

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06099

研究課題名(和文) NPD製マイクロボールエンドミルに対するレーザ/プラズマ複合加工技術

研究課題名(英文) Laser Assisted Plasma Etching Technique for Micro Ball-Endmill Made of Nano-Polycrystalline Diamond

研究代表者

天本 祥文 (AMAMOTO, YOSHIFUMI)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00505670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：刃先丸み半径が1 nm以下のナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)製マイクロボールエンドミルを成形できるレーザ加工技術とドライエッチング技術の開発を行った。自由曲面形状と円錐面と半球面を組み合わせた逃げ面を持つナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミルを成形するレーザ加工技術を開発できた。また、レーザ成形したナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミルに対してドライエッチングを行うことで、刃先の丸み半径を1nm以下にできることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ機械加工という加工概念が提案されて以降、同概念を具現化できる工作機械や工具の開発が行われてきた。その結果、工作機械の制御分解能は現時点で1 nmに達している。1nmの制御分解能で動く工作機械を最大限に活用するためには、切削工具の刃先の丸み半径を少なくとも1nm以下に成形する必要がある。しかし、市販されている工具刃先の丸み半径は20 nm程度である。切削工具の刃先の丸み半径を少なくとも1nm以下に成形できれば、加工中に切りくずをせん断変形させるために消費されているエネルギーのロスがない理想的加工法を実現できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：A research project was conducted to develop a laser scanning machining and dry etching techniques that enables to form the Nano-Polycrystalline Diamond (NPD) radius cutting tool with a radius of round edge are less than 1 μm . Micro ball-endmill with a frank face of free formed shape and combined shape made up of conical face and hemispherical face was fabricated conducting laser machining to the NPD. Also, it has been clarified that by performing dry etching to the NPD micro ball-endmill, the radius of the cutting edge can be formed to less than 1 nm.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：超精密加工 レーザ加工 イオンエッチング ナノ多結晶ダイヤモンド 切削工具

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1990年代の初めにドイツでマイクロ機械加工という加工概念が提案されて以降、同概念を具現化できる工作機械や工具の開発が行われてきた。その結果、工作機械の制御分解能は現時点で1 nmに達しており、超精密・微細と呼ぶにふさわしい加工面を作ることができる工作機械を手に入れるようになった。一方、工具の開発は停滞しており、国内外で以下に示す問題を抱えている。

- (1) 単結晶ダイヤモンド(Single Crystal Diamond: SCD)製の切削工具は、チップングや工具摩耗が
るために硬さが1500 Hvを超える高硬度材料のマイクロ機械加工には使えない。
- (2) 市販されているSCD製切削工具に関する刃先の丸み半径は20 nm前後であり、工作機械の制御分解能に達していない⁽¹⁾。

そこで、制御分解能が1 nmの工作機械を最大限に活用できる、超精密切削用工具の開発に着手した。

2. 研究の目的

位置決めや送り運動に対する工作機械の制御分解能は、現時点で1 nmに達している。これに対し、超精密切削に用いられている単結晶ダイヤモンド製・切削工具の刃先の丸み半径は20 nm以下には成形されていると思われるが⁽¹⁾、1 nm以下に成形されている保証はない。

高純度グラファイトを超高圧ならびに高温でダイヤモンドに直接変換したナノ多結晶ダイヤモンド(Nano-Polycrystalline Diamond: NPD)は、サイズが50 nm以下のダイヤモンドの粒子によって構成されている⁽²⁾⁽³⁾。粒子の内部に生じた転位やすべり線が粒子の境界で止められるため、NPDは単結晶ダイヤモンド(Single-crystal Diamond: SCD)よりも硬いだけでなく、劈開が伝播しない性質を持っている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ため、高硬度材料に対して超精密切削加工を行うことができる、次世代の超精密切削加工用の工具素材として有望視されている。しかし、NPDを超精密切削加工用の工具に成形するためには、NPDに対する粗成形技術⁽⁷⁾や仕上げ成形技術を新たに開発する必要がある。

そこで本研究では、以下に紹介する2つの工具成形技術を開発することを試みた。

- (1) イオンエッチング後の刃先の丸み半径が3~10 nmの範囲で揺らいでいるのは、レーザ加工の条件、とくに粗加工時のレーザの走査間隔が広すぎたことが原因である。この問題を解決するため、レーザ加工後の刃先の丸みに揺らぎ無く、丸み半径を同じ値に成形できるレーザ加工技術を開発する。
- (2) イオンエッチング後の刃先の丸み半径は、エッチングに使用するガスの質量数やエッチング条件によって変化すると考えられる。そこで、レーザ成形後のNPD製マイクロボールエンドミルに対して、刃先の丸み半径を1 nm以下にできるイオンエッチング技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) レーザ加工

マイクロボールエンドミルの成形に使用したレーザ加工装置の外観を図1に示す。制御分解能が10 nmの3軸立形マシニングセンタのテーブルに、供試材を装着するための4軸自公転ステージを固定した。供試材を固定したS45C製の工具ホルダは真ちゅう製の芯振れ防止治具を介してステップモータ、ステップモータはX-Yステージを介して回転テーブルに取付けた。マシニングセンタの直進および円弧運動と4軸自公転ステージの自転および公転運動を併用することにより、マイクロボールエンドミルを成形できる機能を持っている。

レーザには、波長が1060 nm、周波数が20~80 KHz、パルス幅が40~120 ns、ならびに出力が1~8 Wのナノ秒パルスファイバーレーザを使用した。レーザを集光するだけでなく、加工面を画像観察するための鏡筒をマシニングセンタのコラムに取付け、レーザを機械走査することにした。

(2) イオンエッチング

図2に示しているのは、イオンエッチングに使用した誘導結合プラズマ(ICP)発生装置の模式図である。真空チャンバに希ガスを入れターゲットやアンテナに高周波電圧を印加すると、プラズマが発生する。ノーズRパイットをS45C製のホルダに取付け、ホルダにプラスのバイアス電圧を印加すると、ホルダの端面からスパッタアウトした鉄原子がNPDに付着しNPDはプラスに帯電する。そのため、マイナスに電離したプラズマがNPDの表面に衝突してNPDはイオンエッチングされる。

(3) 試作した工具の評価

試作した工具の評価には、位置決めや送り運動に対する制御分解能が10 nmの非球面レンズ加工機を使用した。高硬度材料に対する切削性の評価には、試作したNPD製マイクロボールエンドミルを用いて、ビッカース硬さが1800 Hvで直径が15 mmの超硬合金(株)タンガロイ製EC10)に対して1027個のマイクロレンズアレイの加工を行った。

4. 研究成果

(1) NPD製マイクロボールエンドミルの形状

図3に示しているのは、軸直角断面の形状が半円の工具切れ刃と、切れ刃から α 度後退した

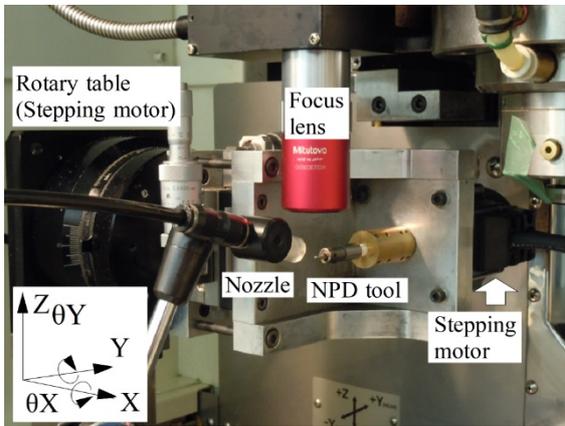


図 1 レーザ加工装置の外観

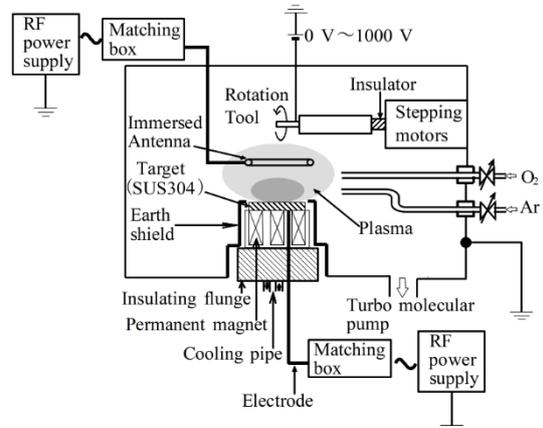


図 2 誘導結合プラズマ(ICP)発生装置

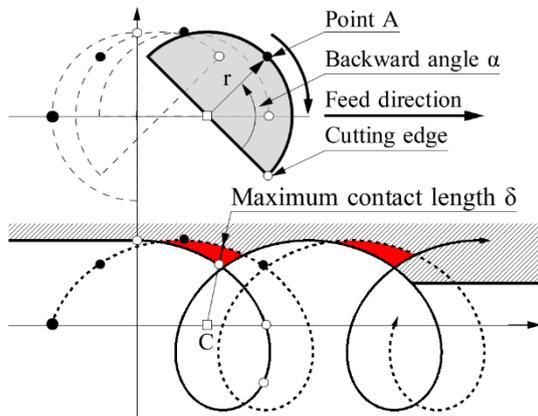


図 3 軸直角断面の形状が半円の工具切れ刃と、切れ刃から α 度後退した位置にある点 A のトロコイド曲線

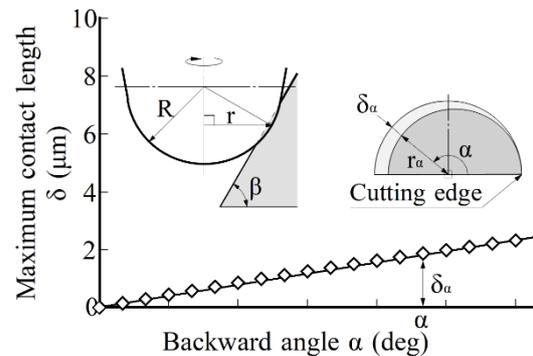


図 4 切れ刃からの後退角 α と最大接触長さ δ との関係

位置にある点 A のトロコイド曲線である。切れ刃によって加工面に作られる工具軌跡を実線、点 A の軌跡を破線で示した。赤色で示したコマ形の部分は、点 A が加工面に接触した領域を示している。工具の回転中心 C と点 A の軌跡上の点を結ぶ直線と切れ刃軌跡との交点を求めることにより接触長さ、接触長さの最大値を求めることにより、切れ刃から α 度後退した位置にある点 A の最大接触長さ δ を幾何計算した。

図 4 に示しているのは、軸直角断面の半径が r の切れ刃に関する、切れ刃からの後退角 α と最大接触長さ δ との関係である。工具半径 R を 0.1 mm 、半径方向切込み量を $5 \mu\text{m}$ 、工具一回転当たりの送り量を $10 \mu\text{m}$ 、工作物の傾斜角を 60 度に設定した場合の計算結果である。

切れ刃からの後退角が α の位置では、半径 r から最大接触長さ δ_α を引くことにより加工面と接触しない工具半径 r_α を求めた。傾斜角 β を変化させて幾何計算を行った後、幾何計算の結果を踏まえて作成したマイクロボールエンドミルの三次元 CAD 形状を図 5 に示している。逃げ面を滑らかな自由曲面で定義するため、三次元 CAD が持つスムージング機能を用いて工具の形状を設計した。また、工具の回転中心を除去するため 45 度の平面で工具先端をカットした。CAD を用いて定義したマイクロボールエンドミルの形状を元に NPD 製マイクロボールエンドミルのレーザ成形を試みた。

(2) NPD 製マイクロボールエンドミルのレーザ成形

図 6 に示しているのは、マイクロボールエンドミルのすくい面ならびに逃げ面のレーザ成形の要領である。図 6(a) に示すように、すくい面の成形では NPD 工具を半球状に成形した後に、すくい面が真上かつ水平になるようにステップモータを用いて工具の自転角を調節し、X-Y 平面内で一方向にレーザ光を機械走査させてミーリング加工を行い、すくい面を成形した。

図 6(b) に示すように、逃げ面の成形ではすくい面が真下を向くように Y 軸回りに 180° 回転させた後に、3 次元の CAD/CAM を使って計算されたレーザの走査軌跡をレーザのブルームが見えなくなるまで繰り返し走査させた後に、Z 軸のマイナス方向に移動させることにより、自由曲面で定義した逃げ面と回転中心を除去するための 45° の平面を成形した。図 7 に示すのは試作した自由曲面で定義した NPD 製マイクロボールエンドミルである。レーザの走査軌跡を 3 次元 CAD/CAM システムを用いて計算することで、自由曲面で定義した逃げ面を成形することができた。

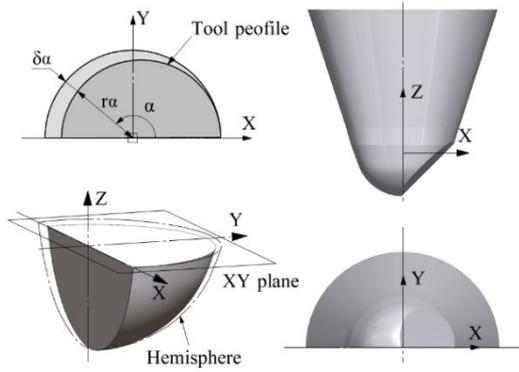


図 5 マイクロボールエンドミルの三次元 CAD 形状

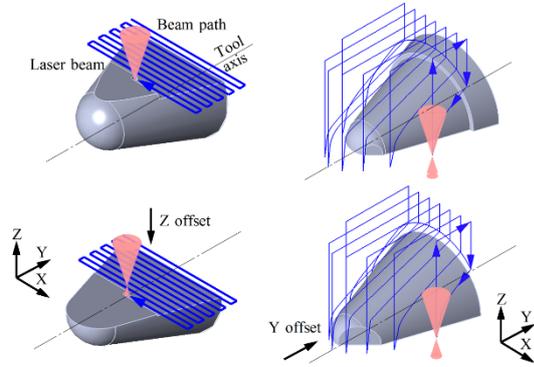


図 6 NPD 製マイクロボールエンドミルのすくい面ならびに逃げ面のレーザー成形要領

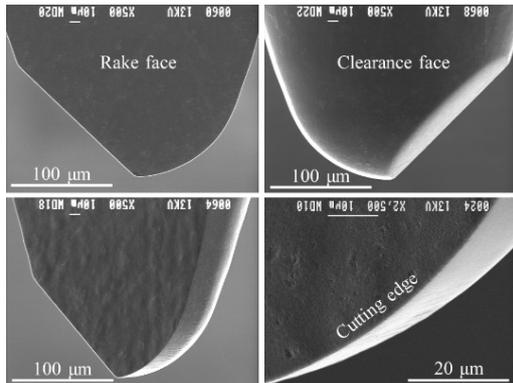


図 7 レーザ成形した NPD 製マイクロボールエンドミル

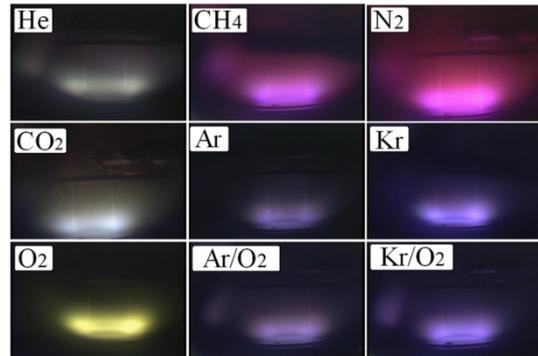


図 8 エッチングガスを変えた場合のプラズマのようす

(3) イオンエッチングを用いた刃先の鋭利化

エッチングガスの変化による効果を確認するため、真空度 0.3 MPa, ターゲット 10 W, アンテナ出力 60 W, バイアス電圧 1000 V, ならびにエッチング時間を 8 時間ならびに 16 時間に設定し、さまざまなエッチングガスを使用してイオンエッチングを行った。エッチングガスにはヘリウム He, メタン CH₄, 窒素 N₂, 酸素 O₂, 炭酸ガス CO₂, アルゴン Ar, ならびにクリプトン Kr を使用した。実験中のプラズマのようすを図 8, 実験の結果を図 9 に示す。Ar/O₂ ならびに Kr/O₂ の流量割合を 8/2 sccm にすることで切れ刃丸み半径を 0.1 nm 程度まで鋭利に成形することができた。また、酸素を混入させることでくさび角が小さくなっていることが明らかになった。これらは、NPD の炭素とガスに含まれる酸素が反応し、除去量が大きくなったことが原因だと考えられる。また、質量数が大きくなるほど切れ刃丸み半径が小さくなることが明らかになった。

図 10 に示しているのは、NPD 製ノーズ R パイトに対してイオンエッチングを行い、0.5 μm の範囲で測定した刃先の断面曲線である。刃先の丸み半径の測定には、原子間力顕微鏡 AFM (島津製作所(株), SPM-9700)を使用した。カンチレバーには、オリンパス製 OMCL-AC160TS-R3(探針半径: 4~10 nm)を使用した。この工具のイオンエッチング前の刃先の丸み半径は、9.7 nm であったがイオンエッチングを継続して行っていくと、4 時間程度で収束した。収束した領域では、刃先の丸み半径の鋭利化の限界であるため、刃先の丸み半径は限りなく炭素原子の原子半径 0.67 Å に等しいと考えられた。標準偏差は 0.5 nm であることから、刃先の丸み半径は $0.0 < r \leq 0.9$ nm, 最大でも 0.9 nm であると考えている。

(4) NPD 製マイクロボールエンドミルを用いた切削試験

図 11 に示しているのは、レーザー成形した NPD 製マイクロボールエンドミルに対して、真空度 0.3 MPa, ターゲット 10 W, アンテナ出力 120 W, ならびにバイアス電圧 1000 V に設定し、エッチングガスに炭酸ガス(CO₂)10 sccm を使用して 8 時間イオンエッチングを行った工具半径 R が 100 μm の NPD 製マイクロボールエンドミルの切れ刃のようすである。エッチングガスに炭酸ガスを使用したため、刃先の丸み半径は約 20 nm 程度である。

図 12 に示しているのは、それぞれ図 11 の工具を用いて、超硬合金に対して 1027 個のマイクロレンズアレイを加工した加工面のようす、設定切り込みを 3.2 μm, レンズ間隔を 45 μm に設定し、研削加工用水溶性油を超音波発生装置で吹付けながら加工した。

加工開始点となる中央近傍から外周に移動するにつれて、レンズ直径が小さくなっている。加

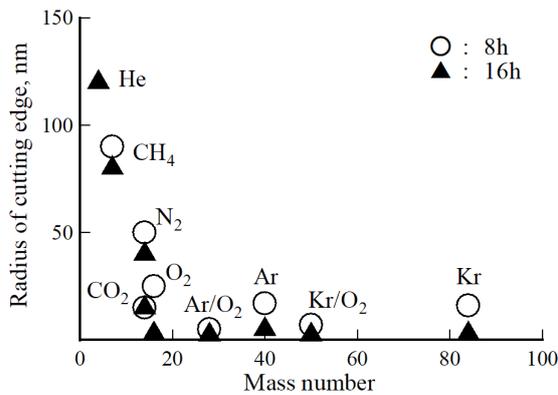


図 9 エッチングガスの質量数とイオンエッチング後の刃先の丸み半径

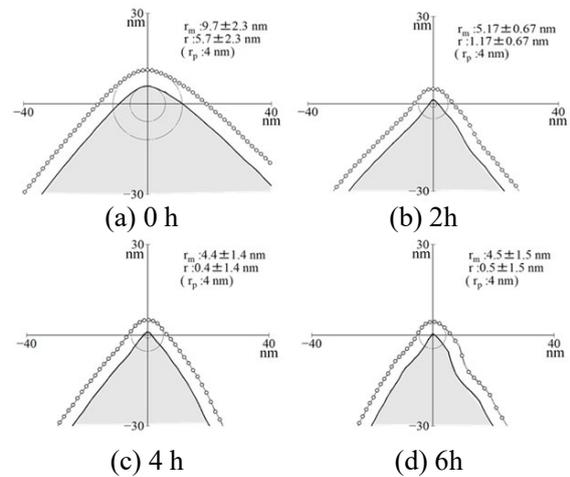


図 10 イオンエッチング後の切れ刃の断面曲線

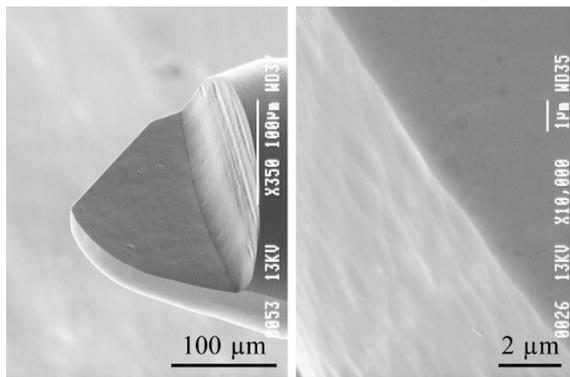


図 11 イオンエッチング後の NPD 製マイクロボールエンドミル

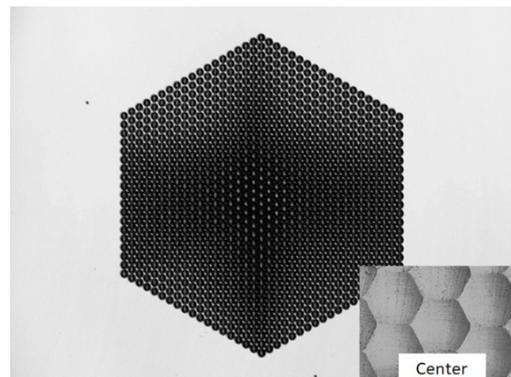


図 12 超硬合金に対して加工した 1027 個のマイクロレンズアレイ

工後の工具を観察すると切れ刃が摩耗しているため、加工中に工具が摩耗したことにより、工具の切れ味が悪くなり徐々にレンズ直径が小さくなったのではないかと考えられる。

ただし、工具の摩耗量は微小であり、加工面の粗さも 15 nmRa 程度であることから、試作した NPD 製マイクロボールエンドミルが超硬合金の切削加工に有効であることは間違いないと考えている。

<引用文献>

- (1) 浅井昭一・田口佳男・堀尾健一郎・河西敏雄・小林昭, 改良走査電子顕微鏡 (SEM) による単結晶ダイヤモンド工具の切れ刃径丸み半径の測定と解析, 精密工学会誌, Vol.56, No. 7(1990), pp.145-150.
- (2) Tetsuo Irifune, Ayako Kurino, Shizue Sakamoto, Toru Inoue, Hitoshi Sumiya, Ultrahard polycrystalline diamond from graphite, nature, 421-6923,(2003), pp.599-600.
- (3) H. Sumiya, T. Irifune, Indentation hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion, Diamond & Related Materials, 13(2004), pp.1171-1176.
- (4) 角谷均, 入船徹男, 各種炭素材料からの直接変換による高純度多結晶ダイヤモンドの合成とその特性, 高圧力の化学と技術, 16-3(2006), pp.207-215.
- (5) H. Sumiya, T. Irifune, Hardness and deformation microstructures of nano-polycrystalline diamonds synthesized from various carbons under high pressure and high temperature, J. Mater. Res, 22-8(2007), pp.2345-2351.
- (6) 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No. 763 (2010), pp. 768-776.
- (7) 山口哲郎, 仙波卓弥, 集束レーザー光を用いた高速微細加工技術の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 73-732(2007-8), pp.220-226.
- (8) 田邊良美・島田尚一・高野光央, Al-4.16%Mg 合金の二次元切りくずの電子顕微鏡的考察, 精密機械, Vol. 42, No. 4(1976-4), pp. 9-15.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均	4. 巻 83-851
2. 論文標題 ナノ秒パルスレーザーを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズRバイトに対する走査線加工技術	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 16-00573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.16-00573	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 時枝大輔, 仙波卓弥, 天本祥文
2. 発表標題 NPD製ノーズRバイトと成形し得る刃先の丸み半径-原子レベルの刃先を成形することの可能性-
3. 学会等名 精密工学会九州支部北九州地方講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天本祥文
2. 発表標題 3次元微細形状のレーザー加工技術
3. 学会等名 最新加工技術に関する研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天本祥文
2. 発表標題 レーザーを用いた微細形状加工
3. 学会等名 福岡県金型研究会平成30年度特別会員訪問(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仙波卓弥, 母里壮大, 天本祥文
2. 発表標題 ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズRバイトに対するドライエッチング
3. 学会等名 ABTEC2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天本祥文
2. 発表標題 フェムト秒レーザを用いた超硬合金に対する3次元加工技術
3. 学会等名 電気加工学会西日本支部技術講演会 依頼講演 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天本祥文, 仙波卓弥
2. 発表標題 フェムト秒パルスレーザを使った超硬合金に対する微細加工
3. 学会等名 精密工学会九州支部熊本地方講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 母里壮大, 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均
2. 発表標題 NPD製ノーズRバイトと成形し得る刃先の丸み半径
3. 学会等名 精密工学会九州支部熊本地方講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高原均, 花田智洋, 天本祥文, 仙波卓弥
2. 発表標題 超硬合金に対するナノfp研削加工技術とマイクロレンズアレイ金型の試作
3. 学会等名 精密工学会九州支部熊本地方講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 母里壮大, 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均
2. 発表標題 ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズRバイトに対するドライエッチング
3. 学会等名 砥粒加工学会 ABTEC2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者情報 http://www.fit.ac.jp/research/search/profile/id/46</p>

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
研究分担者	仙波 卓弥 (SEMBA Takuya) (30154678)	福岡工業大学・工学部・教授 (37112)	