

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号： 8 2 4 0 1
研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間： 2017～2019
課題番号： 1 6 K K 0 1 5 3
研究課題名（和文）フェムト秒レーザーとプラズマアシスト連携による先進ダイヤモンド加工プロセスチェーン（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）Process chain for advanced diamond machining using femtosecond laser processing and plasma-assisted technology(Fostering Joint International Research)
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：7 0 3 3 2 2 5 2
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000 円
渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：大気圧低温プラズマジェットを援用することで、加工中のクーラント効果を促進させ、微細ダイヤモンド工具の加工性能を最大限に引き出す。高純度SiCに対するナノ多結晶ダイヤモンド（NPD）製ボールを用いたミーリング加工においてプラズマ援用クーラントの効果を確認している。NPD工具の更なる高効率・迅速成形プロセスを確立するため、フェムト秒レーザーおよびオンマシン計測システムを駆使することで、NPD工具を1本あたり数分で高精度・高効率に製造可能な技術を確立した。創製した工具の性能を見極めるターゲットとして、レーザープラズマ加速器のキーパーツであるサファイアキャピラリの高精度ミーリングを実施し基礎的知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義
フェムト秒レーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術は、数年以内に我が国でもトレンドとなることは間違いなく。国際的な連携研究に基づいて、一気通貫の先進ダイヤモンド加工プロセスチェーンを打ち立て、早期にビジネスモデル化しておくことで、我が国のみならず世界が注目し導入に乗り出した時点で強力でリーディングできる。さらに、エネルギーや資源を無駄にせず我国独自の精密加工技術の底上げができるという意味で科学技術戦略ビジョンとも合致し、ここに本研究の成果が期待される。例えば、超精密微細金型やバイオデバイス等の生産技術分野を対象に、積極的かつ着実な実用展開を世界的に進める。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to develop a process chain for advanced diamond machining using femtosecond laser processing and plasma-assisted technology. Using the atmospheric pressure plasma jet, the coolant effect during machining was enhanced and machining performance of the microdiamond tool was maximized. The significant effect of using plasma-assisted coolant in high-purity SiC micromilling with a ball end mill composed of nanopolycrystalline diamond (NPD) was confirmed. To establish an efficient and rapid forming process for NPD tools, a processing system was developed that uses femtosecond laser and on-machine measuring systems to produce highly efficient NPD tools in a few minutes. To evaluate the performance of the manufactured tools, high-precision milling of the sapphire capillary, which is a key element of the laser-plasma accelerator, was conducted and successful results were obtained.

研究分野：生産工学

キーワード：ダイヤモンド工具 大気圧プラズマ 超短パルスレーザー サファイア セラミックス 微細加工

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

近年、生化学分野に用いるバイオ分析チップや有機合成マイクロリアクタをはじめ、ミサイル搭載用共振ジャイロ、レーザプラズマ加速器用混合流路など、サブミリサイズの三次元微細構造物をターゲットとしたマイクロ加工のニーズが益々高まっている。それに伴い、小径で高精度な微細ダイヤモンド工具を用いた超精密加工技術の達成精度レベルの更なる漸進が迫られている。マイクロ加工が要求される素材としては、セラミックス (SiC, Si₃N₄, サファイア等) であり、超精密かつ高効率加工が難しい硬脆材料である。研究代表者は、これまで一貫して超精密微細加工/表面機能創発に関わる研究に取り組んできた。最近では、ハイグレードな多結晶ダイヤモンド (Polycrystalline Diamond: 以下 PCD) 工具を用いて、超硬合金や CVD-SiC といった高付加価値材料に対し、研磨レスで粗さが 10 nm Rz 以下の高品位微細形状加工を達成している。今後も幅広い被加工材質へ対応し、かつ後述するナノ多結晶ダイヤモンド (Nano-polycrystalline Diamond: 以下 NPD) 工具の台頭を見据え、超精密加工技術の達成精度レベルを向上させるためには、加工点の瞬時冷却・ナノサイズ切り屑の排出性能の最大化をもたらしクーラント環境を制御することが極めて重要であるという認識に至っている。

一方、近年、人工物で最も硬い素材と言われている NPD が、微細ダイヤモンド工具素材として脚光を浴びている。しかしながら、NPD 素材自体が硬すぎるために従来の研磨仕上げが困難であること、導電性を有さないために放電加工が適用できないこと、などの問題のために、微細かつ形状自由度の高い工具を効率よく作製することは難しいと言われてきた。その課題を解決すべく、最先端の設備と優秀な人材を導入して挑戦的な取り組みを続けているのが、海外共同研究を実施した UC Berkeley/PMC (Precision Manufacturing Center) である。UC Berkeley/PMC では、とくに微細ダイヤモンド工具の高精度・高効率成形に関わる総合技術開発を長年実施しており、数多くの業績を挙げてきた。近年は、超精密 5 軸加工機上にフェムト秒レーザを搭載させたダイヤモンド工具成形専用装置を世界で初めて開発し、そのパイロットテストを開始している。

2. 研究の目的

本共同研究の最大の狙いは、Berkeley/PMC が有する NPD 工具レーザ成形技術と、申請者独自のプラズマ援用クーラント技術の融合連携を図ることにより、工具の作製から活用まで一貫通貫で実現するプロセスチェーン開発である。具体的には以下の 3 課題の達成を目指す。

(1) 大気圧低温プラズマジェットを援用することで、加工中のクーラント効果を促進させ、微細ダイヤモンド工具の加工性能を最大限に引き出すことを目的としている。NPD 製ボールエンドミルによる SiC 加工におけるプラズマ援用クーラントの適用を狙う。

(2) NPD 工具の更なる高効率・迅速成形プロセスを確立するため、ハイパワーのフェムト秒レーザおよびオンマシン計測システムを駆使することで、高精度な NPD 工具を 1 本あたり数分で高能率に製造可能な技術確立を狙う。

(3) 一方、レーザプラズマを閉じ込めて粒子加速させる小型の装置が開発され脚光を浴びているが、同装置の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) をいかに精度よく作製できるかがカギとなっている。本共同研究の新しい展開として、二つの要素技術 (フェムト秒レーザによる高能率・迅速プリフォーミング)、(PCD ミーリング加工による高品位・高精度仕上げ) をシームレスでリンクすることで、サファイア製キャピラリを創製するプロセスチェーン開発にも着手する。

3. 研究の方法

(1) NPD 工具を活かした微細加工技術を確立するためには、工具最表面の切れ刃状態をいかに均一・最適に制御し、切削能力を維持するかがカギであり、さらに加工点の瞬時冷却・ナノサイズ切り屑の排出性能向上をもたらしクーラント環境を制御できる新たなアシスト技術が必要となる。本研究では、図 1 に示すように、プラズマジェットを加工点にピンポイントで照射することにより、加工中のクーラント効果を促進させ、微細ダイヤモンド工具の加工性能を最大化させる。

(2) NPD 工具の成形に使用したフェムト秒レーザ加工機の外観を図 2 に示す。NPD 工具の成形にはレーザパルス幅が 350 fs のフェムト秒パルスファイバレーザを使用した。レーザ照射位置は、ガルバノスキャナを用いることで X-Y 平面内を数 m/s の高速で走査することができる。3 軸制御フェムト秒レーザ加工機は、ウェハ切断や表面改質、レーザクリーニングの分野などで一般的に使用されるが、マイクロエンドミルを高精度に成形するために必要な仕様を有する 5 軸制御フェムト秒レーザ加工機は現状では市販されていない。そこで本研究では、精密形彫放電加工機をメインフレームとして用い、同装置にフェムト秒レーザユニットを搭載することとした。同装置はリニアモータ駆動 X-Y-Z の 3 軸 (最小位置決め分

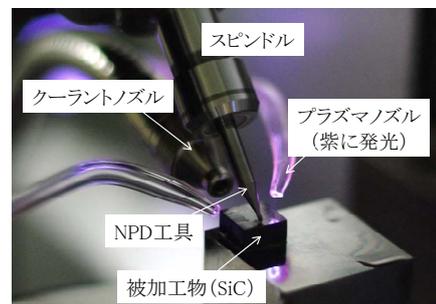


図1 開発した大気圧プラズマ援用クーラント (工具左右のノズルから紫に発光するプラズマガスを照射している様子)

解能 $0.1 \mu\text{m}$) と、B-C の回転軸の 5 軸から構成されている。

(3) 二つの要素技術 (フェムト秒レーザーによる高能率・迅速プリフォーミング)、(PCD ミーリング加工による高品位・高精度仕上げ) をシームレスでリンクする。図 3 にミーリング加工機概観および PCD 工具とサファイアサンプルのレイアウトを示す。同図奥行方向に $90 \text{ mm} \sim 300 \text{ mm}$ の長尺加工を達成するために、サンプルの高精度アライメントを行うための回転軸 (C 軸) が必要となる。また、工具底面が優先的にワークに接触するとともに、下死点付近で切削速度が極端に低いため加工負荷が大きくなることが予想される。ボトム部のみが優先的にワークに接触することを避けるため、工具をツールパスに平行になるように 0 度から 45 度まで傾斜させて加工し、工具の姿勢 (Tilt angle) と加工特性の関係について調査する (回転割り出し A 軸使用)。

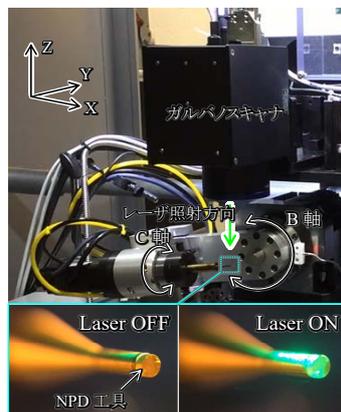


図2 フェムト秒レーザーを搭載した 5 軸加工機の概観

4. 研究成果

(1) プラズマ援用クーラント装置を作製し、窒素ガスペースのプラズマジェットを加工点に対しピンポイントで照射することで、クーラント効果の促進を狙った。プラズマ援用の有無による SiC 加工後の表面粗さを比較したところ、プラズマ援用なしで加工した面粗さは 430 nmRz であったが、プラズマ援用ありで加工した面粗さは 29 nmRz であった (図 4)。プラズマ援用によって、脆性破壊 (チッピング) を大幅に抑制できることを確認している。また、加工後の NPD 工具表面を観察したところ、プラズマ援用することにより、付着物 (Si の酸化物) の抑止に甚大な効果があるという基礎的知見が得られた (図 5)。大気圧プラズマ援用クーラントの効果発現要素とは、【被加工物の表面改質】被加工物表面の親水性向上による“工具⇄被加工物間極界面”のクーラント性能を向上させる現象、【工具表面改質】工具表面のプラズマ処理により溶着性の高い酸化物でさえ付き難くする現象、【切り屑改質】プラズマ状態の活性種の高反応性によって、切り屑の酸化を抑制し、他の生成物チップとして排出される現象、これらが重疊的に作用すると考えている。本研究より、上記の三要素の中でもとくに、“ナノサイズ”の切り屑改質効果が最も主体的であることが確認できた。例えば、Si 系素材 (シリコン、炭化ケイ素、窒化ケイ素等) に対してマイクロ切削加工を施した際には、ナノサイズの切り屑が発生するが、それらは主としてアモルファス状態の SiO や SiO_2 である。これらは、強い結合力を有することが知られており、切り屑同士、またオイル分子と化学反応することにより工具表面に強固な付着物として堆積してしまう。すなわち本手法の効果とは、プラズマ照射により生成直後の切り屑が結合力の弱い生成物チップとしてスムーズに排出されているものと考えられる。本手法の確立および更なる効果発現のためには、加工のフロント (工具と被加工物のナノ領域接触点) において、プラズマガスがどのように工具の切れ味を維持しているのか、その機能発現メカニズムを解明することがカギであるという認識のもと、今後も鋭意研究を継続する。

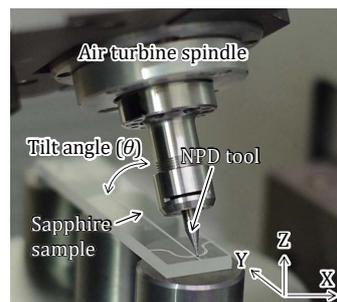


図3 加工機概観およびNPD工具とサンプルのレイアウト

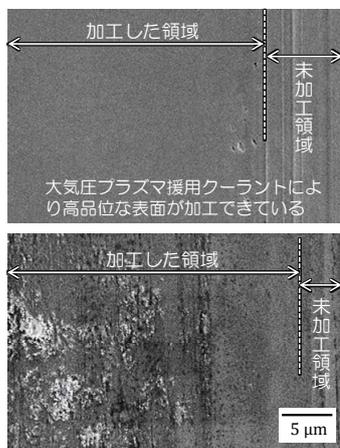


図4 NPD工具による高純度SiCの加工面(上:プラズマ援用あり, 下:プラズマ援用なし)

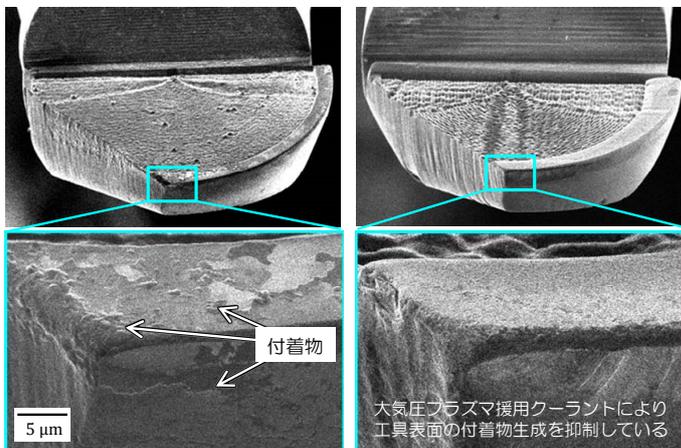


図5 高純度SiC加工後のNPD工具表面の様子 (左:プラズマ援用なし, 右:プラズマ援用あり)

(2) 5 軸加工機に搭載したフェムト秒レーザを駆使することで、高品位な表面性状を有する NPD 工具を高精度・高能率に成形する方法を検討した。総加工時間を 1 時間以内に抑え、工具を加工機上から取り外すことなくワンチャックで最終形状まで成形できることを確認した (図 6)。本研究で実施した工具成形の各工程を図 7 に示す。工程(1)では、円筒形状の NPD ブランク材に対し、レーザ光焦点位置を X-Y 平面で矩形形状に走査させ、垂直方向へ下降させながらレーザ照射することで、円筒部の半分を除去した。工程(2)にて、半円筒の外周部の接線方向にレーザ光を照射し、工具軸方向に往復走査させつつ C 軸を連続回転させ、旋削的に加工することで、円筒の外径を設定値である直径 1 mm に仕上げた。工程(3)にて、レーザ光を 1/4 円弧状のパスにて往復走査させながら C 軸を連続回転させることで四半球形状を成形した。工程(4)にて、工具の切刃エッジとして使用しない片方刃を往復走査で除去した。工程(5)では、レーザを往復走査させつつ、所望の逃げ角 (第 1 逃げ角 8° , 第 2 逃げ角 20°) に従って逃げ面を成形した。工程(6)では、工具をチャンファ角の設定値 45° に傾斜させ、切刃エッジ部全周にチャンファを形成するため、B 軸と C 軸を同時に回転させつつ、XYZ 軸を移動させ、レーザ照射角度が工具エッジに対して常に 45° を保つように 5 軸同時制御加工を行い、チャンファ面を成形した。成形した工具表面に対し、ラマン分光分析を行ったところ、ダイヤモンドに対応する 1333 cm^{-1} 付近のシャープなピークのみが検出されており、加工面はグラファイト化していないことが確認できた。一方、将来の先進ダイヤモンド工具の更なるニーズ拡大を見据えると、現状では十分とは言えない。本研究では、平均出力 100W (パルスエネルギー $500\ \mu\text{J}$) のフェムト秒レーザへと本プロセスを移行するためのシステム構築を実行中である。

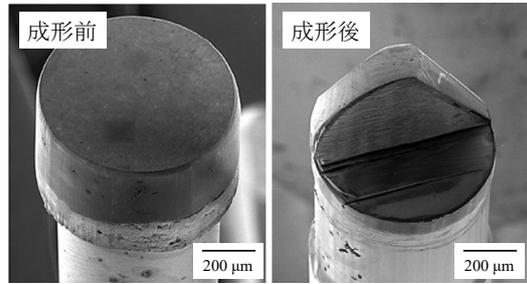


図6 5軸加工機に搭載したフェムト秒レーザを用いてボールエンドミル形状に成形したNPD工具

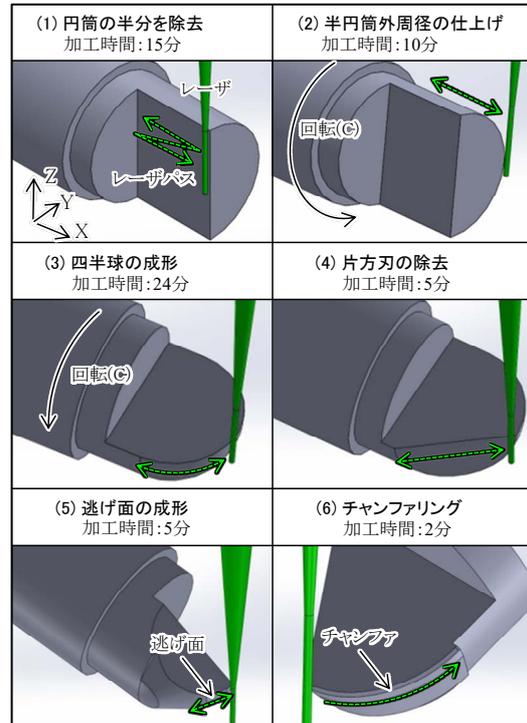


図7 フェムト秒レーザによるボールエンドミル工具成形プロセス

(3) PCD ミーリング加工によるキャピラリ内面仕上げの“下地加工 (プリフォーミング)”として、フェムト秒レーザを用いてニアネット形状まで追い込み加工を行う。仮に、PCD ミーリング加工のみで未加工状態からフルサイズ (90 mm 長さ) 仕上げをする場合、総加工時間は 500 時間以上と試算されることから、フェムト秒レーザを駆使した本プロセスにより同形状をわずか数時間でプリフォーミングすることは極めて重要である。とくに、レーザの加工経路 (パス) も工夫する必要がある。図 8 は 2 つの異なるレーザパスを用いて、幅 0.8 mm × 長さ 100 mm のシリンダ溝加工を行った基礎実験結果である。ガルバノスキャナを用いてシリンダ長さ 20 mm ずつ加工して仕上げた 1st trial (左) は各シリンダ間における高さエラーとジョイント部段差が激しい。アブレーションフロー、レーザ出力の経時変化、フォーカス位置の追込みエラーなどをパラメトリックに調整して再加工した結果、同図 2nd trial (右) に示すように、全面に渡って、レイヤー深さ $5\ \mu\text{m}$ ずつ加工した安定した形状が得られることを確認している。また、キャピラリの最終形状では上下から水素ガスを供給するガイド溝を有する。フェムト秒レーザでプリフォーミングする際に、プラズマ経路の毛細管とガス供給ガイド部それぞれのレーザパスが交差した場合、局所的な段差が生じる恐れがある。レーザ出力を任意の箇所ダイナミックに変え除去量を制御することで、加工交差部の高精度仕上げを目指す (図 9)。PCD ミーリング加工プロセスに移行する際、次の①～③の一連の実験を行い最適加工条件を同定した。すなわち、①送り速度 ($F5\sim 200\text{ mm/min}$)、総加工距離 ($1\sim 1000\text{ m}$) を変化させデータマッピングを作成した。②送り速度を一定にして、軸方向の切込み深さ ap 値を変化させ ($0.2\sim 5.0\ \mu\text{m}$) 高品位かつ高効率加工条件を導出した。長さ 200 mm の毛細管を 24 時間以内で仕上げ加工できる条件を見極めた。③回転工具の先端部は切削速度ゼロ (下死点) となるため、スピ

ンドルを 10~45° 傾斜させ（回転割り出し A 軸使用），最適角度を調査した．図 10 は，フェムト秒レーザー加工後に PCD ミーリングで仕上げた表面の電子顕微鏡観察結果（5000 倍）であるが，延性モードで滑らかな鏡面加工を実現できることを確認している．

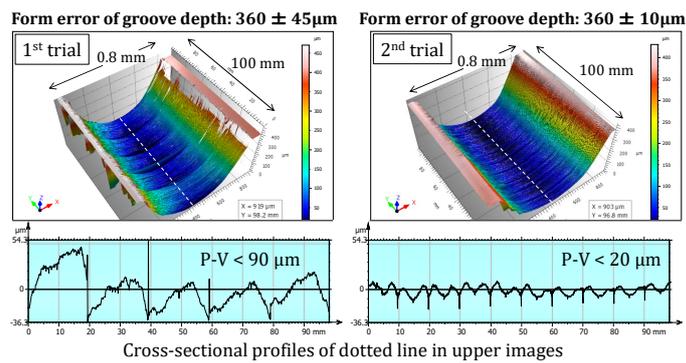


図8 異なるレーザーパスを用いて，幅0.8 mm×長さ100 mmのシリンダ溝加工を行った基礎実験結果

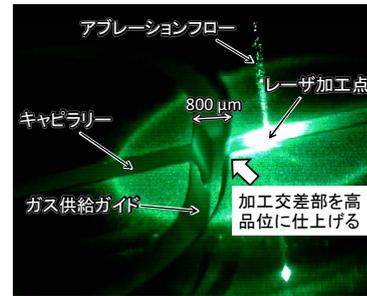


図9 レーザ出力のダイナミック制御による加工交差部の高品位仕上げ

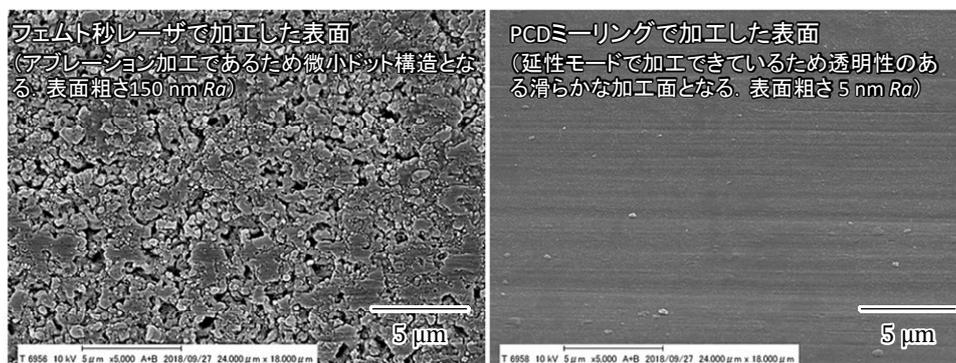


図10 フェムト秒レーザーおよびPCDミーリング加工によるサファイアの基礎加工実験結果（5000倍）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Katahira Kazutoshi、Mifune Nobuhito、Komotori Jun	4. 巻 68
2. 論文標題 Functionalisation of titanium alloy surface through oxygen gas jet-assisted gliding arc discharge plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 201 ~ 204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.122	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 小河誉典、片平和俊、島田浩之、山崎和雄、青山英樹	4. 巻 63/9
2. 論文標題 ナノ多結晶ダイヤモンドエンドミルの超硬合金加工特性とフェムト秒レーザーによる工具成形プロセス開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 470-477
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 該当する
1. 著者名 Katahira, Yuhei Matsumoto, Jun Komotori, Kazuo Yamazaki	4. 巻 93/9-12
2. 論文標題 Experimental investigation of machinability and surface quality of sapphire machined with polycrystalline diamond micro-milling tool	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 4389, 4398
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00170-017-0881-1	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 該当する
1. 著者名 Katahira Kazutoshi、Ogawa Yoshinori、Morita Shinya、Yamazaki Kazuo	4. 巻 69/1
2. 論文標題 Experimental investigation for optimizing the fabrication of a sapphire capillary using femtosecond laser machining and diamond tool micromilling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CIRP Annals	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） 10.1016/j.cirp.2020.04.087	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazutoshi Katahira, Kazuo Yamazaki, Hitoshi Ohmori,
2. 発表標題 Experimental investigation of machinability and surface quality of sapphire machined with polycrystalline diamond micro-milling tool
3. 学会等名 Machine Tool Research Foundation (MTTRF) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片平和俊
2. 発表標題 微細ダイヤモンド工具の加工性能最大化のためのマルチアシスト技術の開発
3. 学会等名 精密工学会2017年春季大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天野慎一郎, 片平和俊, 亀山雄高
2. 発表標題 大気圧プラズマ援用クーラントシステムの開発（ナノ多結晶ダイヤモンド工具によるCVD-SiCの高品位加工への適用）
3. 学会等名 精密工学会2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minami Takashima, Atsushi Ezura, Kazutoshi Katahira, Jun Komotori
2. 発表標題 Development of femtosecond laser-induced wet treatment and characterization of treated surface
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazutoshi Katahira, Kazuo Yamazaki, Hitoshi Ohmori
2. 発表標題 Fabrication of ultra-precise sapphire capillary through process chain of femtosecond laser processing and PCD micro-machining
3. 学会等名 Machine Tool Research Foundation (MTTRF)
4. 発表年 2019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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	山崎 和雄 (Yamazaki Kazuo)	University of California, Berkeley・Department of Mechanical Engineering・Professor	