

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17951

研究課題名(和文) 定寸装置を不要とする知能化研削システムの開発

研究課題名(英文) Development of the intelligent grinding system that can predict the stock removal of the workpiece without using a sizing gauge

研究代表者

大西 孝 (ONISHI, Takashi)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：90630830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、円筒プランジ研削において(1)工作物の熱変形、(2)工作物の切残しの2点を研削中にシミュレーション解析し、工作機械にフィードバックすることで定寸装置がなくとも、研削中に寸法生成量を正確に予測できる知能化システムの開発を目的としている。本研究の結果、工作物の熱変形が半径で数 μm 生じる場合においても、目標とする寸法との誤差を半径で $0.5\mu\text{m}$ 以下に抑制できることを確認した。同時に、工作物系の弾性変形切り残し量を $1\mu\text{m}$ 程度の精度で予測できることを確認した。さらに本研究を応用して、長尺工作物の円筒研削や高アスペクト比を有する内面研削における工作物の形状精度を改善できる手法を考案した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the intelligent grinding system that can control the grinding machine by predicting the stock removal of the workpiece without using a sizing gauge. In this system, thermal deformation and residual stock removal is simulated during grinding process. As a result of this study, the size error of the ground workpiece was reduced less than $0.5\mu\text{m}$ even though 2 or 3 micrometers thermal deformation occurred. The residual stock removal due to the elastic deformation of the workpiece system was predicted with $1\mu\text{m}$ accuracy. Furthermore, the new grinding methods were developed to improve the shape accuracy for traverse grinding of the slender workpiece and internal grinding by a slender grinding wheel.

研究分野：研削

キーワード：円筒研削 内面研削 長尺工作物 寸法精度 熱変形 知能化 研削抵抗 研削盤

1. 研究開始当初の背景

(1) 研削加工は精密かつ高効率な加工法として重用されている。本研究の主な対象となる円筒研削では、円柱状の工作物を回しながら高速で回転する砥石を切り込み、表面品位と寸法精度を得ている。図1のとおり工作物の直径を定寸装置で測定しながら研削がなされ、取り代（実際に除去された寸法）が目標値に達した時に砥石を後退させることで寸法誤差の少ない研削加工が実現している。

(2) 円筒研削で定寸装置が用いられる理由は、砥石を工作物へ切り込んだ量と、実際の取り代が一致しないためである。なぜなら、砥石の回転方向の法線方向に生じる背分力が切削と比較して研削では非常に大きく、工作物や砥石軸が弾性変形し互いに逃げるように研削が行われ、切残しが生じるためである。そのため研削終了時には瞬時に砥石を後退させずに切込みを止め、弾性変形に起因する切残し量を除去するスパークアウトが必要である。スパークアウトにおいては切込みを止めても切残しが除去されるため工作物の半径が減少し、真円度や表面粗さが改善される。スパークアウトにおいて変化する直径を、測定装置を用いずに把握することは難しい。

(3) したがって円筒研削では定寸装置で連続的に工作物の直径の変化を測定して研削盤を制御するものの、次のような課題がある。
他の装置との干渉や加工時間の増加

円筒研削盤ではテーブル上の空間が限られており、振れ止めなど他の装置と干渉する恐れがある。また工作物の交換時には定寸装置も一度後退させるため、加工時間（サイクルタイム）の増大につながる。

熱変形により生じる寸法誤差

研削熱により熱膨張している工作物は、加工終了後も熱収縮するため、定寸装置が所望の取り代に達した瞬間に加工を終了しても最終的な寸法は要求精度を満たせないことがある。例えば、ある研削条件で直径 100mm

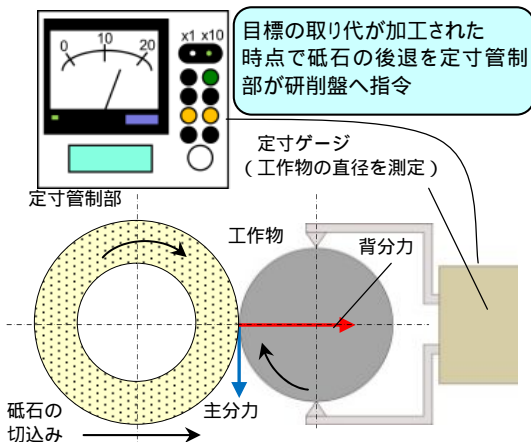


図1 定寸装置を用いた円筒研削

の工作物を加工した場合、砥石を後退させた後も工作物の半径は熱収縮により約 2 μ m 減少している。この場合、直径に換算すると約 4 μ m の寸法誤差が生じる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では先述の定寸装置を用いた際にも依然として残存する寸法誤差を最小化するために、定寸装置を用いずに工作物の寸法生成量、つまり直径の変化をシミュレーション解析により加工中に予測し、予測値に基づいて研削盤を制御することを目的とする。

(2) 本研究では、寸法誤差の原因となる次の要因を研削中に解析的に求める。

工作物の熱変形量

工作物系の弾性変形量

砥石の摩耗量（後述の内面研削のみ）

これらを瞬時に計算するために、パーソナルコンピュータに加工中に変動する研削抵抗の実測結果を取り込む。それぞれの値は、コンピュータに組み込まれたシミュレーション解析システムにより加工中に瞬時に計算され、正味の寸法生成量が求められる。この正味の寸法生成量とは、熱変形や弾性変形により切残しが生じている工作物を削っている瞬間に、砥石を後退させた際に最終的に到達する寸法生成量のことである。例えば、工作物が熱変形している場合、砥石を後退させた後に工作物は冷却され収縮するので、正味の寸法生成量は、今削られている値（定寸装置で測定された寸法変化）よりも熱変形量の分だけ大きい。この正味の寸法生成量をシミュレーション解析で加工中に求め、作業員へ表示することで、正味の寸法生成量が目標の取り代に達した瞬間に砥石を工作物から後退させることで、目標の取り代と差異のない、高い精度を有する加工が可能となる。

(3) 本研究で得られた知見を長尺工作物の円筒トラバース研削に応用することで、長尺工作物の形状誤差を低減させることができる。長尺工作物とは直径に対して長さが大きい工作物であり、剛性が低いため、工作物が加工中に弾性変形し、直径が一定とならない。本研究の切残しに関する研究成果を応用することで、加工条件を最適化して、工作物軸方向の切残しが一定となるように研削盤を制御し、形状精度の改善を図る。

(4) さらに本研究を内面研削へ応用し、穴内面の形状精度の改善を図る。アスペクト比の高い（細長い）砥石により穴の内面を研削すると、砥石の弾性変形により形状誤差が生じる。加工中に砥石の弾性変形の原因となる研削抵抗をモニタリングし、砥石軸の弾性変形量が加工前に予測した砥石の摩耗量と砥石の振れにより相殺される瞬間に加工を終了し、形状精度の向上を図る。

3. 研究の方法

(1) まず円筒研削の熱変形を考慮した研削システムの開発を行った。図2に本研究で開発した工作物熱変形量を考慮できる知能化研削システムを示す。図示の通り研削中の主分力は工作物を支えるセンタに貼り付けられたひずみゲージにより測定される。過去の研究において主分力から工作物熱変形量をシミュレーション解析する手法は構築されていることから、定寸装置の出力と解析で得られた工作物熱変形量を足し合わせることで、正味の寸法生成量を研削中にリアルタイムで計算し、作業員へ表示し、先述のとおり目標の取り代に達した瞬間に砥石を後退させることで寸法誤差を最小化できる。

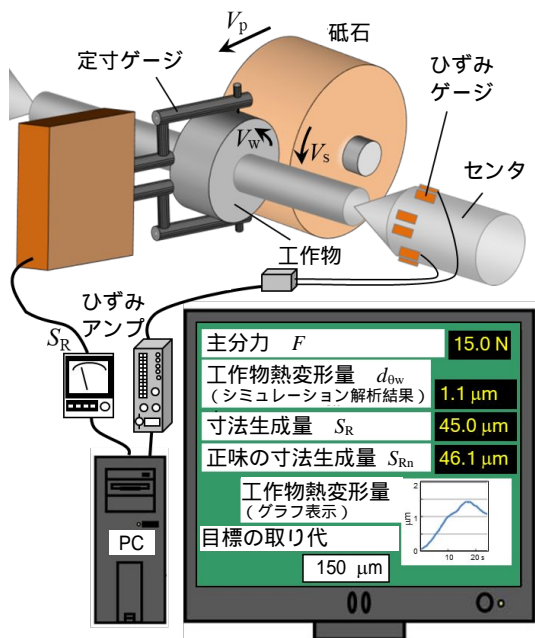


図2 工作物の熱変形量を考慮できる知能化研削システム

(2) 次に図2のシステムで測定された工作物の法線方向の研削抵抗（背分力）から工作物系の弾性変形量を求め、定寸ゲージがなくとも、工作物の切残し量を推定し、スパークアウト過程における工作物の寸法生成過程を推定した。この推定では、スパークアウト過程における切残し量の減少（背分力が徐々に小さくなり工作物と砥石系の弾性回復により研削が進む）を正確に算出する必要がある。

(3) 切残し量の測定から工作物系の弾性変形が求められることを応用して、図3のような長尺工作物のトラバース研削においても、研削条件を変化させた際の背分力を測定することで、工作物の弾性変形量をあらかじめ解析により予測し、最適な加工条件を導く。

(4) 図4に示す寸法の高アスペクト比を有する砥石により研削実験を行い、工作物内面の形状誤差を最小化する。これまでの研究によ

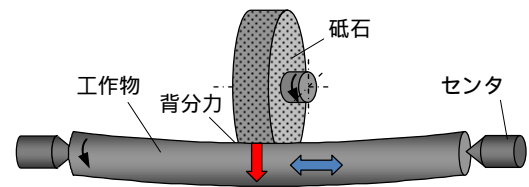
り工作物の形状誤差を引き起こす主要な要因は図5に示すとおり

砥石の弾性変形（変形量は背分力に比例）

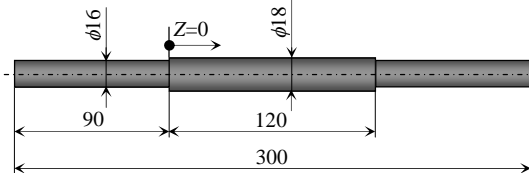
砥石の摩耗（摩耗量は研削量に比例）

砥石の振れ（加工中は一定の値）

であることが分かっている。このうち、の弾性変形量は背分力に比例することから、背分力を加工中にモニタリングすることで推定できる。また、砥石の振れは定数であることから、これらの3者がバランスして形状誤差がゼロになる瞬間を求めるには、事前に砥石の摩耗量を予測し、摩耗量と振れを足し合わせ、それを相殺する砥石軸の弾性変形量になる瞬間の背分力を加工前に求めると良い。砥石の摩耗量は工作物の研削量に比例することから、加工前の砥石形状と工作物形状を測定し、さらに研削後の目標形状が決定されれば研削終了時の砥石の形状が予測でき、砥石の摩耗に起因する形状誤差も推定可能である。したがって、研削中は事前に求めた値に背分力が達する瞬間に砥石を後退させることで目標とする内面形状、すなわち形状誤差が最小化された形状を得ることができる。



(a) 長尺工作物のトラバース研削の様子と工作物の弾性変形



(b) 長尺工作物の寸法

図3 長尺工作物のトラバース研削

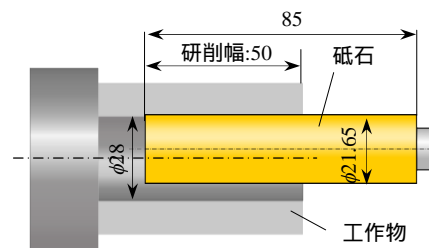
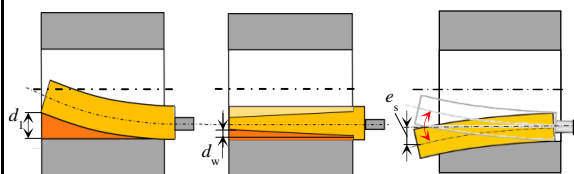


図4 高アスペクト比砥石を用いた内面研削

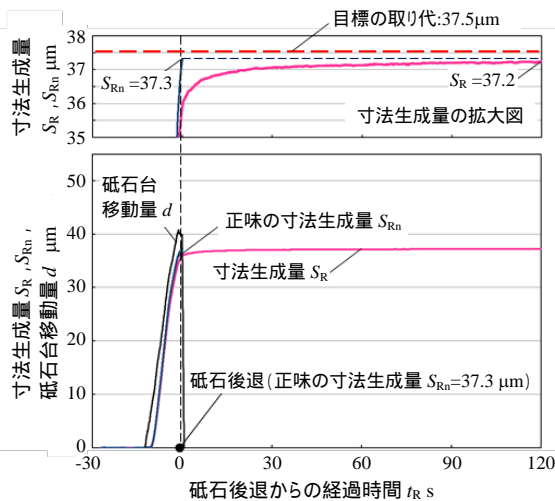


砥石の弾性変形 砥石の摩耗 砥石の振れ

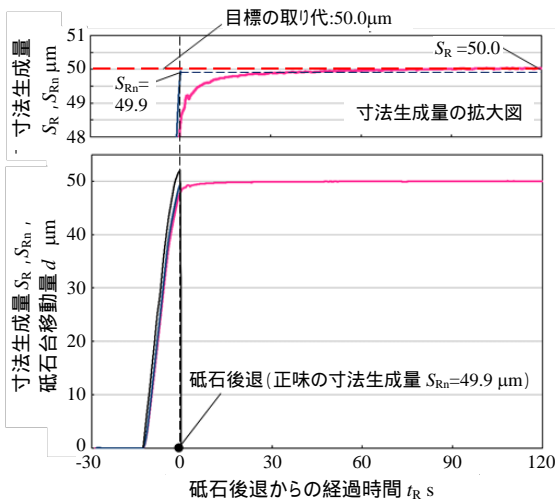
図5 内面研削における形状誤差要因

4. 研究成果

(1) 図 2 に示した知能化研削システムにより工作物熱変形量を考慮した研削加工を行った。実験結果の一例を図 6 に示す。図 6(a) は目標の取り代を半径で $37.5\ \mu\text{m}$ に設定した際の研削実験の結果である。正味の寸法生成量が $37.3\ \mu\text{m}$ に達した瞬間に砥石を後退させると、十分に時間が経過して工作物が冷却された後、最終的な取り代は $37.2\ \mu\text{m}$ になった。これは砥石後退時の正味の寸法生成量、つまり砥石を後退させた瞬間に熱膨張していた工作物の最終的な寸法生成量の予測値である $37.3\ \mu\text{m}$ と $0.1\ \mu\text{m}$ の誤差であり、正確に工作物熱変形を考慮して最終的な取り代を予測できている。同様に取り代を $50\ \mu\text{m}$ とした場合の図 6(b) においても、正味の寸法生成量が $49.9\ \mu\text{m}$ に達した瞬間に砥石を後退させ、最終的な取り代は $50.0\ \mu\text{m}$ になった。なお、それぞれの実験において工作物熱変形の実測値は、それぞれ $1.6\ \mu\text{m}$ と $1.8\ \mu\text{m}$ (いずれも半径あたりの熱膨張量) であった。これらの結果から、工作物の熱変形が寸法精度へ与える影響を知能化研削システムにより最小化できることが確認された。



(a) 目標の取り代 $37.5\ \mu\text{m}$ (半径) の実験結果



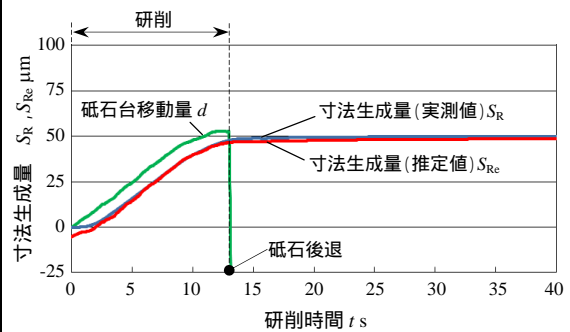
(b) 目標の取り代 $50.0\ \mu\text{m}$ (半径) の実験結果

図 6 知能化研削システムを用いた円筒プランジ研削の結果

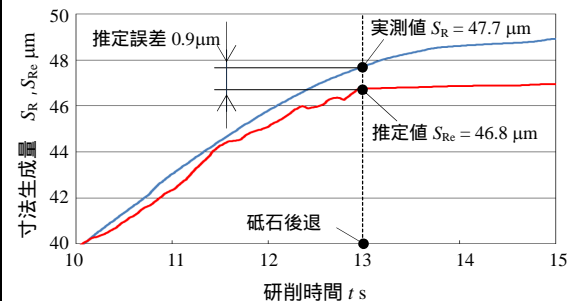
(2) 図 6 では取り代(加工量)を変化させた実験結果を示したが、その他にもプランジ速度(工作物の半径方向に砥石を切り込んでいく速度)、砥石の回転速度を変化させて研削を行い、目標の取り代からの寸法誤差が半径で $0.5\ \mu\text{m}$ 以内に抑制できることを確認した。さらに、砥石の切れ味の変化による影響を確認するために、ダイヤモンドで砥石の表面の砥粒を脱落させ、砥石の切れ味を回復させるドレッシングを行う際に、ドレッシング条件を変えて砥石の切れ味を変化させる実験も行った。砥石の切れ味が悪い場合、発熱量が増え工作物熱変形量は増大するが、先の実験と同様に、工作物の寸法誤差を $0.5\ \mu\text{m}$ 以内に抑制できた。

(3) このように、研削中に様々な加工状態の変化が生じてても、本研究で開発した知能化研削システムにより工作物の熱変形に起因する形状誤差を最小化できた。このシステムでは、常に研削抵抗を測定し、それを入力とすることで砥石の切れ味の変化といった、予測が難しい現象も考慮することができる点が最大の特徴である。一方で、ひずみゲージを用いた測定はノイズや温度ドリフトの影響を受けやすいため、今後は、より容易に測定できる砥石軸モータ電力のモニタリングにより、加工状態を容易に把握できるシステムを開発し、さらなる実験を重ねて各種の研削条件において十分な精度が確保できることを確認する必要がある。

(4) 続いて、図 2 のシステムで研削抵抗等を収集し、工作物系の弾性変形を考慮して研削中の寸法生成量の推定を試みた。図 7 に寸法生成量の推定結果と実測結果を示す。



(a) 研削中の寸法生成量の変化



(b) 砥石が後退する際の寸法生成量の拡大図

図 7 背分力から予測した寸法生成量

(5) 図 7 から、砥石が後退する直前の寸法生成量は、実測値と $0.9 \mu\text{m}$ (半径) 以内の誤差で推定できた。まだこの値は熱変形量の推定精度に比べると大きく、より高い精度で推定する必要がある。そのためには、研削盤に設置された工作物系や砥石系の弾性変形量を適切に見積もることや、砥石の摩耗量も考慮に入れる必要がある。

(6) さらに円筒プランジ研削で得られた知見を応用し、図 3 の長尺工作物の円筒トラバース研削における精度改善に取り組んだ。研削中の工作物の弾性変形の主要因となる背分力は、砥石の回転速度を向上させることで低減されることが確認されたため、砥石の回転速度を向上させ、加工条件を最適化した。その結果、図 8 に示すとおり、工作物中央部における弾性変形に起因する形状誤差を半減させることができた。図 9 にそれぞれの実験において測定された背分力を示す。砥石の回転数を高めることで砥石周速度が向上し、背分力が低下することで工作物の弾性変形を抑制できたためである。振れ止めを設置することなく、研削抵抗のモニタリングを生かした加工条件の最適化により、形状誤差を抑制することができた。

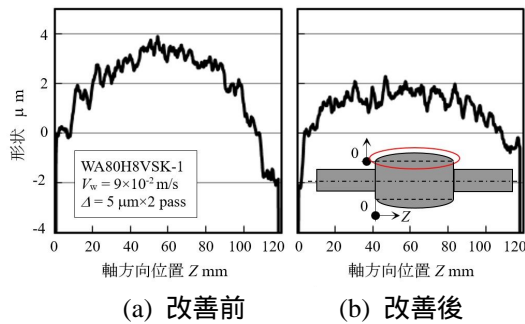
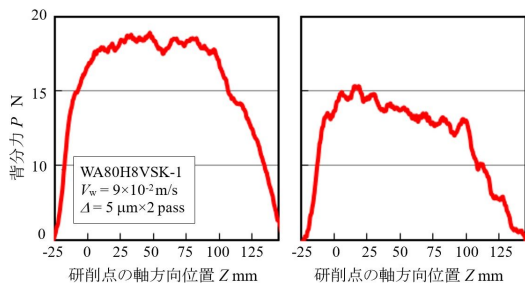


図 8 長尺工作物の形状誤差の改善



(a) 周速度 $V_s=24.9\text{m/s}$ (b) 周速度 $V_s=31.1\text{m/s}$
図 9 砥石周速度の違いによる背分力の変化

(7) 図 4 に示した高アスペクト比を有する砥石を用いた内面研削においても、砥石軸の弾性変形挙動と砥石の摩耗を考慮して加工精度の向上を試みた。先述の通り、加工前に工作物と砥石の形状を測定し、工作物の形状を決定 (形状誤差の最小化を目指すため、工作物内面のテーパ量をゼロとする) し、砥石の軸方向位置により異なる研削量を算出する。砥石軸方向の各位置における研削量が得ら

れると、研削比 (砥石の摩耗量と除去した工作物の体積の比) から砥石の摩耗量が推定でき、研削終了後の砥石形状が決定される。砥石形状と砥石の振れを足し合わせると、それを相殺する砥石軸の弾性変形量が求められ、砥石の剛性から形状誤差を最小化できる背分力を算出できる。図 10 に研削前の工作物と砥石の形状をそれぞれ示す。図 10 の工作物形状から砥石の摩耗量が求められ、その結果、スパークアウト過程 (工作物の半径方向に対する砥石の切込みを止めた状態) で背分力が 15N に低下した際に砥石を工作物から離すと形状誤差が最小化できることを加工前に算出した。研削実験においては図 11 に示す通り、研削抵抗が目標値まで低下した際に砥石を後退させた。その結果、図 12 のように工作物の形状誤差は $2\mu\text{m}$ 以下に低減できた。なお砥石の摩耗量の測定結果は、事前に予測された値と 10% 以内の誤差であった。

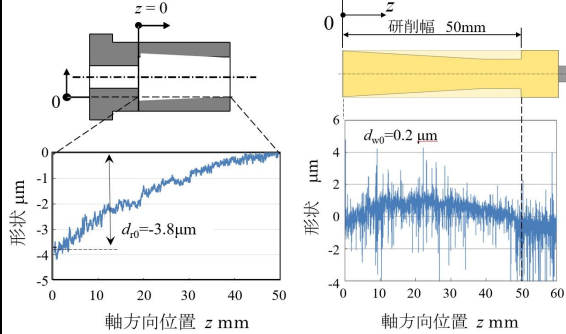


図 10 研削前の工作物と砥石の形状

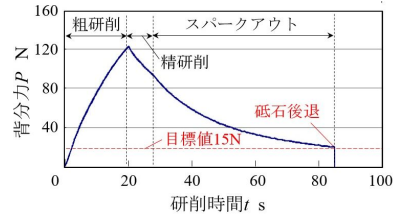


図 11 研削中の背分力の変化

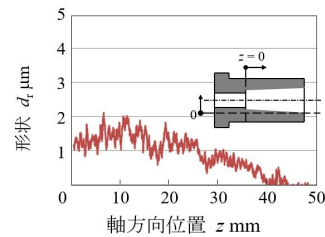


図 12 研削後の工作物形状

(8) 内面研削においても知能化により形状誤差の最小化を実現した。本研究では、砥石にテーパ状の形状補正を施すことで、加工時間を短縮できることも確認している。今後は工作物形状誤差をゼロとするだけでなく、任意のテーパ量を有する形状の実現を目指す。

(9) 本課題では各種の研削方法において、砥石系や工作物系の弾性回復が生じるスパークアウト過程で、研削盤の分解能を超える微小切込みを実現した。研削の知能化によりさらなる高精度化が可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

大西 孝, 坂倉守昭 他, 円長尺工作物の円筒トラバース研削における形状精度の改善 工作物の弾性変形を考慮したトラバース速度の制御, 査読有, 砥粒加工学会誌, Vol.60, No.10, 2016, pp551-556.

大西 孝, 坂倉守昭 他, 円筒ブランチ研削における工作物熱変形量のシミュレーション解析 砥石軸モータの電力を用いた研削抵抗の推定, 査読有, 精密工学会誌, Vol.82, No.1, 2016, pp70-74.

大西 孝, 坂倉守昭 他, 円筒研削における工作物熱変形量を考慮した加工システムの開発, 査読有, 砥粒加工学会誌, Vol.59, No.10, 2015, pp594-598.

〔学会発表〕(計14件)

藤原昂平, 大西 孝, 岡上拓夫, 坂倉守昭 他, 円筒研削における工作物熱変形量のシミュレーション解析を利用した加工精度の向上, 砥粒加工学会先進テクノフェア卒業研究発表会, 2018/3/8, 大田区産業プラザ(東京)

中林優介, 大西 孝, 西 空也, 坂倉守昭 他, 高アスペクト比を有する砥石を用いた内面研削における形状精度の改善, 砥粒加工学会先進テクノフェア卒業研究発表会, 2018/3/8, 大田区産業プラザ(東京)

Takashi ONISHI, Kuya NISHI, Moriaki SAKAKURA et al. Improvement of shape accuracy in internal grinding with slender grinding wheel, ISAAT2017, 2017/12/5, 沖縄科学技術大学院大学(読谷)

大西 孝, 円筒研削におけるコンピュータを援用した加工精度の向上, 精密工学会北陸信越地区学術講演会, 2017/11/25, 富山大学(富山)

Takashi ONISHI, Moriaki SAKAKURA, Takuo OKANOUE et al. Development of intelligent cylindrical grinding system considering thermal deformation of workpiece, The 9th LEM21, 2017/11/15, 広島国際会議場(広島)

岡上拓夫, 大西 孝, 坂倉守昭 他, 円筒ブランチ研削における工作物熱変形量のシミュレーション解析を用いた寸法精度の改善, 2017年度精密工学会秋季大会, 2017/9/21, 大阪大学(豊中)

坂本晃一, 大西 孝, 坂倉守昭 他, 長尺工作物の円筒トラバース研削における形状推定法, 2017年度砥粒加工学会学術講演会, 2017/9/1, 福岡工業大学(福岡)

大西 孝, 西 空也, 坂倉守昭 他, 高アスペクト比を有する砥石を用いた内面研削における形状精度の改善, 2017年度精密工学会春季大会, 2017/3/13, 慶應義塾大学(横浜)

Takashi ONISHI, Moriaki SAKAKURA et al. Development of intelligent cylindrical grinding system considering thermal deformation of workpiece, IC3MT2016, 2016/10/10, 松江テレサ(松江)

Tepei Takashima, Takashi Onishi, Moriaki Sakakura et al. Improvement in the Shape Error of the Long Workpiece in Cylindrical Traverse Grinding, ISAAT2016, 2016/10/4, ストックホルム(スウェーデン)

大西 孝, 坂倉守昭 他, 研削中の工作物熱変形挙動を考慮した知能化研削システムの開発, 2016年度砥粒加工学会学術講演会, 2016/8/31, 兵庫県立大学(姫路)

岡上拓夫, 大西 孝, 坂倉守昭 他, 円筒研削における工作物熱変形量のシミュレーション解析を利用した加工精度の向上, 砥粒加工学会先進テクノフェア卒業研究発表会, 2016/3/4, 大田区産業プラザ(東京)

Takashi Onishi, Moriaki Sakakura, Tepei Takashima et al. Dimensional error analysis for grinding of a cylindrical long workpiece, The 8th LEM21, 2015/10/21, 京都市リサーチパーク(京都)

大西 孝, 坂倉守昭 他, 円筒研削における工作物熱変形量を考慮した加工システムの開発, 2015年度砥粒加工学会学術講演会, 2015/9/9, 慶應義塾大学(横浜)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.prec.mech.okayama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大西 孝 (ONISHI Takashi)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号: 90630830

(2)研究協力者

坂倉守昭 (SAKAKURA Moriaki)

大橋一仁 (OHASHI Kazuhito)

高島哲平 (TAKASHIMA Tepei)

西 空也 (NISHI Kuya)

岡上拓夫 (OKANOUE Takuo)

坂本晃一 (SAKAMOTO Koichi)

藤原昂平 (FUJIWARA Kohei)

中林優介 (NAKABAYASHI Yusuke)