

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04194

研究課題名（和文）長尺工作物の円筒トラバース研削における振れ止めの使用方法の最適化に関する研究

研究課題名（英文）Study of optimization of steady rest in cylindrical traverse grinding

研究代表者

大西 孝 (Onishi, Takashi)

岡山大学・自然科学学域・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）：円筒形状の工作物の外周面を砥石で仕上げる円筒トラバース研削において、直径と比較して長さが大きい長尺工作物を加工する際は、研削中に発生する力（研削抵抗）により工作物が大きく弾性変形し、形状誤差が生じる。弾性変形を抑制するために振れ止めが使用されるが、振れ止めの使用方法を学術的に検討した例は見られない。そこで本研究では、研削中の工作物の弾性変形挙動を解析し、工作物の形状精度を大幅に向上できる振れ止めの使用指針を求めた。研削実験において、理論的に求められた振れ止めの使用方法が適切であることを確認した。さらに研究成果を応用して工作物の両端に微小なテーパ（半径が軸方向に変化する形状）を付与することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円筒トラバース研削は円筒形状の工作物の直径をマイクロメートル単位で仕上げ、良好な表面品位を能率よく得られるため産業界で広く使われている。しかしながら、振れ止めの使用指針に関する学術的な研究はなされておらず高い独自性を有する。製造業の現場では、振れ止めの設置位置やシューの押込み量の決定は熟練技能者の勘と経験に依存していた。産業界では技能伝承が課題になっており、学際的なアプローチで振れ止めの最適な使用方法を示すことは、さらなる高精度化、高能率化が求められる精密加工分野において重要な意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In the case of the cylindrical traverse grinding of a slender workpiece, the shape error is generated due to the elastic deformation of the workpiece owing to the large grinding force. To reduce the shape error, the steady rest is generally used. The academic research for the proper use of the steady rest was not carried out. Therefore, the purpose of this study is determining the proper usage of the steady rest based on the analysis of the change in the elastic deformation of the slender workpiece during the grinding process. The proposed usage of the steady rest, that was determined theoretically, was verified through the grinding experiments. The tapered profile on the ground surface was generated successfully by applying the analysis of the elastic deformation of the workpiece.

研究分野：機械加工

キーワード：円筒研削 長尺工作物 形状精度 振れ止め 弾性変形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 工作物の直径に対して長さが大きい長尺工作物の外径を一定に仕上げ、滑らかな円筒面を得るために円筒トラバース研削が広く用いられる。円筒トラバース研削とは、高速回転する砥石に切込みを与え、回転させた工作物を軸方向に移動させる研削方法であり、軸部品の仕上げに必要不可欠な加工方法である。研削点で砥石が工作物から材料を除去する際に、研削抵抗と呼ばれる大きな力が生じる。特に研削においては、砥石の法線方向に大きな力が作用する。この法線方向の力は背分力と呼ばれ、剛性が低い長尺工作物は中央付近で弾性変形が生じやすい。そのため、図1に示すとおり、加工後に工作物の外径が一定に仕上がらず、工作物の中央部の外径が、センタで支持された左右の端よりも太くなり形状誤差が生じる。

(2) 形状誤差を抑制するために振止め(ふれどめ)が一般的に使用される¹⁾。図2に示すとおり、振止めはシューによって工作物を支えることで弾性変形による加工精度の悪化を抑制する補助具であるが、熟練者の勘と経験によって設置する場所やシューの押込み量が決定されており、属人的な手法で加工精度が保たれてきた。

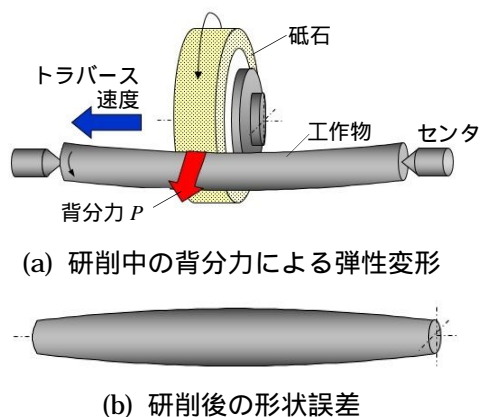


図1 長尺工作物の形状誤差の発生要因

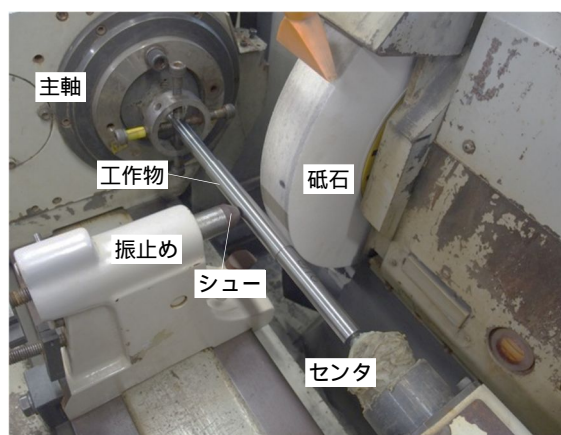


図2 円筒研削盤に設置された振止め

2. 研究の目的

(1) 前述のように、振止めは長尺工作物の円筒トラバース研削において加工精度を向上させるうえで非常に重要な装置であるが、効果的な使用方法について学術的な説明はなされていない。そこで本研究では、長尺工作物の形状精度を向上させるために、振止めを使用した際に生じる研削中の工作物の弾性変形挙動を解明し、弾性変形を抑制できる振止めの使用方法を決定することを目的とする。具体的には、振止めを設置した際の弾性変形量を算出できる材料力学モデルを構築し、得られた弾性変形挙動から、形状精度の悪化を低減できる振止めの設置場所を求める。

(2) 研削抵抗の変化を実測し、振止めの効果がより強く発揮できる研削条件を探求する。

(3) 弾性変形の解析を応用し、工作物の弾性変形を積極的に利用することで、工作物の両端を微小なテーパ形状に仕上げる円筒トラバース研削の手法の構築を試みる。

(4) 発展的な研究内容として、工作物の弾性変形だけでなく、工作物の材料除去過程も考慮した研削後の工作物形状の導出も試みることにした。

3. 研究の方法

(1) 図3に本研究で用いる工作物の寸法を示す。研削される部分は中央に位置する長さ120mm、直径20mmの領域であり、左右の90mmは研削されない。全体の形状に注目すると、アスペクト比(長さ/直径)は15を超える。研削面の形状は中央部の120mmの研削領域を、機上に設置したレーザ変位計を走査することで測定し、形状誤差を評価する。振止めは工作物の軸方向の任意の位置で押し付けることが可能であり、押込み量は手動で調整した。

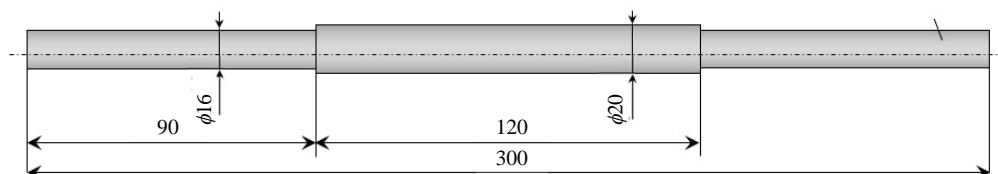


図3 本研究で用いた工作物の寸法(材質:S45C)

(2) 振止めが工作物の弾性変形へ与える影響を調査するために、工作物を梁に見立てた連続体モデルを構築し、振止めの位置を変化させることで、どのように工作物の弾性変形が変化するかを解析した。なお、加工時に作用する背分力は実際に研削実験において実測した値を入力とした。具体的にはセンタによる左右の支点と振止めに作用する反力を求め、たわみの基礎式を解くことで、振止めの設置位置と工作物の弾性変形量の変化を解析した。

(3) 梁モデルを活用して、前述のとおり工作物の両端にテーパ形状を付与するために、工作物の弾性変形量が目標のテーパ量と一致するような背分力を求め、トラバース速度を制御する実験を行った。

(4) 応用的な解析モデルとしては、工作物の弾性変形だけでなく、実際の工作物と砥石の干渉状態を精密に模擬し、干渉量に対してどの程度の材料が除去されるか(この割合を寸法生成率と呼ぶ)を考慮した解析も行った。この手法では、最初に工作物の弾性変形量を仮定し、実際の干渉量に寸法生成率を乗じることで工作物の除去量を算出する。背分力は除去量から求められるため、背分力から工作物の弾性変形量を再び求め、当初に仮定した値との偏差が収束するように繰り返し計算を行い、最終的な研削後の形状を求めた。

4. 研究成果

(1) 図4に工作物を梁として考えた連続体モデルを示す。左右のセンタと振止めを支点として、研削点の移動により作用する背分力を荷重として与え、それぞれの支点に作用する反力を求めて工作物全体の弾性変形挙動を解析する。

(2) 解析モデルの作成に先立ち、工作物と振止めのシューが接触している位置を砥石が通過した際に、工作物の外径が減少するため、振止めが作用しなくなることが予測される。この状態を検証するために、振止めを工作物の中央に設置しトラバース研削を行ったところ、振れ止めを設置した位置で研削面に段差形状が生じた。図5に研削面の段差形状の測定結果を示す。この結果から、図6に示すように、振止めを設置した位置を砥石が通過して材料が除去されると、シューと工作物が離れ、振止めが作用しなくなるとともに、振止めを設置していた場所で急激な弾性変形の変化が生じ、段差形状が生じることが明らかになった。研削中に砥石が振止めを通過する際の研削抵抗の変化を測定し、弾性変形量の変化量を算出する(砥石が通過するまでは振止めが効き、通過後は効かないとして計算する)と、この変化量は段差の高さと同等であることが確認された。

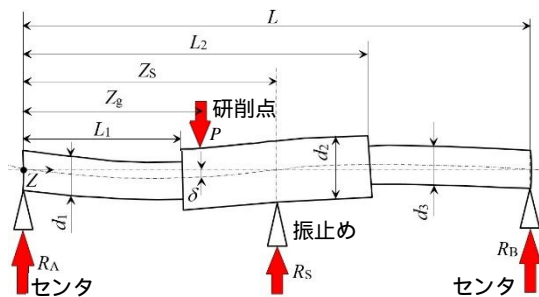


図4 工作物の梁モデル

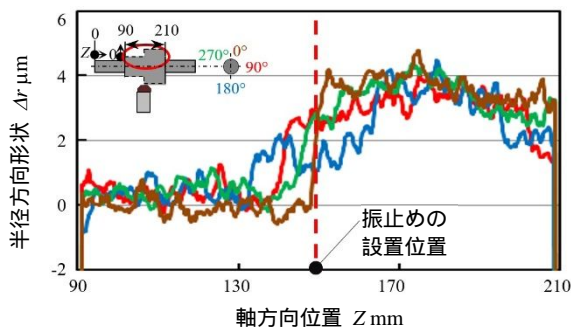


図5 振止めの設置場所で生じる段差

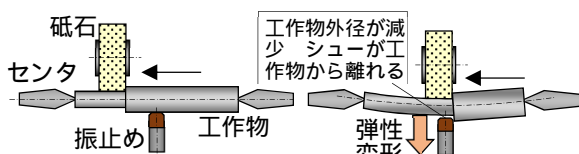


図6 振止めの設置部で段差が生じる要因

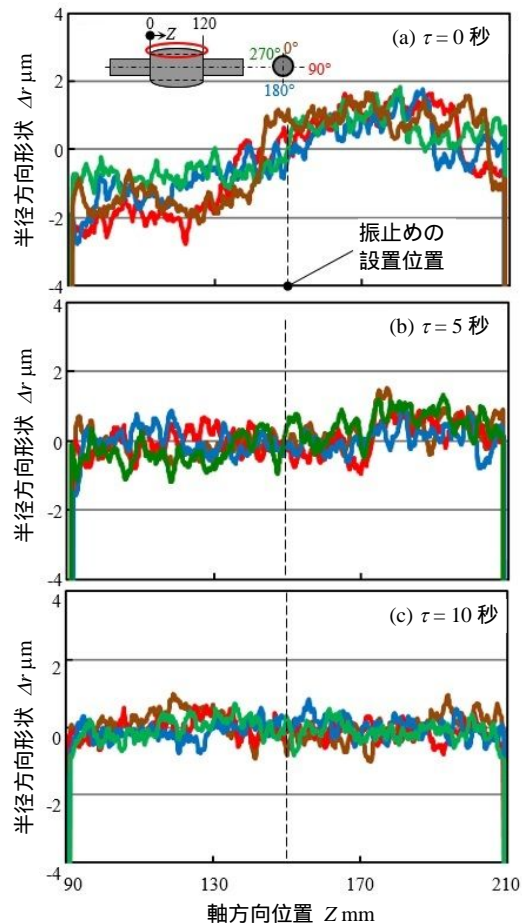


図7 トラバースの停止による段差の解消

(3) 振止めを設置した場所で生じる段差を解消できる研削条件を実験的に求めた。一度、振止めの設置位置でトラバース(工作物の軸方向への移動)を止め、十分に段差を除去するとともに工作物を弾性回復させ、再びトラバースを行うことが有効であると確かめられた。図7に、振止めを設置した位置(工作物中央)におけるトラバースの停止時間 t を変化させた場合の、研削後の工作物形状の変化を示す。停止時間 t を10秒に設定すると、段差を解消できることが分かった。

(4) 梁モデルにおいては、振止めの部分を砥石が通過した後、シューは工作物から離れる、すなわち図4の振止めの位置にある支点を外して弾性変形量を算出することとした。振止めを研削領域に設置した場合は、砥石が振止めの設置位置を越える前後で工作物の弾性変形のモードが変化するため、2種類のたわみの基礎式を用意する。たわみの基礎式が非常に複雑になり多くの式から成る連立方程式を解く必要があるため、逆行列を求めて弾性変形量を算出した。

(5) 梁モデルによる計算を行ったところ、振止めが無い場合、工作物は研削点が中央に来ると大きく弾性変形する。振止めを中央に設置した場合、振止めが作用している間、つまり研削点が振止めに差し掛かるまでは弾性変形を抑制できるが、振止めを通過した後は振止めが無い場合と同様に、大きな弾性変形が生じ、前述の段差が生じる。一方、振止めを研削領域の外に設置すると、振止めの保持効果が全工程で維持されるため、弾性変形は比較的抑制できることが分かった。

(6) これまでの結果から、振止めの効果を研削開始から終了まで維持するために、研削が終了する側(砥石から工作物が抜けていく側)の非研削領域に振止めを設けることで形状精度の改善が期待できる。そこで研削領域の右端($Z=210\text{mm}$)から10mmの場所($Z=220\text{mm}$)に振止めを設置し、研削実験を行った。図8(b)は研削後の形状である。比較のために、図8(a)に振止めを用いずに研削した際の形状を示す。振止めを用いない場合、中央部の半径が $4\mu\text{m}$ 程度大きくなる一方、振止めを砥石の抜け側に設置した場合、半径の増加は $1\mu\text{m}$ 未満に抑制できた。それぞれの図中の赤い破線は前述の梁モデル求めた弾性変形量である。研削後の中央部の形状は弾性変形量の変化とよく一致しており、梁モデルにより形状誤差を推定できることが確認された。

(7) 図8では、いずれの研削結果においても工作物の抜け側(図の右側)で工作物の研削量が過剰になり、工作物の外径は研削が開始される側(図の左側)と比べて小さくなり、形状誤差が生じた。これは砥石が工作物から抜け始めると、背分力が徐々に低下して弾性変形量が減少するため、幅の広い砥石の後半で工作物の外周がさらに研削され、過剰な研削が行われることで生じる「ダレ」と呼ばれる現象である。図9にダレの発生メカニズムを模式的に示す。砥石の抜け側で生じるダレを低減するためには、砥石の抜け側でも背分力を減少させず、工作物の弾性変形量を維持しながら砥石を研削面から抜いていくことが重要である。そこで砥石の抜け側で弾性変形量が一定となるような背分力を梁モデルにより事前に算出し、砥石の抜け側で徐々にトラバース速度(工作物を軸方向に移動させる速度)を上昇させ、抜け側でも工作物の弾性回復を抑制する手法を考案した。トラバース速度が大きいと、単位時間当たりに除去される工作物の体積が増加するため、研削抵抗は増加する。事前にトラバース速度と背分力の関係は実験により得られているため、この結果から目標とする背分力を発生させるのに必要なトラバース速度を算出し、その結果に基づいて研削盤を制御することで抜け側のダレも抑制を試みた。研削実験で得られた形状を図10に示す。図10(a)は90度ごとに計測した4断面の形状であり、それを平均化した形状が図10(b)の赤線である。なお、図10(b)には比較のために振止めを使用せずに研削した際の形状(黒線)も示す。非研削面に振止めを設置し、砥石の抜け側でトラバース速度を増加させることで、半径方向の形状誤差を $0.5\mu\text{m}$ 未満に抑制することが確認され、所期の目標を達成した。

(8) 図11に示すテーパ形状を研削面の両端に付与する。工作物の弾性変形やダレを有効に活用することで、工作物の両端部の外径を微小に変化させるクラウニング加工を行った。工作物の中央付近までは必要とするテーパ量と同等の弾性変形を生じさせ、砥石の抜け側では、弾性回復によるダレを積極的に活用して工作物の両端にテーパ形状を付与する。この形状を実現するため

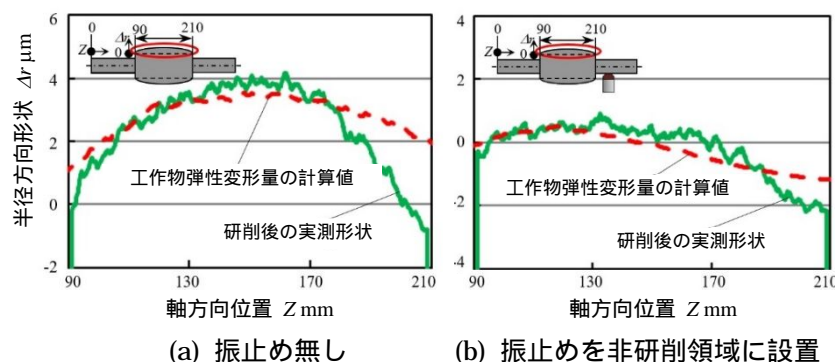


図8 振止めの設置の有無による研削後の形状の差

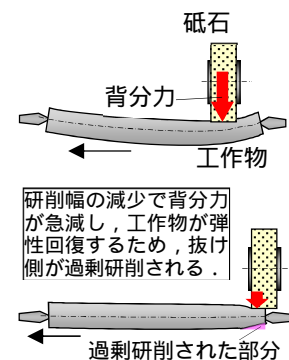


図9 ダレの発生

に、先述の解析を活用してテーパ加工に用いるトラバース速度を求めた。図 12 に示すトラバース速度で研削実験を行った。図 13 は、研削実験で得られた工作物の形状であり、左右に約 $2\mu\text{m}$ のテーパ量を付与することができた。砥石の抜け側 (図の右側) で目標形状とやや相違があるが、これはダレの生成機構をさらに精密に解析することで精度の改善が可能だと考えられる。

(9) 前述のように、これまでの研究成果は工作物の弾性変形量が形状誤差につながると考えて弾性変形量を求めてきたが、さらに高度な解析を行うために、工作物と砥石の干渉状態を精密に模擬し、工作物の材料除去量を求める解析を行った。先述のとおり、この解析では工作物の干渉量に対して、実際に削られる量の比である、寸法生成率²⁾を求めることが重要である。研削では、砥石の切れ味が低いため、工作物に砥石を切り込んだ量に比べて、実際に削られる量は小さい。その比が寸法生成率であり、まず、単純な円筒プランジ研削 (工作物の半径方向に砥石を切り込む研削方法) で、寸法生成率等の基礎データを求めた。

(10) (9) で得られた数値を基に、同じ材料の工作物、砥石を用いた場合のトラバース研削後の工作物形状の解析を行った。この解析では、振止めは使用していない。図 14 のように、工作物の中央部が太くなる形状が求められ、砥石の抜け側でダレが再現された。これは工作物から砥石が抜けていく際に、徐々に工作物が弾性回復し、過剰な研削が行われていることを再現したものであり、トラバース研削における材料除去をシミュレーション解析できる可能性が示唆された。

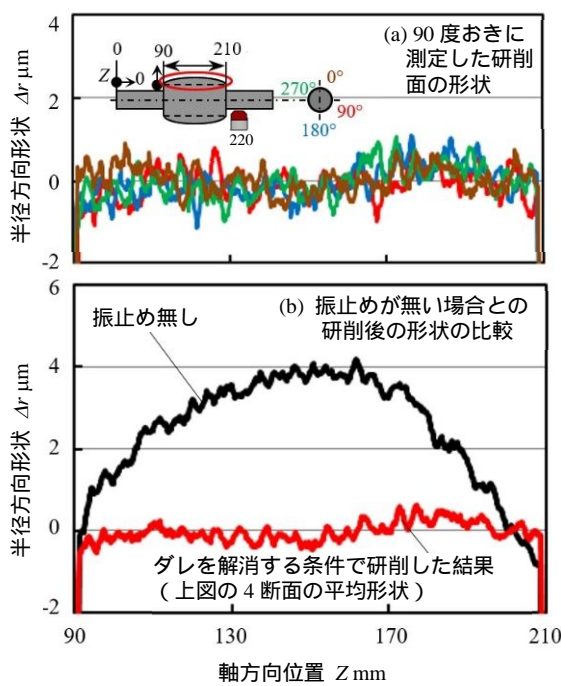


図 10 ダレを抑制した研削結果

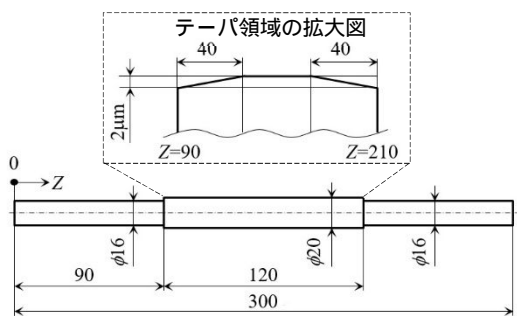


図 11 研削領域の両端に付与するテーパ形状

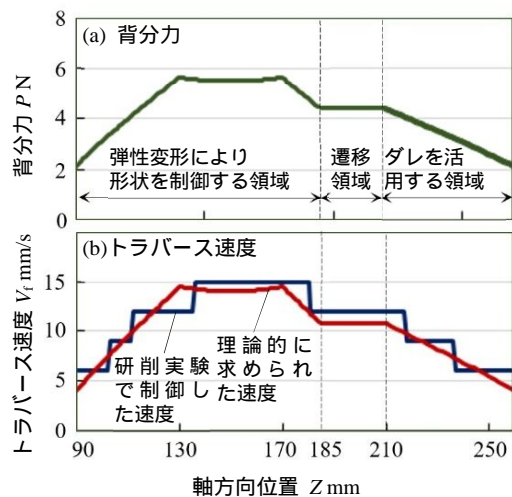


図 12 テーパ形状を付与できるトラバース速度

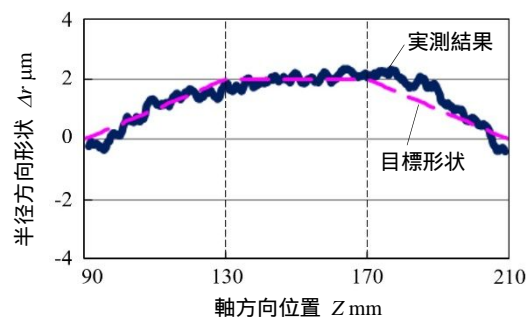


図 13 テーパ研削後の研削面形状

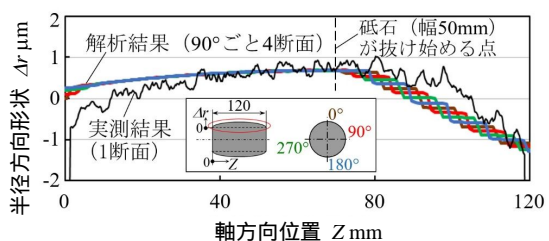


図 14 トラバース研削の形状の推定結果

参考文献

- 1) 鴻巣 健治: 空気式振止めの性能, 精密工学会誌 56 巻 9 号, 1717-1722 (1990).
- 2) 岡村健二郎, 塚本真也, 竹山一郎: トラバース研削機構の研究 (第 1 報), 精密機械 46 巻 4 号, 460-466 (1980).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 FUJII Hidetaka, ONISHI Takashi, LIN Chinhu, SAKAKURA Moriaki, OHASHI Kazuhito	4. 巻 15
2. 論文標題 Improvement of form accuracy in cylindrical traverse grinding with steady rest by controlling traverse speed	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 20-00505pp.1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hidetaka Fujii, Takashi Onishi, Chinhu Lin, Moriaki Sakakura, Kazuhito Ohashi
2. 発表標題 Effect of steady rest in cylindrical traverse grinding of slender workpiece
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (LEMP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidetaka Fujii, Takashi Onishi, Chinhu Lin, Moriaki Sakakura, Kazuhito Ohashi
2. 発表標題 Improvement of Form Accuracy of Slender Workpiece in Cylindrical Traverse Grinding with Steady Rest
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 粒田元希、大西孝、藤井英毅、坂倉守昭、大橋一仁
2. 発表標題 円筒ブランチ研削における寸法生成量のシミュレーション解析
3. 学会等名 砥粒加工学会 2022年度先進テクノフェア 卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 粒田元希、大西孝、藤井英毅、坂倉守昭、大橋一仁
2. 発表標題 円筒トラバース研削における工作物の弾性変形を利用したクラウニング形状制御
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大橋 一仁 (Ohashi Kazuhito) (10223918)	岡山大学・自然科学学域・教授 (15301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	坂倉 守昭 (Sakakura Moriaki)	大同大学・工学部・教授	
研究協力者	藤井 英毅 (Fujii Hidetaka)	岡山大学・自然科学研究科・博士前期課程学生	
研究協力者	粒田 元希 (Kuida Motoki)	岡山大学・自然科学研究科・博士前期課程学生	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------