

アルファセルロースを混合した磁気混合流体を用いた減衰力可変ダンパーの減衰力特性

林 浩一*, 井門 康司**, 上野 聖司***

Damping Properties of a Damping Force Variable Damper Utilizing Magnetic Compound Fluids Containing Alpha-Cellulose

Koichi HAYASHI, Yasushi IDO and Satoshi UENO

In this study, damping force properties of damping force variable damper using magnetic functional fluid which consists of nanometer-size and micrometer-size magnetic particles, poly-alpha-olefine, smectite and alpha-cellulose are investigated experimentally. It is shown that the magnetic functional fluid becomes light by containing the alpha-cellulose. Then the damping force of the damper using the magnetic functional fluid becomes large by containing the alpha-cellulose.

Key words: Damper, Damping Force, Magnetic Fluid, Magnetorheological Fluid, Functional Fluid, Alpha-Cellulose

1. 緒言

オイルダンパーの作動流体に磁気機能性流体を用い、それに外部から磁場を印加することで、減衰力可変ダンパーを構成することができる¹⁾。このようなダンパーは、オイルダンパーのオリフィス面積をメカニカルな機構を用いて変えることで減衰力を変える一般的な減衰力可変オイルダンパーよりも構造が簡単であることや、減衰力変化の応答性が良い等の利点を持つことから注目を集め盛んに研究されており、その一部は既に実用化されている。

磁気機能性流体は、水やオイル等の溶媒に鉄やマグネタイト等の磁性粒子を分散させた流体であり、含有する磁性粒子のサイズにより、ナノメートルサイズの磁性粒子を含有する磁性流体²⁾、マイクロメートルサイズの磁性粒子を含有するMR流体³⁾、そしてナノメートルサイズとマイクロメートルサイズの磁性粒子を同時に含有する磁気混合流体⁴⁾に分類される。このうちダンパーの作動流体には、磁場印加時の粘度変化量が大きいことからMR流体が使われることが多いが、2サイズの磁性粒子の混合割合を調整することにより、ダンパーの減衰力特性を変えることができる磁気混合流体を用いたダンパーの減衰力特性についても、筆者らにより研究が進められている⁵⁾⁷⁾。

これらのMR流体や磁気混合流体の磁性粒子含有量はいずれも30 vol.%程度であり、一般的にダンパーの作動流体として使われるオイルよりも比重が大きくなることから、ダンパーの重量増加へとつながる。このことは自動車や航空機等の移動体に使うダンパーとして考えた場合にはデメリットとなる。

一方で、磁気機能性流体を用いた減衰力可変ダンパーにおいては、磁気機能性流体に印加する磁場が周囲の機器に及ぼす影響や、ダンパーの減衰力を変化または維持するために必要なエネルギーの大きさを考えた場合、できるだけ弱い磁場を印加することで大きく減衰力が変化することが望ましいと考えられる。

このような要求に対して、本研究ではダンパーに用いる磁気機能性流体中にアルファセルロースを混合させる方法に着目した。アルファセルロースは、磁気機能性流体に含まれる磁性粒子よりも比重が小さいため、磁性粒子をアルファセルロースに置換することでダンパーの軽量化が見込める。また磁気機能性流体は磁場が印加されると、その中に含まれる磁性粒子がクラスターを形成することにより粘度が増大するが、繊維状のアルファセルロースは、磁性粒子のクラスターとともに粘度増大作用に寄与することが考えられる。そこで本研究では、磁気機能性流体の一種である磁気混合流体をダンパーの作動流体に用い、その中に含まれる磁性粒子量を変えずにアルファセルロースを混合した場合、および一部の磁性粒子をアルファセルロースに置換した場合のそれぞれについて、混合するアルファセルロースの量がダンパーの減衰力特性に及ぼす影響について実験的に明らかにした。

2. 実験

2.1 実験装置

本研究では Fig.1 に示す実験装置を用いた。ダンパーには、モーター（オリエンタルモーター、BX6400S）を動力源として、モーターコントローラーで設定した任意周波数の正弦状の強制変位が与えられ、その変位はレーザー変位センサー（キーエンス、LB-040）とアンプユニット（キーエンス、LB-1000）の組み合わせで測定される。また発生するダンパーの減衰力はロードセル（共和電業、LUX-A-1kN）で測定後、ひずみアンプ（共和電業、DPM-750A）で増幅され、それぞれオシロスコープ（横河

原稿受付 2012年8月24日

* 正会員 名古屋工業大学技術部 (〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町)

** 正会員 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域 (〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町)

*** アイシン・エイ・ダブリュ株式会社 (〒444-1192 愛知県安城市藤井町高根 10 番地)

電機, DL1620) で記録される. また, ダンパーの作動流体に磁場を印加するための手段としてコイルを用いており, それに電流を流すために直流電源装置 (菊水電子,

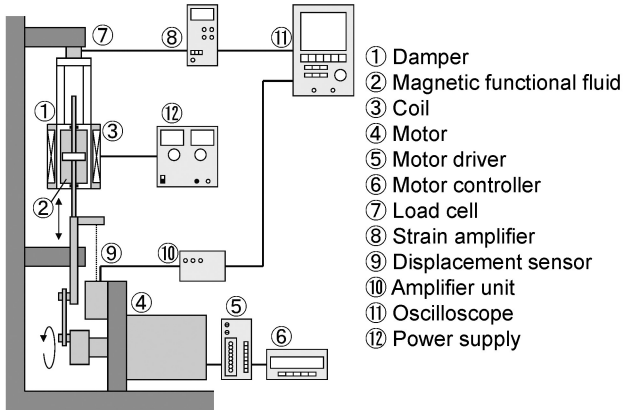


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

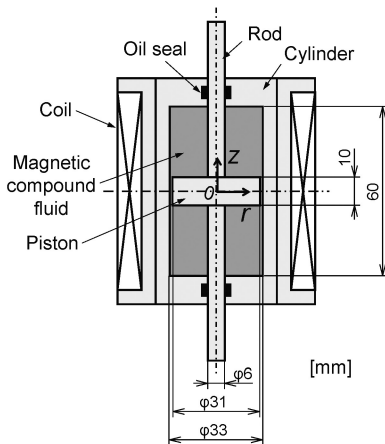


Fig.2 Schematic of the damper

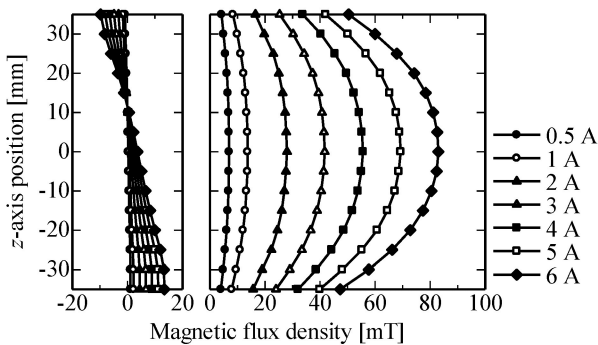


Fig.3 Distribution of magnetic flux density

PAN55-6A) を用いた.

Fig.2 は実験に用いたダンパーの詳細図である. シリンダー内に磁気混合流体が封入されており, その中をピストンがロッドを介して動く構造になっている. シリンダー外周部には磁場印加用のコイルが配されている. このコイルに電流を流した際に発生する磁束密度は Fig.3 に示した分布になっており, 磁束密度の大きさとコイルに流す電流の大きさはほぼ比例関係にある.

2. 2 磁気混合流体

実験には, 磁性流体 (フェローテック, APG314) をベースとして, 鉄粉 (BASF, HQ), ポリアルファオレフィン (フェローテック, EXP.09045), スメクタイト (コープケミカル, SAN-316), アルファセルローズ (ナカライテスク) を混合して作製した, Table 1 に示す 7 種類の磁気混合流体を用いた. アルファセルローズを含有しない流体 A に対し, 流体 B, C, D は磁性粒子の量を変えずにアルファセルローズを追加したもの, 流体 E, F, G はマイクロメートルサイズ磁性粒子である鉄粉を減らした分だけアルファセルローズを混合したものとなっている. したがって各磁気混合流体の比重は, 流体 B, C, D は流体 A よりも大きく, 流体 E, F, G は流体 A よりも小さくなっている. アルファセルローズは Fig.4 に示す写真のように, 繊維状の高分子材料である.

2. 3 実験条件および方法

ダンパーの減衰力と変位を Table 2 に示す各条件下で測定した. 電流は磁気混合流体に印加する磁場の大きさを設定するための指標である. 実験では, 一定の速度パターンおよびコイルへの電流印加パターンでダンパーを連続作動させ, 減衰力が安定し, 且つダンパーのシリンダー部温度が 50 ± 0.5 °C の状態となった後に測定を行った. 測定され

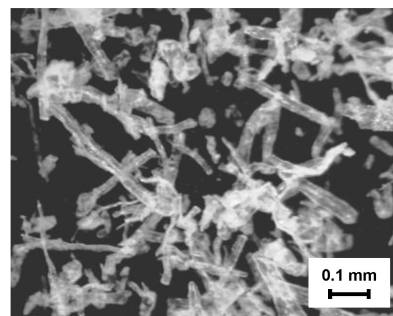


Fig.4 Microscope photograph of the alpha-cellulose

Table 1 Testing fluids

Fluid	Magnetic particles		Poly-alpha-olefin [vol.%]	Smectite [vol.%]	Alpha-cellulose [vol.%]	Density [g/cm ³]
	Magnetite (Nanometer size) [vol.%]	Iron (Micrometer size) [vol.%]				
A	4.00	26.00	67.90	2.10	0.00	2.83
B			65.96	2.04	2.00	2.84
C			64.02	1.98	4.00	2.86
D			62.08	1.92	6.00	2.87
E		24.00	67.90	2.10	2.00	2.70
F		22.00			4.00	2.58
G		20.00			6.00	2.45

Table 2 Physical condition

Stroke [mm _{p-p}]	8
Frequency [Hz]	1, 2, 4, 6, 8, 10
Electric current [A]	0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6

た減衰力にはダンパー摺動部の摩擦抵抗力が含まれているため、それを除去するためにあらかじめダンパーに作動流体を充填しない状態で摩擦抵抗力を測定しておき、減衰力測定値から摩擦抵抗力を差し引いた値を減衰力とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 アルファセルロース混合の影響

アルファセルロースを含有しない流体 A, および流体 A と同じ磁性粒子量を含むとともに、アルファセルロースを混合した流体 B, C, D を用いた場合の減衰力-変位曲線を Fig.5 に、減衰力-速度曲線を Fig.6 にそれぞれ示す。減衰力-変位曲線は時間とともに右回り、減衰力-速度曲線は左回りに進行する。

加振周波数 10Hz で無磁場下の減衰力-変位曲線 (Fig.5(a)) は、どの流体を用いた場合においても楕円形状が顕著であり、減衰力は主に作動流体の粘性抵抗成分により構成されていると考えられる。これは無磁場下の減衰力-速度曲線 (Fig.6(a)) において、減衰力の大きさが速度にほぼ比例していることから確認できる。また減衰力-変位曲線上の変位が ± 4 mm の位置、すなわち死点近傍の領域では、どの流体を用いた場合においても死点直後の変位点で減衰力が急激に立ち上がっており、降伏力が発生していることがわかる。この降伏力は速度がほぼ 0 の領域において発生して

いることから、主に摩擦抵抗成分により構成されていると考えられる。またこの降伏力は死点直前の変位では見られないことから、これを構成する摩擦抵抗成分は、磁気混合流体に含まれる磁性粒子同士が、ピストンが静止した状態では磁気的な結合力が作用していない状態でも互いに接触することで発生する静止摩擦力が主たるもので、ピストンが動き始めるとともに磁性粒子が攪拌される、あるいは運動を始めることで、磁性粒子間に作用していた静止摩擦が無くなるか、もしくは動摩擦力となって小さくなるものと考えられる。減衰力-速度曲線がヒステリシスを持っているのは、この降伏力の影響を受けていることによると考えられる。磁性粒子量を変えずにアルファセルロース混合割合を大きくしていくほど、速度に対する減衰力の変化勾配が大きく、また降伏力が大きくなっていることから、磁気混合流体にアルファセルロースを混合すると、その混合割合が大きくなるにしたがい、無磁場下で減衰力を構成している粘性抵抗成分と、減衰力の中で降伏力を構成している摩擦抵抗成分がともに増大すると考えられる。

一方で加振周波数 10Hz のままコイルへ電流を印加した場合の減衰力-変位曲線 (Fig.5(b), (c)) では、どの流体を用いた場合においても楕円形状に加えて矩形形状が顕著に見られ、減衰力は粘性抵抗成分と摩擦抵抗成分の両方により構成されていることがわかる。このことは同じ条件の減衰力-速度曲線 (Fig.6(b), (c)) において、減衰力の大きさが速度に比例している領域と、速度にかかわらずに一定の大きさを持つ領域が見られることから確認できる。また

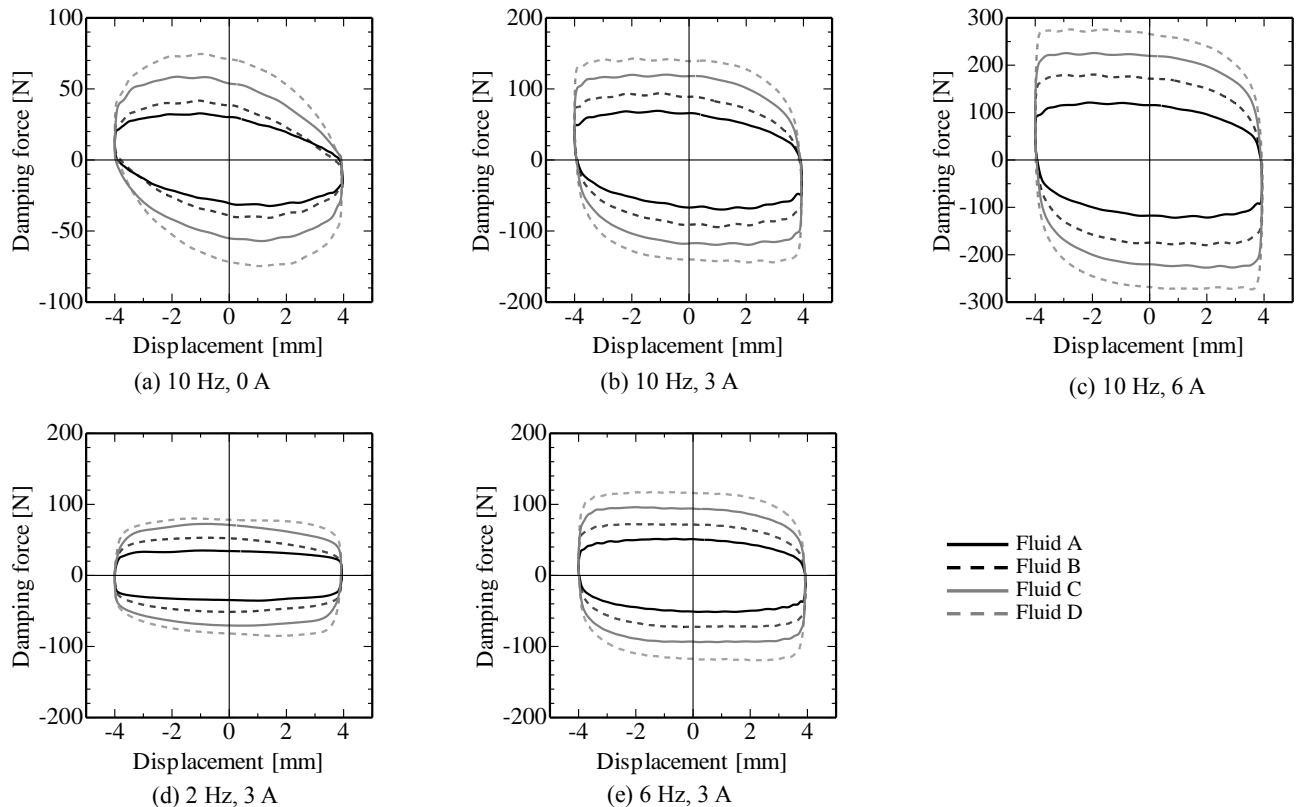


Fig.5 Damping force vs. displacement curves (Fluid: A, B, C, D)

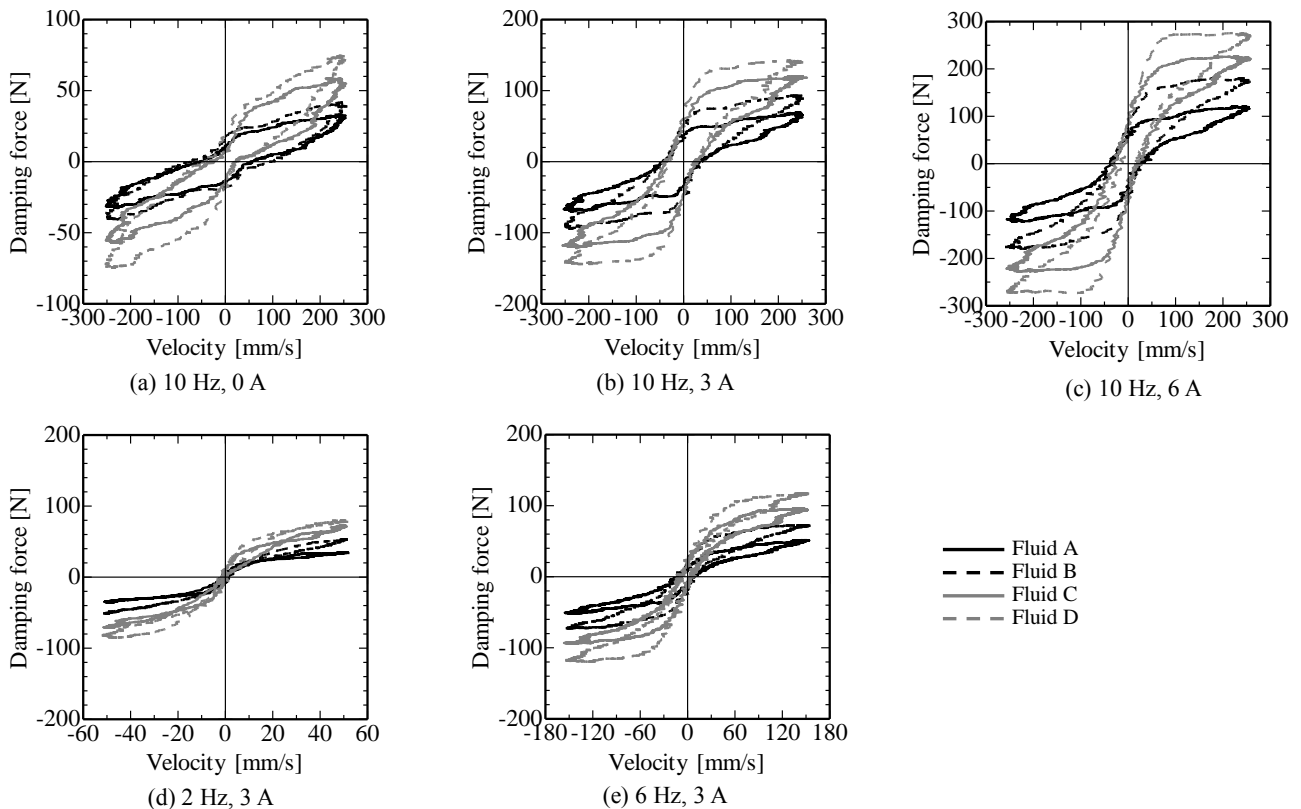


Fig.6 Damping force vs. velocity curves (Fluid: A, B, C, D)

無磁場下の場合と同様に、降伏力も発生していることがわかる。降伏力を含む減衰力の大きさは、無磁場下よりもコイルに電流を流すことで磁場を印加した方が、さらには電流を大きくすることで印加磁場を強くするほど大きくなっている。これは磁場印加により磁性粒子のクラスターが形成され、そのクラスターを構成する磁性粒子間に作用する磁気的な結合力が、印加磁場が強くなるほど大きくなることに起因した現象である。またこの場合、コイルへの印加電流の大きさにかかわらず、アルファセルローズ混合割合が大きくなるほど、減衰力の大きさが速度に比例している領域の減衰力の変化勾配で表される粘性抵抗成分と、速度にかかわらず減衰力が一定の大きさである領域の、減衰力の大きさが表される摩擦抵抗成分の大きさ、さらには降伏力の大きさはともに大きくなる傾向が見られた。

同じように、コイルへの印加電流が 3 A の条件下で、加振周波数を変えた場合の減衰力-変位曲線 (Fig.5(b), (d), (e)) と減衰力-速度曲線 (Fig.6(a), (d), (e)) を見ていくと、どの流体を用いた場合でも、いずれの加振周波数条件下においても減衰力は粘性抵抗成分と摩擦抵抗成分の両方より発生していることがわかる。またどの加振周波数条件下においても降伏力の発生が見られた。しかし降伏力の発生状況は加振周波数により異なっており、加振周波数が低くなるにしたがって、死点直後の変位点に近い大きさの降伏力が、死点直前の変位点においても発生しており、それにより減衰力-速度曲線のヒステリシスが小さくなっている。これは加振周波数が低くなるにしたがって、ピストンの動きに

よる攪拌力が弱くなることに起因した現象であると考えられる。この場合も加振周波数にかかわらず、アルファセルローズ混合割合が大きくなるほど、減衰力の大きさが速度に比例している領域の減衰力の変化勾配で表される粘性抵抗成分と、速度にかかわらず減衰力が一定の大きさである領域の減衰力の大きさが表される摩擦抵抗成分、さらには降伏力の大きさはともに大きくなる傾向が見られた。

Fig.7は加振周波数 10 Hz の場合における最大減衰力とコイルへの印加電流の関係を示したものである。どの流体を用いた場合においても、最大減衰力はコイルへの印加電流に対して比例関係を持っており、印加電流が大きくなるにしたがって最大減衰力も増大する傾向が見られる。しかし最大減衰力の変化勾配は一定ではなく、およそ印加電流 0.5 A までの変化勾配は、それ以上の領域の変化勾配よりも小さくなっている。コイルへの印加電流を大きくする、すなわち磁気混合流体への印加磁場強度を大きくすることによる減衰力の増大は、磁場を印加することで磁気混合流体中の磁性粒子がクラスターを形成することによる。したがってどの流体を用いた場合においても同じように最大減衰力の変化勾配がおおよそ 0.5 A で変わる現象は、磁気混合流体中にアルファセルローズを混合し、その混合割合を変えた場合においても、磁性粒子の印加磁場に対するクラスター形成状況が変わらないことを示していると考えられる。なお最大減衰力の大きさは、コイルへの印加電流が一定の場合、Fig.8 に示すようにアルファセルローズ混合割合と比例関係にあり、コイルへの印加電流が大きくなるにしたがって、

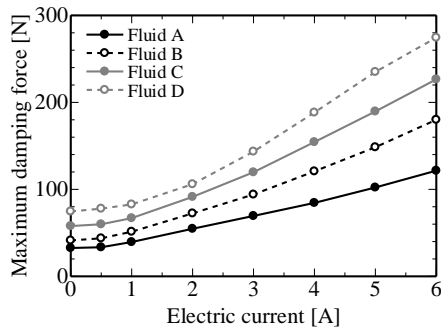


Fig. 7 Relationship between maximum damping force and electric current (Fluid: A, B, C, D, Frequency: 10 Hz)

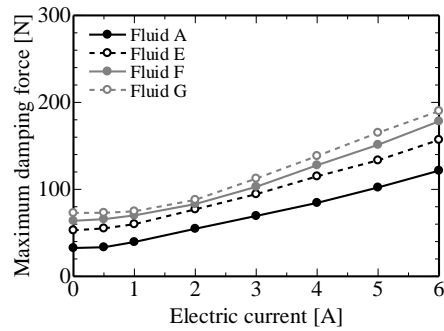


Fig. 11 Relationship between maximum damping force and electric current (Fluid: A, E, F, G, Frequency: 10 Hz)

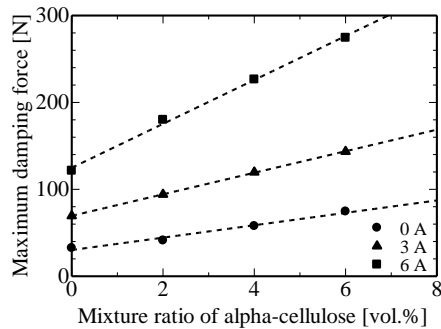


Fig. 8 Relationship between maximum damping force and mixture ratio of alpha-cellulose (Fluid: A, B, C, D, Frequency: 10 Hz)

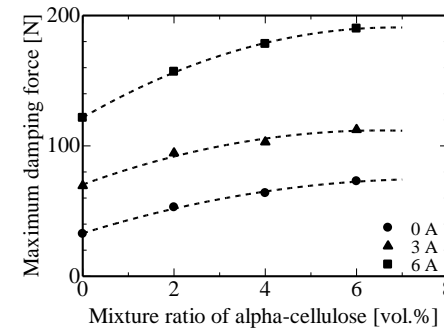


Fig. 12 Relationship between maximum damping force and mixture ratio of alpha-cellulose (Fluid: A, E, F, G, Frequency: 10 Hz)

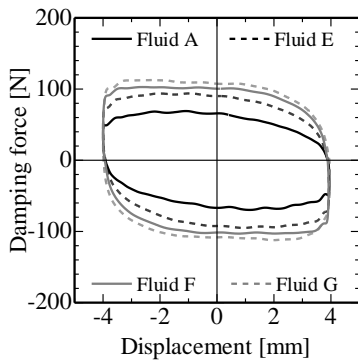


Fig. 9 Damping force vs. displacement curves (Fluid: A, E, F, G, Frequency: 10 Hz, Electric current: 3 A)

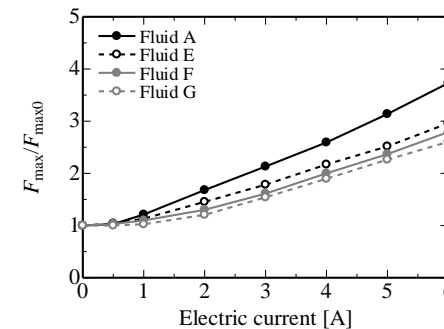


Fig. 13 Relationship between maximum damping force ratio and electric current (Fluid: A, E, F, G, Frequency: 10 Hz)
 F_{max} : Measured maximum damping force
 F_{max0} : Maximum damping force when the electric current is 0 A

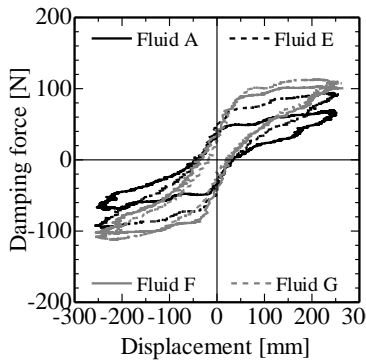


Fig. 10 Damping force vs. velocity curves (Fluid: A, E, F, G, Frequency: 10 Hz, Electric current: 3 A)

アルファセルロース混合割合に対する最大減衰力の変化勾配も大きくなる傾向が見られた。

3. 2 磁性粒子をアルファセルロースで置換した場合

流体 B, C, D は流体 A に対してアルファセルロースを混合するとともに、その体積分率に応じた量のポリアルファオレフィンとスメクタイトを減らしている。その結果、流体 B, C, D の密度は流体 A のよりも高くなっている。それに対し、ここでは磁気混合流体の軽量化を考慮して、アルファセルロースを含有しない流体 A と、それに対し、アルファセルロースを混合するとともに、混合したアルファセルロースと同じ体積分率のマイクロメートルサイズ磁性粒子である鉄粉を減らした流体 E, F, G を作動流体に用

いた場合のダンパーの減衰力特性について見ていく。Fig.9 は減衰力-変位曲線, Fig.10 は減衰力-速度曲線の一例である。磁性粒子をアルファセルローズで置換した場合も、磁性粒子量一定のままアルファセルローズを混合した場合と同様に、どの流体を用いた場合においても、減衰力は粘性抵抗成分と摩擦抵抗成分の両方で構成されており、さらに降伏力が発生していることも確認できる。また Fig.11 に示すように、最大減衰力とコイルへの印加電流の関係においても同様に、どの流体を用いた場合においても最大減衰力はコイルへの印加電流に対して比例関係を持っており、印加電流が大きくなるにしたがい最大減衰力も増大する傾向が見られる上、さらに最大減衰力の変化勾配がおよそ 0.5 A で変わる傾向も見ることができる。したがって、磁性粒子の印加磁場に対するクラスター形成状況はアルファセルローズ量や磁性粒子量にかかわらず、変わらないと考えられる。また印加電流の大きさにかかわらず、アルファセルローズ混合割合が大きい流体ほど最大減衰力は大きくなっており、これは磁性粒子をアルファセルローズに置換することにより、弱い印加磁場でより大きな減衰力を得ることができるようになることを示している。

Fig.12 は最大減衰力とアルファセルローズ混合割合の関係を示したものである。アルファセルローズ混合割合に対する最大減衰力の変化勾配は、印加電流にかかわらず、アルファセルローズ混合割合が小さい領域よりも混合割合が大きい領域の方が小さい傾向が見られる。磁性粒子をアルファセルローズに置換すると、アルファセルローズは粒子形状が繊維状であるため、見かけの粒子径が大きくなることで流体の粘度は高くなる。その一方でアルファセルローズ粒子は磁性粒子よりも大きいため、全粒子の総表面積は減少し、流体の粘度は低くなる。印加電流が 0 A の場合においても前述の現象が見られることから、アルファセルローズ混合割合が小さい領域では粒子形状による影響が支配的であり、混合割合が大きくなるにしたがい粒子サイズの影響が大きくなるものと考えられる。さらに磁場印加条件下では、アルファセルローズは磁性粒子と一緒にクラスターを形成し、それを補強する働きをされると考えられるが、アルファセルローズ量が増えるにしたがい、磁性粒子同士の間接接触数が減少、または磁性粒子間の距離が広がることで、クラスターが変形や崩壊しやすくなることが考えられる。以上のことから、最大減衰力とアルファセルローズ混合割合の関係は上に凸の曲線で表すことができると考えられ、このことはアルファセルローズ混合割合に対する最大減衰力の大きさの関係がピークを持つことを示している。したがって磁性粒子をアルファセルローズに置換する場合は、得られる最大減衰力に上限があると考えられる。

Fig.13 はコイルへの印加電流 0 A での最大減衰力 $F_{\max 0}$ で、各印加電流条件下での最大減衰力 F_{\max} を規格化した最大減衰力比とコイルへの印加電流の関係を示したものであり、どの印加電流条件下においても、アルファセルローズ

混合割合が大きい流体ほど最大減衰力比が小さくなる傾向が見られる。このことは、アルファセルローズ混合割合が大きくなるにしたがい、印加磁場強度変化に対する減衰力の変化量が小さくなることを示している。

4. 結 言

アルファセルローズを混合した磁気混合流体を、減衰力可変ダンパーの作動流体として用いた場合の、減衰力特性について実験的に調べた結果、以下の結論が得られた。

- 1) アルファセルローズの混合割合が大きくなるに従い、減衰力を構成する粘性抵抗成分と摩擦抵抗成分、さらには降伏力の大きさは増大する。
- 2) 磁性粒子量一定の状態ではアルファセルローズを混合する場合、印加磁場強度が一定の場合における最大減衰力の大きさは、アルファセルローズ混合割合と比例関係にある。
- 3) 磁性粒子の印加磁場に対するクラスター形成状況は、アルファセルローズ量や磁性粒子量にかかわらずほぼ同じである。
- 4) 磁性粒子をアルファセルローズで置換することにより、弱い磁場で大きな減衰力を得ることができる。
- 5) 磁性粒子をアルファセルローズで置換した場合は、得られる最大減衰力に上限がある。
- 6) 磁性粒子をアルファセルローズで置換した場合は、アルファセルローズ混合割合が大きくなるほど、印加磁場強度変化に対する減衰力の変化量が小さくなる。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号: 23560259）の助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Morishita, S.: *Handbook of Damping Technology* (in Japanese), Coronasha (2008), 373-375.
- 2) Taketomi, S., Chikazumi, S.: *Jisei Ryuutai* (in Japanese), Nikkan Kogyo Shimbun (1988), 1-3.
- 3) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D.: Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **10**-1 (2000), 5-15.
- 4) Shimada, K.: Development and Applications of Intelligent Magnetic Responsive Fluids, with Particular Attention to Magnetic Compound Fluids (MCFs) (in Japanese), *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**-6 (2004), 766-773.
- 5) Hayashi, K., Takagi, R. and Ido, Y.: Damping Properties of a Damping Force Variable Damper Using Magnetic Functional Fluids, *J.JSEM*, **9** Special Issue (2009), 81-85.
- 6) Hayashi, K., Takagi, R., Yamada, T. and Ido, Y.: Effect of Composition of Magnetic Functional Fluids on Damping Properties of Damping Force Variable Damper (in Japanese), *J.JSEM*, **9**-4 (2009), 78-83.
- 7) Hayashi, K., Takagi, R., Yamada, T. and Ido, Y.: Effect of Composition of Magnetic Functional Fluids on Damping Properties of Damping Force Variable Damper (in Japanese), *J.JSEM*, **9**-4 (2009), 78-83.