

# 福岡工業大学 機関リポジトリ

## FITREPO

Title	フェムト秒パルスレーザーを用いた多結晶ダイヤモンドに対する平坦化加工技術の開発
Author(s)	天本 祥文
Citation	福岡工業大学総合研究機構研究所所報 第2巻 P49-P53
Issue Date	2020-2
URI	<a href="http://hdl.handle.net/11478/1530">http://hdl.handle.net/11478/1530</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

Fukuoka Institute of Technology

# フェムト秒パルスレーザを用いた多結晶ダイヤモンドに対する 平坦化加工技術の開発

天本 祥文 (工学部知能機械工学科)

## Development of Flatting Technique for Polycrystalline Diamond Using Femtosecond Pulsed Fiber Laser

Yoshifumi AMAMOTO (Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

### Abstract

The polycrystalline diamond (PCD), sintered by ultrahigh pressure, possesses the best wear resistance among conventional tool materials adapted to micro grinding. In order to use the PCD as a grinding tool, you need to flatting and smoothing the tool surface. Therefore, an attempt was made to develop a laser smoothing techniques for PCD grinding tool using femtosecond pulsed laser that can high speed. It was confirmed that cobalt and diamond contained in PCD could be processed without distinction by using femtosecond pulse laser. Moreover, the possibility of improving the surface condition was found by using a femtosecond pulse laser.

**Keywords** : Polycrystalline Diamond, Femtosecond Pulsed Laser, Laser machining

### 1. 緒言

超精密切削に使われている市販の単結晶ダイヤモンド SCD (Single Crystal Diamond)製切削工具の刃先の丸み半径は現時点で 1 nm 以上であり、アルミや銅の原子半径に比べると 10 倍以上大きくなっている。したがって、超精密切削と言いながらも加工に費やされる 95%以上のエネルギーは、原子配列を乱し切りくずを作ることに費やされている。単結晶ダイヤモンドバイトの刃先の丸み半径を原子半径と同じ値に成形できれば、中山一雄先生が提案された理想的加工法を具現化できる可能性がある<sup>(1)</sup>。つまり、被削材の原子配列を切断できる可能性がある。そこで、SCD よりも耐欠損性・耐摩耗性に優れたナノ多結晶ダイヤモンド (Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)<sup>(2)</sup>を工具素材として使用し、理想的加工を実現できる切削工具を開発することを試みた。レーザ加工による粗成形を行った NPD 製のノーズ R バイトに対して熱化学反応を利用した仕上げ成形とドライエッチングを行うことで、刃先の丸み半径が 0.1 nm 以下の NPD 製ノーズ R バイトを成形する<sup>(3)</sup>ことには成功しているが、レーザ成形した工具表面の熱変質層を除去するだけでなく平坦かつ平滑に成形するために使用してる焼結ダイヤモンド (Polycrystalline Diamond: PCD) 製ラップ盤の成形に 3~7 日を要している。NPD 製ノーズ R バイトの成形にかかる時間の約 60%が PCD ラップ盤の成形にかかっていることになる。

そこで本研究では、熱影響の少ないフェムト秒パルスレーザを用いて、PCD 製ラップ盤の表面粗さを 200 nmRz 以下に短時間で成形できるレーザ加工技術の開発を試みた。

### 2. 研究の背景

PCD は、ダイヤモンドの一次粒子と焼結助剤であるコバルト Co 系金属を 1360°C、5.5GPa といった超高压下で焼結することにより作られた、多結晶ダイヤモンドである。焼結助剤として使用された Co がダイヤモンドを溶かし共有結合させるだけでなく、導電性を付与するため、PCD の成形には放電加工を用いることができる。

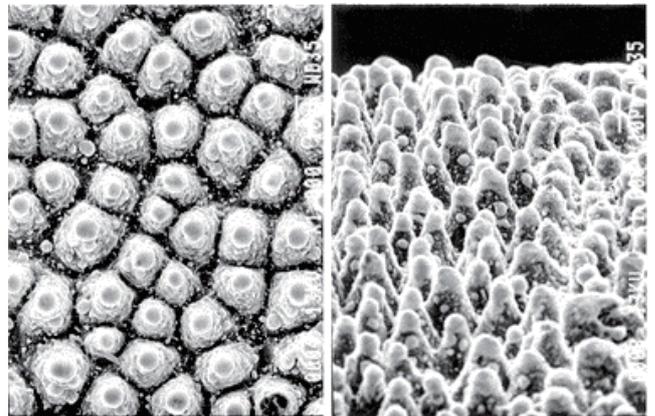


図 1 ナノ秒パルスレーザを用いた PCD のレーザ加工面  
Fig. 1 Laser machining surface of PCD using nanosecond pulsed laser.

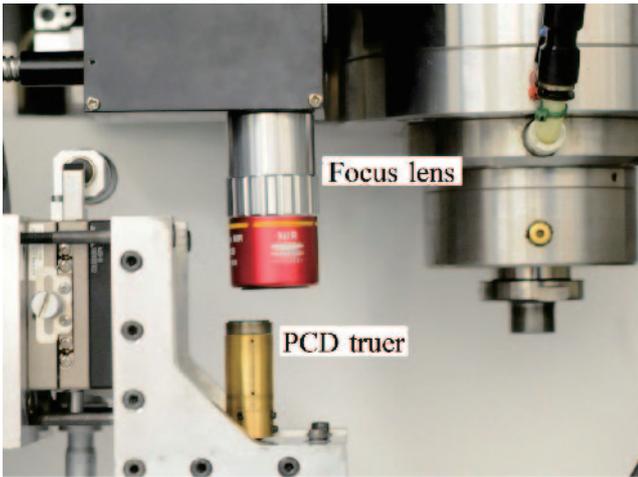


図2 レーザ加工装置の外観  
Fig. 2 Appearance of laser machining rig.

ダイヤモンドの加工にレーザが有効であることが知られている。一般的な加工用のナノ秒レーザはレーザのエネルギーが熱となり、材料を熔融・気化させ、さらに材料が集光点近傍でプラズマ化し、熔融した材料を排出する<sup>(4,5)</sup>。しかし、熔融した材料の一部は排出されず、熔融物や熱変質層として加工面にとどまるといった問題がある。図1に示しているのは、ナノ秒レーザを用いてPCDに対してレーザ加工を行った加工面のようすである。ナノ秒レーザを用いた場合、PCDのダイヤモンド部分とCo部分の光の吸収率の違いにより、Coだけが除去されないといった問題があった。

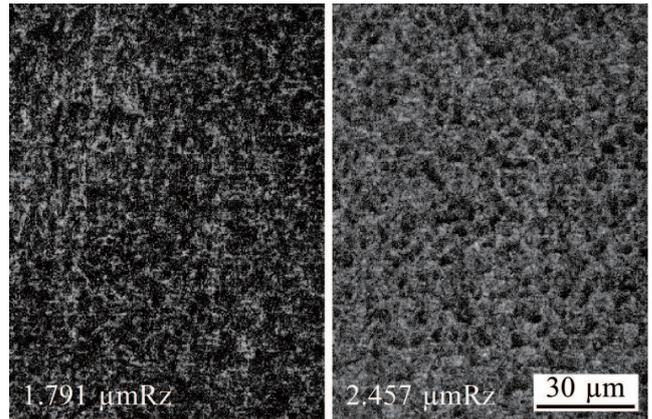
一方、近年研究が盛んに行われているフェムト秒やピコ秒の超短パルスレーザは、1回の照射時間が極端に短いため、材料が熔融する前に冷却される。つまり、長短パルスレーザを用いたレーザ加工は熱加工ではなく、固体構成物質が原子、分子、プラズマ状態となって爆発的に放出されるレーザアブレーションを利用した加工法<sup>(6)</sup>であるため、フェムト秒レーザを用いることでPCDを短時間で平滑に加工できる可能性があると考えられた。

そこで本研究では、フェムト秒パルスレーザを用いて直径が15mmのPCD製ラップ盤の表面粗さを200nmRz以下に5時間以下で成形できる平坦化加工技術を開発するための基礎実験を行った。

### 3. 実験装置

〈3・1〉 フェムト秒パルスレーザ レーザには、波長が1028±5nm、周波数が60kHz～1MHz、パルス幅が290fs～10ps、ならびに最大平均出力が4Wのフェムト秒パルスレーザを使用した。レーザ本体から光学系までのレーザ光の伝送には、ホローコアフォトニック結晶ファイバ<sup>(6)</sup>を利用した。

〈3・2〉 レーザ加工装置 図2に示しているのは、PCDの加工に使用したレーザ加工装置の外観である。立形マシニングセンタのコラムにレーザを集光させると同時に



(a) 300 fs (b) 10ps  
図3 パルス幅を変えた場合の加工面のようす  
Fig. 3 Laser machining surface of the case of changing the pulse width.

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させることにした。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ニングセンタのテーブルに設置した。超硬合金は真ちゅう製の芯ぶれ防止ジグを介してステッピングモータ、ステッピングモータはX-Yステージを介して回転テーブルに取付けた。

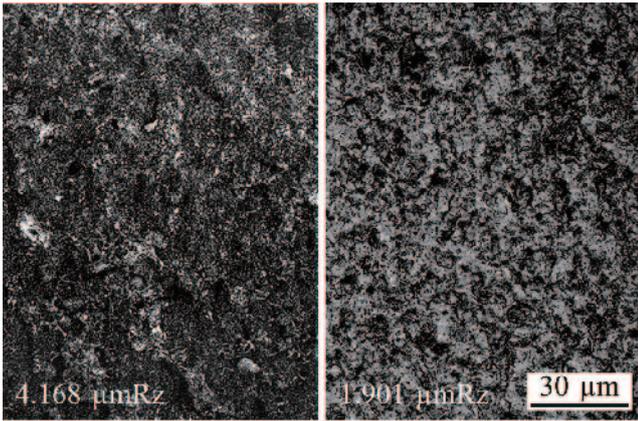
〈3・3〉 多結晶ダイヤモンド ラップ盤の素材には、直径が15mm、厚みが0.5mm、一次粒子径が1μmのPCDを使用した。PCDはダイヤモンド粒子を1500℃、5GPaの高温・高圧で焼結するため、粒子同士が強固に結合し、単結晶ダイヤモンドと同程度の硬さを持っている。また、PCDは焼結助剤として使用されたCoがダイヤモンド粒子の隙間を埋めるように入り込んでいるため、非常に高い靱性を有すると同時に放電加工を行うことができる。

### 4. PCDに対するレーザ加工実験

〈4・1〉 パルス幅 レーザ加工は、熱加工とレーザアブレーション加工の境目はパルス幅が10ps前後であるとされている。加工面の平滑化に有効なパルス幅を確認するために、レーザのパルスエネルギーを2μJ、繰り返し周波数を1MHz、送り速度を100mm/min、ならびに横送り量を1μmに設定し、□0.2mmの範囲に対してレーザ加工を行った。

図3に示しているのは、レーザ加工後にレーザ顕微鏡(Laser scanning microscope: LSM)を用いて観察したパルス幅が10ps、300fs場合の加工面のようすである。超短パルスレーザを用いることで、Coとダイヤモンドを区別なく加工できることが確認できた。また、300fsの方が表面粗さは低いことから、以後の実験ではパルス幅を300fsに固定した。

〈4・2〉 繰り返し周波数 レーザの繰り返し周波数を大きくした場合、同じ箇所被打たれるレーザの回数が増加する。削り残しを除去するためには周波数を高くする方が良いが、熱のこもりやすい状況を作ることになる。周波数を決定するための実験を行った。図4に示しているのは、周



(a) 100 kHz (b) 1 MHz

図4 周波数を変えた場合の加工面のようす

Fig. 4 Lase machining surface of the case of changing the repetition rate.

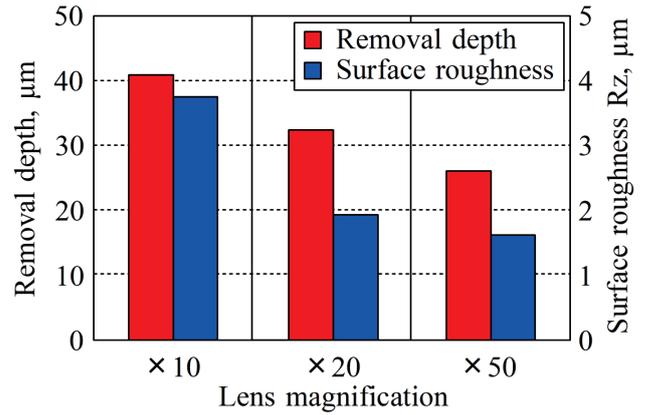
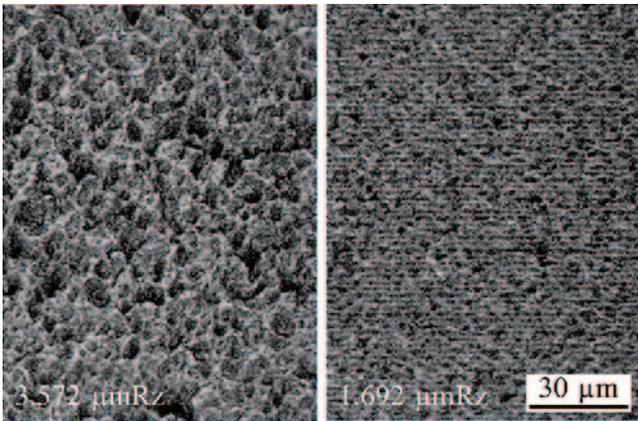


図6 集光倍率と除去深さならびに表面粗さの関係

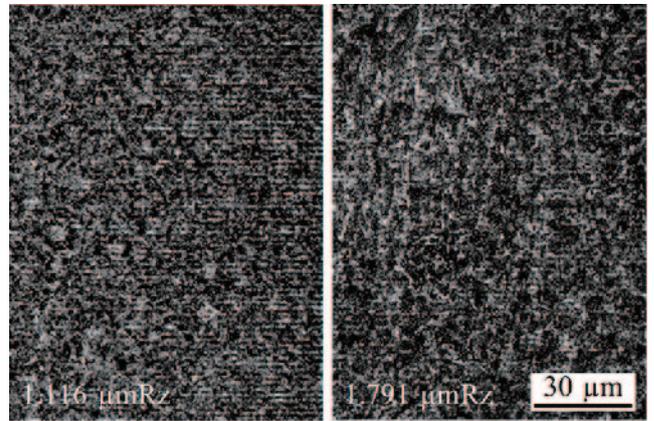
Fig. 6 Relationship between lens magnification, removal depth and surface roughness.



(a) 100 kHz (b) 1 MHz

図5 集光レンズを変えた場合の加工面のようす

Fig. 5 Lase machining surface of the case of changing the lens magnification.



(a) 0.2  $\mu\text{J}$

(b) 2  $\mu\text{J}$

図7 パルスエネルギーを変えた場合の加工面のようす

Fig. 7 Lase machining surface of the case of changing the pulse energy.

波数を変えた場合の加工面のようすである。周波数が100kHzの場合、表面の付着物が残っているように見えるが、1MHzの場合、表面が比較的きれいで有り、表面粗さも低くなった。そこで以後の実験では、繰り返し周波数を1MHzに固定した。

〈4・3〉 集光レンズ 集光レンズの倍率高くなれば、レーザーのスポットサイズは小さくなるため、高倍率の集光レンズを使用した方がエネルギー密度は高くなる。そこで、レンズ倍率を決定するための実験を行った。図5に示しているのは、集光レンズの倍率を10倍、ならびに50倍にした場合の加工面のようす、図6に示しているのは、集光レンズの倍率を10倍、20倍、ならびに50倍にした場合の除去深さと表面粗さの関係である。集光レンズの倍率が大きくなるに従って、除去深さ、表面粗さもともに小さくなることが明らかになった。表面の平滑化を目的としているため、以後の実験では50倍の集光レンズを使用した。

〈4・4〉 パルスエネルギー パルスエネルギーを小さくし、除去量を減少させることを試みた。図7に示しているのは、

パルスエネルギーを0.2  $\mu\text{J}$ 、ならびに2  $\mu\text{J}$ に設定した場合の加工面のようす、図8に示しているのは、パルスエネルギーと除去量ならびに表面粗さの関係である。パルスエネルギーを0.2  $\mu\text{J}$ に設定した場合、レーザーの走査痕が確認できる。また、表面粗さも1  $\mu\text{m}$ 程度と良くなっている。これは、切削・研削・放電と言った除去加工と同様に、表面粗さを小さくすることは、一回の除去量を小さくすることが有効であることを意味している。

〈4・5〉 デフォーカス量 レーザ加工で除去量を小さくする方法として、焦点位置を工作物表面から上方にデフォーカスさせ、レーザーの焦域を大きくしエネルギー密度を下げることが有効である。図9に示しているのは、パルスエネルギーを2  $\mu\text{J}$ に設定し、焦点位置、ならびにデフォーカス量30  $\mu\text{m}$ で加工した場合の加工面のようす、図10に示しているのはデフォーカス量を変化させた場合のデフォーカス量と除去量ならびに表面粗さの関係である。デフォーカスさせた場合の表面粗さの低下量は小さいが、焦域が広がったことで走査痕が確認できなくなった。

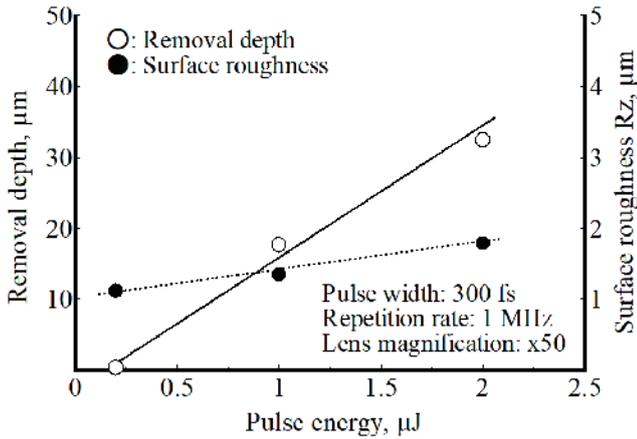


図 8 パルスエネルギーと除去深さならびに表面粗さの関係

Fig. 8 Relationship between pulse energy, removal depth and surface roughness.

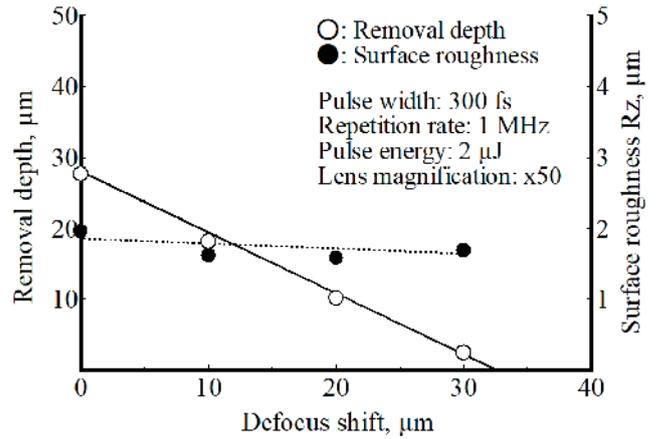
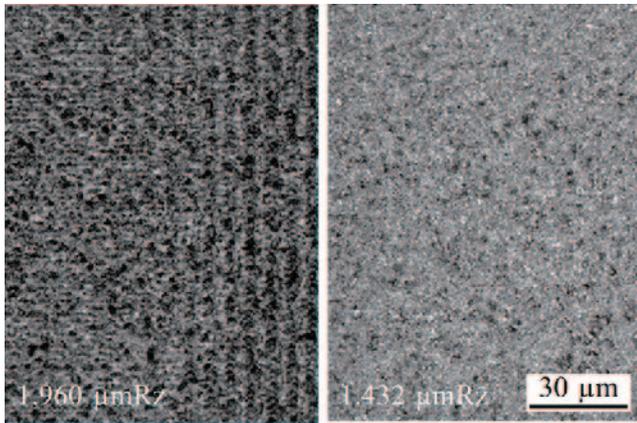


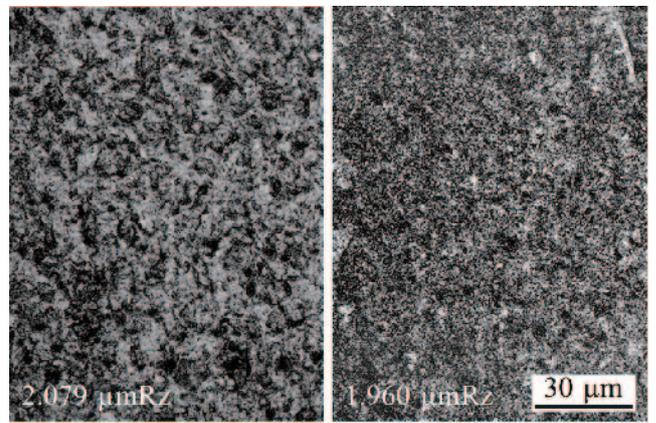
図 10 デフォーカス量と除去深さならびに表面粗さの関係

Fig. 10 Relationship between defocus value, removal depth and surface roughness



(a) 0.2 μJ (b) 2 μJ

図 9 デフォーカス量を変えた場合の加工面のようす  
Fig. 9 Lase machining surface of the case of changing the defocus value.



(a) 0 time (b) 10 times

図 11 ゼロカット回数を変えた場合の加工面のようす  
Fig. 11 Lase machining surface of the case of changing the number of zero cut.

〈4・6〉 ゼロカット加工 レーザ加工では、一般的な除去加工より多くの削り残しが発生する。削り残しを完全に除去すれば表面粗さも低下する可能性があった。そこで、切り込みを入れずに同じ場所で加工を繰り返すゼロカット加工を行った。図 11 に示しているのは、パルスエネルギーを 2 μJ に設定し、ゼロカット回数が 0 回、ならびに 10 回の場合の加工面のようすである。ゼロカット 10 回行ったことで、表面粗さの減少量が少なく、付着物が残っているように見えるが、加工面の状態としては比較的に良好である。

## 5. まとめ

フェムト秒パルスレーザを用いて、PCD 製ラップ盤の表面粗さを 200 nmRz 以下に短時間で成形できるレーザ加工技術の開発をするために、平滑化に有効なパラメータを確認するための基礎実験を行った。得られた結果は以下のようまとめられる。

1. フェムト秒パルスレーザを用いることで、PCD に含ま

れる Co やダイヤモンドを区別なく加工できることが確かめられた。

2. 集光レンズの集光倍率を大きくし、スポットサイズを小さくすることで、表面状態を改善できることが明らかになった。
3. レーザ加工において加工面の状態に影響を及ぼすパラメータは多いが、除去量を小さくし、同じ箇所にも何度でも照射されるようにすることで表面状態を改善できることが確認できた。

## 謝辞

本研究は福岡工業大学総合研究機構の研究支援制度により実施したものである。

(2019年10月26日受付)

文 献

- (1) 中山一雄, 機械工学体系⑧切削加工論, 第 8 章 切削仕上面の品位, コロナ社, pp. 142-146 (1978-11)
- (2) 角谷均, 入舩徹男, 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの合成と特徴, *New Diamond*, Vol.22, No.3, pp.6-11 (2006-3)
- (3) 天本祥文, 母里壮太, 花田智洋, 仙波卓弥, 角谷均, NPD 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, JSPE 九州支部北九州地方講演会, 204, pp. 51-52 (2016-12)
- (4) 徳永剛, レーザ加工の基礎, 精密工学会誌, Vol.75, No.5, pp.595-598 (2009)
- (5) 中奥洋, 超短パルスレーザー加工機による精密加工, *Panasonic Technical Journal*, Vol.62, No.2(2016), pp.14-19 (2016)
- (6) ファタ・ベナビット, フレデリック・ジェローム, ベノイト・デポード, メシャール・アルハラビ, 超短パルスレーザーを極めるカゴメ PC ファイバー, <http://jadocz.com/doc/580386/>.feature
- (7) 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, pp.4986-4994 (2013)