

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03866

研究課題名(和文) 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨技術の開発

研究課題名(英文) Development of a fixed abrasive polishing method combined with the Magnetic Abrasive Finishing Process

研究代表者

鄒 艶華 (Zou, Yanhua)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：10516678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：従来の固定砥粒工具の作用面に永久磁石と磁性粒子を利用して磁気ブラシを形成させ、固定砥粒研磨と磁気研磨法を融合させた新しい研磨法を開発した。この新しい研磨法をセラミックス材料、Ti合金の研磨加工に適用し、従来の固定砥粒研磨法に比べて優れた仕上げ面が得られることを実証し、その除去メカニズムが固定砥粒による材料除去と磁気ブラシによる精密研磨・バリ取りの複合作用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高能率除去と精密仕上げを両立させるために、固定砥粒研磨と磁気研磨法を融合させた新しい研磨法を提案した。本加工法をセラミックス材料、Ti合金に対して詳細な検証実験を行い、加工圧力、磁性粒子の粒径などが加工特性に及ぼす影響について調べた。また、加工メカニズムを明らかにすることにより他の難削材に対する適用可能性も示すことができ、工業的・工学的に有用な知見が得られた。さらに、本加工法は固定砥粒工具に永久磁石と磁性粒子、遊離砥粒の追加のみで達成できるため既存の工作機械への適用が比較的容易であり、工業的有用性が高い加工技術であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new polishing method that combines fixed abrasive polishing and Magnetic Abrasive Finishing (MAF) process, by forming a magnetic brush on the action surface of a conventional fixed abrasive tool using a permanent magnet and magnetic particles. This new polishing method was applied to the polishing of ceramic materials and Ti alloys, and it was demonstrated that an excellent finished surface can be obtained compared to the conventional fixed abrasive polishing method. It was clarified that the removal mechanism of this polishing method is a combined action of material removal with fixed abrasive and precision polishing / deburring with a magnetic brush.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：磁気研磨法 固定砥粒研磨法 複合研磨 難削材 高能率加工 高精度加工

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

磁気援用加工技術は、通常の工具や人手が入りにくい加工困難な箇所の精密仕上げに適用できる有効な加工技術である。特に、円管内面の精密仕上げ、平坦な部品の鏡面仕上げおよび微細複雑形状部品表面の精密仕上げに威力を発揮している。平面磁気研磨仕上げの場合、磁極と工作物との間に一定のギャップが設けられ、このギャップに磁性粒子と研磨粒子の混合物からなる磁気ブラシが形成される。磁気ブラシは柔軟性を持ち、フレキシブルな挙動をすることから良い表面仕上げが得られるが、仕上げ効率の向上が強く求められている。

一方、研削砥石に代表される固定砥粒工具を用いる加工は、砥粒を液体に分散させて用いる遊離砥粒加工法に比べて高い除去能率と形状精度が得られる加工法であり、金型材料やガラス、セラミックスなどの難削材の加工に広く用いられている。仕上げ面性状の点では遊離砥粒加工法に譲るものの、低環境負荷、低消耗品コストの仕上げ加工法として期待されている。このような中、仕上げ面品位と除去能率を両立する加工法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究は、粗大固定砥粒工具と工作物の間の大きな隙間（砥粒突出し高さ）に着目し、この隙間に磁気粒子ブラシを形成させ固定砥粒と磁気ブラシの複合作用により除去を行う新しい加工技術、すなわち磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨技術を提案するものである。

まず始めに、永久磁石と磁性粒子を利用して、固定砥粒工具の作用面に磁気ブラシを形成させ複合工具を作成する。また、磁気ブラシの形成および作用条件を解明するとともに、この新しい加工法の材料除去メカニズムを明らかにすることを目的とする。

次に、本加工法の有効性を検証するため、ガラス、セラミックスなどの硬脆材料やチタン合金などの難削材に対する加工実験を行い検討する。また、高能率除去と精密仕上げを両立させるために、加工特性に及ぼす影響因子を調べ、最適加工条件を明らかにする。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するにあたり、まずは固定砥粒工具の作用面に磁気ブラシを形成させるための固定砥粒工具と永久磁石の選定を行う。磁気力は永久磁石の形状・寸法や磁性粒子のサイズ、磁極形状等によって変化するため、磁場測定・解析を行い永久磁石の仕様、磁極形状を決定する。次に、磁気ブラシを形成する磁性粒子に生じる力を理論解析するとともに、本加工法の材料除去メカニズムを明らかにする。さらに、研磨装置と複合工具を作製し、アルミナセラミックス材料、Ti 合金に対して加工実験を行う。高能率除去と精密仕上げを両立させるためには、(1)定圧力、(2)磁性砥粒の種類、サイズ、(3)固定砥粒サイズ、(4)工具回転速度について最適化を図る必要がある。詳細な加工実験を行い、加工特性を評価、検討する。

### 4. 研究成果

(1) 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨 (MAF-FAP) では砥石上部にリング状の永久磁石を取り付ける。砥石作用面に存在する固定砥粒の突出しによって生じる工具/工作物間の隙間に電解鉄粉と研磨材砥粒、研削液を混合した磁性粒子混合スラリーを磁気吸着させることで、混合スラリーは磁力線に沿って磁気ブラシを形成する。工具を回転させながら一定圧力を負荷し送りを与えることで、砥石表面の固定砥粒と磁気ブラシに付着する遊離砥粒の作用で工作物表面が除去される。図1にMAF-FAPにおける加工力の模式図を示す。磁性粒子は磁極から磁力線方向 ( $x$  軸方向) および等磁位線の方向 ( $y$  軸方向) に磁力  $\Delta F_x$  および  $\Delta F_y$  を受け、工具作用面に集中して吸着される。粒子形状を球形と仮定すれば、磁性粒子相互の磁気吸引力  $\Delta F_m$  は次のように計算される。

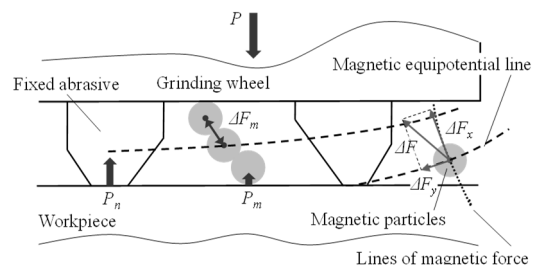


図1 MAF-FAPにおける加工力の模式図

ここで、 $r$  は磁性粒子の半径、 $\mu_0$  は真空中の透磁率、 $\chi_r$  は磁性粒子の比磁化率、 $H$  は磁場強度である。これより磁性粒子の粒子サイズが大きいほど粒子間の吸着が強くなることが示され、磁性粒子の直径が大きいほど形成されたブラシ形状を維持しやすいと考えられる。このとき、複合工具に負荷される垂直荷重  $P$  と工作物に作用する固定砥粒による加工力  $P_n$ 、磁気ブラシによる加工力  $P_m$  の関係は、工作物に作用する固定砥粒と磁気ブラシの数をそれぞれ  $n$ 、 $m$  とすれば  $P = nP_n + mP_m$  で定まり、これらの力により材料除去が進行することが示された。

$$\Delta F_m = \frac{3\pi r^2 \mu_0 \chi_r^2 H^2}{2(3 + \chi_r)^2}$$

ここで、 $r$  は磁性粒子の半径、 $\mu_0$  は真空中の透磁率、 $\chi_r$  は磁性粒子の比磁化率、 $H$  は磁場強度である。これより磁性粒子の粒子サイズが大きいほど粒子間の吸着が強くなることが示され、磁性粒子の直径が大きいほど形成されたブラシ形状を維持しやすいと考えられる。このとき、複合工具に負荷される垂直荷重  $P$  と工作物に作用する固定砥粒による加工力  $P_n$ 、磁気ブラシによる加工力  $P_m$  の関係は、工作物に作用する固定砥粒と磁気ブラシの数をそれぞれ  $n$ 、 $m$  とすれば  $P = nP_n + mP_m$  で定まり、これらの力により材料除去が進行することが示された。

(2) 本研究では、固定砥粒工具である市販の軸付電着ダイヤモンドカップ型砥石にリング状の Nd-Fe-B 磁石を軸にはめ込んだ複合工具を作成しこれを使用した。この複合工具と磁性粒子、遊離砥粒、研磨液を混合したスラリーを用いることにより電着砥石作用面に磁気ブラシが形成され固定砥粒とともに工作物表面に作用する。工具回転数が増加すると磁性粒子に働く遠心力が増加し、磁気ブラシの破断が生じる恐れがあるが、平均粒径  $30\mu\text{m}$  の磁性粒子も用いて検討した。

ところ、工具回転数  $3000\text{min}^{-1}$  程度からスラリーの飛散が見られ始めたが、 $8000\text{min}^{-1}$  に至っても磁気ブラシの破断は見られなかった。

(3) 工具を工作物に定圧力で押しつけつつ回転させ、工具に押し付け運動と回転運動、そして相対的な往復運動をさせる加工装置を試作し、セラミックス平板に対する加工実験を行った。往復運動には電動スライダを用い、工作物台直下にはロードセルを配し加工中の垂直荷重を測定した。平均直径  $75\mu\text{m}$  もしくは  $330\mu\text{m}$  の磁性粒子を  $2\sim 4\mu\text{m}$  のダイヤモンド砥粒、水溶性研磨液と混合した 2 種類のスラリーを用いて工具回転数  $560\text{min}^{-1}$ 、送り速度  $2\text{mm}/\text{min}$ 、種々の垂直荷重でアルミナセラミックス平板を 30min 研磨した際の仕上げ面粗さと材料除去量の変化を図 2 に示す。平均粒径  $330\mu\text{m}$  においてはすべての荷重で表面粗さが大きく改善し、高品質表面が得られた。特に荷重が 30N の場合には、10 分間の加工で加工量が 8 mg、表面粗さが  $8.3\text{nmRa}$  となり、良好な仕上げ面が得られた。

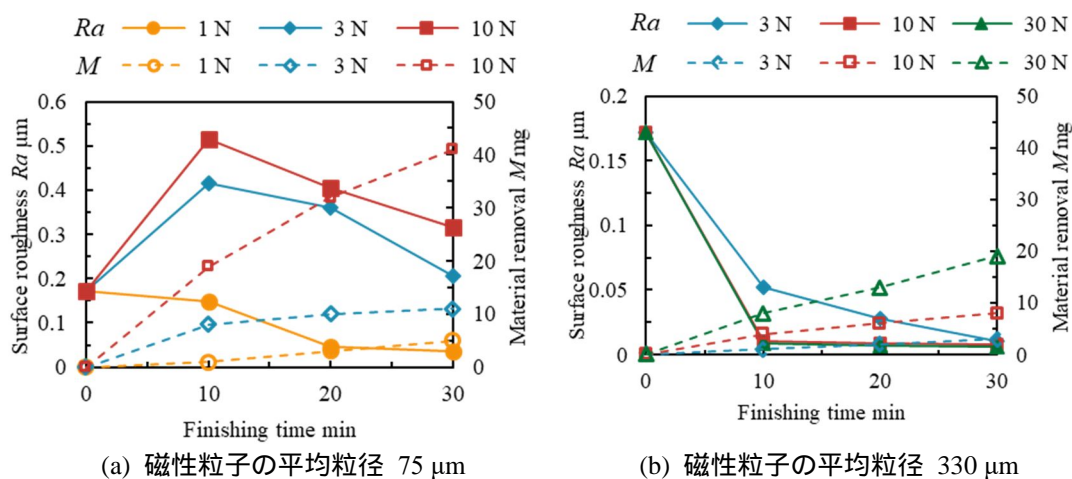
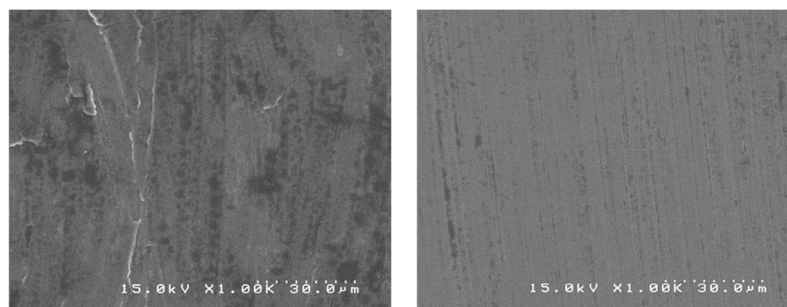


図 2 アルミナセラミックス平板加工における仕上げ面粗さと材料除去量の変化

(4) 難削材である Ti 合金に対して加工実験を行った。工具回転数  $1100\text{min}^{-1}$ 、送り速度  $0.1\text{mm}/\text{min}$ 、垂直荷重  $4\sim 13\text{N}$  で  $20\text{mm}$  をワンパス加工し、平均粒径  $30\mu\text{m}$  の磁性粒子および粒径  $1\mu\text{m}$  のアルミナ砥粒を水溶性研磨液と混合したスラリーを用いた MAF-FAP と水溶性研磨液のみを与えた固定砥粒のみによる加工を比較した。固定砥粒のみによる仕上げ面粗さは約  $0.4\mu\text{mRa}$  であったが、磁気ブラシを複合した MAF-FAP では約  $0.2\mu\text{mRa}$  と仕上げ面粗さが改善された。この時の仕上げ面の SEM 像を図 3 に示す。(a)の固定砥粒のみによる仕上げ面では掘り起こしを伴う除去によって生じたと思われる大きなバリが残存しているのがわかる。一方、(b)の磁気ブラシを複合した MAF-FAP 仕上げ面に残存するバリは非常に規模の小さいものとなっている。この観察結果より、MAF-FAP では固定砥粒による掘り起こしを伴う除去作用によって生じるバリが磁気ブラシによって除去されることが推察され、その結果、仕上げ面粗さが大きく改善されるものと考えられる。以上の結果より、MAF-FAP は延性材料のような塑性変形を伴う除去によって加工が進展するような場合に大きな仕上げ面改善効果が得られることが予想される。



(a) 固定砥粒のみ (b) MAF-FAP  
図 3 Ti 合金加工における仕上げ面の SEM 像

<引用文献>

M. Natsume, and T. Shinmura, "Study on the mechanism of plane magnetic abrasive finishing process—Elucidation of normal force characteristics," Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Vol.74, pp. 212–218, 2008. (In Japanese)  
T. Shinmura, E. Hatano, and K. Takazawa, "Development of spindle-finish type finishing apparatus and its finishing performance using a magnetic abrasive machining process," Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng. Vol.20, pp. 79–84, 1986. (In Japanese)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yanhua Zou, Ryunosuke Satou, Ozora Yamazaki and Huijun Xie	4. 巻 9
2. 論文標題 Development of a New Finishing Process Combining a Fixed Abrasive Polishing with Magnetic Abrasive Finishing Process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Machines	6. 最初と最後の頁 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/machines9040081	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 -

1. 著者名 Ryunosuke Sato, Yanhua Zou and Taiki Koma	4. 巻 -
2. 論文標題 Machining Characteristics of a Process Combining a Fixed Abrasive Polishing with Magnetic Abrasive for Ti-6Al-4V ELI alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 0件）

1. 発表者名 鄒艷華, 佐藤隆之介, 山崎大空
2. 発表標題 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨法に関する研究
3. 学会等名 機械学会2019茨城講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保陽平, 佐藤隆之介, 鄒艷華, 高麗泰熙, 皆川隼輝
2. 発表標題 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨法によるTi合金加工に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鄒艷華, 佐藤隆之介, 山崎大空
2. 発表標題 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨法に関する研究－加工メカニズムの検討－
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎大空, 鄒艷華, 佐藤隆之介
2. 発表標題 磁気援用加工法を複合した固定砥粒研磨技術の開発
3. 学会等名 砥粒加工学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁気援用加工法を応用した固定砥粒研磨方法及び研磨装置	発明者 鄒艷華, 佐藤隆之介	権利者 宇都宮大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-030323	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	佐藤 隆之介  (Sato Ryunosuke)  (20312861)	宇都宮大学・工学部・准教授    (12201)	

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
---------	---------