

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：82401
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01231
研究課題名（和文）サファイア毛細管の超短パルスレーザー/ダイヤモンド加工能強化とプロセスリンク最適化
研究課題名（英文）Ultrashort pulse laser / diamond processing capability enhancement and process link optimization on sapphire capillary
研究代表者
片平 和俊（Katahira, Kazutoshi）
国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員
研究者番号：70332252
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：フェムト秒レーザー成形および微細ダイヤモンドミリング、それぞれのパフォーマンスを強化/最大化させることで、高精度サファイアキャピラリの開発に資する研究を実施した。とくに微細PCD工具を用いて、サファイアに対して高精度に効率良く、かつ鏡面加工を達成するためには、工具最表面のダイヤモンド突出をいかに均一に、最適に制御するかがカギである。PCD工具表面に対し、放電成形後にツルティングを行い平坦化させた工具、放電成形のみでダイヤモンド砥粒の突き出しを確保した工具という2種類の工具を用い、両者の加工特性の違いを詳しく調べることで多結晶ダイヤモンド砥粒の突き出しの有無が加工面仕上げに及ぼす影響について検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果物として小型のレーザープラズマ加速器が想定される。本装置は物理学のみならず、生物・化学系、医学系の研究分野において幅広い普及が期待され、最先端の学術的横断研究領域を支える画期的な独自基盤ツールと成り得る。多岐に渡るニーズに応えるために、サファイアの三次元複雑形状および高品位表面性状を得るための超精密加工技術の開発が求められる。高出力超短パルスレーザーおよび各種先進ダイヤモンド工具による超精密加工技術の強化自体が我が国のものづくり基盤の底上げをもたらすとともに、サファイア高精度微細加工自体が幅広いアプリケーションへの応用展開が期待できるため学術的・工業的波及効果は計り知れない。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research to contribute to the development of high-precision sapphire capillaries by enhancing and maximizing the performance of both femtosecond laser forming and micro diamond milling. In particular, to achieve mirror-finish machining of sapphire efficiently and with high precision using micro PCD tools, the key is how to uniformly and optimally control the protrusion of diamond grains on the top surface of the tool. We used two types of tools: a tool with a flattened surface after truing after electric discharge forming, and a tool with protruding diamond grains ensured only by electric discharge forming. We investigated the differences in the machining characteristics of the two tools in detail to verify the effect that the presence or absence of protruding polycrystalline diamond grains has on the machined surface finish.

研究分野：超精密加工 表面改質 レーザ成形

キーワード：多結晶ダイヤモンド サファイア フェムト秒レーザー 超精密加工 微細加工

1. 研究開始当初の背景

近年、単結晶サファイア（以下サファイア）の産業ニーズは益々広がっている。例えば、サファイア製のマイクロリアクターが、医療診断や化学合成向けの小型・高速反応の次世代型デバイスとして期待されている。マイクロリアクターとは、数 cm 角の透明材質基板上に、幅および深さ数十～数百 μm の流路を形成し、化学・生化学のプロセスを集積化したものである。その素材としては、サファイアのように、化学的に安定で酸・塩基溶液にほとんど侵されない、かつ分析のために赤外から紫外まで広範な光透過性を有するなどの特性が必須となる。他にも最先端の素粒子物理学を支えるレーザプラズマ加速器においても、キーパーツとなるレーザガイド（サファイア製キャピラリ）に利用されており、難加工材であるサファイアをいかに精度よく高品位に加工できるかが課題となっている。これら多岐に渡る最先端ニーズに応えるために、サファイアに対して三次元複雑形状かつ高品位表面性状を達成するための超精密加工技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、いくつかの最先端加工技術（フェムト秒レーザ成形、微細ダイヤモンドミーリング、超精密研削）それぞれのパフォーマンスを強化/最大化させるとともに、それらのプロセスリンクを至適化することで、長尺高精度サファイア製キャピラリの開発に資する研究を実施するとともに、得られた成果をさらに掘り下げることで新規アプリケーション拡充を狙う。とくに、多結晶ダイヤモンド（Polycrystalline Diamond：以下 PCD）によるサファイアの高品位高効率加工法の開発に注力したことから、この点に焦点を絞って報告する。PCD は、へき開性や硬度の異方性がなく、単結晶ダイヤモンドと比較してコスト的にも有利なことから、これまでも高効率切削工具として広く用いられている。とくに最近では、金型鋼や超硬合金に対し、PCD 工具を用いて超精密加工する際には、工具の表面を研磨し、ダイヤモンド砥粒の突き出し高さを均一にそろえることで、より高品位な加工面を得られるという報告があり、学術的にも工業的にも一定の成果が確認されている。しかしながら、サファイアほどの高硬度かつ脆性な難加工材に対し、ダイヤモンド砥粒の突き出し高さをそろえた工具が有効であるか検証した例はない。さらに、大面積あるいは長尺溝加工を行う際に、加工距離が延伸することによる工具の加工性能劣化が懸念されるが、この点について論じている報告は極めて少ない。本研究では、工具表面の研磨の有無によりダイヤモンド砥粒の突き出し高さが異なる 2 種類の PCD 工具を用い、両者による単結晶サファイアの加工特性の差異を検証した。さらに、上記 2 種類の工具のうち、サファイア加工に適する一方を見極めたうえで、切込み量および送り速度を変えた際の加工特性を評価した。

3. 研究の方法

被加工物である単結晶サファイアは六方晶材料であり、結晶のすべり面は、 $A\{11\bar{2}0\}$ 、 $C\{0001\}$ 、 $m\{10\bar{1}0\}$ 、 $R\{01\bar{1}2\}$ である。本実験では被加工物の $C\{0001\}$ 面に対して加工を行った。

本実験では、直径 600 μm の PCD ボールエンドミルを用いた。研磨を施していない工具（単に PCD 工具と称する）および工具表面を研磨仕上げすることによりダイヤモンド砥粒の突き出し高さを均一にした工具（Polished PCD 工具と称する）の 2 種類を使用した。両者の外観および表面プロファイル測定結果を図 1 に示す。工具表面の研磨の有無によりダイヤモンド砥粒の突き出し高さが異なることが確認できる。なお、PCD 素材のダイヤモンド平均粒径は 1 μm 、ヌーブ硬さは 5000 kgf/mm^2 である。

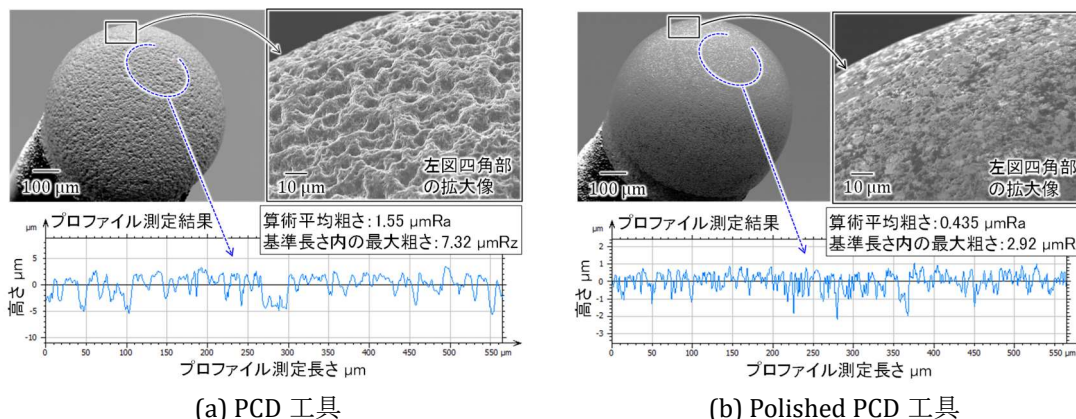


図 1 本実験に使用した 2 種類の PCD 工具の外観および表面のラインプロファイル測定結果

同工具を用いて、表 2 の条件下で、サファイアに対してミーリング加工を行い、その加工特性を評価した。本実験では、基本的な加工特性を把握するために、軸方向の切込み量と送り速度を変える単純な溝加工を実施した。なお、先行研究を参照して工具傾斜角度は 30°とした。加工装置は、エアタービンスピンドル主軸を有し、リニアモータ駆動による 3 軸の直進送り軸および 2 軸の回転軸で構成された超精密加工機を使用した。図 2 に加工実験の様子を示す。切削抵抗の測定には、マルチチャンネルチャージアンプを用いた。工具観察には、走査型電子顕微鏡（以下 SEM）を使用した。加工した溝の形状測定および工具刃部の表面性状測定には、白色光干渉顕微鏡および非接触表面性状測定装置を用いた。

表 2 加工条件

被加工物	単結晶サファイア (10 mm×10 mm×1.5 mm)
工具回転数, min ⁻¹	50,000
クーラント	オイルミストブロー (非塩素油脂系不水溶性油)
切込み量, μm	0.2, 0.5
送り速度, mm/min	2, 5, 10, 20, 30, 50
工具傾斜角度, deg	30



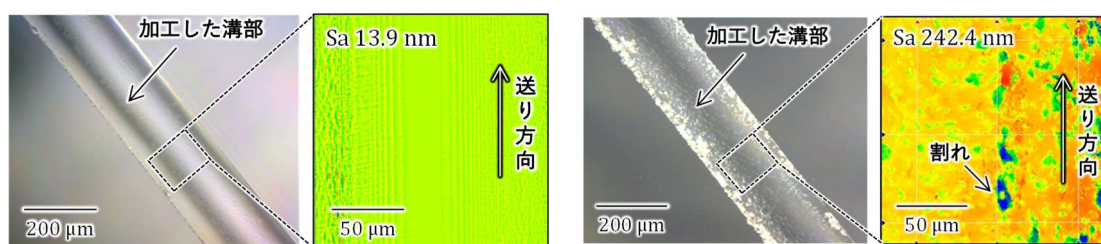
図 2 加工実験の様子

4. 研究成果

(1) 砥粒突き出し高さの異なる 2 種類の工具によるサファイア加工特性の比較

砥粒突き出し高さの異なる 2 種類の工具を用いてサファイアの微細溝加工を行い、加工後の加工面性状および加工時の切削抵抗値の評価を行った。本実験における加工条件は、切込み量 0.2 μm、送り速度 5 mm/min とした。図 3 に加工面観察結果および表面粗さ測定値を示す。同図 (a) の PCD 工具を用いて加工した表面には、目立った凹凸や割れは確認されない。算術平均粗さは 13.9 nmSa であり、延性モードによる高品位加工が達成できているといえる。一方、同図 (b) の Polished PCD 工具を用いて加工した表面には、全体的に凹凸や割れなどを表す斑点状の切削痕が目立ち、脆性破壊を主体とする加工が行われたことが確認できる。また、算術平均粗さは 242.4 nmSa であり、同図 (a) で示した PCD 工具による加工結果と比較して粗いこともわかる。図 4 は、総加工深さ 10 μm 時点における切削抵抗（背分力）の測定結果である。PCD 工具および Polished PCD 工具の切削抵抗を最大値の平均で比較すると、前者は 0.24 N であるのに対し、後者は 0.58 N であった。

以上より、Polished PCD 工具に比べ PCD 工具の方が高品位な加工面が得られた理由としては、切削抵抗の上昇を抑えつつ延性モードで安定な加工が達成できたためであるといえる。また、他の研究では、超硬合金の加工において、PCD 工具表面を研磨することで、砥粒表面が平坦に仕上



(a) PCD 工具を用いて加工した溝

(b) Polished PCD 工具を用いて加工した溝

図 3 砥粒突き出し高さの異なる 2 種類の工具で加工した微細溝のマイクロスコープ（左）および白色干渉計（右）による観察像と表面粗さ測定結果

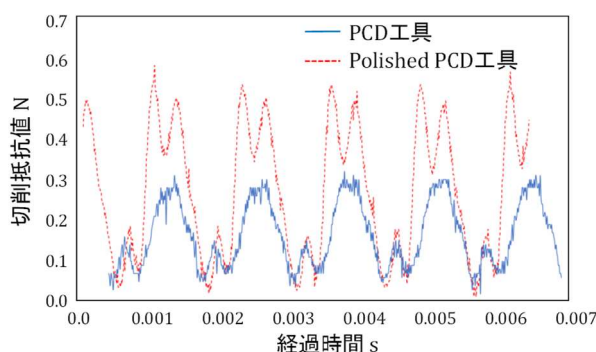


図 4 切削抵抗値測定結果

げられているため、砥粒エッジ箇所が微細でシャープな切れ刃として作用し、延性モードで高品位加工が達成できるという報告がある¹⁰⁾。しかし、本実験結果より、サファイアほどの高硬度な脆性材料の加工においては、上述の加工メカニズムが機能しなかったために、Polished PCD 工具では高品位加工を達成できなかつたと推察される。すなわち、サファイアに対して微細溝加工を行うには、PCD 工具表面を研磨せず砥粒の突き出しを確保することで、いわゆる“研削効果”を積極的に発現させることが有効であると考えられる。次節では、PCD 工具を用いて、切込み量および送り速度を変化させた実験を行い、サファイアの基礎加工特性を評価する。

(2) PCD 工具を用いたサファイア加工における切込み量と送り速度の影響

まず、送り速度を 5 mm/min 一定とし、切込み量を 0.2 μm および 0.5 μm と変化させて加工実験を行った。加工後の表面性状および表面粗さ測定結果を図 5 に示す。切込み量 0.2 μm では、算術平均粗さは 14.8 nmSa であり、加工面は全体にわたって滑らかであった。一方、切込み量 0.5 μm では、算術平均粗さは 163.6 nmSa と高い値を示し、凹凸が目立つ表面であった。よって、PCD 工具によるサファイア加工において高品位な加工面を得るためには、本実験条件下では切込み量は 0.2 μm が適していることが確認できた。

次に、切込み量を 0.2 μm に統一し、送り速度を 2~50 mm/min に変化させ実験を行った。送り速度と算術平均粗さ Ra の関係を図 6 に示す。同図より、送り速度の上昇に伴って算術平均粗さが増加していることがわかる。本実験条件下で送り速度が最も小さい 2 mm/min において、算術平均粗さ 3.2 nmRa という値が得られている。これは、同材に対して遊離砥粒を用いて研磨加工を施した場合に得られる表面粗さに匹敵する高品位な表面性状といえる。本実験条件下においては、送り速度 2~5 mm/min の領域において、延性モードによる材料除去機構で加工が行われたものと考えられる。さらに、送り速度を上げていくと、送り速度 10 mm/min より、加工面の算術平均粗さは急増していることから、この送り速度付近より材料除去機構が脆性モードに遷移し、加工面の損傷も顕著となったと考えられる。

以上のとおり、PCD ボールエンドミルを用いて、サファイア等の硬脆材料をミーリング加工する際には、ダイヤモンド砥粒の突き出しを維持することが高品位/高効率加工に有効であることを見出した。砥粒突き出しを維持した同工具を用いて、サファイアのみならず、ガラスレンズ金型材である高強度 SiC、耐摩耗構造部材である Si₃N₄、高機能光学素子材である石英や YAG 結晶等に対して高品位/高効率加工を達成している。

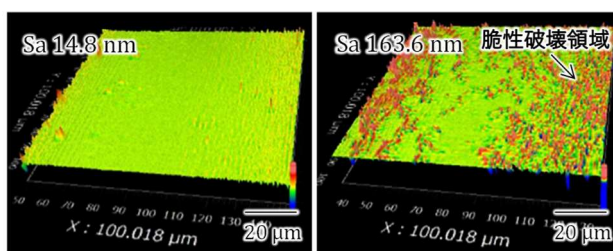


図 5 切込み量を変化させて加工した表面の白色干渉計による観察像と表面粗さ測定結果

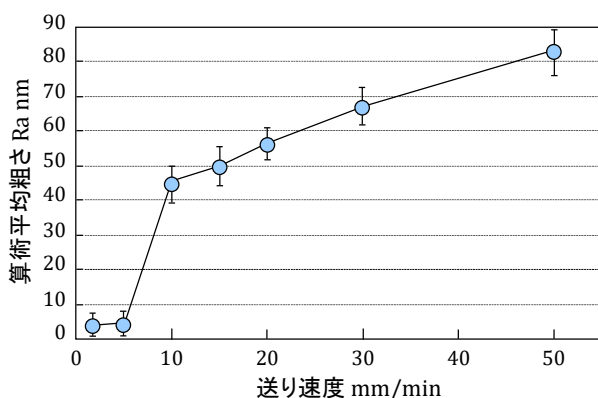


図 6 送り速度と算術平均粗さ Ra の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Katahira Kazutoshi, Ezura Atsushi, Takesue Shogo, Komotori Jun	4. 巻 71
2. 論文標題 Surface modification of titanium alloy via atmospheric pressure nitrogen plasma assisted femtosecond laser irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 469 ~ 472
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2022.04.035	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 片平和俊, 瀧島玖実, 森田晋也	4. 巻 67/3
2. 論文標題 PCDエンドミルによるサファイアの加工特性と工具リコンディショニングの効果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 150 ~ 156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 江面篤志, 片平和俊, 小茂鳥潤	4. 巻 1/68
2. 論文標題 レーザー誘起湿式表面改質法により形成したステンレス鋼改質面のトライボロジー特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 36 ~ 41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Kazutoshi Katahira, Atsushi Ezura, Shogo Takesue, Jun Komotori	4. 巻 71/1
2. 論文標題 Surface modification of titanium alloy via atmospheric pressure nitrogen plasma assisted femtosecond laser irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals - Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 片平和俊, 小河誉典, 青山英樹, 山崎和雄	4. 巻 55/139
2. 論文標題 フェムト秒パルスレーザによるダイヤモンド工具成形	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 56-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kumi TAKISHIMA, Kazutoshi KATAHIRA, Shinya MORITA
2. 発表標題 Experimental investigation on micro-grooving characteristics of sapphire using polycrystalline diamond radial end mill
3. 学会等名 International Conference of Precision Engineering 2022 (ICPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazutoshi Katahira, Atsushi Ezura, Shogo Takesue, Jun Komotori
2. 発表標題 Surface modification of titanium alloy via atmospheric pressure nitrogen plasma assisted femtosecond laser irradiation
3. 学会等名 CIRP General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazutoshi Katahira
2. 発表標題 Diamond tool micro-milling of hard and brittle materials
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazutoshi Katahira
2. 発表標題 Experimental Investigation for Optimizing the Fabrication of a Sapphire Capillary Using Femtosecond Laser Machining and Diamond Tool Micromilling
3. 学会等名 The 2nd Advanced Optical Fabrication for Analyzer Technologies (ADOPTTECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧島玖実, 片平和俊, 森田晋也
2. 発表標題 PCDラジアスエンドミルによる単結晶サファイアの微細溝加工特性に関する研究
3. 学会等名 精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

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