円管内面の磁性流体研磨の研究*

山本 豊寿^{*1}, 梅原 徳次^{*1}, 加藤 康司^{*1}
菊間 敏夫^{*2}, 渡辺 和夫^{*2}

Magnetic Fluid Grinding of Pipe Inner Surface

Toyohisa YAMAMOTO, Noritsugu UMEHARA, Koji KATO,
Toshio KIKUMA and Kazuo WATANABE

The need to grind the inner surface of a pipe has increased recently, but it is not satisfied by traditional grinding methods. On the other hand, magnetic fluid grinding with a float has been developed as a new method which has more flexible properties than traditional grinding methods. Magnetic fluid was applied to the grinding of a pipe inner surface. The maximum removal rate was $8.9 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Nm}$. Optimum conditions existed in regard to revolution speed of pipe, shape of float, concentration and mean grain size of abrasive grain. The material of the abrasive grain and float influence the removal rate. Therefore, the pipe inner surface was ground effectively for practical usage by magnetic fluid grinding.

Key Words: Magnetic Fluid, Pipe Inner Surface, Float, Abrasive Grain, Removal Rate

1. 緒 言

スーパークリーンルーム, 化学プラントおよび半導体製造装置などの各種ガスパイプの内面は, じんあいや汚染分子の吸着を防ぐために, 鏡面仕上げをする必要がある。また, パイプラインなどに使われる一般の円管は, ストレッチレデュース法により管径を縮小させ製造するため, 内面が六角形状になりしわが発生する。このしわは, 管径を縮小するにつれて増大し, 流体の流動に対し抵抗となるため, 除去する必要がある。このように, 円管の高性能化, 製造上の理由などから, 円管内面の研磨の必要性が急激に増加している。

このようなニーズに対し, 従来の円管内面の加工法としては, 研削, ホーニングおよび湿式ブラスト加工などがある。しかし従来の加工法では, 円管の長さ, 内径, 研磨量の制御性および円管形状において適用限界があり, 種々のニーズに対応できる新しい研磨法が求められている。

一方, 磁性流体は磁石に感應する流体という特異な性質から多くの関心を集めており, 様々な分野への応

用が試みられている^{(1)~(3)}。特に, 加工の分野において様々な磁性流体の応用が試みられている^{(4)~(8)}。梅原・加藤らは, 加工圧力を高める補助工具として, 浮子を磁性流体に導入し, 実用上有効な研磨率と形状制御性を得ている^{(6)~(8)}。この磁性流体研磨は, 従来の加工法と比較して種々の優れた特長を有する新しい研磨法として期待されている。

以上の背景をもとに, 本研究では, 円管内面の磁性流体研磨法を考案し, その基本特性を明らかにする。特に, 円管試験片の回転速度, 浮子の形状および材質, 砥粒の添加率, 平均粒径および材質が研磨率および浮子の摩耗に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

考案された円管内面の磁性流体研磨装置の概略図を図1に示す。図1には短冊形組合せ磁石④および浮子②③からなる中軸を円管試験片①内に挿入, 砥粒を含む磁性流体⑤を円管試験片内に充満させ, その後旋盤⑥に取付けた状態である。円管試験片および浮子の寸法形状を図2に示す。浮子は浮子a②および浮子b③からなる。浮子aとしては, 厚さを変化させた浮子a₁と浮子a₂および先端形状を変化させた浮子a₃を用いる。浮子bは短冊形組合せ磁石により印加される磁場

* 原稿受付 平成4年1月28日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 正員, 新日本製鐵(株)中央研究本部(〒299-12 富津市新富20-1)。

により磁性流体中で磁気排出力を受け浮子 a を円管内面に押し付ける。この力を加工荷重として用いる。この状態で円管試験片を旋盤により回転し、その結果、磁性流体中に混合された砥粒により円管内面が研磨される。円管試験片の旋盤にチャックされた反対側の端面は、コイルばねとシール材により、磁性流体の飛散を防ぐようにシールされている。

研磨体積は、円管内面の軸方向の断面曲線より求めた。本研究において、単位滑り距離、単位加工荷重あたりの研磨体積を研磨率と定義し研磨能率を表す尺度とする。ただし、同時に 2 個の浮子が作用するため浮子 1 個あたりの研磨率を考える。また、浮子の摩耗特性を表す尺度として浮子の比摩耗量(単位滑り距離、単位加工荷重あたりの摩耗体積)を用いる。

実験条件を表 1 に示す。浮子 a₁ の材質としては、ス

テンレス鋼、アルミナおよびアルミニウム合金の 3 種類を用いる。また浮子 a₂ および浮子 a₃ の材質には、ステンレス鋼を用いる。

3. 実験結果

3.1 磁石-浮子下面間距離と加工荷重の関係 本研究では研磨中の加工荷重を測定することができないため、幾何学的に求められる磁石と浮子 b 下面との距離より加工荷重を推定する。そのため、研磨装置において用いたものと同じ材質、同じ形状および寸法の浮子と磁石を用いて、浮子に作用する磁気浮揚力を加工荷重とみなしてあらかじめ測定した。磁石と浮子 b 下面との距離 h と加工荷重 F との関係を図 3 に示す。実線は理論値、プロット点は実測値を示す。

理論値は、磁性流体中の非磁性体に働く磁気排出力

表 1 実験条件

Magnetic Fluid	W-40 (Water-based)	
	Density	$1.285 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (at 25°C)
	Viscosity	$5.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (at 25°C)
	Saturation Magnetization	348 G
	pH	6.5
Magnet	LM-30BK (Sm Co ₅ , Residual Induction Br = 6000G)	
Pipe Workpiece	Steel (Hv = 177 kgf/mm ²)	
Float	a	Stainless steel (SUS304 ; Hv = 277 kgf/mm ²), Al ₂ O ₃ (Hv = 2000 kgf/mm ²), Al alloy (A5056 ; Hv = 50 kgf/mm ²)
	b	Brass
Abrasive Grain	SiC grain (Hv = 2500 kgf/mm ²), Al ₂ O ₃ grain (Hv = 2000 kgf/mm ²)	
Mean Grain Size	d	12.5 μm (#1000), 38 μm (#400), 75.5 μm (#150), 180 μm (#80)
Concentration	ρ	0, 20, 30 vol%
Revolution Speed	V	200, 777, 1680 rpm
Initial Grinding Load	F _i	5.7 N ($h_0 = 0.5 \text{ mm}$)
Grinding Time	T	10 min

- ① Pipe workpiece ② Float a ③ Float b ④ Magnets
⑤ Magnetic fluid containing abrasive grains ⑥ Chuck
⑦ Tail stock ⑧ Seal ⑨ Coil spring

図 1 実験装置概略図

を求めた Rosensweig の式⁽¹⁾において磁場と磁性流体の磁化の強さを代入することにより求められる。磁場はチャージモデルにより計算される⁽⁹⁾。また磁性流体の磁化の強さは、磁性流体を超常磁性体とみなしランジェバン関数を用いて計算される。

本研究においては、研磨開始時の磁石と浮子 b 下面との距離 h_0 を 0.5 mm と一定とした。このときの、研磨開始時の加工荷重は 5.7 N である。しかしこの加工荷重は、円管試験片の研磨および浮子の摩耗による h の増加とともに減少する。そこで本研究では、研磨開始時と研磨終了時の加工荷重の平均値を加工荷重として表す。

3.2 研磨量に及ぼす研磨時間の影響 研磨前および、10 間研磨した後の円管内面の軸方向表面粗さ曲線を図 4 に示す。図より、浮子の接触している面のみ、ほぼ均一に研磨されていることがわかる。次に、磁性流体を用いた場合と水を用いた場合における研磨量に

及ぼす研磨時間の影響を図 5 に示す。水を用いた場合には、ほとんど研磨されておらず、加工荷重が発生していないことがわかる。これに対し、磁性流体を用いた場合には、研磨時間とともに研磨量が増加することがわかる。すなわち、磁気排出力により加工荷重が発生し、定常的な研磨が行われていることがわかる。また、研磨時間とともに単位時間あたりの研磨量が低下しているが、これは円管試験片の研磨および浮子の摩耗により磁石と浮子 b 下面との距離が増加し、加工荷重が低下したためと考えられる。

3.3 研磨率に及ぼす各種因子の影響

3.3.1 回転速度の影響 それぞれの浮子形状における、研磨率に及ぼす回転速度の影響を図 6 に示す。図より、浮子の形状ごとに研磨率が最大になる最適な回転速度が存在することがわかる。この研磨率が最大になる回転速度は、浮子の形状が厚さ 3 mm, 厚さ 6 mm そして溝付きのものと変化するに伴い低速側へ移動していることがわかる。また、溝付きの浮子

図 2 円管試験片および浮子の寸法形状

図 3 加工荷重の理論値および実験値

図 4 研磨前後の円管内面の軸方向表面粗さ (研磨時間: 10 min)

図 5 研磨深さに及ぼす研磨時間の影響

においては、研磨率の最大値が他の浮子と比較して約1.5倍大きいことがわかる。

3・2・2 砥粒の添加率の影響 研磨率に及ぼす砥粒の添加率の影響を図7に示す。図7より、研磨率が最大になる最適な砥粒の添加率が存在することがわかる。本研究においては、その最適な砥粒の添加率は、20 vol%であった。

3・3・3 砥粒の平均粒径の影響 研磨率に及ぼす砥粒の平均粒径の影響を図8に示す。研磨率が最大に

なる最適な砥粒の平均粒径が存在することがわかる。本研究においては、その最適な砥粒の平均粒径は、38 μm (#400)であった。

3・3・4 砥粒の材質の影響 アルミナ浮子を用いた場合における研磨率と浮子の比摩耗量に及ぼす砥粒

図6 研磨率に及ぼす浮子の形状と回転速度の影響

図7 研磨率に及ぼす砥粒の添加率の影響

図8 研磨率に及ぼす砥粒の平均粒径の影響

図9 研磨率および浮子の比摩耗量に及ぼす砥粒の材質の影響

図10 研磨率および浮子の比摩耗量に及ぼす浮子の材質の影響

図 11 研磨前後の研磨面の SEM 写真
($v=1680$ rpm, SiC grain, $d=38$ μm , $\rho=20$ vol%, Stainless steel-float)

の材質の影響を図 9 に示す。炭化けい素砥粒の場合、研磨率は、アルミナ砥粒の場合の約 1.8 倍であり、浮子の比摩耗量は、約 5.5 倍であることがわかる。

3・3・5 浮子の材質の影響 研磨率および浮子の比摩耗量に及ぼす浮子の材質の影響を図 10 に示す。研磨率は、浮子の材質が、アルミニウム合金、ステンレス鋼、アルミナの順に増加することがわかる。一方浮子の比摩耗量は、浮子の材質が、アルミニウム合金、アルミナ、ステンレス鋼の順に減少することがわかる。浮子の比摩耗量において、アルミナ浮子がステンレス鋼浮子よりも摩耗しているが、これは研磨時に発生する振動により、アルミナ浮子がぜい性破壊による摩耗を起こしているからであると考えられる。

3・4 研磨面の SEM 観察 研磨前後の研磨面の SEM 写真を図 11(a), (b) および (c) にそれぞれ示す。図より研磨前の切削こんが研磨により消滅し、なし地状の研磨面になることがわかる。このようになし地状の研磨面であることから、研磨は浮子と研磨面の間にはさまれた砥粒が研磨面を転動することによって考えられる。

4. 考 察

4・1 従来の摩耗データとの比較 トライボロジーにおいて摩耗の程度を表す尺度として摩耗係数があり、種々の摩耗においてその摩耗係数が求められている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。本研究は研磨の研究であるが表面層の除去という点では摩耗と同じであると考えられる。そこで、本研磨法の研磨体積を摩耗体積とみなして次式より摩耗係数 K を求めて、従来得られている摩耗係数の値と比較する。

$$K = \frac{V \cdot H_v}{L \cdot S} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V ：研磨体積、 H_v ：加工物のビッカース硬さ、 L ：加工荷重、 S ：滑り距離である。

図 12 アブレイシブ摩耗と磁性流体研磨における摩耗係数とビッカース硬さの関係
(MFG: Magnetic Fluid Grinding)

図 12 に、二元アブレイシブ摩耗(固定粒子によるアブレイシブ摩耗)と三元アブレイシブ摩耗(遊離砥粒によるアブレイシブ摩耗)の摩耗係数と試験片のビッカース硬さの関係を示す⁽¹²⁾。図 12 のデータはいずれもステアリン酸を含むパラフィン油中の値である。図 12 より二元アブレイシブ摩耗の摩耗係数が三元アブレイシブ摩耗に比べて約 10 倍大きな摩耗係数であることがわかる。また、図 12 に、本研究で得られた最大摩耗係数および著者らの窒化けい素球の磁性流体研磨⁽⁶⁾、アルミニウム合金の円筒端面の磁性流体研磨⁽⁷⁾、アルミニウム合金と窒化けい素円筒面の磁性流体研磨⁽⁸⁾の研磨データより得た摩耗係数を合せて示す。図 12 より磁性流体研磨の摩耗係数は三元アブレイシブ摩耗の摩耗係数より大

きく、二元アプレシブ摩擦の摩擦係数より小さいことがわかる。この結果からも本研究において行われている研磨は砥粒による完全なひっかけ作用によってではなく、砥粒の転動によると考えられる。

4・2 各種因子の影響 図6, 7および図8より、浮子の形状ごとに研磨率が最大になる最適な回転速度、砥粒の添加率および平均粒径が存在することがわかる。これは、加工荷重、回転速度および砥粒を含む磁性流体の粘度により決定される浮子と円管内面との間の磁性流体の膜厚とそこに入り込む砥粒の粒径との関係によるものと考えられる。すなわち、磁性流体の膜厚が砥粒の平均粒径より小さい場合は、砥粒が研磨面に進入しないため研磨率は小さい。一方、磁性流体の膜厚が砥粒の平均粒径より大きい場合は、荷重の大部分が磁性流体により支えられるため、砥粒に作用する荷重が小さく研磨率は小さいと考えられる。よって、磁性流体の膜厚とそこに入り込む砥粒の粒径との比が1の近傍では、加工荷重はほとんど砥粒により支持され、かつ砥粒が浮子に押し込まれるため水平方向の支持力も強く、研磨率が最も高いと考えられる。

この磁性流体の膜厚は、流体力により決定されると考えられ、加工荷重が小さいほど、接触圧力が小さいほど、回転速度が高くなるほど、また砥粒の添加量が増加し磁性流体の粘度が増加するほど、増加する傾向にあると考えられる。そのため、回転速度、砥粒の添加率および砥粒の粒径に対して研磨率が極大値をもつと考えられる。

5. 結 言

円管内面の磁性流体研磨法を考案し、その基本的研磨特性を明らかにした。得られた結果は以下の通りで

ある。

(1) 円管内面の磁性流体研磨において得られた最大研磨率は、 $8.9 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ であった。

(2) 研磨率に及ぼす各種因子の影響は以下の通りである。

① 研磨率が最大になる最適な回転速度、最適な砥粒の添加率および平均粒径が存在する。

② 研磨率は、炭化けい素砥粒を用いた場合のほうが、アルミナ砥粒を用いた場合よりも約1.8倍大きい。

③ 研磨率は、浮子の材質により変化し、アルミニウム合金浮子、ステンレス鋼浮子、アルミナ浮子の順で増加する。

終わりに、磁性流体を提供していただいたタイホー工業(株)に感謝する。

文 献

- (1) Rosensweig, E. R., *Ferrohydrodynamics*, (1986), 132, Camb Univ Press.
- (2) 神山・佐藤, 機論, 54-506, B(1988), 2768.
- (3) Shimoizaka, J., Nakatsuka, N., Fujita, T. and Kounou, A., *IEEE Trans. Magnetics Mag.*, 13-5(1980), 358.
- (4) 今中・黒部・松島, 磁性流体利用による砥粒加工, 精機学会春期大会学術講演会論文集, (1981-4) 775.
- (5) 高尾・谷・河田, 生産研究, 37-2, (1985), 76.
- (6) 梅原・加藤, 機論, 54-503, C(1988), 1599.
- (7) 加藤・梅原・馬場, 機論, 55-519, C(1989), 2873.
- (8) 梅原・加藤・渡辺, 機論, 55-519, C(1989), 2879.
- (9) 山川・大川・宮本, 永久磁気回路の設計と応用, (1979), 総合電子出版.
- (10) Rabinowicz, E., *Wear control handbook*, ASME, (1980), 475.
- (11) 日本潤滑学会編, 潤滑ハンドブック, (1970), 73, 養賢堂.
- (12) 笹田・尾池・江森, 潤滑, 27-12, (1982), 992.