磁気研磨法によるファインセラミックスの 平滑加工に関する研究*

——強磁性体粒子混合ダイヤモンド磁性砥粒の研磨能率向上効果——

進 村 武 男** 王 鳳 輝*** 会 沢 利 夫**

Study on a New Finishing Process of Fine Ceramics by Magnetic Abrasive Machining
—On the Improving Effect of Finishing Efficiency Obtained by Mixing
Diamond Magnetic Abrasives with Ferromagnetic Particles—

Takeo SHINMURA, WANG Feng Hui and Toshio AIZAWA

A new efficient magnetic abrasive finishing process is created in which the new type magnetic abrasives are used mixing small sized diamond magnetic abrasives with such large sized ferromagnetic particles as iron particles. From the experiments, it was clarified that the machining efficiency was improved remarkably based on the increasing effects of both the finishing pressure and the magnetic brush rigidity. It was also pointed out that the machining efficiency was influenced severely by both the iron particle diameter and the mixing weight percentage of iron particles, and there was suitable value for the mixing weight percentage.

Key words: magnetic abrasive finishing, plane finishing, mixing type diamond magnetic abrasives, fine ceramics, finishing efficiency, ferromagnetic particle, stock removal, surface roughness

1. 緒 言

ファインセラミックスは精密機械用材料として頻繁に使用されるようになり、 $0.1 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の高精度表面が要求されてきている。筆者ら¹⁾²⁾は、約 $100 \mu\text{m}$ 径の鉄粒子表面に $2/4 \mu\text{m}$ 径のダイヤモンド粒子を分散固着させたダイヤモンド磁性砥粒²⁾を用いた磁気研磨により、セラミックスの精密仕上げが可能なことを示した。しかし、このダイヤモンド磁性砥粒は極めて高価なため簡単に入手できなく、セラミック磁気研磨の基礎研究および積極的な応用・実用化研究を阻害している。

本研究では、この問題点を解決し得る一つの新しい磁気研磨法を創案した。すなわち、ダイヤモンド磁性砥粒のみを用いた従来の磁気研磨法¹⁾²⁾に代わって、大径の強磁性体粒子（不定形鉄粉）をダイヤモンド磁性砥粒に混合した「混合ダイヤモンド磁性砥粒」を用いれば研磨能率が大幅に向上することを見いだした。ここでは、この新しい磁気研磨法の概念とその加工メ

カニズム、および研磨実験の結果について報告する。

2. 平面磁気研磨法における作用磁力とその影響因子の解析

2.1 研磨圧力を左右する因子

鉄粉の表面にダイヤモンド粒子を分散固着させたダイヤモンド磁性砥粒²⁾（図2の模式図参照）の粒径を一定とすれば、研磨特性に影響する主な因子は研磨圧力およびダイヤモンド磁性砥粒とセラミック表面の相対運動距離となる。概して両者の値が大きいほど加工能率は向上する。最初に、研磨圧力を左右する因子について検討する。

図1に平面磁気研磨法の加工部模式図を示す。工具側回転磁極とセラミック表面との間に一定の加工間隙を設け、この間隙にダイヤモンド磁性砥粒を充てんとすると磁力線に沿って磁気ブラシが形成される。次に、磁極を高速回転（磁気ブラシを回転）させると同時にセラミック板に送り運動を与えて表面を精密研磨する。加工域に必要とされる磁場は別途に設置した電磁コイルにより、ヨークを介して与えられる（図6参照）。

加工部断面を二次元表示した図2を基にして、ダイヤモンド磁性砥粒に作用する磁力について考える。回

* 原稿受付 平成4年7月13日

** 正 会 員 宇都宮大学工学部（宇都宮市石井町 2753）

*** 鞍山鋼鉄学院（中国遼寧省鞍山市）

Fig. 1 Schematic view of plane magnetic abrasive finishing

Fig. 2 Schematic sectional view of machining portion

回転磁極とセラミック保持台(強磁性体)との間には一般に不均一集中磁場分布が形成されており、加工域外の①点のダイヤモンド磁性砥粒には磁力線方向(x 方向)と等磁位線方向(y 方向)にそれぞれ次式で表される磁力 F_x , F_y (合力 F)が作用する³⁾。この磁力がダイヤモンド磁性砥粒を加工域に集中、充てんさせるばかりでなく、セラミック表面への研磨圧力を与える。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) \chi H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ F_y &= \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) \chi H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Fig. 3 Relation between pressure and iron particle diameter

ここに、 D :ダイヤモンド磁性砥粒を球形に仮定したときの粒径、 χ :ダイヤモンド磁性砥粒の磁化率、 H :磁場強度、 $(\partial H/\partial x)$, $(\partial H/\partial y)$:磁場の変化率。

式(1)の物理的意味について考える。加工部付近の不均一集中磁場分布によってダイヤモンド磁性砥粒が受ける磁力は、粒径とその磁化率、磁場強度とその変化率に關係して決まる。磁場強度とその変化率に大きな値が期待できないときには、磁力の増大は粒径 D と磁化率 χ に依存せざるを得ない。ダイヤモンド磁性砥粒の母体を鉄粒子とした場合、磁化率 χ は一定値をとる。その結果、式(1)の磁力を大きくする手段は最終的に粒径 D を増大させることに帰着する。しかも、磁力は粒径の3乗に比例し、その影響度が著しい。

また、式(1)は、粒径 D の増大によって見掛け上、磁場強度とその変化率が増大したかのような効果をもたらす内容を表している。この事象は高い磁場強度が得られ難いセラミックスのような非磁性材料にとっては実用上極めて重要な意味をもつ。

さらに、式(1)の磁力は回転磁極へのダイヤモンド磁性砥粒の磁気吸着力にも関係し、粒径の増大によってこの磁力を大きくすれば磁気ブラシは回転磁極によく追従して回転するようになる。その結果、セラミック表面と磁気ブラシの相対運動距離が増大し、加工能率が向上する。

ところで、式(1)は1個の磁性砥粒に作用する磁力

Measuring method of the displacement of a magnetic ball brush

Fig. 4 Relations between ball diameter, magnetic flux density, brush length and displacement of a magnetic ball brush

であるから、これを単位面積当たりの磁力、すなわち、研磨圧力に換算すると、圧力は粒径に比例することになる。粒径に比例して圧力が大きくなるという事象は図3に示す実験によって証明される。図示の押付圧力検出器を製作し、一定量の不定形電解鉄粉を磁極真下に充てんし、鉄粉の粒径が押付圧力に及ぼす影響を調べた。実験に用いた粒径の範囲では、粒径の増大とともに押付圧力はほぼ直線的に大きくなることがわかる。

2.2 磁気ブラシの剛性を左右する因子

セラミック表面は回転する磁気ブラシにより加工されることは前述した。一般にブラシ加工における加工能率はブラシの剛性に著しく影響されることがわかっている。磁気研磨法における磁気ブラシの剛性が研磨能率を左右することは一般のブラシ仕上げの場合と同

様であり、高剛性磁気ブラシの研磨能率は向上すると考えられる。そこで、磁気ブラシの剛性（変形挙動）について検討した。

磁性砥粒同志は磁力線に沿って磁気吸引し合い、磁気ブラシを形成する。磁力線はファラデー則によって互いに磁気反発しているため、図2の模式図のように1本ずつ分離したブラシを形成する。粒径 $100\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド磁性砥粒から成る実際の磁気ブラシの変形をそのまま観測できないので、図4に示すように磁性砥粒を鋼球でモデル化し、1本の疑似ブラシの変形について検討した。ブラシの一端を磁極に接着固定し、他端をテンションゲージを用いて変形させ、一様磁場中におけるブラシ先端の変位量を調べた。

測定結果を図4に示す。図4はブラシ先端の引張り力 f をパラメータにして、鋼球径 d 、磁束密度 B お

よびブラシ長 l が磁気ブラシ先端の変位量 δ に及ぼす影響を調べた結果である。図示のように、両対数グラフ上のこれらの関係は直線で近似することができる。従って、ブラシ先端の変位量 δ は、 d, B および l を用いて次式で表される。

$$\delta \propto d^{-3} B^{-0.9} l^{1.1} \quad (2)$$

式 (2) から、磁気ブラシの変位量はダイヤモンド磁性砥粒の粒径 d の 3 乗に反比例することがわかる。この事象は、加工域の磁束密度およびブラシ長さ（加工間隙）が制御できなく、高剛性ブラシを形成できないときには粒径を増大することによって高剛性ブラシが形成できることを意味している。

さらに、鉄粉径の増大によって次の研磨効果が得られると考えられる。すなわち、磁場中における強磁性体粒子同士の磁気吸引力は粒径の 2 乗に比例して大きくなることから³⁾、磁気ブラシの構成要素である鉄粉径を増大すれば鉄粉相互間の相対滑り⁴⁾が減少する。その結果、加工中における磁気ブラシの研磨圧力は維持され、研磨能率の低下が防止される。

3. 強磁性体粒子混合ダイヤモンド磁性砥粒を用いた高能率磁気研磨法の創案

前節の考察から、研磨圧力および磁気ブラシの剛性はダイヤモンド磁性砥粒の粒径 D を増大することによって大きくできることがわかった。しかし、これまでの議論では、図 2 に示すようにダイヤモンド磁性砥粒自体の粒径について検討してきた。いま、ダイヤモンド磁性砥粒に比べて数倍以上の粒径をもつ強磁性体粒子を混合した場合を考えると、磁気ブラシは混合した大径の強磁性体粒子によって形成されることになる。そして、磁場によって強磁性体粒子とダイヤモンド磁性砥粒が同時に磁化され、ダイヤモンド磁性砥粒は大径の強磁性体粒子表面に磁気吸着され、見掛け上の 1 個の大径ダイヤモンド磁性砥粒を形成する。この概念図を図 5 に示す。

混合ダイヤモンド磁性砥粒に含まれる大径の強磁性体粒子は互いに磁気吸着して粒子群を成し、これらが図 5 のように磁力線に沿って整列し、多数の高剛性の磁気ブラシを形成する。本報が提案する新しい磁気研磨法が従来のダイヤモンド磁性砥粒のみを用いる研磨法と異なる点は、磁気ブラシを大径の強磁性体粒子で形成させ、研磨加工は大径粒子表面に磁気吸着させた小径のダイヤモンド磁性砥粒で行うことにある。ブラシの剛性と研磨圧力は混合する強磁性体粒子が担い、その粒径を変えるだけで両者の値を自由に制御し得る特長をもっている。このことは小径のダイヤモンド磁

Fig. 5 General idea for improving finishing efficiency by mixing diamond magnetic abrasives with large sized iron particles

Fig. 6 Schematic view of experimental apparatus

性砥粒を 1 種類のみ製作準備すればよいという実用上極めて重要な意味を含んでいる。

さて、混合する強磁性体粒子の粒径は研磨圧力とブラシの剛性に影響を与え、その混合割合は加工に關与するダイヤモンド磁性砥粒数（切れ刃数）を左右する。従って、強磁性体粒子の粒径と混合割合は研磨特性に著しく影響するはずである。次に、この両者の影響を実験によって調べた。

4. 研磨装置および研磨方法

研磨装置の模式図を図 6 に示す。立てフライス盤を装置の一部として用いた。フライス盤の主軸を利用して磁極を回転させ、図示のモータとボールねじによってセラミック板に送りを与えた。ダイヤモンド磁性砥

Fig. 7 Change of machined depth with mixing weight percentage of iron particles

[Conditions] Workpiece: Al_2O_3 ceramics, $100 \times 100 \times 7$ mm : circumferential speed of magnetic pole : 32 m/min : magnetic flux density : 0.76 T : working clearance : 1 mm ; feed of workpiece : 10 mm/min : Magnetic pole passing number : 10 passes (passing stroke = 35 mm) ; magnetic pole dia. : 12 mm ; machining fluid : straight oil type grinding fluid, 6 wt% supplied

粒は平均粒径 $72 \mu\text{m}$ の不定形鉄粉の表面に $2/4 \mu\text{m}$ 径のダイヤモンド粒子を分散固着させたものである(市販品であるが、製法の詳細は公表されていない)。

このダイヤモンド磁性砥粒に不定形の電解鉄粉(縦横比=1.4)を混合させ、研磨特性に及ぼす影響を調べた。混合する電解鉄粉の粒径を 22, 72, 330, 560 μm の 4 種類に、混合割合を重量比で 0, 20, 40, 60, 80, 100% に変化させて実験した。加工深さは加工後の断面形状を表面形状測定機で測定して求めた。なお、加工深さと表面粗さは回転磁極がセラミック平面上を 5 往復した後の測定値で示した。実験条件を図 7 に示す。

5. 研磨実験の結果および考察

図 7 に、混合鉄粉の粒径をパラメータにして、加工深さと鉄粉の混合割合 (wt%) の関係を示す。混合鉄粉の粒径がダイヤモンド磁性砥粒の母体径 $72 \mu\text{m}$ を超える場合には、粒径の増大とともに加工深さも増大する。また、加工深さは混合割合 40~50 wt% で最大になる傾向を示す。

これらの傾向は図 8 に示す表面粗さについても見られる。表面粗さは混合鉄粉の粒径が大きいほど向上し、混合割合が 40~50 wt% で最も小さな粗さとなっている。なお、本実験では前加工面粗さを $2 \mu\text{mR}_{\text{max}}$

Fig. 8 Change of surface roughness with mixing weight percentage of iron particles
[Conditions] See Fig. 7

に設定しており、図 7 の加工条件では前加工面粗さを完全に除去できていない。図 8 は回転磁極がセラミック表面上を 5 往復した後の表面粗さを示しており、加工前の粗面が次第に除去され、平滑化していく途中の値である。加工深さが大きい条件ほど速く前加工面が除去されることがわかる。

一方、混合鉄粉の粒径がダイヤモンド磁性砥粒の母体径より小さい場合の加工深さは、ダイヤモンド磁性砥粒だけのときよりも減少し、前加工面粗さが残留し表面粗さは容易に平滑化されない。

以上の結果から、大径の不定形鉄粉をダイヤモンド磁性砥粒に混合することによって加工深さが向上でき、加工前の粗面を迅速に平滑化できることがわかった。この加工機構は第 2 節と第 3 節で考察したように、研磨圧力の増大効果、磁気ブラシの剛性化効果、磁気ブラシの回転促進化効果、および鉄粒子間の相対滑りの減少効果に基づくものと考えられる。

鉄粉の混合割合を過度に増大していくと加工に関与するダイヤモンド磁性砥粒数(ダイヤモンド切れ刃数)が減少し、逆に加工深さは小さくなる。鉄粉の混合割合に適値が存在することがわかった。

次に、鉄粉の混合割合を 40 wt% 一定にして、磁束密度と加工間隙が加工深さと表面粗さに及ぼす影響を調べた。図 9 に、鉄粉の粒径をパラメータにして、加工深さと磁束密度の関係を示す。磁束密度が低下すると研磨圧力も低くなり、加工深さが減少する。しかし、大径鉄粉の混合により加工深さを増大することができた。この事象は、第 2 節で述べたように、大径鉄粉の混合による見掛け上の磁束密度増大効果の存在を裏付けるものである。図示していないが、表面粗さと磁束密度の関係は図 8 の場合と同様に、加工深さの大きい条件ほど加工前の粗面が迅速に平滑化されること

Fig. 9 Change of machined depth with magnetic flux density
[Conditions] See Fig. 7

Fig. 10 Change of machined depth with working clearance
[Conditions] Magnetic flux density: 0.6 T; other conditions: see Fig. 7

がわかった。

図 10 に、鉄粉の粒径をパラメータにして、加工深さと加工間隙の関係を示す。加工間隙が増大すると磁気ブラシが長くなり、剛性の低いブラシが形成され、加工深さも減少する。混合する鉄粉の粒径を大きくしていくと加工深さが増大することがわかる。大径鉄粉の混合による磁気ブラシの剛性化効果が現れたものと考えられる。図示していないが、表面粗さと加工間隙の関係は、図 8 の場合と同様に、加工深さの大きい条件ほど加工前の粗面が迅速に平滑化されることがわかった。

なお、別の実験によれば⁵⁾、非磁性金属材料 (SUS 304, C 3604, A 5056) に対しても強磁性体粒子混合磁性砥粒の研磨能率向上効果が見られることがわかっていいる。

6. 結 言

本報で得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) セラミック平面磁気研磨においてダイヤモンド磁性砥粒がセラミック表面を押し付ける磁力 (研磨圧力) と磁気ブラシの剛性は母体である強磁性体粒子の粒径に最も影響されることを明らかにした。
- (2) この結果を利用して、ダイヤモンド磁性砥粒に大径の強磁性体粒子を混合した「混合ダイヤモンド磁性砥粒」を用いる新しい高能率磁気研磨法を創案した。
- (3) 研磨能率は混合鉄粉の粒径と混合割合に大きく影響され、混合割合には適値があることを明らかにした。
- (4) 強磁性体粒子混合ダイヤモンド磁性砥粒の使用は加工能率向上効果のほかに、見掛け上の磁束密度 (磁場強度) 増大効果をもたらすことを明らかにした。

本研究が提案する新しい磁気研磨法は、円筒研磨への適用についても検討され、研磨能率向上効果の存在が確認されている。今後は、混合ダイヤモンド磁性砥粒の寿命について検討していく予定でいる。

なお、本研究の端緒は、金属短繊維混合磁性砥粒を用いた磁気研磨法を着想された鈴木⁴⁾の研究にあることを記し、衷心より謝意を表します。

最後に、本研究は平成 2~3 年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 C) の補助を受けて行われた。厚くお礼申し上げます。ダイヤモンド磁性砥粒についてご配慮頂いた東洋研磨材工業 (株)、およびセラミックスの研削加工にご協力頂いた旭ダイヤモンド工業 (株) にお礼申し上げます。また、卒業研究の一部として実験に協力された尾熊智子氏 (現: 三菱電機) に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 進村武男: 平面磁気研磨法の研究 (第 3 報)——非磁性工作物材料の研磨特性, 精密工学会誌, 55, 7 (1989) 1271.
- 2) T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano and M. Matsunaga: Study on Magnetic Abrasive Finishing, Ann CIRP, 39, 1, (1990) 329.
- 3) 進村武男, 会沢利夫: 平面磁気研磨装置の開発とその研磨性能——コイル固定方式研磨装置, 精密工学会誌, 54 5 (1988) 928.
- 4) 鈴木 清ほか: 短繊維状磁性研磨材を用いた磁気研磨法に関する研究 (第 1 報)——磁性研磨材への金属短繊維混入の効果, 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 307.
- 5) 進村武男, 王 鳳輝, 会沢利夫: 平面磁気研磨法の研究, 日本機械学会第 69 期通常総会講演論文集, Vol. C, (1992) 420.