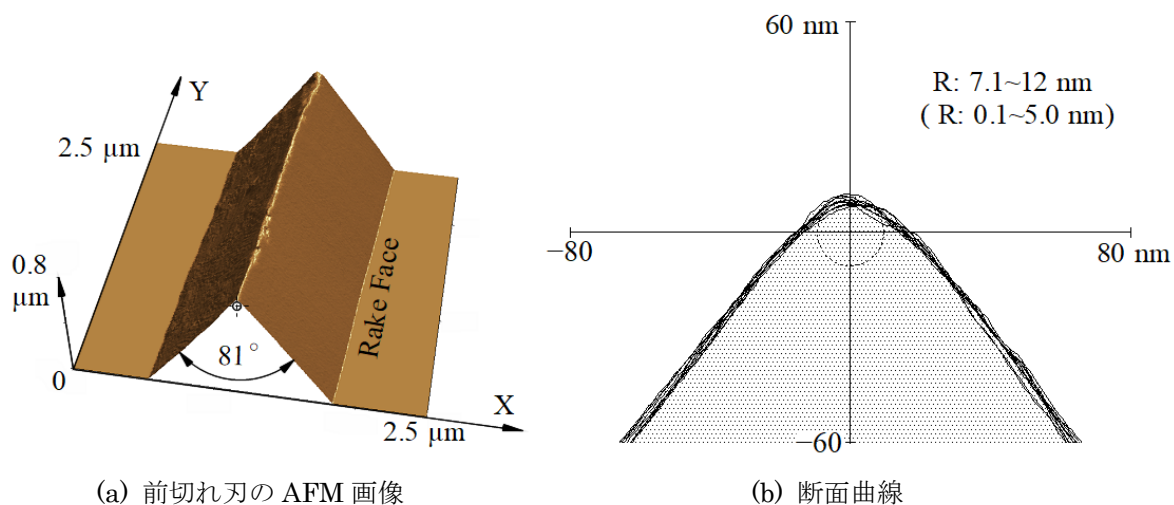
図6に示しているのは、ラップ板を自転運動させるために使ったモータと面振れとの関係である。ラップ板には放電加工を行うことによって面振れを0.1 μm以下に成形したPCD製円板を使用した。横軸にBLFMと表現しているのはオリエンタルモータ(株)製のスピードコントロールモータ、NXMと表現しているのは同社製のACサーボモータ、ならびにABCと表現しているのは東芝機械(株)製のタービン駆動方式のエアスピンドルである。BLFMとNXMを用いた場合には回転に同期しない面振れが発生した。これに対し、ABCを用いた場合の面振れは回転に同期しており、しかも面振れは0.2 μm以下の値であった。

面振れが回転と同期している場合には、芯振れ調整を行うことによってラップ板の面振れを0.1 μm程度に調整できる。また、エアスピンドルのアキシヤル方向の剛性は12.7 N/μmと低く、ラップ板の作用面がNPD製ノーズRバイトに弾性接触する可能性があると考えられた。そこで、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を用いることにした。

2. 4 NPD製ノーズRバイトの成形

図7に示しているのは、乾式ラッピングを行い成形したNPD製ノーズRバイトのAFM画像と刃先の断面曲線である。このように、レーザ成形したNPD製ノーズRバイトに対して乾式ラッピングを行うと、刃先の丸み半径を1.5~2 μmから5 nm以下、楔角を110°から81°に減らすことができた。ただし、回転に同期しているがアキシヤル方向に生じる振動が原因でラップ板に面振れが発生し、図7(a)に示すように刃先に微細な欠けが発生した。

そこで、面振れと欠けとの関係を明らかにする目的で面振れの値を $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ の範囲で変化させ、NPD 製ノーズ R バイトを成形した。



(a) 前切れ刃の AFM 画像

(b) 断面曲線

図 7 乾式ラッピングを行い成形した NPD 製ノーズ R バイト

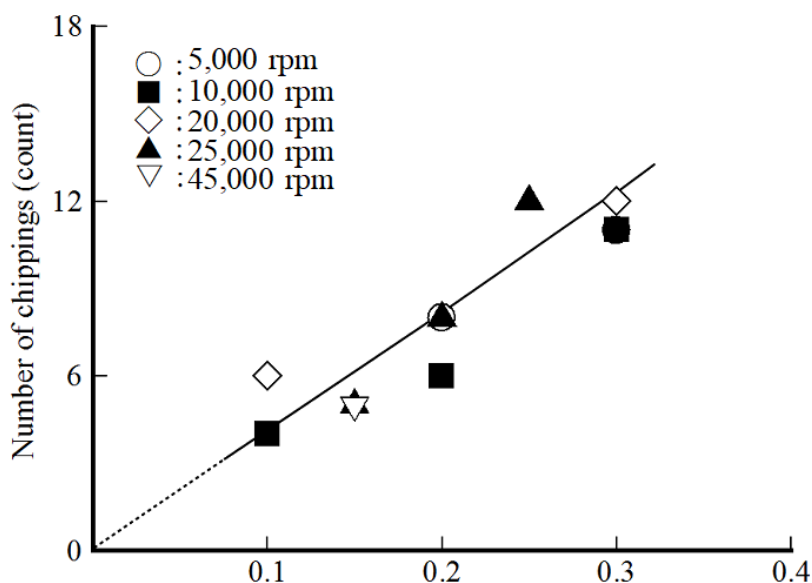


図 8 回転に同期したラップ板の面振れと刃先に生じたサイズが 100 nm 以上の欠けの数

図 8 に示しているのは、ラップ板の面振れと前切れ刃と両サイドの横切れ刃に生じていたサイズが 100 nm 以上の欠けの個数との関係である⁽¹⁰⁾。10000 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。図 8 のように得られた実験の結果から、乾式ラッピングを行い刃先に生じる欠けを無くするためには、ラップ板の面振れを 0 にする必要があることが明らかになった。

芯ぶれ調節を行いラップ板の面振れを 0 に調整することは不可能に近い。また、サイズが $1 \mu\text{m}$ 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 行えば完全に除

去できる⁽⁵⁾。そこで、乾式ラッピングを行い欠けがない刃先を成形するための研究を続けることは断念することにした。

3. 切れ刃鋭利化のためのドライエッチング技術の開発

3.1 ドライエッチングの効果

2015年度の研究成果報告書に記載したように、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⁽¹¹⁾を使用した。図9に示しているのは、レーザ成形後に電解加工を行うことによって熱変質層を除去したNPD製ノーズRバイトに対し、酸素プラズマを用いたドライエッチングを10h行った場合の刃先である。また、図10に示しているのは乾式ラッピングを行ったNPD製ノーズRバイトに対し、酸素プラズマを用いたドライエッチングを3h行った場合の刃先である。このように、刃先に丸みや欠けは生じているNPD製ノーズRバイトに対してドライエッチングを行うと丸みや欠けは除去され、刃先が鋭利化される⁽¹⁰⁾。

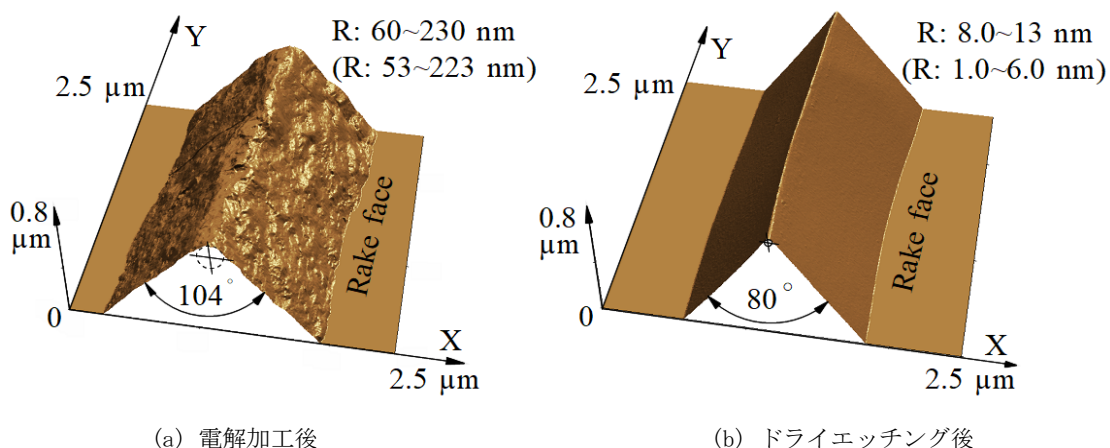


図9 レーザ成形後に電解加工を行った刃先と、電解加工後にドライエッチングを10h行った刃先のAFM画像

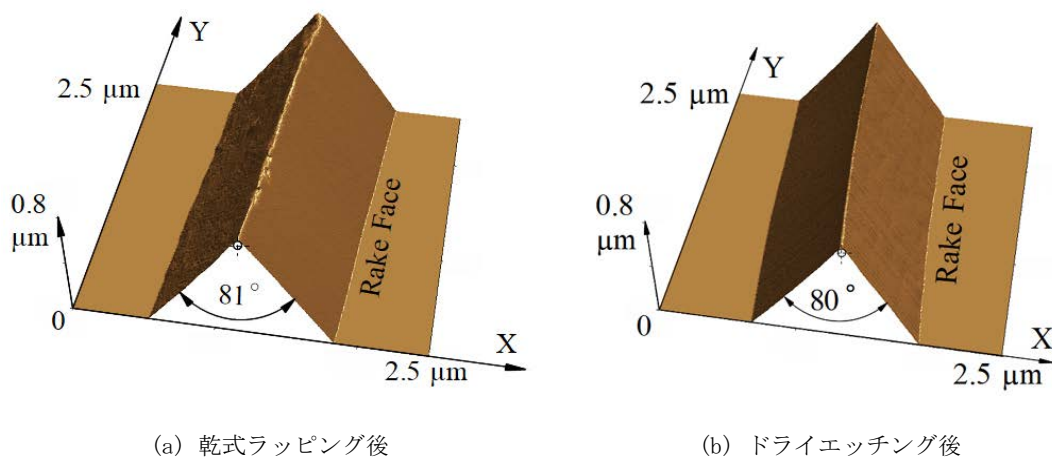
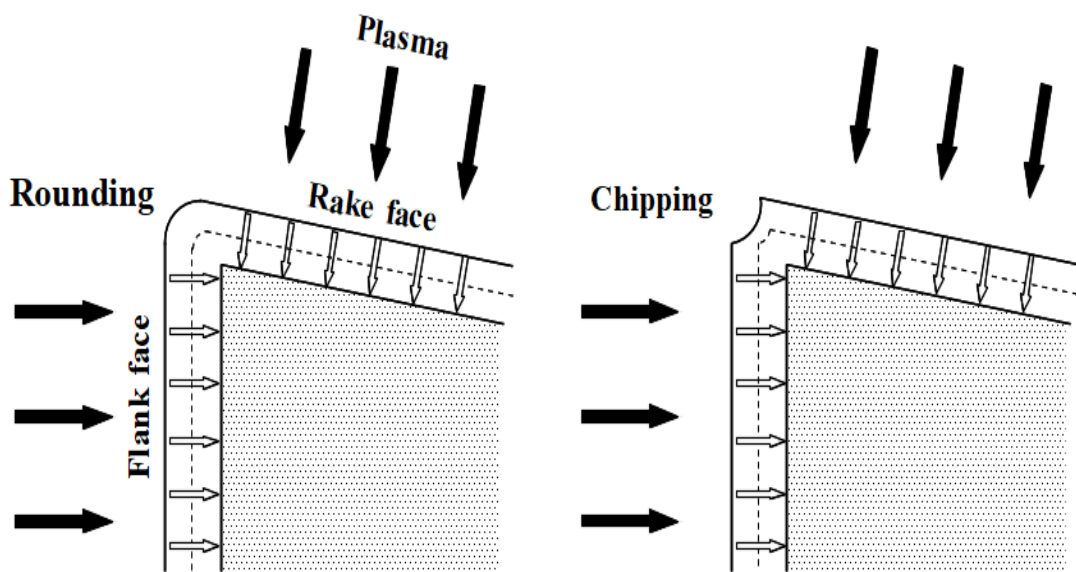


図10 乾式ラッピングを行った刃先と、乾式ラッピング後にドライエッチングを3h行った刃先のAFM画像

3. 2 刃先が鋭利化されるメカニズム⁽¹⁰⁾

ドライエッチングを行うと刃先の丸みや欠けがなくなる原因として、図 11 に示すように酸素プラズマがすくい面や逃げ面に対して垂直に衝突し、それらの面が元の面に対して平行にドライエッチングされている可能性が考えられた。そこで、ドライエッチングを行う前後ですくい面と前逃げ面の方向から 2 枚の SEM 画像を撮影し、2 枚の画像を重ね合わせることによってすくい面や逃げ面の後退量を測定した。この場合、二枚の画像を重ね合わせる目印としてすくい面には図 12 に示すように±60° 度の範囲に 1 辺の長さが 10 μm で三角形のレーザスポットを 7 個成形した。また前逃げには、工具の中心軸上に三角形のレーザスポットを 1 個成形した。



(a) 刃先の丸み

(b) 刃先の欠け

図 11 ドライエッチングを行うと刃先の丸みや欠けが無くなるメカニズム

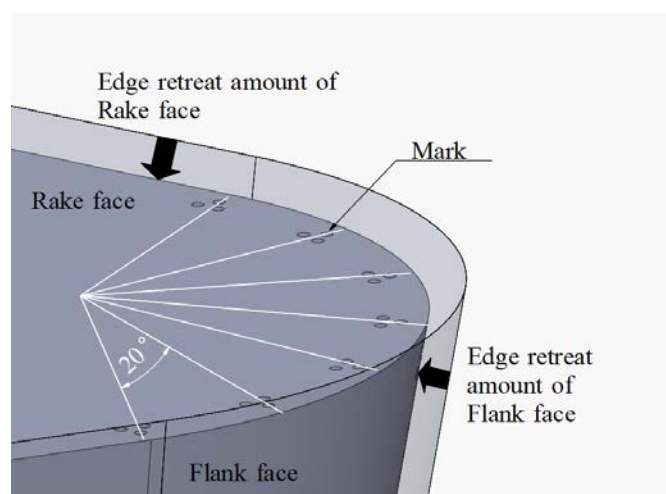
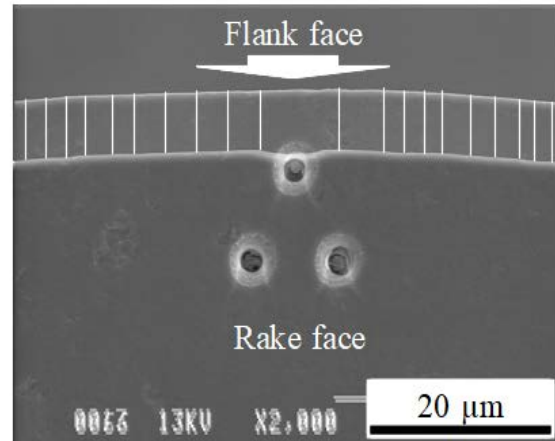
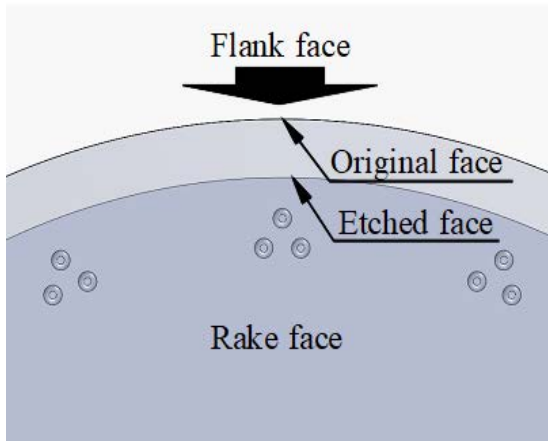


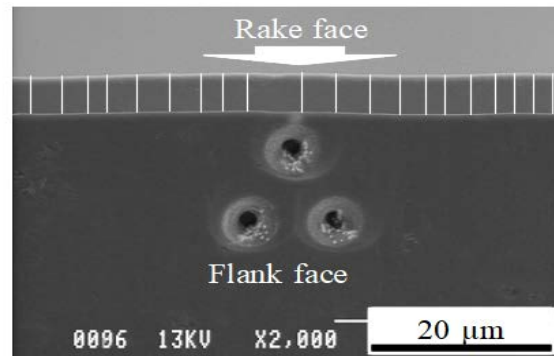
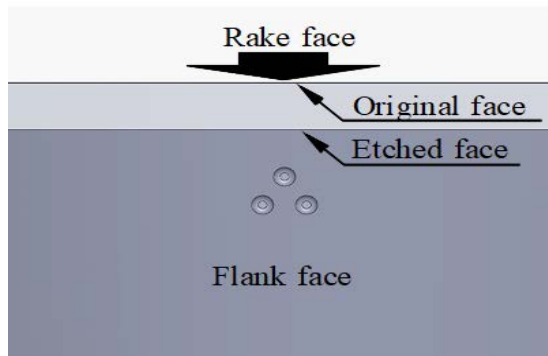
図 12 ドライエッチングを行い前後で撮影した 2 枚の SEM 画像を重ね合わせる目印にするためにすくい面や逃げ面に成形した三角形のレーザスポット



(a) CAD イメージ

(b) SEM 画像

図 13 すくい面側から観察した 2 枚の SEM 画像を重ね合わせ、逃げ面の後退量を測定した一例



(a) CAD イメージ

(b) SEM 画像

図 14 前逃げ面側から観察した 2 枚の SEM 画像を重ね合わせ、すくい面の後退量を測定した一例

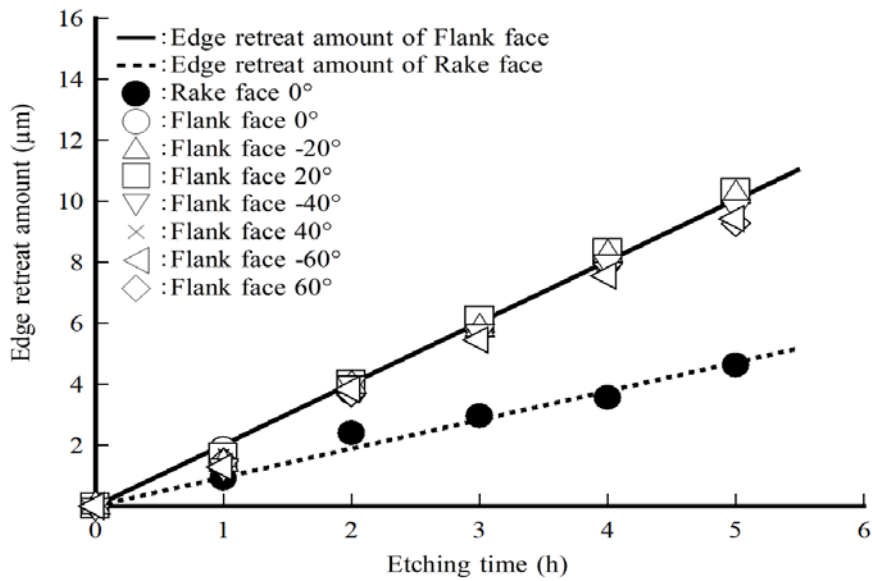


図 15 エッチング時間と元の面に対するすくい面や逃げ面の後退量

図 13 に示しているのは逃げ面の後退量を測定しているようす，図 14 に示しているのはすくい面の後退量を測定しているようすである．図 13 や図 14 に示したように，すくい面や逃げ面は元の面に対して平行にドライエッチングされていることが確かめられた．ここで，逃げ面が元の面に対して平行にドライエッチングされたということは，ノーズ R の半径が減少したことを意味する．

3. 3 乾式ラッピングされた NPD 製ノーズ R バイトに対するドライエッチング

図 15 に示しているのは，エッチング時間とすくい面や逃げ面の後退量との関係である．酸素プラズマは NPD 製ノーズ R バイトをクランプする工具ホルダの形状に影響され，NPD 製ノーズ R バイトの逃げ面に衝突する性質を持っている．このことが原因で逃げ面の後退量はすくい面の後退量に比べて 2 倍程度大きくなっている．この逃げ面の後退速度は約 $2 \mu\text{m/h}$ であり，この結果は刃先に生じたサイズが $1 \mu\text{m}$ の欠けはドライエッチングを 30 分行えば除去できることを意味する．

図 16 に示しているのは，乾式ラッピングを行い刃先に欠けが残っていた NPD 製ノーズ R バイトに対し，ドライエッチングを 3 h 行った場合に得られた前切れ刃の AFM 画像と断面曲線である．刃先に生じた欠けはドライエッチングを 1 h 行うと除去できたが刃先の丸み半径は $0.1 \sim 3 \text{ nm}$ であった．これに対しドライエッチングを 3 h 行うと，図 16(b) に示すように刃先の丸み半径を $0.1 \sim 0.9 \text{ nm}$ に鋭利化できた．エッチング時間を増すと，刃先の丸み半径がさらに減少するといった実験の結果が得られている．したがって，欠けが無いだけで無く刃先の丸み半径を工作物の原子半径と同じサイズに成形することに関しては，研究目標の 90%程度は達成できたと考えている．

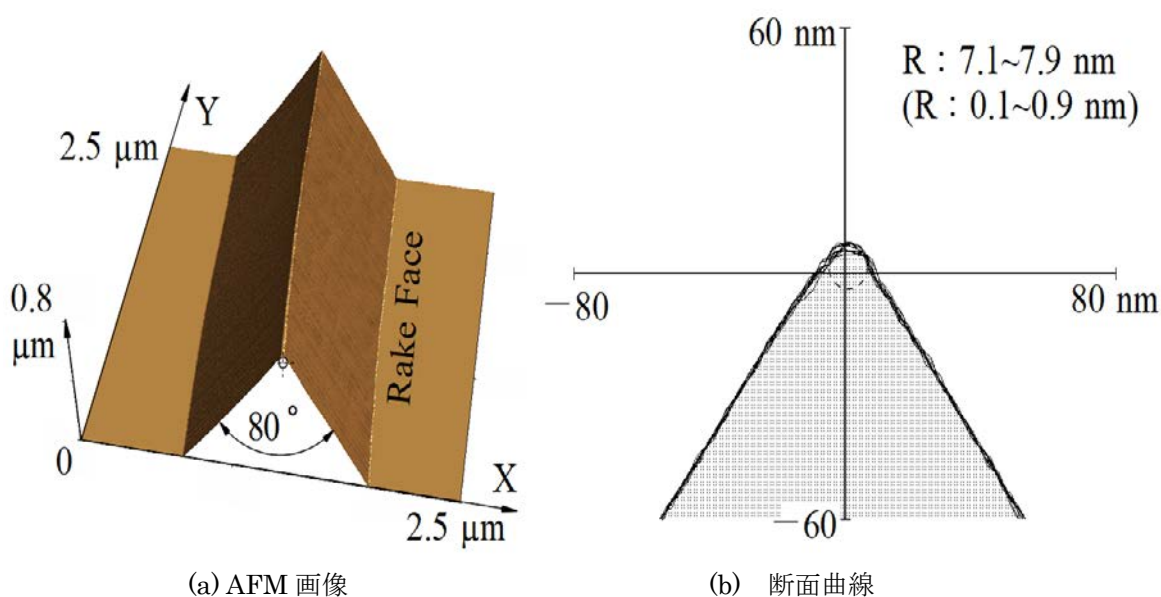


図 16 乾式ラッピング後の NPD 製ノーズ R バイトに対して 3h ドライエッチングを行った場合の刃先

4. 切れ刃鋭利化の優位性を検証するための切削実験

4. 1 検証の方法

過去に NPD 製のマイクロボールエンドミルを試作し、アモルファスカーボン、プリハードン鋼 NAK55, ならびに超硬合金に対して fp 加工⁽¹²⁾、⁽¹³⁾を行った。fp 加工というのは、工具一回転当たりの送り量と横送量とが等しくなるように加工条件を設定した加工法⁽¹²⁾のことである。古いデータになるが、**図 17**に示しているのは、試作した NPD 製のマイクロボールエンドミル⁽¹⁴⁾を使って加工した fp 加工面である⁽¹⁵⁾。アモルファスカーボンや超硬合金に比べると延性の高い NAK55 の加工面には、カスプと呼ばれている工具の回転軌跡が残っており、カスプの稜線は曲がっている。これは、切りくずが排出される過程で被削材が塑性変形したことを意味する。

図 18に示しているのは、工具一回転当たりの送り量と送り方向に測定した fp 加工面の粗さ R_z である⁽¹⁵⁾。図中に黒丸で示しているのは、 $R_z = f^2 / (8R)$ と幾何計算される理論粗さである。ここで、 f は工具一回転当たりの送り量、 R はボールエンドミルの半径である。 f を 0 に近づけたとしても、粗さは 0 になりそうにない。この現象は寸法効果と呼ばれ、切りくず厚さが徐々に増加するカンマ形切りくずの厚さに比べて刃先の丸み半径が大きく、被削材の表面が塑性変形しているためである⁽¹⁾。

もしも**図 16**のように成形した刃先で理想的加工を行うことができれば、つまり切りくずの厚さを設定切込み深さと同じにすることができれば、加工面の粗さは理論粗さと一致するはずである。そこで、刃先を**図 16**のように成形した NPD 製ノーズ R バイトの優位性を検証するための実験として、きわめて延性が高い多結晶純アルミニウムに対して超精密切削を行い加工面の粗さを測定することにした。この場合、超精密切削に使用する非球面レンズ加工機の位置決めや送り運動に対する制御分解能は 10 nm であり、検証のために行う加工実験には多くの問題が発生することが予想された。そこで、加工技術を修得するための研究を行うことにした。

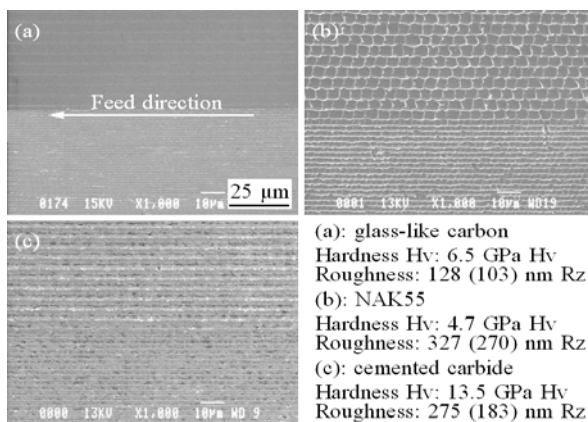


図 17 NPD 製マイクロボールエンドミルを用いた fp 加工面 (被削材: アモルファスカーボン, NAK55, 超硬合金)

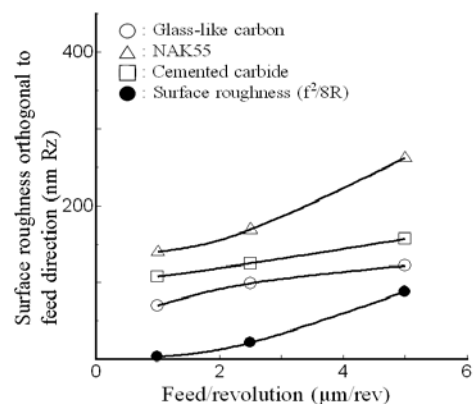


図 18 工具一回転当たりの送り量と送り方向に測定した加工面の粗さ

4. 2 加工方法と加工条件

図 19 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。前述したように、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(株), ULG50A), 切削工具には刃先の丸み半径が 0.1~2 nm 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 の多結晶純アルミニウム, ならびに切削液には 30 倍に希釈したソリュブルタイプのアルミ専用切削液(アイガー(株), NT33)を使用した。

表 2 に示しているのは加工条件である。たとえばワークスピンドルの回転数を 600 rpm に設定し、切削工具を 0.2 mm/min に設定すると加工面の理論粗さは 0.035 nm Rz になる。この粗さはアルミの原子半径である 0.118 nm よりも小さい値である。2016 年度には、この理論粗さに近い値が実現できるか否かを見極めるための切削実験を行った。

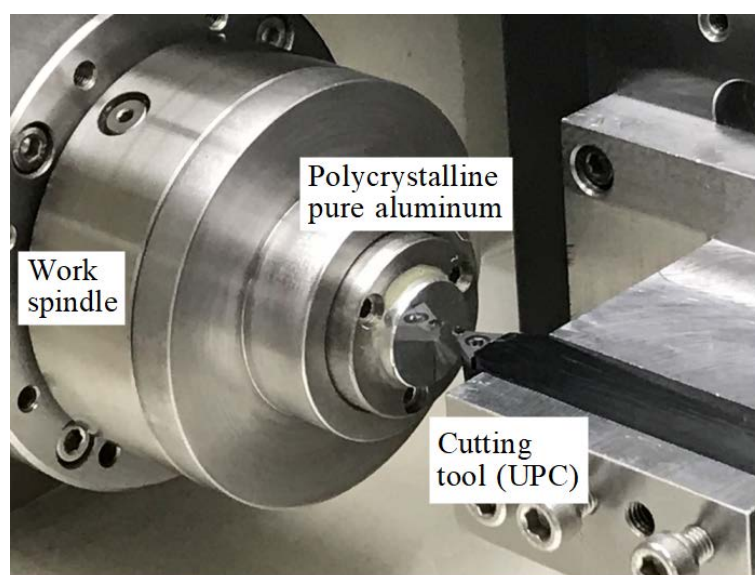


図 19 切削実験に使用した装置の外観

表 2 加工条件 (Al の原子半径: 1.18 Å(0.118 nm))

ノーズR	ワーク回 転数 s	半径方 向送り速 度 v	ワーク一 回転当 たりの 送り量 f	ワーク 回転当 たりの送 り量 f	最大粗さ Rz	最大切り 込み量 ΔR	1パス加 工時間
mm	rpm	mm/min	mm/rev	μm/rev	nm	nm	min
0.4	600	0.2	3.333E-04	0.33	0.0347	0.0347	11.9
0.4	600	0.6	1.000E-03	1.00	0.3125	0.3125	4.0
0.4	600	1	1.667E-03	1.67	0.8681	0.8681	2.4
0.4	600	1.4	2.333E-03	2.33	1.7014	1.7014	1.7
0.4	600	1.8	3.000E-03	3.00	2.8125	2.8125	1.3
0.4	600	2.2	3.667E-03	3.67	4.2014	4.2014	1.1
0.4	600	2.2	3.667E-03	3.67	4.2014	4.2014	1.1
0.4	600	5	8.333E-03	8.33	21.7014	21.7014	0.5
0.4	600	10	1.667E-02	16.67	86.8056	86.8056	0.2

4. 3 切削実験の結果

図 20 に示しているのはワークスピンドルの回転数を 600 rpm, 工具の送り速度を 0.6 mm/min, ワーク一回転当たりの送り量を $1 \mu\text{m}/\text{rev}$, 設定切込み深さを 200 nm に設定した場合に得られた加工面である. 光学微分干渉顕微鏡画像であり, 加工面には加工条件と一致

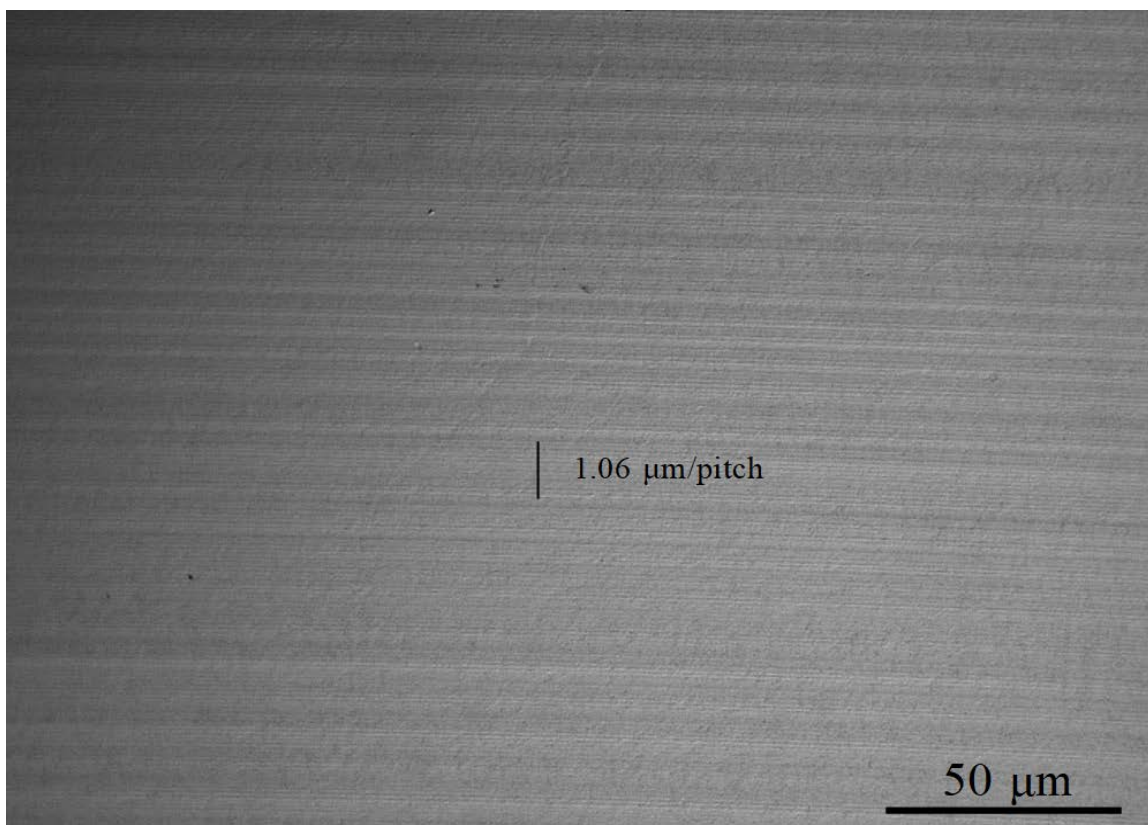
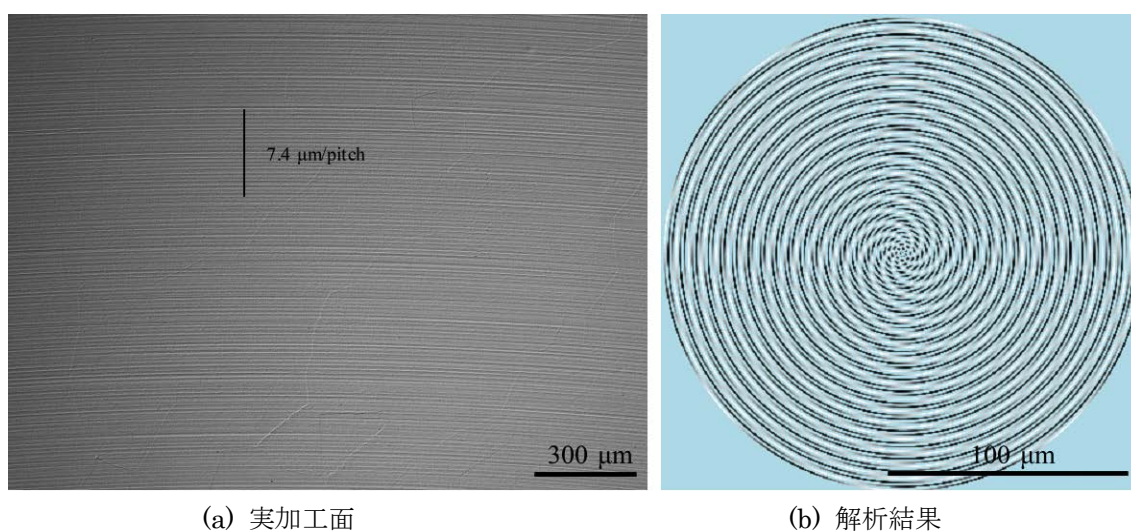


図 20 ワークスピンドルの回転数を 600 rpm, 工具の送り速度を 0.6 mm/min, ワーク一回転当たりの送り量を $1 \mu\text{m}/\text{rev}$, 設定切込み量を 200 nm に設定した場合の加工面



(a) 実加工面

(b) 解析結果

図 21 対物レンズの倍率を $\times 50$ から $\times 10$ に下げて観察した実加工面と加工面の解析結果

する間隔が $1.06 \mu\text{m}$ の送りマークと同心円状のうねりが観察された。図 21(a) に示しているのは、図 20 に示したのと同じ場所を対物レンズの倍率を $\times 50$ から $\times 10$ に下げて観察した結果である。加工面には粗さが 40 nm Rz 前後で同心円状のうねりが生じていることが明らかになった。

実験に使用した工作機械はフルクローズドループで位置決めや送り運動が制御されている。この制御信号の中でも、切込み方向である Z 軸方向の位置制御信号が図 21(a) のように観察された加工面のうねりに関与した可能性が高いと考えられた。そこで、NC 装置から Z 軸方向の位置制御信号を取出し、制御信号に対して周波数分析を行った。厳密には位置を制御するための変位から平均値を除去した、位置偏差と呼ばれている変位に対して周波数分析を行った。その結果、特定の周波数では無く広い周波数で工具の刃先は Z 軸方向に振動しているが、振幅は 77 Hz で最も高くなっていることが明らかになった。

そこで、周波数が 77 Hz で工具の先端が Z 軸方向に振動していると考え、加工面に残る工具の軌跡を解析した。図 21(b) に示しているのは解析の結果である。加工面に最も食い込んだ位置を黒色、過去面から最も離れた位置を白色で表現し、黒色と白色の間を 126 階調の色に分けて切れ刃の運動軌跡を表現している。図 21(b) に示したように、Z 軸方向の工具の振動軌跡が加工面に転写されると同心円状のうねりが加工面に生じることが確かめられた。

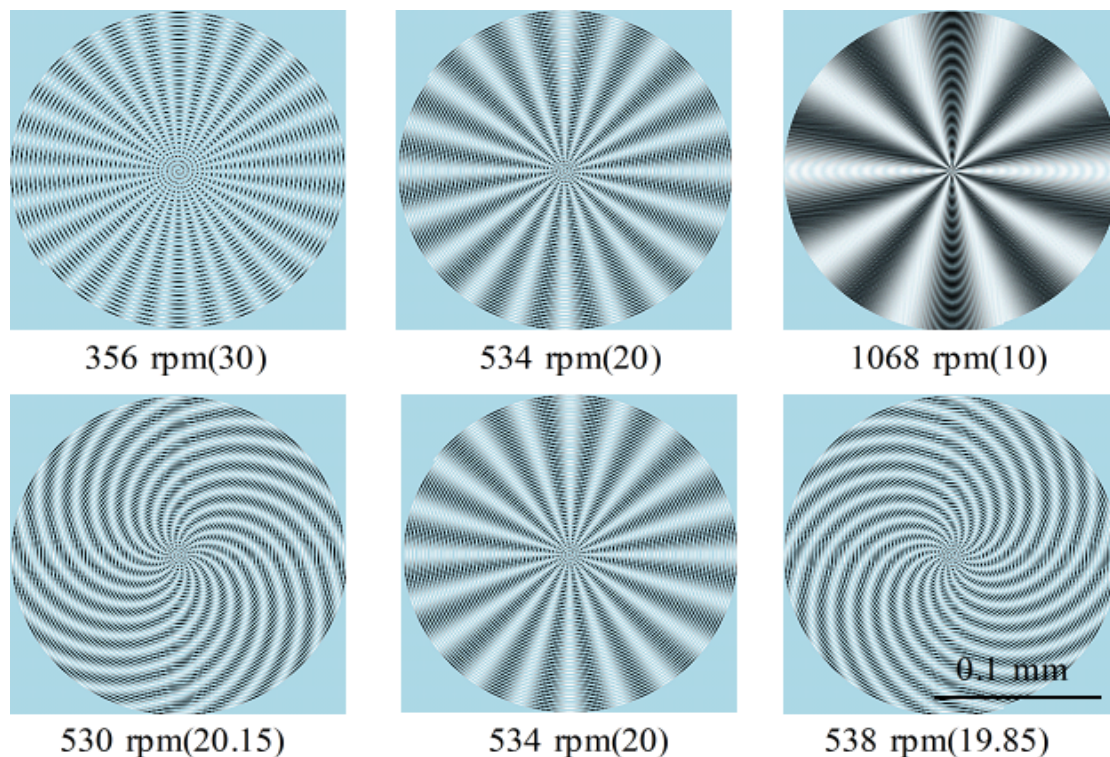


図22 ワークスピンドルの回転数を変化させた場合に变化すると考えられる干渉模様。
括弧内の数字：加振周波数/ワークスピンドルの回転周波数（ワーク回転数： 600 rpm ，
工具送り速度： 1 mm/min ，励起周波数： 77 Hz ，ワーク半径： 0.1 mm ）

4. 4 うねりの回避方法

図 21(a)のように加工面に生じた干渉縞を消すためには、Z 軸方向の位置偏差を 0 にする必要がある。このためには、振動の発生原因を明らかにすると同時に、位置検出のためにスケールが取り付けられている位置での外乱振動を 0 にする必要がある。これは、言うのは簡単であるが実現するのは不可能に近い。

そこで、図 21(b)に示したような加工面の解析を行い、同心円状のうねりが生じない加工条件を見出すための数値実験を行った。図 22 に示しているのは加振周波数を 77 Hz に固定した上で、ワークスピンドルの回転数を変化させた場合に得られた結果である。加振周波数がワークスピンドルの回転周波数の整数倍の時には放射状の干渉縞が生じるのに対し、実数倍の場合には同心円状の干渉縞が生じることを表している。前述したように、Z 軸方向の位置偏差にはいろいろな周波数が含まれており、ワーク回転数を変化させて切削実験を行ったとしても放射状の加工面が得られる保証は無い。しかし、もしも図 22 の上段に示したような加工面を作ることができれば、ワークの半径方向の粗さを計ればうねりを含まない加工面の粗さを計ることができる。

5. 2017 年度の実験計画

表 3 に示しているのは、2017 年度に実施する必要があると考えている研究実施内容である。レーザ加工を行った NPD 製ノーズ R バイトに対して熱化学反応を利用した乾式ラッピングと酸素プラズマを用いたドライエッチングを行い、刃先の丸みを工作物の原子半径と同じサイズに鋭利化するという、1. と 2. の研究に関しては克服すべき問題点は残っていない。これに対し、切れ刃鋭利化の優位性を検証するための実験に関しては、研究目標を達成するために克服しなければならない多くの問題点を抱えている。現時点では、以下に示す研究をなるべく早い時期に行う必要があると考えている。

表 3 2017 年度(2017 年 9 月～2018 年 8 月)の実験計画

研究課題	研究実施項目	2015	2016	2017	2018	2019
1. 熱化学反応を利用した乾式ラッピング技術の開発	① 乾式ラッピング用PCD製円板の試作		→ 終了			
	② 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	
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	
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			→ 中止		

1. 外乱振動.

図 20 や図 21 に示したように、現時点では Z 軸方向の位置偏差が振動していることが原因で加工面に同心円状のうねりが発生している。これは、外乱振動を打ち消すために NC 装置が誤差修正のための信号を出していることが原因である。したがって、同心円状のうねりを無くするためには、外乱振動の発生原因を突き止め無くするための研究を行う必要がある。

2. 試験方法

現時点では、200 nm 程度の切込みを加えて超精密切削を行い、加工面の粗さが理論粗さと一致することを証明するための実験を行っている。このためには 1. で紹介したように外乱振動を無くする必要があるが、完全に無くしてしまうことは難しい。そこで、具体的にはワーク回転数を変えることによって図 22 の上段に示したような加工面を創成し、半径方向の粗さを測定することを計画している。

3. 加工面粗さの測定方法

原子間力顕微鏡の Z 軸方向の方位解能は 0.1 nm である。したがって、加工面の粗さを測定することに関して問題は無いと考えている。

参考文献

- (1) 中山一雄, 切削加工論, (1978), p.38, コロナ社
- (2) 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.
- (3) 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
- (4) 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), pp.45-46.
- (5) 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), pp.217-218.
- (6) 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), pp.37-38.
- (7) 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(2017-7), [DOI:10.1299/transjsme.16-00573] .
- (8) 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), pp.4704 - 4717.

- (9) 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), pp. 4513-4523.
- (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 パイトに対するドライエッチング, ABTEC2017 講演論文集 USB, B09(2017), pp.99-100.
- (11) 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.
- (12) 高橋昭・阿部忠之・神田敬一・松岡和彦・渡辺一樹, 高速型彫り技術の開発 第 1 報 - ボールエンドミルにおける切削メカニズムの解明, トヨタ技術, 37-2 (1987), pp. 75-87.
- (13) 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), pp.354-355.
- (14) 仙波卓弥・岡崎隆一・角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, 76-763,(2010), pp.768-776.
- (15) 仙波卓弥他 4 名 & 3 社, 次世代超精密微細金型に対する高速製造技術の開発, 文部科学省 私立大学学術研究高度化推進事業(産学連携研究推進事業) 研究成果報告書, (2009), pp.1-466.