弱磁場下の MR 流体の物性と減衰特性*

小山 忠正^{*1}, 藤田 豊久^{*2}, 西山 秀哉^{*1}Physical Properties and Damping Characteristics of MR Fluids
in Low Magnetic FieldsTadamasa OYAMA^{*4}, Toyohisa FUJITA and Hideya NISHIYAMA^{*4} Tohoku University, Institute of Fluid Science, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577 Japan

Magnetic fluid and MR fluids are representative functional fluids because their properties and characteristics can be controlled easily by applying a magnetic field. Especially, MR fluids has controllable high viscosity, high sensitivity, controllable large yield stress and strong magnetic force in the applied magnetic field due to the robust cluster formation compared with those of magnetic fluid. In the present study, two kinds of nano-MR fluids dispersed iron particle with different diameters are prepared. Visualization of cluster formation of particles and measurements of physical properties are conducted in the low applied magnetic fields. Finally, damping characteristics of an oscillating flat plate immersed in MR fluids under the low applied magnetic fields are compared with those of magnetic fluid.

Key Words: Functional Fluids, MR Fluids, Magnetic Fluid, Cluster, Viscosity, Viscous Damping Coefficient, Drag Force, Low Magnetic Field

1. 緒 言

MR 流体は、磁場に応答する機能性流体であり⁽¹⁾⁽²⁾, 磁性流体に比べて、制御可能な降伏せん断応力や大きな磁気力を有し、弱い磁場でも強く応答する。このため、近年、ダンパ、ショックアブソーバ、ブレーキ、クラッチや施工時における位置決め装置等へ応用開発するための研究が活発に行われている^{(3)~(5)}。MR 流体は、分散粒子径が大きいと一般に沈殿しやすいが、磁性流体に比べ磁気機能が優れており、近い将来、磁場負荷の小さな応用も期待できる。

一方、著者らは、これまでに磁性流体に関する研究として、磁性流体の管内振動流に関する研究⁽⁶⁾, 磁性流体ダンパの開発を目的としたダンパモデルの振動特性に関する基礎的研究⁽⁷⁾, 磁化の強さが大きな窒化鉄磁性流体中の振動平板に関する実験的研究⁽⁸⁾を行った。また、高機能磁性流体⁽⁹⁾や電場・磁場両方に応答する 3 種類の電磁粘性流体を創製し、それらの粘度特

性、減衰特性について比較・検討を行った⁽¹⁰⁾。以上により、電磁場環境負荷の小さな磁気機能性流体の開発とその検証が待たれている。

そこで、本研究は、MR 流体を用いて、弱磁場下で MR 流体の有するいくつかの特性のうち、特に MR 流体中の平板に働く粘性減衰係数、抵抗力、およびこれらの磁場への応答特性に関する実験的研究を行ったものである。直径の異なる 2 種類の鉄微粒子を分散させた MR 流体を新たに作成し、弱磁場下での鉄微粒子のクラスタ形成の可視化を行い、粘度特性や磁化特性を明らかにした。ついで、これらの MR 流体を用いて、弱磁場下での MR 流体中の平板の振動特性により、その減衰特性について明らかにした。最後に、水ベース磁性流体についても同様の実験を行い、MR 流体と磁性流体との減衰特性の比較を行い、特に弱磁場下での MR 流体の高機能化も明らかにした。

2. 実験装置および方法

作成した MR 流体は、平均粒子直径が、それぞれ 10, 1000 nm の鉄微粒子をアルキル・ナフタレン中に分散させた流体 (MR 10, MR 1000 と記す) の 2 種類である。また、比較のため、平均微粒子直径が 10 nm のマグネタイトを水に分散させた磁性流体 (W-40, MF-

* 原稿受付 1999 年 9 月 2 日。

^{*1} 正員, 東北大学流体科学研究所 (☎ 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)。^{*2} 正員, 秋田大学工学資源学部 (☎ 010-8502 秋田市手形学園町 1-1)。

E-mail: oyama@ifs.tohoku.ac.jp

10と記す)を使用した。表1にそれぞれの流体の構成要素と物性値を示す。

薄いシリコン板と薄いガラス板間のMR流体の薄膜に垂直磁場を印加し、顕微鏡により微粒子のクラスタ形成の可視化を行った。流動特性はソレノイドコイル内に設置されたコンプレート形レオメータにより計測した。なお、磁場方向は試料に垂直方向で、弱磁場下では磁場の強さはほぼ一様である。また、磁化特性は磁気てんびんにより求めた。

図1にMR流体の減衰特性を検証するためのMR流体ダンパ装置の概略を示す。長方形容器②(50 mm×110 mm×9 mm)内のMR流体③中に挿入したチタン製の平板④(30 mm×30 mm×3 mm)はシャフト⑤、ばね⑥、加振器⑦に接続されている。MR流体に電磁石⑫により図1中の矢印の方向に平板に垂直に磁場を印加する。平板、加振器の変位 z_g 、 z および位相差 ϕ は、これらに接続した指標⑨の変位から求め、非接触

形光学変位計(オプトフォロー)で測定し、FFTアナライザにより解析する。なお、平板の重さは $m=56.84$ g、ばね定数 $k=1500$ N/mである。実験中の液温は 25°C に保持し、 50 Hzまで加振した。

3. 実験解析

粘性減衰係数 C および抵抗力 D を以下の方法により実験から求めた。印加磁場が小さい場合には、降伏せん断応力は極めて小さいので、本実験の範囲では、簡単化のためMR流体をニュートン流体で近似する。この場合の平板の運動の式を式(1)で示す⁽⁸⁾。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + k(z - z_g) = D \quad (1)$$

記号は、それぞれ

D : 流体抵抗力

k : ばね定数

m : 平板の質量

t : 時間

z : 平板の変位

z_g : 加振器の変位

を示す。なお、平板に作用する磁気力は磁場こう配が小さいうに、上下対称振動のため、時間平均項を省略する。

抵抗力 D と変位 z の関係は式(2)で表すことができる。

$$D = -C \frac{dz}{dt} - m_A \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2)$$

ここで、 C および m_A はそれぞれ粘性減衰係数、付加質量である。

加振器の変位は

$$z_g = \Delta z_g \sin(\omega t) \quad (3)$$

平板の変位は位相差 ϕ を用いて

$$z = \Delta z \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

と表示し、式(2)～(4)を式(1)に代入して整理すると

$$C = \frac{k}{\omega} \cdot \frac{1}{a} \sin \phi \quad (5)$$

$$m_A = \frac{k}{\omega^2} \left(1 - \frac{1}{a} \cos \phi \right) - m \quad (6)$$

変位の振幅比 $a = \Delta z / \Delta z_g$ および位相差 ϕ を実験から求め、式(5)、(6)に代入することにより C および m_A が得られる。さらに

$$\frac{\sqrt{D^2}}{V_0} = \sqrt{\frac{1}{2} C^2 + \frac{1}{2} m_A^2 \omega^2} \quad (7)$$

により、流体抵抗力 D の二乗平均が得られる。

ここで、

$$V_0 = \omega \Delta z.$$

Table 1 Composition and physical properties of fluids

fluid	particle	diameter (nm)	carrier	viscosity 25°C, B=0G (Pa·s)	density (kg/m ³)	mass fraction (%)	surfactant
MR10	iron	10	oil	0.525	1.47×10^3	43	(poly-oxi-ethylene-alkyl-ether)
MR1000	iron	1000	(alkyl-naphthalene)	0.5773	2.564×10^3	73	
MF10 (W: 40)	magnetic	10	water	0.026	1.39×10^3	40	oleate ion + SDBS

MR: Magneto rheological fluid
MF: Magnetic fluid
SDBS: Sodium dodecylbenzen sulfonate

- ① Table ② Vessel ③ MRFluids
④ Flat Plate ⑤ Shaft ⑥ Spring
⑦ Vibrating Exciter ⑧ Guide ⑨ Index
⑩ Constant Temperature Vessel
⑪ Thermo-Couple ⑫ Electromagn

Fig. 1 Experimental set up

4. 実験結果および考察

図2は、MR 1000の薄膜に垂直に磁場を印加した場合に形成される微粒子のクラスターの平面断面を、顕微鏡により可視化した写真である。上図は、無磁場の場合であり、下図は、薄膜に垂直方向に150 Gの磁場を印加した場合である。磁場を印加すると磁気双極子の反発力とクラスターの表面張力の釣り合う状態になるまで、クラスターの間隔が減少し、クラスター断面積はわずかに増加する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この強固なクラスターが形成されることにより、弱磁場下でのMR流体の見掛け粘度増加、さらにはクラスター構造の摩擦効果の相乗効果が著しくなると考えられる。

図3は、流体の流動曲線を示す。なお、磁場の強さはコーン・プレート形レオメータのコイル中心での値で、記号は τ ：せん断応力、 $\dot{\gamma}$ ：ずり速度を示す。印加磁場が120 G以下では、降伏せん断応力は極めて小さいので、本実験の弱磁場下では、MR流体をニュートン流体で近似する。また、MR流体は、磁性流体(MF 10)に比べて弱磁場下でもせん断応力が大きく、特に、粒径の大きいMR 1000では著しい。これは、図2に示したクラスター形成が強く関与していると考えられる。なお、図3中に、Launら⁽⁴⁾の実験結果も合せ

て示す。

図4に流体の磁化曲線を示す。記号は H ：印加磁場の強さ、 M ：流体の磁化の強さである。MR 1000の磁化は他の2種類の流体と比較した場合に、粒子濃度が高いことにより、大きな値を示す。なお、Carlsonらの実験結果⁽¹³⁾も、曲線で示す。

図5に、振動数 f を変化させた場合の、平板の変位の振幅と加振器の変位の振幅の比の値 a を示す。なお、図5中の磁場の強さは図1の平板の中心での値を示す。共振振動数25 Hzのところでは、MF 10については、磁場の影響がほとんどみられない。一方、MR 10、MR 1000の場合には、溶媒粘度と、磁場印加

Fig. 3 Flow curve

Fig. 4 Magnetization curve

Fig. 2 Top view of cluster structure of MR 1000 ($\times 100$)

Fig. 5 Amplitude ratio of the flat plate displacement to the exciter displacement

による見掛け粘度増加, クラスタ構造の摩擦効果の相乗効果により比の値は著しく減少する。また, 磁場強度の増加により, 共振振動数が減少する。

図6に, 振動数を変化させた場合の平板と加振器の位相差 ϕ を示す。MF 10の場合には, 磁場の影響はわずかであるが, MR流体の場合には, 磁場印加により, MF 10に比べて変化する。すなわち, 共振振動数25 Hzより小さい振動数の範囲では, 磁場の印加により, 位相差は大きくなり, 磁場の強さが増加するにつれて大きくなる。共振振動数より大きい振動数の範囲では, 磁場の強さが増加するにつれて位相差は小さくなる。これは, 磁場印加によりクラスタ構造⁽¹⁴⁾の変化とクラスタの応答性が関係しているためと推測される。

図7に, 磁性流体(MF 10)の粘性減衰係数 C_{MF} に対するMR流体(MR 10, MR 1000)の粘性減衰係数 C_{MR} の比を示す。なお, 粘性減衰係数を求める場合には, 平板に接続されている支持棒(図1⑤)とガイド(図1⑧)間のクーロン摩擦力の補正を行っている⁽⁸⁾。磁場を印加した場合に, 共振振動数より小さい振動数の範囲では, 比の値は, MR 10の場合には, 8~14,

MR 1000の場合には, 16~22である。特に, 振動数が小さいところでは, 比の値が大きい。これは, この範囲では, 形成されたクラスタが破損されにくく, 粘度効果や振動平板へのクラスタ構造の摩擦効果が維持されるためと考えられる。

図8に, 粘性減衰係数の磁場感度, すなわち, 粘性減衰係数の印加磁場に対する相対増加率を示す。添字 $B=0$ は無磁場の場合を示す。共振振動数より小さい振動数の範囲では, 粒径の同じ磁性流体とMR 10の場合には, 相対増加率は0.2以下であるが, 高い振動数では, MR 10の増加率が多少大きい。これは, 溶媒の粘度が大きいことによる。一方, MR 1000の場合には, 0.5以上であり, これは低い振動数の範囲で強固なクラスタ形成の影響によると考えられる。

図9に磁性流体(MF 10)の抵抗力 D_{MF} の二乗平均に対するMR流体の抵抗力 D_{MR} の二乗平均の比を示す。磁場を印加した場合, 共振振動数以下では, 比の値は6~15であり, 弱磁場でも著しい減衰性能を示す。

図10に抵抗力の磁場感度, すなわち, 抵抗力の印加磁場に対する相対増加率を示す。磁性流体と同じ粒径

Fig. 6 Phase difference between the flat plate displacement and the exciter displacement

Fig. 8 Relative increase in viscous damping coefficient against the applied magnetic field

Fig. 7 Viscous damping coefficient ratio of MR fluids to magnetic fluid

Fig. 9 Drag force ratio of MR fluids to magnetic fluid

Fig.10 Relative increase in drag force against the applied magnetic field

のMR 10では、抵抗力の相対増加率は多少磁性流体より大きい。一方、MR 1000の場合には、磁場感度は、0.4~3である。磁性流体に対する磁場感度の比の値についてみると、MR 1000の場合には、振動数が小さいところ(15 Hz以下)では約100倍である。以上から、MR 1000は弱磁場下で、かつ、小さい振動数の範囲で、磁性流体に比べて、磁場に対する抵抗力の増加が大きく、著しい磁場感度を示す。

5. 結 言

MR流体を新たに創製し、弱磁場下での物性値の評価と減衰特性を磁性流体と比較することにより実験的検討を行った。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 弱磁場下のMR流体の可視化により、強固なクラスタ形成下の見掛け粘度の増加、クラスタ構造の摩擦効果さらには溶媒粘度の相乗効果は、磁性流体の粘度効果に比べて著しく大きいと考えられる。

(2) 弱磁場下でも、共振振動数以下の振動数の範囲では、MR流体の磁性流体に対する粘性減衰係数の比は磁性流体と粒径の同じMR 10では8~14, MR 1000では16~22であり、粒径の大きな鉄微粒子

のMR流体の減衰効果が著しい。

(3) 印加磁場に対する抵抗力の相対増加率は、共振振動数以下ではMR 1000の場合には0.4~3であり、磁性流体に比べて磁場変化に対する抵抗力の増加率すなわち磁場感度も著しく大きい。

終わりに臨み、本実験遂行には、東北大学卒研究生 伏見竜君、可視化は、東北大学科学計測研究所 島田寛教授、北上修助教授、桜井伴明技官の助力を得た。また、本研究は、秋田県立大学システム科学技術学部長 神山新一教授に討論をいただいた。ここに、深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) Ginder, J. M., *Encyclopedia Appl. Phys.*, **16** (1996), 489-503.
- (2) 神山新一, 磁性流体入門 (1989), 産業図書.
- (3) Carlson, J. D., Catanzare, D. M. and St. Clair, K. A., *Int. J. Mod. Phys., B*, **10** (1996), 2857-2865.
- (4) Laun, H. M., Kormann, C. and Willenbacher, N., *Rheol., Acta*, **35** (1996), 417-432.
- (5) Jeon, D., Park, C. and Park, K., *Proc. 6th Int. Conf. ER Fluids, MR Suspens. Their Appl.*, (1998), 853-860.
- (6) Kamiyama, S., Oyama, T., Kawabe, S. and Yamane, T., *Magnetohydrodynamics*, **32** (1996), 418-424.
- (7) Shimada, K., Oyama, T., Nishiyama, H. and Kamiyama, S., *Int. J. Appl. Electr. Mater.*, **2** (1992), 301-305.
- (8) 小山忠正・上野和之・片桐一成・神山新一・中谷功, 機論, **65**-636, B (1999), 2652-2657.
- (9) Fujita, T., Miyazaki, T., Nishiyama, H. and Jeyadevan, B., *J. Mag. Mag. Mater.*, **20** (1999), 14-17.
- (10) Fujita, T., Jeyadevan, B., Yamaguchi, K. and Nishiyama, H., *Powder Tech.*, **101** (1999), 279-287.
- (11) Zhou, L., Wen, W. and Sheng, P., *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998), 1509-1512.
- (12) Hong, C.-Y., Horng, H.-E., Kuo, F. C., Yang, S. Y., Yang, H. C. and Wu, J. M., 平成10年度磁性流体連合講演会およびエレクトロレオロジー研究会第18回例会の合同研究会講演論文集, (1998), 26-29.
- (13) Carlson, J. D., Chrzan, M. J. and James, F. O., U. S. Patent 54284330, (1994).
- (14) Larson, R. G., *The Structure and Rheology of Complex Fluids*, (1999), 376, Oxford.