

フェムト秒レーザーによるナノ多結晶ダイヤモンド工具成形と サファイアキャピラリ加工のプロセスチェーン

国立研究開発法人理化学研究所 開拓研究本部大森素形材工学研究室
専任研究員 片平 和俊

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018214-B3)

キーワード：フェムト秒レーザー，ナノ多結晶ダイヤモンド工具，サファイア

1. 研究の目的と背景

直径数 100 メートルの巨大な高周波加速器の限界を打ち破る新しい粒子加速として、レーザーとプラズマの相互作用を利用したレーザープラズマ加速が 1979 年に提案された。当時は、この提案を実現するような強力なレーザーが存在せず、現実的な粒子加速法とは考えられていなかった。しかし、テラワット級の高出力フェムト秒レーザー技術の急速な進展によって実験室規模の強力なレーザーが手に入るようになり、2000 年代に入ってから急速に研究が進展した¹⁾。レーザープラズマを閉じ込めて粒子加速させる小型の装置も開発されているが、キーパーツとなるレーザーガイド（サファイア製キャピラリ）をいかに精度よく加工できるかがカギとなっている。

上記、サファイア製キャピラリに限らず、同素材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・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、ほとんどの溶媒・溶質に対して安定という特性が必須となる。これら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な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ている。

通常、サファイアの形状創製には、ダイヤモンド砥石による研削加工が適用される。しかしながら、サブミクロンの形状精度とナノメートルレベルの表面粗さを得るためには、高剛性かつ微細砥粒（平均粒径 5 μm 以下）の砥石を用いる必要があるが、砥石の小径化およびツルニング精度に限界がある。また、単結晶ダイヤモンドバイトを用いてセラミックス等を旋削加工した報告もあるが、加工対象が非軸対象形状あるいは微細流路のような三次元複雑形状は難しい。くわえて、単結晶ダイヤモンドではへき開性があるため耐欠損性に劣るという問題を避けられない。これらの問題により、現状では、サファイアに対して、溝幅が数百 μm 、溝底面の平均表面粗さ数 nm 以下という微細複雑形状を高精度に効率良く加工する手法は未だ確立されていない。

一方、ここ数年、我が国の素材メーカーにて新たに開発されたナノ多結晶ダイヤモンド（Nano - Polycrystalline

Diamond : 以下 NPD）が脚光を集めている²⁾。NPD とは、グラファイト（黒鉛）などの非ダイヤモンド炭素に、十数 GPa、二千数百°C以上の超々高圧高温を与えることで、ダイヤモンドに直接変換した素材である。NPD は、へき開性や硬度の異方性がなく、化学的にも安定であり、単結晶ダイヤモンドを凌駕する硬度や諸特性を有することから、硬脆材料に対する高効率切削工具として期待されている。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。

本研究では、まず、ナノ多結晶ダイヤモンドに対し、フェムト秒レーザーを搭載したダイヤモンド工具成形専用装置を駆使することで、同素材の高品位・高効率工具成形技術を確立する。つぎに、単結晶サファイアに対し微細かつ高品位加工を達成するための基本条件を検証するため、多結晶ダイヤモンド（Polycrystalline Diamond : 以下 PCD）工具を用いて、微細溝加工特性を評価した。

2. フェムト秒レーザーによる NPD 工具成形

2.1 レーザ加工条件

NPD 工具の成形に使用したフェムト秒パルスレーザー加工機の外観を図 1 に示す。3 軸制御フェムト秒パルスレーザー加工機は、ウェハ切断や表面改質、レーザー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 軸制御フェムト秒パルスレーザー加工機は現状では市販されていない。そこで本研究では、精密彫削放電加工機（ソディック、AP3L）をメインフレームとして使い、本装置に後述するフェムト秒パルスレーザーを搭載することとした。本装置はリニアモーター駆動 X-Y-Z の 3 軸（最小位置決め分解能 0.1 μm ）と、B-C の回転軸の 5 軸から構成されている。

NPD の成形に使用したフェムト秒パルスレーザーの仕様を表 1 に示す。パルス幅が 350 fs のフェムト秒パルスファイバレーザー（IMRA America, DE1050）を使用した。レーザー照射位置は、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。

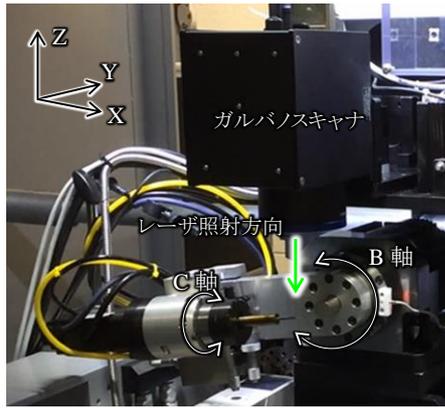


図1 5軸フェムト秒パルスレーザー加工機

表1 フェムト秒パルスレーザーの仕様

| | |
|------------|-------------------|
| 平均出力 | <4 W |
| 繰返し周波数 | 200 kHz |
| 波長 | 522 nm |
| パルス幅 | 350 fs |
| ビームスポット径 | 20 μm |
| パルスエネルギー | <20 μJ |
| ビーム品質 (M2) | 1.3 |

2.1 NPD 工具のレーザー加工プロセスおよび加工結果

加工対象の工具形状は、半径 0.5 mm の一枚刃ボールエンドミルとした。実施した工具成形の各工程を図 2 に示す。工程(1)では、円筒形状の NPD プランク材に対し、レーザー光焦点位置を X-Y 平面で矩形状に走査させ、垂直方向へ下降させながらレーザー照射することで、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ー光を照射し、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、レーザー光を 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、レーザー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、レーザー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。チャンファ工程は、他の工程と異なり、機械軸移動による加工が主体となるため、レーザー走査速度が最大で 100 mm/min 程度になる。これは、ガルバノスキャナを用いた場合のレーザー走査速度 400 mm/s と比較すると単位時間あたりのエネルギー照射量が 240 倍となることを意味する。この過大なエネルギー照射がもたらす熱影響による加工面品位の悪化や表面層のグラファイト化を避けるため、図 3

に模式的に示すように、レーザー光をトロコイダル状に高速走査させながら断続的に加工を行った。工程(1)から(6)まで、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している。成形前後の NPD 工具の様子を図 4 に示す。総加工時間は 1 時間以内に抑えることができた。今後は加工条件の最適化を進めることにより、更なる高効率成形の達成を狙う。

成形した工具のすくい面からチャンファ部、逃げ面に至る部分のエッジ部プロファイルを測定した結果を図 5 に示す。加工特性に大きな影響を及ぼすと考えられる第 1 逃げ面の角度は、目標値 8° に対し、実測値 8.6° であった。市販工具の角度誤差が $\pm 0.5^\circ$ であることを考慮すると、概ね許容範囲内であるといえる。

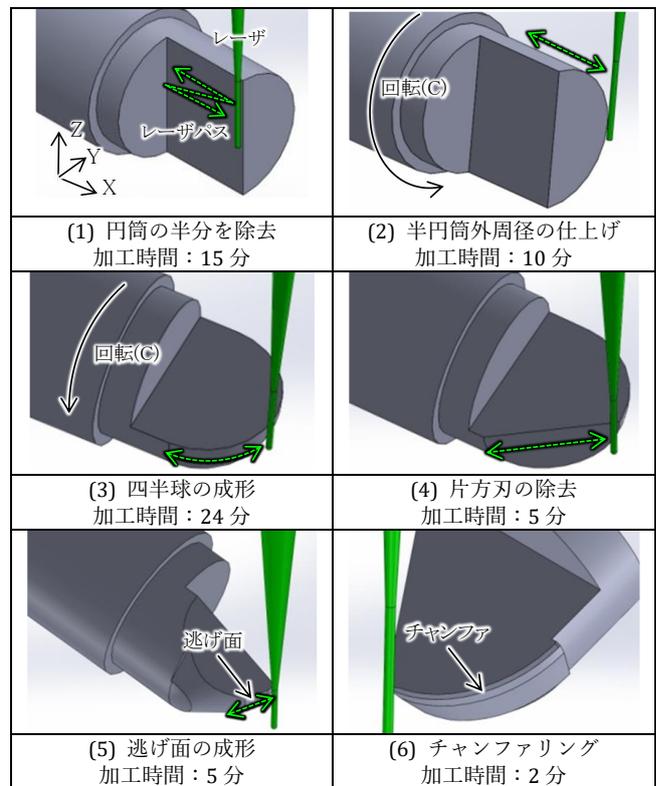


図2 NPD 工具のレーザー加工プロセス

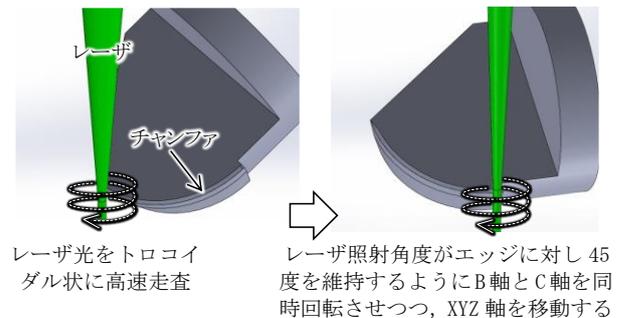
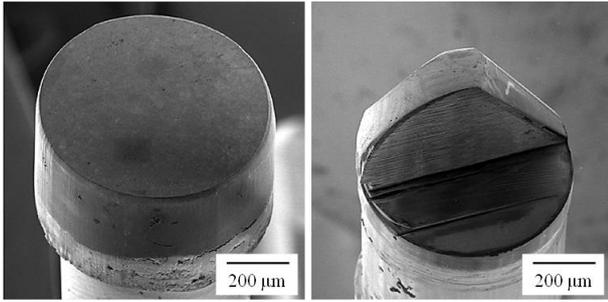


図3 チャンファ部加工時の模式図



(a) 成形前 (ブランク材) (b) 成形後
図4 ブランク材とレーザ成形後の工具の様子

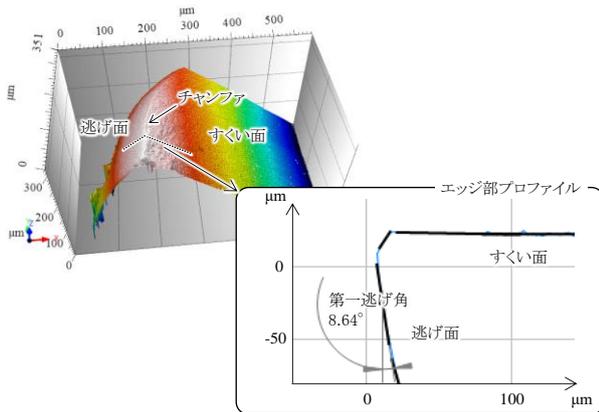


図5 成形したNPD工具の3次元形状測定結果

3. PCD工具によるサファイアの微細溝加工

硬脆材料に対しPCD工具を用いて加工する際は、先端をツルーイング(研磨)している工具を用いる方が高品位な加工面を得られるという報告がある³⁾。しかし、研磨の有無により工具刃部の表面性状が異なる工具を用い、サファイアのような硬脆材料を加工する研究はなされていない。さらにサファイアに対し微細形状加工を試みる際には、脆性破壊による材料除去、切削力による工具のたわみや破損、工具摩耗による仕上げ面精度など多くの課題を有している。本研究では、研磨の有無により工具刃部の表面性状が異なるPCDラジラスエンドミルを用い、単結晶サファイアの微細溝加工特性を評価した。実験では、工具の輪郭形状を転写する単純な溝加工を行い、加工後の表面性状を評価し、適切な加工方法を比較検討した。

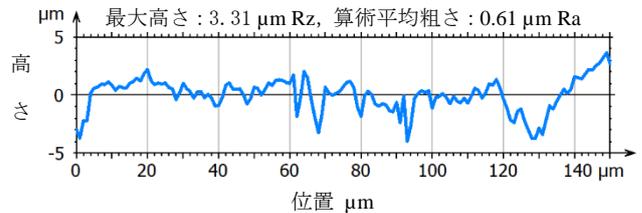
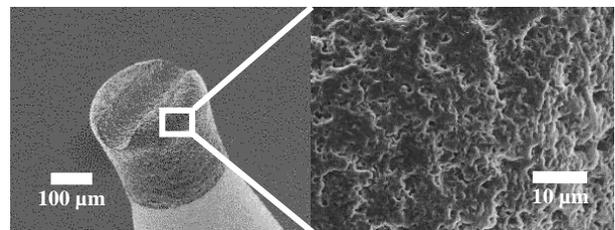
3.1 実験方法

使用した工具は、直径0.3 mm、コーナR0.05 mmの研磨の有無により工具刃部の表面性状が異なるPCDラジラスエンドミル(日進工具)である。研磨有無のPCD工具をそれぞれ研磨済工具、未研磨工具と称する。両者の外観および表面プロファイル測定結果を図6に示す。工具表面のツルーイング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。両者の外観および表面プロファイル測定結果を図6に示す。表2にPCD工具の研磨有無による溝加工実験の加工条件を示す。加工装置は、エアービンスピンドル主軸、リニアモータ駆動による3

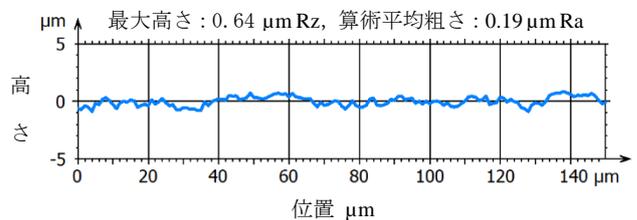
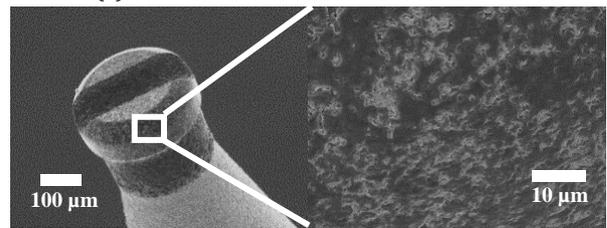
軸の送り軸および2軸の回転軸で構成された超精密加工機(Ultra NANO 100, ソディック)を使用した。加工した溝の粗さ測定には、白色光干渉顕微鏡(AMETEK)を使用した。工具観察には走査電子顕微鏡(日本電子)を用い、加工した溝の形状測定および工具刃部の表面性状測定には非接触表面性状測定装置PF-60(三鷹光器)を使用した。

表2 加工条件

| | 未研磨工具 | 研磨済工具 |
|----------|-------------------------|-------|
| スピンドル回転数 | 50000 min ⁻¹ | |
| 切込み深さ | 0.2 μm | |
| 総切込み深さ | 15 μm | |
| 送り速度 | 5 mm/min | |
| 切削距離 | 150 mm | |
| クーラント | 不水溶性切削油 | |



(a) 未研磨工具の外観及び刃部表面性状



(b) 研磨済工具の外観及び刃部表面性状

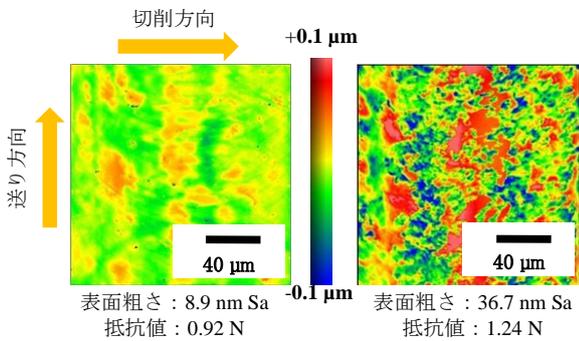
図6 未研磨と研磨済のPCD工具

3.2 実験結果および考察

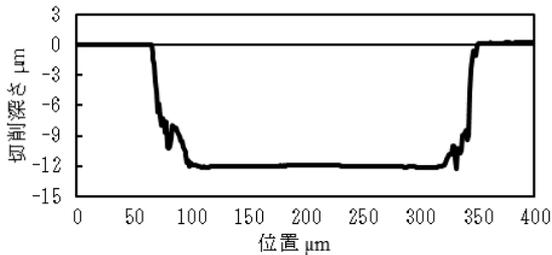
図7に加工面観察結果および表面粗さ測定値を示す。同図より、(a)の未研磨工具の加工面には、微細な凹凸や割れなどを表す斑点状の切削痕は確認されない。算術平均粗

さが 8.9 nm Sa となり高品位な加工が達成できているといえる。(b)の研磨済工具の加工面には、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になっていることが確認できる。また、算術平均粗さが 36.7 nm Sa となっており、(a)と比べて粗いこともわかる。さらに、双方の切削抵抗値では、未研磨工具より研磨済工具の方が高いことから、切削抵抗が低いと延性モードでの加工になり、切削抵抗が高いと脆性破壊を主体とする脆性モードでの加工になることが確認できる。

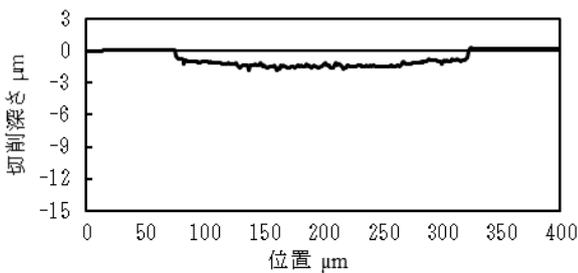
図 8 に切削溝断面形状を示す。同図より、(a)の未研磨工具での平均切削深さは 12.2 μm 、(b)の研磨済工具での平均切削深さは 1.6 μm との結果が得られた。研磨済工具より未研磨工具の方が概ね設定値通りの深さで加工されたことが確認できた。



(a) 未研磨工具 (b) 研磨済工具
図 7 加工面観察結果および加工時切削抵抗値



目標切削深さ : 15 μm 平均切削深さ : 12.2 μm
(a) 未研磨工具



目標切削深さ : 15 μm 平均切削深さ : 1.6 μm
(b) 研磨済工具

図 8 加工後の溝断面形状

研磨済工具より未研磨工具を用いた方が高品位な加工となっている理由としては、切削抵抗が低かったことにより加工面の表面粗さが良くなったためであると考察できる。また、先行研究では、超硬合金を加工する際に PCD 工具表面を研磨することで、ダイヤモンド表面が平坦に仕上げられているため、砥粒境界箇所が微細な切れ刃となり延性モードでスクラッチのない鏡面加工が達成できるとい報告がある³⁾。しかし、本研究で研磨済工具より未研磨工具の方が、加工面性状や切削深さで良い結果を得られたことにおいては、サファイアほどの硬質材料を加工する場合、上記の加工メカニズムが機能しなかったために、研磨済工具では高品位な加工面および設定値通りの加工深さが達成できなかったものと推察される。よって、本実験条件下においては、単結晶サファイアに対して微細溝加工を行うには表面を研磨しておらず砥粒の突き出しを確保している未研磨工具が有効であると考えられる。

4. まとめ

ナノ多結晶ダイヤモンドに対し、フェムト秒レーザを搭載したダイヤモンド工具成形専用装置を駆使することで、同素材の高品位・高効率工具成形技術を確認し得た。さらに、単結晶サファイアに対し微細かつ高品位加工を達成するための基本条件を検証するため、PCD 工具を用いて、微細溝加工特性を評価した。本研究により、サファイア製キャピラリ等の微細加工を達成するための工具製作及び加工条件設定に関する基本的知見を得ることができた。今後、ナノ多結晶ダイヤモンド工具を用いて、長尺サファイア製キャピラリの高精度高効率加工を実施することを継続的に検討する。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団に一般研究開発助成として採択されたものであり、同財団の有難いご支援に対し深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Leemans WP, Gonsalves AJ, Mao HS, Nakamura K, Benedetti C, Schroeder CB, Toth C, Daniels J, Mittelberger DE, Bulanov SS, Vay JV, Geddes CGR, Esarey E (2014) Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime. Physical review letters 113(24):245002.
- 2) H. Sumiya: Novel development of high-pressure synthetic diamond "Ultra- hard nano-pokycrystalline diamond", SEI Technical Review, 74, (2012) 15.
- 3) カスリヤ, 渡辺, 後藤, 神 : 球形状焼結ダイヤモンド工具による金型の鏡面仕上げに関する研究 (第 1 報) 超硬合金に対する加工特性, 2021 年度砥粒加工学会誌, Vol.65. No.3. 2021, 145-149.