

フェムト秒レーザーを用いた多結晶 CVD ダイヤモンド・コーティング 工具の高機能刃先創製

名古屋工業大学 電気・機械工学科 機械工学分野
助教 劉 暁旭

(2019 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019232-C2)

キーワード：フェムト秒レーザー，CVD ダイヤモンド・コーティング工具ベンディング，刃先創製

1. 研究の目的と背景

CVD ダイヤモンドは、高硬度、ヤング率、良い熱伝導性などの優れた特性を有するため、製造業で注目を浴びている¹⁾。特に、安価、等方性かつ良好な加工性であるため、工具のコーティング材として切削分野への適用が進められている。高性能な CVD ダイヤモンド・コーティング工具（下記 CVDD 工具）を用いて高精度高能率低コストのマイクロ加工，例えば、CVDD 工具による超硬合金型の直彫りなど、実現することが期待できる。しかし、CVDD 工具では、切削加工によって直接刻んだ超硬合金ダイスなどの高精度、低コスト、研削の微細加工を実現できた。しかし、成膜時に生じる刃先丸味が工具切れ味の低下を引き起こすという課題がある。切れ味の低下は、切削抵抗の増加、摩耗の増大、被膜の剥離を生じさせる。また、CVD ダイヤモンドにはアモルファスカーボン分率が高く、大きな粒径は、高い表面粗さをもたらす。これにより、刃先丸味を除去する鋭利な刃先を成形する加工技術が求められている。

CVDD 工具の刃先成形としては、一般的な手法は研削加工である。しかし、ダイヤモンドの極高硬度により、生産性と制御性は難しくなる。それに対して、短パルスレーザー加工は、材料硬さの制約を受けにくく、非接触な加工が可能であり、硬脆材料である CVD ダイヤモンドであっても鋭利な刃先が成形できるという利点がある²⁾。Everson らは、PCD ツールの製造の高い除去率を実現するために ns レーザ処理を使用した。表面の明らかに熱影響ゾーンはさらなる処理を必要とする³⁾。いくつかの他の研究^{4,5)}については、ナノ秒 (ns) レーザを使用して、ダイヤモンドに大量のエネルギーを供給して表面をグラファイト化し、研磨を仕上げ加工プロセスとして行った。しかし、これらの方法は高コスト、低効率、高精度切削に必要な十分シャープな刃先にならない。ここで、本研究室では短パルスレーザーを用いて革新的なレーザー加工手法である PLG (pulsed laser grinding) という研削方法を開発された。工具エッジを斜めに照射することにより、砥石車のように小さな加工角度で繰り返し走査することにより、鋭い刃先を高効率かつ正確に生成することができる。ns レーザによる PLG の現在の問題点は、比較的滑らかな加工面を得ることができたが、ダイヤモンドの品質が影響を受け、縦筋が著しく出ている⁶⁾。この熱影響を抑制するために、冷加

工法としてフェムト秒レーザーが有望である。さらに、低フルエンス fs レーザ照射により多結晶 CVD ダイヤモンドにおける結晶性向上が誘起されるという新しい現象が報告されている⁷⁾。この構造改質の効果は、シリコン、DLC、さらにはグラファイトさえも他の材料についても発見された。具体的なメカニズムは未だ解明されていないが、これは fs レーザによる PLG 加工の新しいアベニューを開いており、CVD ダイヤモンドがかなりの量の欠陥と非晶質炭素を含んでいるので、より高精度で熱衝撃の少ない、あるいはダイヤモンドにポジティブな微細構造変化を得る刃先創製手法が期待できる。

本研究では、fs レーザを用いた CVD ダイヤモンド被覆工具の工具刃先形成と構造改質を同時に行うことを目的とした。まず、赤外線 (IR) 範囲の fs レーザを用いて、CVD ダイヤモンド被覆工具上で PLG 加工を行い、ns レーザ PLG の比較を行った。次に、紫外 (UV) fs レーザ PLG を行い、適切な加工条件を調べた。最後に、工具刃先形成と表面微細構造変化の観点から、3 種類のレーザーを用いた加工工具刃先を比較した。

2. 研究方法

Fig.1 (a) に示すように、超硬合金にコーティングされた約 20 μm 厚の多結晶 CVD ダイヤモンドを用いた市販ダイヤモンド切削インサートを使用した。走査型電子顕微鏡 (SEM) による as-received したダイヤモンド工具の形態から、Fig.1 (b) に示すように、刃先の丸みはかなり大きい。また、球晶のような表面形態は高い表面粗さをもたらす。ダイヤモンドには多くのアモルファス成分な炭素があることを示している。

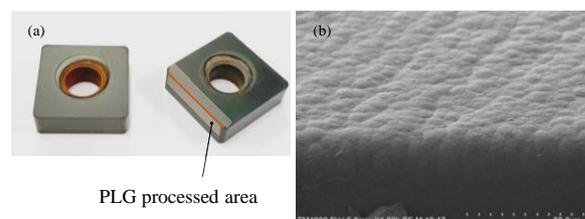


Fig. 1. (a) polycrystalline CVD diamond coated inserts (b) SEM images the tool edge

本研究では、CVDD 工具の刃先部分をパルスレーザー研削で加工した。PLG 加工の概略を Fig.2 に示す。まずは、パルスレーザー光は、円筒状および縦方向のレーザー加工領域（赤色で描かれた）を形成するために、長焦点レンズで集光される。そして、研削加工において砥石走査のように、集光ビームは小さな加工角度 θ で照射して工具刃先とほぼ平行に走査を繰り返す。特定のスキャン数後、工具は水平方向にレーザービームに向かって送りされ、スキャンの新しいパースを開始する。そうすることで、Fig.2 の右側のように刃先付近に薄いブルーの部分除去され、刃先をシャープになった。

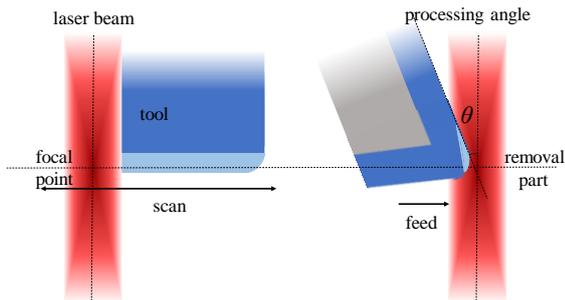


Fig. 2. Schematic of PLG processing at a small processing angle θ

本研究ではまず、改質されたダイヤモンドの結晶性の以前の報告による波長 1045 nm の同じ fs レーザを用いて PLG 加工を行った。レーザーのスポット径が約 50 μm の長焦点距離レンズ（焦点距離 100 mm）で集光され、加工角が変化し、それぞれ高いフルエンス及び低フルエンスを示す 2 つの異なる条件が行った。比較のために、最適であると確認された条件下で Nd:YAG ns レーザを用いた PLG 加工も行った。具体的な PLG 加工条件は Table1 に示した。

Table. 1 Laser parameters of PLG with ns laser and IR fs laser

Condition No.	a	b	c
Pulse width	7 ns	700 fs	
Wavelength	355 nm	1045 nm	
Repetition rate	15 kHz	100 kHz	
Scanning speed	30 mm/s	60 mm/s	
Power	3 W	3 W	
Processing angle θ	4.5°	20°	10°

Table. 2 Laser parameters of PLG with UV fs laser

Condition No.	1	2	3	4	5	6
Pulse width, fs	250					
Wavelength, nm	257					
Repetition rate, kHz	50					
Scanning speed, mm/s	5	10	15	10	10	10
Power, mW	125	250	375	200	300	350

そして、さらに PLG 加工の精度をより向上させるために、他の波長は UV の fs レーザ加工機も用いて、刃先成形とダイヤモンド構造改質を同時に実現できる条件を調査した。レーザー加工条件は Table 2 に示す。十分なレーザーフルエンスを確保するため、対物レンズで集光してスポット径が 2 μm であった。PLG 加工を行った後、SEM を用いて加工刃先成形を評価した。ダイヤモンドの微細構造変化表面を同定するためにラマン分光を用いた。Fig.3 に示すように、PLG 処理面の加工 chamfer 角度 θ' 及び粗さ Rz をレーザー顕微鏡で測定した。

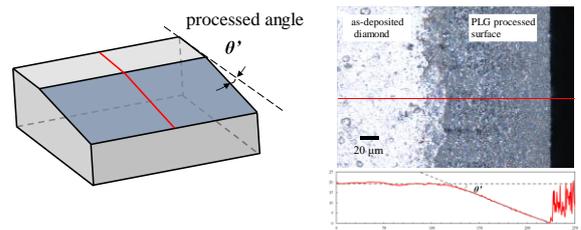


Fig. 3. Definition of processed angle θ' and the measurement by laser microscope

3. 研究成果

3.1 IR fs レーザ PLG による刃先成形

Table1 に記載された条件下での PLG 加工を行った。Fig.4 は被加工端面（像の上側）の光学顕微鏡画像を示す。蒸着したコーティングよりも ns レーザの表面が非常に明るい処理された表面に比べて fs レーザの方が暗くなった。ns 及び fs レーザを用いた加工面の特徴は、レーザー研削処理後の条件 (a), (b) とともに平滑になってきた。レーザー顕微鏡を用いて、加工面の粗さ Rz と加工された面取り角度 θ' を測定し、Fig.5 及び Table3 に示す。

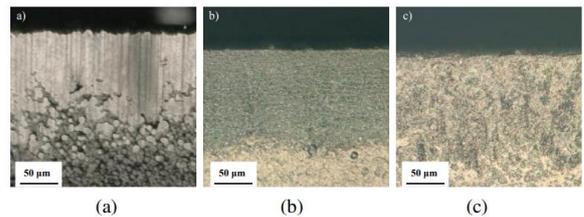


Fig. 4. Optical microscope images of PLG-processed CVDD tool edge surfaces (upside of the images) with (a) ns laser, (b) IR fs laser with the processing angle θ of 20° and (c) 10°.

Table. 3 Processed angle θ' of PLG with ns laser and IR fs laser

Condition No.	a	b	c
Processed angle θ' , °	1.5	10.2	1.2

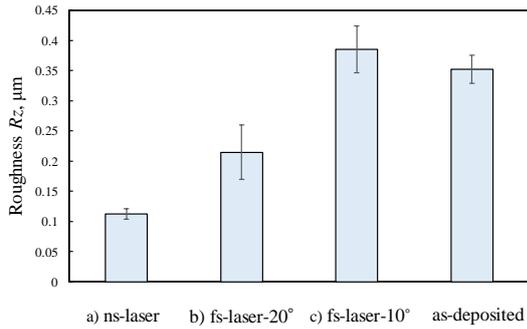


Fig. 5. Roughness R_z of PLG-processed tool edge surfaces with ns laser, IR fs laser with different processing angle θ

ns レーザと fs レーザで加工した表面では、両者の粗さは未加工面の場合と比較して大幅に減少したが、ns レーザは優れた縦筋がでていたが、比較的滑らかな工具刃先成形面を示した。条件 (c) での粗さは未加工面よりも高くなり、加工角 10° の条件下では、レーザーエネルギーは CVD ダイヤモンド材料を除去するには不十分であり、部分的除去により表面粗さを悪化させた可能性があることを示した。加工した面取り角 θ' を考慮すると、ns レーザ PLG は 4.5° 加工角で 1.5° のシャフアー角度を得ることができ、fs レーザは 20° 加工角で 10° のシャフアー角を生成できた。これは 10° は IR fs レーザに対してやや加工閾値付近となり、ちょうど条件 (c) ダイヤモンドが加工不十分の理由を説明した。この結果から、CVD ダイヤモンドのアブレーションには、IR fs レーザのしきい値は ns レーザよりもはるかに高いことが示唆された。

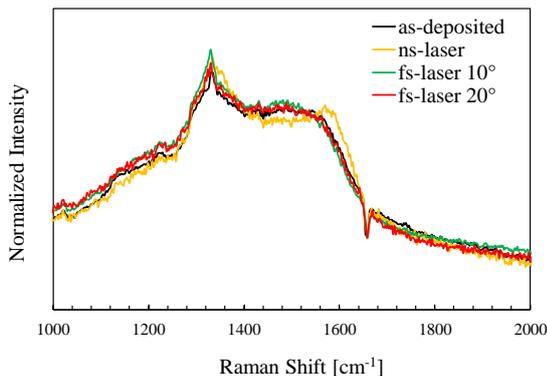


Fig. 6. Raman spectra of PLG-processed CVD diamond surfaces with ns laser and IR fs laser

PLG 工具刃先成形の評価基準としてマイクロ構造変化も注目され、PLG 加工された CVD ダイヤモンドのラマンスペクトルを規格化し、Fig.6 に示す。ブラックラインで示された未加工面のスペクトルでは、 1333 cm^{-1} (ダイヤモンドのラマン線) 中心の鋭いピークと、 1350 と 1550 cm^{-1} の広い D と G バンドに対する大きな特徴 (アモルファス成分) が観測された。PLG 処理後、ラマンスペクトル間のいくつかの小さな変化は、ダイヤモンド微細構造に対する PLG 加工の効果を明らかにすることができた。ns

レーザーを使用した場合、ダイヤモンド品質の尺度として一般的に使用されているダイヤモンドピークの FWHM を拡大し、G ピークの少し増加も観測できた。fs レーザを 20° で加工した (b) については、未加工とほとんどスペクトルが変わらなく、これは fs レーザ PLG はネガティブの構造変化を抑制することができたと考える。この理由は fs レーザが光励起電子と格子イオンの間の熱エネルギー交換よりもはるかに速いので、熱的影響は少なくなった。また、低フルエンス fs レーザ (緑色線) の刃先 (c) は 1330 cm^{-1} でダイヤモンドピークが著しく増強し、また、CVD ダイヤモンドの結晶性が向上していることを示唆される。この効果は刃先形成に非常に有利であるが、完全に加工されなかった粗面は工具成形を実現するためにフルエンスが不十分であることを示唆している。高フルエンス (条件式 (b)) の fs レーザは工具成形を達成することができるが、粗さと高いシャフアー角度はこの IR fs レーザの PLG への適用を制限した。これは fs レーザの波長が赤外領域であるため、加工レートが低いためであろうと考える。

3・2 UV fs レーザ PLG による刃先成形

より低表面粗さの加工面を達成できるため、Table2 に示すように波長 257 nm の fs レーザを用いて PLG を行った。まず、1~3 条件でレーザーフルエンスを固定し、走査速度と加工パワーの組合せを変えた。Fig.7 は光学顕微鏡の写真であり、未加工面の凹凸よりもはるかに滑らかになっていき、ns レーザ加工面の典型的な縦筋は現れない。3 つの条件の比較により、パルスエネルギーの増加に伴い、処理した表面は暗くなり、縦の幅は大きくなったが、レーザーの有効エネルギー数を減少させることにより総エネルギーを一致にした。対応する粗さ R_z と加工面取り角度 θ' を Fig.8 に示す。チャンファ角 θ' はレーザーパワーと共に増加したが、条件 2 は最低表面粗さを示した。これは PLG 加工におけるパルス間隔の影響に関する以前の報告と一致した。Fig.9 は、条件 1 および条件 2 の SEM 画像を示し、パルス間隔は $0.1, 0.2\text{ }\mu\text{m}$ である。低いパルス間隔を持つ条件は明らかに付着したデブリを示し、おそらく連続的で集中的な照射により、高温プラズマによる熱が不十分な散逸をもたらす。表面粗さに基づいて次のステップでパルス間隔 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の条件を採用した。

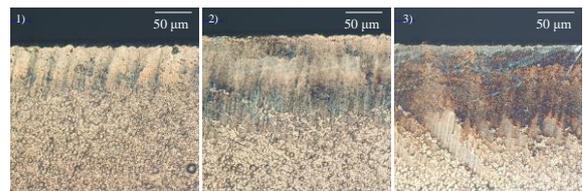


Fig. 7. Optical microscope images of PLG-processed surfaces with UV fs laser under condition 13: 1) 125 mW, 5 mm/s; 2) 250 mW, 10 mm/s and 3) 375 mW, 15 mm/s

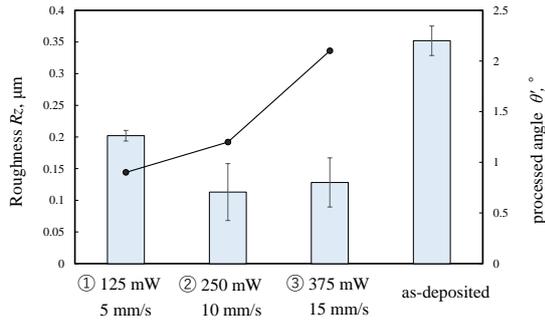


Fig. 8. Roughness R_z of PLG-processed surfaces with UV fs laser under different conditions

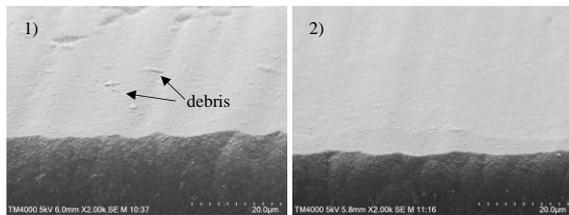


Fig. 9. SEM images of PLG-processed tool edges with UV fs laser under different conditions: 1) 125 mW, 5mm/s and 2) 250 mW, 10 mm/s

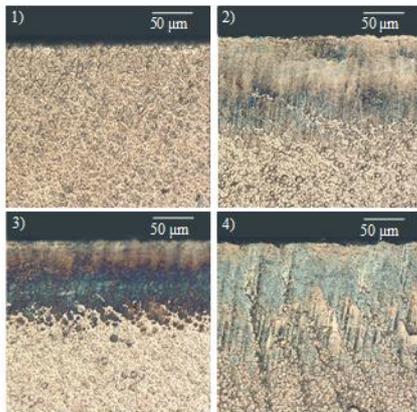


Fig. 10. Optical microscope images of PLG-processed surfaces with UV fs laser under different powers: 1) 200 mW, 2) 250 mW, 3) 300 mW and 4) 350 mW

次に、走査速度（走査間隔）で 2, 4~6 の条件でレーザーパワーの影響を調べた。Fig.10 に光学顕微鏡画像を示す。200 mW のパワーでは、PLG 加工後の工具刃先はほとんど変化しなかった。300 mW の加工面は（条件 5）最も滑らかであるが、未加工面と比べると変色した。粗さ R_z （Fig.11）の結果は、200 mW 及び 350 mW の条件で、高い粗さを有する表面を示す。250 mW 以下の加工面に比べ、300 mW まで増加すると表面粗さが減少する。しかし、さらにパワーが 350 mW になると、表面粗さは悪くなり、加工角 θ' は変化しない。表面形態がどのように変化するかを調べるために、SEM により（Fig.12）工具を観察し

た。パワー350 mW で加工された表面に対して縦加工マークが存在することが分かった。高いパルスエネルギーにより、パルスごとに作った細長いクレーターは加工面より深く修正不可な溝になったと考える。それに対して、300 mW の条件で加工した表面は良好な低粗さを示す。一方、加工角度 θ' が 2.7°であることは刃先形成にとりては有利であるので、現段階では最適な PLG 処理条件は、300 mW のパワーと 10 mm/s の走査速度であると考えられる。このようにして、この PLG 処理により、すくい面と逃げ面の双方で PLG 行うことで、エッジの創製を行った。

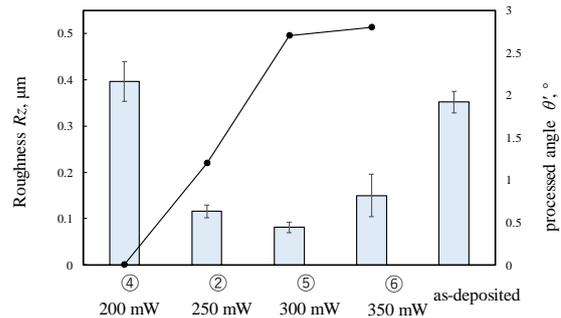


Fig. 11. Roughness R_z of PLG-processed surfaces with UV fs laser under different laser powers

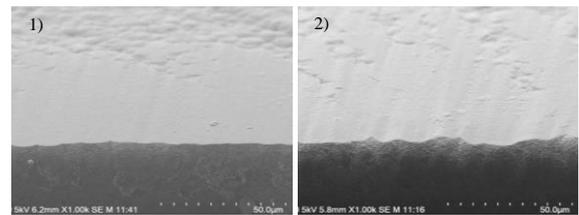


Fig. 12. SEM images of PLG-processed tool edges with UV fs laser under different powers: 1) 300 mW and 2) 350 mW

3・3 ns レーザと fs レーザ PLG 加工による刃先創製手法の比較

上述した ns レーザ（条件 a）及び IR-fs レーザ（条件 b）及び UV-fs レーザ（条件 5）を用いて、工具刃先すくい面及び逃げ面における PLG 処理を行った。ここで、工具刃先の創製を工具刃先形成とダイヤモンドの微細構造変化から評価した。まず、SEM を用いて Fig.13 に示すように加工した工具刃先を観察した。すべての PLG 加工条件では、Fig.1 (b) の未加工の CVD ダイヤモンドと比較して PLG により球状粒子による粗面が大幅に平滑化された。三つの加工表面は明らかに異なった特徴を示した。ns レーザ加工面では、比較的粗さが悪いが、縦筋は顕著であり、高精度加工の達成を妨げる。さらなる拡大画像は、このマシニングマークが工具エッジラインまで伸びることを示す。それは切断の時に仕上げに移され、面精度に影響を及ぼすと考える。一方、IR fs レーザ加工面は少し彎曲し、再付着したデブリが超音波アセトン浴でも除去できない。上記 2 つと比較し、UV fs レーザで加工した刃先は

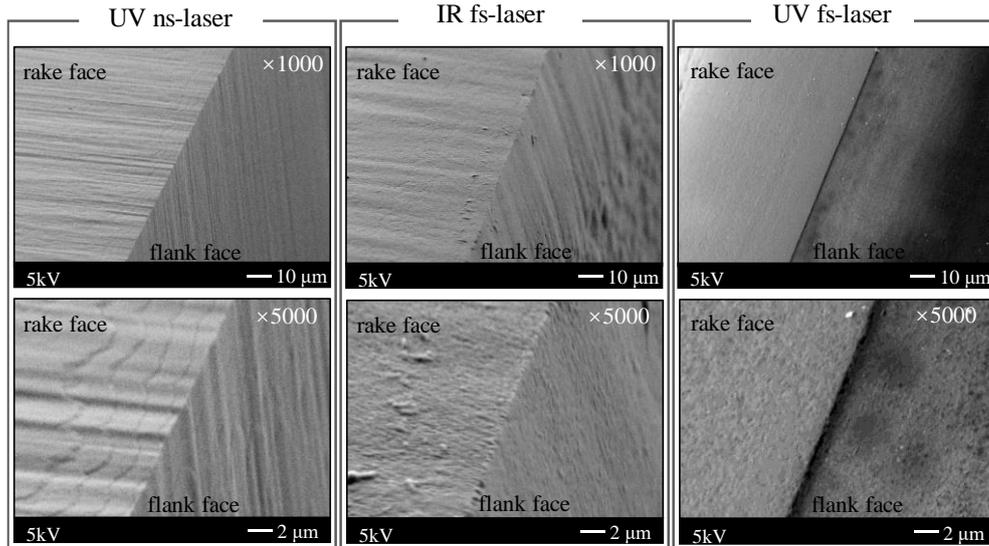


Fig. 13. SEM images of tool edge formation by PLG processing with UV ns laser, IR fs laser and UV fs laser

ほとんどマーキングマークがなく、またデブリも見られない。工具端線の真直度については、一般に2種類のfsレーザで加工した工具稜線はnsレーザに比べて優れている。最後に、機械加工の最も重要な因子の一つである工具エッジの鋭さを、SEM反射電子像のグレイ値から曲率半径は約 $0.5\mu\text{m}$ で表現した。刃先の丸みは $20\mu\text{m}$ の元の値から大幅に減少したので、このPLG加工された工具により高精度の微細加工が期待できた。

さらに、Fig.14に示すラマンスペクトルを測定した。全体的には未加工面と同じく示す。その中で、FWHMが 17cm^{-1} から 10cm^{-1} に減少すると、ダイヤモンドピーク強度の著しい増加が観測され、fsレーザ照射によるダイヤモンド結晶性の改善効果が示唆された。これは、初期加工角度がアブレーション加工を確保するのに十分であり、PLGが進むにつれて加工角が小さくなり、閾値よりもフルエンスが低い時加工が停止する。このとき、低フルエンスによる繰り返し走査照射の効果は、前研究での、fsレーザ特有の光誘起相転移過程は、ダイヤモンドの結晶性の改善を特徴づけることができた。

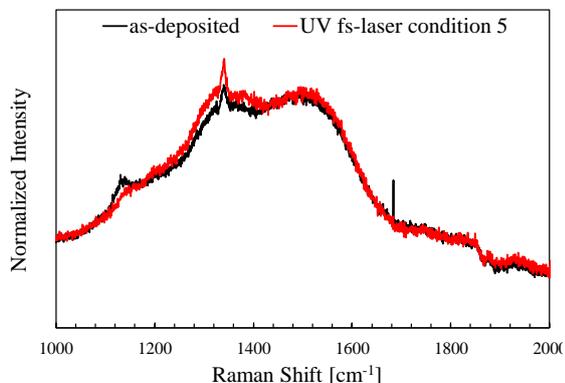


Fig. 14. Raman spectra of PLG-processed CVD diamond surfaces with UV fs laser under condition No.5

以上のことから、UV fsレーザを用いたPLG加工は、表面粗さが約 $0.08\mu\text{m}$ に低下し、刃先真円度が $0.5\mu\text{m}$ 前後のより良い刃先形成を達成するだけでなく、CVDダイヤモンドの結晶性を向上させることができた。これにより、シャープかつハードなCVDD工具の同時実行が可能になった。メカニズムは完全には明らかではないが、より多くの相転移をもつ吸着された光子は結晶性改善をもたらした。さらに、光誘起相転移の程度である構造変化効果は、適切に選択されたレーザ条件によって、ダイヤモンドの微細構造が制御されることが予想される。これはPLG加工表面の微細構造変化に及ぼすレーザパラメータの影響を明らかにする次のステップ研究につながる。

4. 結び

本研究では、CVDダイヤモンド被覆工具刃先に、IRとUVの2つのfsレーザを用いたPLG加工をそれぞれ行った。結果を以下にまとめる。

- 1) IR-fsレーザPLGはnsレーザpにより加工表面に示したダイヤモンド微細構造への熱損傷を抑制することができた。しかし、加工したダイヤモンド表面粗さ R_z $0.21\mu\text{m}$ は、 R_z $0.11\mu\text{m}$ であるnsレーザより高い。
- 2) UV-fsレーザPLGでは、中間的なパルス間隔とパルスエネルギー(50 kHzの繰り返し率、300 mWのパワー、10 mm/sの走査速度)の条件が最適である。粗さ R_z が約 $0.08\mu\text{m}$ の滑らかなエッジ表面を加工できる。また、20 fsのIR-fs PLGの加工角度 θ' に比べて、 2.7° の極めて小さなチャンファ角度が達成できた。
- 3) ラマン分光の結果は、UV fsレーザPLG処理後に多結晶CVDダイヤモンドの結晶性を改善し、刃先成形と構造改質を同時に実現できることを示した。

謝 辞

本研究の実施にあたり公益財団法人天田財団より奨励研究助成(若手研究者枠)(AF-2019232-C2)を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) A. Jee and M. “Surface functionalization and physicochemical characterization of diamond nanoparticles,” *Curr. Appl. Phys.* Vol. 9(2), pp. 144-147, March 2009.
- 2) V. I. Konov “Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials,” *Laser Photonics Rev.*, Vol. 6.6 pp. 739-766, 2012.
- 3) C. Everson, P. Molian. “Fabrication of polycrystalline diamond microtool using a Q-switched Nd: YAG laser,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 45(5-6), pp. 521, 2009.
- 4) C. Brecher, F. Klocke, F. Schindler, A. Janssen, B. Fischer and J. Hermani, “Finishing of polycrystalline diamond tools by combining laser ablation with grinding,” *Prod. Eng.*, Vol. 7(4), pp. 361-371, 2013.
- 5) Y. Yang, G. Zhao, M. Hu, L. Li, N. He and M. Jamil, “Fabrication of CVD diamond micro-milling tool by hybrid machining of laser-induced graphitization and precision grinding,” *Ceram. Int.*, Vol. 45.1(18), pp. 24127-24136, 2019.
- 6) X. Liu, K. Natsume, S. Maegawa, and F. Itoigawa, “Micromachining of polycrystalline CVD diamond-coated cutting tool with femtosecond laser,” *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, Vol. 14(4), pp. JAMDSM0059, 2020.
- 7) X. Liu, K. Natsume, S. Maegawa and F. Itoigawa, “Improvement of crystallization in CVD diamond coating induced by femtosecond laser irradiation,” *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 107, pp. 107883, 2020.