

研究紹介

「難加工基板の高効率精密加工法～前処理工程としてのfsレーザー照射による疑似ラジカル場形成の検討」(共同研究者・黒河 周平)

本研究は、難加工基板の革新的加工プロセスの確立を目指すもので、具体的には、機械加工では高効率な加工が困難な、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)、ダイヤモンドといった硬脆材料を主対象として、疑似ラジカル場の形成法を検討するとともに、加工環境コントロール型密閉式研磨法とPCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining) 法を融合させた革新的密閉式CMP/PCVM融合装置による高効率平坦化加工法を提案するものである。前処理行程としての疑似ラジカル場形成に関して、SiC基板や単結晶ダイヤモンド基板を加工対象として、フェムト秒(fs)レーザーを基板表面に照射することで、加工表面の極表層に微小欠陥種(疑似ラジカル場)を形成する(図1)ための基礎検討を行ったもので、各種表面分析手法や研磨加工を通してその可能性を探った結果を報告する。

極短パルスによるレーザー光のうち、パルス幅が1ピコ秒未満のものをフェムト秒レーザー(fsレーザー)と呼ぶ。すなわち、フェムト秒(10^{-15} 秒)オーダーの極短パルスレーザーであり、その特徴は、極短パルスを集光することでピーク強度がテラ(10^{12})ワットからペタ(10^{15})ワットの領域に達し、この極めて高い強度を持つレーザーの電界により照射面の原子・分子から直接電子をはぎ取るという直接加工が可能となる点にあり、その性質を利用した除去加工が注目を浴びている。あまりにも短い時間でのエネルギー照射であるため、照射部周辺への熱拡散がほとんど起こらないうちに加工が終了し、熱影響部を最小にできるという特徴を持つ。本プロジェクトで新たに導入したfsレーザー加工装置の全体外観写真を図2に、レーザー加工部詳細を図3に示す。パルス幅は400fs未満で、パルスエネルギー200nJ/pulse以上、最大出力2W、パルス最大周波数は10MHzである。

我々の研究目的は基板極表層のみへの疑似ラジカル場形成であるため、まず予備実験では、いわゆるレーザーアブレーションが起こる一歩手前の弱い出力の下で、極表層のみの電子状態を変化させることでその影響の有無を観察することを試みた。レーザー出力を通常のレーザーアブ

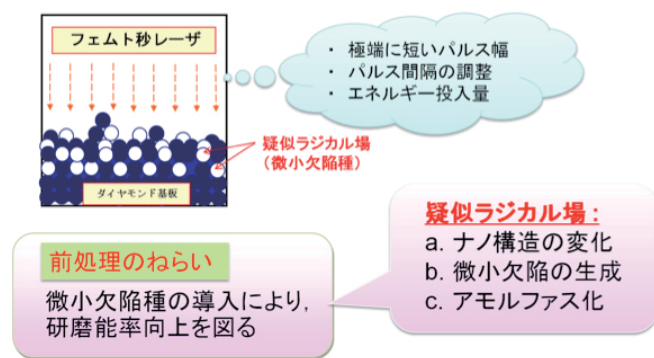


図1 基板の前処理としての疑似ラジカル場の形成コンセプト

レーションが起こる場合の1/5の出力に設定し、ダイヤモンド単結晶基板(5mm角の(100)面)の表面に、波長1045nmのfsレーザーを全面照射した。その後、出力を5倍に上げレーザーアブレーションが起こる出力で表面にラインマーキングを施した。ラインマーキングを含む領域から観察用試料を切り出し、断面TEM観察を行った。ラインマーキング箇所およびその周辺における断面状態を図4(a)のマーキング周辺部では1nm未満の白いコントラストの層が、図4(b)のマーキング部では約10nmの白いコントラストを持つ層が観察された。この白いコントラスト層周辺をさらに詳細に観察するため、高倍率TEM画像の観察を行った。その結果を図5に示す。最表面(領域1)においては、はっきりとした原子配列格子が確認できずアモルファス状態になっていることが分かる。一方、最表面から約30nm程度基板内部に入った表面下領域(領域2)では、規則正しい原子配列が確認でき、本来のダイヤモンド基板の状態を保っていることが分かる。このことから、最表面の約10nm厚程度の部分のみに疑似ラジカル場が形成されていることが明らかとなった。

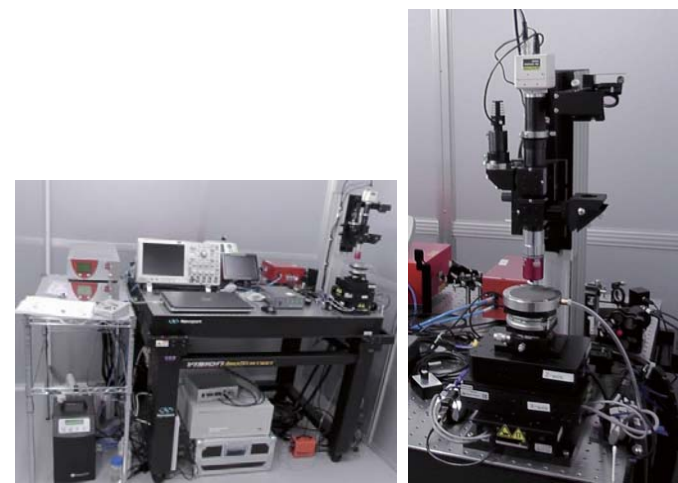
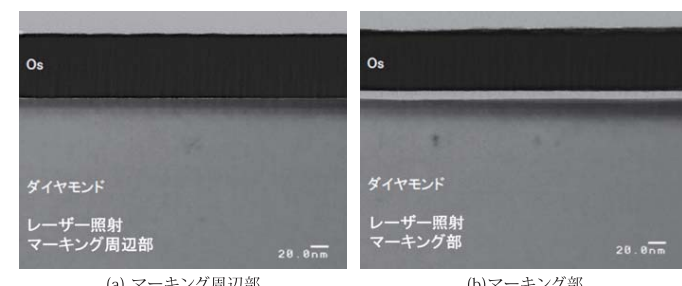


図2 新たに導入したfsレーザー加工装置(全体写真)

図3 fsレーザー加工部詳細



(a) マーキング周辺部

(b) マーキング部

図4 fsレーザー照射ダイヤモンド基板の断面TEM画像

Fsレーザー照射の研磨工程に与える影響を調査する目的で、同一ダイヤモンド基板の異なる領域にfsレーザーの出力を段階的に変えて照射した試料を作成した。その時の基板表面写真を図6に示す。基板上を4つの領域に分け、レーザー出力を747mW、594mW、472mWおよび375mWにて10mm/sのスキャンスピードで照射した。Fsレーザーのパルス周波数は10MHzとした。出力が高い領域ではレーザーアブレーションが発生して黒く変色しており、出力が低くなるにつれてその状態が緩和されていることが分かる。なお、等間隔に配置された黒いマークが見えるが、これは象限を明らかにするために基板裏面に施した刻印である。この基板表面観察においては、非破壊検査法の一つであるレーザーラマン分光により観察を行った。その結果を図7に示す。1580 cm^{-1} 付近の幅広いブロードなピークはアモルファスカーボン由来のピークで、全ての条件で表面がアモルファス化していることが分かる。また、1332 cm^{-1} に鋭いピークが確認できるスペクトルがあり、ダイヤモンド由来のピークを示している。出力が弱くなるにつれてダイヤモンド由来のピークが大きくなってきており、アモルファスとダイヤモンド構造が混在している様子が分かる。レーザーラマン分光は観察深さが1 μm 程度と比較的深い情報を得ることとなるため、極表層の分析が可能なXPS等の表面分析手法と併用することでより詳細な表面状態の解析に繋がるものと思われる。

次に、Fsレーザー照射後の基板に対する実際の研磨の効果を観察するため、研磨レート等が既に明らかとなっている難加工材SiC基板の研磨を通して検討を行った。オフ角4°の4H-SiC基板のSi面に対して、130mW、10MHzにて3mm x 3mmの領域に照射を行った結果と、その基板をコロイダ

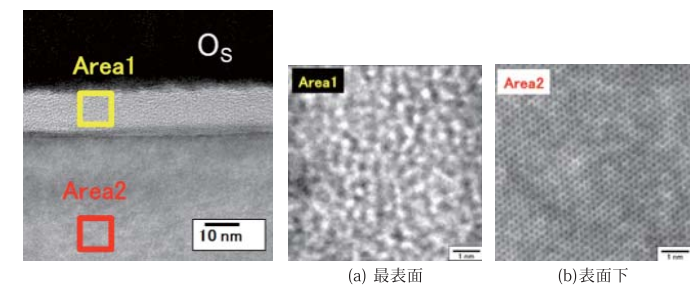


図5 極表層の断面TEM高倍率画像

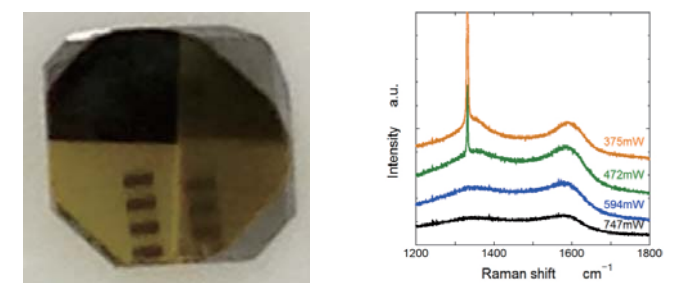


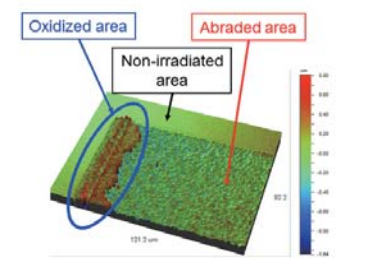
図6 出力別fsレーザー照射を施されたダイヤモンド基板

図7 出力別fsレーザー照射を施されたダイヤモンド基板のラマンスペクトル

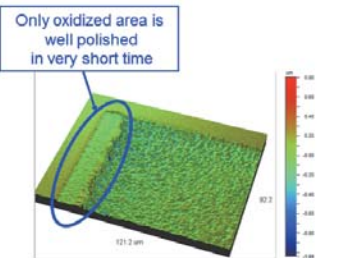
ルシリカで研磨した結果を図8に示す。レーザーアブレーションが起こっている領域の中で、周辺部よりも高く盛り上がっている部分が観察された。これは、fsレーザー照射により基板が酸化されているためと考えられる。そのことは、同じ基板を研磨した結果からも理解できる。すなわち、酸化された部分はコロイダルシリカにて容易に研磨されるため、僅か4分間の研磨で明らかに研磨が進行していることが分かる。レーザー照射されていない部分はほとんど研磨されていないことから、その効果は明らかである。ただし、SiC基板の場合、レーザーアブレーションが起こった部分の表面粗さはダイヤモンド基板に比べて格段に大きくなっているため、このままでは研磨表面を一度大きく荒らす結果となる。そこで、前処理工程としての効果的利用法を考え、SiC基板のラップ加工後の表面に対してレーザー照射を行い、同様の実験を行った。

図9は、4H-SiC基板のラップ面(C面)に対して、fsレーザー照射の有無による研磨後の表面粗さの推移を示したものである。ラップ面そのものと、ラップ面にレーザー照射を施した後の面で、初期の表面粗さはそれほど変わらない。しかしその後の研磨における効果には明らかな差があり、レーザー照射基板については、表面粗さの改善が急速に起こり、短い時間で研磨が進行していることが分かる。ラッピング後のCMP工程での時間短縮効果が明らかに現れており、高効率加工への一つの指針が得られた結果である。

SiC基板で一定の研磨レート向上の成果が得られたため、最終年度はダイヤモンドにターゲットを絞り、疑似ラジカル場形成と研磨結果について、さらに調査する予定である。ダイヤモンド基板の場合、アブレーションが起こる場合でも10nmと言う極表層にのみ疑似ラジカル場が形成されたことを考えると、アブレーションを起こす出力+研磨の組合せで得られる効果に期待がかかる。今後の成果が楽しみである。



(a) 130mWで照射された基板表面



(b) 4分間研磨後の表面

図8 fsレーザー照射を施されたSiC基板(Si面)と研磨後の表面状態

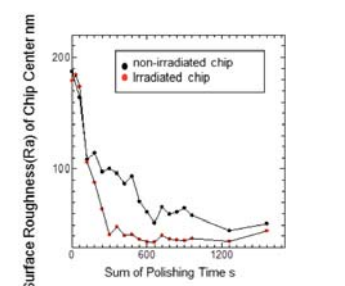


図9 fsレーザー照射の有無による研磨後の表面粗さの推移(SiC基板C面)