

# 短パルスレーザー加工による切削工具刃先成形過程の インプロセス計測

名古屋工業大学 電気・機械工学科  
准教授 前川 寛

(2018年度 奨励研究助成 (若手研究者) AF-2018231-C2)

キーワード：短パルスレーザー加工，切削工具，刃先成形

## 1. 研究の目的と背景

切削加工において刃先の鋭利性は、加工精度や仕上げ面性状を決定する重要な因子である。一般的な刃先成形手法である研削加工において、刃先のカケや工具表面への微細欠陥・クラックの導入が問題となる場合がある。例えば、ダイヤモンド工具やCBN (Cubic Boron Nitride, 以下CBNと呼ぶ) 工具などの高脆性材料においては、刃先成形時に生じたカケや表面欠陥の存在が切削時における工具寿命や加工表面の品質に大きく影響する。ダイヤモンド工具やCBN 工具などの高いポテンシャル (高硬度や高耐熱性) を十分に発揮するためには、刃先への機械的負荷が少ない刃先成形手法の開発が重要となる。

そこで申請者の研究グループでは、短パルスレーザー (フェムト秒パルスレーザーやナノ秒パルスレーザー) 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<sup>1-3)</sup>。同手法では、短パルスレーザー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ことで、ピ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ピ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、加工時のレーザー照射エネルギー

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。加工条件をこれまでの経験則に基づいて設定しているのが現状であり、更なる高精度化や汎用技術としての展開のためには、刃先成形メカニズムの解明が重要な課題となっている。

以上の背景のもと本研究では、PLG加工において加工点で生じるプラズマ発光をハイスピードカメラで観察することで、1パルス毎における材料除去の素過程や加工面形成プロセスを可視化することを目指す。具体的には、PLG加工条件の違いがプラズマの強度や分布形状などに与える影響を調査して、刃先成形メカニズムについての考察を行う。以下、その詳細について報告する。

## 2. 実験方法

### 2-1 PLG加工機の概要

図1にPLG加工法の概要を示す。同手法では、対象とする切削工具のすくい面に対して浅い角度 (平行に近い角度) でレーザー光を照射する。工具 (図1左図中のTool) を左右に走査することで刃先エッジ部での除去加工を行う。図中の帯状の濃いグレーの領域が加工領域である。図1右図からわかるように、レーザー光の焦点を刃先のエッジ部 (稜線) と同じ高さに合わせることで、エッジ部付近のみが加工される。なお、図中の「Processing angle」はレーザー入射角度であり本実験では6°とした。また、十分に工具を操作させたのち、右図の「Feed」方向に工具を移動させた後に再度走査させる。この過程を繰り返すことで加工領域を拡大される。

なお、図2に示すようにPLG加工後では「Processing angle  $\theta$ 」とは異なる角度 (図中の $\theta$ ) で仕上げ面が形成されることに注意が必要である。

図3に本実験で使用したPLG加工機の写真を示す。レーザー光源から出た光は2枚のミラーで光路を調整された後、対物レンズを含む光学系に入る。対物レンズから出たレーザー光が刃先のエッジ部で焦点が合うように対物レンズと加工する工具の位置を調整する。

本実験では、PLG加工を行う切削工具として市販のCBN工具を対象とする。

本実験で使用したレーザの使用を表 1 に示す。レーザ媒質として Nd:YAG を用いたナノ秒パルスレーザを使用した。基本波は 1064 nm であるが、本実験では第 3 高調波の 355 nm の紫外光を使用した。パルス幅は 7 ns であり Q スイッチによりパルス化が行われている。

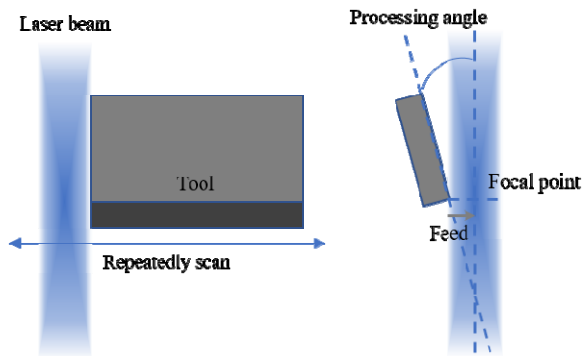


図 1 PLG (Pulse laser grinding) 刃先成形加工の概要

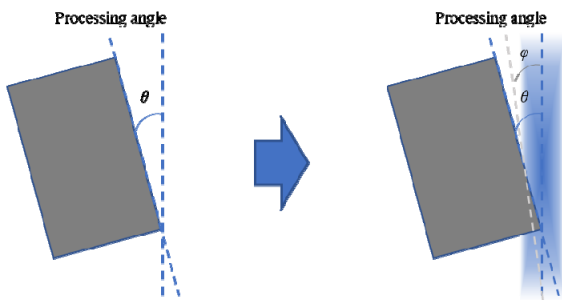
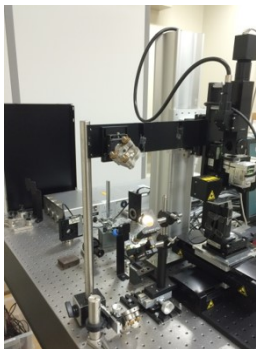
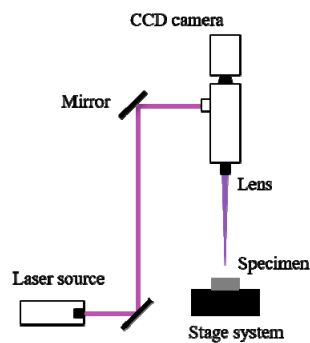


図 2 PLG 刃先成形加工における加工除去領域



(a) 写真



(b) 概略図

図 3 実験に用いた PLG 刃先成形加工機

表 1 レーザ諸元

波長	355 nm
パワー	3.0 W
パルス幅	7 ns
周波数	15 kHz
パルスエネルギー	200 $\mu$ J

## 2・2 刃先成形過程インプロセス計測システムの概要

図 4 に刃先成形過程インプロセス計測を実施するための光学系を示す。図 3 に示した PLG 加工機に高速度ビデオカメラ (FASTCAMAPS-RX, Photron 社製) を新たに設置することで、刃先近傍で生じるプラズマ発光を可視化する。プラズマ発光は瞬間的に生じるため、レーザ発光のタイミングと高速度カメラのシャッタータイミングを同期させて撮影を行った。高速度カメラの撮影速度 (Frame rate) は 15000 fps, シャッター速度 (Shutter speed) は 1/15000 s に設定した。

なお、本実験では、パルス間隔が異なる 3 条件 (0.2  $\mu$ m, 2  $\mu$ m, 20  $\mu$ m) での PLG 加工におけるプラズマ発光観察を行った。ここで、パルス間隔とはパルスレーザが 1 回照射される間に工具が左右に移動する距離である。したがって、パルス間隔が小さい場合、工具の表面に重なってレーザが照射される。

図 5 は、加工される工具のエッジを鉛直方向上側 (レーザ照射の上流側) から見た時の加工面の形状を模式的に図示したものである。一発のレーザ照射毎に理想的にエッジ部が除去された場合、図 5 に示すようなエッジ形状が創製されると考えられる。ここで図中の  $x$  がパルス間隔を意味する。すなわち、 $x$  が小さいほどより平坦なエッジが形成される (理論粗さ  $R_{max}$  は小さくなる)。

## 3. 実験結果

### 3・1 典型的な実験結果 (パルス間隔が 2 $\mu$ m の場合)

図 6 に典型的な観察結果 (パルス間隔 2  $\mu$ m の場合) を示す。同図は各 pass (加工する工具を図 1 左図において左

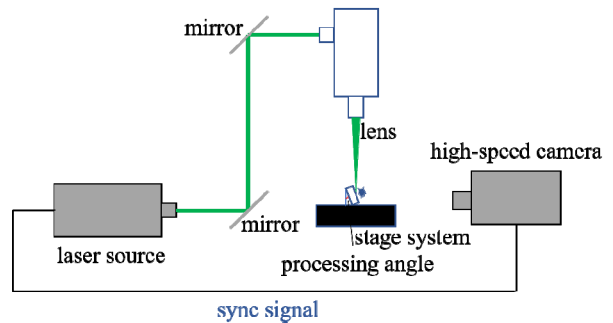


図 4 刃先成形過程インプロセス計測システムの概要

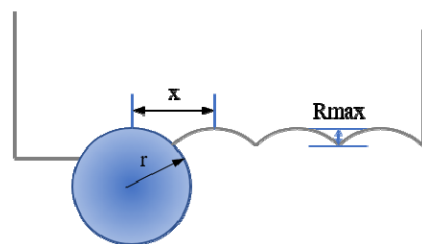


図 5 パルス間隔の模式図

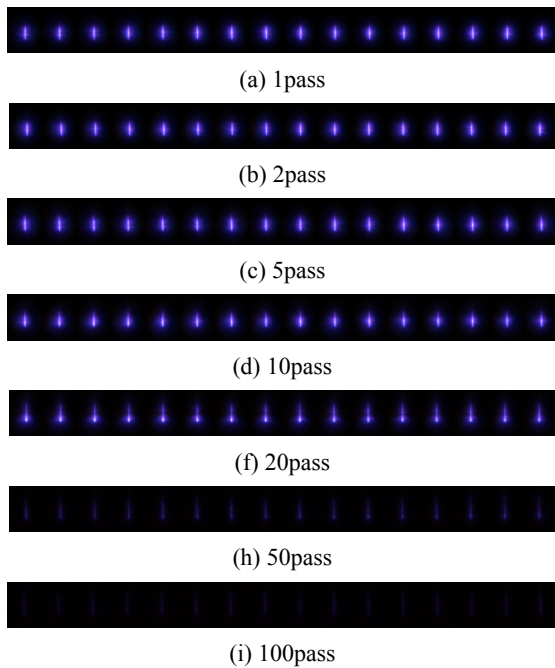


図6 典型的な観察結果

右の駆動1回を1 pass とする)において、レーザ照射一発毎に生じるプラズマ発光の様子をまとめたものである。同図より pass 数が増えるごとにプラズマ発光の強度は徐々に低下して、50 pass 時では非常に強度が低く、100 pass 時ではプラズマ発光が生じていないことがわかる。これは、100 pass 目となる以前に加工が終了し、100 pass 目ではレーザ光は材料に照射されてはいるが、工具加工面の角度(図2の $\phi$ )がレーザ照射で除去加工ができる閾値以下になっていることを意味する。この閾値は表面の光の吸収率に依存するため、材料毎に異なる値となる。以上より、プラズマ発光の強度変化を観察することで、刃先加工が終了するまでの過程を可視化可能であることがわかる。

図7は図6に示した観察結果を拡大したものと工具表面写真および粗さ曲線を比較した結果である。1 pass 目では、プラズマ発光が複数の点として離散的に表れている。プラズマ発光が均一的ではなく、すなわち均一な加工が生じていないことがわかる。粗さプロファイルからも明らかな通り、表面は粗く、局所的で疎らな加工が生じていることがわかる。その後、pass 数が増加すると徐々にプラズマ発光は均一化されていき、20 pass 目では完全に均一なプラズマ発光が形成されている。同図より、均一化にともない表面の粗さも減少している様子がわかる。

以上をまとめると送り2  $\mu\text{m}$  の場合では、徐々に加工が均一化していき(序盤では粗さの粗いところが選択的に加工されて)最終的に平滑な面が形成されている様子がわかる。また、5, 13, 20 pass の発光写真を比較すると明らかなように発光分布の重心は徐々に下方向に移動しているようである。これは、上流側(図1における上側)から徐々に加工が進展していることを意味する。

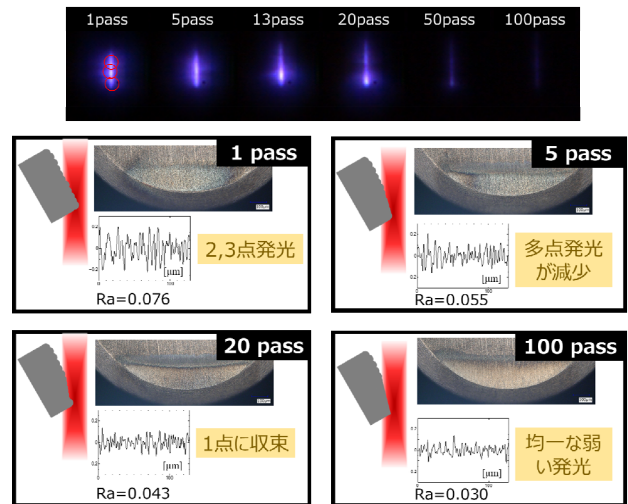


図7 表面成形過程の様子

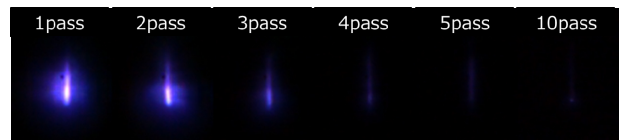


図8 パルス間隔 0.2  $\mu\text{m}$  の場合の観察結果

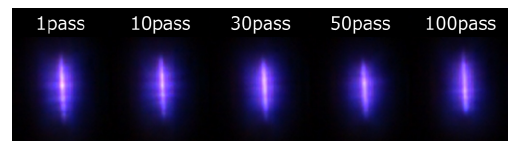


図9 パルス間隔 20  $\mu\text{m}$  の場合の観察結果

### 3・2 パルス間隔の違いが加工プロセスに与える影響

図8と図9にパルス間隔が0.2  $\mu\text{m}$  および2  $\mu\text{m}$  の場合のプラズマ発光観察の結果を示す。同図より、パルス間隔が0.2  $\mu\text{m}$  の場合では、5 pass 前後で加工が終了している(図6のパルス間隔2  $\mu\text{m}$  の場合よりも少ない pass 数で加工が終了している)ことがわかる。逆に20  $\mu\text{m}$  の場合では100 pass 後もプラズマ発光が見られ、加工終了までの pass 数が多くなっている。

図10にパルス間隔が異なる3条件の場合(0.2  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ )でのプラズマ発光観察の結果を比較する。ただし、比べる pass 数の値は異なっていることに注意が必要である。同図より0.2  $\mu\text{m}$  の場合ではプラズマ発光の分布が左右で非対称になっている様子がわかる。一方で、20  $\mu\text{m}$  の場合では加工が進行してもプラズマ発光の分布がほとんど変化しておらず明らかに異なるモードでの表面加工が生じていることがわかる。

図11は図10の結果をもとにして、パルス間隔が0.2  $\mu\text{m}$  の場合での刃先形成メカニズムを模式的に表したものである。パルス間隔が小さいということは、各パルス照射

における照射範囲が何度も重なっていることを意味する。したがって、初期の加工で加工された加工領域から少しずれた位置にレーザが照射される。以降のレーザはそれ以前の加工により形成された斜面に照射される。その結果レーザ光は反射して谷部のフルエンスが局所的に大きくなる。局在化したレーザ光により、理論的な工具加工面の角度（図2の $\phi$ ）よりも大きな角度での加工が局所的に生じてしまう。以降、繰り返し走査してもこの局所的な加工を修正することができず大きな谷が形成されたままとなる。その結果、表面の粗さが形成されると考えられる。

一方で、パルス間隔が  $20 \mu\text{m}$  では、加工の進行によらず左右に均一なプラズマ発光が観察された。これは、照射間隔が広いために図 11 に示した斜面での反射効果が生じていないことを意味する。

最後に図 12 に異なる 3 条件における加工面の写真および表面粗さの値を示す。同図よりパルス間隔が  $2 \mu\text{m}$  の場合で表面粗さが最適（一番小さい）であることがわかる。パルス間隔が小さい場合は前述の斜面反射に基づく過加

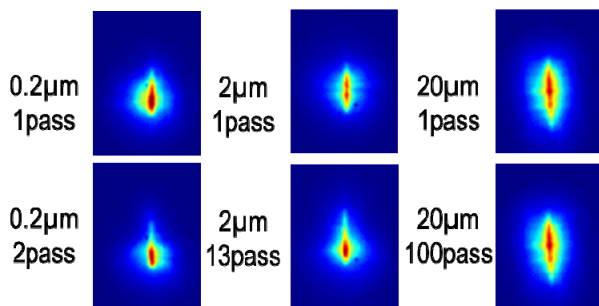


図 10 パルス間隔がプラズマ発光分布に及ぼす影響

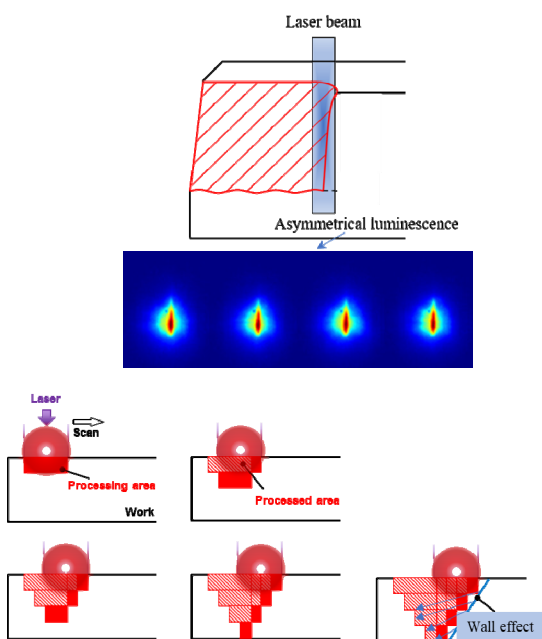


図 11 パルス間隔  $0.2 \mu\text{m}$  の場合の刃先形成メカニズム

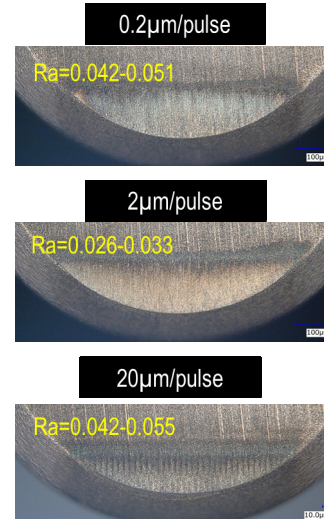


図 12 パルス間隔が表面粗さに及ぼす影響

工（理論角度よりも深く加工されてしまうこと）が生じたためであると考えられる。また、パルス間隔が大きい場合は、各パルス毎の重なりが小さく初期に形成された深い溝を平滑化できていないことがわかる。

#### 4. 結言

PLG 加工で生じるプラズマ発光を観察することで、工具刃先形成過程のインプロセス観察を行った。パルス間隔が異なる 3 条件でのプラズマ発光観察により、パルス間隔の違いによって工具刃先形成過程のモードが異なることを明らかにした。また、刃先形成モードの違いが加工面の加工後表面粗さに影響することを明らかにした。本研究で開発した刃先形成過程可視化システムを活用することで、PLG 加工における表面形成メカニズムの解明が可能になるものと期待される。

#### 参考文献

- 1) SUZUKI D, ITOIGAWA F, KAWATA K, NAKAMURA T. Using pulse laser processing to shape cutting edge of PcBN tool for high-precision turning of hardened steel. Int J Autom Technol 2013;7:337-344.
- 2) SUGANUMA S, ITOIGAWA F, HAYAKAWA S, MAEGAWA S, NAKAMURA T. Enhancing Cutting Performance of Diamond Coating Tool by Edge Sharpening with Short Pulse Laser. Proc Int Conf Lead Edge Manuf 21st Century LEM21 2015;2015.8:0520-1.
- 3) LIU X, NATSUME K, MAEGAWA S, ITOIGAWA F. Micromachining of polycrystalline CVD diamond-coated cutting tool with femtosecond laser. J Adv Mech Des Syst Manuf 2020;14:1-10