

令和元年5月24日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06007

研究課題名(和文) 超硬合金を直接切削できるコーテッド超硬工具の工具形状確立と仕上げ面評価

研究課題名(英文) Establishment of cutting edge shape and evaluation of finished surface in direct cutting of cemented carbide with coated carbide tool

研究代表者

岡田 将人 (OKADA, MASATO)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：60369973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一般的に切削加工により製品形状の創成が困難であった超硬合金に対し、超硬合金を基材とし、その表面にダイヤモンド薄膜をコーティングしたダイヤモンドコーテッド超硬工具を適用した場合の切削機構、切削現象、仕上げ面について詳細に検討した。工具にはボールエンドミル形状とツイストドリル形状を用い、それぞれ溝加工ならびに穴加工に適用した。本工具を超硬合金の切削加工に供することで、切削初期段階で切れ刃付近のダイヤモンドコーティングが剥離することで鋭利な刃先が発現して良好な切削性能を示すこと、ならびに刃先処理を当初より施した工具により、良好な仕上げ面が得られることを種々の評価方法により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果により、従前は放電加工ならびに手磨き仕上げの加工工程が求められていた超硬合金製の金型等の複雑形状物が、ダイヤモンドコーテッド超硬工具を用いた切削加工にて代替可能になることが期待される。これにより、放電加工により必要とされていた専用工程を省略化できるために、加工コスト、時間の削減が図れる。また、本工具を用いた切削加工により得られた仕上げ面は、残留応力ならびに抗折力の観点で、従前工程の手磨き仕上げの場合と同等もしくはそれ以上の品質を有していたため、金型等の超硬合金製品の長寿命化にも寄与できる成果である。本研究成果により、産業界において超硬合金製品のより広範な適用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The cutting mechanisms, cutting characteristics, and finished surface integrity in direct cutting of cemented tungsten carbide, which is generally classified as difficult-to-cut material, with diamond coated carbide tools were investigated. The ball-end mill and twisted drill were applied as cutting tools for grooving and hole making. The cutting performance was obviously improved by flaking the diamond coating only on the rake face at cutting onset and generating extremely sharp cutting edge in end milling and drilling. The quality of the finished surface was evaluated by surface appearance, profile, roughness, residual stress, and transverse rupture strength, and satisfactory quality of the finished surface can be obtained by using diamond coated end mill, which was treated the cutting edge.

研究分野：切削加工, 表面加工

キーワード：ダイヤモンドコーテッド超硬工具 超硬合金 直彫り加工 仕上げ面品質 刃先形状 残留応力 抗折力

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超硬合金は高い硬度を有するために、冷間鍛造や打ち抜き金型などの高いヤング率ならびに耐摩耗性が求められる製品への適用が進んでいる。しかし、これらの特性により、金型形状の創成が極めて困難であり、一般的には放電加工による場合が多い。放電加工は、その加工原理から加工速度の高速化が難しく、専用機や電極製作が必要となる。加えて、仕上げ面に微小亀裂を含んだ加工変質層が生じやすいとされている。この対策として、ダイヤモンドやcBN工具を用いて直接的に超硬合金を切削加工する直彫り加工があり、振動切削などの高付加価値加工法の研究が進められている¹⁾。しかし、これらの工具は、取り扱いが難しく高価であるため、直彫り加工の優位性を一部相殺する要因となっている。

一方、本研究の実施者らは、これまでに、ダイヤモンドコーテッド超硬エンドミル（以後、ダイヤモンドコートエンドミル）の直彫り加工への適用を試みてきた。本工具は、超硬合金製の工具母材表面に数ミクロンから数十ミクロン程度のダイヤモンド薄膜（以後、ダイヤモンドコート）を蒸着させた工具である。前述のダイヤモンド工具等と比べ、母材となる超硬合金の靱性により、大規模な欠損に至りにくく、製造が容易で安価に調達できる特徴を有する。実施者らは、これまでの研究成果により、ダイヤモンドコートエンドミルを超硬合金の直彫り加工に供した場合、一刃あたりの送り量をダイヤモンドの膜厚以下に設定することで、切削開始直後にすくい面上のダイヤモンドのみが剥離して、切削性能が向上する特性を有していることを明らかにしている²⁾。これは、逃げ面側に残存したダイヤモンドの稜線部に鋭利な刃先が発現し、極微量の送り条件下では、ダイヤモンド部のみが切削に関与することで得られる特性である（図1）。しかしながら、本特性は偶発的に生じるすくい面上のダイヤモンドの剥離により得られる現象であり、そのような切削機構から得られる切削現象や仕上げ面品質は明らかになっていない。

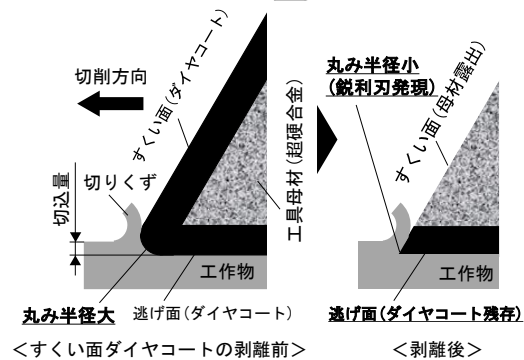


図1 剥離による切削機構の変化

2. 研究の目的

本研究では、ダイヤモンドコートエンドミルを用いた超硬合金の直彫り加工中における切削現象の解明ならびに仕上げ面品質の評価を目的とした。用いる工具の検討として、当初、超硬合金の直彫り加工に最適な刃先形状の検討から進める予定であった。しかしながら、前述した切削加工中に偶発的にすくい面上のダイヤモンドのみ剥離する工具（以後、未処理工具）に対し、切削に供する前にすくい面上の刃先のみ、意図的にダイヤモンドの除去処理をすることで鋭利な刃先を創成した工具（以後、処理工具）が開発された。そのため、本工具を用いて、切削現象の解明と仕上げ面品質の評価を進めた。加えて、穴加工用のツイストドリルに同様のダイヤモンドコーティングを施したダイヤモンドコーテッド超硬ドリル（以後、ダイヤモンドコートドリル）の超硬合金の穴加工時における現象も併せて明らかにした。これらにより、超硬合金の直彫り加工にダイヤモンド工具を適用した場合の形状加工、穴加工に対する有用性を包括的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ダイヤモンドコートエンドミルによる溝加工

ダイヤモンドコートエンドミルの切削特性を検討するにあたり、切削加工中における切削抵抗波形を記録し、これと、切削距離の進行に伴う工具刃先形態、仕上げ面性状の変化を比較した。図2に実験装置の構成を示す。本実験では工作機械として5軸立形マシニングセンタを用い、圧電式3成分動力計上に固定した超硬合金平板に対して、ボールエンドミルの回転軸方向を工作物対象面に対し法線方向で一定としながら溝加工を行った。切削油剤は用いないドライ加工とし、加工部には外部よりエアブローを供給した。工具にはダイヤモンドコーティングを施した2枚刃でR1.5 mmのボールエンドミルを用いた。工具には前述の未処理工具と処理工具を用いて比較した。図3(a), (b)に、両工具の刃先の拡大画像を示す。両工具には厚さ約20μmのダイ

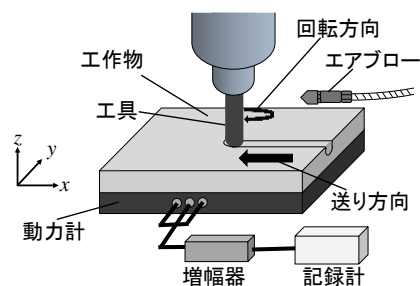
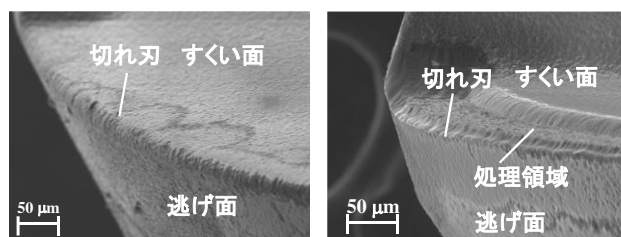


図2 エンドミル加工実験装置



(a) 未処理工具 (b) 処理工具

図3 未使用時のエンドミル刃先

ヤコートが蒸着されており、図にみるように未処理工具では、ダイヤコートを施したことにより、丸み半径の大きな刃先形状を呈していることがわかる。これに対し、処理工具では、すくい面上のダイヤコートを意図的に除去処理することにより、逃げ面上のダイヤコート断面稜線に鋭利な刃先が発現していることがわかる。

(2) ダイヤコートドリルによる穴加工

ダイヤコートドリルの切削特性の検討においても、エンドミルの場合と同様に、切削抵抗、工具刃先形態、加工穴品質を評価した。図4に実験装置の構成を示す。本実験でも5軸立形マシニングセンタを用い、圧電式2成分動力計上に固定した超硬合金平板に対して、穴加工を施した。加工穴は穴深さ4.0 mmの止まり穴とし、切削油剤は用いずに外部よりエアブローを供給した。工具にはダイヤモンドコーティングを施した2枚刃で、直径1.0 mmのツイストドリルを用いた。ダイヤコートドリルにおいては、すくい面上のダイヤコート処理が行われていないドリルのみを用いた。図5(a), (b)に、刃先のすくい面側ならびに逃げ面側の拡大画像を示す。エンドミル同様に厚さ約20 μm のダイヤコートが蒸着されており、丸み半径の大きな刃先形状を呈していることがわかる。

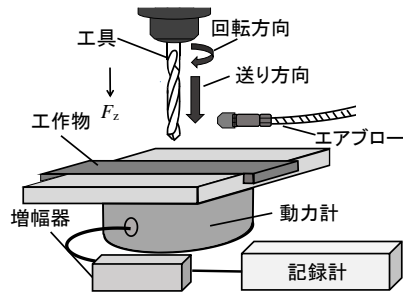


図4 ドリル加工実験装置

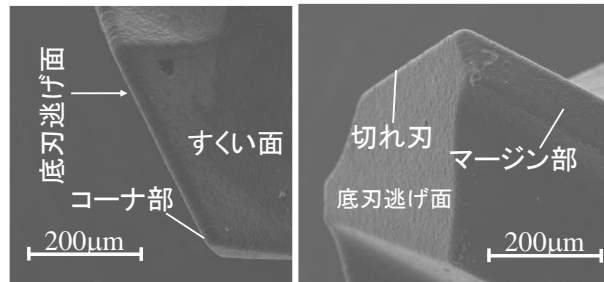


図5 未使用時のドリル刃先

4. 研究成果

(1) ダイヤコートエンドミルによる溝加工

① 切削抵抗

図6に両工具を用いた場合の加工溝長ささと切削抵抗(3成分力)の関係を示す。工作物材料にはTAS VM-40を用い、工具回転数、一刃あたりの工具送り量、軸方向切込み量をそれぞれ図中に示す。切削抵抗は2刃より得られたそれぞれの出力波形の最大値を10点測定し平均した。図より、加工溝長さの極初期段階で未処理工具ではいずれの方向成分においても切削抵抗が急減している。これは、すくい面上のダイヤコートの剥離により逃げ面上に残存したダイヤコート稜線部に鋭利な刃先が形成されたことによるものである。これに対し、処理工具は切削開始直後より、いずれの成分においても極めて低い切削抵抗を示している。これにより、すくい面上のダイヤコートを切削に供する前に処理することで、良好な切削性能が得られることがわかる。その後、両工具の切削抵抗は加工溝長さの増加に伴い、 $l_g = 5500$ mm程度まで増加する傾向ならびに $l_g = 7000$ mm程度までは減少する傾向が認められた。 $l_g = 7000$ mm以降は、処理工具の場合、再度、切削抵抗の増加傾向が認められ $l_g = 10000$ mm以上でも寿命に至らなかったのに対し、未処理工具では引き続き切削抵抗の減少傾向が認められ、 $l_g = 9000$ mm程度で逃げ面側のダイヤコートの大規模な剥離が生じて切削性能が消失した。図7(a), (b)に両工具の各加工溝長さ時点において得られた加工溝の断面形状をそれぞれ示す。図より、未処理工具の場合は加工溝長さの増加に伴い、加工溝の幅が減少していることがわかる。これに対し、処理工具では、そのような傾向は認められなかった。これは、未処理工具の場合、工具摩耗の進行によりダイヤコート刃先稜線が後退したことによると考えられる。これらのことから工具寿命、形状精度の観点からも刃先のダイヤコート除去処理は有用であるといえる。

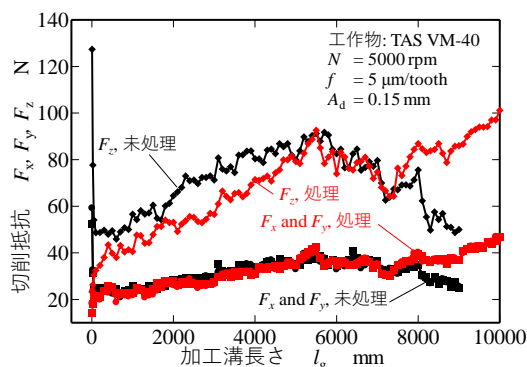


図6 エンドミル加工における切削抵抗

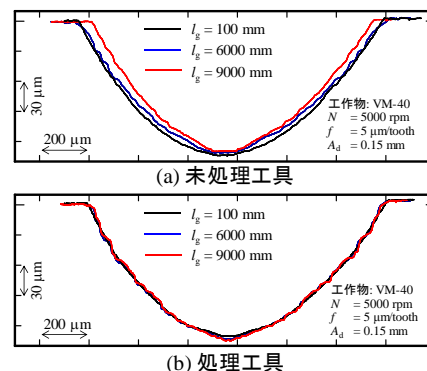
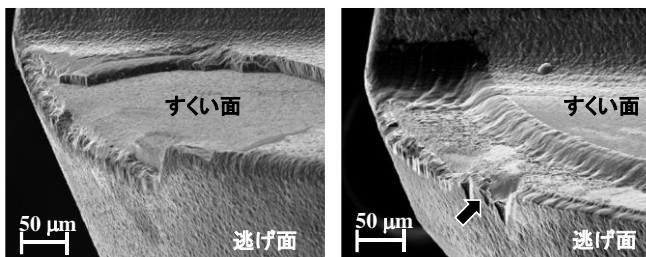


図7 加工溝の断面形状の比較

② 工具摩耗形態

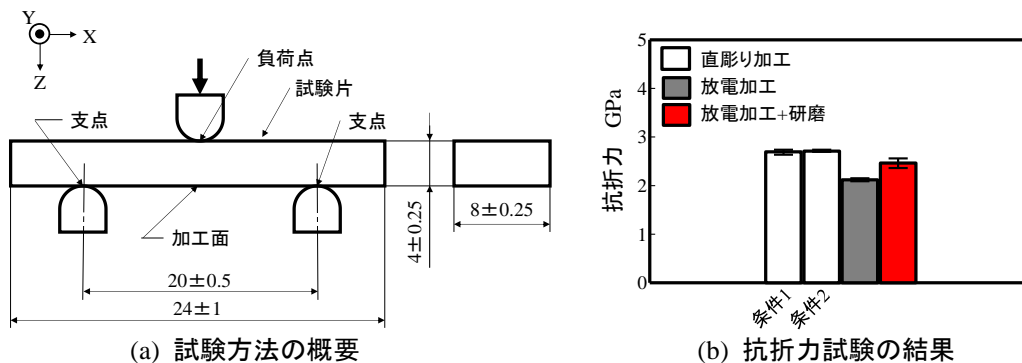
図 8(a), (b)に前節の切削条件下において $l_g = 6000 \text{ mm}$ 時点の両工具の工具刃先の拡大画像を示す。図より、処理工具においては図中に矢印で示す境界部で大きな逃げ面側のダイヤモンドならびに超硬母材の剥離、摩耗部が認められるが、それ以外の領域においては、逃げ面上のダイヤモンド稜線に鋭利な刃先の残存が認められる。これに対し、未処理工具においては、境界部から工具先端にかけて工作物と接触している稜線部全体が逃げ面側に刃先が後退しており、刃先の鋭利刃形状も大幅に消失していることがわかる。図 6, 図 8 の結果より、未処理より処理工具が良好な工具寿命、摩耗形態を示したのは、未処理工具の場合、切削抵抗によりすくい面上のダイヤモンドが機械的かつ強制的に除去されるため、すくい面上のダイヤモンド剥離が生じた際に、逃げ面側のダイヤモンドも影響を受けたためと考えている。このことから、切削に供する前にすくい面側のダイヤモンドを除去処理することが有意といえる。



(a) 未処理工具 (b) 処理工具
図 8 エンドミルの刃先摩耗形態の比較

③ 仕上げ面品質

ダイヤモンドエンドミルによる直彫り加工により得られた仕上げ面を評価した。ここでは、仕上げ面評価の一つとして実施した抗折力試験結果について報告する。図 9(a), (b)に抗折力試験の試験概要ならびに試験結果を示す。図にみるように抗折力の試験片の下面を、処理校による直彫り加工、ワイヤ放電加工ならびにワイヤ放電加工面に対し研磨仕上げした 3 種類の仕上げ面で比較した。また直彫り加工面は条件を 2 種類に分け、条件 1 より条件 2 は切込み量を大きくした。図より、直彫り加工面は放電加工面や、その研磨面と比較して高い抗折力を有していることがわかる。このことより、直彫り加工により得られる仕上げ面は、従前の放電加工面や、その研磨仕上げ面より優れた特性を有していると考えられる。

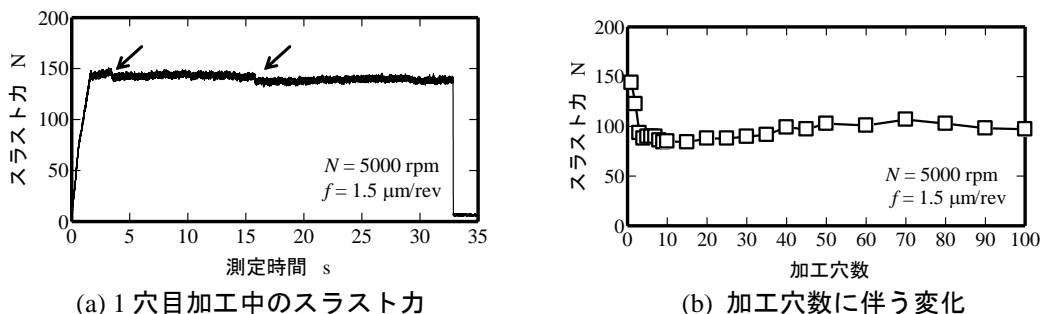


(a) 試験方法の概要 (b) 抗折力試験の結果
図 9 抗折力試験による仕上げ面評価

(2) ダイヤモンドドリルによる穴加工

① スラスト力

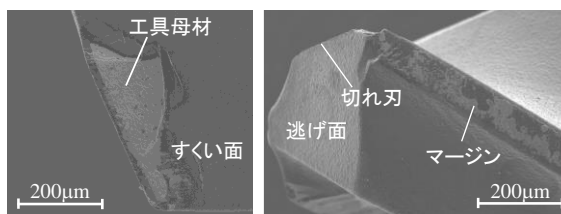
ドリル加工の実験では、切削抵抗はスラスト力にて評価した。図 10(a), (b)に 1 穴目加工中のスラスト力の変化傾向ならびに各加工穴数における最大スラスト力の変化傾向を示す。図 10(a)内に示すように、定常状態に至ったスラスト力が、突発的に減少する傾向が認められた。図 10(b)より、1 穴目のスラスト力は 150N 程度の大きなスラスト力を示したものの、この突発的なスラスト力の減少は数穴程度のみ認められ、それ以降はほぼ定常状態となることがわかった。



(a) 1 穴目加工中のスラスト力 (b) 加工穴数に伴う変化
図 10 スラスト力による切削特性評価

② 工具摩耗形態

図 11(a), (b)に 100 穴加工後の刃先部の拡大画像を示す. 図 5 と比較すると, 刃先周辺のすくい面側のダイヤモンドコートに大規模な剥離が認められるとともに, 逃げ面側ならびにマージン部には目立った剥離が認められないことがわかる. これらのことから, 連続切削に相当するドリル加工においても, 断続切削のエンドミル加工時と同様に, 本ダイヤモンド工具を用いるとすくい面上のダイヤモンドの剥離現象による鋭利刃が発現し, 切削性能が向上することを明らかにした.



(a) すくい面 (b) 逃げ面

図 11 ドリルの刃先摩耗形態

(3) まとめ

本研究では, 大量生産に向いており比較的安価に製造が可能なダイヤモンドコーテッド超硬工具を用いた超硬合金の直彫り加工において, エンドミルによる溝加工ならびにドリルによる穴加工の両加工法における有用性を検討することを目的に, 切削中に生じる切削現象, 工具摩耗形態, 仕上げ面品質を明らかにした. エンドミル加工においては, 刃先部の丸み半径を極小化させる処理を施した工具を適用することで, 切削抵抗, 工具寿命, 仕上げ面品質の観点で良好な工具性能が得られることを明らかにした. また, ドリル加工においても, 未処理のエンドミルと同様に, 切削初期段階ですくい面上にダイヤモンドコーティングの大規模な剥離が生じ, これにより鋭利刃が発現することで切削性能が向上することを明らかにした. 本研究では, 上述した以外の観点でも, その有用性を検討してきた. これらについては, 今後の論文掲載, 学会発表等により研究成果の社会還元に努めていく.

<引用文献>

- 1) Jianguo Zhang, Norikazu Suzuki, Yilong Wang, Eiji Shamoto, Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, 2014, pp. 2644-2659.
- 2) Masato Okada, Akihiro Yoshida, Tatsuaki Furumoto, Hidehito Watanabe, Naoki Asakawa, Masaaki Otsu, Mechanisms and characteristics of direct cutting of tungsten carbide using a diamond-coated carbide end mill, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 86, 2016, pp. 1827-1839.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Masato Okada, Reiji Suzuki, Hidehito Watanabe, Masaaki Otsu, Takuya Miura, Cutting characteristics of direct milling of cemented tungsten carbides using diamond-coated carbide end mills with untreated and treated cutting edge, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 13, No. 1, 2019, pp. 58-66.
DOI: 10.20965/ijat.2019.p0058
- ② Masato Okada, Reiji Suzuki, Atsuyuki Kondo, Hidehito Watanabe, Takuya Miura, Masaaki Otsu, Evaluation of finished surface of cemented carbide by direct cutting using diamond-coated carbide end mill, Procedia CIRP, 査読有, Vol. 77, 2018, pp. 114-117.
DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.234

[学会発表] (計 10 件)

- ① Masato Okada, Ryosuke Shida, Hidehito Watanabe, Takuya Miura, Masaaki Otsu, Fundamental drilling characteristics of cemented carbide with diamond-coated carbide drill, Proceedings of the 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE), 査読有, 2018, pp. 1-2.
- ② 岡田将人, 志田涼輔, 渡邊英人, 三浦拓也, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬ドリルによる超硬合金の穴あけ加工—加工穴数が工具刃先形態に及ぼす影響—, 日本機械学会第 12 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 査読無, 2018, pp. 1-2.
- ③ 近藤淳行, 岡田将人, 渡邊英人, 新谷正義, 三浦拓也, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具による超硬合金の直彫り加工の仕上げ面評価, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 査読無, 2018, pp. 171-172.

- ④ 近藤淳行, 岡田将人, 渡邊英人, 新谷正義, 三浦拓也, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具による超硬合金の直彫り加工による仕上げ面の評価, 2018 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 査読無, 2018, pp. 1-2.
- ⑤ 近藤淳行, 岡田将人, 渡邊英人, 三浦拓也, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具による超硬合金の直彫り加工における仕上げ面評価, 平成 29 年度切削加工専門委員会ワークショップ講演論文集, 査読無, 2017, pp. 9-10.
- ⑥ 近藤淳行, 岡田将人, 渡邊英人, 三浦拓也, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具による超硬合金の直彫り加工における仕上げ面評価, 2017 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, 査読無, 2017, pp. 1-2.
- ⑦ 志田涼輔, 岡田将人, 渡邊英人, 大津雅亮, ダイヤコート超硬ドリルによる超硬合金の穴あけ加工における切削条件が切削抵抗に及ぼす影響, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, 査読無, 2016, pp. 1-2.
- ⑧ 鈴木怜日至, 岡田将人, 渡邊英人, 大津雅亮, ダイヤコート超硬エンドミルによる超硬合金の直彫り加工における仕上げ面評価, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, 査読無, 2016, pp. 1-2.
- ⑨ 鈴木怜日至, 岡田将人, 渡邊英人, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具を用いた超硬合金のエンドミル加工一切削条件による仕上げ面の検討一, 日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 査読無, 2016, pp. 57-58.
- ⑩ 志田涼輔, 岡田将人, 渡邊英人, 大津雅亮, ダイヤモンドコーテッド超硬工具による超硬合金のドリル加工一切削特性の基礎的検討一, 日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 査読無, 2016, pp. 55-56.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：大津 雅亮

ローマ字氏名：(OTSU, masaaki)

所属研究機関名：福井大学

部局名：学術研究院工学系部門

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：20304032

研究分担者氏名：三浦 拓也

ローマ字氏名：(MIURA, takuya)

所属研究機関名：福井大学

部局名：学術研究院工学系部門

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：60781466

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。