

フェムト秒パルスレーザを使用した高硬度金型材料に対する レーザ微細加工技術の開発

研究報告者 天本 祥文

プロフィール



最終学歴	2005年3月 福岡工業大学大学院 工学研究科 物質生産 システム工学専攻 単位取得退学
専門分野	生産工学・加工学(特殊加工・超精密加工)
学 位	博士(工学)
所属団体	福岡工業大学 工学部 知能機械工学科
役 職 名	准教授

今後の抱負

レーザ加工を使用した金型加工用の工具や金型の材料に対する成形法の開発を長く続けてきましたが、材質が変わると加工条件を決めるために多くの加工データを必要としています。レーザ加工は一般的な除去加工と異なり、加工面に影響するパラメータが多く、このことがレーザを使用した形状加工の普及の妨げになっているように感じています。この問題を意識してから、レーザ加工条件を求めるプロセスを簡略化したいと考えるようになりました。今回助成いただいたことで、多種のダイヤモンドの加工を行いました。形状加工の条件はほとんど変わりませんでしたが、加工面の粗度には焼結助剤や結晶粒界などの材料に起因する影響が大きいことがわかりました。今はまだダイヤモンドだけで比較対象が少ないですが、今後超硬合金などの他種の材料の傾向と比較検討することでレーザ加工条件を求めるプロセスの簡略化につなげられればと考えています。

1. はじめに

プレス加工は、20 世紀の電気・電子機器や自動車等の工業大躍進の時代に、安くて大量生産に適する製造法として発展してきた。21 世紀の今日では、さらに省資源・省エネルギーの地球環境に優しい加工法、あるいは金型を使用する高精度・安定生産の転写加工法として、産業において欠かせない基盤技術として注目されている。

近年、金型の長寿命化というメリットから、金型材料に超硬合金を用いることが増えている。また、硬度や化学的安定性に優れているだけでなく、ステンレスやアルミニウムといった材料の成形加工に金型部品^(1,2)に、ドライ環境下で摩擦係数を 0.1 以下にすることが可能で、極めて摩擦が少ないダイヤモンド焼結体(Poly-crystalline Diamond, PCD)や化学気相成長法(Chemical Vapor Deposition, CVD)で作られた CVD ダイヤモンド膜が耐摩耗材として用いられるようになってきている。

しかし、硬度の高い超硬合金に対する一般的な加工は、加工中の工具の摩耗や欠けにより、工具の形状修正や砥粒の目だしを何度も行う必要がある。また、ダイヤモンド系材料に関しては一般的な加工法で形状を成形することは困難である。これらの問題が知られている一方で、金型に対する形状精度に関する要求は年々厳しくなっているのが現状である。

そこで本申請では、超硬合金やダイヤモンド系材料に対して、目標形状を高精度に成形できる加工技術を開発することを計画した。

2. 研究の背景

2005 年より 17 年にわたり、超精密加工用のダイヤモンド製工具の試作や、超硬合金製の金型の粗加工にナノ秒パルスレーザを用いた研究を行っており、ナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-polycrystalline diamond, NPD)製の切削工具や PCD 製の研削工具の粗加工にナノ秒パルスレーザが有効であることがわかっている。しかし、3 次元の形状加工に成功したといえるのは NPD だけであった⁽³⁾。

図 1、図 2、図 3 に示しているのは、それぞれナノ秒パルスレーザを用いて加工した超硬合金、PCD ならびに CVD ダイヤモンドの加工面である。

- (1) 超硬合金の加工では、熱で溶かした溶融物を排出できず、加工面に再付着する。
 - (2) PCD の加工では、PCD に含有する Co を除去できないため、Co 下部のダイヤモンド粒子を加工できずに突起が形成される。
 - (3) CVD ダイヤモンドの加工では、熱衝撃により剥離したような加工面になる。
- といった問題があった。

極短光パルスを用いたレーザ加工は、非侵襲および非熱アブレーション特性を持つために材料の光吸収率の違いや熱の影響をほとんど受けずに加工することができる。そのため、極短光パルスのフェムト秒パルスレーザを用いれば超硬合金や PCD、CVD ダイヤモンドに対して 3 次元形状のレーザ加工が可能であると考えられた。

図 4 に示しているのは、フェムト秒パルスレーザを用いて成形した先端 R が 5 μm の超硬合金製マイクロボールエンドミルの外観である。超硬合金に対して微小形状を高精度に加工できることは確認できたが、最適な加工条件や加工プロセスを求めるには至っていない。

この結果は、熱影響の少ないフェムト秒パルスレーザを用いれば、これまで加工が困難であった様々な材料に対して高精度な3次元形状のレーザ加工が可能であることを意味している。

そこで、本研究では超硬合金の加工条件や加工プロセスの最適化を図り、その結果を踏まえて、これまで3次元形状のレーザ加工が困難であったダイヤモンド系材料、特にPCDならびにCVDダイヤモンドに対して3次元形状を加工できるレーザ加工技術を開発することを試みた。

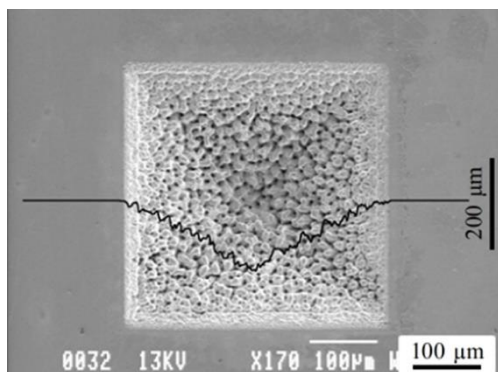


図1 ナノ秒パルスファイバーレーザを用いて加工した超硬合金の表面

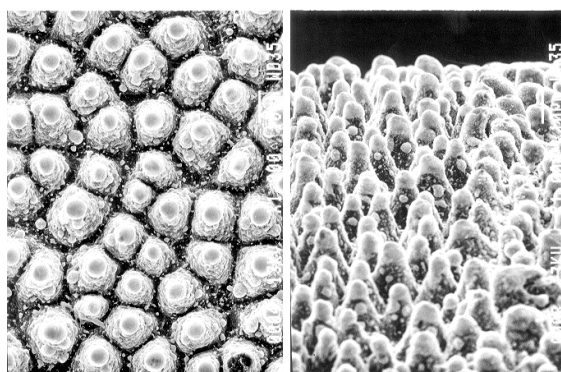


図2 ナノ秒パルスファイバーレーザを用いて加工したPCDの表面

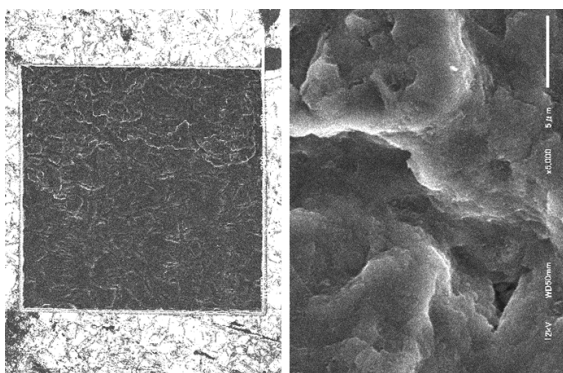


図3 ナノ秒パルスファイバーレーザを用いて加工したCVDダイヤモンドの表面

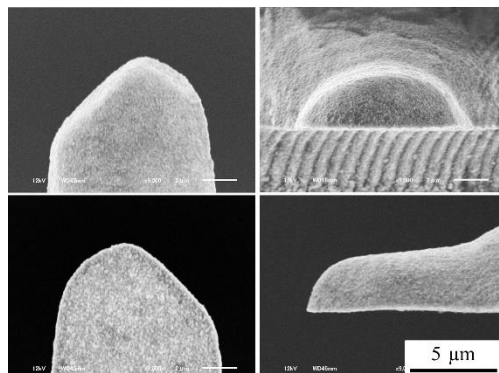


図4 フェムト秒パルスレーザを用いて加工した超硬合金製マイクロボールエンドミル

3. 実験装置

3.1 レーザ加工装置

図5(a)に示しているのは、超硬合金の加工に使用したレーザ加工装置の外観である。立形マシンングセンタのコラムにレーザを集光させると同時に加工面を観察するための光学系を取付け、レーザ光を機械走査した。真ちゅう製の治具に取り付けられた超硬合金はゴニオステージを介してマシンングセンタのテーブルに設置した。

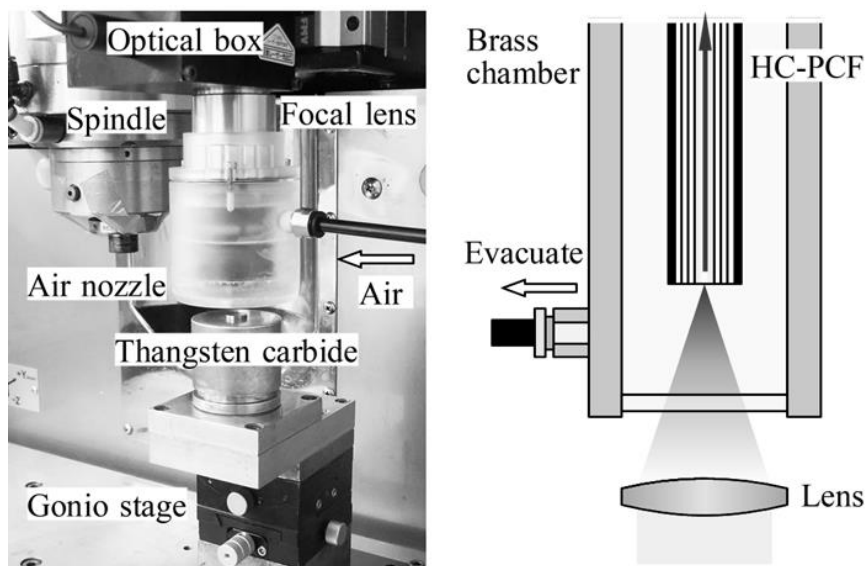
レーザには、波長が 1028 ± 5 nm、最大周波数が1 MHz、パルス幅が290 fs ~ 10 ps、ならびに最大平均出力が4 Wのフェムト秒パルスレーザを使用した。図5(b)に示すように中空ファイバが格子状に配置されホローコアフォトニック結晶ファイバ^(4,5)の内部を真空状態にすることで、フェムト秒パルス

レーザのパルス幅や波長を維持したまま、レーザ光をレーザ本体から光学系まで伝送できるようにした。

3.2 供試材

超硬合金に対するレーザ加工には、プラズマ放電焼結法で作られたバインダレス超硬合金(NJS, M78)を使用した。硬さは2600 Hvである。

ダイヤモンド系材料に対するレーザ加工には、焼結後のダイヤモンドの粒子径が数十 nm でヌープ硬さが約 13,000 Hk の NPD、化学気相成長法(Chemical Vapor Deposition)で合成された CVD ダイヤモンド(トーメイダイヤ(株), TMD-PDB)、平均粒径が 0.5, 5(住友電気工業(株), DA2200, DA150), 1, 3, 7, 10 μm (トーメイダイヤ, TDC-98F2M, TDC-GM, TDC-SM, TDC-HM)の PCD を使用した。



(a) レーザ加工機

(b) ホローコアフォトニック結晶ファイバ

図5 レーザ加工装置の外観

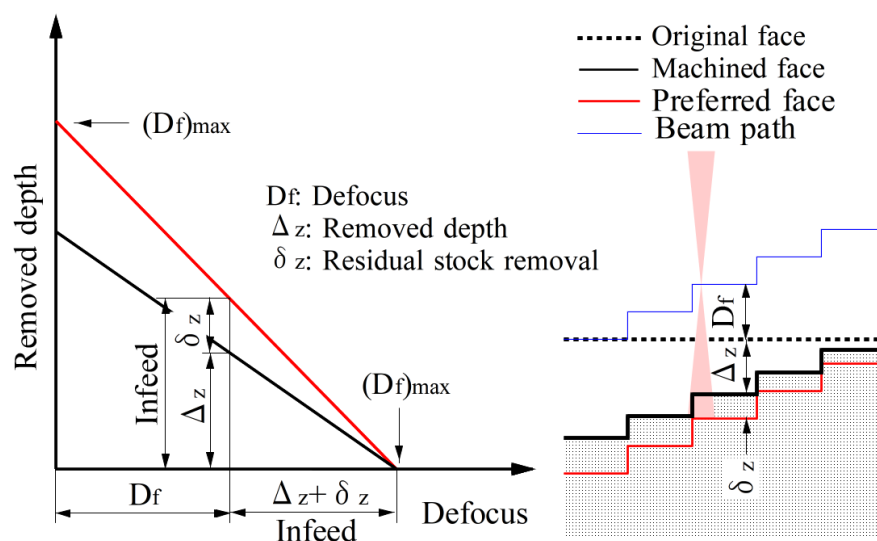


図6 フェムト秒パルスレーザを用いたレーザ加工のメカニズム

4. フェムト秒パルスレーザを用いた超硬合金に対する微細加工技術

4.1 レーザを用いた形状創成のメカニズム

図6に示しているのは、デフォーカス量とZ軸方向の除去量 Δz との関係を示す模式図である。デフォーカス量を0に設定し、完全に削り残しを除去した場合、最大除去量と $(Df)_{max}$ は等しくなる。しかし、レーザ加工では必ず削り残し δz が発生する。レーザで微細形状を加工するためには、赤線で図示した用に削り残し δz を0に近づける必要がある。デフォーカス量を Df 、除去量を Δz とすると焦点除去率 α は

$$\alpha = \Delta z / Df \quad \dots \dots \dots (1)$$

で求められる。削り残し δz が完全に除去された場合、焦点除去率 α は1となる。これは切込

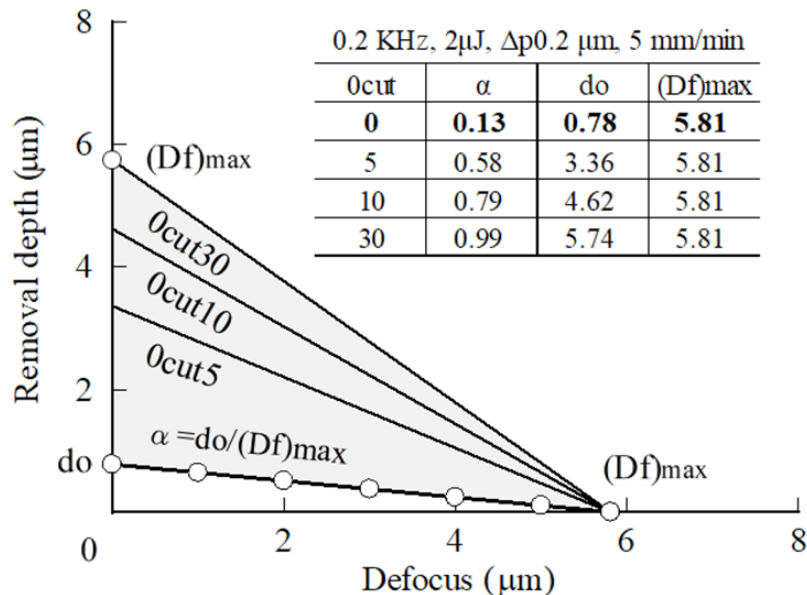


図7 デフォーカス線図

み量 If と除去量 Δz が等しくなることを意味しており、削り残しを完全に除去できれば機械加工と同様の方法で微細形状をレーザ加工することができる⁽¹⁰⁾。

4.2 デフォーカス線図

図7に示しているのは、繰返し周波数が0.2kHz、パルスエネルギーを2μJ、横送り量 Δp を0.2μmならびに、送り速度を5mm/minに設定してレーザ加工を行った場合に得られたデフォーカス量 Df と除去量 Δz との関係である。加工表面からレーザの焦点位置をZ軸のプラス方向にデフォーカスし、正方形のポケットを加工して除去量を測定すると図7に○印で示すデフォーカス線図を取得できる。焦点での除去量を do 、除去量が0になるデフォーカスを $(Df)_{max}$ 、 $do/(Df)_{max}$ を焦点除去率 α と表している。図7に○印で示したデフォーカス線図を取得すれば、切残しを除去するためのゼロカットを行った場合に得られるデフォーカス線図をシミュレーションできる。図7に示した実線は、ゼロカッ

トの回数を変えポケットを加工した場合に得られたデフォーカス線図である。ゼロカットを行っても $(Df)_{max}$ は変化しないが、 do や α は増加する。

4.3 ゼロカット加工と低出力焦点加工

図 8(a)に示しているのは、図 7 に○印で示したデフォーカス線図を加工条件に使用し、 R が $20\text{ }\mu\text{m}$ の円柱に r が $10\text{ }\mu\text{m}$ の半割円柱を加工した場合に得られる形状をシミュレーションした結果である。図 8(a)に付記したように半割円柱を成形するための総切込み深さは $17.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 do は $0.78\text{ }\mu\text{m}$ なので、（レーザの焦点位置を Z 軸の方向に $0.78\text{ }\mu\text{m}$ 移動させた後にレーザを走査させる）といった焦点加工を 23 回繰り返して行えば半割円柱を加工できる。

図 8(b)に示しているのは、ゼロカットを 30 回行った場合に得られるデフォーカス線図を加工条件に使用し、半割円柱を加工した場合のシミュレーション結果である。図 8(b)に付記したように do は $5.74\text{ }\mu\text{m}$ なので、（レーザの焦点位置を Z 軸の方向に $5.74\text{ }\mu\text{m}$ 移動させた後にレーザを同じ走査軌跡で 31 回走査させる）といったゼロカット加工を 3 回繰り返して行えば半割円柱を加工できる。図 8(b)の切込み回数の右に括弧で併記しているのは、ゼロカットを含めた加工パスの繰返し回数である。

このように、低出力焦点加工は do が $0.78\text{ }\mu\text{m}$ なので r が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の半割円柱の加工に適しており、ゼロカット加工に比べ加工パスの繰返し回数は少ないが半割円柱の精度は劣る。これに対し、ゼロカット加工は切残しを除去しながら加工するので加工される半割円柱の精度は高いが、加工パスの繰返し回数が多くなる。また、 do が $5.74\text{ }\mu\text{m}$ なので、ゼロカット加工は r が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の半割円柱の加工には適していない。

図 9 に示しているのは、低出力焦点加工を行い半割円柱の形状精度を上げるために行ったシミュレーションの結果である。 r が $10\text{ }\mu\text{m}$ の半割円柱を加工する円柱の半径 R を変化させた場合に得られる、 $r/(Df)_{max}$ と加工精度の関係を表している。焦点加工を行い半割円柱の加工精度を上げるためには、半割円柱を加工する円柱の半径 R を大きくすることの他に、 $r/(Df)_{max}$ が 2 以上になるデフォーカス線図を加工条件として用いればよい。

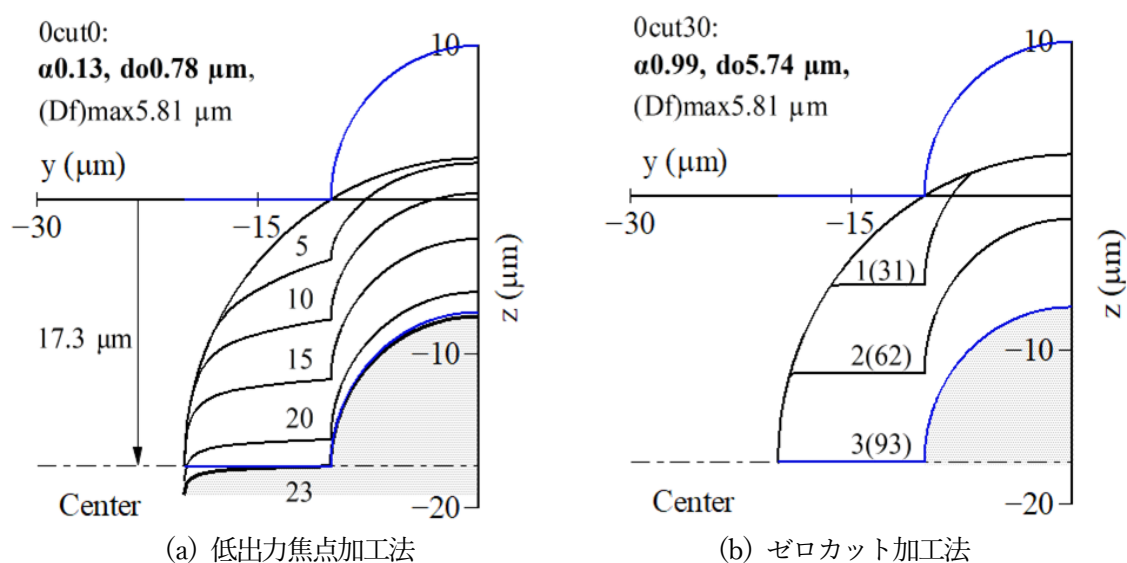


図 8 低出力焦点加工法とゼロカット加工法の原理

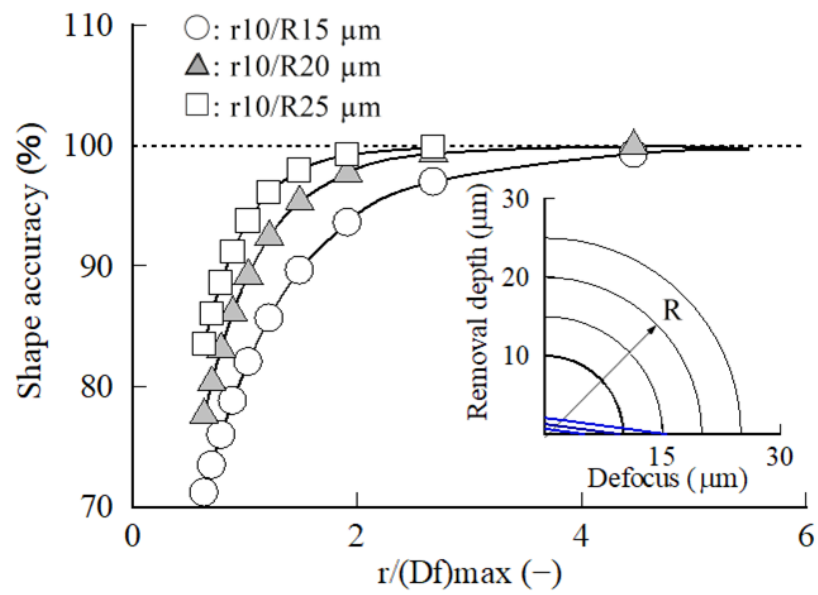


図9 低出力焦点加工の高精度化

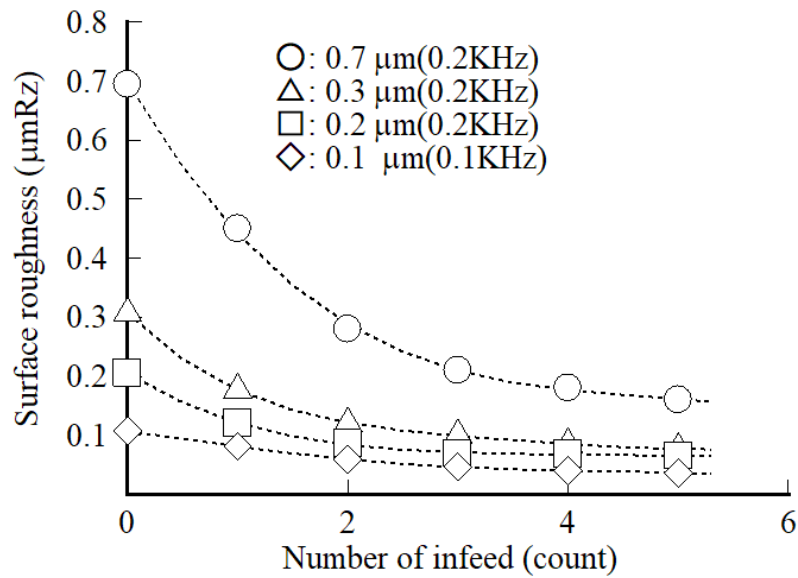


図10 切り込み回数と表面粗さの関係

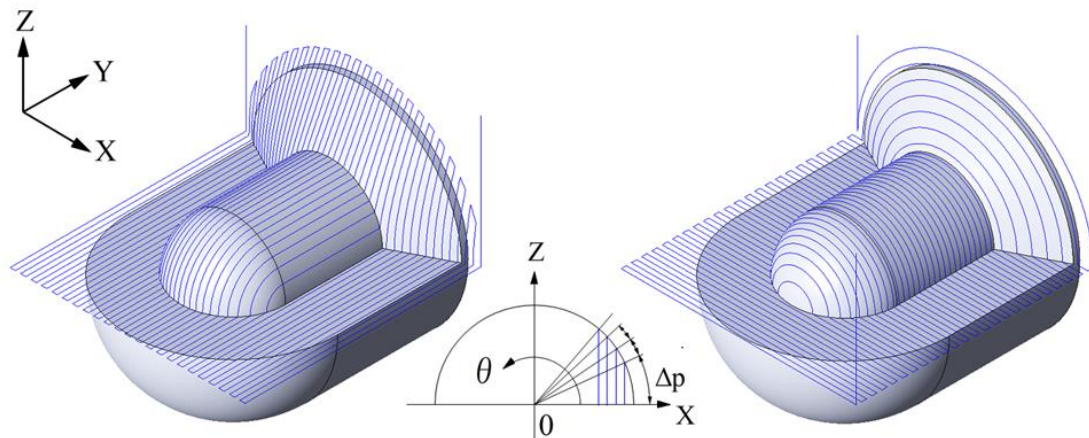


図 11 CAD/CAM を使って定義した半割円柱の形状とレーザ走査軌跡

4.4 焦点加工を用いた加工面の平滑化

ゼロカット加工を行い加工パスの繰返し回数を減らすためには、焦点除去率 α が0.8以上のデフォーカス線図を加工条件に選べばよいが、加工面の粗さは焦点除去率 α が増すにしたがって増加する。 α が小さい低出力焦点加工を行った場合にも、切込み回数が増すに従って表面粗さは劣化する。そこで、z軸方向に d_o 切込んだ後にレーザを走査させるといった焦点加工を繰返して行い、加工面を平滑化することを試みた。図10に示しているのは、表面粗さ R_z が $0.1 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の前加工面に対し焦点での除去量 d_o の比 d_o/R_z が2になるような加工条件を使用し、焦点加工を5回行った場合に得られた切込み回数と加工面の粗さとの関係である。例えば前加工面の表面粗さが $0.3 \mu\text{m}R_z$ の場合、焦点加工を5回行えば表面粗さを $0.1 \mu\text{m}R_z$ 前後に平滑化できる。

4.5 CAD/CAM を使って定義した半割円柱の形状とレーザの走査軌跡

図11に示しているのは、CAD/CAMを使って定義した半割円柱の形状とレーザ走査軌跡である。半球や円柱を一方向のレーザ走査軌跡で加工する場合、走査軌跡の横送り量を一定にしたとしても、頂点から側面に近づくにつれて半球や円柱の輪郭に沿った走査間隔は増加する。そのため、側面部分に想定より大きな削り残しが生じた。そこで、図11に示したように、Y軸方向のレーザ走査軌跡とX軸方向のレーザ走査軌跡を交互に使用することにした。

4.6 サンプル加工の例

ゼロカット加工法、低出力焦点加工法を用いてそれぞれ半径が $50 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ の半割円柱の加工を行った。図8で示したように、ゼロカット加工法と低出力焦点加工法で目標の形状を加工するための加工シミュレーションを行った。表1、表2に示しているのは、目標の形状を加工する場合のゼロカット加工法、低出力焦点加工法の加工条件である。図12、図13に示しているのは、ゼロカット加工法、

低出力焦点加工法を用いて加工した半割円柱の SEM 画像である。

ゼロカット加工法を用いた場合、レーザの走査軌跡通りの形状に加工できるため、形状を把握しやすい。また、除去量が大きく、焦点除去率 α が1に近ければ、形状加工に必要な加工工数を少なくできるメリットがあるが、面粗度が悪く、ゼロカット回数が多いため、極短パルスレーザ特有の微細周期構造ができやすいと言ったデメリットがある。ゼロカット加工法は、1回の除去量が大きいので、10 μm 以上の形状加工に適している。

低出力焦点加工法を用いた場合、きれいな面粗度を維持できるが、1回の除去量が少なく、目標の形状より大きく加工する必要があるため総加工数が多くなり、加工時間が長くなるといったデメリットがある。低出力焦点加工法は、除去量は少ないが、面粗度を維持できるため 10 μm 以下の微小形状の加工に適している。

また、どちらの加工法を用いたとしても平滑化加工を行うことで、100 nmRz 程度の加工面を成形することができた。

表1 ゼロカット加工法を用いた半割円柱の加工条件

	Pulse energy	Frequency	Cross feed	Zero cut	Number of cut
Laser forming	0.5 μJ	3 kHz	0.2 μm	1	8
Removing debris	3 μJ	0.1 kHz	0.4 μm	1	
Smoothing	1.75 μJ	0.2 kHz	0.3 μm	1	8

表2 低出力焦点加工法を用いた半割円柱の加工条件

	Pulse energy	Frequency	Cross feed	Zero cut	Number of cut
Laser forming	2 μJ	0.3 kHz	0.2 μm	0	14
Removing debris	4 μJ	0.1 kHz	0.4 μm	1	
Smoothing	1 μJ	0.2 kHz	0.3 μm	5	8

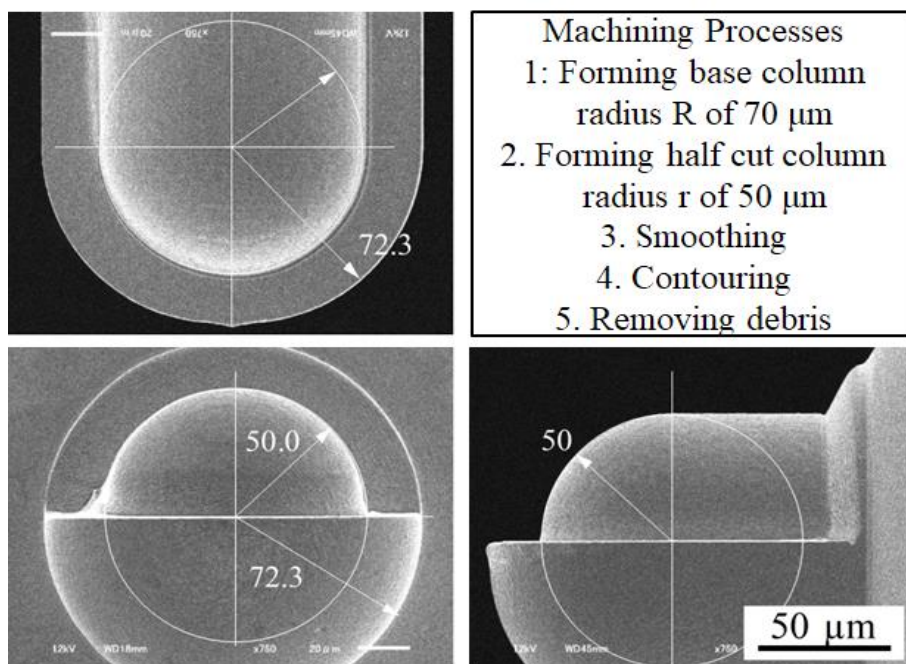


図 12 ゼロカット加工法を用いて成形した半割円柱

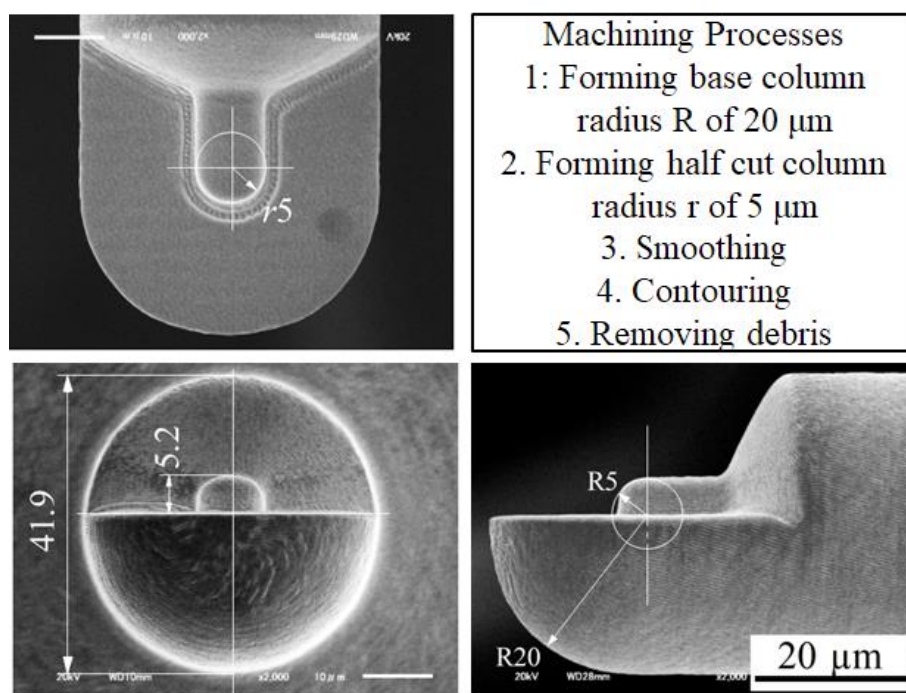


図 13 低出力焦点加工法を用いて成形した半割円柱

5. フェムト秒パルスレーザを用いたダイヤモンド系材料に対する形状加工技術

5.1 ダイヤモンド系材料の加工条件

これまでにナノ秒パルスレーザを用いてダイヤモンド系材料をノーズRが0.4mmのノーズRバイトの形状に成形する研究を行ってきたが、ノーズRバイトの形状に成形できたのはNPDだけであった⁶⁾。ナノ秒パルスレーザに比べて、極短光パルスを用いたレーザ加工は、非侵襲および非熱アブレーション特性を持つために材料の光吸収率の違いや熱の影響をほとんど受けずに対象を加工することができる。そのため、極短光パルスのフェムト秒パルスレーザを用いれば超硬合金やPCD、CVDダイヤモンドに対して3次元形状のレーザ加工が可能であると考えられた。

そこで、NPD、PCDならびにCVDダイヤモンドに対してフェムト秒パルスレーザを用いたテスト加工を行った。図14に示しているのは、NPD、PCD、CVDダイヤモンドの3種類に対してポケット加工を行って得られた周波数と除去量の関係である。ノーズRが0.4mmのノーズRバイトに成形するため、送り速度を50mm/minに固定した。3種類とも除去量にほとんど差が無いことが明らかになった。この結果は、少なくとも粗さがあまり影響しない形状加工であればNPD、PCD、CVDダイヤモンドで同じ加工条件を用いることができることを意味している。

図15、図16、図17に示しているのは、それぞれ様々な条件で行ったNPD、CVDダイヤモンド、PCDに対するレーザ加工後の除去量と表面粗さの関係である。NPDとCVDダイヤモンドに関しては、ほぼ同じ傾向が確認された。この2種の材料に関しては、表面粗さを0.2 μmRz 以下に成形できると考えられた。しかし、PCDはNPDやCVDダイヤモンドと比べると2～3倍の表面粗さになった。図18に示しているのは、NPD、CVDダイヤモンド、PCDに対してレーザ加工を行った後の特徴的な加工面のようすである。NPDは超硬合金の加工で使用した低出力、低周波数領域で図18(a)に示すようなうろこ模様が形成された。これは、ナノ秒パルスレーザを使用したレーザ加工では確認できない(参考文献)現象で、理由はわかっていない。CVDダイヤモンドは、図18(b)に示したように結晶粒界に段差が生じた。これは使用した多結晶CVDダイヤモンドの粒界部の強度の問題ではないかと考えられる。近年製造されるようになった単結晶CVDダイヤモンドを用いればこの現象は回避で

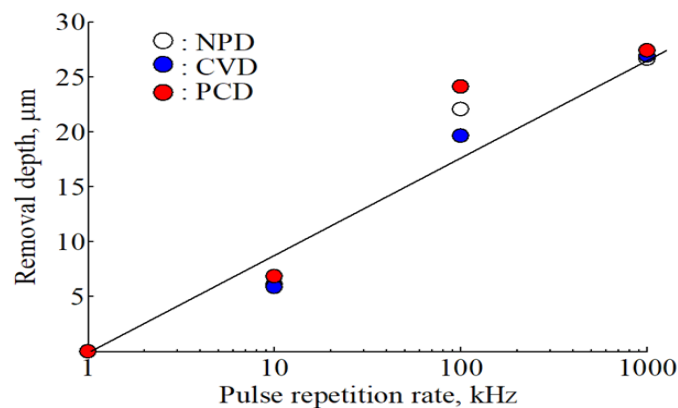


図14 フェムト秒パルスレーザを用いたレーザ加工で得られた周波数とダイヤモンド系材料の除去量の関係

きる。PCD は、図 18(c)に示して用に焼結助剤として使用されている Co の除去量がダイヤモンドよりも多いため、Co 部分が凹んで段差が生じた。ダイヤモンドの表面は $0.2\text{ }\mu\text{mRz}$ 以下であったため、PCD の表面粗さが大きくなる主要因は、ダイヤモンドと Co の除去量の差にあると考えられる。

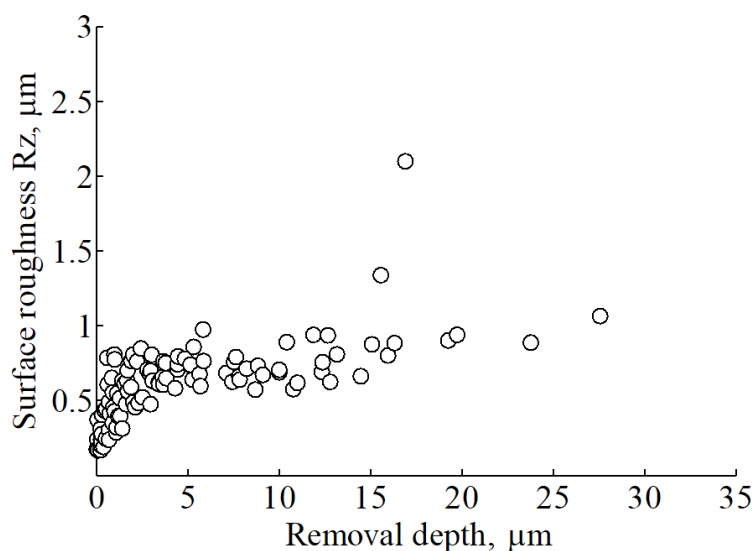


図 15 NPD に対するレーザー加工から得られた
除去量と表面粗さの関係

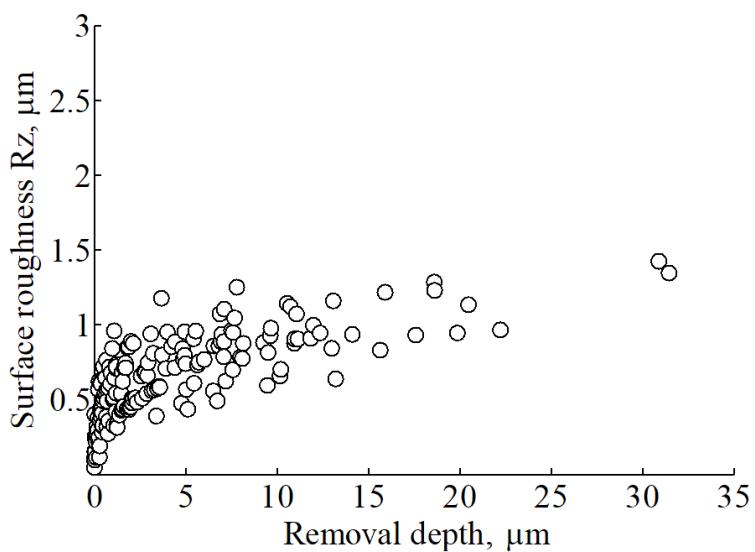


図 16 CVD ダイヤモンドに対するレーザー加工から得られた
除去量と表面粗さの関係

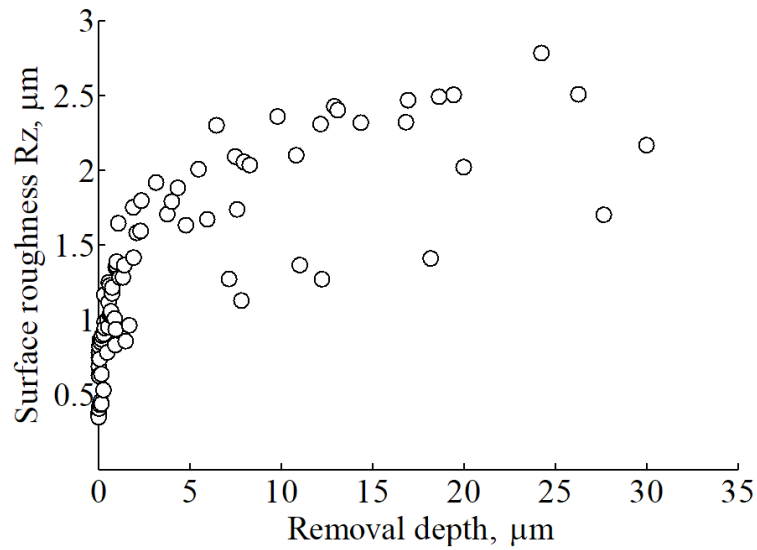
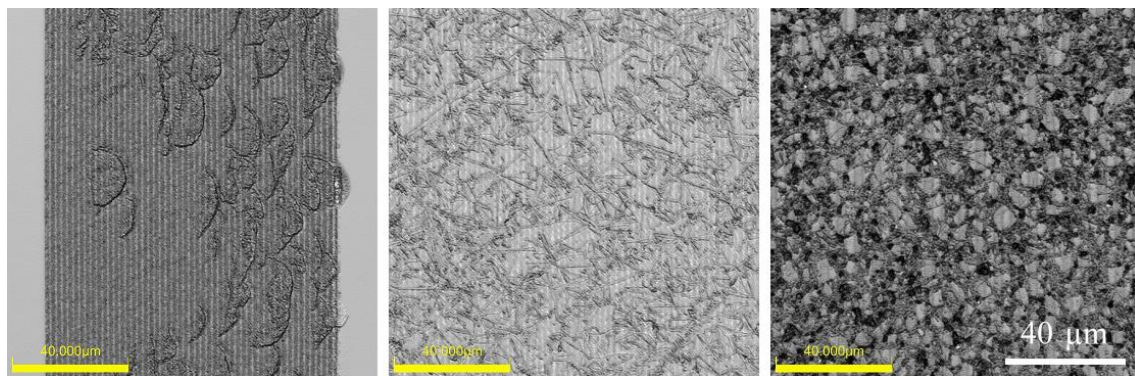


図 17 PCD に対するレーザ加工から得られた
除去量と表面粗さの関係



(a) NPD

(b) CVD ダイヤモンド

(c) PCD

図 18 ダイヤモンド系材料に対するレーザ加工後の加工面のようす

5.2 NPD 製ノーズ R バイトのレーザ成形

表 3 に示しているのは、図 15 の実験より求めた NPD 製ノーズ R バイトの加工条件である。図 19(a) に示しているのは、粗加工を 5 回、図 19(b) に示しているのは、図 19(a) に対して中仕上げ加工を 5 回、図 19(c) に示しているのは、図 19(b) に対して仕上げ加工を行って平滑化した加工面である。粗加工、中仕上げ加工、仕上げ加工を 5 回行った場合の除去量はそれぞれ、 $46.159\ \mu\text{m}$ 、 $12.099\ \mu\text{m}$ 、 $0.189\ \mu\text{m}$ であった。想定通り表面粗さを $0.2\ \mu\text{mRz}$ 以下に成形できることが確認できた。そこで、表 1 の条件を使用して NPD 製ノーズ R バイトの成形を行った。

図 20 に示しているのは、フェムト秒パルスレーザを用いて成形した NPD 製ノーズ R バイトの刃先のようすである。図 20(a)の市販の NPD 製ノーズ R バイトのすくい面は研磨されているが、逃げ面は荒れていた。すくい面が研磨されているため、フェムト秒パルスレーザを用いて逃げ面だけをレーザ成形することにした。図 20(a)の逃げ面を成形した後、すくい面の刃先の内側に凹みが確認された。そこで、すくい面を成形することで、逃げ面を加工

表 3 NPD 製ノーズ R バイトの加工条件

	Pulse energy	Frequency	Cross feed	Defocus	Zero cut
Laser forming	0.4 μ J	20 kHz	1 μ m	0 μ m	5
Smoothing	0.3 μ J	20 kHz	1 μ m	7.5 μ m	5
	0.5 μ J	1 kHz	1 μ m	0 μ m	5

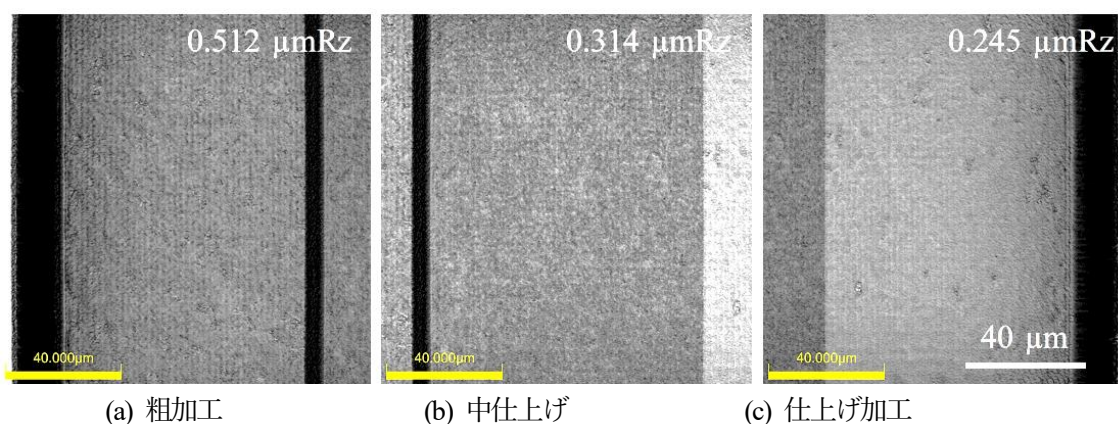


図 19 平面に対するレーザ加工後に観察した加工面のようす

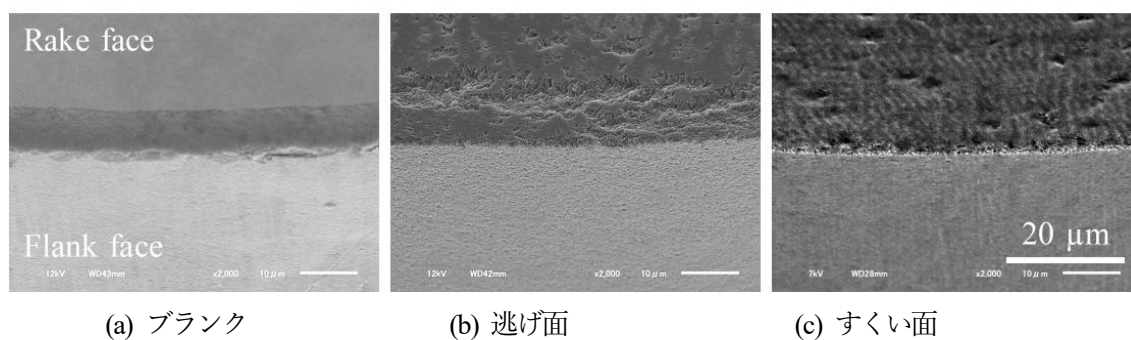


図 20 NPD 製ノーズ R バイトの成形後に観察した刃先のようす

した際に生じた凹みを除去することを試みた。図 20(c)に示すようにすくい面に生じた凹みを除去することはできたが、すくい面が荒れてしまい、逃げ面のように平滑にすることはできなかった。逃げ面成形の場合、すくい面を真下にして刃裏が真上に来るように設置し、レーザ光を刃裏から刃先に向けて、 80° の傾斜に沿うように機械走査する。

これまでの研究からも傾斜面に対してレーザ加工を行った場合、加工面の粗さが低下する傾向が確認されている。そこで、すくい面の傾斜角と表面粗さの関係を求めるために、すくい面を $0\sim 75^{\circ}$ まで傾斜させてすくい面の成形を行った。図 21 に示しているのは、すくい面の傾斜角とすくい面の表面粗さの関係である。また、図 22 に示しているのは、NPD 製ノーズ R バイトを傾斜させてすくい面の成形を行った後に観察した刃先の様子である。想定していたとおり、傾斜角を大きくするに従って表面粗さは減少した。しかし、傾斜角が 60 度を越えると図 21(d)、図 21(e)に示すように逃げ面側に凹みが生じた。傾斜角が大きいとレーザ光が透過して対面に集光されたために対面側に凹みが生じたものと考えられる。

NPD 製ノーズ R バイトの逃げ面を成形する際に傾斜角を一定にすることが困難であるため、逃げ面成形後に傾斜角を 45° に調整してすくい面を成形することで、逃げ面成形時に生じる凹み除去することにした。図 23(a)に示しているのは、市販の NPD 製ノーズ R バイトの外観、図 23(b)に示しているのは、図 23(a)に対してレーザ成形を行った後に観察して NPD 製ノーズ R バイトの外観である。ナノ秒レーザを用いて成形した場合に生じていた刃先のダレはほとんど見られず刃先の丸み半径が $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の鋭利な切れ刃を成形することができた。表面粗さは、すくい面、逃げ面ともに $0.2\text{ }\mu\text{mRz}$ 程度であった。

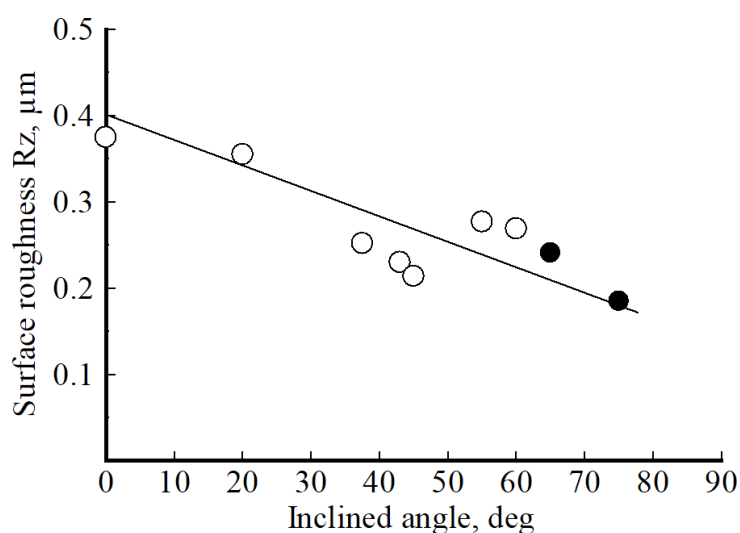


図 21 NPD 製ノーズ R バイトのすくい面の傾斜角と表面粗さの関係

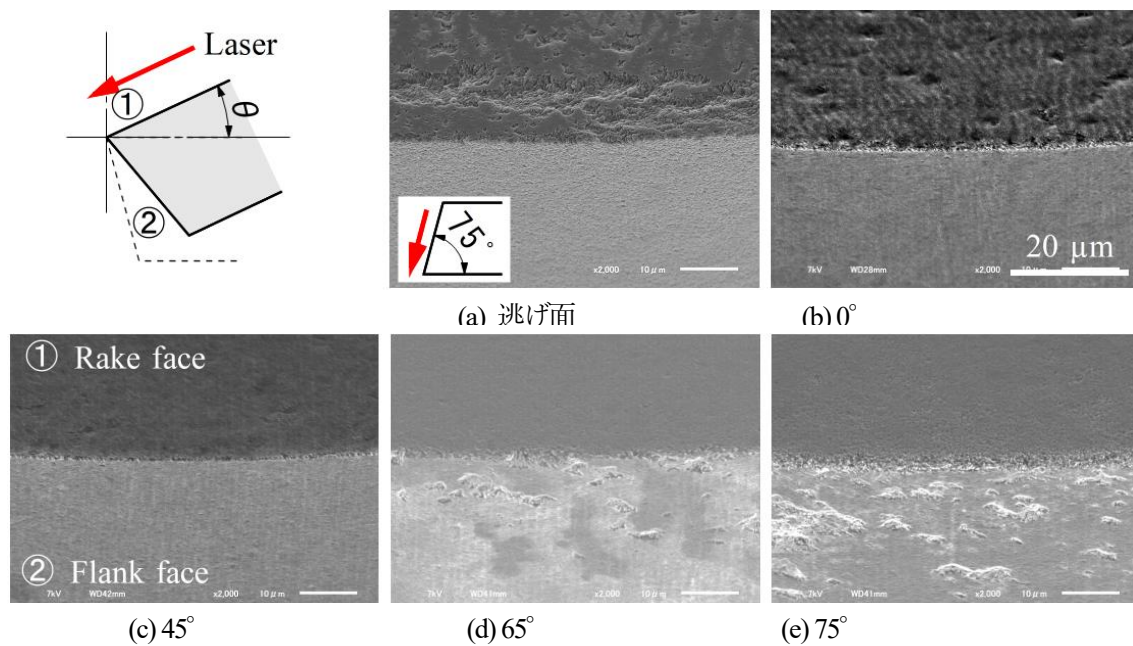


図 22 NPD 製ノーズ R バイトを傾斜させてすくい面を成形した後に観察した刃先のようす

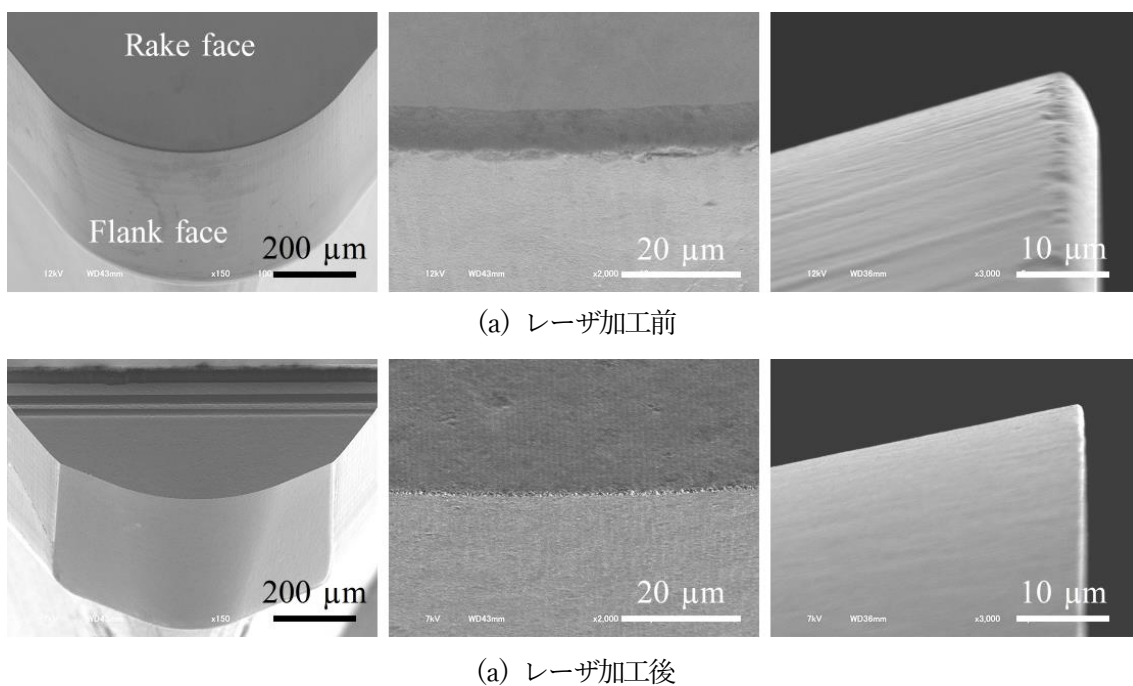


図 23 レーザ加工後に観察した NPD 製ノーズ R バイトの外観

表4 CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトの加工条件

	Pulse energy	Frequency	Cross feed	Defocus	Zero cut
Laser forming	1 μ J	1000 kHz	1 μ m	0 μ m	5
Smoothing	0.4 μ J	20 kHz	1 μ m	5 μ m	5
	0.4 μ J	20 kHz	1 μ m	5 μ m	5

5.3 CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトのレーザ成形

表4 に示しているのは、図16の実験より求めた CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトの加工条件である。NPD のレーザ加工よりも同じ箇所へのレーザ光の照射回数が多いほど表面粗さが低下する傾向にあったため、粗加工時の面粗さを抑える目的で周波数を 1000kHz に設定した。市販の NPD 製ノーズ R バイトと同様にすくい面側は機械研磨されているため、CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトのレーザ成形は逃げ面に対してのみ行った。図24 に示しているのは、逃げ面成形後に観察した CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトの外観である。使用した多結晶 CVD ダイヤモンドは、NPD のような半透明ではなかったため、すくい面に凹みが生じることはなかった。結晶粒界に段差が生じているため表面粗さは 0.458 μ mRz と NPD に比べて大きくなった。ただし、段差を避けて結晶表面の粗さを測定した結果、表面粗さは 0.2 μ mRz 程度と NPD の表面粗さと変わらなかった。

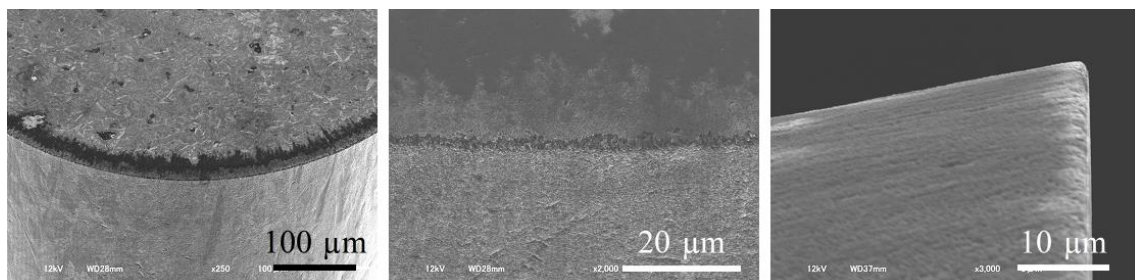


図24 レーザ加工後に観察した CVD ダイヤモンド製ノーズ R バイトの外観

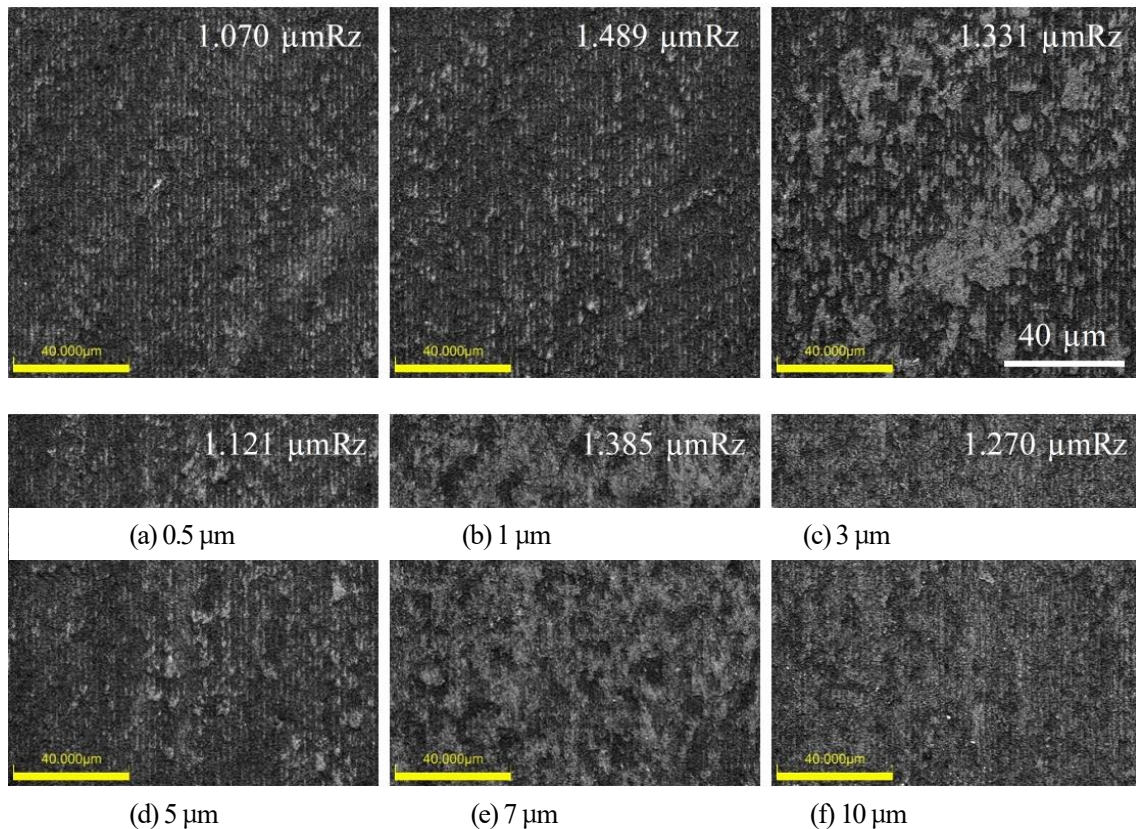


図 25 ダイヤモンドの粒径が異なる 6 種類の PCD に対するレーザー加工後の加工面

5.4 PCD に対するレーザー加工

図 17 の実験の結果を元に加工条件を選定し、図 19 と同様の平面に対するレーザー加工を行い粗加工、中仕上げ加工、仕上げ加工後の表面粗さの確認を行った。しかし PCD の場合、加工を重ねる毎に表面粗さが増加して、1.3 μmRz 程度に集束する傾向が確認された。これは、図 18(c)で示したように、ダイヤモンドと Co の除去量の差が影響しているものと考えられる。表面粗さが 1.3 μmRz に集束したのは、ダイヤモンドと Co との除去量の差が約 1.3 μm あるためではないかと思われる。図 25 に示しているのは、ダイヤモンドの粒径が異なる 6 種類の PCD に対して、周波数を 1000 kHz、パルスエネルギーを 0.2 μJ、横送りを 1 μm に設定しレーザー加工を行った後に観察した加工面のようである。ダイヤモンドの粒径にかかわらず表面粗さは 1.3 μmRz 程度になっている。ダイヤモンドの粒径が 10 μm の PCD のコントラストの薄いダイヤモンド表面の粗さを測定した結果、表面粗さは、0.3 μmRz 程度と NPD の表面粗さとほとんど変わらなかった。ダイヤモンドと Co の除去量の差の問題を解決しなければ目標の表面粗さ 0.5 μmRz を達成することは困難であることが明らかになった。

6. まとめ

フェムト秒パルスレーザを用いた超硬合金に対する微細形状加工法の開発ならびに、ナノ秒レーザでは3次元形状加工が困難であったダイヤモンド系材料に対して3次元形状を加工できるレーザ加工技術の開発を試みた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. フェムト秒パルスレーザを用いて超硬合金に微細形状を加工できるゼロカット加工法ならびに低出力焦点加工法を開発することができた。
2. フェムト秒パルスレーザを用いて表面粗さが0.2 μmRz 程度のNPD製ノーズRバイトを成形できるレーザ加工技術を開発することができた。
3. フェムト秒パルスレーザを用いて表面粗さが0.45 μmRz 程度の多結晶CVDダイヤモンド製ノーズRバイトを成形できるレーザ加工技術を開発することができた。
4. 工作物を45°に傾斜させてレーザ加工を行うことで、良好な加工面粗さが得られることが明らかになった。
5. 多結晶CVDダイヤモンドでは結晶粒界、PCDでは焼結助剤であるCoの含有されている箇所が優先的に除去されるため、加工面の粗さが大きくなることが明らかになった。ただし、ダイヤモンドの表面の粗さは0.2~0.3 μmRz 程度と良好であり、これらの問題が無ければ、ダイヤモンド系材料の加工特性はそれほど変わらないと考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されたことを記し、謝意を表す。

参考文献

1. 藤田雅之, 橋田昌樹, フェムト秒レーザー加工, プラズマ・核融合学会, Vol.81(2005), pp.195-201.
2. 塚本雅裕, 橋田昌樹, 金属最良へのフェムト秒レーザー加工, 溶接学会誌, Vol. 72(2003), No.8, pp.622-625.
3. 中奥洋, 超短パルスレーザ加工機による精密加工, Panasonic Technical Journal, Vol.62, No.2(2016), pp.14-19.
4. ファタ・ベナビット, フレデリック・ジェローム, ベノイト・デボード, メシヤール・アルハラビ, 超短パルスレーザを極めるカゴメPCファイバ, <http://jadocz.com/doc/580386/.feature>
5. F. Emaury et al., Beam delivery and pulse compression to sub-50 fs of a mode locked thin-disk laser in a gas-filled Kagome-type HC-PCF fiber, Optics Express, Vol.21, Issue 4(2013), pp.4986-4994.
6. 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].