

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 26 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420052

研究課題名(和文)ラピッドローテーション研削によるダイヤモンドの高温軟化促進研削法に関する研究

研究課題名(英文) Study of grinding method accelerated by high-temperature softening on diamond with rapid rotation grinding

研究代表者

太田 稔(Ota, Minoru)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：60504256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、連続ドレッシング機構を有した高速定圧研削装置を開発し、多結晶ダイヤモンド焼結体(以下、PCDと呼ぶ)の高速定圧研削実験を行うとともに、有限要素法による研削温度解析を行った。その結果、砥石周速度を増大すると、加工能率と表面粗さを同時に向上できることがわかった。さらに、砥石周速度100m/s以上の乾式研削により、工作物表面の推定研削温度が850℃を超え、ダイヤモンドの高温軟化が促進されたことが判明した。これによって、PCDの『高温軟化促進研削法』によって、ダイヤモンドの加工能率を飛躍的に増大できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a high-speed constant pressure grinding device having an in-process dressing mechanism was investigated, and high-speed constant pressure grinding experiments on a polycrystalline diamond (PCD) were carried out, moreover grinding temperatures were analyzed using FEM. In consequence, it was clarified that a grinding efficiency and a surface roughness were improved concurrently with increasing wheel speed. Moreover, an estimated grinding temperature of workpiece surface exceeded 850 degrees C at 100 m/s in wheel speed in dry condition. It was indicated that high-temperature softening of diamond was accelerated. It followed that grinding efficiency of diamond was dramatically increased using the grinding method accelerated by high-temperature softening on PCD.

研究分野：生産加工学，マイクロ・ナノ加工，研削加工，微細加工，新材料加工

キーワード：ダイヤモンド 高速研削 加工能率 表面粗さ 研削温度 ダイヤモンドホイール 高温軟化

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは物質中で最も硬いため、砥粒や超精密切削工具などに利用されている。しかしながら、その硬さゆえに究極の難削材とも言われ、研削・研磨加工に多大な労力を費やしている。従来から、ダイヤモンドホイールによる研削加工やスチール材等との摩擦熱を利用する熱化学反応を利用した加工の研究例があるが、加工能率と表面品位を両立させることは極めて困難であった。

研究者は、これまでラピッドローテーション研削 (RRG: Rapid Rotation Grinding) により、研削抵抗を低減し良好な工作物表面性状をもつ加工が可能であることや、セラミックスなどの硬脆材料にも高速研削が有効であり、品質低下を防ぐ最適な研削速度が存在することなどを明らかにした。そこで、これまでの研究成果をダイヤモンドの研削加工に発展させ、難削性を克服する新たな加工法として、ダイヤモンドの高温軟化特性を利用した高能率研削法を考案した。高速研削を用いることによって、機械的な研削抵抗低減効果と高速研削の研削熱を利用して工作物表面を熱軟化させることが可能であると考えた。すなわち、研削熱によりダイヤモンドの表面に軟化層、脆弱層を形成し軟化・脆弱層を砥粒により機械的に除去することにより、高能率加工を実現しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、PCD の材料特性を利用して、極めて高い加工能率で PCD の除去加工を実現することを目的としている。そこで、PCD の高温軟化特性を利用した新たな研削法として『高温軟化促進研削法』を提案する。このコンセプトを実現するために、高速研削を利用し、高速研削による研削熱の増大により、研削表面温度を高温にして、PCD 表面の軟化を促進して、高能率加工を実現する。具体的には、PCD の高温軟化促進に必要な温度、圧力等を明らかにし、PCD の高温軟化条件を明確化する。高速研削用ダイヤモンドホイールを用いた研削実験により、PCD の高速研削特性を明らかにする。有限要素法を用いた研削温度解析および研削温度測定実験により、研削温度と研削特性の関係を明らかにする。以上により、PCD の高速研削による『高温軟化促進研削法』が高能率高品位研削法として有用であることを実証する。

3. 研究の方法

本研究では、PCD の高温軟化特性を利用した新たな研削方法を実現しようとしている。そのためには、PCD を研削する際の研削条件と研削温度の関係を明確化することが重要となる。さらに、研削条件と加工能率や表面品位などの研削結果との関係を調査することによって、『高温軟化促進研削法』による高能率高品位加工を実現する。具体的には以

下の方法による。

高速研削実験装置の開発

PCD の研削特性を把握するために、高速定圧研削装置を設計・製作する。同時に、ダイヤモンドホイールの連続ドレッシングを可能にするドレッシング装置を設計・製作する。

PCD の高速定圧研削による研削基礎特性

高速定圧研削実験により研削特性を検討する。基本的な研削特性の解明のために、一般的なダイヤモンドホイールや研削条件による研削実験を実施し、研削条件と研削結果との関係を明らかにする。これによって、PCD の高温軟化条件を推定する。

高能率高品位研削法の追及

上記で得られた高温軟化条件を実現するために、高速研削用ダイヤモンドホイールによる高速研削実験を行い、高能率加工を実現する。

研削表面温度の推定

PCD の研削表面温度を推定するために、研削温度推定手法を考案する。また、有限要素法による研削温度の解析手法を確立し、研削表面温度の推定手法を開発する。さらに、研削温度の解析や研削後の PCD の表面分析等により、PCD の高温軟化現象に基づいた加工が行われていることを証明する。

4. 研究成果

(1) 高速研削実験装置の開発

本研究においては、**図 1** に示す超高速研削盤を実験装置のベースマシンとして使用した。砥石軸の最高回転数は 30000 min^{-1} である。この研削盤のテーブル上に、ラピッドローテーション研削装置および高速定圧研削装置を搭載して実験を行った。開発した高速定圧研削装置の概要図を **図 2** に、外観写真を **図 3** に示す。本装置は、工作物を定圧で砥石端面に押し当て、同時に定圧で連続ドレッシングが可能である。定圧機構にはいずれもスプリング方式を用い、案内機構はリニアガイドを用いた。また、工作物の押付け荷重をロードセルで計測するようにした。ダイヤモンドホイールは直径 200 mm とし、最外周から 20 mm の幅でダイヤモンド砥粒層を設ける構造とした。



図 1 実験に用いた超高速研削盤

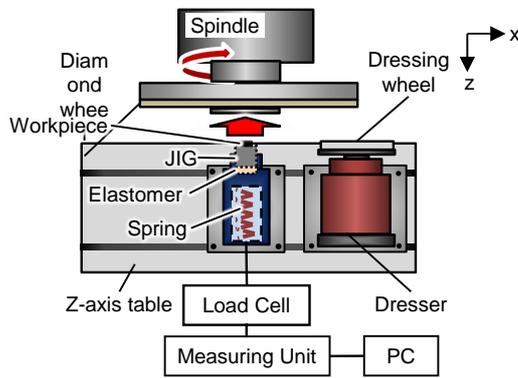


図2 高速定圧研削装置の概要図

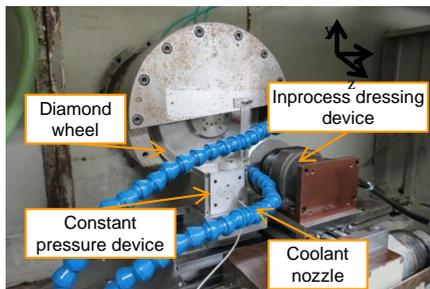


図3 高速定圧研削装置の外観

(2) PCDの高速定圧研削による研削基礎特性

PCDの基本的な研削特性を調査するために、メタルボンドホイールを用いた湿式研削実験を行った。工作物は超硬を基板としたPCD(FACT製)であり、大きさは5mm x 5mmでPCD層の厚さは0.6mmである。

砥石周速度と加工能率および表面粗さの関係を図4に示す。砥石周速度は汎用的に用いられている20~60 m/sとした。加工圧力は3 MPaとした。砥石周速度が大きくなると、加工能率は増大し、表面粗さも向上した。一般的に加工能率と表面粗さは相反する関係にあるが、本研究では、加工能率の増加と共に表面粗さが向上した。そこで、研削後の砥石表面状態を転写法により観察した結果、砥石周速度が増加すると、平坦化された面積が大きくなっていった。これは、砥石周速度の増大によってPCDと砥粒の接触回数が増えたことや、研削熱の増大によって砥粒先端でダイヤモンドの熱軟化が起こったためと考えられる。また、砥石周速度を60 m/sとして、加工圧力を1~3 MPaに変化させた場合、加工圧力の増加に伴い、加工能率が増大し、表面粗さも向上した。加工圧力の増大によって砥粒先端と工作物との接触圧力の増加や、研削熱の増大によってダイヤモンドの熱軟化が起こったためと考えられる。さらに、研削液流量と加工能率および表面粗さとの関係を調査した結果、研削液流量が少ないほど加工能率は増大し、表面粗さはわずかに大きくなった。以上のことから、砥石周速度および加工圧力を増大するほど加工能率と表面粗

さを同時に向上させることが可能であることが明らかになった。また、研削液流量は少ない方が良好な研削結果を得ることが可能であることがわかった。

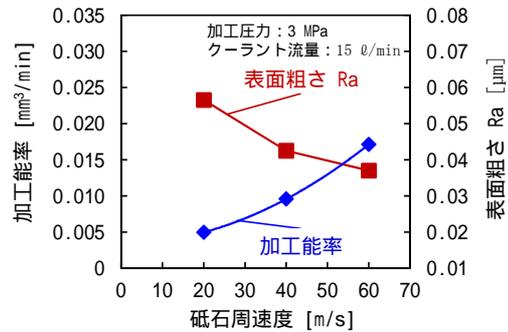


図4 砥石周速度と加工能率および表面粗さ

(3) 高効率高品位研削法の追及

これまでの定圧研削基礎実験により、砥石周速度の高速化や研削液流量の少量化が加工能率の向上に有効であることがわかった。これは、研削熱の増大によって、ダイヤモンドの軟化を促進していることによるものと推定された。そこで、研削熱を増大する方法として、乾式研削、さらなる砥石周速度の高速化、およびビトリファイドボンドホイールによる研削を考えた。

まず、メタルボンドホイールを用いて、湿式研削と乾式研削を比較した。砥石周速度は60 m/sとした。乾式研削では最初に実験を行ったときに、急激に加工が進行したため、連続ドレッシングは行わず、研削時間も2 minと短くした。図5に乾式研削と湿式研削における加工能率と表面粗さの関係を示す。表面粗さの測定には、非接触3次元表面粗さ形状測定機(NewView8200, ZYGO製)を使用した。乾式研削では湿式研削の70倍以上の極めて高い加工能率が得られた。また、表面粗さSaは若干悪化した。この理由として、湿式研削に対して乾式研削では極めて高い研削熱が発生し、軟化によるダイヤモンド粒子の脱落を促進していることが考えられる。

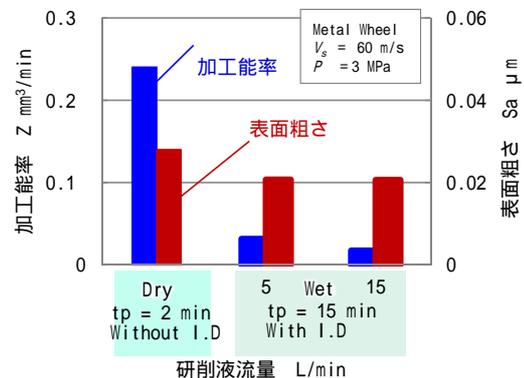


図5 乾式・湿式研削における加工能率と表面粗さ

次に、砥石周速度を 100 m/s まで高速化した時の加工能率を検討した。実験はまず湿式研削で行った。図 6 に、砥石周速度と加工能率の関係を示す。砥石周速度を 100 m/s に増大することによって、60 m/s に比べて急激に加工能率が增大していることがわかる。しかしながら、図 5 と比較すると明白なように、加工能率の絶対値は乾式研削に比べてはるかに小さかった。

そこで、乾式研削によって、砥石周速度と加工能率の関係を検討した。乾式研削における砥石周速度と加工能率の関係を、図 7 に示す。図から、砥石周速度 100 m/s で極めて大きい加工能率を示し、その値は湿式研削の時と比べて、実に約 200 倍の加工能率になった。また、砥石周速度が 60 m/s から 100 m/s になると、加工能率は急激に増大している。このことは、砥石周速度 60 m/s と 100 m/s で加工現象が大きく変化していることをうかがわせる。次に、乾式研削における砥石周速度と表面粗さの関係を検討した。砥石周速度が大きくなると、算術平均粗さ Sa は大きく変化せず、最大高さ粗さ Sz は大きくなった。このときの表面状態をレーザー顕微鏡 (VK-X200, KEYENCE 製) で観察した結果、砥石周速度 100 m/s では、クレータ状の窪みが観察された。これは、研削熱によって PCD の粒子が脱落したことによるものと考えられる。これらの現象を解明するため、研削温度や工作物の表面状態の解析を行った結果を次節で述べる。

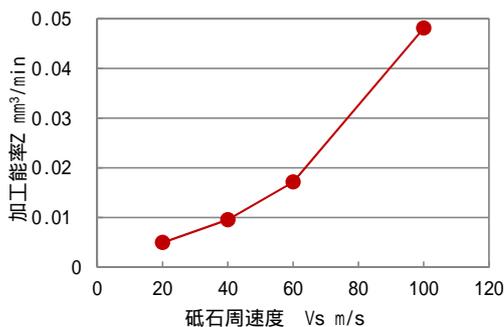


図 6 湿式研削時の砥石周速度と加工能率

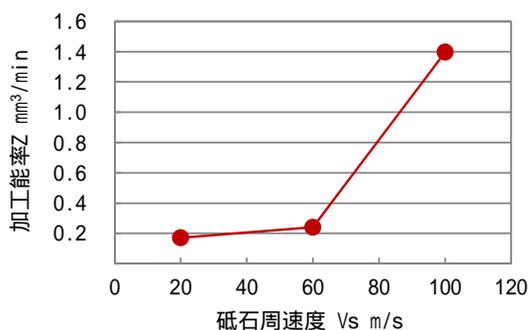


図 7 乾式研削時の砥石周速度と加工能率

研削熱を増大する方法の一つとして、ダイヤモンドホイールのボンド剤を金属からビトリファイドに変えるという方法が考えられる。ビトリファイドの方が金属より熱伝導率が小さいため、ダイヤモンドホイールに流入する研削熱割合が小さくなり、工作物の研削表面温度が大きくなる可能性があるからである。図 8 に、金属ボンドホイールとビトリファイドボンドホイールによる湿式研削における加工能率と表面粗さを示す。砥石周速度はビトリファイドボンドホイールが安全に使用できる速度として 40 m/s とした。図から、金属ボンドホイールよりビトリファイドボンドホイールの方が加工能率、表面粗さとも若干大きくなった。しかしながら、その向上効果は期待値より小さく、さらに大きく研削熱の影響が出ると考えられる乾式研削等によって、ボンド剤の影響を検討する必要があると考えられる。ビトリファイドボンドホイールによる乾式高速研削の実験は現在進行中である。

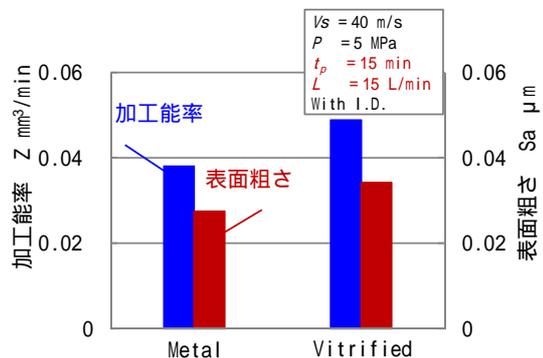


図 8 砥石ボンド剤と加工能率・表面粗さ

(4) 研削表面温度の推定

ここまで、PCD の高能率高品位研削を実現するために、砥石周速度、研削液条件 (湿式・乾式) 等が研削特性に及ぼす影響を実験的に明らかにしてきた。これらの実験結果から、加工能率の向上に研削熱が大きく関与していることが推察された。そこで、ここでは、研削表面温度の推定を行うことによって、本研究の基本的なコンセプトであるダイヤモンドの高温軟化現象を利用した加工が行われているかどうかを検証する。

まず、研削表面温度の推定方法について述べる。PCD に熱電対を埋め込み、ヒータによる加熱実験によって、熱電対温度 (PCD 内部温度) と PCD 表面温度を測定する。定常 1 次元熱伝達状態と仮定し、高温条件域から両者の関係式を求める。一方で、研削実験により PCD 内部温度を測定する。得られた PCD 内部温度から関係式を用いて PCD の研削表面温度を算出する。図 9 に研削表面温度の推定手順を示す。

研削温度の影響が最も強く研削結果に反

映される実験結果の代表例として、乾式研削における研削時間と推定研削温度の変化の様子を 図10 に示す。砥石周速度は 20, 60, 100 m/s とした。加圧が開始されるとともに推定研削温度は上昇し、設定加工圧力に達して、揺動を開始すると揺動による加工位置の変化に応じて推定研削温度は変化する。研削状態が安定した研削時間での推定研削温度をそれぞれの砥石周速度で比較すると、砥石周速度 100 m/s で推定研削温度が一般的なダイヤモンドの熱軟化温度を超える 850 以上になっていることがわかる。図 7 の実験結果を重ね合わせると、砥石周速度 100 m/s で 60 m/s に比べて加工能率が急激に増大した理由は、研削表面温度がダイヤモンドの熱軟化温度を超える温度に達したためと考えられる。

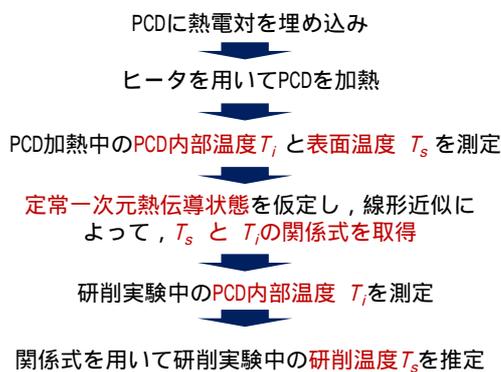


図 9 研削表面温度の推定手順

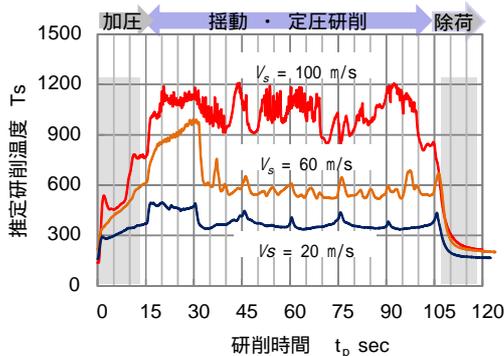


図 10 乾式研削時の推定研削温度の変化

次に、有限要素解析法(FEM)によって研削温度の算出を試みた。図 11 に FEM によって求めた推定研削温度と実験結果の例として、砥石周速度 100 m/s での乾式研削と湿式研削の推定研削温度を示す。解析結果および実験結果の推定研削温度は図の右上の温度測定点の位置の温度である。研削熱の熱流入量は研削動力を測定した実験結果から算出した。解析結果と実験結果は比較的よく一致した。このことから、研削実験時の研削動力を測定することによって、推定研削温度を求めることが可能になり、様々な加工条件での研削熱の関与の仕方を推定できる手法を開発する

ことができた。

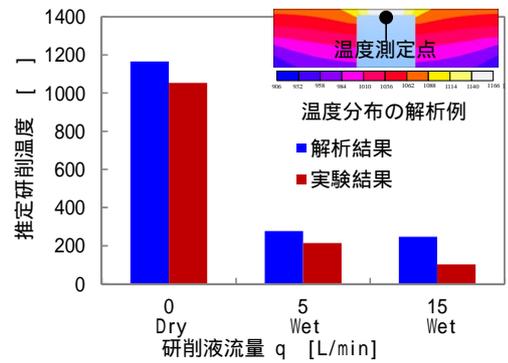
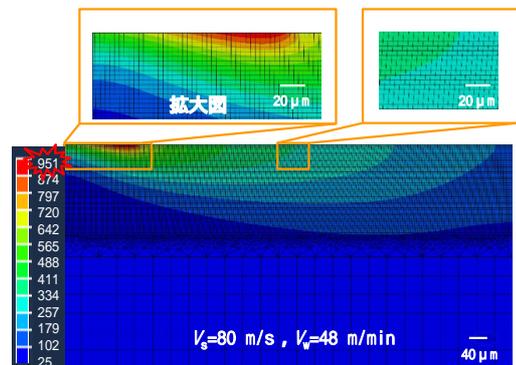
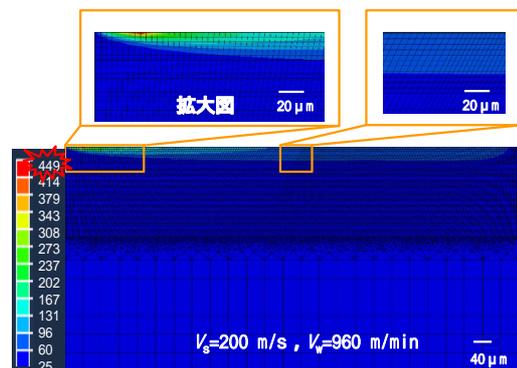


図 11 研削液流量と推定研削温度

一方で、ラピッドローテーション研削による PCD の高能率加工の可能性について、FEM による研削温度解析から検討した。ラピッドローテーション研削では工作物を高速で回転し研削動力を測定する必要があることから、ここでは工作物の製作が容易な焼入れ鋼 (S45C, HRC53~55) を対象にした。図 12(a) に、砥石周速度 80 m/s、工作物周速度 48 m/min における FEM による研削温度分布の解析結果を示す。また、図 12(b) に、砥石周速度 200 m/s、工作物周速度 960 m/min における結果を示す。



(a) 従来研削条件における研削温度分布



(b) ラピッドローテーション研削条件における研削温度分布

図 12 FEM による研削温度分布の解析例

いずれも湿式研削時の結果である。図から、前者に比べて後者では研削熱がごく表層部に集中し、研削温度も低くなっていることがわかる。すなわち、ラピッドローテーション研削によれば、ごく表層に研削熱が集中し内部への研削熱の流入も少なくなることがわかる。図 12 の結果は湿式研削の結果であるため、研削液の流量を適度に制御することによって、研削表面温度を制御し、ごく表層に研削熱を集中させることができるものと考えられる。すなわち、PCD の研削にラピッドローテーション研削を適用することによって、効果的に研削熱を利用した高能率研削加工が可能になることを示唆している。

(5) 結言

PCD の高能率高品位研削を狙いとして、ラピッドローテーション研削による『高温軟化促進研削法』を提案し、実験および解析によって実証することを試みた。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

PCD の高温軟化促進研削を実証するため、高速定圧研削法を提案し、連続ドレッシング装置付き高速定圧研削装置を開発した。高速定圧研削装置を用いて、PCD の高速定圧研削実験を湿式研削で行い、砥石周速度および加工圧力の増大とともに加工能率と表面粗さが同時に改善されることが明らかになった。

研削液の流量は加工能率に大きく影響し、研削液流量が少なくなるほど加工能率は向上した。特に、乾式研削では極めて高い加工能率を示すことが分かった。

一般的な砥石周速度 40 m/s 以下、湿式研削条件に比べて、砥石周速度 100 m/s、乾式研削条件では、加工能率が 200 倍以上になり、極めて高い加工能率が実現できた。PCD の研削温度を推定する研削温度推定手法を開発し、乾式研削における研削温度の推定を行った。砥石周速度 100 m/s の乾式研削で、推定研削温度が 850 を超えることが判明し、このことが砥石周速度 100 m/s で加工能率が急激に増大した理由と考えられる。

さらに、ラピッドローテーション研削による効果を、FEM により推定したところ、砥石周速度をさらに高速化し、工作物を高速回転することで、研削熱を工作物のごく表層部に集中することができ、効率的な加工が可能であることが推定できた。

以上の結果から、提案した『高温軟化促進研削法』がダイヤモンドの高能率高品位研削法として有用であることを実証することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. Keishi Yamaguchi, Ryo Yamazaki, Chuanhai Yu, Minoru Ota, Kai Egashira, Yasunori Akita and Shoji Suzuki,

Influence of Work Speed on Surface Quality with Rapid Rotation Mirror-like surface Grinding, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 1017 (2014) pp.66-71.

2. Takaaki FUJIMOTO, Minoru OTA, Kai EGASHIRA, Keishi YAMAGUCHI, Toshikazu NANBU, Hirota MIWA and Yasunori AKITA, High-speed constant-pressure grinding characteristics of PCD with diamond grinding wheel, Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 査読有, CD-R, No.0806 (2015).

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 中村篤史, 藤本剛壮, 太田稔, 江頭快, 山口桂司, 中村暢秀, PCD の高速定圧研削特性に及ぼす研削温度の影響 - 研削温度の推定と研削結果 -, 2016 年度砥粒加工学会卒業研究発表会, 東京, (2016-3).
2. 藤本剛壮・太田稔・江頭快・山口桂司(京都工芸繊維大)・南部俊和・三輪紘敬(日産自動車)・秋田恭伯(アライドダイヤモンド), PCD の高速定圧研削において研削温度が研削特性に及ぼす影響, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2015-9).
3. 藤本剛壮, 于伝海, 太田稔, 江頭快, 山口桂司, 南部俊和, 三輪紘敬, 秋田恭伯, ダイヤモンドホイールによる PCD の高速定圧研削特性, 日本機械学会第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, 徳島, (2014-11).
4. Keishi Yamaguchi, Ryo Yamazaki, Chuanhai Yu, Minoru Ota, Kai Egashira, Yasunori Akita and Shoji Suzuki, Influence of Work Speed on Surface Quality with Rapid Rotation Mirror-like surface Grinding, The 17th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Hawaii (2014-9).
5. 田代絢一, 藤本剛壮, 太田稔, 江頭快, 山口桂司, 南部俊和, 三輪紘敬, 秋田恭伯, 高速定圧研削によるダイヤモンドの高能率表面仕上げ, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京, (2014-3).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 稔 (OTA, Minoru)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号: 6 0 5 0 4 2 5 6