

機関番号：32621
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560112
 研究課題名（和文） 砥粒切れ刃密度のインプロセス計測に基づくスキルフリー
 鏡面研削加工法
 研究課題名（英文） Skill-free Mirror Grinding Method Based on In-process
 Measurement of Grain Cutting-edge Density
 研究代表者
 坂本 治久 (SAKAMOTO HARUHISA)
 上智大学・理工学部・准教授
 研究者番号：40276514

研究成果の概要（和文）：スキルフリー鏡面研削加工を実現するために、以下の 5 つの課題について検討した：1)研削砥石の作業面プロファイルのオンマシン測定システムの汎用化、2)砥粒切れ刃密度の定量化法の確立、3)ドレッシングに伴う切れ刃分布の変化の把握、4)連続切れ刃間隔の定量化手法の確立、5)マイクロバブルを応用した研削液清浄化技術の開発。それらの実践的な検討は、研削プロセスと作業面状態変化との関係を解明し、研削液の新たな管理手法を具体化した。その結果、スキルフリー鏡面研削は実現に一歩近づいた。

研究成果の概要（英文）：In order to realize the skill-free mirror grinding process, five research themes are examined in this study: 1) Generalization of on-machine measurement system of working surface profile of grinding wheel, 2) Establishment of the quantification method of the grain cutting-edge density, 3) Grasp of the change of the grain cutting-edge distributions with dressing, 4) Establishment of the quantification method of successive cutting-edge spacing, 5) Development of the coolant purifying method with the micro-bubble supply. Those practical examinations have clarified the relationships between grinding process and the change in the cutting-edge distributions, and realized the novel management method of grinding coolant. From the results, the skill-free mirror grinding has advanced one step to realization.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：精密加工学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：研削砥石、作業面状態、研削抵抗、インプロセス計測、砥粒切れ刃密度、連続切れ刃間隔、マイクロバブル、清浄化

1. 研究開始当初の背景

(1)技術分野の動向

今日、鏡面仕上げの適用範囲はますます拡大してきており、精密機械分野においても、各種のロールや金型の最終仕上げ、転がり軸受の転動面や精密駆動機構の案内面およびロボット用精密減速機部品などにおいて鏡

面仕上げがなされている。このような精密機械部品や金型の鏡面仕上げにおいては、表面粗さ、高い寸法および形状精度を、高い加工能率で実現することが求められる。このため、形状精度および加工能率に優れる研削加工の適用が有効と考えられる。

しかしながら研削加工は、切れ刃状態が変

化しやすい砥石を用いるため、加工プロセスを適切に制御し続けることが極めて難しい。中でも鏡面研削は、わずかな作業面状態変化が仕上げ面粗さに大きく影響し、高度で難しい加工法とされている。このため多くの場合は、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の積み重ね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生産では対応できない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強く求められている。

(2) 関連研究の動向

鏡面研削に関する研究は用いる砥石の粒度により二つに分類できる。一つは粒度が #800 より微小な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。これらの方法では、砥粒が細かいため容易に高い切れ刃密度を得られる反面、高精度な前加工を必要としたり、ドレッシングなどの非加工時間が増したりするため加工能率を高めることが難しい面がある。

一方、比較的粗い砥粒を用いた鏡面研削の試みもなされている。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]に関する検討では、粒度 #140 で結合度が高いダイヤモンド砥石を用いることにより μm オーダの比較的大きな切込みでもセラミックスの延性モード研削が可能になり、高平滑表面が得られることを明らかにしている。一般に粗粒砥石の方が気孔の大きさや結合度を高めやすく、潜在的に長寿命化、高能率化に優れている。

これら二つの研究アプローチにおいて、共通している技術課題は砥粒切れ刃状態、すなわち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が、その計測・監視・管理は難しい。したがって、鏡面研削をスキルフリーな加工技術にするためには、砥石作業面状態の計測技術を研削加工プロセスの中に織り込んでいく努力が求められている。とりわけ作業面上での「砥粒切れ刃密度」や「連続切れ刃密度」などのパラメータは研削抵抗や仕上げ面粗さの理論式の中でも用いられており、重要性が高い[4]。今日、それらのパラメータをインプロセス計測して研削プロセスに活用する技術はほとんど実現されておらず、重要な技術課題のひとつとして残されている。

[参考文献]

[1] 例えば H.Ohmori, and T.Nakagawa: 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).

2. 研究の目的

スキルフリー鏡面研削加工を実現するためには、以下の3つの技術課題について、具体的かつ実践的な解決を図ることが求められる:

課題#1: 作業面状態の創成技術の確立.

課題#2: 作業面状態の維持・管理技術の確立.

課題#3: 非加工時間短縮技術の確立.

本研究では、当研究グループにおける従来検討の成果を基礎として、これらのうち課題 #1 および #2 を主な対象として取り上げ、実験的かつ実践的にその解決を図る。当研究グループでは、これまでに砥石作業面状態のインプロセス評価技術[1]や超音波重畳クーラントの円筒研削への適用技術[2]および冷風加工法の平面研削への適用性[3]などについて検討を行ってきた。そこで、これらの検討に共通する基盤技術である「砥粒切れ刃密度のインプロセス計測技術」を活用して「研削中およびドレッシング中の砥粒切れ刃密度の新しい定量化技術」を開発するとともに、マイクロバブルを活用した研削液清浄化技術を新たに開発することを具体的な目的とする。

[参考文献]

[1] 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.

[2] H.Sakamoto, S.Shimizu ほかに3名: Effects of Megasonic Coolant on Cylindrical Grinding Performance, Key Engineering Materials, Vols.238-239 (2003) 189.

[3] S.Ohmori, H.Sakamoto and S.Shimizu: 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.

3. 研究の方法

本研究では、以下の5つの課題を具体的なテーマとして実践的に検討を行った。

- ① 研削砥石の作業面プロファイルのオンライン測定システムの汎用化
- ② 砥粒切れ刃密度の定量化法の考案

- ③ 単石ダイヤモンドによるドレッシング過程における作業面状態変化の把握
- ④ 連続切れ刃間隔の定量化手法の考案
- ⑤ マイクロバブルを応用した研削液清浄化技術の開発

基本的な検討方法として、研削実験および研削仕上げ面の計測を行った。主な実験装置としては、円筒研削盤および平面研削盤に加えて、マイクロバブル発生装置や接触式3次元粗さ測定装置を用いた。また、研削実験においては、A系の通常砥石を単石ダイヤモンドでドレッシングし、主に焼入れ鋼を工作物として湿式プランジ研削を行った。また、実験結果の解析のために、上記①で構築した作業面プロファイルオンマシン測定システムおよび研削抵抗測定システムを用いて、作業面プロファイルおよび研削抵抗を測定するとともに、研削液中の浮遊ごみの定量および観察や、仕上げ面粗さの測定と空間周波数解析などを行った。

4. 研究成果

4.1 作業面プロファイルのオンマシン測定システムの構築とその汎用化

本検討においては、複数の研削盤に汎用的に取付けが可能で、しかも同一の作業面を繰返し測定できる脱着式プロファイル測定システムの構築を試みた。主な解決すべき技術課題は、レーザ変位計を研削盤上から脱着しても、精度よく同じ砥石断面を計測できる技術を確立することであった。

図1は、開発した脱着式作業面プロファイルオンマシン測定システムの外観を示している。同図に示すように、研削盤上に設けた測定基準のエッジ測定と、NC座標値の取込みを組み合わせることにより、レーザ変位計の研削盤上への取付けの再現性の誤差を補正する具体的な方法を確立することができた。

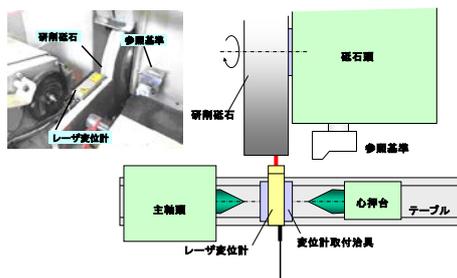


図1 砥石作業面プロファイルのオンマシン測定システムの構成

[5. 主な発表論文：雑誌論文②③にこの成果が報告されている。]

4.2 砥粒支持剛性を考慮した切れ刃密度の定量化法の考案

本検討においては、前述の作業面プロファ

イルオンマシン測定システムを用いて測定した作業面プロファイルに基づいて、作業面上の砥粒切れ刃密度を定量化する具体的な方法を考案した。解決すべき主な技術課題は、①測定される狭い幅の作業面プロファイルから砥粒のピーク高さ分布を同定すること、②研削抵抗に伴う砥粒高さの弾性変位を考慮した実効切れ刃層深さの同定法を具体化することの二つであった。

図2は、上記①の課題について、作業面上の砥粒が概ね正規分布にしたがって統計的に分布することを利用して、砥粒高さ分布を同定した結果の一例を示している。同図に示すように、幅15 μm の断面として測定する作業面プロファイルに基づいて、その分布幅を狭めることにより砥粒の最大高さの分布を推定できる。

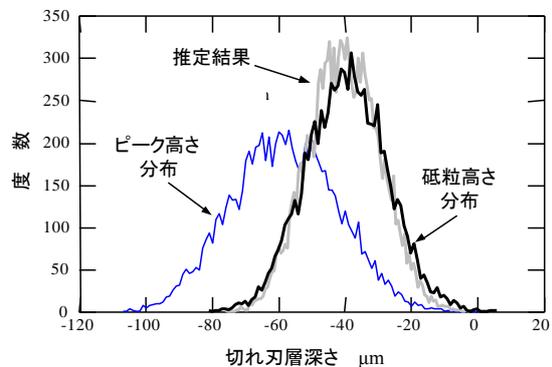


図2 作業面におけるピーク高さおよび砥粒高さ分布

一方、上記②の課題については、砥粒の支持剛性を考慮した作業面モデルに基づいて、作業面プロファイルおよび研削抵抗の測定結果を整合するように、切れ刃密度を算出する方法を考案している。ここで、新たなパラメータとして、砥粒支持剛性を考慮した実効的な切れ刃の存在範囲を表す実効切れ刃層深さを提案している。この値と前述の砥粒高さ分布を組み合わせることにより、作業面上での砥粒切れ刃分布を定めることができる。

図3は、本提案手法により定めた砥粒切れ刃密度 ρ と研削仕上げ面の粗さ Rz との関係を示している。 Rz は、 ρ の増加に伴って、一様に減少しており、研削性能が向上することがわかる。このことは、机上計測が可能な切れ刃密度 ρ に基づいて仕上げ面粗さ Rz を推定し、また制御することが可能になると考えられる。

[5. 主な発表論文：雑誌論文④⑤⑥、学会発表②にこの成果が報告されている。]

4.3 作業面評価に基づくドレッシング過程のモニタリング

研削砥石の作業面は、ドレッシング工程を経て形成され、その条件により大きく変化する

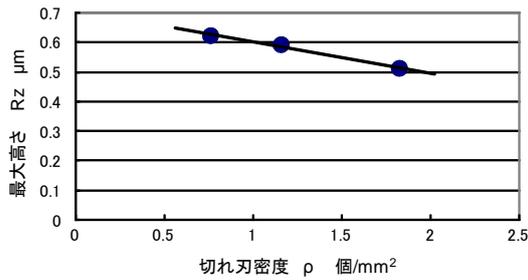


図3 砥粒切れ刃密度 ρ と仕上げ面粗さ Rz の関係

る。しかしながら、ドレッシングに伴って作業面状態がどのように変化するかについては十分には明らかと言えない。そこで、本検討においては、単石ダイヤモンドを用いた通常砥石 WA150N7V のドレッシングに伴う切れ刃密度の変化を、前述までに開発した測定システムおよび手法を用いて計測した。

図4は、ドレッシングにおける最終切込みと切れ刃密度の関係を示している。切込みの減少に伴って切れ刃密度は増加するが、大まかに見て3つの状態に分けることができる。すなわち、切込み $5 \mu\text{m/pass}$ を超える条件での切れ刃密度が低めの状態と、切込み $3 \mu\text{m/pass}$ 以下の条件での切れ刃密度が高い状態、そしてその間の遷移過程である。

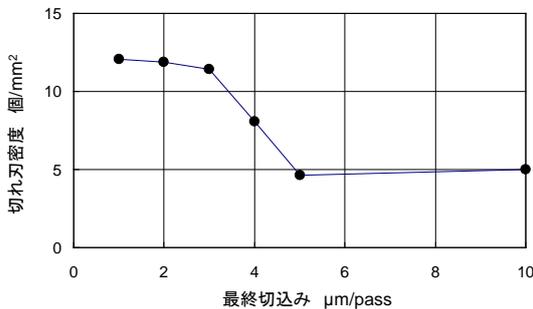


図4 ドレッシングに伴う切れ刃密度の変化

一方、図5は、ドレッシングにおける最終の切込みに伴う仕上げ面粗さ Rz の変化を示している。同図より、切込みが小さくなればなるほど、Rz がより小さくなるのがわかる。切れ刃密度の増加、すなわち連続切刃間隔の短縮は仕上げ面粗さを向上することが一般的に知られており、このことから前述のドレッシング切込みの低減による切れ刃密度向上作用が裏付けられる。前述したように、切込みには、切れ刃密度の大小を分ける臨界的な値があるので、切込みは、求められる仕上げ面粗さに応じて合理的に定められることがわかる。

[5. 主な発表論文：雑誌論文②③に成果に関する記述あり.]

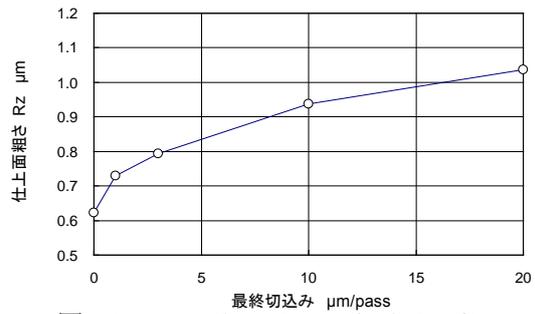


図5 ドレッシングに伴う仕上げ面粗さの変化

4.4 連続切れ刃間隔の定量化法の考案とその妥当性の検討

多くの研削の理論式において、研削砥石はフライス工具と類似した多刃工具と見做され、同一線上を切削する切れ刃の作用を幾何学的に定式化している。このため、切れ刃の連続した分布状態を表すパラメータとして「連続切れ刃間隔」を定める必要がある。

図6は、連続切れ刃間隔を定めるための砥石作業面及び砥粒切れ刃のモデルを示している。砥粒切れ刃は、その切れ刃密度を満たすようにランダムに配置されている。そこで、実効的な切込みと砥粒形状から決まる切削幅の範囲に収まる一連の砥粒がその砥石断面における有効切れ刃の並びとなる。この有効切れ刃数で円周長を除すことにより連続切刃間隔が定まることになる。

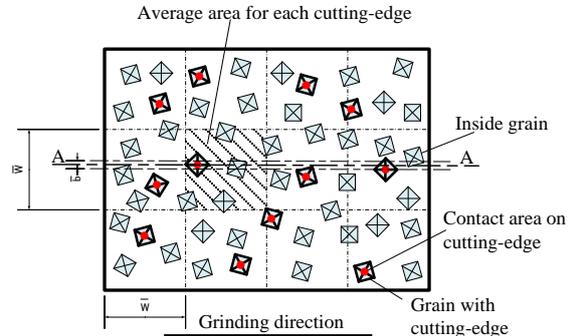


図6 砥粒切れ刃分布に基づく有効切れ刃の存在領域モデル

有効切れ刃数および連続切刃間隔の同定においては、砥粒の代表形状の把握が必要である。そこで、本検討では、砥粒の平均的な形状として比較的鋭角な切れ刃を形成する正8面体と、鈍角の切れ刃を形成する球形を取り上げて比較する。

有効切れ刃数および連続切刃間隔の同定の妥当性は、軟質な銅の研削により、作業面における砥粒の分布状態を研削仕上げ面に転写し、その表面トポグラフィを解析することにより定めて、確認した。その結果、砥粒の代表形状としては8面体よりは球形に近く、従来から言われているように、砥石は平

均的には鈍角な切れ刃を持っていると考えられることがわかった。

この結果は、研削加工があたかも切れ刃がランダムかつ多数のフライス工具を用いた切削加工のように、すなわち統計的ではなく確定的にモデル化できる可能性を示唆しており、研削仕上げ面粗さに代表される研削特性の予測が可能になることを示している。[5. 主な発表論文：雑誌論文①にこの成果が報告されている。]

4.5 マイクロバブルを応用した研削液清浄化技術の提案

本検討においては、ドレッシングにより形成した作業面状態を有効に活用するために、研削液中を漂う研削くずや砥粒の破砕片を除去して研削液を清浄化する技術を提案している。本テーマで解決すべき主な課題は、既存のフィルタでは回収の難しい極微粒な研削くずや砥粒片のようにマグネットセパレータで吸着できないような微粒子ごみが、研削点に再循環されてしまうと、仕上げ面にスクラッチやくずの付着による盛り上がりなどができやすくなって仕上げ面粗さを劣化させることであった。

図7は、マイクロバブルの発生装置を組み込んだ研削液清浄化システムの構成を示している。本検討では、マイクロバブルとして、平均粒径 $50\mu\text{m}$ ほどの空気の泡を研削液中に吹き込んでいる。マイクロバブルは、研削液の底面から供給され、ゆっくりとクーラントタンク上面に浮き上がってくる。その過程で、研削くずや破砕砥粒片と接すると、それらをトラップして、クーラントタンクの上面にそれらの微粒子ごみを浮き上がらせる。そこで、その汚れた上澄みを除去することにより、研削液を清浄化することができる。

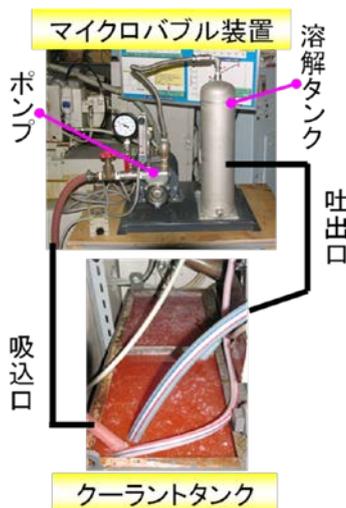


図7 マイクロバブルを用いた研削液の清浄化システムの構成

図8は、本システムを用いた研削液の清浄化効果の評価結果を示している。研削液中の微粒子ごみは、同図左に示すように、研削面仕上げ面に多くのスクラッチと付着による盛り上がりを形成する。これに対して、本検討で提案する清浄化法を適用すると、同図右に示すように、スクラッチおよび盛り上がりが抑制され、粗さの最大高さ R_z が3~4割低減できる。これは、清浄化システムにより、研削液中を浮遊する微粒子が減少したことによっており、実際に清浄化の前後で、研削液中の微粒子ごみを計数した結果、その密度が1/4以下に低減したことが確認できた。このことは、前述の4.3によりドレッシング過程を制御して行い、良好な砥石作業面状態を実現した後に、その本来の研削性能を発揮させるだけではなく、より長期にわたり、良好な作業面状態を維持することにつながると期待できる。

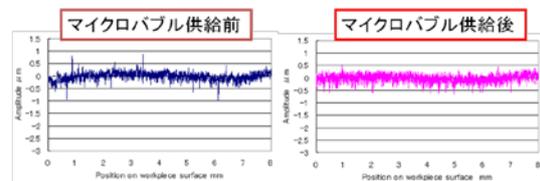


図8 研削液清浄化による仕上げ面粗さの改善効果

[5. 主な発表論文：学会発表①にこの成果が報告されている。]

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6件)

- ① H. Sakamoto, K. Nakamura, Y. Sasaki and S. Shimizu, Analysis of Effective Cutting-edge Distribution of Grinding Wheel Based on Topography of Working and Ground Surfaces, *Advanced Materials Research*, 2011, 査読終了(掲載決定).
- ② 坂本治久, 清水伸二, 単石ダイヤモンドによるドレッシングに伴う研削砥石の切れ刃分布状態の生成過程, 砥粒加工学会誌, Vol. 55, 2011, 査読終了(掲載決定).
- ③ H. Sakamoto and S. Shimizu, Generation process of cutting-edge distribution on grinding wheel with single-point diamond dressing, *Advanced Materials Research*, Vols. 126-128, 2010, pp. 1001-1006 (査読あり).
- ④ 坂本治久, 清水伸二, 砥粒の支持剛性を考慮した研削砥石における切れ刃密度の机上計測法, 砥粒加工学会誌, Vol. 54,

No. 7, 2010, pp.431-436 (査読あり).

- ⑤ H.Sakamoto, S.Shimizu, S.Kashiwabara and H.Tsubakiyam, Estimation method of grain-height distribution based on the working surface profile of grinding wheels, Advanced Materials Research, Vols.76-78, 2009, pp.143-148 (査読あり).
- ⑥ H.Sakamoto, H.Tsubakiyam, S.Shimizu and S.Kashiwabara, Quantification method of cutting-edge density considering grain distribution and grinding mechanism, Advanced Materials Research, Vols.76-78, 2009, pp.149-154 (査読あり).

[学会発表] (計2件)

- ① 坂本治久, 椿山仁士, 清水伸二, 武靖久, マイクロバブルを応用した研削液の清浄化法の提案, 2009年度精密工学会春学術講演会, 2009年3月12日, 中央大学にて発表.
- ② 坂本治久, 椿山仁士, 清水伸二, 砥石作業面上の個々の砥粒に作用する平均研削抵抗に基づく円筒研削特性の評価, 2008年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2008), 2008年9月3日, 滋賀県立大学にて発表.

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・准教授
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・教授
研究者番号: 70146801