磁極振動方式磁気研磨装置の開発と その研磨性能*

進 村 武 男**

Development of Magnetic Abrasive Finishing Apparatus using
Vibratory Magnetic Poles and Its Finishing Performance

Takeo SHINMURA

In the magnetic abrasive finishing process utilizing a magnetic field, a new surface finishing apparatus is developed in which the N and S magnetic poles are vibrated and a workpiece is rotated only, in stead of the conventional surface finishing apparatus in which the magnetic poles are steady state and a workpiece is rotated and vibrated simultaneously. This paper describes the newly developed unit system finishing apparatus and its finishing performance examined experimentally. From the experimental results, it is found that the vibration effects of magnetic poles on the finishing characteristics are large in cylindrical and internal finishing respectively.

Key words: magnetic abrasive finishing, magnetic abrasives, magnetic field, vibratory magnetic pole, cylindrical finishing, internal finishing, surface roughness, stock removal

1. 結 言

筆者らは、磁性研磨材（鉄などの強磁性体と WA 砥粒などから構成される特殊な粒状研磨材）を用いた磁場援用の表面研磨法に関して研究開発を進めている¹⁾。従来の円筒外面¹⁾²⁾および円管内面³⁾の磁気研磨法では、図 1 (a), (b) に示すように、磁極を静止させ、工作物を回転・振動させて加工する方式を採用しており、工作物に振動運動を重畳させることによって得られる著しい研磨量増大効果と表面の迅速平滑化効果を積極的に利用していた。しかし、この加工方式では、工作物寸法が大きくなると加振装置も大形化して高価となるばかりでなく、加振すること自体も困難になってくる。

そこで、筆者は、図 2 (a), (b) に示すように、工作物に回転のみを与え、代わりに N・S 磁極を振動させて加工する方式を採用することによって研磨装置を小形化・ユニット化し、この装置を汎用の工作機械に搭載して加工し得るような新しいユニット方式磁気研磨加工装置の開発を目的として研究を開始した。ここでは、磁極振動の研磨装置を試作して円筒外面研磨と円

管内面研磨のそれぞれについて、磁極振動が研磨特性に与える効果を実験的に明らかにした結果について報告する。

2. 工作物振動方式と磁極振動方式の 研磨挙動の違い

図 3 に円筒外面磁気研磨法の模式図を、図 4 に円管内面磁気研磨法の模式図を示す。これらの図を基にして工作物振動方式と磁極振動方式がもつそれぞれの研磨挙動の違いについて考察する。両図には共通点もあるので、図 3 の場合を中心にして検討する。

さて、磁性研磨材には 4 つの磁力が作用する。その 1 つは、加工域外の磁性研磨材を加工域へ集中充てんさせようとする磁力であり、式 (1) で表される。この磁力は磁性研磨材の粒径および磁場強度とその変化率が大きくなればなるほど大きくなる。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= V\chi_r\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ F_y &= V\chi_r\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 V ：磁性研磨材の容積、 χ_r ：磁性研磨材の比磁化率、 μ_0 ：真空の透磁率、 H ：磁界の強さ、 x ：磁力線の方向、 y ：等磁位線方向。

式 (1) の磁力によって加工域に充てんされた磁性研

* 原稿受付 昭和 63 年 3 月 29 日。昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和 63 年 3 月 16 日）にて発表

** 正 会 員 宇都宮大学工学部（宇都宮市石井町 2753）

Fig. 1 Conventional finishing processes using stationary magnetic poles

磨材粒子群は工作物表面に圧力 P を発生し⁴⁾、これが研磨圧力となって加工が進行する（圧力 P の関係式は省略したが文献⁴⁾で詳述している）。

さらに、磁性研磨材粒子相互間には磁気吸引力 F_m が作用し、遊離粒子群が互いに数珠つなぎ状（ブラシ状）に整列して加工に参与する。 F_m は次式で表される。

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

ここに、 r ：磁性研磨材を球形と仮定したときの粒子半径。 F_m は粒子径および磁界の強さが大きくなるほど大きくなる。

また、磁極表面に接する磁性研磨材には磁極の間に磁気吸引力が作用し、特に磁極エッジ部に強く磁気吸引される。この磁力は磁極に切欠きを設けて強い不均一集中磁場分布を形成することにより高められる。

まず、工作物が回転・振動する従来方式（図1(a)）における磁性研磨材の挙動について検討する。この場合、磁気研磨ブラシは切欠きを設けた静止磁極表面に

Fig. 2 Newly developed finishing processes using vibratory magnetic poles

Fig. 3 Schematic diagram of cylindrical finishing

強い不均一集中磁場による磁力を受けて磁気吸引されており、ブラシ根元は静止している。一方、ブラシ先端には研磨抵抗が作用してブラシを変形させる。工作物の振動振幅がこの変形量よりも大きければブラシ先端と工作物表面との間には相対運動が生じ、振動による研磨効果が期待できる。相対運動の程度は上述のブ

Fig. 4 Schematic diagram of internal finishing

ラン変形量のほかに、工作物の振動運動に対する磁性研磨材の慣性力の影響があり、この慣性力が大きいほど磁性研磨材の静止力が大きくなり、相対運動が生じやすい。

次に、磁極が振動する場合（図2(a)）について検討する。この場合、磁性研磨材を磁極の振動運動に追従させて運動させる必要が生ずる。このための磁力には磁極表面への磁気吸引力と式(1)で表される磁力および式(2)で表される粒子相互間の磁気吸引力が関係する。一方、追従させまいとする力には研磨抵抗と上述の磁性研磨材の慣性力とがあり、磁力がこれらの抵抗力よりも大きいことが必要となる。

ところで工作物振動方式と磁極振動方式のそれぞれについて、磁気研磨ブラシと工作物表面との接触状態に大きな差がなく、従って、研磨抵抗にも大差がないとすれば、両方式がもつ研磨挙動の違いは主として磁性研磨材の慣性力の有無に基づくものと考えられる。磁気研磨ブラシと工作物表面との相対運動に対して、工作物振動方式では磁性研磨材の慣性力はプラスに作用し、磁極振動方式ではマイナスに作用する。

以上の考察から、磁性研磨材と工作物表面との相対運動は工作物振動方式の方が大きく、効果的であることはいうまでもない。しかるに、工作物振動方式ではチャックの加振も含めた専用の装置を必要とし、重量工作物に対しては加振装置が大形化して高価となるばかりでなく、加振自体も困難になる。さらに、加工装置を小型化・ユニット化し、汎用の工作機械に搭載して手軽に利用し得る装置とするには磁極振動方式が極めて有利であるといえる。

そこで、磁極振動方式における磁性研磨材の挙動について検討し、磁性研磨材の慣性力と作用磁力の比較、すなわち、磁性研磨材が磁極の振動運動に追従して運

動し得るか否かについて概算してみる。いま、正弦波振動する磁極の運動どおり磁性研磨材を動かすに要する最大の加振力を F とすれば、 $F = 4\pi^2 m a f^2$ と表される。ここに、 m : 磁性研磨材の質量、 a : 振動振幅、 f : 振動数。磁性研磨材を鉄球と仮定すると、最大加振力 F は、後述の実験条件を参考にして、粒径 0.2 mm 、振動数 14 Hz 、振幅 2.5 mm のとき $F = 2.10 \times 10^{-7} \text{ N}$ と計算される。一方、磁力は、式(1)について、それぞれ $r = 0.1 \text{ mm}$ 、 $H = 1/(4\pi) \times 10^7 \text{ A/m}$ 、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 、 $\chi_r = 2000$ とおけば、磁場の分布形にもよるが、例えば、 $(\partial H / \partial x) \approx (\partial H / \partial y) = 2.0 \times 10^5 \text{ H/m}$ のとき、 $F_x \approx F_y = 1.67 \times 10^{-3} \text{ N}$ 、式(2)については、 $F_m = 7.50 \times 10^{-2} \text{ N}$ と計算される。これらの値

は最大加振力 F に比べていずれも極めて大きな値であり、磁性研磨材の比磁化率や磁場の変化率および磁場強度が多少低下しても磁力の方が大きいといえる。従って、磁極振動方式によっても磁性研磨材に振動運動が発生でき、磁極の振動重量による研磨効果が十分に期待できる。

図4に示す円管内面研磨の場合には、磁性研磨材は磁極表面と直接接せず、磁極表面との間の磁気吸引力が作用しない。このために磁性研磨材が磁極の振動運動に追従する程度は図3の円筒外面研磨の場合に比べて小さくなる。しかるに、前述したように、磁力は磁性研磨材の慣性力に比べて極めて大きく概算され、図4の場合にも磁極振動による研磨効果が期待できるものと考えられる。当然ながら、振動重量の効果は工作物振動方式の方が大きいことはいうまでもないが、装置の小型化・ユニット化および重量工作物に対して磁極振動方式の方が有利である。本報では、詳しい磁力計算を行い比較検討するかわりに、実験によって研磨効果を確認することにした。次に、これらの実験結果について述べる。

3. 実験装置および実験方法

図5に、新しく製作した工作物回転・磁極振動方式磁気研磨装置の模式図を示す。図5の加工部は円筒外面研磨の場合を示している。円管内面研磨のときには、先端の磁極を取り換えるだけでよく、図5の模式図は内外面兼用の加工装置である。磁気誘導コイルおよび閉磁気回路を構成する鉄心、ヨーク、磁極をユニット化して、これを旋盤（山崎鉄工所製）の往復台上に搭載した。N・S磁極を一組のリニアスライドベアリングを用いて静止ヨーク端に保持し、小形のニューマチックパイプブレータ（ガデリウス社製、NTK 15 X 型）を

Fig. 5 Schematic diagram of unit system finishing apparatus using vibratory magnetic poles made for trial

(a) External view of experimental apparatus

(b) Shape and size of magnetic poles

Fig. 6 External view of experimental apparatus in the case of cylindrical finishing

Fig. 7 Shape and size of magnetic poles in the case of internal finishing

用いて加振した。実験装置外観と磁極の形状寸法を図6(a), (b)に示す。磁極に不均一集中磁場分布を与える形状のものを選定して用いた。図7に円管内面研磨における磁極の形状寸法を示す。

加工中の磁極の振動波形は、薄い板ばねを旋盤往復台に固定し、他端を磁極端に取り付けて、板ばねにひずみゲージを貼り付けることにより、磁極の変位を動歪測定器を介してシンクロスコープに出力させて観測した。結果を図8に示す。観測波形はほぼ正弦波形を示しており、加工中の磁極はほぼ正弦波振動していることがわかる。それぞれの場合の振動数と振幅を表1に示す。なお、工作物回転数や磁束密度などの加工条件によってこれらの値はほとんど変化しなかった。実験条件を表2に示す。

Fig. 8 Observation of vibratory wave form of magnetic pole

Table 1 Frequency and amplitude of magnetic pole in finishing process

Finishing process	Workpiece	Frequency Hz	Amplitude mm
Cylindrical finishing	Hardened steel (SK 4)	14	2.5
	Brass (C 3604)	12	3.5
Internal finishing	Stainless steel tubing (SUS 304)	11	4

Table 2 Experimental conditions

	Cylindrical finishing	Internal finishing
Workpiece	SK 4 hardened steel (HRC 63) Brass (C 3604) 30 mm in outer dia.	SUS 304, 38.1 mm in outer dia. 1.2 mm in thickness
Circumferential speed of workpiece	60 m/min	73 m/min
Working clearance	1 mm	1 mm
Magnetic flux density	1.5 T (SK 4) 0.8 T (C 3604)	0.8 T
Magnetic abrasives	Al_2O_3 (10 μm under in dia.) + Fe chemical reaction type, 80 μm in dia.	
Machining fluid	Straight oil type grinding fluid 7 wt% supplied	

4. 実験結果および考察

4.1 円筒外面の磁気研磨

図9に、磁性工作物材料(SK 4 焼入れ鋼, HRC 63)を磁気研磨加工し、磁極振動の効果を確認した結果を示す。磁極に振動を与えることによって加工当初の表面粗さ $2 \mu m R_{max}$ を1.5 minの研磨時間で $0.2 \mu m R_{max}$ にまで向上することができた(○印)。一方、磁極に振動を与えないときの表面粗さは研磨時間を長くしても $0.6 \mu m R_{max}$ 以上には向上しなかった(△印)。また、研磨量を示す●印と▲印を比較することに

Fig. 9 Relationships between surface roughness, stock removal and finishing time in the case of hardened steel

よって、研磨能率についても磁極振動の効果が大きく現れることがわかった。このときの加工前後の工作物外観写真を図10(a)に示す。磁極振動の有無に関係なく、加工後の工作物表面は格子じまを鮮明に反射する。しかるに、磁極振動によりもたらされる研磨効果は図10(b)に示す表面粗さプロフィールと加工表面の金属顕微鏡写真とによって再確認できる。すなわち、磁極を振動させないときに見られた工作物表面の深いひききずは図示のように振動の重量によって激減し、表面が迅速に平滑化されることがわかる。工作物表面に観察される極微小な切削痕が互いに交叉していることから、磁力線に沿って形成された磁気研磨ブラシは切欠きを設けた磁極エッジ部に強く磁気吸着され、前節で詳述したように磁極の振動運動にほぼ追従しながら工作物表面を研磨加工しているといえる。また、その結果として研磨量増大効果と表面の迅速平滑化効果が得られたものと想像される。

図示していないが、この磁極振動の効果は黄銅(C 3604)の非磁性工作物材料についても見られ、図9とほぼ同様な実験結果が得られた。

4.2 円管内面の磁気研磨

非磁性材料の薄肉円管(ステンレス鋼サニタリー SUS 304, JIS G 3447, 外径 38.1 mm, 厚さ 1.2 mm)内面を磁気研磨加工した結果を図11に示す。この場合にも磁極振動による効果が大きく現れることがわかる。写真では鮮明に示し得ないので図示していないが、磁極を振動させないときには仕上表面に回転方向に沿う大きなひききずが見られるが、磁極を振動させ

(a) Photograph of workpieces before and after finishing

(b) Surface roughness profiles and photographs of finished surface observed by metallurgical microscope

Fig. 10 Photographs and surface roughness profiles of workpiece

ることによってこれを激減できることがわかった。また、工作物の回転数の増大につれて磁極の振動重疊の効果が減少してくること、磁場強度が小さく、磁性研磨材粒子中の磁性体成分量が少なく、研磨材の作用力が小さい場合には振動重疊の効果が減少することも明らかにできた。

5. 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) 従来の「工作物回転振動：磁極静止」の磁気研磨方式と本報で開発した「工作物回転：磁極振動」の磁気研磨方式の相違を明らかにし、磁極振動方式によっても振動重疊の効果が期待できることを

Fig. 11 Relationships between surface roughness, stock removal and finishing time in the case of stainless steel tubing

示した。

- (2) 磁極振動方式研磨装置を製作して、振動重疊の效果を実験的に調べた。その結果、研磨量増大効果と表面の迅速平滑化効果を得ることができ、振動重疊の効果が大きいことを明らかにできた。
- (3) 磁極振動方式の実現により、研磨装置を小形化、ユニット化して、これを汎用の工作機械に搭載するだけで簡単に磁気研磨加工が行える見通しを得ることができた。また、磁極振動方式の採用により、加振困難な重量工作物の磁気研磨加工の可能性も明らかにすることができた。

最後に、実験試料などについてご協力いただいた呉羽化学工業(株)生産技術部長加治久継氏に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、進村武男，高沢孝哉，波田野栄十：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，53，9（1987）1440。など
- 2) 進村武男，高沢孝哉，波田野栄十，会沢利夫：磁気研磨法の研究（第2報）——円筒外面の研磨特性，精密工学会誌，52，10（1986）1761。
- 3) 進村武男，会沢利夫：磁気研磨法による非磁性円管内面の平滑加工に関する研究，精密工学会誌，54，4（1988）767。
- 4) 進村武男，高沢孝哉，波田野栄十：磁気研磨法の研究（第1報）——加工原理と二，三の研磨特性，精密工学会誌，52，5（1986）851。