磁気研磨法による内面の平滑加工に関する研究*

(第3報, 研磨圧力分布が研磨特性に及ぼす影響)

山口 ひとみ^{*1}, 進 村 武 男^{*2}

New Internal Finishing Process by Application of Magnetic Abrasive Machining (3rd Report, Effects of Finishing Pressure Distribution on Characteristics)

Hitomi YAMAGUCHI and Takeo SHINMURA

The finishing pressure distribution over the finishing area is clarified in the case of magnetic abrasive machining of an internal surface of a tube. This paper shows that the finishing pressure distribution of the magnetic abrasives is affected by the magnetic field distribution over the finishing area, which controls the finishing characteristics. It is found that increases in excitation current and amount of magnetic abrasives supplied increase the finishing pressure by increasing the magnetic field strength. It is also found that both the magnetic field strength and its gradient are minimum at the center of the magnetic pole and maximum around the edge of the magnetic pole, a phenomenon called the "edge effect". Magnetic abrasives converge sequentially around the pole edge, generating high finishing pressure. The results of the finishing experiments indicate that the higher finishing pressure due to the edge effect increases the finishing efficiency.

Key Words: Abrasive Grain, Polishing, Surface Roughness, Magnetic Abrasive Machining, Internal Finishing, Magnetic Abrasives, Magnetic Field, Finishing Pressure, Finishing Characteristics

1. 緒 言

近年, 各所で高度のクリーン化技術が求められており, 高純度ガス・液体輸送用クリーンパイプ内面にもより高精度の表面が要求されようとしている。しかし, クリーンパイプは細長いため, その内面の超精密研磨は極めて困難であり, 従来法とは全く異なる発想による新しい表面仕上げ技術の開発が切望されている。著者らは, この社会的ニーズに対応するため, 磁気を用いた高精度表面創成法の開発研究に着手し, 磁気援用内面研磨法を提案した⁽¹⁾。この研磨法の研磨圧力は加工部の磁場分布に影響され, その結果として研磨特性が左右される。したがって, 研磨特性および加工機構を明らかにするには加工部の磁場分布と研磨圧力の関係を定量的に把握しておくことが必要である。

第2報⁽²⁾では, 磁場分布と磁性砥粒1個に作用する磁力の関係について検討した。しかし, 実際の研磨では加工部に多数個の磁性砥粒が供給されるにもかかわらず, 粒子群が生ずる研磨圧力分布については未検討

のままになっていた。本報は, はじめに, 有限要素法による磁場解析を行って加工部の磁場分布を求め, 次に, 磁性砥粒群が生ずる研磨圧力分布を調べた。そして, 研磨圧力分布と磁場分布との関係を明らかにした。さらに, 研磨実験を行い, 研磨圧力分布が研磨量と表面粗さに及ぼす影響について検討し, 「磁場分布-研磨圧力分布-研磨特性」の一連の関係を明らかにした。

2. 加工部の磁場分布と磁極のエッジ効果

図1に円管内面の磁気研磨装置の模式図を, 図2に装置写真を示す。円管内に供給された磁性砥粒は外部磁極によって磁化され, 研磨圧力を発生する。一方, 円管を高速回転させ, 円管と磁性砥粒の間に生じる相対運動を利用して内面が精密研磨される⁽¹⁾。このとき, 加工部の磁性砥粒1個に作用する各座標軸方向の磁力 F_x , F_y , F_z は次式で表され, 磁性砥粒の容積とその磁化率, および加工部の磁場分布に左右される⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= kV\chi H(\partial H/\partial x) \\ F_y &= kV\chi H(\partial H/\partial y) \\ F_z &= kV\chi H(\partial H/\partial z) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, k : 係数, V : 磁性砥粒の容積, χ : 磁性砥粒の磁化率, $H(\partial H/\partial x)$, $H(\partial H/\partial y)$, $H(\partial H/\partial z)$: x , y , z 方向の磁場強度とその変化率の積(以下, 「磁場分布

* 原稿受付 平成6年10月19日。

*¹ 正員, 宇都宮大学大学院 (〒321 宇都宮市石井町 2753)。*² 正員, 宇都宮大学工学部。

図1 円管内面磁気研磨装置の模式図

図2 実験装置の全景写真

の値」と呼ぶ)。

磁極のエッジ部では強い不均一集中磁場が形成されるため、磁場分布の値が著しく高くなる⁽²⁾。磁性砥粒はこの影響を受けて磁極エッジ部に集中し、研磨作用に関与する。このとき、磁場分布の値が磁極の形状・寸法に左右されることはいうまでもない。しかし、従来、この事象については定性的に評価されていたにすぎず⁽²⁾、定量的検討は現在までなされていない。そこで、はじめに、有限要素法による磁場解析を行って加工部の磁場分布を定量的に求め、磁極エッジ部における磁束集中効果を調べた。

図1に示すように、磁極-コイル系は回転対称形で

図3 加工部の等磁束密度線図(Exciting current: 2A)

あることから、1/2断面を解析モデルとした。なお、材料特性として入力する鉄心と磁極材(SS 400)の磁化特性は別途に測定した実測値⁽²⁾を入力した。解析結果を図3に示す。図3中に併記した円管は、磁極と円管との位置関係を示すためのものであり、円管については回転対称形ではない。

図3は加工部の等磁束密度線図を示している。図3中の数値は磁束密度を表す。磁極の先端付近では磁極エッジ部に等磁束密度線が集中しており、しかも高い磁束密度の値を示している。すなわち、磁極エッジ部では磁束密度が高く、その変化率も大きいことがわかる。この結果から、磁極エッジ部への磁束の集中効果を確認することができた。

式(1)の磁場強度 H は磁束密度を空气の透過率(一定値)で除して得られ、両者は比例関係にある。したがって、図3の等磁束密度線図は等磁場強度線図に置き換えて考えることができる。すなわち、磁場強度とその変化率は磁極エッジ部において大きく、両者の積として与えられる磁場分布の値は磁極エッジ部において著しく高くなる。式(1)からわかるように、磁性砥粒に作用する磁力(研磨圧力)は、磁性砥粒の容積 V と磁化率 χ を固定すれば、磁場分布の値に影響される。したがって、研磨圧力は磁極エッジ部において最大値を示し、研磨作用がエッジ部において主体的に行われると考えられる。これが、いわゆる磁気研磨法における「磁極のエッジ効果」と呼ばれるものであり、従来から定性的に唱えられていた現象である。

一方、磁極から離れた箇所では、磁束密度とその変化率が低下し、磁極エッジ部への磁束集中効果は著しく小さくなっている。そのため、磁場分布の値が減少

図4 磁極先端からの距離に対する磁束密度の変化

図5 磁極位置に対する研磨圧力の変化

し、磁極のエッジ効果も消滅している。

次に、図2の実験装置を用いて磁極近傍の磁束密度分布を測定し、図3の解析結果を確認した。また、磁極先端からの距離 z に対する磁束密度の変化も調べた。ここにおいて、磁束密度はテスラメータ(測定範囲: 0.002~2 T, これを10レンジに分けて測定)を介して測定した。

図4に、磁束密度と磁極先端からの距離 z の関係を示す。図4中のパラメータ x は x 軸方向の磁極中心からの距離を示す。 $x=0$ mmは磁極中心部を、 $x=15$ mmは磁極エッジ部を示す。磁極先端のごく近傍($z=2$ mm以下)では、磁極中心部からエッジ部に移動するにつれて磁束密度は高い値を示し、曲線の傾き(磁束密度の変化率)も増大している。例えば、磁極先端からの距離 z が1 mmのときについて磁極エッジ部の磁場分布の値を計算すると、磁極中心部の約7倍大きい値を示した。このことから、磁極エッジ部への磁束集中効果を実験的に確認することができた。

一方、磁極から離れた領域($z=6$ mm以上)では、磁束密度とその変化率はともに低下し、磁極中心からの距離 x に影響されなくなることがわかる。これらの事象は、図3の解析結果と同じ傾向を示している。

以上により、磁極のエッジ効果は磁極先端近傍において著しく現れることがわかった。磁性砥粒群の研磨圧力は加工部の磁場分布に影響されることから、磁極エッジ部では中心部に比べて高い研磨圧力を発生することが予想される。さらに、実際の研磨作用は磁性砥粒群の研磨圧力分布に深くかかわるため、磁極のエッジ効果に強い影響を受けるはずである。そこで、次に、磁性砥粒群の研磨圧力分布を測定し、本章で求めた磁場分布との関係について調べた。

3. 研磨圧力分布の測定

3.1 研磨圧力分布から見た磁極のエッジ効果

図2の装置を用いて、SUS 304 TP ステンレス鋼円管(外径 42.8 mm, 肉厚 2 mm)内に平均粒径 80 μ m の磁性砥粒 20 g を供給して研磨圧力分布を測定した。実際の研磨状態では、円管と磁性砥粒間に相対運動が生じ、磁性砥粒は接線研磨抵抗を受けて多少の動的挙動を示す。したがって、厳密には、円管を静止した状態と研磨状態では、磁性砥粒の圧力分布に相違が生じるはずである。しかるに、研磨状態における圧力分布の測定は極めて困難であった。そこで、本報では、円管を静止させて圧力分布を測定し、研磨状態における圧力分布を類推することにした。圧力分布は円管内面に埋め込んだ直径 6 mm のひずみゲージ式圧力変換器と動ひずみ測定器(最大測定圧力: 200 kPa, 測定感度: 0.32 mV/Pa)を用いて検出した。

図5に、磁性砥粒群の研磨圧力と磁極中心からの距離 x の関係を示す。図5中の l は円管-磁極間距離(加工間隙)を示す。磁極近傍($l=1\sim3$ mm)の研磨圧力は磁極中心部からエッジ部に向けて増大している。 $l=1$ mmの場合、エッジ部付近($x=12$ mm)の研磨圧力は中心部($x=0$ mm)の約2.4倍に増大しており、磁極のエッジ効果の存在が確認できる。本来、研磨圧力は磁極エッジ部($x=15$ mm)で最大値を示すと考えられるが、図5ではその値が減少している。この理由は、圧力変換器をエッジ部に設置すると、受圧面の一部がエッジ部から外れてしまうためと考えられる。

一方、磁極から離れた領域($l=6\sim9$ mm)における磁場圧力は低く、磁極位置に無関係にほぼ一定値を示している。図4に示したように、この領域では磁場強度とその変化率はともに低い値を示すため、研磨圧力

図6 加工間隙に対する研磨圧力の変化

が低下し、磁極のエッジ効果も薄れたと考えられる。

また、図5に研磨圧力分布が、図3の磁場分布と同じ傾向を示すことから、本実験条件では磁場分布と研磨圧力分布は一対一で対応するとみなすことができる。すなわち、磁場分布を明らかにすれば磁性砥粒群が生ずる研磨圧力分布を推定できることがわかった。このことは、コンピュータによる磁場解析を駆使して各種形状の磁極近傍の磁場分布を求めれば、現実に近い研磨圧力分布が推定できることを意味している。この手法は、実際に磁極を製作して実験を行わなくても磁極の寸法形状を最適化できることを示唆するものである。

3・2 研磨圧力分布に及ぼす励磁電流の影響 磁極の寸法形状および加工間隙を固定して考えると、加工部の磁場分布と研磨圧力分布を左右する因子には、コイルへの励磁電流と磁性砥粒の供給量がある。はじめに、励磁電流が研磨圧力分布に及ぼす影響を調べた。

図6に、磁極中心から $x=0, 6, 12$ mm の各位置における研磨圧力を両対数グラフ上に表示した結果を示す。励磁電流を 1 A から 2 A に増大すると研磨圧力は約 3 倍に増大する。さらに、磁極中心からの距離 x が同じ場合の圧力は励磁電流の変化に伴ってグラフ上をそのままシフトした形で変化することがわかる。すなわち、励磁電流は磁場の分布形を変えずに磁場強度のみに影響して研磨圧力を増減することがわかった。また、図6中の曲線の傾きは、磁極中心からの距離 x によって 3 種類(0, 6, 12 mm)に大別され、磁極エッジ部に近づくにつれて大きくなっている。この事象は、第2報⁽²⁾で述べた磁性砥粒1個の場合に見られた現象と同じである。以上の結果から、研磨圧力分布から見

図7 加工間隙に対する研磨圧力の変化

た磁極のエッジ効果の存在を定量的に確認することができた。

次に、磁性砥粒の供給量が研磨圧力に及ぼす影響について調べた。

3・3 研磨圧力分布に及ぼす磁性砥粒の供給量の影響 磁性砥粒の供給量を 10~30 g に変化させて研磨圧力分布を測定した。図7に、磁極中心部 $x=0$ mm と磁極中心から 12 mm の位置における測定値を両対数グラフ上に表した結果を示す。

磁極中心からの距離が同じであれば、研磨圧力は供給量の増大とともにグラフ上をそのままシフトする形で変化している。これは図6と同様の傾向を示しており、磁性砥粒の供給量が磁場の分布形に大きく影響しないことがわかった。また、図7の曲線の傾きは磁極中心部と $x=12$ mm の 2 種類に大別され、磁極エッジ部に近い $x=12$ mm のほうが磁極中心部よりも研磨圧力が高くなっている。さらに、加工間隙 l に対する変化率も大きい。したがって、この実験においても研磨圧力分布から見た磁極のエッジ効果の存在を確認することができた。

以上により、研磨圧力分布は磁場分布に左右され、両者が一対一で対応すること、したがって、磁場分布から圧力分布が推定できることを明らかにすることができた。次に、図2の装置を用いて研磨実験を行い、研磨圧力分布が研磨特性(研磨量と表面粗さ)に及ぼす影響を調べ、「磁場分布-研磨圧力分布-研磨特性」の3者の関係について検討した。

4. 研磨圧力分布が研磨特性に及ぼす影響

工作物には SUS 304 TP ステンレス鋼円管(外径 42.8 mm, 肉厚 1.5 mm)を用いた。実験条件を表1に

示す。本章では、磁極のエッジ効果、コイルへの励磁電流、および磁性砥粒の供給量が研磨特性に及ぼす影響について検討した。なお、磁性砥粒には研磨能率の向上に有効な鉄粉混合磁性砥粒⁽¹⁾を用いた。

はじめに、磁極のエッジ効果が研磨特性に及ぼす影響について調べた。図8に、加工間隙が1mmと6mmにおける磁極中心部とエッジ部の表面粗さの時間的変化を示す。加工間隙が1mmの場合、加工前の粗面は磁極中心部に比べてエッジ部のほうが迅速に平滑化されている。また、加工時間10分後の表面粗さもエッジ部のほうが小さい。前述したように、本実験における磁極の寸法形状では、磁極エッジ部の研磨圧力

は中心部に比べて高い(図5)。したがって、エッジ部では中心部に比べて迅速に粗面が除去されて平滑化されたものと考えられる。

一方、加工間隙が6mmの場合は、磁極中心部とエッジ部の表面粗さに差はほとんど見られず、1mmの場合の仕上げ面に比べて粗くなっている。図3に示したように、加工間隙が増大すると磁場強度とその変化率が低下するため、磁性砥粒の加工部への集中度が低下する。また、図5に示したように、磁性砥粒群が生ずる研磨圧力も低下し、磁極のエッジ効果も薄れる。このため、加工前の表面に存在していた深い傷が除去されずに残留したままとなり、表面粗さが向上しなかったものと考えられる。これらの事象は実際の研磨結果を基にして磁極のエッジ効果を確認したものであり、高能率研磨を実現するにはこのエッジ効果に着目すべきことを意味している。

次に、コイルへの励磁電流の影響について調べた。

図9には、電流値を1.5~3Aに変えた場合の磁極エッジ部の表面粗さと研磨量の時間的変化を示す。電流値が高いほど加工前の粗面は短時間で平滑化され、表面粗さも向上している。しかし、研磨量については、電流値の変化(研磨圧力の変化)に対して差が見られない。この事象は図2に示した単一磁極型装置を用いた内面研磨特有の現象と考えられ、次のように説明される。

前述したように、本加工法では、円管内の磁性砥粒と高速回転する円管との相対運動を研磨作用の基本としている。これを実現するには、磁性砥粒が外部磁極によって引き付けられて加工部に保持される力(磁力)が研磨抵抗よりも大きいことが必要条件となる。磁性砥粒の作用磁力が研磨抵抗よりも小さくなると、磁性砥粒は円管の回転につれて伴回りしてしまい、研磨不

表 1 実験条件	
Work	SUS304 stainless steel tube 42.8mm in outer diameter 1.5mm in thickness
Work revolution	800rpm
Abrasives	Mixing type magnetic abrasives Iron particles (330 μ m in mean diameter) Magnetic abrasives (80 μ m in mean diameter)
Supplied amount of abrasives	10 ~ 30g Iron particles: 80wt% Magnetic abrasives: 20wt%
Clearance	1 ~ 6mm
Excitating current	1.5 ~ 3A
Magnetic flux density	Abrasives: 20g, Clearance: 1mm Edge: 0.42T (1.5A), 0.52T (2A), 0.68T (3A) Center: 0.38T (2A) Abrasives: 20g, Clearance: 6mm Edge, Center: 0.32T (2A) Abrasives: 10g, Clearance: 1mm Edge: 0.52T (2A) Abrasives: 30g, Clearance: 1mm Edge: 0.61T (2A)
Lubricant	Straight oil type grinding fluid (7wt% supplied)

図 8 表面粗さの時間的変化

図 9 表面粗さと研磨量の時間的変化

能に陥る。これを磁性砥粒の「伴回り現象」と呼ぶ。例えば、本実験条件では、電流値を1 Aにした場合に伴回り現象が観察され、研磨不能になった。

さて、電流値を次第に低下すると、磁性砥粒の作用磁力は小さくなり(図6)、磁力に対する研磨抵抗の割合が大きくなっていく。その結果、磁性砥粒は不安定な加工状態に陥り、磁場分布の値の大きい箇所に向けて自ら動き始め、自生かく拌作用を生ずようになる。このかく拌作用は、砥粒切れ刃の新陳代謝を促進して加工能率を向上させるが、極めて不安定なものであり、常に実現されるものではない。本実験条件では、電流値を3 Aにすると、このかく拌作用は全く観察されず、2 A、1.5 Aと減少するにつれてかく拌作用が活発になることが観察された。この現象は、湿式ラップ加工の仕上げ面が乾式ラップ加工の仕上げ面よりも粗くなる事象⁽⁴⁾に置き換えて考えることができる。電流値が低いときは、低圧加工条件下でありながら、磁性砥粒のかく拌作用に基づく砥粒の転がりやが支配的に加工作用を担い(湿式ラップ加工に対応)、電流値を増大して研磨圧力を高くすると、磁性砥粒のかく拌作用は抑制され、半固定砥粒切削挙動に基づいて表面が創成される(乾式ラップ加工に対応)と考えられる。これら研磨圧力と磁性砥粒のかく拌作用の相殺作用によって、図9の研磨量にほとんど差が生じなかったものと想像される。

また、電流値を増大するにつれて、磁性砥粒の加工部における分布面積(研磨面積)が減少することも観察された。この事象と上述した研磨量が電流値に依存しない事象を併せて考えると、電流値の増大は加工深さを深くすることが想像される。すなわち、電流値が増大するにつれて前加工面が迅速に除去され、表面の平滑化速度に差が生じたものと考えられる。

最後に、磁性砥粒の供給量の影響について調べた。図10に、磁性砥粒の供給量を10~30 gに変えた場合の磁極エッジ部の表面粗さと研磨量の時間的変化を示す。磁性砥粒群の研磨圧力は式(1)に示した作用磁力の積分値として考えることができ、供給量の増大は作用磁力を増大することを意味する。このことは、図7からも確認できる。また、供給量の増大は砥粒切れ刃数をも増大させる。これらの両効果が加味されて、供給量の増大は研磨量を向上させたものと考えられる。

仕上げ面については、供給量が20 gのときに最も良好であり、供給量を30 gと多くすると平滑化されにくくなっていることがわかる。したがって、磁性砥粒を過剰に供給すると研磨圧力が過大に作用し、研磨量は増大しても表面は逆に粗くなると考えられる。一

図10 表面粗さと研磨量の時間的変化

方、供給量が10 gの場合は、十分な研磨圧力と作用切れ刃数が得られないため、研磨量が少なく、前加工の粗面が残留して表面の平滑化が進まなかったものと考えられる。これらの実験結果から、供給量には適値が存在することがわかった。

以上により、磁極エッジ部の研磨圧力増大効果を利用すれば、高能率内面磁気研磨を実現できることがわかった。しかし、加工中の磁性砥粒には研磨抵抗が作用する。この研磨抵抗が磁性砥粒の作用磁力よりも大きい場合は、磁性砥粒は伴回り現象を引き起こし、研磨不能に陥ってしまう。したがって、この伴回り現象は極めて重要な検討項目であり、磁性砥粒の伴回り現象と研磨抵抗の関係を詳細に調べておくことが不可欠となる。これについては、次回に報告する予定である。

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) 加工部における磁場分布と磁性砥粒群が生ずる研磨圧力分布の関係を調べ、磁場分布と研磨圧力分布が一对一に対応することを明らかにした。
- (2) 磁極エッジ部への磁束集中効果が磁場強度とその変化率の両者を増大させて研磨圧力を高め、その結果、研磨能率を向上させる、いわゆる「磁極のエッジ効果」の存在を定量的に明らかにした。
- (3) 本実験条件では、励磁電流と磁性砥粒の供給量増大は、磁場の分布形を変えずに磁場強度のみに影響を与えて研磨圧力を増大することを明らかにした。
- (4) 単一磁極の場合、コイルへの励磁電流(磁場強度)の大小によって磁性砥粒に自生かく拌作用が生じ、不安定な研磨現象領域が存在することを示した。

最後に, 本研究は, 平成6年度文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)により実施されたことを記し, 厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 進村・山口, 機論, **59**-560, C(1993), 293.
 - (2) 山口・進村, 機論, **60**-578, C(1994), 3539.
 - (3) 山口・進村, 第72期全国大会機講論, vol. V(1994), 255.
 - (4) 佐藤, 切削理論, **1**(1964), 157, 誠文堂新光社.
-