ＰＣＤブレードへの短パルスレーザドレッシングによる極細ダイシング加工技術の開発

近畿大学　理工学部　機械工学科
准教授　藤田　隆
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022232-B3）

キーワード：Polycrystalline diamond，フェムト秒レーザ，ダイシング

１．研究の目的と背景

二酸化炭素による地球温暖化への対策は，人類にとって極めて大きな課題である．エネルギーの電力化率が増大していくなかで，電力を効率的に運用する省エネルギー技術の開発は急務である．その実現に向け SiC デバイスをはじめとしたパワーエレクトロニクス技術の役割が重要になっている．電気自動車(EV)では，インバータに使用される SiC デバイスの普及が大いに期待されるが，現状 SiC デバイスは市場に広く浸透していない．これは，SiC 基板が極めて硬く難削材であるため，工具や研磨剤を多く消化し加工コストが極めて高いことが一因とされる[1]．

従来の SiC 基板の加工方法では，超音波振動を援用したブレードによる加工[2]やレーザ光を基板内部で集光して内部クラックを用いて切断する加工アプローチ[3]があるが，いずれも SiC 基板にクラックを形成しながら脆性破壊による加工法で，加工後にクラックを除去する研磨を必要とする．そのため，クラックのない状態を確保して微細加工する効果的加工技術は現存しない．

本研究では，極微細かつクラックフリーで持続的な鏡面加工を実現する次世代ダイシング加工技術を開発することを目的とする．一体の多結晶ダイヤモンド（PCD：Poly-Crystalline Diamond，以下 PCD とする）を使用した極薄ブレードの先端に極短パルスレーザを照射し，ランダムかつ鋭利な微小切れ刃を形成するレーザドレッシング技術を開発する．PCD は，ダイヤ結晶粒が 90%以上の含有率で稠密状態かつ均質であることから，極短パルスレーザで局所アブレーションの重ね合わせにより，ブレード先端は極めて鋭利かつ高密度な 3 次元の切れ刃体の形成が期待できる．本研究では，この極短パルスレーザにより，微細 3 次元切れ刃を有するブレードを試作し，SiC 基板に代表される難削材に対し，極細かつクラックフリーのダイシング加工評価を試みたので報告する．

２．本研究のアプローチ

2.1　レーザによる PCD 先端への切れ刃形成

図 1 に従来砥石と比較した PCD 砥石の特徴を示す．一般的な研削砥石の場合，結合材に埋め込まれた砥粒が切れ刃として被削材に作用する．結合材が摩耗により交替することにより，新しい砥粒が突き出して切れ刃として作用する．そのため，従来ブレードでは一つの砥粒が切れ刃となるため，まばらな切れ刃として形成される．また，切れ刃のサイズとして，ミクロンオーダかそれ以下の切れ刃サイズとなると，砥粒のサイズをミクロンオーダとする必要があるが，このサイズの砥粒では，結合材内に埋め込まれるか，突き出ると容易に脱離してしまうため，微小な切込みを与える切れ刃として作用させることは難しい．ある程度の大きさの砥粒とすると，被削材に対して材料の臨界切込み深さ以上の切込みを与えてしまい，被削材に致命的なクラックやチッピングが発生する原因となる．SiC は脆性材料であり，臨界切込み深さは 0.1 μm 程とされる[4]．クラックなく延性モード加工するには砥粒の切込みが 0.1 μm 以下であることが求められる．

本研究で取り組む PCD ブレードでは，単結晶ダイヤモンドに匹敵する極めて高硬度材料の PCD を使用する．極めて硬い SiC 基板に対しても切れ刃が砥石側に押し戻されることなく所望の微小切込みを与える．また，PCD は単結晶ダイヤモンドの焼結体で，各ダイヤモンド粒子の結晶粒界が 3 次元的な高密度切れ刃構造を形成する．その結晶粒界で形成される切れ刃は，凹凸部分の凸部のすべてが切れ刃として作用するため非常に高密度な切れ刃となる．

今まで，本研究では，PCD 表面を放電加工によって荒らし，恣意的に粗さを与えて，PCD 表面に 3 次元高密度切れ刃を形成してきた．放電加工では，放電オイル等の特

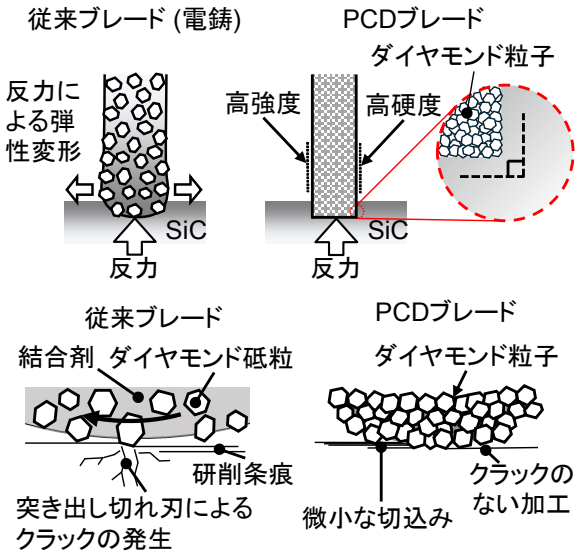


図 1　従来ブレードと比較した PCD ブレードの特徴

殊な放電環境を形成することを必要とする．そのため，たとえば切れ刃先端部を加工中に同時に再生することなどは難しい．将来的に，被削材の加工と同時に先端の切れ刃の再生・ドレッシング技術を実現する場合，その場加工が可能なレーザによるドレッシング技術が期待される．

そこで，本研究では，極短パルスレーザにより PCD 表面に微小な凹凸の切れ刃を形成することを試みる．切れ刃先端の結晶性の損傷をなくし，高硬度高強度を維持する高密度な微細切れ刃を形成することを試みた．

2.2　短パルスレーザによる切れ刃形成

図2 に長パルスレーザと比較した短パルスレーザの切れ刃形成の原理図を示す．長パルスレーザの場合，レーザを照射した際に，レーザによるエネルギーが PCD 内部に熱として吸収されるため，ダイヤモンド粒子が一部溶解することが懸念される．それに対して，ピコ秒ないしはフェムト秒の短パルスレーザの場合，レーザアブレージョンによりダイヤモンドが熱で溶融せず，プラズマ化してそのまま昇華することが期待される．その結果，PCD 面は微小な凹凸が形成され，残された面は表面がグラファイト化することなく，極めて高硬度高強度な微小切れ刃が形成されることが期待される．また，照射スポット径がある程度数十 μm 径であったとしても，そのスポット内にも微小な切れ刃が形成され，3 次元的な高密度切れ刃が形成される可能性もある．このようなことから，切れ刃先端にフェムト秒レーザを照射し，ブレードの加工作用面に高密度切れ刃を形成することを試みた[5]．

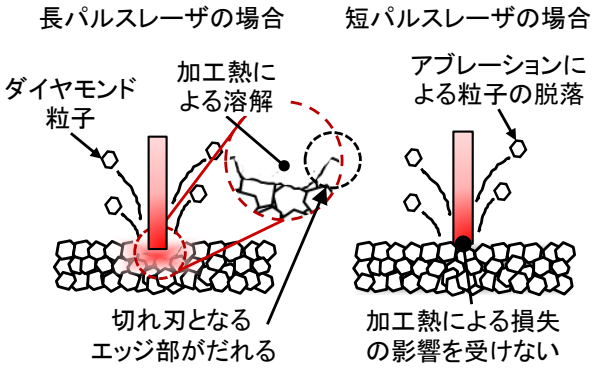


図 2　パルスレーザを用いた PCD の切れ刃形成

3．フェムト秒レーザによる PCD ブレード先端加工

PCD ブレード先端部の切れ刃形成において，フェムト秒レーザを使用し，等間隔の切れ刃形成を試みた．図 3 に使用したフェムト秒レーザ装置を用いたブレード外周端への切れ刃形成した際の実験装置構成を示す．フェムト秒レーザは光響製 femt-pro を使用した．表1 に本研究で用いた PCD ブレードの仕様およびレーザ照射条件を示す．フェムト秒レーザで形成した切れ刃の鋭利性を確認するために，まずは PCD 平板にレーザを照射し，レーザ痕部分におけるダイヤモンドの結晶性を評価することとした．図4 に，フェムト秒レーザ加工後の PCD 表面状態と粗さ結果を示す．一つのスポット径は 20μm に設定としたが，レーザ痕の中にも微小粗さが形成された形態となり，0.2～0.5μm 程度のサブミクロンサイズの凹凸が形成された．これにより，スポット内の線粗さは，レーザ照射前が Ra4nm であるのに対し，Ra32 nm へ増加した．このレーザスポットを重ね合わせることで，レーザ照射部と照射していない部分での段差が切れ刃になるとともに，照射部内のスポット内の粗さも切れ刃になり得ることを確認した．次に，この微小粗さによる切れ刃が，切れ刃として十分な高硬度を有していることが重要となる．そこで，レーザスポ

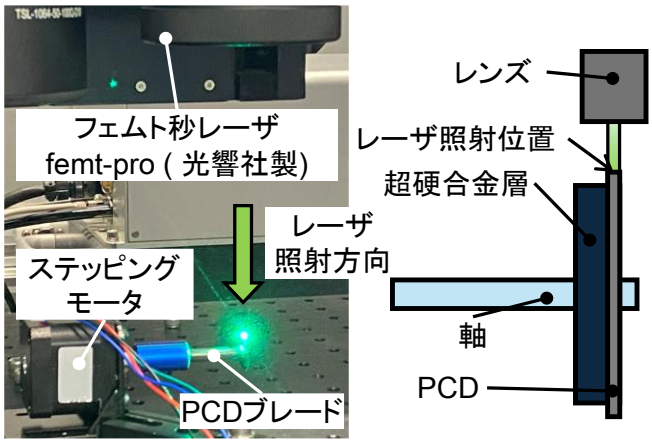


図 3　フェムト秒レーザによるブレード外周端への切れ刃形成の実験装置構成

表 1　ブレードの仕様およびフェムト秒レーザ照射条件

ブレード仕様	母材	PCD (DA200) ダイヤモンド含有率 90%以上 平均粒径 1μm 以下
	直径	17 mm
	回転数	2 rpm
レーザ照射条件	波長	531.2 nm
	周波数	500 fs
	パルス幅	50 kHz

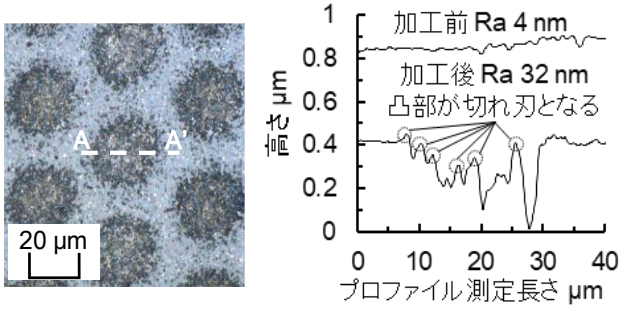


図 4　レーザ加工後の PCD 平面の状態と線粗さ結果

ット部分を切断し，極表面付近の結晶性を，電子線後方散乱回折を用いて評価することとした．

図 5 に，電子線後方散乱回折(EBSD : Electron Back Scattered Diffraction Pattern)によるフェムト秒レーザ照射後の PCD 表面の結晶性評価の結果を示す．試料は，レーザ照射した PCD 基板を FIB(Focused Ion Beam)で切断後，研磨処理して，その断面のレーザ照射した表面部付近を評価した．結晶性がない部分は黒くなるが，結果は極表層まで結晶性が確保されており，ほとんどグラファイト化していないことを確認した．フェムト秒レーザによる短パルスアブレーション加工によって，切れ刃の結晶性を確保した状態で，微小な切れ刃が形成されることを確認した．次に，平板加工と同じレーザ照射条件でブレードを 2rpm で回転させながら，ブレード刃先にフェムト秒レーザを 20μm の一定間隔で照射して，ブレード外周部に一様な切れ刃を形成した．図6 にレーザ加工前後における PCD ブレード外周端の表面状態を示す．レーザ加工前後と比較すると，レーザ照射後には反射する面ではなく微小な凹凸が示唆され，照射された部分と照射されていない部分で境界が識別できる．それに加えて，照射されたスポット内は溶けたような形跡は見受けられず，微小粗さが形成されているように見受けられる．

図7 に，図 6 の位置 B にて同一位置で観察したブレード表面 b-b’（加工前）および B-B’（加工後）のプロファイル測定結果を示す．加工前は Ra 111 nm，Rz 470 nm に対し，加工後は Ra 112 nm，Rz 527 nm と増加した．レーザ痕の内部にも，微小な凹凸が新たに形成されていることを確認した．これらの微小な凹凸すべてが 3 次元的な高密度切れ刃として作用することが期待される．このような微小凹凸はブレードの進行方向のみならず，ブレードの横断方向にも同様のピッチで形成されている．そのため，一つの切れ刃の幅方向にもサブミクロンオーダの研削幅で加工が進行し，極めて細い幅でほぼ鏡面状態の研削面が得られると期待される．

４．レーザ加工された PCD ブレードによる溝加工

図 8 に，新しくレーザで切れ刃を形成した PCD ブレードによる SiC 基板への溝入れ加工特性を評価するための加工装置外観を示す．スピンドルは，高速スピンドル（NR-2351，ナカニシ社製）を使用した．ブレードは軸付きブレードを使用し，直径は 17mm とし，ブレード厚みは 20μm とした．送りステージは AC サーボもータ（HIWIN 社製）を使用し，送り速度は 0.1mm/s とした．調整後のブレードの軸方向の振れは，Keyence 社製レーザ変位計 LK-H050 にて測定した結果，4μm であった．表 2 に，実験条件を示す．今回，レーザアブレーションにより微小に切れ刃付けしたブレードにて，溝底の表面粗さの向上を主眼に評価することとした．

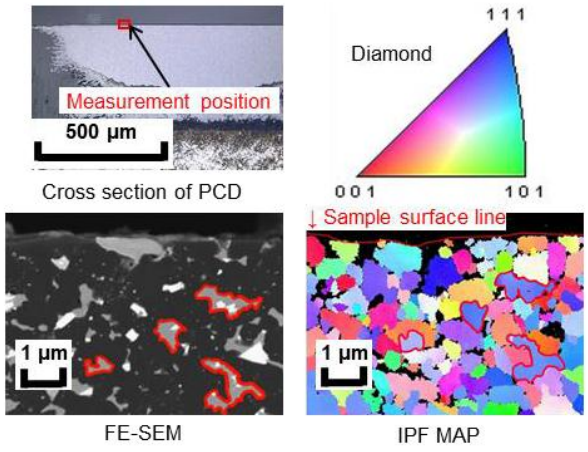


図 5　電子線後方散乱回折(EBSD : Electron Back Scattered Diffraction Pattern)によるレーザ照射後 PCD 表面の結晶性評価の結果

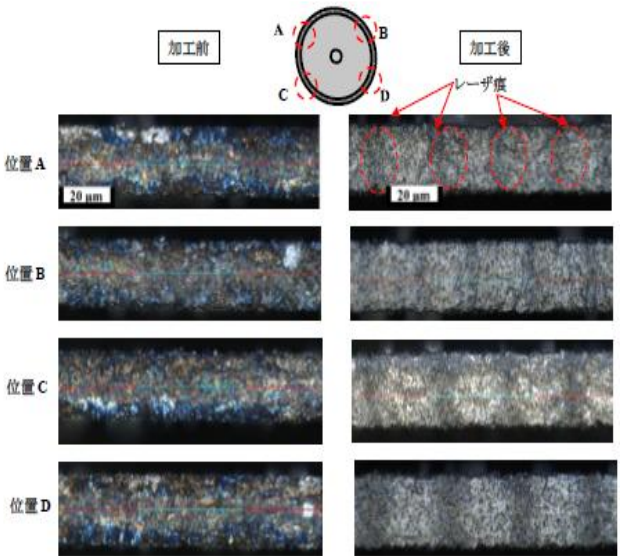


図 6　レーザ加工後の PCD ブレード外周端の表面状態

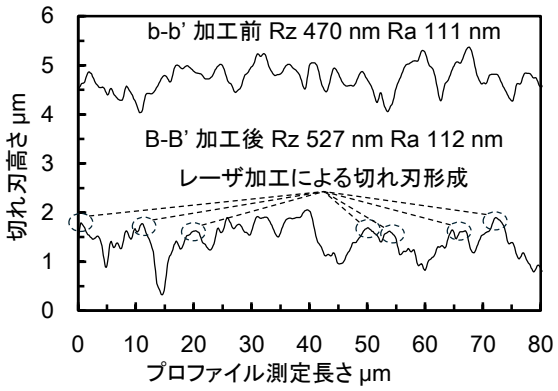


図 7　レーザ加工前後のブレードプロファイル測定結果

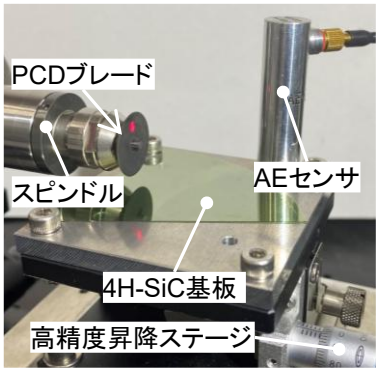


図 8　実験装置の外観

表 2　実験条件

ブレード材質	多結晶ダイヤモンド 住友電工ハードメタル製 DA1000 ダイヤモンド含有率 89%
加工サンプル	4H-SiC (Si 面)
送り速度	0.1 mm
ブレード直径	17 mm
ブレード厚み	20 μm
回転数	50000 min^{-1}
切込み深さ	16 μm

図 9 に，4H-SiC のサンプルに溝入れ加工した結果を示す．溝の側面はワレが生じた．これはブレードの振れの影響と考えられ，ブレードの軸方向に 4μm 振れていることによるものと考えられる．加工後の微小溝における溝底の線粗さ Ra は 1nm となり，研磨に匹敵する鏡面状態を得た．これは，微小な切れ刃が微小に切込み除去した結果であると考えられる．ただし，ところどころに黒点やラインクラックが存在した．これは，ブレードが，径方向にも軸方向と同程度触れており，ブレード全周の切れ刃が均等に作用せず一部が作用したことによると考えられる．そのため，試料の送りに対して，切れ刃の切込みが一部追い付かなかった可能性がある．これは径方向の振れを軽減し，全ての切れ刃が均等に作用することで解消すると考えられる．また，ブレードの進行方向に対する垂直な方向の C-C'においても，明瞭な研削条痕は見られない．線粗さ Ra は 19 nm と極めて微小な粗さでほとんど鏡面である．今後，レーザで微小な切れ刃を形成するとともに，軸の振れを軽減することで，一つの切れ刃が除去する切り屑をナノオーダに近づけ，理想的な鏡面状態を形成することを試みる．

５．まとめ

極短パルスレーザにより微細 3 次元切れ刃を有する PCD ブレードを試作し，SiC 基板に代表される難削材に対し，極細かつクラックフリーの鏡面溝入れ加工を試みた．

(1) フェムト秒レーザ装置を用いてブレード外周端への切れ刃形成した結果，0.2～0.5μm 程度のサブミクロンサイズの凹凸を形成した．

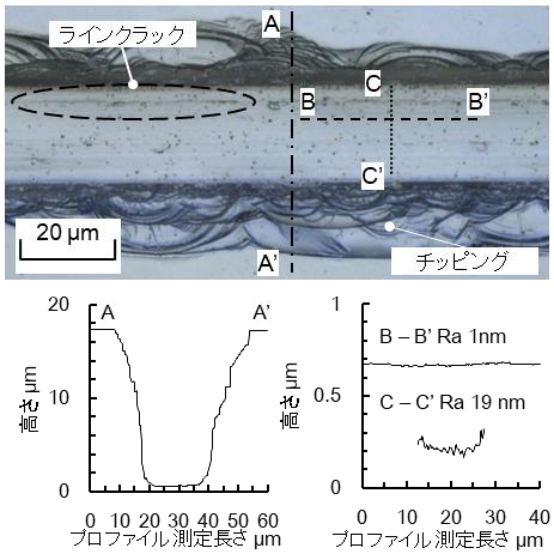


図 9　SiC 基板へ溝加工した溝断面形状の評価

(2) レーザ照射した切れ刃に相当する箇所について，電子線後方散乱回折(EBSD)にて，結晶性の評価を行った結果，極表面付近まで結晶性が確保されていることを確認した．

(3) レーザ照射した PCD ブレードを用いて SiC サンプルを溝入れ加工した結果，溝底の表面粗さはブレード進行方向で Ra 1nm であり，ブレード横断方向で Ra 19nm と鏡面状態を得た．

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団の一般研究開発助成の支援を受け実施されました．ここに深く感謝申し上げます．

参考文献

1) 河田研治，パワーデバイス用 SiC ウェハ加工の現状と展望，精密工学会誌 Vol.89,No.5(2023) 359
2) 邱暁明，田篠文照，超音波振動用ダイシングソーの開発と電子デバイス部品加工への応用の技術賞受賞とその後，精密工学会誌 Vol.82, No.2 (2016) 128
3) J. Li, B. Liu, Y. Zhang, Dual-stage temporal laser stealth dicing of silicon carbide wafers with continuous crack propagation, Materials Science in Semiconductor Processing, Vol 201, (2026) 110067
4) 和泉康夫，藤田 隆,南　久,渡邉純二,峠　睦,SiC 半導体基板用 PCD ダイシングブレードの開発，砥粒加工学会誌 Vol.60, No.11, (2016) 597-602
5) 小西遥大，藤田　隆，福永涼太，和泉康夫，渡邉純二，PCD ブレード工具による微細加工技術に関する研究（第 2 報），精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2023) C47 pp.221-222