ナノサイズ針状磁性粒子とミクロンサイズ球状磁性粒子を含有する 磁気機能性流体のダンピング特性

Damping Property of Magnetic Functional Fluids Containing Both of Nanometer-size Needle-like Magnetic Particles and Micrometer-size Spherical Magnetic Particles

井門 康司^{*1}(正員), 林 浩一^{*1} (正員), 飛田 隼佑^{*2}

Yasushi IDO (Mem.), Koichi HAYASHI (Mem.), Shunsuke TOBITA

New magnetic functional fluids containing both of nanometer-size needle-like magnetic particles and micrometer-size spherical magnetic particles are produced and its damping properties are investigated experimentally by using a simple prototype damper. Damping force is variable by changing intensity of applied magnetic field. Damping property of the damper depends on mixture ratio of nanometer-size magnetic particles to micrometer-size magnetic particles. Higher ratio of volume fraction of needle-like magnetic particles against that of all particles increases the damping force; in contrast higher ratio of volume fraction of nanometer-size magnetic particles against the total volume fraction of particles in a magnetic compound fluid decreases the damping force. In the absence of magnetic field, the fluid behaves like a Bingham fluid, while the fluid can be treated as a pseudoplastic fluid in the presence of magnetic field.

Keywords: magnetic functional fluid, damper, viscosity, damping force, magnetic particle, vibration control.

1 緒言

機械装置や建築構造物等の制振に用いるオイルダンパーの作動流体に磁気機能性流体を用い、外部から磁場を印加することで、機械的な可動部を用いてオリフィス部面積を変えるなどの複雑な機構を使うことなく減衰力可変ダンパーを構成することができる[1, 2]。磁気機能性流体には、粒子径約 10 nm の強磁性微粒子を含有する磁性流体や、粒子径が数 μm から十数 μm の強磁性粒子を含有する MR 流体、磁性流体に粒子径数 μm から十数 μm の強磁性粒子を混合した 2 種類のサイズの強磁性微粒子を含む磁気混合流体[3]がある。このうち磁気混合流体を作動流体に用いたダンパーでは、それに含まれる 2 種類の強磁性粒子の混合割合や粒子径、粒子の形状や材質を変えることで、ダンパーの減衰力特性が変化することが確認されている[4]。このことは、磁気混合流体中の強磁性粒子を変えることで、ダンパーの性能向上が可能となることを示唆している。印加磁場下の磁気混合流体中では、粒子径数 μm の強磁性粒子が形成するクラスターの粒子の間に粒子径約 10 nm の強磁性粒子が架橋構造を形成して、クラ

スターを強化しているものと考えられている[3]。

本研究では、従来の磁気混合流体に含まれる球形のナノサイズ強磁性粒子の代わりに、粒子径が約 100 nm サイズの針状強磁性粒子を用いた磁気機能性流体を試作し、そのダンピング特性を明らかにした。針状強磁性粒子により、磁気混合流体とは異なる特性を有するものと期待される。流体に対する強磁性粒子の体積割合を一定として、粒子径約 1.1 μm の球形強磁性粒子と長軸平均粒径約 100 nm、短軸平均粒径約 25 nm の針状鉄粉の体積割合を変化させた 5 種類の磁気機能性流体を作製し、それぞれの磁気機能性流体を作動流体としたダンパーの減衰力特性を実験的に調べた。

2 実験

2.1 磁気機能性流体

本研究で作製した磁気機能性流体は、溶媒にポリアルファオレフィン（フェローテック EXP. 09045）を使用し、針状強磁性粒子として粒子長径 100 nm、軸比 4 の針状鉄粉（DOWA エレクトロニクス MP5）、球形強磁性粒子として平均粒子径 1.1 μm のカルボニル鉄粉（BASF HQ）、増粘剤としてスメクタイト（コープケミカル SAN-316）、強磁性粒子の分散性向上のために界面活性剤としてオレイン酸（ナカライテスク）を混合させたものである。それぞれの材料の混合割合を

連絡先：井門 康司, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域,
e-mail: ido.yasushi@nitech.ac.jp

^{*1}名古屋工業大学 ^{*2}JFE スチール(株)

Table 1 Component of magnetic functional fluids.

Fluid	Magnetic Particles		Base fluid	Viscosity improver	Surfactant agent
	Micrometer-size Spherical [vol.%]	Nanometer-size Needle-like [vol.%]	Polyalphaolefin [vol.%]	Semctite [vol.%]	Oleic Acid [vol.%]
A	30	0	67.23	2.21	0.56
B	28	2	66.05	2.17	1.77
C	26	4	64.87	2.14	2.99
D	24	6	63.68	2.10	4.22
E	22	8	62.50	2.06	5.44
F	30	0	62.50	2.06	5.44
G	26	4	62.50	2.06	5.44

Table 1 に示す。全ての流体において強磁性粒子の体積割合が 30 %，それ以外の体積割合が 70 %となるように混合しており，スメクタイトは溶媒のポリアルファオレフィンに対して 5.0 wt.%の割合，オレイン酸は流体に含まれる全ての磁性粒子の表面を覆うことができる量を添加した。各磁気機能性流体でミクロンサイズ球形強磁性粒子と 100 nm サイズの針状鉄粉の混合割合を変化させて作製し，それぞれの流体を作動流体としたダンパーによる減衰力特性の比較を行う。また，界面活性剤量が流体のダンピング特性に与える影響も確認するため，界面活性剤量を一定とした磁気機能性流体も 2 種類加えて作製し (Fluid F および Fluid G)，そのダンピング特性も調べた。

2.2 ダンパー

本研究で用いたダンパーの概略図を Fig. 1 に示す。ダンパーはシリンダー内部の体積を一定にするため，ダンパー両端からロッドが突き出る構造となっている。シリンダー内部には磁気機能性流体が封入され，固定されたピストンとロッドを動かすと，ピストン外周部とシリンダー内周部の間で構成される環状オリフィスを流体が通過し，そのときの流体の抵抗により減衰力が生じる仕組みになっている。シリンダー外周部には全体を覆うようにコイルが装着されている。このコイルに電流を流すことによりシリンダー内部に封入された磁気機能性流体に磁場を印加する。

コイルに電流を流した時に発生する磁束密度分布を Fig. 2 に示す。シリンダーの軸方向 z と半径方向 r の中心を原点とし，ピストン外周とシリンダー内周間で構成されるオリフィスの中心($r = 16$ mm)で各方向の磁場測定を行った。磁束密度は r 方向より z 方向の方が大きくなり， z 方向磁場はオリフィス中心位置で最大値をとっていることが確認できる。また印加電流の

Fig. 1 Schematic of the damper. 1: case, 2: piston, 3: O-ring, 4: magnetic functional fluid, 5: rod, 6: coil.

Fig. 2 Distribution of magnetic flux density.

大きさに比例して磁束密度も変化していることが分かる。なお，本研究では新たに作製した磁気機能性流体のダンピング特性を調べることを目的としてプロトタイプダンパーを用いて実験を行っており，通常の MR ダンパーのようにオリフィス部で流れに垂直な磁

場を印加していない。

2.3 実験装置および実験条件

実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。ダンパーは鉛直方向に設置されており、モーター（オリエンタルモーター、BX6400S）によって与えられる駆動力はピストンクランク機構により往復運動に変換され、ダンパーに正弦波状の強制変位を与える。その際に発生する減衰力はロードセル（共和電業、LUX-a-1kN、DPM-750A）によって、ピストン変位はレーザー変位計（キーエンス、LB-040、LB-1000）によってそれぞれ測定される。また、直流電源（菊水電子工業、PAN55-6A）を用いてコイルに電流を流すことにより、作動流体に磁場を印加する。ダンパーの減衰力測定時の温度や強磁性粒子の分散状態は測定結果に影響を及ぼすものと考えられるため、実験前にウォーミングアップとしてデューティー比 0.47、6 V の矩形波電圧をコイルに印加して、一定の加振周波数 3 Hz でダンパーを加振させた。コイルに電流を流し続けるとジュール発熱のため温度が上昇するが、本実験ではダンパーのケース温度が $50 \pm 5^\circ\text{C}$ の条件下で測定を行った。

作動流体としての磁気機能性流体の種類他に、強制変位の加振周波数と作動流体に印加する磁場を発生させるためにコイルに流す電流値をパラメータとした。本実験では、ピストンの振幅を ± 4 mm に固定し、強制加振の周波数として、1 Hz から 10 Hz まで 1 Hz 刻みで与えた。この振幅と加振周波数によって発生する速度域は、地震などの免震用や自動車などの車載用ダンパーで想定するものに対応する。コイルに流す電流値として 0 A、(磁場無し) および 1 A から 6 A まで 1 A 刻みで設定した。なお、測定は複数回行い、得られた結果の再現性の確認を行った。また、ロードセルによ

って測定される力には、ロッドとケースの摺動部で発生する摩擦力が含まれているが、以下に示す減衰力は、この摺動部で発生する摩擦力を差し引いたものである。そのため、1 Hz よりも低い加振周波数では相対的な誤差が増大するため、本実験では設定していない。

3 実験結果および考察

3.1 流体の種類による印加磁場依存性

実験により得られた減衰力と変位の関係を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。これらの図は加振周波数 2 Hz、6 Hz および 10 Hz の場合について、無磁場の場合（印加電流 0 A）、コイルへの印加電流 3 A および 6 A のそれぞれ

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus. 1: damper, 2: coil, 3: motor, 4: motor driver, 5: motor controller, 6: laser displacement sensor, 7: amplifier unit, 8: loadcell, 9: strain amplifier, 10: Oscilloscope, 11: DC power supply.

Fig. 4 Relationship between damping force and displacement of the piston. The electric current to the coil is (a) 0 A, (b) 3 A and (c) 6 A, respectively. The frequency of forced vibration is 2 Hz.

Fig. 5 Relationship between damping force and displacement of the piston. The electric current to the coil is (a) 0 A, (b) 3 A and (c) 6 A, respectively. The frequency of forced vibration is 6 Hz.

Fig. 6 Relationship between damping force and displacement of the piston. The electric current to the coil is (a) 0 A, (b) 3 A and (c) 6 A, respectively. The frequency of forced vibration is 10 Hz.

れの同じ条件について、作製した磁気機能性流体によって減衰力-変位曲線がどのように変化するかを示している。時計回りが時間進行に対応する。いずれの条件においても、針状鉄粉の混合割合が多い流体ほど、すべての変位点において減衰力が大きくなっていることがわかる。また、磁場を印加した場合の減衰力-変位曲線の形状は、加振周波数に依らず死点近傍領域の変位点において降伏応力に相当する応力の発生が顕著に見られる。磁場の印加が無い場合には、針状鉄粉を含まない流体 A、あるいはその含有量が少ない流体 B や流体 C では降伏応力が小さいが、針状鉄粉を多く含む流体 D や流体 E では、降伏応力が顕著に現れている。これらのことは Fig. 4 に示していない他の加振周波数においても同様であった。磁性流体をベースとして平均粒子径約 10 nm の強磁性粒子と μm サイズの球形強磁性粒子を混合した磁気混合流体の場合には、ナノサイズの強磁性粒子の割合が大きくなると減衰力は小さくなる[5]。今回作製した針状鉄粉を含む磁気機能性流体を用いた場合は、磁気混合流体の場合とは全く逆の

結果となっている。針状鉄粉の割合が大きい流体を用いた場合の方が減衰力が大きくなる特性は、無磁場の場合にも減衰力が大きくなることから、針状鉄粉の形状が大きな要因であると考えられる。すなわち、針状粒子は崩壊しない小さなクラスターと見なすことができ、磁場印加が無い場合でも小さなクラスターが形成されているのと同様の粘度増加が生じるためである。さらに磁場印加時では、球形強磁性粒子が形成するクラスターを針状鉄粉が補強しているものと考えられる。

Fig. 7 および Fig. 8 に界面活性剤量を一定とした流体 E、流体 F、流体 G について減衰力-変位曲線を比較したものを示す。ここでは加振周波数 2 Hz と 10 Hz の場合のみについて示す。他の加振周波数の場合も基本的にはここで示した結果とほぼ同様の結果となっている。Fig. 7 および Fig. 8 より、界面活性剤量が減衰力に与える影響は非常に小さいことがわかる。基本的に、強磁性粒子の混合割合が同じであれば、5.5 vol.%以下の界面活性剤量であれば減衰力にほとんど影響はなく、針状鉄粉の割合が大きい方が、減衰力が大きくなる傾

Fig. 7 Relationship between damping force and displacement of the piston. The electric current to the coil is (a) 0 A and (b) 6 A, respectively. The frequency of forced vibration is 2 Hz. Volume fraction of surfactant is constant.

Fig. 8 Relationship between damping force and displacement of the piston. The electric current to the coil is (a) 0 A and (b) 6 A. The frequency of forced vibration is 10 Hz. Volume fraction of surfactant is constant.

向を示す。したがって、以降は流体 A から流体 E について比較を行うこととする。

3.2 加振周波数依存性

次に減衰力の加振周波数に対する依存性を見る。Fig. 4 から Fig. 6 より、流体の種類に依らず加振周波数が大きくなると減衰力が大きくなるとともに、死点近傍での減衰力の変化が大きくなっている。減衰力が大きくなるのは、周波数が大きくなるとピストンの移動速度も大きくなることから、速度に比例する粘性力が大きくなるためである。

3.3 最大減衰力とダンピング特性

Fig. 9 に最大減衰力とその時のピストン速度との関係を示す。Fig. 9 より、磁場が印加されていない場合、最大減衰力と速度はほぼ比例関係にある。これは無磁場下では強磁性粒子はランダムに分散している状態であり、針状鉄粉の長軸方向も一定の方向を向いているわけではない。そのため、個々の粒子による粘性抵抗が減衰力の主要因となっているため、速度に比例して最大減衰力が増加しているものと考えられる。一方、磁場を印加すると、いずれの流体の場合にも最大減衰

力が増加するが、流体 A を除く他の針状鉄粉を含有する流体では針状鉄粉を多く含む流体ほど低速度域で最大減衰力が比例関係から外れて落ち込む傾向が見られる、すなわち擬塑性流体のような特性を示していることがわかる。このような特性を示すのは、印加磁場下において強磁性粒子が形成する構造が大きく影響しているものと考えられる。そこで希釈流体ではあるが、針状鉄粉と球形鉄粉を混合した磁気機能性流体内部で粒子が形成する構造を光学顕微鏡で撮影した写真を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、無磁場下ではランダムに分散していた強磁性粒子は、磁場が印加されると磁場方向にクラスターを形成するが、MR 流体中や磁気混

Fig. 9 Maximum damping force vs. velocity of the piston. Applied electric current is (a) 0 A and (b) 6 A.

Fig. 10 Photographs of suspended particles in magnetic functional fluids (a) in the absence of magnetic field and (b) in the presence of magnetic field.

Fig. 11 Amplification of the maximum damping force against the applied electric current to the coil. The frequency of forced vibration is (a) 1 Hz, (b) 6 Hz, and (c) 10 Hz. F_0 is the damping force in the absence of magnetic field.

合流体中の μm サイズ球形強磁性粒子が形成するクラスター構造[6]とは異なり、磁場方向にも網の目状にクラスターが結合していることがわかる。強磁性粒子の体積割合が多い場合にもこのような網の目状の構造が3次元的に形成されているものと考えられる。ピストン速度が遅い場合には、このような構造のうち針状鉄粉が形成する部分が崩壊して分散し、ピストン速度が大きくなる、すなわちオリフィス部でのせん断が強くなると、このような球形強磁性粒子による構造までもが崩壊するため、最大減衰力の増加分が小さくなり、擬塑性流体のような振る舞いを見せているものと考えられる。流体 A の場合は球形強磁性粒子のみで構成されているため、ビンガム流体的な特性を示している。

最後に、最大減衰力の印加磁場強度に対する増幅率を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、最大減衰力は印加磁場が強くなるほど大きくなるが、加振周波数が高くなるほど、また針状鉄粉の混合割合が増加するほど最大減衰力の増幅率は小さくなっていることがわかる。これは針状鉄粉の材料の磁化特性が球形強磁性粒子材料の磁化特性よりも悪いためであり、そのため針状鉄粉の混合割合が増加すると磁気機能性流体としての磁化特性が落ちるためである。なお、流体 F と流体 G の飽和磁化はそれぞれ 213 emu/g, 178 emu/g であることから、針状鉄粉の方が球形強磁性粒子よりも飽和磁化が小さいことを確認している。

4 結言

粒子長径 100 nm, 軸比 4 の針状強磁性粒子と平均粒子径 1.1 μm の球形強磁性粒子を含有する磁気機能性流体を試作し、そのダンピング特性を実験的に調べた結果、以下のことが明らかとなった。強磁性粒子の体

積割合を一定として針状鉄粉の混合割合を大きくすると、減衰力が増加する。ただし、針状鉄粉の混合割合が大きくなると最大減衰力の増幅率が低下する。また、針状鉄粉を含有する磁気機能性流体は、磁場印加が無い場合にはビンガム流体的な特性を示すが、磁場を印加すると擬塑性流体のような特性となる。

本研究で試作した針状鉄粉を含む磁気機能性流体は、増幅率が多少低下しても強磁性粒子の体積割合を増加させずに減衰力を大きくしたい場合に有用である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(23560259)による援助を受けて行われた。流体の磁化特性の測定にご協力いただいた大分大学戸高孝教授に感謝いたします。

(2013 年 7 月 17 日受付, 2013 年 8 月 26 日再受付)

参考文献

- [1] 森下信, 新素材による制振, 免震, 日本機械学会誌, Vol. 110, No. 1062, pp. 379-382, 2007.
- [2] 水野孝之, 小堀鐸二, 高橋元一, 松永義憲, 丹羽直幹, 倉田成人, 200 tf 可変オイルダンパの開発と性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 733-734, 1998.
- [3] 島田邦雄, 菅野秀人, 須知成光, 小川淳二, 神山新一, 磁気混合流体(MCF)ダンパの特性とクラスターの影響, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 179-185, 2003.
- [4] 林浩一, 高木竜路, 赤松渉平, 井門康司, 磁気機能性流体ダンパに用いる磁性粒子の材質や形状が減衰力に及ぼす影響, 実験力学, Vol. 10, No. 4, pp. 433-438, 2011.
- [5] 林浩一, 高木竜路, 山田貴友, 井門康司, 磁気機能性流体の組成がダンパの減衰特性に及ぼす影響, 実験力学, Vol. 9, No. 4, pp. 382-387, 2009.
- [6] 井門康司, 稲垣貴文, 磁気混合流体中の微粒子が形成するマイクロ構造の解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 753, pp. 978-984, 2009.