

学術論文

磁気混合流体 (MCF) ダンパの特性とクラスタの影響

Characteristics of magnetic compound fluid (MCF) damper and effect of cluster

島田 邦雄
須知 成光
神山 新一

(秋田県立大学)
(秋田県立大学)
(秋田県立大学)

菅野 秀人
小川 淳二

(秋田県立大学)
(秋田県立大学)

Kunio SHIMADA
Hideto KANNO
Shigemitsu SHUCHI
Junji OGAWA
Shinichi KAMIYAMA

Member

This paper presents a passive damper utilizing a MCF (magnetic compound fluid) that was developed as a new intelligent fluid. The damper used was a cylinder type with a single-degree-of-freedom system of spring and mass. It was investigated at a low vibration frequency, less than 10Hz. Our experiments examined the dynamic characteristics and response time of this damper and fluid upon application of a nonuniform steady magnetic field. We compared them to systems using other ordinary magnetically responsive fluids, including MF (magnetic fluid) and MRF (magneto-rheological fluid). The MCF damper was demonstrated to have the largest damping effect and the shortest response time. The superiority of the MCF is due to the clustering behavior of particles, which aggregate like a chain or necklace in the fluid.

Key Words: Viscous Damper, Intelligent Fluid, MCF (magnetic compound fluid), Magnetic Fluid, Magneto-rheological Fluid, Aggregation, Particle, Cluster, Magnetic field

1 緒論

機能性流体やスマート流体である磁性流体 (MF) や MR 流体 (MR) を用いた応用開発の一つとして、流体の粘度特性や磁気特性を利用した粘性ダンパがある。これらに関する研究は、これまで多く行われてきている [1]-[4]。これらについて流体の観点からみると、MF については、飽和磁化が小さいこと、一方、MR については、流体の粒子が沈降してしまうことや、粉体と

しての挙動を示すため流体力学的に扱うには困難を要すること等が、ダンパへの工学的利用の上で大きな問題となっている。

これらのダンパにおける問題解決の一つとして、まず、流体の開発が上げられる。

その流体の開発として、島田らは、MF と MR の両方の特性を有する磁気混合流体 (MCF) を提案した [5]-[7]。そして、この MCF の流体力学的特性や磁気特性について実験的に明らかにした [5]。その結果、混合する MF や MR の濃度、及び、印加する磁場方向や磁場強度により、MCF の粘度が変化することを実

連絡先: 島田 邦雄, 〒 015-0055 秋田県本荘市土谷字海老ノ口 84-4, 秋田県立大学システム科学技術学部,
e-mail: shimada@akita-pu.ac.jp

験的に明らかにした。

そこで次なる段階として、MCF を粘性ダンパに適用したときの特性について調べる必要がある。すなわち、現在、このMCF をダンパ装置に適用したとき、磁性流体ダンパ (MF ダンパ) やMR 流体ダンパ (MR ダンパ) に比べて、どの程度、ダンパとしての減衰効果があるのかについて検討する余地が残されており、また、新しい粘性ダンパとして、MCF ダンパの開発が期待される。

そこで、本研究では、MCF を粘性ダンパに適用し、そのダンパの振幅や印加磁場に対する応答時間の特性について調べ、また、従来からある、MF ダンパやMR ダンパのそれらと比較する。さらに、ダンパの振動特性の要因になっている粒子のミクロ的構造を実験的に調べ、それを用いて実験結果を考察する。

2 実験方法

本研究で扱う粘性ダンパは、バネ定数 k のバネと、質量 m の重りからなる1自由度系のダンパである。その試験装置の概略図を Fig. 1 に示す。電磁石により磁場を印加したときの、加振機の振動に対する流体中の内筒の振動をレーザ変位計により測定する。本研究では、MCF を粘性ダンパに適用した時に、従来のMF ダンパやMR ダンパと比較して、どのような有意差があるのかについて基礎的に調べることを研究目的とするため、パッシブ型ダンパについて取り扱うこととした。ここで、本実験では、 $m = 60.4\text{g}$ 、 $k = 56.8\text{N/m}$ を使用した。

また、本研究では、与える振動の周波数について、建築や車における本研究結果の将来への実用化を考えて、10Hz 前後以下の低周波数領域について扱った。

流体中の内筒は、Fig. 2 の詳細図に示すように、直径 18mm、長さ 50mm からなるアクリル樹脂製の非磁性体である。

また、電磁石に供給する電流 $I = 20\text{A}$ の定常非一様磁場を z 軸に対して垂直に印加する。Fig. 3 に、このときの水平方向、鉛直方向の磁場強度分布を示す。いずれも、Fig. 2 に示す内筒と外筒の間隔 2mm の中間位置における磁場強度である。ここで、Fig. 2, 3 の z -axis は、バネ-マス系の静的な釣り合いの位置におけるときの鉛直方向の座標であるが、この状態で、 $z = 200\text{mm}$ から 250mm の間に、内筒が位置している。この静的釣り合いの位置から振動を開始させる。

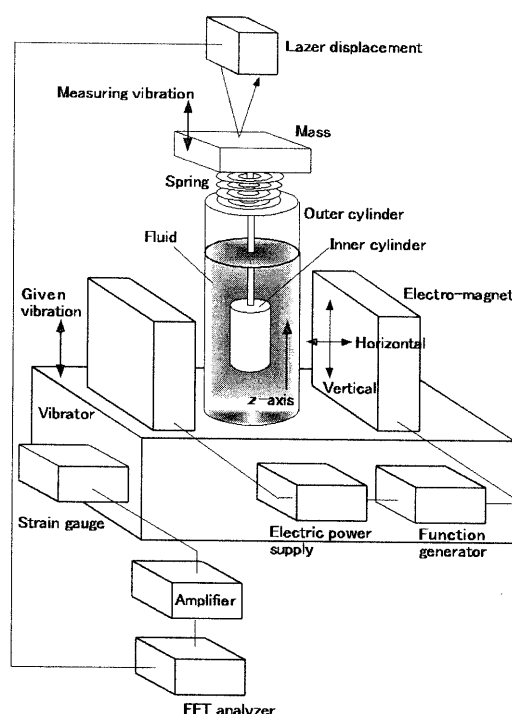


Fig. 1 Schematic diagram of passive viscous damper.

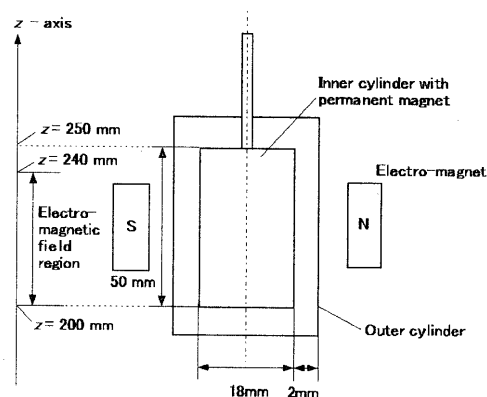


Fig. 2 Detailed diagram and dimensions of the piston part in the damper.

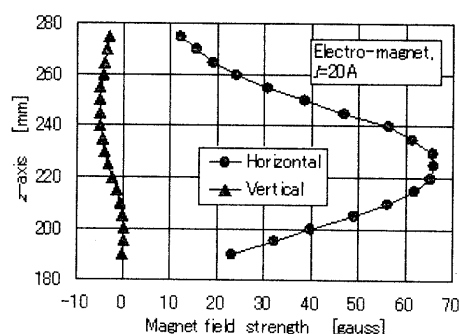


Fig. 3 Magnetic field distribution.

供試流体は、MCF, MF, MR であり、Table 1 に示す物性を有する。ここで、MCF 中の HQ は、平均粒径が約 $1.2\mu\text{m}$ のハイドロカーボン鉄粉であり、MF 中のマグネタイト Fe_3O_4 は、平均粒径が約 10nm である。

3 実験結果

3.1 振幅比の周波数特性

Fig. 4, 5 に、各流体における、周波数 f に対する、与える振動の振幅 z_0 と内筒の振動の振幅 z の比を、無磁場下と定常磁場下について、それぞれ示す。ここで、 f_c は、実験値における共振周波数であり、付録の Table 3 に示す値であった。

共振周波数付近の周波数において、MCF や MR は、MF よりも、磁場印加による無磁場下からの振幅比の減衰が大きい。

これについて、特に、共振時における振幅比 z/z_0 について、磁場印加による無磁場下からの減衰率としてまとめると、Table 2 のようになる。ここで、MR(W) と MCF(K) の有意的な差は、誤差範囲内にあるので、明確な差は認められない。

一方、MCF や MR, MF は、磁場下での振幅比は、付録の Fig. 13 に示すような定性的傾向がある。

3.2 応答時間の周波数特性

前項までは、振幅比の変化についての実験結果であるが、印加磁場に対する振幅の応答時間についても興味のあるところである。また、本研究ではパッシブダンパについて取り扱っているが、この研究の次の段階として、実用化されたダンパの場合には、フィードバック

Table 2 Damping ratio by applying a magnetic field at f_c , $[(z/z_0)_{\text{non-mag.}} - (z/z_0)_{\text{mag.}}] / (z/z_0)_{\text{non-mag.}}$.

Testing fluid	Damping ratio at f_c
MCF (K)	37.50 %
MCF (W)	32.70 %
MR (W)	37.90 %
MF (K)	8.60 %
MF(W)	3.70 %

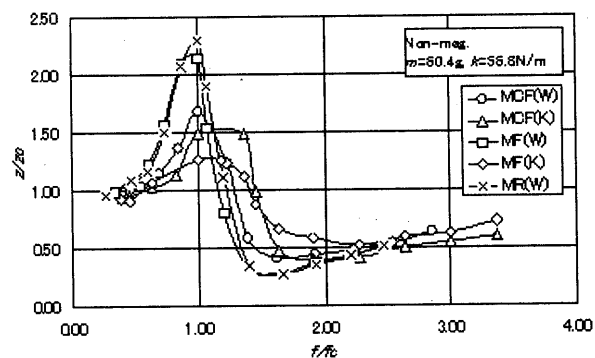


Fig. 4 Frequency characteristics using under the condition of no magnetic field.

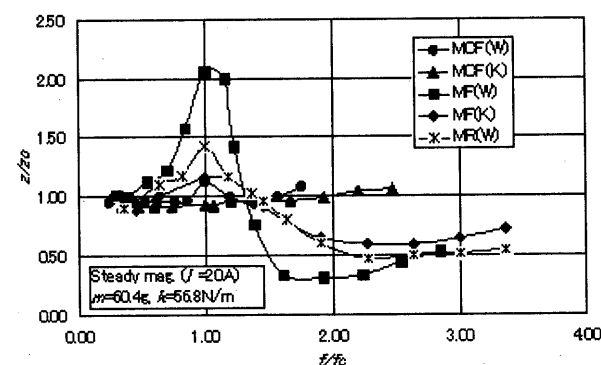


Fig. 5 Frequency characteristics under the condition of a steady magnetic field.

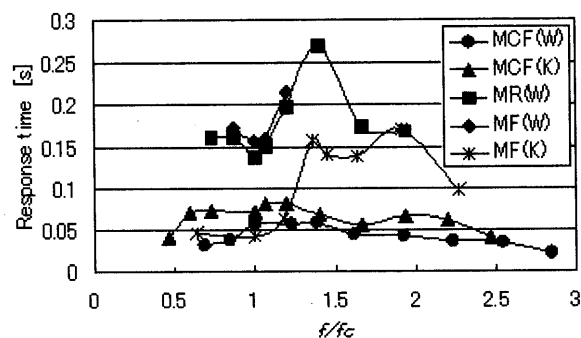


Fig. 6 Response time at the time of application of a magnetic field.

Table 1 Ingredients and concentration of testing fluid.

Testing fluid	Ingredient	Mass concentration	Density × 1000 [kg/m ³]
Kerosene base MCF : MCF (K)	• HQ : 80g • kerosene base magnetic fluid (HC50, 20wt %) : 54.96g • kerosene : 62.4g	• HQ : 40.5wt% • Fe₃O₄ : 5.5wt%	1.486
Water base MCF : MCF (W)	• HQ : 80g • water base magnetic fluid (W35, 35wt%) : 117.36g • sodium oleate : 4g • water : 193.36g	• HQ : 20.2wt% • Fe₃O₄ : 10.4wt%	1.11
Water base MR : MR (W)	• HQ : 80g • sodium oleate : 4g • water : 193.36g	• HQ : 40.5wt%	1.26
Kerosene base MF : MF(K)	• HC50 (20wt%) : 54.96g • kerosene : 70.4g	• Fe₃O₄ : 8.76wt%	0.847
Water base MF : MF(W)	• W35 (35wt%) : 117.36g • water : 142.4g	• Fe₃O₄ : 15.8wt%	1.07

ク制御された、いわゆる、セミアクチブダンパとしての特性評価が重要となってくる。そのためにも、磁場印加に対する応答時間についても調べておく必要がある。そこで、内筒の振動の印加磁場に対する応答時間について、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで、Fig. 6, 7 にそれぞれ示す。ここで、前者は、磁場を印加してから、振幅が時間的に一定の大きさに達するまでの時間であり、後者は、磁場を除去してから、振幅が時間的に一定の大きさに達するまでの時間である。このように、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで、応答時間が異なるのは、次節で後述するように、粒子の凝集の形成状態が、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで異なることに起因するものと考えられる。

しかしながら、Fig. 6, 7 は応答時間の定量的なオーダーを知るのには便利であるが、本来は、振幅比の減衰効果の度合いを同じにして、応答時間をみる必要がある。そこで、Fig. 6, 7 の応答時間を、無磁場下の振幅比から磁場印加時における振幅比を引いた値（ここでは、これを便宜上、振幅比減衰と称する）で除したものを Fig. 8, 9 に、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで、それぞれ示す。

ここで、縦軸の値である、“応答時間と振幅比減衰の比”が、共振周波数より大きな周波数領域で負の値となる場合がある。これは、Fig. 4 と Fig. 5 からわかるように、共振周波数より大きな周波数領域では、無磁場下の振幅比に対して磁場印加時の振幅比が大きくなることによる。一般に、本実験のような磁場に反応する機能性流体を用いたパッシブダンパの場合、共振周波数か、または、それより小さな周波数領域では、無

磁場下の振幅比に対して磁場印加時の振幅比が小さくなるが、共振周波数より大きな周波数領域では、無磁場下の振幅比に対して磁場印加時の振幅比が大きくなる。この傾向は、既に、島田ら [1] により、MF ダンパの場合において指摘されている。本実験の周波数領域にわたってみると、ほぼ MF, MR, MCF の順に、応答時間と振幅比減衰の比が小さくなる周波数領域が広い。

また、Fig. 8 では、ケロシンベース MCF のほうが水ベース MCF より、応答時間と振幅比減衰の比について、明確な有意差は認められないが、Fig. 9 からでは、 $f/f_c < 1$ の低周波数領域において、ケロシンベース MCF のほうが水ベース MCF より、応答時間と振幅比減衰の比が小さい。

4 クラスタによる影響

MF, MR, MCF の場合には、磁場を印加することにより、粒子がクラスタを形成することがわかっている。特に、MF や MR については、多くの研究者により、クラスタの研究が行われている。

このクラスタに関して、MF や MR, ER 流体などのコロイド溶液におけるクラスタそのものを取り出す工学的技術については、国内外ともに未だ報告されていない。しかしながら、MCF や MR について、著者の一人の島田は、流体中のクラスタを流体より抽出し、実体顕微鏡にて観察できることに成功した [8]。その工学的技術は、既に特許申請を得たものであるが、その詳細については、他論文 [8] を参照して頂くとして、ここでは、本研究に関する所見のみ述べる。すなわち、Table 1 に示す流体について、ある磁場強度の定

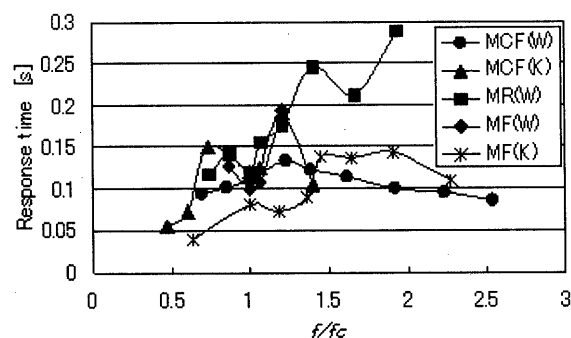


Fig. 7 Response time at the time of removal of a magnetic field.

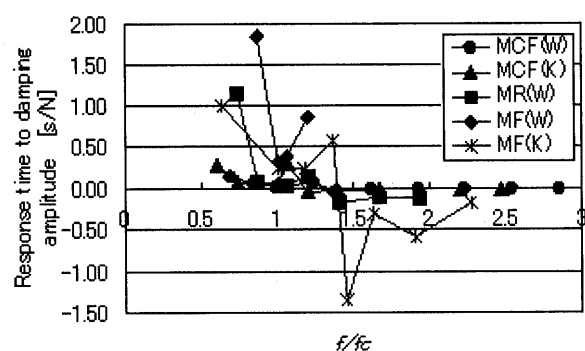


Fig. 8 The ratio of response time to damping effect at the time of application of a magnetic field.

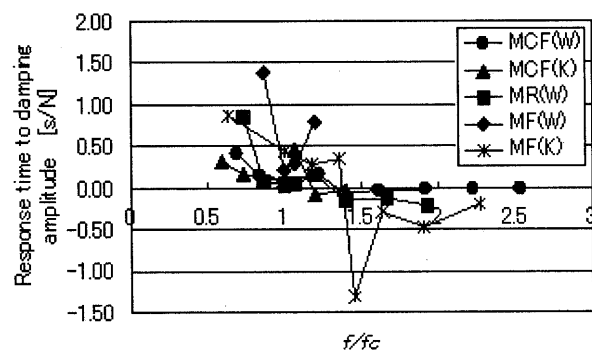


Fig. 9 The ratio of response time to damping effect at the time of removal of a magnetic field.

常磁場を印加した状態で、溶媒を追加し、続いて溶媒を流し出すという操作を数回繰り返し、クラスタを濾し取る。このとき、クラスタを印加磁場に引き寄せるようにしておく。このような過程を通して、実体顕微鏡にて観察でき得るクラスタを抽出することができる。

Fig. 10 - Fig. 12 に、Table 1 に示す供試流体 MCF(K), MCF(W), MR(W) について、3000 ガウスの下で抽出したクラスタの実体顕微鏡で観察した結果を示す。Fig. 10 - Fig. 12 からわかるように、棒状もしくは針状のクラスタが多数存在する。このクラスタは、鉄粒子とマグネタイト粒子からなる、一種の凝集体である [5] - [7]。

前節 3 で述べた、振幅比や応答時間の周波数特性は、Fig. 10 - Fig. 12 のクラスタに起因することが予想される。そこで、これらのダンパの実験結果について、以下のように考察できる。

まず、振幅比についてみる。Fig. 10 - Fig. 12 のクラスタの写真は、無磁場下のものであるため、それぞれのクラスタは勝手な方向に配向している。一方、磁場を印加すると、その磁力線方向にクラスタが配向することを他に観察している。このことより、付録の Fig. 14 に示すように、MCF や MR の場合は、本実験装置における内筒と外筒の間に、 z 軸に対して垂直に印加された磁力線方向に多数のクラスタが配向する。このクラスタが内筒に接すると、内筒に働くせん断応力が大きくなるため、磁場印加により内筒の振幅が減衰する。これに対して、MF の場合にも同様に、粒子が磁力線方向に配向するが、マグネタイト粒子によるクラスタの大きさは MCF や MR のクラスタの大きさに比べて圧倒的に小さいので、MCF や MR の場合よりも、内筒に接するクラスタによる内筒に働くせん断応力は大きくならない。したがって、MF の磁場印加による内筒の振幅の減衰は、MCF や MR のそれらより小さくなる。

一方、Fig. 10 に示すような MCF(K) のクラスタのほうが、Fig. 11 に示すような MCF(W) のクラスタよりも、大きさは小さいものの、数がより多い。そのとき、そのクラスタが内筒に接すると、内筒に働くせん断応力が、MCF(K) のほうが MCF(W) よりも大きいことになる。したがって、MCF(K) のほうが MCF(W) よりも、磁場印加による内筒の振幅の減衰が大きくなる。

次に、応答時間についてみる。前節で述べたように、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで、応

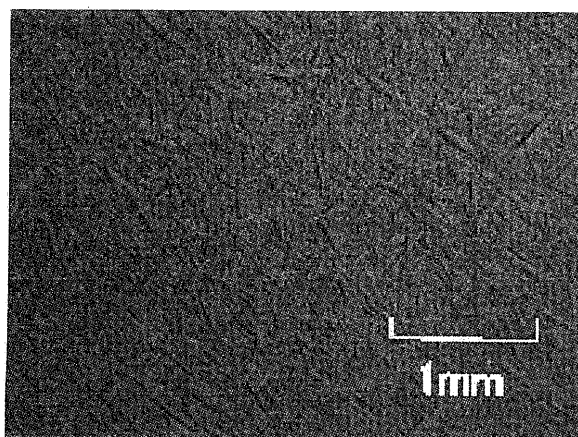


Fig. 10 Photograph of clusters of MCF(K) produced under $H_{\max}=3000$ gauss as seen by microscope with magnification $\times 60$.

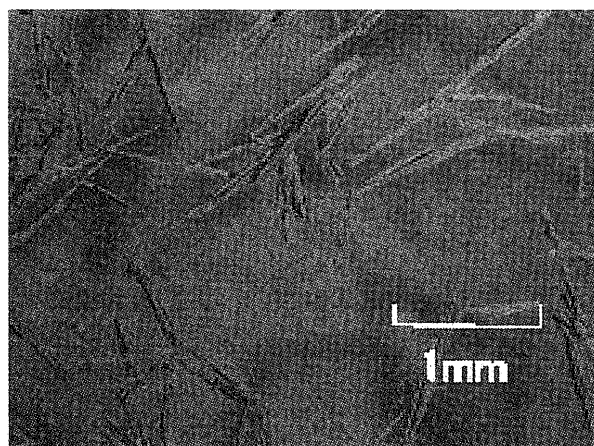


Fig. 11 Photograph of clusters of MCF(W) produced under $H_{\max}=3000$ gauss as seen by microscope with magnification $\times 60$.

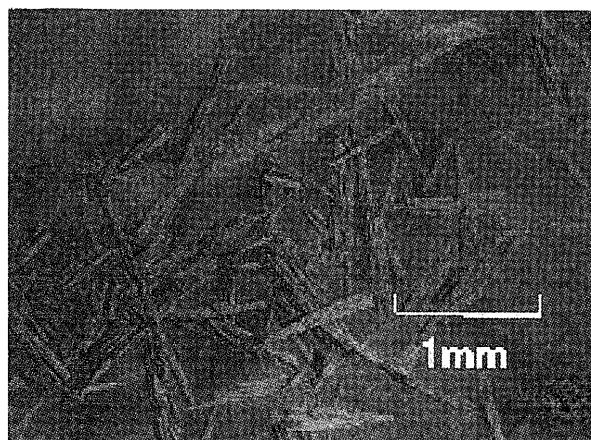


Fig. 12 Photograph of clusters of MR(W) produced under $H_{\max}=3000$ gauss as seen by microscope with magnification $\times 60$.

答時間が異なる。これは、鉄粒子の場合には残留磁化を有するため、Fig. 10 - Fig. 12 に示すようなクラスタの形成が、磁場と流れの両方から影響を受ける過程において、磁場を印加した時と磁場を除去した時とで異なるためである。

また、Fig. 10 に示すような MCF(K) のクラスタのほうが、Fig. 11 に示すような MCF(W) のクラスタよりも、大きさが小さい。このとき、クラスタを形成するまでの時間がより短くてすむと考えると、応答時間が、MCF(K) のほうが MCF(W) よりも小さくなると予想される。しかしながら、これは、Fig. 9 の結果を説明するものであるが、クラスタの形成過程が複雑であると考えられるため、全般的に、応答時間とクラスタの関係については、さらなる実験的、あるいは理論的検討が必要である。

5 まとめ

粘性ダンパの開発の上で問題となっている磁場に反応する流体の諸問題を背景に新しく開発した MCF について、パッシブ型の粘性ダンパに適用し、その振幅特性や時間応答特性について実験的に調べた。また、クラスタを用いて実験結果を考察した。

- (1) 本実験の周波数領域においては、MF よりも MR, MCF のほうが、磁場印加による無磁場下からの振幅比の減衰が大きい。
- (2) 磁場印加による無磁場下からの振幅比の減衰で除した応答時間は、MF, MR, MCF の順に小さくなる。
- (3) (1) および (2) の実験結果は、磁場印加によるクラスタの形成を用いて考察できるが、応答時間については、さらなる検討が必要であると考えられる。

(2002 年 11 月 19 日受付)

参考文献

- [1] 島田邦雄, 神山新一, 磁性流体の粘性ダンパの振動特性に及ぼす磁場の影響, 日本機械学会論文集, 59 巻 567 号 B 編, (1993), pp.3493-3497.
- [2] K. Sunakoda, H. Sodeya, N. Iwata, H. Fujitani and S. Soda, Dynamic characteristics of magnet-rheological fluid damper, Proc. SPIE, Smart Structures and Materials, Newport Beach, Vol. 3989 (2000) pp.194-203.

- [3] J. D. Carlson and M. R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatoronics, Vol. 10 (2000) pp.555-569.
- [4] T. Pranoto, 長屋幸助, 細田敦史, MR 流体を用いたせん断型リニアダンパの開発とそれによる平板型構造物の制振, 日本機械学会論文集, 68 巻 667 号 C 編 (2002) pp.761-767.
- [5] 島田邦雄, 藤田豊久, 岡 英夫, 赤上陽一, 神山新一, MCF(磁気混合流体)の流体力学的特性と磁化特性, 日本機械学会論文集, 67 巻 664 号 B 編 (2001) pp.3034-3040.
- [6] 島田邦雄, 藤田豊久, 神山新一, 赤上陽一, 磁気混合流体(MCF)の流動特性に及ぼす諸因子の影響についての実験的研究とその応用, 日本 AEM 学会誌, 10 巻 1 号 (2002) pp.67-72.
- [7] K. Shimada, Y. Akagami, T. Fujita, T. Miyazaki, S. Kamiyama, and A. Shibayama, Characteristics of MCF (Magnetic Compound Fluid) in a rotating rheometer, J. Magn. Magn. and Mat., Vol. 252 (2002) pp.235-237.
- [8] K. Shimada, T. Miyazaki, A. Shibayama and T. Fujita, Extraction of magnetic particle clusters self-assembled by a magnetic field Smart Materials and Structures, Vol.12 No.2 (2003) pp.297-303.

付録

Table 3 に, 各供試流体の共振周波数 f_c の実験値について示す。

本実験により, MCF, MR 流体, 磁性流体により, 磁場印加時の振幅比の周波数特性には, Fig. 13 に示すような定性的傾向がある。

Fig. 10 - 12 に示すクラスタが, 本実験における粘性ダンパ内で, Fig. 14 に示すように, 磁場印加により, 形成されると考えられる。

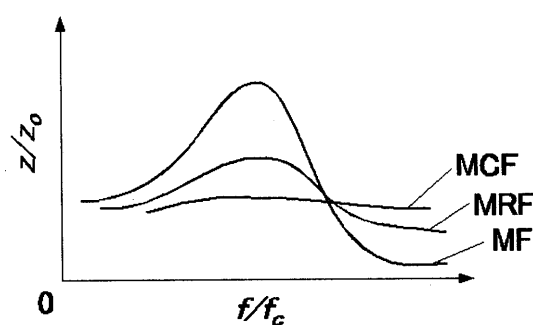


Fig. 13 Quantitative results of frequency characteristics under a magnetic field.

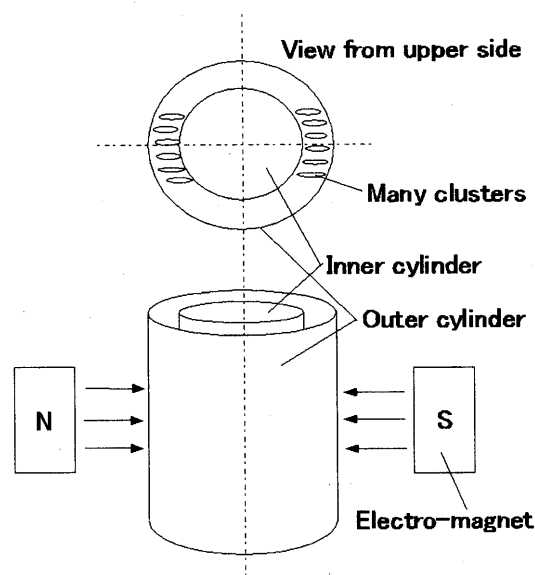


Fig. 14 Cluster model in a cylindrical damper.

Table 3 Experimental data of f_c .

Testing fluid	$f_c[Hz]$	
	non magnetic field	magnetic field
MCF (K)	2.75	3.75
MCF (W)	3.25	5.25
MR (W)	3.75	2.75
MF (K)	2.75	2.75
MF(W)	3.75	3.25