

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420050

研究課題名(和文)次世代単層超砥粒ホイールのための砥粒分布精密制御法の開発研究

研究課題名(英文)Development of precision control of distribution in abrasive density for next-generation single layered super abrasive grinding wheel

研究代表者

大橋 一仁(Ohashi, Kazuhito)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：10223918

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)：リブ形状の総形単層メタルボンドダイヤモンド砥石とこれに対向させた金属プレート間に生成させる静電場をシミュレーションし、静電気力によるダイヤモンド砥粒の飛翔特性を考慮して砥粒密度分布を生成するための条件を明らかにした。その結果に基づき、静電気力を利用してメタルボンドペーストを塗布した砥石台金の表面に、金属プレート上に配置したダイヤモンド砥粒を、砥石使用時の総切込み量の分布に応じた砥粒密度の分布を与え付着させることができた。

研究成果の概要(英文)：The available conditions for setting diamond abrasive grains with the required density distributions on formed grinding wheels using electrostatic force are made clear by the simulation of electrostatic field between ribbed single layered metal bond diamond wheels and electrode plates. As the results, the diamond abrasive grains could be set on the formed grinding wheel putting metal bond paste on with the grain density distribution according to the total depth of cut using the electrostatic force based on the simulation.

研究分野：工学

キーワード：総形ダイヤモンド砥石 ダイヤモンド砥粒 静電場 砥粒密度

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド砥粒あるいはcBN砥粒を切れ刃とする超砥粒ホイールは、金属、非金属を問わず多岐にわたる難削性材料の精密加工に利用されており、各被削材に適したホイールの選定技術が必要である。特に近年では、複合材や超合金に代表される新たな難削性新素材の開発とともにその利用が増えることが、より一層ホイールの選定を難しくしていることから、この課題を克服した新たなダイヤモンドホイールの開発が求められている。すなわち難削化の要因として、被削材自体の硬さ・粘さに起因する目詰まり(チタン合金・アルミ合金・CFRP)、低熱伝導性に起因する研削焼け・研削割れ(チタン合金・インコネル)などが挙げられ、これらを抑制し安定して加工できる超砥粒ホイールが囑望されている。

超砥粒ホイールは、粒度、集中度(砥粒密度)、ボンドから被削材にマッチングした仕様で構成され、ビトリファイド、レジノイド、メタルボンドホイールについては選定内容を細かく調整できるが、総形研削などの場合に必要となる作業面の成形はホイールの焼成後になされるため、多くの手間が必要となり、生産性を著しく低下させることが問題となっている。さらに、砥粒層の組織が一定であるため砥粒の配置や砥粒密度分布を細かに調整する要求を研削ホイールに反映させることはできない。

一方、めっきや冶金技術を利用する電着ホイールや単層メタルボンドホイールは、総形砥石の製作には有利であるが、既存の製造技術では砥粒の配置や砥石作業面における局所単位で砥粒密度をコントロールすることが困難であり、図1に示すようなランダムな砥粒分布を有する単層超砥粒ホイールにならざるを得ないのが現状である。なお、粗粒の超砥粒ホイールの一部は、砥粒切れ刃を所定の規則的な配列で砥石作業面に配置されるものもあり、その研削性能の学術的研究[例えば、北嶋孝之、奥山茂樹、由井明紀：ダイヤモンド砥粒配列砥石とGC砥石によるCFRPの研削性能、砥粒加工学会誌、Vol.55 No.10 (2011) pp.611-615]がなされているが、砥粒の配置は手作業によるもので、生産性は極めて低く、砥石表面における砥粒分布の制御技術に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、硬脆材料や機能性新素材の高効率かつ高精度な研削加工において、研削能率や取扱い性に優れる砥石として利用が進められる単層超砥粒ホイールの研削性能およびホイール寿命を飛躍的に向上させるため、ホイール表面において砥石それぞれの利用条件に応じた最適な位置に砥粒を速やかに配置するとともに理想的な砥粒密度の分布状態を実現する制御技術の開発を目的と

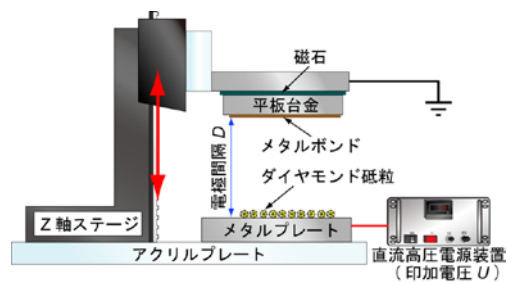


図1 実験装置の概略

表1 実験条件

砥粒	SDC30, 60, 120 Ti コーティング
平板台金	S45C (35×35×10mm)
メタルプレート	S45C (110×210×10mm) $R_a=0.10 \mu\text{m}$
砥粒配列範囲	15×15mm
電極間隔 D	1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 4.0mm
印加電圧 U	0~4.8kV
メタルボンド塗布厚 t	0.05mm

している。

3. 研究の方法

(1) ダイヤモンド砥粒の飛翔特性の解明方法

図1に静電場を利用した砥粒飛翔実験に使用した実験装置の概略を示す。Z軸ステージにより、電極間隔を任意に変更でき、直流高圧電源装置により、任意の電圧を印加することができる。実験では、あらかじめパンチングメタルにより砥粒を配列した下部メタルプレートに所定の電圧を印加し、アース接続された平板台金との間に電界を発生させ、メタルボンドが塗布された平板台金に砥粒を付着させた。本装置により電極間隔および印加電圧を変更することによって平行平板、メタルプレート間の電界強度を変化させ、各条件での砥粒の付着状態を顕微鏡で観察した。主な実験条件を表1に示す。

(2) 電界強度シミュレーションによる砥粒飛翔の予測方法

平行平板によるダイヤモンド砥粒の飛翔特性解明実験により得られたダイヤモンド砥粒の飛翔特性と電界強度の関係は判明し

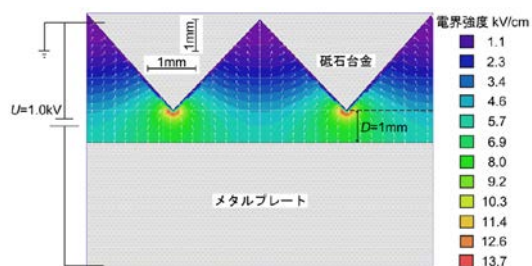


図2 静電場解析結果

表2 シミュレーション条件

印加電圧 U	0~3.0kV
砥石合金	0kV
電極間隔 D	1~4mm
空気の比誘電率	1.00058

たが、総形砥石の表面近傍に発生している電場や電界強度は未知のものとなっていた。そこでVリブ形状を有する総形砥石とメタルプレート間に電圧を印加する場合の静電場をシミュレーションし、電界強度の解明を行った。使用した静電場解析ソフトでは、砥石合金とメタルプレートのCADモデルを作成し、印加電圧や電極間隔の領域における比誘電率などを入力することで電位や電界強度を解析できるものとなっている。

図2に静電場解析の結果の一例を示す。本研究のシミュレーションにおいて、リブ山先端からメタルプレートまでの電極間隔を D 、メタルプレートに印加する電圧を U と定義しており、図2は $D=1\text{mm}$ 、 $U=1.0\text{kV}$ の場合のシミュレーション結果である。

この結果より、リブの山部における電界強度がもっとも高く、電界強度が約 13.7kV/cm となっている。そして、谷部に向かうにつれて低くなっていることが確認できる。並べた砥粒の数に対する実際に付着した砥粒の数で定義する砥粒飛翔率は電界強度に依存することが明らかとなっているため、砥粒はリブ山先端近傍へ優先的に付着すると考えられる。ダイヤモンド砥粒はメタルプレート上に設置しており、そこでの電界強度の影響を受けて飛翔するため、メタルプレート表面の電界強度を測定した。表2に主なシミュレーション条件を示す。印加電圧 U や電極間隔 D を変化させることにより、総形砥石表面近傍に発生する静電場の状態を確認した。

(3) 総形単層メタルボンドダイヤモンド砥石の外周面への付着における砥粒密度分布制御方法

図3に実験装置の概略図を示す。この実験装置では印加電圧 U と電極間隔 D を任意に変更することにより電界強度 E を制御することが可能となっている。また、3つのモータがあり、それぞれ砥石合金の回転、砥石合金のトラバース、メタルプレートの移動を担っている。そして、3つのモータはプログラムにより連動して制御できる仕様となっており、任意の速度で駆動させることが可能となっている。

実験では、あらかじめダイヤモンド砥粒をパンチングメタルによりメタルプレート上に配列しておき、砥石合金円周部には所定の厚さにペースト状のメタルボンドを塗布する。電圧を印加するとともに砥石合金は反時計回りに回転を始め、メタルプレートは紙面向かって左から右へ移動し、砥粒の砥石合金への連続的な付着を行う。主な実験条件を表

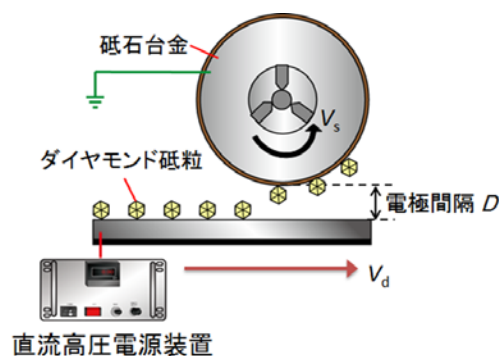


図3 微粒子塗布装置

表3 実験条件

砥粒	SDC30 Tiコーティング
合金	S45C
メタルプレート	S45C 110×210×10mm
メタルボンド塗布厚	0.25mm
砥粒配列	千鳥配列(45°) ピッチ $P=2.12\text{mm}$
電極間隔 D	1.5mm
印加電圧 U	1.0~1.4kV
メタルプレート移動速度 V_d	6~36 mm/s
合金周速度 V_s	12, 24 mm/s
速度比 V_d/V_s	0.5~3

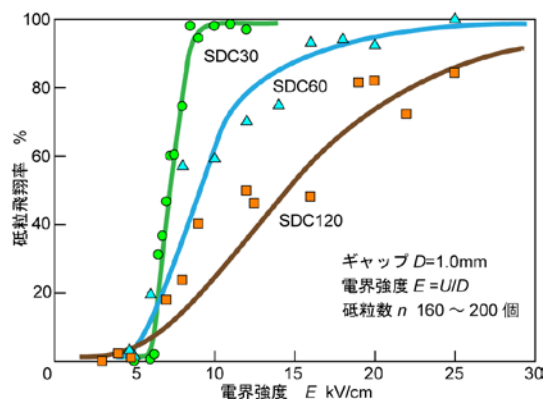


図4 各粒径砥粒飛翔率と電界強度の関係

3に示す。

4. 研究成果

(1) ダイヤモンド砥粒の飛翔特性の解明

図4に各粒径砥粒飛翔率と電界強度 ($E=U/D$) の比較を示す。この関係より砥粒径に関わらず、砥粒飛翔率は電界強度に依存して変化することが確認され、SDC30砥粒が飛翔しはじめる最小の電界強度は約 6kV/cm であり、約 9kV/cm で飛翔率はほぼ100%に達した。SDC60では約 5kV/cm で飛翔しはじめ、約 24kV/cm で飛翔率は100%に達する。また、SDC120では約 4kV/cm で飛翔しはじめ、

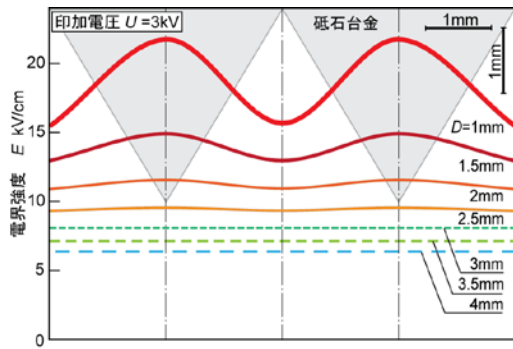


図5 電極間隔による電界強度分布の変化

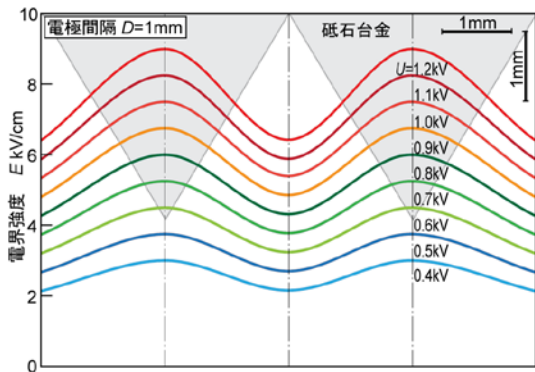


図6 印加電圧による電界強度分布への影響

25kV/cm のときでも飛翔率は 80%程度であった。これより大きな電圧を印加すると放電現象が発生し、実験をすることができなかった。この結果より、砥粒の粒径が異なると飛翔率の挙動も変化することが確認され、粒径が小さくなるにつれて飛翔率の増加割合は小さくなることが判明した。また砥粒が飛翔しはじめる電界強度のしきい値は、粒径が小さくなるに従って小さくなった。それに加えて、安定した砥粒飛翔は小さい粒径のものよりも大きい砥粒の方が安定して行われることがわかる。SDC60, SDC120 については SDC30 と比較して砥粒飛翔率のばらつきが激しい。この要因について考察する。SDC30, SDC60, SDC120 はどの砥粒も 12 面体の形状を持っている。また、ふるいをかけている砥粒であっても大きさが異なるものも存在し、静止している際の結晶方方面に統一性がないことや、それぞれの面の形、面積が異なっている。さらに、割れている砥粒も見受けられ、これら以上のことが帯電量に影響を及ぼしているため、砥粒飛翔率にばらつきが出ていると考えられる。

(2) 電界強度シミュレーションによる砥粒の飛翔予測

図5に印加電圧 $U=1.0\text{kV}$ と固定した場合の電極間隔変化におけるメタルプレート上の電界強度の大きさを示す。電極間隔が $4\sim 3\text{mm}$ と大きい場合では電界強度の分布は砥石形状の影響を受けず、ほぼ一定値となっている。しかし、電極間隔が 2.5mm や 2mm の場合は砥石形状に応じて電界強度の分布に差が現れ

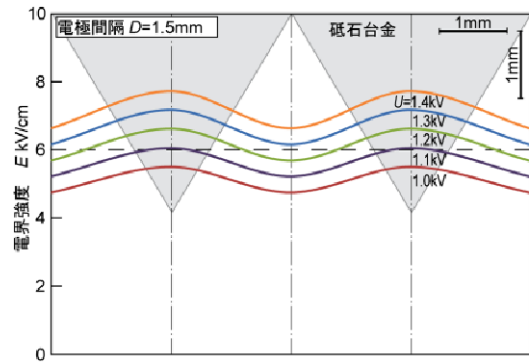


図7 電極間隔 1.5mm における電界強度シミュレーション結果

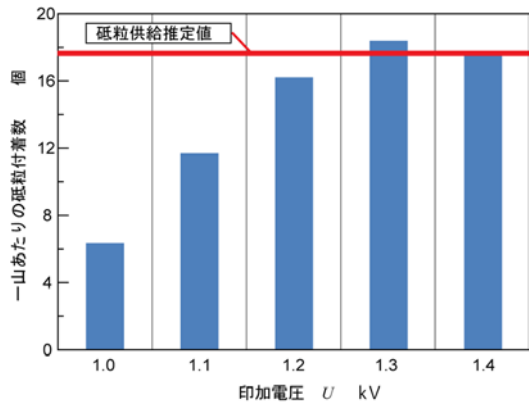


図8 各印加電圧における砥粒付着数

ていることが確認できる。さらに電極間隔が小さくなるにつれ電界強度の分布の差が顕著となり、特に電極間隔が 1mm の場合は、山部と谷部での電界強度の差が約 1.4 倍まで増大する結果となった。以上のことから、総形砥石において、電極間隔を小さくした状態で電圧を印加すると、山部と谷部で電界強度の差を生み出せることが判明した。この結果は、リップ先端近傍に砥粒を付着させるには有効な結果であると推測できる。

図6に電極間隔 $D=1\text{mm}$ と固定した場合の印加電圧 U による電界強度の影響を示す。印加電圧がどの値の場合も、電界強度分布は総形形状の山部と谷部で 1.4 倍の差を保ちながら平行移動するような結果となった。この結果より、電極間隔 D を小さくした状態であれば、印加電圧 U の大きさに関わらず、総形砥石の山部と谷部の電界強度に差を持たせることが可能である。そのため砥粒をリップ山近傍のみ付着させるには、電極間隔 D が小さい条件で所定の電圧を印加すれば実現できそうである。

(3) 総形単層メタルボンドダイヤモンド砥石の外周面への連続付着時における砥粒密度分布制御

① 印加電圧による砥粒密度分布の制御

表3に示す実験条件のうち、メタルプレート移動速度 V_d を 24mm/s 台金周速度 V_s を 24mm/s と固定し、速度比 $V_d/V_s=1$ とした状態で、印加電圧を $1.0\sim 1.4\text{kV}$ まで変化させ印加電

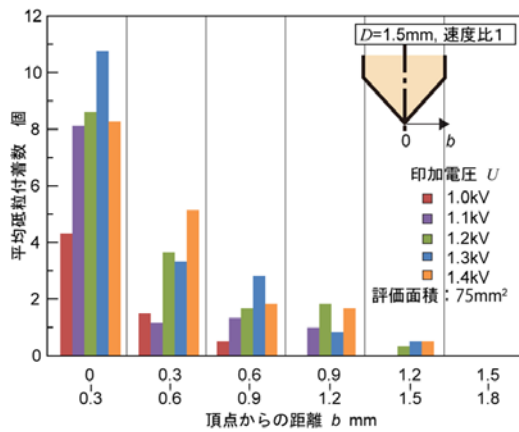
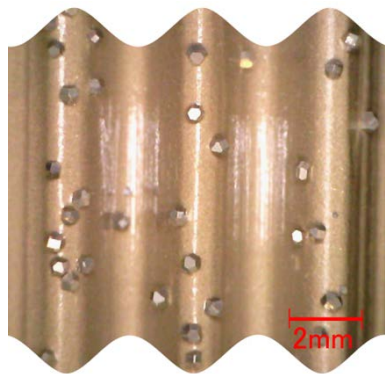
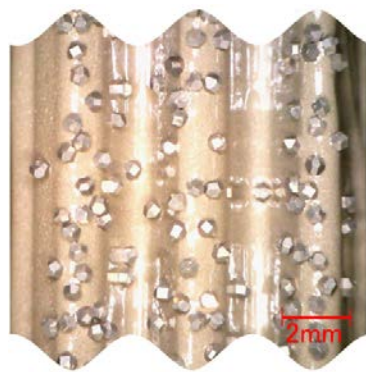


図9 平均砥粒付着数と頂点からの距離



(a) $V_d/V_s=1$



(b) $V_d/V_s=3$

図10 砥粒付着後の砥石表面

圧による砥粒密度分布への影響を検討した。図7に電極間隔1.5mmにおける電界強度シミュレーションの結果を示す。図中の破線で示される最小飛翔電界強度付近の電界強度が発生する条件をシミュレーションにより求め、印加電圧の値を設定した。図8に印加電圧の影響と一山あたりの砥粒付着数の関係を示す。図中の砥粒供給推定値は配列した砥粒の間隔、メタルプレート移動速度、台金周速度より求めた理論値である。印加電圧の増加にともない砥粒の付着数は増加し、印加電圧 $U=1.3kV$ の時に砥粒供給推定値とほぼ同じ値となった。砥粒供給推定値より若干大きな値となったが、これは砥粒の飛翔が円周方向でばらつくことが原因であると考えられる。

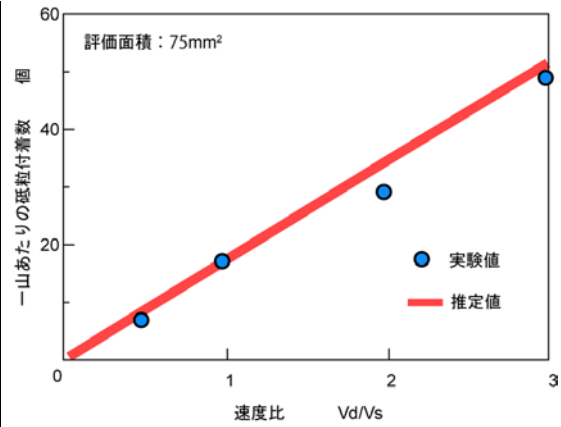


図11 速度比と一山あたりの砥粒付着数の関係

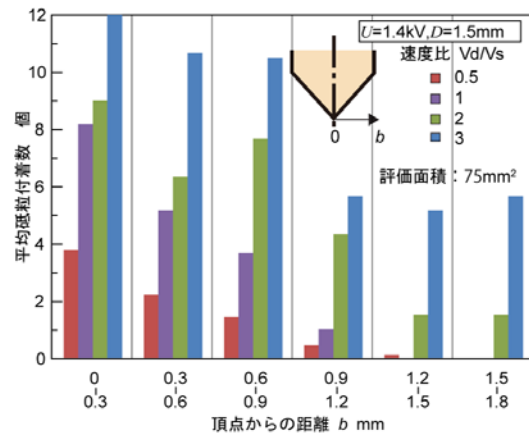


図12 速度比と各領域における砥粒付着数

$U=1.4kV$ の条件でも砥粒付着数は増加することはなく、砥粒供給推定値とほぼ等しい結果となった。この結果より印加電圧 $U=1.0\sim 1.2kV$ の場合は、メタルプレートに並べられ、供給された砥粒はすべて飛翔しておらず、印加電圧の増加にともない飛翔する砥粒数は増大し、 $U=1.3kV$ 以上の条件において、供給されたすべての砥粒は飛翔、付着したと考えられる。図9に平均砥粒付着数と頂点からの距離の関係を示す。 $b=0\sim 0.3mm$ の領域における砥粒付着数が最も大きく、谷部に近づくにつれ砥粒付着数は減少する傾向を示した。どの領域においても、印加電圧の増加に伴い砥粒の付着数は増える傾向を示した。

②メタルプレート移動速度による砥粒密度分布の制御

表3に示す実験条件のうち、台金周速度 V_s を $12mm/s$ と固定し、メタルプレート移動速度 V_d を $6\sim 36mm/s$ と変化させることで、速度比 $V_d/V_s=0.5\sim 3$ までの条件で砥粒付着実験を行った。

図10に実験後の砥石表面を示す。このようにメタルプレート移動速度と台金周速度により砥粒付着の状態が変化しており、 V_d/V_s が大きい条件のほうが砥粒の付着数が増加していることが確認できる。図11に一山あたりの砥粒付着数と速度比の関係を示す。速度比を大きくするにつれて砥粒付着数は線形的に増加することがわかった。これにより、



図 13 試作砥石の例

砥粒の付着数は、速度比 V_d/V_s に依存することが実証された。今回の速度比が 3 までの実験においては、推定値と実験値の誤差は小さい結果となった。図 12 に速度比と各領域における砥粒付着数の関係を示す。速度比を大きくするにつれ、どの領域においても砥粒付着数は増大する結果となった。また、速度比が 0.5~1 の場合は $t=1.2\sim 1.5\text{mm}$ の領域にはわずかにしか砥粒が存在しておらず、 $t=1.5\sim 1.8\text{mm}$ の領域には砥粒が全く付着しないという結果になった。一方、速度比が 2~3 の条件では先端付近の砥粒数が多いが $t=1.2\sim 1.5$, $t=1.5\sim 1.8\text{mm}$ の領域にも砥粒が付着することが判明した。

前述の(3)①では、砥粒密度分布が電界強度によって制御できることを明らかにしているが、速度比によってさらに砥粒密度分布の制御範囲を広げることが可能となり、電界強度と速度比のパラメータを組み合わせることで様々な砥粒密度分布を有する超砥粒砥石を実現できることが期待できる。図 13 に $V_d/V_s=2$ の条件で作成した砥石を一例として示す。このように、本実験装置を用いることにより砥石の全周に砥粒を付着させることに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

S. Watanabe, K. Ohashi, Y. Kakuda, S. Tsukamoto, Control of Setting Abrasive Grains on Single-layered Metal Bond Diamond Forming Wheel Using Electrostatic Field, Proceedings of 19th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 査読有, Vol. 1, 2016, pp. 36-41.

〔学会発表〕(計 5 件)

①辰本大輔, 渡邊 智, 角田悠輔, 大橋一仁,

静電場を用いた総形単層メタルボンドダイヤモンド砥石の砥粒密度分布制御, 2017 年砥粒加工学会卒業研究発表会, 2017. 3. 3, ホテルプラザ勝川 (愛知県春日井市)

②S. Watanabe, K. Ohashi, Y. Kakuda, S. Tsukamoto, Control of Setting Abrasive Grains on Single-layered Metal Bond Diamond Forming Wheel Using Electrostatic Field, The 19th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2016), 2016 年 10 月 4 日, Stockholm (Sweden)

③渡邊 智, 大橋一仁, 角田悠輔, 塚本真也, 単層メタルダイヤモンド砥石の砥粒密度制御法に関する基礎的研究 -総形砥石表面近傍の静電場によるダイヤモンド砥粒の飛翔現象の検討-, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 16 日, 東京理科大学野田キャンパス

④角田悠輔, 大橋一仁, 渡邊 智, 塚本真也, 単層メタルボンドダイヤモンド砥石の砥粒密度制御法に関する基礎的研究, 2015 年度精密工学会中国四国支部高知地方学術講演会, 2015 年 11 月 28 日, 高知工科大学

⑤K. Ohashi, S. Murakawa, S. Tsukamoto, Effect of Dry Ice Blasting on Removal of Loading Carbon Chips on Wheel Surface, The International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies 2014, 2014 年 9 月 3 日, 台北

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 一仁 (OHASHI, Kazuhito)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 10223918

(2) 研究分担者

塚本 真也 (TSUKAMOTO, Shinya)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 80163773

(3) 研究分担者

大西 孝 (ONISHI, Takashi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 90630830