

令和元年6月19日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06024

研究課題名（和文）知能化工作機械のための表面性状予測機能の開発

研究課題名（英文）Development of prediction function of ground surface roughness for intelligent grinding machines

研究代表者

山田 高三（YAMADA, Takazo）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10349962

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、砥石の表面形状測定装置を試作し、測定した砥石形状から研削後の工作物表面形状を予測する知能化システムを開発することを目的としている。

砥石表面形状装置の試作においては、点合焦式輪郭曲線法を応用した測定後高さ検出法を提案した。これまで点合焦式輪郭曲線法では、砥石表面の測定は難しかったが、測定後高さ検出法では砥石表面上の砥粒を精度よく測定できるようになった。また、研削後の工作物表面形状の予測については、砥粒を支持している砥粒支持剛性から砥粒の弾性変位量を考慮したシミュレーションソフトを作成した。これにより、砥石表面形状の測定結果から工作物の表面形状を予測できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの砥石表面形状の測定には三角測量法が使われていたが、精度よく測定することが難しかった。これに対して本研究で提案した方法により、精度よく測定できるようになった点が社会的に意義がある。また、研削後の工作物表面形状の予測においては、砥粒を支持する砥粒支持剛性に着目し研削中の砥粒の弾性変位量を考慮した。さらに工作物の弾性回復量も考慮した。この2点を考慮して工作物の表面形状を予測した点に学術的な意義がある。

これらの機能を工作機械に搭載することにより、これまで日本が得意としてきた工作機械の高剛性・高精度化に加え、知能化による高能率加工を実現でき、国際競争力のある工作機械を産み出すことができる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a prediction system of ground surface roughness of workpiece using grinding wheel surface geometry measured by proposed measuring device of grinding wheel surface.

In fabrication of measuring device of grinding wheel surface, the measured focus position recalculation method improving point autofocus profiling method is proposed in this study. Using this method, it is confirmed that high accuracy measured results of grinding wheel surface are obtained. In fabrication of the prediction system of ground surface roughness, an abrasive grain displacement and an elastic deformation of workpiece are considered to developed simulation software. Using the measured result of grinding wheel surface and the simulation software, ground surface roughness of workpiece can be predicted accurately before grinding operation.

研究分野：研削加工

キーワード：研削 砥石 表面粗さ レーザ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) これまで日本の工作機械は、高剛性・高精度に着目した設計により世界をリードしてきた。しかし近年、近隣諸国の工作機械の技術進歩に伴い、これまでの高剛性・高精度化に加え知能化が重要になってきている。そこで(株)ジェイテクトや(株)岡本工作機械製作所では、過去の研削条件をデータベース化し、その中から加工に適した条件を決定する自動研削条件決定機能などを開発し、作業者に依存しない研削盤を開発している。このように、工作機械の知能化により日本の産業基盤である工作機械技術に「知」の資産を産み出すことは重要であり、ドイツやアメリカが進めている産業技術の知能化に対する国際競争に打ち勝つ技術が必要となっている。

(2) ところで、研削加工においては、研削中に砥石が弾性変形するため加工後の寸法形状を予測するのが難しく、どのように加工すれば良いかは現場作業者の勘に頼っている。また、砥石は砥粒と結合剤で構成されているが、砥粒の摩耗や脱落が激しいため砥石形状が変化しやすく、研削後の工作物表面形状にばらつきが多い。このように、研削加工は作業者の勘やばらつきが多いため、生産効率が上がらない欠点を有している。

2. 研究の目的

(1) 研削加工の自動化・知能化の技術進歩を妨げている要因として、研削後の工作物表面形状の予測が難しい点が挙げられる。研削では、砥石形状がそのまま工作物に転写されるため、砥石の軌跡から工作物の表面形状を予測できる。しかし、砥石形状の測定が難しいため、工作物の表面形状の予測が困難となっている。そのため、自動化においては、加工中に砥石形状が変化しても確認できずに加工が続くため、不良品を出す原因となっており、生産効率の向上を妨げている。

(2) そこで本研究では、砥石の表面形状測定装置を試作し、測定した砥石形状から研削後の工作物表面形状を予測する知能化システムを開発し、これを研削盤に搭載することで研削加工での生産効率と歩留まりを向上させることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 砥石表面形状測定装置は点合焦式輪郭曲線法を応用して試作した。点合焦式輪郭曲線法の原理を図1に示す。レーザ発振器から照射され、2つのハーフミラーで屈折されたレーザ光は、対物レンズを通り測定対象物に照射される。そして、測定対象物で跳ね返ったレーザ光は再び対物レンズを通り、集光レンズを通過する。最後に、4つのフォトダイオードセンサ A, B, C, D に受光される。各センサの出力電圧 V_a, V_b, V_c, V_d から差分電圧 V は次式により算出される。この差分電圧が 0V のとき、図1のようにセンサ B と C の中間にレーザ光が受光した状態であり、レーザの焦点が測定物に合っていることを示している。

$$V = (V_a + V_b) - (V_c + V_d) \quad (1)$$

点合焦式輪郭曲線法は、対物レンズを各測定箇所まで自動合焦させることで、 V が 0V になる対物レンズ高さを算出している。そして、この高さの違いから測定物の表面形状を得る測定法である。それに対して本研究では、測定原理は同じではあるが、各測定箇所まで自動合焦させるのではなく、順次レンズ高さを変えて測定を行う。そして、測定後に焦点の合う高さを算出する方法を提案した。この測定方法を本研究では、測定後高さ検出法と呼ぶ。

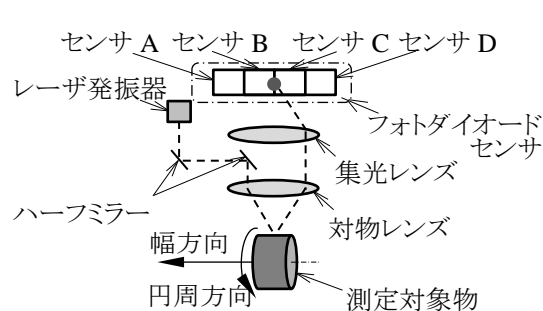


図1 点合焦式輪郭曲線法

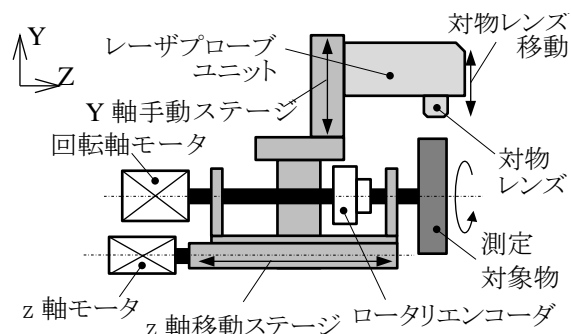


図2 砥石表面形状測定装置

(2) 砥石表面形状測定装置の概略図を図2に示す。測定対象物である砥石の上方にレーザプローブユニットを配置している。そして、対物レンズを設定した高さに固定し、砥石を回転させる。そのときの各円周方向の測定点において、フォトダイオードセンサの出力電圧値を測定する。これを設定した高さ範囲まで順次対物レンズ高さを変えて、測定を繰り返す。

次に、測定後に焦点の合う対物レンズ高さを求める方法を説明する。測定結果の一例として、ある円周上における対物レンズ高さと差分電圧 V およびセンサ B, C の出力電圧 V_b, V_c の関係を図3に示す。図3より、 V が 0V にもっとも近い対物レンズ高さは、 $224\mu\text{m}$ (▲部)であり、こ

の高さが焦点の合う高さとなる。点合焦式輪郭曲線法では、この V により高さの算出を順次行う。しかし、前述のように測定後高さ検出法では、対物レンズを自動合焦させずに対物レンズ高さを順次変えて測定を行う。そのため、高さ方向の測定間隔によっては、 V が $0V$ になる高さを必ずしも測定できるわけではない。したがって、測定誤差が生じてしまう恐れがある。

そこで本研究で提案する測定方法では、

V_b , V_c に着目する。図 3 より、 V_b , V_c は差分電圧 V が $0V$ となる前後の高さで高い電圧値を示している。これは、焦点が合う位置からわずかにずれると、隣り合うセンサ B, C のどちらかにレーザー光が集中して受光されるためである。そこで V_b , V_c の最大電圧が生じた際の対物レンズ高さ(●部と■部)に着目すると、両者の間に V が $0V$ となる高さ(▲部)がある。すなわち、焦点が合う前後で V_b , V_c はそれぞれ最大電圧値を示す高さがある。そこで本研究で提案する測定後高さ検出法では、 V による高さの算出だけでなく、 V_b , V_c が最大となるレンズ高さを求め、これらの対物レンズ高さの差をを求めることで、焦点の合う高さの算出を行う。

以上の処理を砥石の円周方向の各点において行い、それぞれの対物レンズ高さを算出することによって、二次元形状を求めることができる。さらに、砥石の幅方向にも同様の処理を行うことで、三次元形状を抽出することができる。

(3) 研削後の工作物表面形状の予測は、工作物の仕上げ面が砥粒の運動軌跡により削られた研削痕の集合として求めることができる。そこで各々の砥粒の挙動が研削痕形状に与える影響を明らかにすることで、工作物表面形状の予測ができると考えた。

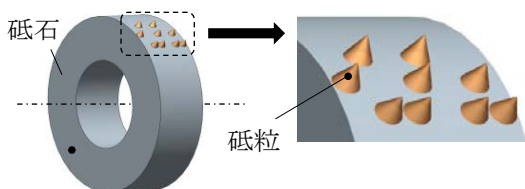


図 4 砥粒配置の模式図

図 4 に示すように、砥石表面上に砥粒が配置している。この砥粒が図 5 のように剛性 k_{gs} で結合剤で支持されたものと考える。研削方向を x 軸、切込方向を y 軸、砥石軸方向を z 軸とし、砥石半径 R 、設定切込量 a_p 、ある x 座標における切込量 y_x 、真実切込量 Y_1 、砥粒の弾性変位量 d_g 、工作物の弾性回復量 d_w 、砥石周速度 V_g 、工作物送り速度 V_w とした。

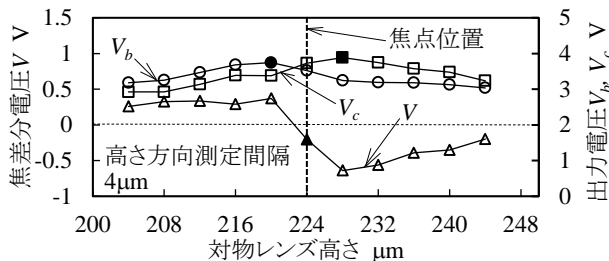


図 3 各出力電圧と対物レンズ高さの関係

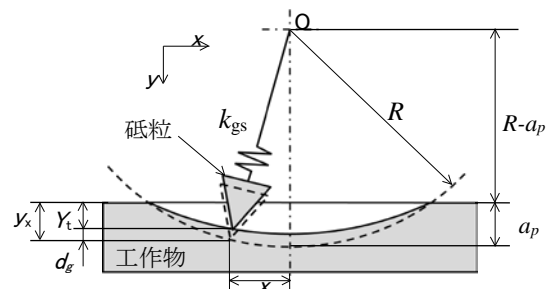


図 5 砥粒の研削プロセスモデル

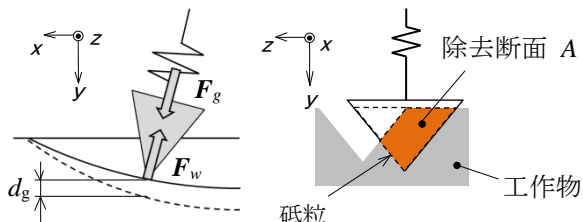


図 6 砥粒に作用する力 図 7 工作物除去断面

(4) 砥粒の弾性変位量は、図 5 のように砥粒が弾性変位している場合を考える。砥粒にかかる力に着目すると、図 6 に示すように、結合剤に作用する力 F_g 、工作物からの砥粒を押し戻す力 F_w の 2 つの力が作用しており、それぞれつり合っている。これらの力は結合剤の支持剛性 k_{gs} と単位面積あたりの力 k_w から、それぞれ式(2)、式(3)より求められる。よって $F_g = F_w$ の関係が成り立つまで、任意の弾性変位量 d_g から図 7 に示す他の研削痕との重複を考慮した断面積 A を算出し計算を繰り返すことで、 d_g は一定の値に収束し、砥粒の弾性変位量が求められる。

$$F_g = k_{gs} \cdot d_g \quad (2)$$

$$F_w = k_w \cdot A \quad (3)$$

(5) 工作物の弾性変形量は、球と平面の接触状態におけるヘルツの弾性接触理論を用いて算出する。砥粒と工作物の接触を図 8 に示すように球と平面の接触状態であると仮定する。予め、切込量と法線抵抗の関係を求めておくことにより、砥粒一粒あたりに作用する荷重 P を求められる。この P からヘルツの接触理論より図 8 の d_w を算出できる。工作物の弾性回復量 d_w の計算式を式(3)に示す。ここで砥粒先端半径 r 、砥粒のヤング率 E_g 、ポアソン比 ν_g 、工作物のヤング率 E_w 、ポアソン比 ν_w とする。

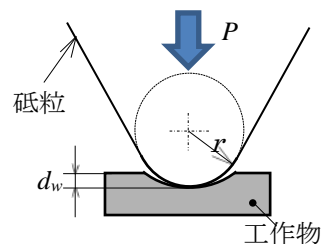


図 8 砥粒による工作物の弾性回復量

$$d_w = \sqrt[3]{\frac{9\pi P^2 (\kappa_g + \kappa_w)}{16r}} \quad (4)$$

ここで, $\kappa_g = 1 - \nu_g^2 / \pi E_g$, $\kappa_w = 1 - \nu_w^2 / \pi E_w$

4. 研究成果

(1) 試作した装置を用いて, ドレッシング前後の砥石表面形状の測定を行い, その結果を比較した. 砥石はビトリファイド砥石 WA60J8V($\phi 100\text{mm}$)で, まずツルーイングのみを行った砥石表面形状を測定した. 測定後, リード 0.6mm/rev , 切込量 $30\mu\text{m}$ でドレッシングを行い, 同位置の砥石表面形状を再度測定した. 測定条件は, 砥石周速度 3.14 m/min (10 min^{-1})とし, 各測定範囲は, 円周方向に 78.54mm (90°), 幅方向に 2mm , 高さ方向に $100\mu\text{m}$ とした. また, 各測定間隔は円周方向に $8.73\mu\text{m}$ (0.01°), 幅方向に $9\mu\text{m}$, 高さ方向に $2\mu\text{m}$ とした.

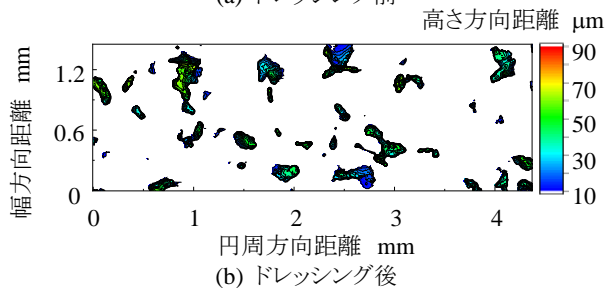
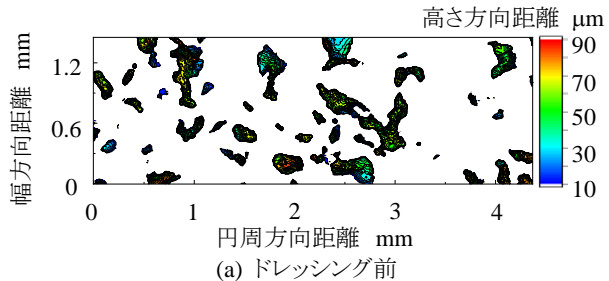


図9 ドレッシング前後の三次元分布図

(2) ドレッシング前後において, 同位置を測定した測定結果の一部を図9に示す. ビトリファイド砥石は表面が光沢を帯びており, レーザの乱反射が激しく測定が難しい. しかし図9より, 本研究で提案した測定方法によりエラーなく砥石表面を測定できている. また図(a)と(b)を比較すると, 明らかにドレッシングによる砥粒の脱落や変化が確認できる. したがって, 提案した測定方法により測定の難しい砥石表面形状を測定でき, 砥石表面の変化を観察することができた.

(3) 工作物表面形状の予測シミュレーションを行った結果の一例を以下に示す. 加工条件は, 設定切込量 $a_p=5\mu\text{m}$, 砥石直径 $D=200\text{mm}$, 砥石周速度 $V_g=1800\text{m/min}$, テーブル送り速度 $V_w=3\text{m/min}$, 砥粒のヤング率 $E_g=1050\text{GPa}$, 砥粒のポアソン比 $\nu_g=0.1$, 工作物のヤング率 $E_w=205\text{GPa}$, 工作物のポアソン比 $\nu_w=0.3$, 砥粒支持剛性 $k_{gs}=0.311\text{N}/\mu\text{m}$ とした. 計算領域は研削方向に 6mm , 砥石幅方向に 3.2mm とし, それぞれの計算間隔は研削方向に $10\mu\text{m}$, 砥石幅方向に $2\mu\text{m}$ とした.

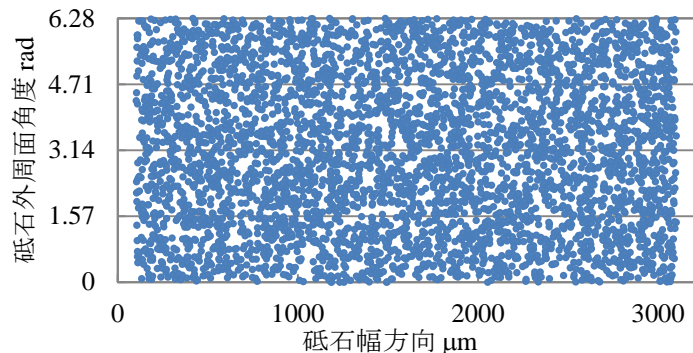


図10 シミュレーションに用いた砥粒配置

図10にシミュレーションに用いた砥粒配置を示す. 砥粒の配置は, 測定した WA60J6V の砥石作業面切れ刃密度 (砥石最外周からの深さ $10\mu\text{m}$ の範囲で 1mm^2 あたり 2.2個) に基づいた数とし, 配置はランダムに決定した. 計算領域の砥石幅方向の両端からそれぞれ $100\mu\text{m}$ ずつ余裕を取り, $100\mu\text{m}$ から $3100\mu\text{m}$ の間に砥粒を配置した結果, 砥粒の数は 4278 個となった. 砥粒形状は先端頂角 120° の円錐とし, 先端の高さを $5\mu\text{m}$ から $15\mu\text{m}$ の範囲で各砥粒ごとにランダムに設定した.

図11に予測した工作物表面形状の3次元形状を, 図12に図11の研削方向 $3000\mu\text{m}$ での工作

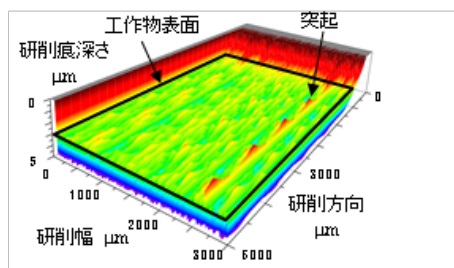


図11 予測した工作物表面形状

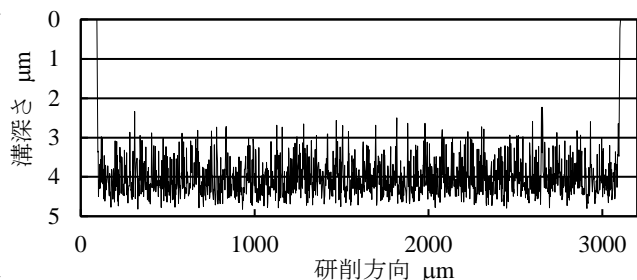


図12 予測した工作物表面の断面形状

物表面形状の 2 次元形状を示す．このように任意の場所で研削痕の断面形状を抽出することにより，研削後の工作物表面形状を予測することが可能となった．

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 18 件)

- ① 中島美穂，高橋知樹，内田元，山田高三，李和樹，三浦浩一，平面研削加工時における工作物切増し要因の検討，2019 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 77-78，2019.
- ② 田中允，成澤龍，内田元，山田高三，李和樹，三浦浩一，円筒研削時における砥石熱膨張量の測定，2019 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 75-76，2019.
- ③ 田中智寛，水井優希，内田元，山田高三，李和樹，三浦浩一，ドレッシング前後における砥石表面状態の違い，2019 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 71-72，2019.
- ④ 平野育海，内田元，李和樹，山田高三，三浦浩一，画像処理による砥石表面状態の観察と評価，2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，PP. 232-233，2018.
- ⑤ 田中允，山田高三，高橋宏美，向井良平，内田元，李和樹，三浦浩一，レーザ変位計を用いた研削時の砥石熱膨張量の測定，ABTEC2018 砥粒加工学会学術講演会講演論文集，A01，2018.
- ⑥ Takazo Yamada，Gen Uchida，Hwa-Soo Lee，Kohichi Miura，Measuring of thermal expansion of grinding wheel by means of laser displacement sensor，The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018)，No.42，2018.
- ⑦ Gen Uchida，Takazo Yamada，Kohichi Miura，Hwa-Soo Lee，Measuring of Grinding Wheel Surface Shape by Means of Laser Probe and Evaluation of Cutting Edge Density，The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018)，No.41，2018.
- ⑧ 下田 竣也，岸野 良亮，内田 元，山田 高三，李和樹，三浦 浩一，レーザ変位計を用いた砥石熱膨張量の測定，2018 年度精密工学会春季大会学生会員卒業研究発表講演会，PP. 89-90，2018.
- ⑨ 今泉 雄斗，中田 友満，内田 元，山田 高三，李 和樹，三浦 浩一，レーザを用いた測定方式の違いによる砥石表面形状の測定，2018 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 31-32，2018.
- ⑩ Gen UCHIDA，Takazo YAMADA，Kohichi MIURA and Hwa-Soo LEE，Measuring of Grinding Wheel Surface Shape by Means of Laser Probe Method，The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017)，PP.926-931，2017.
- ⑪ 内田 元，山田 高三，三浦 浩一，李 和樹，点合焦輪郭曲線法を応用した砥石表面形状の測定，2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，PP. 309-310，2017.
- ⑫ Kohichi Miura，Takazo Yamada and Hwa-Soo LEE，Proposal of detecting and evaluating method of cutting edge distributions in grinding wheel surfaces，Proceedings of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)，D21，2017.
- ⑬ Gen Uchida，Takazo Yamada，Koichi Miura and Hwa-Soo Lee，Development of measuring device of grinding wheel surface shape by means of laser probe method，6th Pacific Asia Conference of Mechanical Engineering and 6th International Conference on Civil Engineering，M-A3 03，CD，2017.
- ⑭ 鳥屋誠霸，上紙透，山田高三，李和樹，三浦浩一，点合焦式輪郭曲線方式を応用した砥石表面形状測定装置の試作，2017 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 59-60，2017.
- ⑮ 田中佑弥，佐久間大貴，山田高三，李和樹，三浦浩一，研削量が砥粒支持剛性と接触剛性に及ぼす影響，2017 年度砥粒加工学会卒業研究発表会発表論文集，PP. 57-58，2017.
- ⑯ 佐久間大貴，田中佑弥，山田高三，李和樹，三浦浩一，研削量が砥粒支持剛性と接触剛性に及ぼす影響，千葉県加工技術研究会，第 19 回大学等委員による研究事例発表会，発表番号 12，2017.
- ⑰ Takazo YAMADA，Hwa-Soo LEE and Kohichi MIURA，Calculation of Static Contact Stiffness of Grinding Wheel by Means of Support Stiffness of Single Abrasive Grain，19th International Symposium on Advances in Abrasive Technology，PP.130-134，2016.
- ⑱ 山田高三，李和樹，砥粒支持剛性を用いた砥石の接触剛性の算出，2016 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集，PP.124-125，2016.

6. 研究組織

該当なし

※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。