工作物振動方式磁気研磨法の研究* (平面の磁気研磨特性と溝内面の精密仕上げ)

夏目 勝之*¹, 進村 武男*², 坂口 克己*¹

Study of Magnetic Abrasive Machining by Use of Work Vibration System (Characteristics of Plane Finishing and Application to the Inside Finishing of Groove)

Masayuki NATSUME, Takeo SHINMURA and Katsumi SAKAGUCHI

In this paper, a new type of magnetic abrasive machining is described, which is modified for applying to 2 D free form surface and is realized by work vibration system. Although work vibration is used as substitution for high-speed revolution of magnetic tool in this method, slow revolution of magnetic tool put on the vibration has good effects on the isotropy of surface roughness. Smooth surface can be got by two-step finishing, namely rough polishing as the first step and fine polishing as the second. They are implemented by controlling magnetizing current. Taking this technique, experimentally finishing is made to the surface with shallow groove machined on stainless steel SUS 304 plate. It is possible to finish the inside of groove with a machining tool which has larger diameter than width of groove.

Key Words: Non-traditional Machining, Magnetic Abrasive Machining, 2 D Free Form Surface, Work Vibration System, Surface Finishing, Surface Roughness

1. 緒 言

磁気を利用した表面研磨法の特長は、工作物表面と磁極間に数 mm の間隔が許され、加工域に投入された磁性砥粒により表面の鏡面仕上げが実現できる点にある⁽¹⁾。平面磁気研磨法⁽¹⁾では水平な台上に設置された工作物の上面を精密研磨することを主目的として、高速回転磁極の利用が基本となっている。この磁極高速回転方式の平面磁気研磨法を三次元金型の鏡面仕上げに適用する研究も展開されている⁽²⁾。三次元自由曲面形状の工作物を研磨対象とした場合、五軸マシンングセンタ等を用いて磁極の回転軸を研磨面の法線方向に保持する方法が能率的であるとされている⁽²⁾。しかしながら、自由曲面形状にはさまざまなものがあり、加工可能な工作物形状については検討の余地がある。また、金型研磨を実際に行っている中小企業への導入には高価につき、安価で簡単な装置と方法による新しい手法の展開が望まれている。

そこで著者の一人は平面磁気研磨法⁽¹⁾を基礎から

見直し、振動を利用した新たな磁気研磨法を提案した⁽³⁾。この加工法が対象とする部品の表面形状は、図 1 に示すように一軸方向が直線形状で、それに直交する 2 軸を含む断面が自由曲線形状をもつ曲面(以下「2 D 自由曲面」という)である。このような工作物形状はワイヤ放電加工により簡単に実現でき、例えば成形用金型などとして頻繁に加工されてもいる。また直動ベアリングのボール転動面なども 2 D 自由曲面である。これらの鏡面仕上げに工作物振動方式磁気研磨法が適用されれば、仕上げ工程の自動化が可能になり生産率の向上が期待できる。

本研究は、2 D 自由曲面研磨を目的とした工作物振動方式磁気研磨法について一連の研究開発を展開しよ

Fig. 1 A sample of 2 D free form surface

* 原稿受付 1998 年 3 月 18 日.

*¹ 正員, 名古屋市工業研究所(☎ 456-0058 名古屋市熱田区六番 3-4-41).

*² 正員, 宇都宮大学大学院工学研究科(☎ 321-8585 宇都宮市石井町 2753).

うとしている。本報は、最初に本加工法での加工特性と加工機構を明らかにするために、ステンレス鋼板試験片を用いた実験を行った。さらに、2D自由曲面モデルとして浅い溝を形成した薄板の研磨実験を実施し、細い凹面内部の精密研磨も可能であるなどの特長をもつことを明らかにできた。これらの結果について報告する。

2. 工作物振動方式の加工原理とその特長

磁気研磨法には加工面形状に対して柔軟性をもつという特長がある。すなわち、磁力によって磁極先端に吸着された磁性砥粒が加工面に倣って柔軟に動き、曲面研磨を可能にする。しかるに、磁極高速回転方式の従来法⁽¹⁾⁽²⁾では、工作物に接する磁性砥粒が磁極回転数に比例した上下動を繰り返す。ゆえに、加工能率維持のため磁極回転を高速化して限界値を超過させると砥粒が加工面に追従できなくなる⁽⁴⁾。また、磁極高速回転方式において通常用いられる磁極は先端部断面が小さいため吸着できる磁性砥粒の量に限りがあり、磁性砥粒の切れ味低下によって加工ムラが発生する可能性がある。

工作物が磁性材料である場合磁性砥粒は工作物表面に引き寄せられるので、磁気ブラシ長さは突部を通過した部分から順次回復すると考えられるが、磁極回転数が高ければ先端部が工作物からはく離れたまま再び凸部に至る。その結果、例えば図2(a)のような形状では右側の低い部分が研磨されず、残った部分を研磨するために磁極位置の調整、さらに磁極の回転軸の方向と磁極先端形状の吟味が必要になる。その結果として五軸マシニングセンタ方式の加工機が提案されているが⁽²⁾、磁性砥粒の寿命の問題と併せて、複雑形状の工作物では全面加工が事実上不可能になっている。

一方、工作物を2D自由曲面に限定した場合、直線方向に平行に相対移動させるのであれば磁気ブラシの高さは変化しない。このため、加工中の磁気ブラシの形が崩れることなく、磁性砥粒は常に加工面と接触し、接触面全体で研磨が継続され、磁性砥粒の寿命の問題も影響小となる利点がある。この加工原理を基にして2D曲面の精密研磨を実現する方法が工作物振動方式磁気研磨法である。図2(b)の加工方式は上記の考え方に基いて提案している。本方式では磁気ブラシは加工面の低い部分にも接触し、工作物全面にわたる均等研磨が期待される。なお、本報では実験していないが、図2(c)のように、加工面全面にわたって加工可能な静止磁極を用いることも考えられる。

(a) By pole revolution (b) By work vibration with circular pole

(c) By work vibration with rectangular pole

Fig. 2 Behavior of abrasives on the workpiece surface

本加工方式において加工能率を確保するにはある程度大きな振動振幅を工作物に与えることが必要なため、重量の大きな工作物は不向きである。この場合には上側の磁極を振動させることによって対応できるが、本報では工作物を振動させる方式について検討した。

図2(a), (b)に示す二つの加工方式の特徴を明確にするために、累積加工距離を基にして両者を比較してみる。累積加工距離とは、研磨加工に寄与する一つの砥粒が常にブラシ先端に存在するとしたときの砥粒切れ刃の加工距離の累積値と定義する。磁極高速回転方式磁気研磨法では転動などによる損失を無視した場合、1個の砥粒の累積加工距離 S は式(1)で表される。

$$S = r\omega t \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

r : 磁極の回転中心からの距離

t : 時間

ω : 角速度

磁極回転方式では磁気ブラシに作用するせん断力が一定であるから、平面研磨であれば砥粒の転動などによる損失は小さい。したがって、実際の累積加工距離も S にほぼ等しいとみられる。ところが自由曲面を研磨する場合、前に述べたように砥粒が凹凸を有する加工面に追従できなくなって加工面の一部から分離して

しまう。このとき累積加工距離は減少する。仮に回転中のある位置で一定距離の分離が発生したとすれば、累積加工距離 S' は、

$$S' = (1 - \delta/2\pi r) r \omega t \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

δ : 磁極が一回転する間の加工面からの分離による損失距離

一方、工作物振動方式磁気研磨法では振動運動の折り返し点で磁気ブラシのたわみおよび砥粒の転動が生じる。このときの砥粒の挙動は複雑であり明らかにされていないが、議論を容易にするため累積加工距離 S を近似的に式(3)で表すことにする。

$$S = 2(2a - \epsilon)ft \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

a : 振幅

f : 振動数

ϵ : 折り返し点での損失距離

図2(b)に示す2D曲面を加工対象とした工作物振動方式では折り返し点での損失 ϵ に対して振幅 a を十分大きく取ることができる。工作物が2D自由曲面であれば各砥粒は平面研磨の時と同じ研磨作用をすることが期待でき、式(3)の成立条件に変わりはない。式(2)で表された磁極回転方式の累積加工距離 S' が大きく減少するような細かい凹凸面を有する形状では工作物振動方式による2D加工法の採用が有利になることはいうまでもない。

3. 実験装置および実験方法

図3に実験装置の模式図を、図4に装置全体の外観写真を示す。小形の立てフライス盤テーブル上に設置した電磁石($\phi 2\text{ mm} \times 800$ 巻)により磁力を発生させ、ヨークを介して磁極に導いている。磁極は上部ヨークを鉛直に貫通した状態で立てフライス盤の主軸チャックに把持されている。可変周波数インバータ方式の電源装置を用いてフライス盤主軸電動機を駆動することにより、磁極を任意の速度で回転させることができる。磁極先端は $\phi 10\text{ mm}$ の円形である。

試験片は一軸スライドウェイで支持された鋼製可動台(SS 400 材)に固定され、スピードコントロールモータとクランク機構により水平方向に加振される。本研究では振動数 8 Hz、振幅 5 mm の一定値に設定した。

表1に示すように、磁性砥粒と平均粒径 200 μm の還元鉄粉を重量混合比 1:4 で混合し、鉄粉混合磁性砥粒として使用した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお、磁極回転数と表面粗さの方向性を調べる実験では平均粒径 200 μm の還元

Table 1 Experimental conditions

Work	SUS304 stainless steel plate 1.0mm in thickness (Fig.6, 7, 8) 1.5mm in thickness (Fig.9)
Abrasives	(1) Mixed type magnetic abrasives Iron particles (200 μm in mean diameter) Magnetic abrasives (80 μm in mean diameter) (2) Slurry type abrasives with iron particles Iron particles (200 μm in mean diameter) # experiment shown in Fig.6 only
Lubricant	Chemical solution type grinding fluid
Work vibration	Frequency: 8Hz, amplitude: 5mm
Pole revolution	20 ~ 508rpm
Clearance	2 ~ 5mm
Magnetizing current	0.8 ~ 3A

Fig. 3 Schematic of plane magnetic abrasive finishing by use of work vibration system

Fig. 4 External view of experimental equipment

鉄粉に金属磨き液(商品名:ピカールメタルポリッシュ)を混合して使用した⁽⁷⁾。

図5に本装置加工域での磁束密度の水平方向分布を示す。この磁束密度は板厚 1 mm の非磁性材料の表

Fig. 5 Magnetic flux density on the surface of workpiece in machining area

[Conditions] Workpiece: non-ferromagnetic plate, 1 mm in thickness; working clearance: $c=3$ mm, without magnetic abrasives

面を研磨加工することから試験片台表面から1 mm上に離れた位置での測定値であり、閉磁気回路のギャップは板厚と加工間げき c の和となっている。なお、研磨材・鉄粉は供給していないときの値である。

この磁場分布は最大値が磁極中心にあり、磁極先端外径の半分程度の頂上平坦部をもつ分布形状である。磁極高速回転方式の平面磁気研磨法では磁極外周のエッジ部⁽⁶⁾に磁束が集中する条件のとき、周速度との相乗効果で加工能率が向上する。しかし、工作物振動方式では工作物との相対速度が磁極断面全域において均一なので、必ずしも外周エッジ部に磁束が集中する必要はなく、場合によっては図2(c)に示す矩形磁極の使用がより適当なときもある。

4. 平面磁気研磨特性

4.1 磁極回転運動の研磨効果 平面磁気研磨特性を明らかにするために、ステンレス鋼板(SUS 304, 厚さ1 mm)を工作物として実験した。加工実験前の表面粗さは $0.05 \sim 0.10 \mu\text{m } R_{a75}$ である。ここで R_{a75} は JIS B 0601-1994 に規定される中心線平均粗さのことであり、JIS B 0601-1982 において R_a と表示されていた粗さパラメータと同値である。

図6に磁極回転数と表面粗さの方向性との関係を示す。本実験では鉄粉と金属磨き液を混合した研磨材を使用した。図6中で振動に対して直交する方向にトレースして測定した粗さを $R_{a75}(1)$ 、振動に対し平行な方向に測定した粗さを $R_{a75}(2)$ と表示している。磁極の回転数を高めると振動方向の表面粗さがやや悪化するが、振動に直交する方向の粗さが若干改善され、粗さの縦横比 $R_{a75}(1)/R_{a75}(2)$ は1に近づくことがわかる。

図示していないが同じ条件で磁極を回転させずに研

Fig. 6 Relation between pole revolution and surface roughness ("Perpendicular" and "Parallel" in figure mean measuring direction to the machining vibration)

磨を行った場合、振動方向の粗さ $0.023 \mu\text{m } R_{a75}$ に対し、振動に直交する方向の粗さは $0.715 \mu\text{m } R_{a75}$ となる。この原因は単振動のみを与えた場合、砥粒のかくはんがほとんど行われず、砥粒が同じ線上を繰返しなぞるように削っていくためと考えられる。したがって、工作物振動方式磁気研磨法では振動を主としながらも、振動と交差する運動を補助的に与える必要があると判断できる。

本節の実験では磁極に回転運動を与えると平滑化促進効果があることを示している。しかし、主振動に対し直交する方向の速度成分をもつ補助運動を大きくした場合、3章で述べた磁極高速回転方式と同様の問題点が発生する。すなわち工作物の凹凸形状に磁気ブラシが追従できず一様な加工が不可能になることである。そのため、表面粗さの異方性が許容される範囲で低速な交差運動(本報では磁極回転)により加工することが考えられる。以下の実験は磁気研磨法の特長を生かすために溝内面研磨を前提にして行ったものであり、低い磁極回転数で実験した。

4.2 二、三の研磨特性と二段研磨法の実現 図7に、加工間げきと加工深さおよび加工面粗さの関係を示す。加工間げきが増加するに従って加工深さは逆に減少する。磁性砥粒が工作物表面を押し付ける磁力は磁場強度とその変化率の積に比例することから⁽¹⁾、加工間げきの増大は両者の値を減少させ、その結果として加工圧力が低下し、加工深さが減少したものと見られる。

2D自由曲面を精密研磨する場合、磁極高さが一定ならば位置によって加工間げきが増加するが、このとき工作物が非磁性材料であれば閉磁気回路のギャップは不変である。したがって加工部の磁場条件はほとん

Fig. 7 Changes of surface roughness and machined depth with working clearance ("Perpendicular", "Parallel" in figure: see Fig. 6)

ど変化しない。閉磁気回路ギャップを4 mmとして3種類の板厚(1, 1.5, 2 mm)で加工深さを比較したが、いずれも40ないし41 μm でほぼ一定であった。図7から明らかなように、磁極高さの変化が伴う場合には1 mmの間げき変化に対し7 μm 程度の加工深さの変化が生じる。非磁性材料は多少の凹凸を有する形状であっても磁極高さ一定として加工するのがよいと考えられる。

表面粗さは、振動方向の粗さが加工間げきによらずにほぼ一定であるのに対して、振動に直角方向の粗さは加工間げきが増すほど小さくなっている。磁極回転数が同じ20 rpmの値について図6のデータと比較すると図7に示した結果のほうが粗くなっている。加工間げきが小さく磁界が強くなると加工圧力が必要以上に作用し、同時に高剛性磁気ブラシが形成されてブラシ内での砥粒のかくはんが抑制されたものと考えられる⁽⁶⁾。鉄粉と液状研磨剤を混合して使用したときの研磨面(図6)が良好な理由は、砥粒が鉄粉表面に加工液とともに付着しているだけで拘束力が弱く、強い切込みが生じにくいとみられる。

加工深さを確保するには大径鉄粉混合磁性砥粒のほうが有利であるといわれている⁽⁶⁾。そこで、研磨材を交換せずにより良好な仕上面を得るため、加工の途中で励磁電流を減少させ加工圧力を最適化する二段研磨法について検討した。図8に磁極回転数20 rpmおよび207 rpmのときの励磁電流と表面粗さの関係を示す。磁極回転数20 rpmでは振動方向に対する直角方向粗さが励磁電流2.2 Aと3 Aで突出して大きな値を示している。これは図7の場合と同様に高剛性磁気ブラシの形成によるものと考えられる。同じ回転数で励磁電流1.5 Aでは直角方向粗さが振動方向粗さの値に近くなり、振動方向粗さ、直角方向粗さのいずれ

Fig. 8 Changes of surface roughness with magnetizing current ("Perpendicular", "Parallel" in figure: see Fig. 6)

も磁極回転数207 rpmの値とほぼ同じとなる。磁極回転数207 rpmではいずれの測定値も振動方向粗さと直角方向粗さがほぼ同じ値となっている。励磁電流0.8 Aではどちらの回転数でも1.5 Aの場合に比べ良好な仕上げ面となっていることがわかる。この結果から電磁力の調整により加工の途中で高能率研磨から仕上げ研磨へ切り替える方法は実現可能であると判断できる。

電磁力を弱めた仕上げ研磨では加工除去量が減少し能率が低下するので、十分な加工時間を要することが予想される。しかし、高能率研磨の段階で表面粗さが改善されるので、仕上げ研磨段階で必要とする加工時間は最初から弱い電磁力で加工する場合に比べ短縮されると見られる。この二段研磨法の加工効果は5章で述べる溝内面研磨にも適用される。

5. 溝内面研磨への適用

2D自由曲面の一つのモデルとしてステンレス鋼板表面に幅4 mm、深さ0.2 mmの溝をエンドミル加工した形状を成形し、溝内面研磨実験を行った。研磨加工前の溝内面はエンドミル加工の痕が残る、0.20 μm R_{a75} の粗さである。このような角断面溝の場合、磁極高速回転方式の従来法では溝の側壁部分で磁気ブラシが工作物からはく離するため、全体を均一に研磨加工することが困難であった。本加工法はこの問題を克服したものであり、溝内面に対してもほぼ均等に磁気ブラシの加工圧が作用することが期待される。

そこで加工開始後の5分間は磁極回転数20 rpm、励磁電流3 A、続く5分間は1.5 A、その後の10分間

Fig. 9 External view of groove inside as sample

は磁極回転数を 207 rpm に上げて励磁電流 0.8 A と順次条件を変えて加工を行った。加工前後の溝付近の外観写真を図 9 に示す。加工前写真の溝底面に見られるエンドミル切削マークが加工後の写真では溝幅全体でなくなっている。粗さプロファイルを見ても、加工前のこの歯状の波形が加工後には消えて十分平滑化されていることがわかる。研磨加工後の溝底面の粗さは $0.052 \mu\text{m } R_{a75}$ であり、二段研磨法を適用したとき平面研磨で得られる表面粗さとほぼ同水準である。

磁極に低速の補助回転を与えた場合、磁気ブラシ外周部付近の磁性砥粒は溝の側壁段差を横切る方向に移動する。しかし、溝側面エッジ部の形状の崩れは、ほとんど見られない。これは、おもに加工に寄与する運動が溝に平行な方向の振動であり、磁極回転が低速であれば砥粒のかくはん効果を発揮しながら工作物の形状精度を維持することが可能であることを示している。ただし、エッジ部に切削時のバリが残っている場合、あるいはエッジ部の角を取って丸みを付けたい場合などには、逆に磁極回転数を高速化することによってバリ除去効果を高めることができると考えられる。

一方、図 9 で明らかなように溝底面の両側壁付近は溝中央部と遜色なく平滑化されている。溝断面形状のアスペクト比(溝幅と深さの比)が変化した場合、どの程度まで同様の効果が見られるかについては別報で一部を明らかにしている⁽⁹⁾が、本章の浅い角断面溝において底面コーナ部に対しても十分な研磨効果が得られることを明らかにできた。

本実験で使用した磁極の先端部外径は 10 mm であり、工作物に接触する磁気ブラシの外径は 15 mm 程

度となる。この径より狭い幅 4 mm の溝において、溝の周囲と同時に形状を崩すことなくほぼ均一に内面の研磨ができた。これは工作物形状、特に凹面形状に対し磁極形状を厳密に合せなくとも加工が可能であることを示しており、磁性砥粒研磨法の特徴を十分に発揮できているものと言える。

以上の結果から、工作物振動方式磁気研磨法が小さな凹面を含む 2 D 自由曲面の精密研磨に有効であることを確認できた。

6. 結 言

2 D 自由曲面の精密仕上げを目的とした工作物振動方式磁気研磨法を提案し、非磁性材料の薄板試験片を用いた磁気研磨実験を行い、研磨特性、二段研磨法、溝内面への適用について検討した。そして次の結果を得た。

(1) 振動に起因する研磨面粗さの異方性は磁極回転運動の重畳によって改善されること、またその改善度は磁極の回転数に依存することを明らかにした。

(2) 電磁コイルへの励磁電流制御により加工域の磁界強度を最適化でき、粗加工と仕上げ加工を電流制御により実現する二段研磨法を提案し、良好な研磨面を得ることができた。

(3) 工作物振動方式磁気研磨法により、磁極外径より幅の狭い浅い溝の内面を精密研磨することができ、さらに磁極の回転数を調整することにより溝側面の形状精度を維持しながら、溝側面の平滑化が可能なことを明らかにした。

文 献

- (1) 進村武男・会沢利夫, 精密工学会誌, 54-5(1988), 928-933.
- (2) 安斎正博・須藤亨・真崎浩一・大滝久規・中川威雄, 精密工学会誌, 57-12(1991), 2209-2212.
- (3) 進村武男・吉田健, 日本機械学会・精密工学会山梨講演会講演論文集, (1996-10), 95-96.
- (4) 本橋正喜・大橋裕之・高松洋・植松哲太郎・鈴木清, 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991-3), 483-484.
- (5) 鈴木清・高松洋・大橋裕之・米村朋浩・宮崎英児・植松哲太郎, 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990-9), 307-308.
- (6) 進村武男・王鳳輝・会沢利夫, 精密工学会誌, 59-8(1993), 1251-1256.
- (7) 安斎正博・須藤亨・大滝久規・中川威雄, 砥粒加工学会誌, 37-1(1993), 51-55.
- (8) 山口ひとみ・進村武男, 機論, 61-586, C(1995), 2605-2611.
- (9) 夏目勝之・進村武男・坂口克己, 機講論, No.983-1(1998-2), 321-322.