

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03834

研究課題名（和文）短パルスレーザー照射によるアブレーション加工を利用したレーザー研磨技術の提案

研究課題名（英文）Proposal of laser polishing technology using ablation process by short pulse laser irradiation

研究代表者

糸魚川 文広（Itoigawa, Fumihiro）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：20252306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、超短パルスレーザー（フェムト秒レーザー）照射によるアブレーション加工を利用した表面研磨技術（PLG法）を精密切削工具の刃先形成に適用して、その有効性を検証することである。具体的には、CVDダイヤモンドコーティング工具に対して、精密加工の要件である刃先粗さ $0.1\mu\text{m}$ 以下の実現可能性を検証するとともに、刃先粗さを低減するための最適加工条件の探索やPLG加工法の改良を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の機械研磨にもとづく刃先成形手法であるPLG法を確立し、例えば実用的に活用されている切削工具の刃先成形に対して本手法の有用性を実証することができれば、精密切削をはじめとする機械加工技術の大幅な向上が見込まれる。例えば、機械加工機上にPLG用レーザーを設置することで、刃先研磨と機械加工を同一マシンに統合することができ、大幅な加工時間の短縮や工具の取り外しを不要とすることによる精度向上などが見込まれる。また、高エネルギー照射をともなうレーザー加工では、刃先形状創製とレーザーアニーリングなどの表面改質の融合の可能性も高まる。このように本研究を進めることは機械加工分野において重要な意義を有している。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to verify the effectiveness of the surface polishing technology (PLG method) using ablation processing by ultrashort pulsed laser (e.g. femtosecond laser) irradiation in the edge formation of precision cutting tools. Specifically, we aim to verify the feasibility of achieving a roughness of $0.1\mu\text{m}$ or less for CVD diamond-coated tools, which is a requirement for precision machining, and to search for optimal machining conditions and improve the PLG method to reduce the roughness of the cutting edges.

研究分野：機械加工

キーワード：PLG 短パルスレーザー アブレーション加工 刃先研磨 CVDダイヤモンドコーティング工具 精密加工
切削加工

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

表面研磨と言えば、機械的な研磨加工（研削やラッピングなど）が一般的である。これらの手法では、硬質砥粒が金属表面を擦過する際に、材料内部に局所的な力学的高負荷が加わり表面層付近に機械的なダメージ層が形成される場合がある。一方、申請者らの研究グループでは、短パルスレーザ（フェムト秒パルスレーザやナノ秒パルスレーザ）を用いた新しい刃先成形加工法（PLG：Pulse Laser Grinding、以下 PLG と呼ぶ）を提案している [1-3]。同手法では、短パルスレーザを工具刃先のエッジ部に比較的浅い角度（数°程度）で入射して、工具材料表面で生じるアブレーションを利用することで刃先成形を行う手法である。市販品の工具表面（PLG 加工を行っていない工具の表面）と PLG 加工後の工具表面を比較すると、ビッカース硬度の向上、焼入鋼の旋削への適用による仕上げ面品質の向上、耐エロージョン性能の向上など、PLG 加工の優位性が確認されている。PLG 加工の利点をまとめると以下の通りである。

- ① レーザ加工であるため被加工材の硬さの制約を受けることなくダイヤモンドなどの高硬度材料に対しても短時間で加工が可能である。
- ② 非接触な加工であり刃先に負荷が加わらないため脆性材料や焼結材料であっても刃先のチップングや粒子の脱落を抑制できる。
- ③ レーザ光源は光ファイバーなどでも伝送できるため取り回しが良く多軸加工への応用など自由度の高い加工機設計が可能である。
- ④ 高エネルギー照射にともなう材料改質が可能であり形状成形に加えて低摩擦化や耐摩耗性向上などの表面改質が可能である。

このように PLG 加工はその優れた性能を有する一方で、刃先成形における詳細な加工メカニズムについては明らかになっていない。例えば、加工時のレーザ照射エネルギーや送り量、走査速度、照射角度などの違いによって最終的に生じる加工面の粗さは大きく変化することが明らかになっているものの、そのメカニズムについては不明な点が多い。PLG の精密切削用工具への適用のためには、仕上げ面表面粗さの低減が必要不可欠であり、さらなる実験および理論的な考察が必要である。

2. 研究の目的

以上を踏まえて本研究では、超短パルスレーザ（フェムト秒レーザ）照射によるアブレーション加工を利用した表面研磨技術（PLG 法）を精密切削工具の刃先成形に適用して、その有効性を検証することを目的とする。具体的には、CVD ダイヤモンドコーティング工具に対して、精密加工の要件である刃先粗さ $0.1\mu\text{m}$ 以下の実現可能性を検証するとともに、刃先粗さを低減するための最適加工条件の探索や PLG 加工法の改良を目指す。

3. 研究の方法

本研究で対象とする超短パルスレーザ照射による切削用工具の刃先成形手法の概要を図 1 に示す。PLG 加工ではまず短パルスレーザを長焦点の単レンズを用いて集光し、円筒状の加工可能領域を形成する。この加工可能領域を工具の刃先稜線に対して垂直に、加工面に対して平行に近い角度で照射する。このとき加工可能領域がわずかに刃先と重なる位置にレーザを照射する。そして加工可能領域を加工面に対して平行に繰り返し走査することで面を加工する。その位置での加工が終了後にそこからわずかに切り込みを与えて同操作を繰り返し繰り返し行うことによって工具仕上げ面上に加工面を形成する。同様な加工を工具逃げ面からも行うことですくい面および逃げ面の表面粗さを低減できることに加えて、図 1 の右側の SEM 画像で示す通り、平滑かつ鋭利な刃先稜線を創製することができる。精密加工においては、刃先表面や刃先稜線の粗さが仕上げ面へと転写されることで仕上げ面粗さの悪化が生じる。本研究で提案する PLG 加工において、ダメージレス表面創製に基づく工具長寿命化と刃先表面および稜線の平滑性の実現は、精密加工の加工精度向上に向けて極めて有用な技術であると言える。

本研究では、PLG 加工の精密切削加工工具の刃先創製への応用に向けて、下記の二つのステップを実施した。

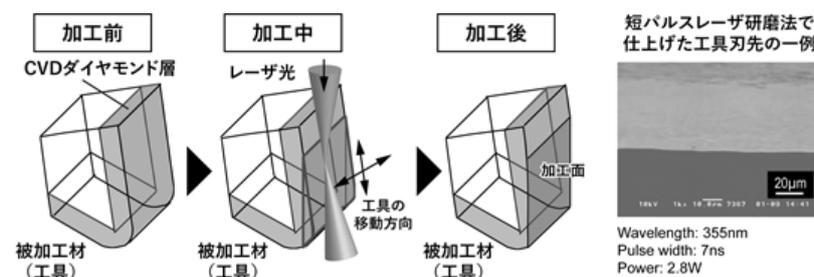


図 1 PLG 加工による刃先成形加工技術の模式図

(1) 2段 PLG 加工による仕上げ面の高精度化

本研究では、加工前の工具表面凹凸が加工仕上げ面の粗さに影響するという仮説のもと、図2に示す2段 PLG 加工法を提案する。2段 PLG 法では仕上げ面粗さの原因となる工具表面の凹凸をまず1段目の加工で取り除き、次に2段目の加工で最終仕上げ面を創製するという手法である。1段目の PLG 加工では、通常通りの手法で PLG 加工を行う。次に2段目の PLG 加工では、1段目の仕上げ面に対して再度照射角度を調整した別の角度である。2段目の PLG 加工を行うために工具の角度を変えていることで、1段目の PLG 加工で取り除けなかった凹凸の除去や、一度発生した縦溝の改善が期待できる。なお、使用したレーザの仕様および加工条件は図3と図4の通りである。

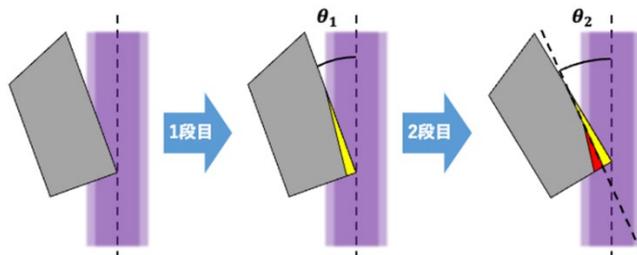


図2 2段 PLG 加工法の模式図

Wavelength	355nm
Power	20mW
Pulse width	350ps
Frequency	1kHz
Pulse energy	2uJ

図3 レーザの仕様

照射角度	5deg
往復回数	60往復
走査速度	1mm/sec
総切り込み量	10um

図4 レーザ加工条件

(2) 微小切り込み PLG 加工による仕上げ面の高精度化

本研究では加工角度と切込量を極めて小さくした条件で PLG 加工を行うことで、仕上げ面粗さへの単パルスの加工量の影響を調査した。図5と図6に使用したレーザの仕様と加工条件を示す。加工量の大きい条件はスカيف研磨を施していない加工面への最適な PLG 加工条件と同様に設定した。それに対し加工量の小さい条件は加工角度と切込量をもとに小さくしている。往復を繰り返し続けるとダイヤモンドのグラファイト化やインキュベーション効果により仕上げ面は悪化するため、仕上げ面角度がこれ以上変化しない繰り返し回数を往復回数とした。

Wavelength	355nm
Pulse width	7ns
Beam diameter	6mm
Spot diameter	20um
Transverse mode	TEM ₀₀
M ²	1.5

図5 レーザの仕様

Frequency [kHz]	15			
Power [W]	1.5			
Processing angle [deg]	5		2.5	
Total infeed amount [um]	10	1	10	1
Single infeed amount [um]	1	0.1	1	0.1
Processing fluence [J/cm ²]	6.68	5.58	3.34	2.79
Scanning speed [mm/s]	30			
Pulse pitch [um]	2			
Reciprocation number of times [times]	50	5	50	5

図6 レーザ加工条件

4. 研究成果

(1) 2段 PLG 加工による仕上げ面の高精度化

図7に微粒子工具を2段 PLG 加工した仕上げ面の顕微鏡画像を示す。同図の中央に横方向に広がるやや赤みを帯びて写る部分は1段目と2段目の PLG 仕上げ面の境界線である。境界線の上部分が1段目の PLG 仕上げ面が残っている範囲であり、境界線の下部分は2段目の PLG 加工が行われた範囲である。画像より2段目の PLG 加工が行われた範囲では仕上げ面の縦溝が薄くなっており、形状粗さが改善されていることがわかる。触針式粗さ計を用いて仕上げ形状を測定した結果を図7に示す。1段目の PLG 加工後に残る大きな凹凸の山が除去され、2段 PLG 加工をした範囲では仕上げ粗さが大きく改善されていることが確認できる。触針式粗さ

計および AFM を用いて測定した，仕上げ粗さを図中に示す． 2 段 PLG 加工することで $Rz : 0.100\mu\text{m}$ 未満の精度の仕上げ面が得られていることがわかる． これは可視光領域で用いる光学素子の金型を製造する上で，加工時の被削材への工具切れ刃の転写性を考慮しても十分な値だと言える．

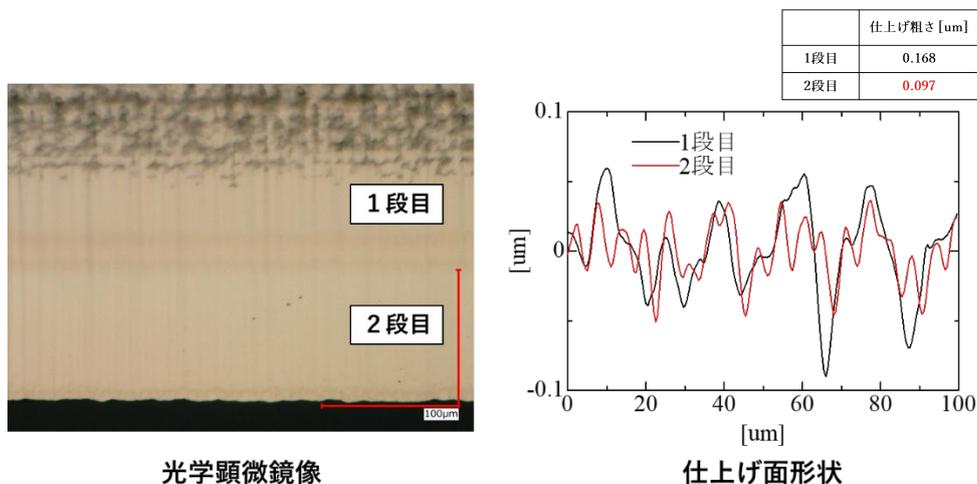


図 7 2 段 PLG 加工による仕上げ面画像と表面プロファイル

(2) 微小切り込み PLG 加工による仕上げ面の高精度化

仕上げ面の顕微鏡画像と表面プロファイルをそれぞれ図 8 と図 9 に示す． 切込量が大きい条件ではパルスピッチと同じ間隔の縦筋が生じているのに対し，切込量が小さい条件では縦筋はほとんど確認できず比較的平坦な面が得られている． 図 9 より切込量を小さくしたことで表面凹凸が平滑化されていることは明らかである． 刃先からの距離に応じた仕上げ面の表面粗さを図 10 に示す． 切込量を小さくしたことで $Ra 0.016\mu\text{m}$ ， $Rz 0.123\mu\text{m}$ となり，大きな改善が見られた． 一方，加工角度によって加工フルエンスを小さくした条件では，細かいピッチの粗さは低減できているように見えるものの深い溝は変わらず生じており，仕上げ面粗さも悪化していることがわかる． 特に表面粗さが小さい条件のときに仕上げ面粗さの悪化が顕著である． 本実験はあらかじめ加工面にスカイフ研磨を施すことで，加工角度を変えた際の加工前表面の影響が極めて小さくなるようにしている． しかし，切込量を小さくして加工量の差による粗さを大幅に改善したことで，加工前表面凹凸による影響が仕上げ面に現れたものだと考えられる． また Ra より Rz でより顕著に悪化しており，加工前表面の凹部で強め合った光が深い溝を形成したことによる影響であると考えられる． 本実験によって，切込量を変化させて加工フルエンスを小さくし，加工可能領域の変動を抑制することで縦筋を改善し，仕上げ面粗さ低減できることが示された． このとき得られた仕上げ面粗さは $Rz 0.1\mu\text{m}$ 程度の粗さであり，精密加工にたいして十分な仕上げ面粗さが達成できたと考えられる．

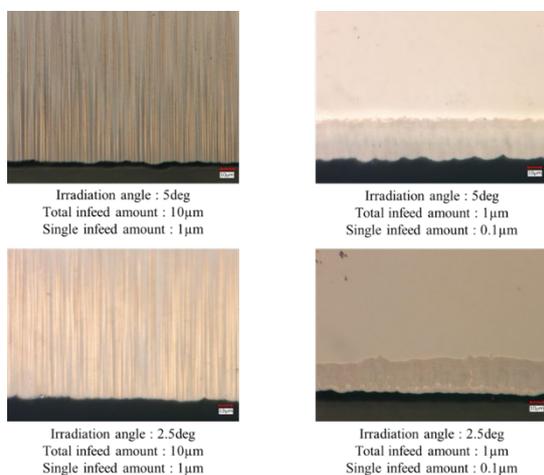


図 8 仕上げ面の光学顕微鏡画像

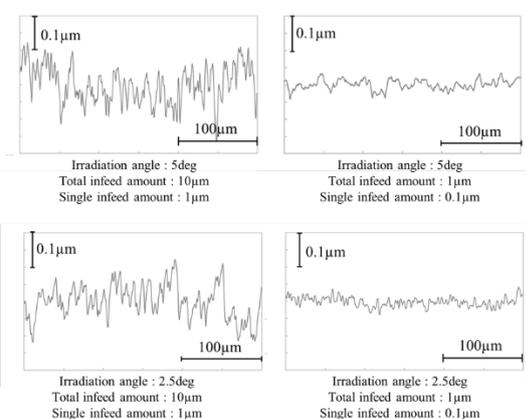


図 9 仕上げ面の表面プロファイル

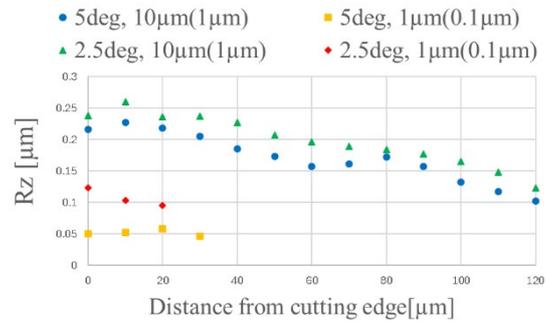


図 10 各条件における仕上げ面粗さ

参考文献

- [1] 「レーザー加工装置，制御装置および加工面形成方法」:特願 2015-038888
- [2] H.Saito, H.Jung, E.Shamoto, S.Suganuma, F.Itoigawa, *Journal of Applied Physics*, 12 (2018) 573.
- [3] X.Liu, K.Natsume, S.Maegawa, F.Itoigawa, *Diamond & Related Materials*, 107 (2020) 107883.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松井亮太, 糸魚川文広, 前川覚, 劉曉旭
2. 発表標題 レーザーにより平滑化処理されたCVDダイヤモンドコーティング工具の表面粗さに関する研究
3. 学会等名 第14回 生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉曉旭, 田中良樹, 前川覚, 小野晋吾, 糸魚川文広
2. 発表標題 短パルスレーザー照射による表面改質とそのトライボロジー特性の改善
3. 学会等名 日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 糸魚川文広
2. 発表標題 超短パルスレーザーを用いた切削工具刃先のダメージレス鋭利化技術（PLG）
3. 学会等名 TECH biz 連続セミナー 2023年12月 精密工学会東海支部、名古屋国際見本市委員会、中日BIZナビ（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 レーザー加工装置、レーザー加工方法およびプログラム	発明者 糸魚川文広、前川覚、近田修	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7274807	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

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
研究 分 担 者	前川 覚 (Maegawa Satoru) (90637406)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13903)	

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