

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560144

研究課題名(和文)高精度研削プロセスシミュレーションを活用した鏡面研削加工のスキルフリー化

研究課題名(英文)Skill-free mirror grinding based on process simulation of precision grinding

研究代表者

坂本 治久(SAKAMOTO, Haruhisa)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40276514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の包括的成果は、以下の2点を可能にしたことである；砥石作業面状態の統計的把握による基本的研削性能の予測、研削仕上げ面粗さの3次元プロファイルのシミュレーション。は、研削砥石の3次元プロファイルを机上計測することにより可能となった。砥石作業面状態は、砥粒切れ刃分布の統計的な特性値として把握できる。は、支持剛性を考慮した砥粒切れ刃の実効的切込みモデルに基づいて実行できる。研削仕上面の3次元粗さプロファイルは、3次元作業面プロファイルと実効切込深さ分布から生成できる。作業面の弾性変位を10～20μmと見積もることにより、実研削面とシミュレーションの粗さがほぼ一致することが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：Conclusions of this study are to enable following two processes; Evaluation of basic grinding performance based on statistical conditions of wheel working surface. Simulation of three-dimensional roughness of ground surface. The former can be possible by the measurement of three-dimensional profile of grinding wheel on the machine. The conditions of wheel working surface can be grasped as the statistical properties of grain cutting-edge distribution. The latter can be executed based on effective model of depth-of-cut considering supporting stiffness of grains. Three-dimensional roughness on ground surface can be simulated from three-dimensional working surface profile and effective cutting-edge distribution. As the elastic displacement of working surface is estimated about 10 to 20 μm, it is confirmed that the roughness values are almost same between actual ground surface and simulated result.

研究分野：精密加工学

キーワード：研削加工 鏡面研削 仕上面粗さ シミュレーション 実効切れ刃 砥粒支持剛性 比研削抵抗

1. 研究開始当初の背景

(1)技術分野の動向

今日、鏡面仕上げの適用はますます拡大してきている。各種のロールや金型の仕上げ、転がり軸受の転動面やロボット用精密減速機部品などにおいて、表面粗さ、高い寸法および形状精度を、高い加工能率と両立して実現しなければならない。このため、仕上げ面粗さの向上だけでなく、形状精度および加工能率にも優れる研削加工の適用が望まれる。

しかし、研削加工は、工具とする研削砥石の切れ刃の形成状態が変化しやすいため、加工プロセスの合理的な制御は極めて難しいとされている。中でも鏡面研削は、わずかな作業面状態の変化が仕上げ面粗さに大きく影響するため、特に難しいとされている。このため、実際には、熟練技能者の経験とノウハウを頼りに、試行錯誤的な予備研削に基づいて実施されている。

今後、鏡面仕上げのニーズはさらに伸びると期待されるが、一方で熟練技能者は減少しつつあり、熟練技能に依存した現在の生産方式では対応できなくなることが明らかである。このため鏡面研削加工のスキルフリー化が本質的に求められている。

(2)関連研究の動向

鏡面研削に関する研究は砥石の粒度により二分できる。一つは粒度が#800以上の微粒砥石を用いた鏡面研削に関するものであり、例えば ELID 研削法[1]や EPD 砥石研削法[2]などが挙げられる。他方は、比較的粗い砥粒を用いた鏡面研削の試みであり、例えば熊本大の安井らの粗粒ダイヤモンド砥粒によるファインセラミックスの延性モード研削[3]に関するなどがある。

しかし、これらの研究アプローチのいずれにも共通する技術課題は、工具である研削砥石の切れ味を決める作業面状態の適切な創成と維持である。砥石作業面状態は、仕上げ面粗さおよび加工能率の両方に大きな影響を与えるにも拘らず、その計測・監視・管理は著しく難しい。したがって、鏡面研削をスキルフリーにするためには、作業面状態の計測技術を研削加工プロセスの中に組み込み、その情報をプロセス制御に活かすことが求められる。しかしながら、「砥粒切れ刃密度」や「連続切れ刃間隔」などの作業面パラメータ[4]を定量化して研削理論に組み入れて活用する技術はほとんど実現されておらず、重要技術課題として残されたままである。

また、砥石作業面の研削特性への影響を考える上で、砥粒の支持剛性もまた重要なパラメータである。この砥粒の支持剛性を正確に定めるためには、砥石の剛性の測定に加えて、作業面上での砥粒の分布状態を併せて考慮しなければならない。しかしながら、従来の研削プロセスの剛性特性に関する検討では、砥石剛性についての評価が中心となっており、ミクロな視点での砥粒の分布状態について考慮が十分とは言えない。したがって、砥石剛性と作業面上での砥粒分布状態を結びつける研究が、本質的に求められていると言える。

2. 研究の目的

本研究は、研削加工システムに各種の評価技術を組み込み、そのデータと研削特性との関係性を実験的に把握した上で、研削シミュレーション技術の高精度化を実現することによって、機構部品における鏡面研削加工プロセスのスキルフリー化を図るものである。これを実現するために、「砥石作業面状態の合理的創成」、「作業面状態の評価と管理」および「研削加工条件の合理的結果」の実現と言う3つの技術課題を定め、これを「作業面状態の評価技術」、「砥石剛性の定量化」、「シミュレーションの高精度化」などの具体的な手法の開発と適用により達成することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)技術課題とその解決法

スキルフリー鏡面研削実現のためには次の3つの課題を解決する必要がある。

課題#1: 作業面状態の合理的創成の確立

課題#2: 作業面状態の評価と管理の確立

課題#3: 研削条件の合理的決定法の確立

本研究は、これらの課題を、①作業面状態の統計的モデル化とその把握、②砥石の切削剛性特性のモデル化とその把握、③研削プロセスの高精度シミュレーション技術の確立、④砥石条件と研削条件に対する研削特性の把握とデータベース化という観点から、研削理論および円筒研削実験の両面から検討して解決しようとするものである。

まず課題#1に関しては、仕上げ面粗さと形状精度を得るために必要な作業面状態をドレッシングにより形成するプロセスのスキルフリー化を図る。このために、ドレッシング条件と研削特性(仕上げ面粗さや研削抵抗)の関係を、作業面状態、特に切れ刃分布と研削理論を関連付けて明確にする。

次に課題#2に関しては、#1で創成した作業面状態を砥粒の統計的分布と支持剛性の両面を考慮して定量化する手法を確立した上で、その変化挙動のインプロセス監視による管理技術を確立する必要がある。具体的には、レーザ変位計を用いて測定する作業面プロファイルの統計的特性評価による砥粒分布状態の同定法と、切れ刃分布を考慮した砥粒支持剛性の実験的同定法を確立し、両者を有機的に組み合わせで解析することにより、作業面状態の実効的な把握と管理の実現を図る。

さらに課題#3については、研削特性の予測に基づいた研削条件の合理的決定法を具体的に提案することを目指す。このために、作業面状態の砥粒切れ刃分布の実測値に基づいた高精度な研削プロセスシミュレーション法の確立を図るとともに、研削実験に基づく研削特性データベースの構築を試みる。

(2)本研究の基本的な検討方法

本研究に関連して、これまでに砥石作業面状態のインプロセス評価技術[5]、超音波重畳クー

ラントの円筒研削への適用技術[6]および冷風加工法の平面研削への適用性[7]など多面的に作業面状態と研削特性の関係について検討を行ってきた。本研究では、それらの成果を基礎として、レーザ変位計によるプロファイル測定や新たに開発する接触剛性の机上計測法を実際の研削加工システムに組み込むことにより、工学的合理性に基づいて高能率鏡面研削加工のスキルフリー化を目指す。

4. 研究成果

(1) 砥石作業面プロファイルのインプロセス計測システムの構築

図1は、研削砥石の3次元プロファイルの机上計測システムの構成を示している。研削盤上にレーザ変位計を直接設置することにより、研削前後でのプロファイルを繰り返し精度良く3次元計測可能にしている。プロファイルは、照射レーザのスポット径を考慮して砥石円周方向および幅方向に10 μm の間隔でレーザ変位計により凹凸高さを測定して計測する。

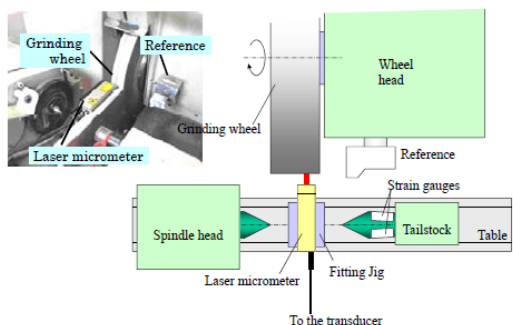


図1 研削砥石の3次元プロファイルの机上計測システムの構成

得られたプロファイルの測定値から砥粒切れ刃分布の統計的な特性値である「ピーク高さ分布」、「自己アフィンフラクタル次元」、「砥粒切れ刃形状パラメータ(切れ刃半頂角など)」、「連続切れ刃間隔」などを定量化できる。最終的に本研究では、円筒研削盤上の研削点の反対側に防水機構とレーザ変位計の駆動機構を装備した砥石作業面3次元プロファイルインプロセス計測システムを実現した。

(2) 砥粒支持剛性を考慮した実効的砥粒切込みモデルの構築

図2は、粒支持剛性を考慮した個々の砥粒切れ刃の実効的な切込みモデルを概略的に示している。砥粒切れ刃の実効的な切込み挙動は、砥粒支持剛性、個々の砥粒に作用する法線研削抵抗および円錐状の切れ刃の押込モデルの3者を考慮することにより定めることができる。検討の結果、砥粒の支持剛性の振舞いとして、線形ばねではなく、法線研削抵抗の平方根に比例する実切込み深さが生じるとした方がより精度よく仕上面をシミュレートできることが確認できた。

特に特筆すべき成果として、「比研削抵抗の見直し」が挙げられる。従来、単位切りくず断面積に作用する研削抵抗である「比研削抵抗」の

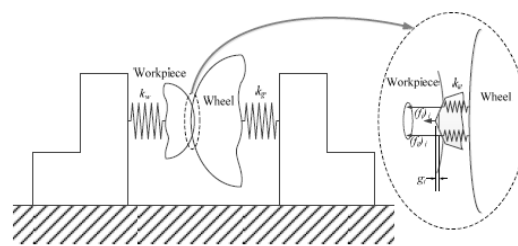


図2 粒支持剛性を考慮した個々の砥粒切れ刃の実効的な切込みモデル

定量化は行われてきていた。しかしながら、砥粒と工作物の接触剛性を考慮しない場合、その値は材料の破壊強度の数十倍から百倍以上に達してしまっていた。本研究では、砥石と工作物との接触剛性を考慮した砥粒切込みモデルを確立することにより、実効的に切りくずを生成するために必要とされる接触圧力と弾性的に作用する圧力との配分比を明らかにすることに成功した。そしてこれにより、個々の砥粒切れ刃による実効的な切込み深さを定める指標を得ることができた。

(3) 研削仕上面粗さの3次元シミュレーション技法の開発

作業面3次元プロファイルに基づく研削仕上面粗さのシミュレーション手法を検討している。提案手法では、砥石作業面の3次元プロファイルと実効的切込み深さ分布から研削仕上面の3次元粗さプロファイルを生成できる。幾何学的なシミュレーションでは実験値より粗さが桁違いに大きくなってしまいが、それを砥粒支持剛性を考慮することで改善することができている。

図3は、通常砥石 WA150N7V により焼入鋼 SCM440 を円筒研削した場合の仕上面粗さのシミュレーション結果の一例を示している。実研削面の粗さ測定値と砥石作業面プロファイルに基づくシミュレーション結果を比較した結果、切れ刃の弾性変位量を10~20 μm と見積もることにより値がほぼ一致することが確かめられた。この成果で特筆すべきことは、砥粒切れ刃の弾性変位を見積もれば、作業面プロファイルを計測するだけで研削仕上面粗さを予測できることを明らかにしたことである。

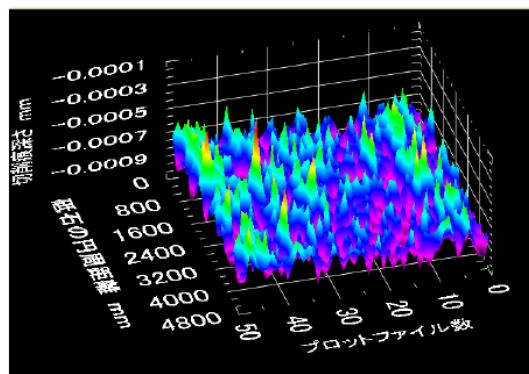


図3 研削仕上面の3次元粗さシミュレーション結果の一例

(4) 研究成果の総括

3年間を通じての本研究の包括的な成果として、以下の2点が挙げられる。①砥石作業面状態を統計的に把握することによりその基本的な研削性能を予測できるようにした。②砥粒の弾性変形を考慮して実効的な切込深さを想定することにより実研削面に近い粗さプロファイルをシミュレーションできるようになった。

<引用文献>

- [1] 例えば H.Ohmori, et al: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-process Dressing, Ann.CIRP, 39, 1(1990) 329.
- [2] 例えば J.Ikeno, Y.Tani and H.Sato: Nanometer Grinding Using Ultra Fine Abrasive Pellets, Ann.CIRP, 39.1 (1990) 341.
- [3] 例えば, 安井, 山崎:粗粒ダイヤモンド砥石によるファインセラミックスの超平滑研削の可能性, 精密工学会誌, 69, 1 (2003) 115.
- [4] 例えば, 庄司:研削加工学, 養賢堂, 第3章, 第5章(2004).
- [5] 坂本, 清水:研削の進行に伴う砥石作業面状態変化の評価法:精密工学会誌, 71, 1 (2005) 120.
- [6] H.Sakamoto ほか 4名: Effects of Megasonic Coolant on Cylindrical Grinding Performance, Key Eng. Mat., Vols.238-239 (2003) 189.
- [7] H.Sakamoto ほか 2名: Semi-cold-air Supply System for Environmental Impact Reduction and Its Application to Surface Grinding, Proc. of Int. Conf. on LEM21, Vol.2 (2005) 641.

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 1 件)

- [1] H.Sakamoto, H.Tsubakiyama, M.Takeishi: Proposal of purification method of grinding coolant by dissolution of micro-bubbles, Advanced Materials Research, v.565, (2012) 406-411.

[学会発表](計 4 件)

- [1] 中木将路, 坂本治久, 石川剛:砥粒切れ刃分布に基づく研削仕上面の3次元シミュレーション手法の提案, 砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2014, 2014年09月11日~13日, 岩手大学.
- [2] 中木将路, 坂本治久, 小林康記:砥粒切れ刃分布を考慮した研削仕上面粗さのシミュレーション, 2013年度砥粒加工学会学術講演会, 2013年08月27日~29日, 日本大学理工学部.
- [3] 坂本治久, 佐々木義憲, 小林康記, 清水伸二:机上計測した作業面プロファイルに基づく比研削抵抗の同定,2013年度精密

工学会春季大会学術講演会,2013年03月13日~15日,東京工業大学

- [4] 坂本治久, 中村恭子:研削砥石作業面のフラクタル特性とその研削仕上げ面粗さとの相関性, 砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2012, 2012年08月29日~31日, 同志社大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等:特に無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂本 治久 (SAKAMOTO, Haruhisa)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号: 40276514

(2)研究分担者

清水 伸二 (SHIMIZU, Shinji)

上智大学・理工学部・名誉教授

研究者番号: 70146801