偏肉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}
阿高松男^{*2}, 渡辺和夫^{*2}Magnetic Fluid Grinding for Innersurface of Pipe
of Which Cross-sectional Shape is Hexagonal CircleToyohisa YAMAMOTO, Noritsugu UMEHARA, Koji KATO,
Matsuo ATAKA and Kazuo WATANABE

In magnetic fluid grinding for innersurface of pipe of which cross-sectional shape was hexagonal circle, a ratio of ground area to whole innersurface area of pipe and distribution of ground depth were studied experimentally and theoretically. Whole innersurface of pipe was ground under revolution speed of 125 rpm. But, over its speed, ground area decreased with the increase of revolution speed. The distribution of ground depth in innersurface of pipe was changed by the change of revolution speed. Such both properties were explained by the change of grinding load which was the sum of magnetic buoyant force F_m of a float, a force F_s due to squeeze effect and a force F_d due to viscous damping effect. Therefore, if optimum grinding load was designed, the whole innersurface of pipe of which cross-sectional shape was hexagonal circle is ground sufficiently.

Key Words: Magnetic fluid grinding, Float, Grinding load, Squeeze effect, Viscous damping effect

1. 緒 言

パイプラインなどに用いら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するため、肉厚が不均一で内面が六角形状になりしわが存在する。このしわは、管径を縮小するにつれて増大し、流体の流動に対して抵抗となるため除去する必要がある。しかし、長さ 10 m 前後で管内径が 50~70 mm の円管内径をドリル、バイト、砥石などの工具で仕上げるのは大量生産工程において非常に困難である。

一方、著者らは、これまでの浮子を用いた磁性流体研磨の研究結果^{(1)~(4)}を基礎に円管内面の磁性流体研磨法を考案し、切削加工された円管内面の仕上げ研磨の可能性およびその基本特性を明らかにした⁽⁵⁾。この円管内面の磁性流体研磨では浮子により加工荷重が柔軟に加えられているため円管内面の形状が真円でなくとも内面全域の研磨が可能と考えられる。

そこで本研究では、このように先に考案した円管内面の磁性流体研磨法⁽⁵⁾を、円周方向に六角形のうねり

を有する偏肉円管の内面研磨へ適用することを試み、その可能性を示す。そのためにまず研磨範囲および研磨深さに及ぼす回転速度の影響を実験的に明らかにする。ついで、円管内面のうねりに浮子が追従する場合に発生する研磨中の加工荷重を計算により求める。さらに、これをもとにし、浮子が研磨面に完全に追従し全面が研磨される回転速度領域と部分的に研磨される回転速度領域の境界を表す臨界周波数が存在することを示し、偏肉円管内面の磁性流体研磨の設計指針を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。図において短冊形組合せ磁石および浮子などからなる中軸は、円管試験片内に挿入され、砥粒を含む磁性流体が円管試験片内に充填している。隣合った磁極が互いに異なる短冊形組合せ磁石が中軸の中央に固定され、その磁極面に平行に浮子 b が位置している。浮子 a は浮子 b の中央部に図のように立っており、浮子 b が磁気浮揚することにより、円管内面に押付けられる。一方、円管試験片は旋盤に取付けられ、回転し、その結果円管内面は、浮子との間に介在する砥粒により研磨される。磁性流体は、W-40 (水ベース、飽和磁化: 400 G) である。砥粒は

* 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, 新日本製鉄(株)中央研究本部 (〒299-12 富津市新富 20-1)。

SiC 砥粒 (#80; 平均粒径 $180\ \mu\text{m}$) である。浮子は厚さ $3\ \text{mm}$ のステンレス鋼 (SUS 304) である。また、円管試験片の寸法と形状を図 2 に示す。円管試験片は、ストレッチデュース法により製造された円管 (S 45 C) であり、内面が円周方向に六角形のうねりを有している (最大直径 $39.5\ \text{mm}$, 最小直径 $38.0\ \text{mm}$)。回転速度としては、125, 200, 777, 1680 rpm (0.25, 0.40, 1.5, 3.3 m/s) が用いられた。

円管内面における研磨された範囲および研磨深さは、60 分研磨後の円管内面の軸方向の断面曲線より求められた。

3. 実験結果

3・1 磁気排出力による加工荷重 F_m 磁性流体中の非磁性体に作用する磁気排出力は、Rosensweig の次式⁽⁶⁾により理論的に求められる。

$$F_m = - \iint_S \left(\mu_0 \frac{M_n^2}{2} + \mu_0 \int_0^H M dH \right) n dS \cdots \cdots (1)$$

ここで、 S : 物体の表面積、 μ_0 : 真空の透磁率、 M : 磁性流体の磁化の強さ、 M_n : M の物体表面に垂直方向の成分、 H : 磁場の強さ、 n : 物体表面に垂直方向外向きの単位ベクトル

図 3 に、磁気排出力による加工荷重 F_m と浮子 b の下面と磁石面の距離 h の関係を示す。プロット点は実測値、実線は Rosensweig の式により求められた理論値であるが、よく一致していることがわかる。本研究の装置では浮子 a が円管の最小径に接触するとき

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

図 2 円管試験片の寸法と形状

の h を $0.5\ \text{mm}$ になるようにしたため、図 3 より研磨開始時の F_m は円管が 1 回転する際に 3.0 と $5.7\ \text{N}$ の間を変化することがわかる。

3・2 研磨割合に及ぼす回転速度の影響 回転速度と研磨割合の関係を図 4 に示す。研磨割合は、円管内面の面積 A に対する研磨された部分の面積 A_g の割合 A_g/A によって示される。 $A_g/A=1$ においては、円管内面の全面が研磨され、逆に $A_g/A=0$ においては、円管内面は全く研磨されないことを示す。

図より、回転速度が $125\ \text{rpm}$ の場合には円管内面全域が研磨されているが、回転速度が $200\ \text{rpm}$ になると円管内面において研磨されない部分が発生し、それ以上の回転速度では、研磨速度が増加するに従い、研磨される割合が減少していくことがわかる。

3・3 研磨深さに及ぼす回転速度の影響 回転速度と研磨深さの関係を図 5 に示す。円管内面の各位置における単位加工荷重、単位滑り距離あたりの半径方

図 3 磁気排出力による加工荷重 F_m と浮子 b の下面と磁石の距離 h の関係

図 4 研磨割合に及ぼす回転速度の影響

向の研磨深さを Rd と定義する。なお、円管内面の六角形の一边の長さを L とし、一边上の位置を x/L で表す。また実験結果とあわせて、磁気排出力による加工荷重 Fm による各位置における研磨深さを、研磨率（単位加工荷重、単位滑り距離当たりの研磨体積）より算出し、図中に破線で示す。研磨率は、以前著者らが円管内面の磁性流体研磨において得た値 $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ を用いる⁽⁵⁾。

回転速度が 125 rpm の場合には、円管内全面が研磨されており、 $x/L = -0.25$ 近傍で研磨深さが最大となる。この最大研磨深さの位置は、磁気排出力による加工荷重 Fm より算出した最大研磨深さの位置と異なることがわかる。また回転速度が 200 rpm の場合には、円管内面の一部が研磨されなくなり、 $x/L = 0$ 近傍の研磨深さが最大となる。さらに、回転速度が 777 rpm、1680 rpm と増加するにつれて、研磨範囲が減少するとともに、 $x/L = 0$ 近傍の研磨深さが減少することがわかる。

以上のように、回転速度により、浮子の円管内面への追従性および各位置における研磨深さが大きく変化した。これは、研磨面がうねりを有し、浮子とその研磨面に沿って振動するような動的状態においては、その加工荷重は、磁気排出力による加工荷重 Fm とは異なるためであると考えられる。すなわち、動的な状態では、磁気排出力のみでなく、浮子を支持しているシステムのダンピング効果により発生する力が加工荷重に関与すると考えられる。

4. 考 察

4.1 加工荷重 F 研磨範囲と研磨深さの分布を

図 5 円管内面における研磨深さ分布に及ぼす回転速度の影響

考察するに当たり、磁気排出力による加工荷重 Fm だけで説明することは困難である。そこで、加工荷重として、磁気排出力による加工荷重 Fm 以外に、スクイズフィルム効果による加工荷重 Fs および粘性ダンパの効果による加工荷重 Fd について考える。

すなわち、加工荷重 F を、

$$F = Fm + Fs + Fd \quad \cdots \cdots (2)$$

で表すことにする。以下各加工荷重要素について考察する。

4.1.1 磁気排出力による加工荷重 Fm 図 3 より各 h における磁気排出力による加工荷重 Fm は求めることができるのであるが、図 6 に示すように、実測値において、磁石と浮子 b 下面との距離 h と $\log Fm$ とは、よい線形関係にある。そこで本研究では、 Fm を次の実験式より求める。

$$Fm = 14.5e^{-1.25h} \quad \cdots \cdots (3)$$

4.1.2 スクイズフィルム効果による加工荷重 Fs 薄い流体膜を挟んで相対している 2 平面が、急激に接近しようときに流体内に圧力が発生する、いわゆるスクイズフィルム効果が生ずる。本研究においても浮子下の薄い磁性流体膜を挟んで、浮子が上下方向に振動するため、このスクイズフィルム効果により荷重が発生すると考えられる。

本研究に用いた浮子は矩形平板であるが、ここでは、厚さおよび底面積が同じである円板と考え、その円板が振動したときに生じるスクイズフィルム効果について検討する。現象が軸対称なので円柱座標を用い、 $ra \gg h$ の関係 (ra : 浮子の半径, h : 磁石と浮子の距

図 6 磁気排出力による加工荷重 Fm と浮子 b の下面と磁石の距離 h の関係

離) を考えると、スクイーズフィルム効果による浮子下面の圧力分布は堀・黒田により求められた以下の圧力分布の近似式より求まる⁽⁷⁾。

$$p = \left(\frac{3\eta\dot{h}}{h^3} + \frac{3\rho\dot{h}}{10h} - \frac{15\rho\dot{h}^2}{28h^2} \right) (r^2 - r_a^2) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 p : 浮子下面の圧力、 h : 磁石と浮子の距離、 r : 半径方向座標、 r_a : 浮子の半径、 η : 磁場中における磁性流体の粘度、 ρ : 磁性流体の密度、その結果、 F_s は次の式により表される⁽⁷⁾。

$$F_s = 2\pi \int_0^{r_a} p r dr \dots\dots\dots (5)$$

4・1・3 粘性ダンパによる加工荷重 F_d 研磨中の浮子の上下動に伴い、浮子と壁面のすきま内を磁性流体は移動すると考えられる。そこで、ここでは、ピストンがあるすきまをもってシリンダ内を動くとした場合に発生する粘性ダンパの効果について考える。ピストンとして浮子と同じ厚さ、同じ上下面積をもつ円板を考える。この場合、粘性ダンパの効果により発生する加工荷重 F_d は、次式により表される⁽⁸⁾。

$$F_d = \frac{6\eta l A^2}{\pi r_a \epsilon^3} \dot{h} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 η : 磁場中における磁性流体の粘度、 l : 浮子の厚さ、 A : 浮子の断面積、 r_a : 浮子の半径、 ϵ : 浮子と壁面とのすきま

4・2 浮子が正弦波振動する場合の加工荷重のシミュレーション 次に、4・1節で得た加工荷重の式に、本実験で用いた各数値を入れて研磨中における加工荷重のシミュレーションを行う。本研究に用いた円管試験片の内面は六角形状であるため円管が1回転するごとに浮子は6回振動する。ここでは、円管試験片の内面のうねりの形状を正弦波で近似し、浮子とその研磨面に追従して強制振動する場合における加工荷重を求める。

浮子の上下運動を次式により表す。

$$h = h_0 + a(\cos 2\pi f t - 1) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 h : 磁石と浮子の距離、 h_0 : 初期の磁石と浮子の距離、 $2a$: 強制振動の振幅 (浮子の振幅)、 f : 強制振動の周波数 (円管内面のうねりの周波数、 $6v/60$)、 v : 回転速度

各計算に用いた数値を表1に示す。表1において磁性流体の粘度は磁場中の粘度と考え磁場なしの場合の20倍とした⁽⁹⁾。

4・2・1 加工荷重の各構成要素 図7に $f=12.5$ Hzにおける各位置の加工荷重の各構成要素を示す。加工荷重 F は、磁気排出力による加工荷重 F_m と大きく異なることがわかる。また加工荷重の各構成要素に注目すると、粘性ダンパによる加工荷重 F_d の影響

は小さいが、スクイーズフィルム効果による加工荷重 F_s の影響は非常に大きく、加工荷重 F を設計する上で、非常に重要であることがわかる。

4・2・2 臨界周波数 図8に円管の回転速度の変化により周波数が変化する場合の各位置における加工荷重 F を示す。周波数が小さい場合 (5 Hz) には、スクイーズフィルム効果による加工荷重 F_s の影響が小さく、加工荷重は磁気排出力による加工荷重 F_m に近いことがわかる。また、周波数が増加するに従い、スクイーズフィルム効果による加工荷重 F_s の影響が増大していくことがわかる。

周波数が増加し、周波数が25 Hzになると加工荷重が零になる位置がでてくることがわかる。この周波数よりも周波数が大きい場合には、浮子は研磨面から離れるので、もはや正弦波振動ではなくなり、本研究におけるモデルは適用できなくなる。このときの周波数を、ここでは臨界周波数と呼ぶことにする。本モデルにより得られた臨界周波数は、25 Hz (250 rpm) であり、実験において得られた値20 Hz (200 rpm) と近い値である。したがって、浮子が研磨面に完全に追従する臨界周波数が存在し、本モデルにより、その臨界周波数を推定することができると考えられる。

4・2・3 研磨深さの推定 周波数が12.5 Hz (125 rpm) の場合の各位置における加工荷重 F をもとに、

表1 シミュレーションに用いる各数値

Radius of float b	r_a	15.88×10^{-3} m
Thickness of float b	l	2×10^{-3} m
Sectional area of float b	A	792×10^{-6} m ²
Clearance length between float b and wall ϵ		1×10^{-3} m
Viscosity of magnetic fluid	η	1.0×10^{-1} Pas
Density of magnetic fluid	ρ	1.258×10^3 Kg/m ³
Initial thickness of magnetic fluid film	h_0	1.25×10^{-3} m
Amplitude	$2a$	0.75×10^{-3} m

図7 加工荷重各構成要素の円管内面の浮子の位置に伴う変化

研磨率が加工荷重に比例すると仮定して算出した円管内面の各位置における研磨深さを図9に実線で示す。研磨率としては、以前著者らが円管内面の磁性流体研磨において得た値 $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ を用いる⁽⁵⁾。また、プロット点は実測値である。

本モデルにより得られた円管内面の各位置における研磨深さと実測値が定性的にも定量的にもよい一致を示していることがわかる。したがって、うねりを有する研磨面において浮子が完全に追従する周波数（回転速度）の場合、各位置における加工荷重および研磨深さを、本モデルにより推定することができると考えられる。

4.3 偏肉円管内面の磁性流体研磨の設計 うねりを有する円管内面を研磨する場合、その目的として次の2点が考えられる。第1は、内面形状を真円に改善すること、第2は、形状を改善する必要はなく表面粗さだけを改善することである。

図8 加工荷重の位置による変化に及ぼす周波数の影響

図9 研磨深さの分布の実験値と計算値

磁性流体研磨においては、回転速度を臨界周波数以上すれば、肉厚の厚い部分から研磨されていくので、内面形状を真円に改善することが可能であると考えられる。また、回転速度を臨界周波数以下にすれば、浮子が研磨面全面に追従するので、表面粗さだけを改善することが可能であると考えられる。

また、この臨界周波数は、浮子を支持するシステムの動特性により決定すると考えられる。

そこで、浮子を支持するシステムの動特性の決定因子である、磁場中における磁性流体の粘度および $2a/h_0$ （円管内面のうねりの振幅と、初期の磁石と浮子の間の距離の比）が臨界周波数に及ぼす影響を計算に

図10 臨界周波数に及ぼす磁性流体の粘度の影響

図11 臨界周波数に及ぼす浮子の振幅 $2a$ と初期の磁石と浮子の距離 h_0 の影響

より求めた結果をそれぞれ図 10 および図 11 に示す。図 10 より、磁場中の磁性流体の粘度が増加するに従い、臨界周波数が減少することがわかる。また図 11 より、 $2a/h_0$ が同じ場合においても、初期の磁石と浮子の距離により臨界周波数が変化することがわかる。

以上より、磁場により磁性流体を制御し、また円管内面のうねりの振幅を考慮して磁石と浮子の距離を設計することにより、臨界周波数を制御することが可能であり、ニーズに応じて、内面形状を真円に改善すること、または表面粗さを改善することが可能であると考えられる。

5. 結 言

円周方向に六角形のうねりを有する偏肉円管内面の磁性流体研磨を行い、研磨割合および研磨深さに及ぼす回転速度の影響を実験的に明らかにした。また、研磨中の加工荷重について検討を行い、研磨割合および研磨深さの結果が加工荷重によって説明可能であることを示した。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 回転速度が 125 rpm 以下においては、全面が研磨される。しかし、それ以上の回転速度においては、研磨割合が回転速度とともに減少する。

(2) 加工荷重 F には、浮子の磁気排出力による

加工荷重 F_m だけでなく、スクイーズフィルム効果による加工荷重 F_s および粘性ダンピング効果による加工荷重 F_d を考慮することが重要である。

(3) 加工荷重を考慮することで、浮子が研磨面に完全に追従する周波数（臨界周波数）を求めることが可能である。

(4) 臨界周波数以下の、浮子が研磨面に完全に追従する周波数において、加工荷重により、研磨深さの分布を推定することができる。

終りに、磁性流体を提供していただいたタイホー工業(株)に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 梅原・加藤, 機論, 54-503, C(1988), 1599.
- (2) 加藤・梅原・馬場, 機論, 55-519, C(1989), 2873.
- (3) 梅原・加藤・渡辺, 文献(2)の 2879 ページ.
- (4) Umehara, N. and Kato, K., *J. MMM*, (1990), 1, 37.
- (5) 山本・梅原・加藤・菊間・渡辺, 機論投稿中.
- (6) Rosensweig, R. E., *Ferrohydrodynamics*, (1986), 156, Camb., Univ. Press.
- (7) 黒田・堀, 潤滑, 21-11(1976), 740.
- (8) 日本機械学会編, B1 機械要素設計・トライボロジ, 機械工学便覧, (1986), 151.
- (9) Rosensweig, R. E., Kaiser, R. and Miskolczy, G., *J. Coll. Interface Sci.*, 29(1969) 690.