

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560127

研究課題名(和文) 研削プロセスにおける工作物熱変形量のシミュレーション解析技術の開発

研究課題名(英文) Development of a simulation system of workpiece thermal deformation in grinding process

研究代表者

塚本 眞也 (TSUKAMOTO, Shinya)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80163773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研削プロセスにおいて工作物の熱変形により発生する寸法誤差、形状誤差を抑制し、高精度な加工を実現するために円筒研削と内面研削を対象として、研削中の工作物熱変形挙動をシミュレーションにより解明するとともに、加工精度の向上を図った。円筒研削においては工作物温度分布と熱変形量をシミュレーション解析により用いて高精度に求めることができた。さらに、熱変形量を加工機へフィードバックできる研削システムを開発し、目標の加工量に対して0.1 μ mの誤差で加工することに成功した。内面研削においては、砥石の形状を補正することで、工作物の形状誤差を1/3に減らすことができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to improve the machining accuracy of a workpiece in cylindrical and internal grinding by reducing the effect of thermal deformation of the ground workpiece in the grinding process. To understand the thermal deformation of the workpiece during grinding process, an advanced analysis method of temperature distribution and thermal deformation of a workpiece are developed. In cylindrical grinding, the temperature distribution and thermal deformation can be calculated with a developed simulation analysis system. A new grinding system that can consider the thermal deformation was also developed in this study. With this grinding system, the cylindrical grinding was performed within a tolerance of only 0.1 micro meters.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：円筒研削 内面研削 工作物熱変形 シミュレーション解析 寸法精度 形状精度 インプロセス測定 研削現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 円筒研削は、工業分野において精密かつ高効率な加工法として重用されているものの、研削プロセスにおいては、研削熱が工作物に流入し熱変形を起こし、加工終了後に工作物内部に蓄積された熱が徐々に放出され工作物が時間をかけて収縮するため、定寸装置を用いて加工を行っても寸法誤差が生じる場合がある。

(2) 研削中の工作物熱変形による寸法誤差を無くすためには、加工中の工作物の熱変形挙動をリアルタイムに把握し、加工機にフィードバックする必要がある。これまでも、研削熱に関する研究が行われてきたものの、これらの研究は研削熱による研削点近傍の加工品位の低下に注目したものが多く[例えば、P.N.Moulik, H.T.Y.Yang and S.Chandrasekar: Simulation of thermal stresses due to grinding, International journal of Mechanical Sciences, 43, 3 (2001) 831.]、工作物全体の温度分布に着目したものは少ない。前述のとおり、工作物内部に流入した研削熱は時間をかけて蓄積、放出されることから、工作物の熱変形挙動を理解するためには、工作物に出入りする研削熱を勘定し、刻々と変化する工作物温度分布を考慮した熱変形量の算出を行う必要がある。

(3) 研究代表者らは、工作物温度分布に関する基礎的な研究[坂倉守昭, 蘇日塔拉図, 長谷川裕之, 塚本真也: 円筒プランジ研削における工作物の熱変形のシミュレーション, 砥粒加工学会誌, 51, 9(2007)559-564.]を行ってきたが、工作物の熱変形量を解析するには至っておらず、研削中の熱変形量の推定は難しい状況であり、円筒研削における高精度な加工は、現場の長年の勘と経験に依存せざるを得ない現状であった。

(4) 円筒(外面)研削のみならず、内面研削においても工作物熱変形による寸法誤差の低下が懸念される。内面研削は、砥石の軸剛性が低いことに加えて、円筒状の工作物内面を加工するため、研削熱の除去が難しく、形状精度の悪化が生じやすい。一方で、内面研削により加工が行われるディーゼルエンジンの燃料噴射ノズルにおいては、昨今の環境意識の高まりにより、一層の燃料液滴の微粒噴霧性能が必要[例えば、田中泰, 長田耕治, 圧力を活かすディーゼルエンジン用 1800bar コモンレールシステム自動車技術 58, 4 (2004) 19-24.]とされ、それを実現するためにはノズル内面の高精度な内面研削が求められる。

2. 研究の目的

(1) 円筒研削を対象として、加工中の熱変形挙動を容易に把握するために、研削プロセスにおける工作物温度分布および熱変形量のシミュレーション解析手法を確立する。

(2) 円筒研削を対象として、熱変形に起因する工作物の寸法精度の悪化を抑制するために、工作物熱変形量をフィードバック可能な加工システムの開発を行う。

(3) 内面研削を対象として、工作物熱変形および砥石損耗、砥石軸の弾性変形等に着目し、寸法誤差の発生要因を解明するとともに、高精度化を目的として、形状補正を施した砥石による新たな研削手法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 円筒研削における工作物熱変形挙動の解明を目的として、温度分布と熱変形量のインプロセス測定システムを開発するとともに、シミュレーション解析手法も同時に作成し、両者の結果を比較することでシミュレーション手法の向上を図った。図1に研削中の工作物各部の温度上昇量を測定するインプロセス温度測定システムを示す。本システムでは、工作物内部の複数の箇所にサーミスタを埋め込み、温度上昇量を無線によりPCへ伝送することで、回転しながら研削されている工作物の温度分布を測定できる。本方式では温度測定データがデジタル化されて伝送されるので、ノイズに強いといった利点がある。

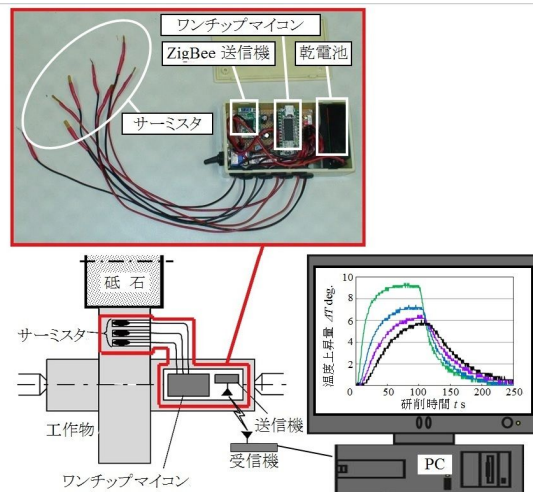


図1 円筒研削用のインプロセス工作物温度分布測定システム

(2) 図2に、円筒研削における工作物熱変形量のフィードバックを行うシステムを示す。本システムでは、研削中の工作物熱変形量を測定し、実際に加工がなされた量、すなわち寸法生成量と熱変形量を足し合わせることで、熱変形している工作物が熱収縮した後の実際の寸法生成量を研削中にリアルタイムに演算し、PCの画面に表示する。なお、本研究では工作物が熱収縮した後の実際の寸法生成量を「正味の寸法生成量」と呼称する。正味の寸法生成量が、目標とする取代(加工量)と一致した際に、砥石を工作物から後退させることで、加工終了後、工作物が十分に冷却された際の寸法生成量が目標の取代と一致することを実験により確認する。

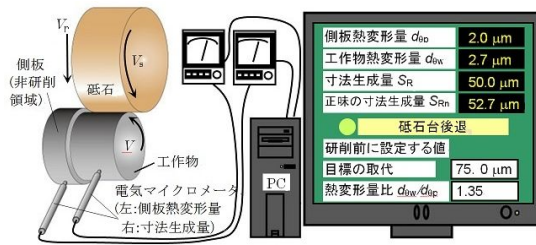


図2 工作物熱変形を考慮した加工システム

(3) 図3に、内面研削における工作物温度分布の測定システムを示す。本システムでは、図1と同様の装置を用いて研削中の工作物温度分布をインプロセス測定し、研削熱が工作物の半径の変化に与える影響を調べる。なお、この実験においては深穴の加工を想定して、非常にアスペクト比（長さと直径の比）が大きい、細長い砥石を用いた。なお、寸法誤差の発生要因を追究するために、研削中には砥石に作用する研削抵抗や砥石軸の弾性変形量を測定するとともに、研削後に工作物の内面の形状誤差と、砥石損耗量を測定した。

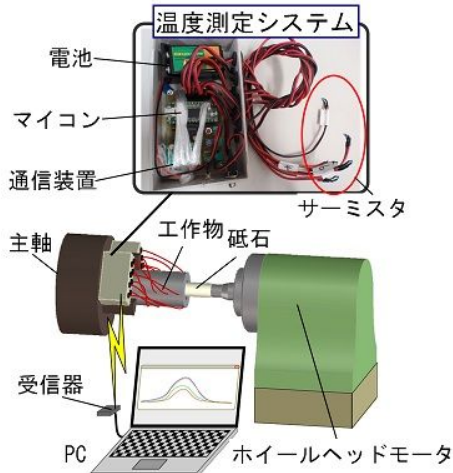


図3 内面研削用の工作物温度分布測定システム

4. 研究成果

(1) 円筒研削における工作物温度分布および熱変形量のインプロセス測定結果とシミュレーション解析結果を比較したところ、両者はよく一致し、本研究で開発したシミュレーション解析手法が妥当であることが確認された。なお、シミュレーション解析を行う際に、従来は工作物へ流入する研削熱を推定するために、研削抵抗を測定する必要があった。しかしながら、研削抵抗の測定は、ひずみゲージを用いることからドリフトが生じやすく、セッティングにも時間がかかるという欠点があった。そこで本研究では、容易に測定可能な砥石軸モータの電力の増減を測定し、モータの消費電力から研削抵抗を算出する手法を新たに考案した。図4にインプロセス測定結果とシミュレーション解析結果を示す。それぞれの図の左側が、研削実験で測定された砥石軸モータの電力を用いて、解析に

より求められた結果である。研削中の工作物温度分布の変化に着目すると、研削開始後、工作物の表面温度は直ちに上昇するが、内部は遅れて温度が上昇していることがわかる。一方で、研削終了後は工作物の中心部に近い部分がすぐには冷却されず、熱が蓄積された状態がしばらく続くことが実験により明らかになり、同様の結果が解析で燃えられた。工作物熱変形についても、研削開始直後に急激に工作物が熱膨張するものの、研削終了後は内部に熱が残っているため、時間をかけて熱収縮する様子が測定され、解析でも同等の結果を得た。なお本実験は直径約120mmの工作物を研削したものであり、半径で最大約4μm程度の熱膨張が生じている。これらの結果から、実際の研削プロセスにおける工作物熱変形挙動を極めて高精度にシミュレーション解析できていることがわかる。

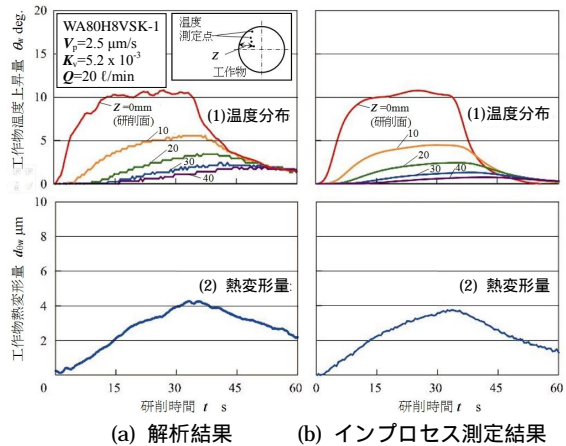


図4 解析とインプロセス測定結果の比較

(2) 図5に、図3のシステムを用いて研削実験を行った結果を示す。本システムを用いて、直径約86mmの工作物の半径を75μm減少させることを目標として実験を行った。本システムで演算される正味の寸法生成量が、目標の取代である75μmに達した時に砥石を後退させれば、最終的に工作物が冷却された後の寸法生成量は目標の取代と一致するはずである。図示のとおり、実験においては正味の寸法生成量が74.6μmに達した際に砥石を後退させた。砥石が後退した瞬間の工作物熱変形量は半径で約2.2μmであった。この時の実際の寸法生成量は約72.4μmであるが、時間の経過とともに砥石から離れているものの工作物が熱収縮するため、寸法生成量の測定値は増大する。十分に時間が経過した後、最終的な寸法生成量は74.9μmに収束した。この結果、本システムにより目標の取代とわずか0.1μmの寸法誤差で工作物を加工できることを確認した。熱変形を考慮せずに加工を行った場合、研削プロセスにおいて工作物熱変形量が最大で約3.8μmに達していることから、数μmの誤差が生じることが予測されるが、本システムを用いることで、容易に工作物の寸法精度の向上が可能である。

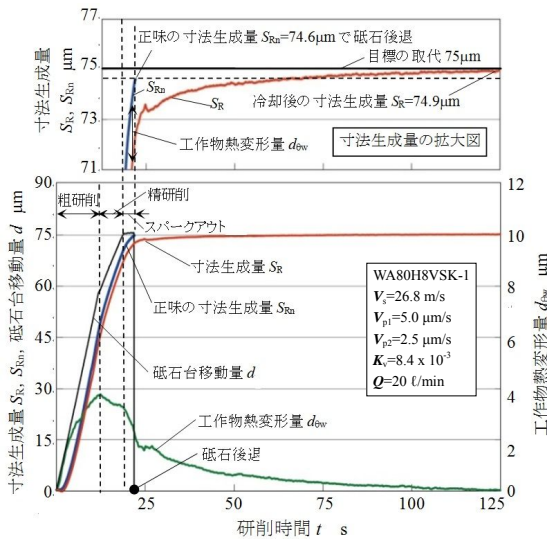


図5 工作物熱変形を考慮した加工結果

(3) 内面研削の実験においては、工作物熱変形量が加工精度に与える影響は小さく、むしろ砥石軸の弾性変形が主要因であることが実験によりわかった。図6に、工作物の形状誤差の発生要因の割合を示す。図中の z は砥石の先端(穴の奥側)からの距離であり、穴の奥側では入口側よりも工作物の形状誤差が大きいことがわかる。また、砥石軸の弾性変形量が形状誤差の多くの割合を占めていることから、工作物の入口側でのみ支持されている砥石の先端が、研削抵抗で大きく弾性変形するために、特に工作物の奥側で形状誤差が顕著に発生しているものと考えられる。したがって図7に示すように、砥石の弾性変形を相殺するように、砥石の形状を補正することで、工作物の形状誤差の改善を試みた。この形状補正の量は、研削実験で得られた工作物の形状誤差や砥石軸の弾性変形量から最適値を決定した。図8に、形状補正を施した砥石と、通常の砥石で研削して得られた工作物内面形状の測定結果を示す。図示のとおり、従来の研削手法では工作物の奥側に向かい約15 μ mのテーパ状の形状誤差が発生していたが、形状補正を行った砥石で研削すると、形状誤差は約5 μ mと、従来の1/3に改善することに成功し、本手法が形状誤差の改善に非常に有用であることを確認した。

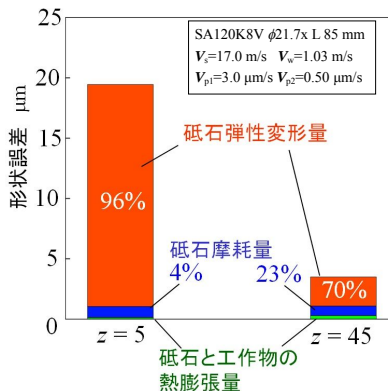


図6 内面研削における形状誤差要因の内訳

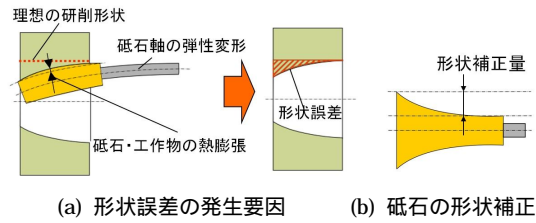


図7 砥石の形状補正

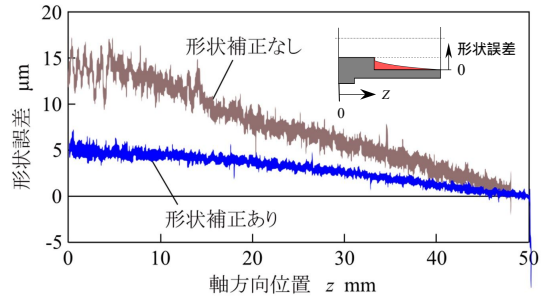


図8 研削後の工作物内面形状の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Takashi Onishi, Moriaki Sakakura, Naoki Sato, Takuya Kodani, Kazuhiro Ohashi and Shinya Tsukamoto, Grinding System Reducing the Influence of Thermal Deformation of Workpiece in Cylindrical Grinding, Advanced Materials Research, Peer review, Vol. 797, 2013, 609-612

Moriaki Sakakura, Takashi Onishi, Takayuki Shinoda, Kazuhiro Ohashi, Shinya Tsukamoto, Ichiro Inasaki, Temperature distribution in a workpiece during cylindrical plunge grinding, Production Engineering, Peer review, Vol.6, No.2, 2012, 149-155

大西孝, 坂倉守昭, 佐伯哲也, 谷村賢彦, 和田洋平, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒プランジ研削における工作物表面温度のインプロセス測定結果を用いた熱変形量の予測システムの開発, 粒加工学会誌, 査読有, 55巻, 7号, 2011, 418-423

[学会発表](計15件)

藤山 泰弘, 大西 孝, 坂倉守昭, 佐藤直樹, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒プランジ研削における工作物熱変形挙動を考慮した加工技術の開発, 砥粒加工学会 先進テクノフェア卒業研究発表会, 2014

吉田光佑, 大西孝, 坂倉守昭, 大橋一仁, 塚本真也, 高アスペクト比砥石を用いた内面研削におけるスパークアウト時間の最適化, 2013年度精密工学会中国四国支部広島地方学術講演会, 2013

大橋一仁, 深穴内面研削加工の高精度化技術, 砥粒加工学会関西地区部会平成 25 年度第 3 回研究・見学会, 2013

Takashi Onishi, Moriaki Sakakura, Naoki Sato, Takuya, Kodani, Kazuhiro Ohashi and Shinya Tsukamoto, Grinding System Reducing the Influence of Thermal Deformation of Workpiece in Cylindrical Grinding, The 16th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2013), 2013

Takashi ONISHI, Moriaki SAKAKURA, Naoki SATO, Takuya KODANI, Kazuhiro OHASHI, Shinya TSUKAMOTO, Grinding System Considering Thermal Deformation of Workpiece, The 15th International Machine Tool Engineers' Conference Poster Session, 2012

大西 孝, 坂倉守昭, 佐藤直樹, 小谷拓也, 孫 小楠, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒プランジ研削における工作物熱変形を考慮した加工システムの開発, 日本機械学会 第 9 回生産加工・工作機械部門講演会, 2012

大西孝, 坂倉守昭, 佐藤直樹, 小谷拓也, 孫小楠, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒研削における工作物の熱変形挙動を考慮した加工システムの開発 - 工作物熱変形量のインプロセス測定による研削終了後の寸法生成量の推定 -, 2012 年度精密工学会中国四国支部島根地方学術講演会, 2012

ONISHI Takashi, SAKAKURA Moriaki, WADA Yohei, SONG Shonan, SATO Naoki, OHASHI Kazuhito, TSUKAMOTO Shinya, Simulation analysis of temperature distribution and thermal deformation in a workpiece during cylindrical grinding, 10th International Conference on Progress of Machining Technology (ICPMT), 2012

大西 孝, 高アスペクト比砥石を用いた内面研削に関する研究, 精密工学会第 87 回精密工学会超砥粒ホイールの性能に関する研究専門委員会, 2012

山本雄也, 大西 孝, 大橋一仁, 坂倉守昭, 塚本真也, 高アスペクト比砥石を用いた内面研削における形状誤差の発生要因, 2011 年度精密工学会中国四国支部岡山地方学術講演会, 2011

孫 小楠, 大西 孝, 坂倉守昭, 和田洋平, 谷村賢彦, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒研削における研削動力を用いた研削抵抗の推定, 2011 年度精密工学会中国四国支部岡山地方学術講演会, 2011

Takashi ONISHI, Kazuhiro OHASHI, Yuya YAMAMOTO, Moriaki SAKAKURA and Shinya TSUKAMOTO, Improvement of Accuracy in Internal Grinding with Shape Modification on High Aspect Ratio Wheel, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2012

大西 孝, 坂倉守昭, 和田洋平, 大橋一仁, 塚本真也, 円筒プランジ研削における工作物熱変形量のシミュレーション解析 - 研削動力からの工作物温度分布の推定 -, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011

大西 孝, 坂倉守昭, 和田洋平, 谷村賢彦, 大橋一仁, 塚本真也, 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技術の開発 - 工作物表面温度のインプロセス測定結果を用いた研削エネルギーの推定 -, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会, 2011

山本雄也, 大西 孝, 大橋一仁, 塚本真也, 坂倉守昭, 高アスペクト比砥石を用いた内面研削に関する研究 - 形状誤差生成過程の解明と砥石の形状補正による形状精度の改善 -, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会, 2011

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
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

(2)研究分担者

大橋 一仁 (OHASHI Kazuhito)
岡山大学大学院自然科学研究科 准教授
研究者番号： 10223918

(3)連携研究者

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