

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14876

研究課題名(和文)超短パルスレーザーを用いた炭素系硬質被膜の表面機能創製

研究課題名(英文)Development of high-performance Polycrystalline CVD diamond coated cutting tool edge with femtosecond laser

研究代表者

劉 曉旭 (Liu, Xiaoxu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30837662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：CVDダイヤモンド・コーティング工具の刃先創製に対して、本研究ではフェムト秒レーザーのアブレーション加工による刃先鋭利化と低フルエンス照射による表面改質を着目した。まずフェムト秒レーザー照射による多結晶CVDダイヤモンドの結晶性向上のメカニズムを明らかにした。そして刃先成形と結晶構造二軸としてフェムト秒レーザーとナノ秒レーザーによるPLGを比較することで、工具の機能性向上を実現する最適なレーザー加工条件による超短パルスレーザーPLG手法を構築した。最後はレーザーを組み合わせることで、刃先各部分に異なる機能を付与させて革新的な工具を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CVDダイヤモンド・コーティング工具は優れた機械特性、安価という利点から、実用切削工具への適用が注目されているものの、被膜形態を維持するために切れ刃の丸みが大きくなり、精密加工が阻害される刃先鋭利化という課題が存在している。そこで本研究では、フェムト秒レーザーの高精度なアブレーション加工を見据え、低フルエンスのレーザー照射によるダイヤモンドの結晶性向上のメカニズムを解明する上で、機能性向上の刃先成形手法を開発した。本研究の成果を発展させることで、工程集約化とともに、より総合的な表面機能を向上させる切削工具コーティングが期待される。

研究成果の概要(英文)：CVD diamond has attracted attentions in the field of manufacture due to its excellent properties. Hence, with the CVD diamond coated tools, kinds of hard and brittle materials could be expected to be processed with high precision, low cost and grinding-less machining. Herein, a novel edge shaping process with femtosecond (fs) laser is proposed, since the ablation processing of fs laser possesses high precision, and furthermore the low-fluence irradiation shows an improvement of the diamond crystallinity. In this study, firstly the mechanism of this surface modification effect has been clarified. Then the feasibility of PLG using fs laser was confirmed and compared with that of conventional PLG using nanosecond (ns) laser. From the aspects of shape formation precision and micro-structural change, the proper PLG condition was investigated. Finally, considering the characteristics of fs laser and ns laser, a novel edge shaping method with the combination of fs and ns laser was developed.

研究分野：トライボロジー、レーザー加工

キーワード：CVDダイヤモンド・コーティング工具 フェムト秒レーザー 刃先成形 表面改質 pulse laser grinding

1. 研究開始当初の背景

(1) 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。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(下記 CVDD と呼び) 切削分野への適用が進められている。しかし、CVDD 工具では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。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高精度に成形する加工技術が求められている。一般的な手法は研削加工に対して、短パルスレーザ加工は、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) 過去の研究としては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^{2,3)}。ここで、本研究室では短パルスレーザを用いて革新的なレーザ加工手法である PLG (pulsed laser grinding) という研削方法を開発された。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熱影響を受け、縦筋が著しく出ている。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 (fs) レーザが有望である。さらに、低フルエンス fs レーザ照射により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。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。

2. 研究の目的

CVDD 工具が持つポテンシャルを十分に発揮させるために、本研究ではフェムト秒レーザのアブレーション加工による刃先鋭利化と低フルエンス照射による表面改質を着目し、刃先の形状創製(高い切れ味を得る)と表面改質(耐摩耗性の向上)を単一プロセスで実現する新しい加工プロセスの開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、CVDD 工具の刃先部分をパルスレーザ研削加工を行った。PLG 加工の概略を図 2 に示す。まずは、パルスレーザ光は、円筒状および縦方向のレーザ加工領域(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、集光ビームは小さな加工傾斜角度 θ で照射して(工具刃先とほぼ平行に)研削加工において砥石走査のように、繰り返しの走査を行った。特定のスキャン回数後、工具は水平方向にレーザ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、図 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る。すくい面と逃げ面両面 PLG 加工を施すことで、刃先の丸みを鋭利化された。

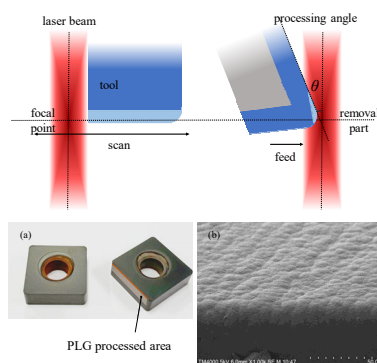


図 1 PLG加工面の模式図とCVDD工具

4. 研究成果

(1) フェムト秒レーザ照射による CVD ダイヤモンドの結晶性向上のメカニズムの解明

CVD ダイヤモンドに対して、除去加工が発生しない低フルエンスの fs レーザを照射することで結晶性が向上したことが発現した。フェムト秒レーザによる CVD ダイヤモンド膜中のアモルファス成分の改質が可能となれば高硬度に加えて低摩擦か内部応力の付与が可能ではないかと考えられ、それが工具の切削性能に強く影響を与えることを明らかにしている。図 2 のようにレーザフルエンスを変化させて、ラマン分光により表面改質程度の違いとダイヤモンドやアモルファスカーボンなどの成分の変化についての調査を行った。結果として、表面改質効果はレーザフルエンスが大きいほど大きくなり、FWHM により検証されたダイヤモンドの品質が著しく改善されたことと、再表面のみならず内部でも生じていることが示唆される。同様なアモルファス構造が多くの炭素硬質被膜構造を持つ DLC 膜では、照射により ID/IG の増加はあるものの、ダイヤモンド相の相対強度増加よりややグラファイト化が見出したため、CVD ダイヤモンドの表面改質は核成長であることが示唆される。以上の結果に基づいて、この結晶性の改善がアモルフ

アス成分からダイヤモンドへの光誘起相転移に起因するものだと考える。

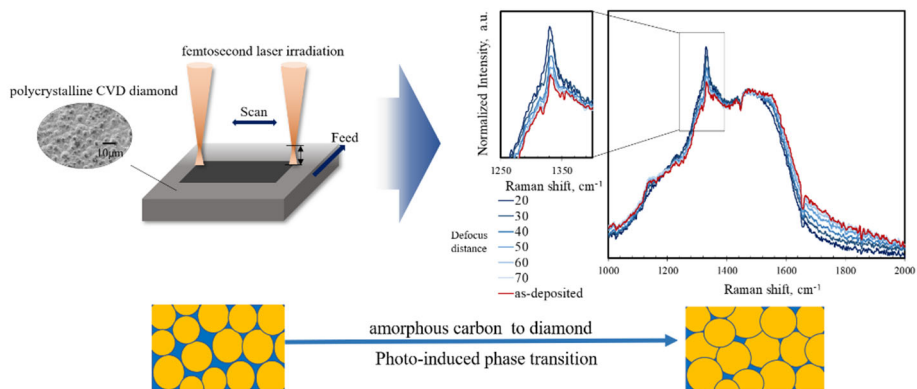


図2 fs レーザによる CVD ダイヤモンド表面改質の解明

(2) CVDD 工具の刃先成形性と結晶構造変化に及ぼす超短パルスレーザーの影響

刃先の鋭利さと加工面品質を両立するために、従来の ns レーザを用いた PLG 加工と新たにフェムト秒レーザーを用いた PLG 加工を結晶構造と刃先成形性の二つ軸で比較を行った。結晶構造に関してはラマンスペクトルをみると、fs レーザを用いた場合ナノ秒より加工面の変質を抑えることができているといえる。一方で、刃先成形性（刃先面粗さ）としては、デブリが fs レーザの加工面に荒くなってしまうため、ns レーザ加工面の粗さが少しよいが、どちらの PLG を用いても 1 μm 以下のシャープなエッジを成形できたことから、fs レーザを用いた PLG 加工では刃先成形の実現可能性が確認された。

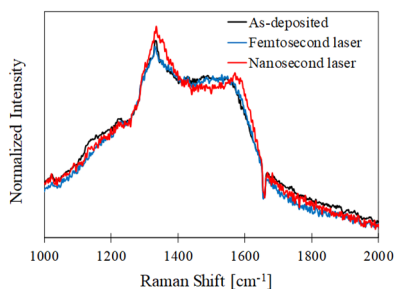


図3 fs と ns レーザ PLG による加工面のラマンスペクトル

(3) フェムト秒レーザーを用いた CVD ダイヤ被膜工具刃先の高機能創製

波長などが独立変更可能な fs 秒レーザーを用いて、PLG 加工における最適なレーザー加工条件を明らかにした。最後両面 PLG 加工で創製された刃先の SEM 像は図 4 に示す。PLG した後に表面ももとの結晶粒子による粗い表面(図 1)は平滑になり、ナノ秒レーザーと比べて縦筋が大幅に減少し、赤外 fs 秒のデブリはほとんどなくなったことが分かった。一方で、ラマン分光の結果から紫外 fs レーザ PLG された表面のダイヤモンドピーク強度の著しく増加し、それは fs-PLG 加工で従来の PLG よりよい高精度な刃先成形性を達成すると同時に表面改質効果を付与できることを確認した。

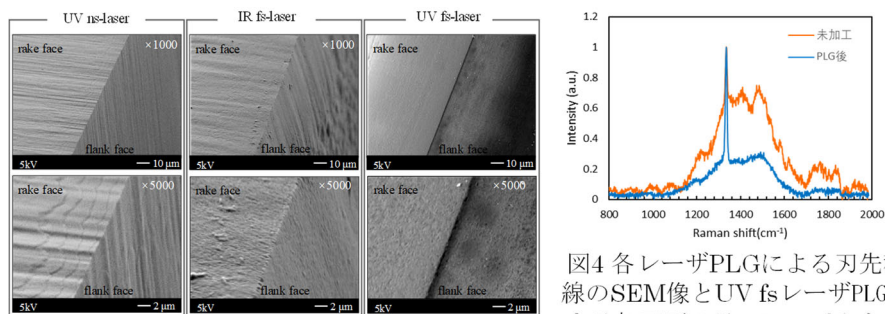


図4 各レーザーPLGによる刃先稜線のSEM像とUV fsレーザーPLGによる加工面のラマンスペクトル

<引用文献>

- ① V. I. Konov “Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials,” Laser Photonics Rev., Vol. 6.6 pp. 739-766, 2012.
- ② 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.
- ③ 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Xiaoxu LIU, Kohei NATSUME, Satoru MAEGAWA, Fumihiro ITOIGAWA	4. 巻 107
2. 論文標題 Improvement of crystallization in CVD diamond coating induced by femtosecond laser irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 107883
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.diamond.2020.107883	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xiaoxu LIU, Kohei NATSUME, Satoru MAEGAWA, Fumihiro ITOIGAWA	4. 巻 14.4
2. 論文標題 Micromachining of polycrystalline CVD diamond-coated cutting tool with femtosecond laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Xiaoxu, Nagoya Institute of Technology Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8555, Japan, Konda Osamu, Furuhashi Hiroko, Natsume Kohei, Maegawa Satoru, Itoigawa Fumihiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of High-Performance Polycrystalline CVD Diamond-Coated Cutting Tools Using Femtosecond Lasers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 413 ~ 421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Liu Xiaoxu, Ni Xianlong, Konda Osamu, Furuhashi Hiroko, Maegawa Satoru, Itoigawa Fumihiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Clarification of the Mechanism of Pulse Laser Grinding of Nanosecond Lasers Using High-Speed Camera Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machines	6. 最初と最後の頁 196 ~ 196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/machines10030196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Xiaoxu Liu, Satoru Maegawa, Hiroko Furuhashi, Shingo Ono and Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Edge shaping and structural modification of CVD polycrystalline diamond coated tool with femtosecond laser
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xianlong Ni, Xiaoxu Liu, Satoru Maegawa and Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Surface fabricating Process in Pulse Laser Grinding of PCBN Cutting Tools
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Hasegawa, Xiaoxu Liu, Satoru Maegawa and Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Surface Roughness of Finished Surface by Processing with Short Pulse Laser
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xiaoxu Liu, Kohei Natsume, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Development of High-performance Polycrystalline CVD Diamond Coated Cutting Tool Edge With Femtosecond Laser
3. 学会等名 The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xiaoxu Liu, Kohei Natsume, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Micromachining of Polycrystalline CVD Diamond Coated Cutting Tool with Femtosecond Laser
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiaoxu Liu, Kohei Natsume, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa, Shingo Ono and Michiharu Ota
2. 発表標題 A Comparative Study of Surface Modification effects of Femtosecond and Nanosecond Laser on CVD Diamond Tools during Sharpening Processing,
3. 学会等名 CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America (OSA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiaoxu Liu, Kohei Natsume, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa
2. 発表標題 Pulse Laser Grinding Processing of Polycrystalline CVD Diamond Coated Cutting Tool Edge with Femtosecond Laser
3. 学会等名 FIO/LS: Frontiers in Optics + Laser Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Natsume, Xiaoxu Liu, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa, Shingo Ono and Michiharu Ota,
2. 発表標題 Surface modification of polycrystalline CVD diamond films with femtosecond laser. CLEO: Applications and Technology
3. 学会等名 CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America (OSA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉 曉旭, 夏目航平, 前川覚, 糸魚川文広, 小野晋吾,
2. 発表標題 超短パルスレーザを用いた多結晶CVDダイヤモンド・コーティング工具の刃先創製
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会, 秋田
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏目航平, 劉曉旭, 前川覚, 糸魚川文広, 小野晋吾,
2. 発表標題 超短パルスレーザを用いた多結晶CVDダイヤモンド加工と表面構造変化
3. 学会等名 精密工学会2019年度春季大会, 東京電機大学
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋工業大学 生産機器研究室 ホームページ https://tmlab.web.nitech.ac.jp/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------