

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560206

研究課題名(和文)磁気機能性流体の過渡応答特性におよぼす印加磁場の影響

研究課題名(英文)Influence of magnetic fields on transient response of magnetic functional fluids

## 研究代表者

澤田 達男 (Sawada, Tatsuo)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：00162545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁性流体やMR流体中には磁性体微粒子が含まれており、磁場によって形成されるクラスターが、様々な変化を流体内部に生じさせる。これらの磁気機能性流体を取り巻く環境を動的に変化させ、磁気機能性流体の動的諸特性を明らかにすることを目的として、同調液柱管ダンパーに関する実験、超音波伝播特性に関する実験、ダクト内流動に関する実験、を遂行した。その結果、振動磁場下での様々な現象をある程度明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Magnetic fluids (MF) and magnetorheological fluids (MRF) are stable colloidal dispersion of small magnetic particles in a liquid carrier. When an external magnetic field is applied to an MF or MRF, some of the inner particles coagulate and form a clustering structure. In the present study, the following experiments were carried out: (1) The author quantitatively investigated the damping coefficient generated by the flow of magnetic fluid, which is strongly related to the damping performance. (2) Ultrasonic propagation velocity was measured and the change of ultrasonic propagation velocity was calculated. Based on the experiment results, the relation between the change of ultrasonic propagation velocity and magnetic field strength and frequency of magnetic field were discussed. (3) Pressure drop in a square duct flow of a magnetic fluid was investigated experimentally. DC and AC magnetic fields were applied to the flow.

研究分野：流体工学

キーワード：磁性流体 MR流体 超音波 クラスタ ダクト内流れ 磁場

### 1. 研究開始当初の背景

近年の目覚ましい技術革新により、流体中に特有の機能を有する微粒子を分散させることで、流体に様々な機能を持たせる事が可能となった。これらの流体は、機能性流体と総称されており、温度、重力、電磁場などの外部環境に反応してその性質が変化する。現在、機能性流体工学は、新たな研究分野としての体系化が図られてきている。

特に磁場に反応する磁気機能性流体では、印加磁場によってその特性が大きく変化し、多くの分野において応用研究がなされてきている。磁気機能性流体としては、磁性流体と MR 流体 (Magnetorheological fluid) が代表的である。これらは、強磁性微粒子に界面活性剤を添加した機能性微粒子を水やケロシンなどの溶媒に分散させたもので、この内部微粒子の大きさの違いから、磁性流体は印加磁場によってその流動特性が大きく変化し、MR 流体は磁場に敏感に反応して降伏応力が変化し、半固体化する。これらの諸特性は、磁場印加方向に内部の強磁性微粒子のクラスターが形成される事に起因する。

そこで、申請者は磁性流体や MR 流体中の超音波伝播特性の印加磁場による変化を調べる事により、印加磁場とクラスター構造との関係を実験的に検討してきており、クラスター構造に及ぼす磁場の影響がある程度明らかになってきている。

### 2. 研究の目的

これまでの研究成果により、磁性流体や MR 流体といった磁気機能性流体の超音波伝播特性が印加磁場によって大きく変化し、それが内部のクラスター形成と関連があることが、様々な実験を遂行する事によって明らかになってきている。しかしながら、クラスター形成に起因する特徴的な現象を実験的に捉えているものの、これらは主に準定常状態での結果である。

印加磁場、外力、圧力、加振振動といった機能性流体をとりまく環境が動的に変動した場合、その影響は内部のクラスターに大きな影響をおよぼすと考えられる。そこで、本研究では、磁性流体や MR 流体内部に形成されるクラスターの動特性を様々な観点から調べる事を目的としている。交流磁場を印加した場合の両流体中の超音波伝播特性変化、衝撃力や変動圧力が加わった場合の特性変化等を実験的に調べていく。

### 3. 研究の方法

本研究では、幾つかの実験を並行して実施し、様々な環境下での磁性流体や MR 流体の動特性を調べている。

#### (1) U 字管内の磁性流体振動

実験装置の概要を図 1 に示す。実験装置は加振台・構造物・MF-TLCD (磁性流体を用いた同調液柱管ダンパー) で構成され、コイルばねを介して構造物に振動を加えることが

できる。MF-TLCD は、U 字管容器と円筒形電磁石で構成され、磁性流体を作用流体として使用した。同じ電磁石が左右に設置され、直流電源装置から一定の電流を入力することで定常磁場を印加できる。加振台と構造物の変位はレーザー変位計で測定し、液面変位に伴う圧力変動を圧力センサによって測定した。圧力センサは容器の底面に 1 箇所、側面に 2 箇所設置されている。これは一方の電磁石のみを使用した場合に左右で液面形状が非対称となり、圧力センサの設置位置による測定結果の差が生じる可能性があるため、検証的使用を目的としている。

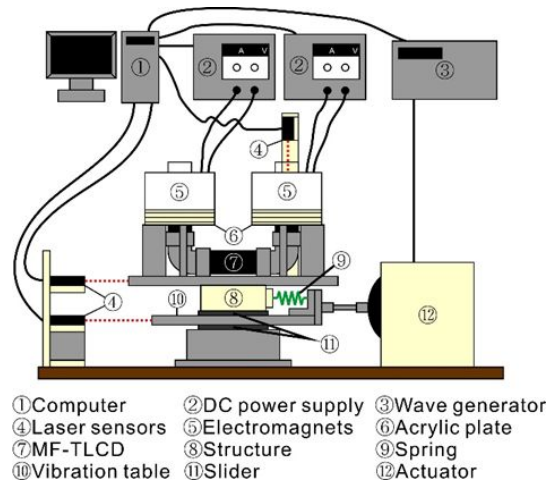


図 1 MF-TLCD 実験装置

今回の実験では 電磁石を 1 つだけ用いた場合と 両方用いた場合について、それぞれ入力電流  $I$ 、電磁石位置  $h$  を変えて構造物-液柱の強制振動実験を行い、構造物振幅および圧力変動と構造物の位相差の周波数応答を求めた。ここで電磁石位置は、無磁場での磁性流体液面から電磁石中央部までの高さを表している。

#### (2) 振動磁場下での MR 流体中の音速

使用した MR 流体は 2 種類であり、両者の差異は微粒子の体積分率である。実験装置の概要を図 2 に示す。パイポラ電源により正弦波の振動磁場を発生させ、テストセル内の MR 流体に磁場を印加した。テストセルの構造を図 3 に示す。テストセル内は二重構造になっており、内部容器の周囲を恒温水が循環しており、MR 流体の温度を 25 に保っている。内部容器の外側壁面に 4 MHz の超音波振動子を取り付け、超音波を発生させ、MR 流体中を伝播した超音波信号をオシロスコープによって捉えている。音速変化の評価方法として以下の音速変化率を導入した。音速変化率は以下の式により定義される。

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{L/T - L/T_0}{L/T_0} = \frac{T_0 - T}{T} \quad (1)$$

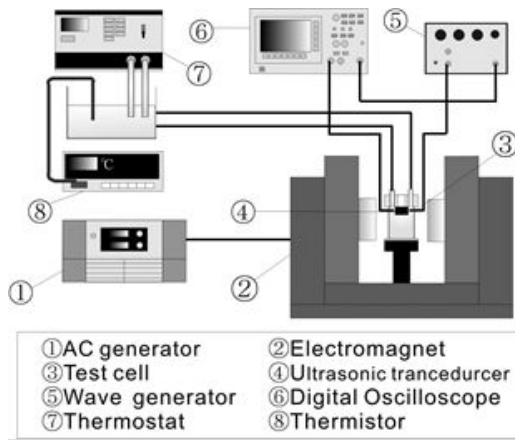


図 2 音速測定装置

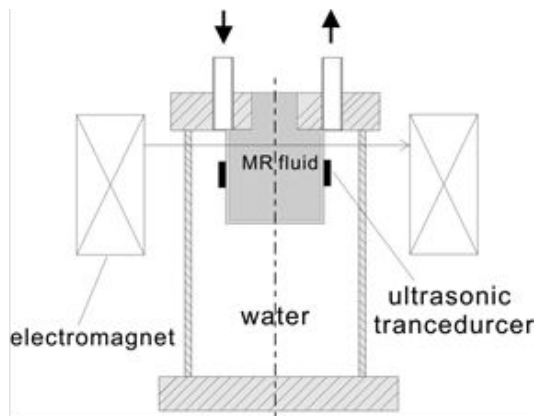


図 3 テストセル

ここで、 $V_0$ 、 $T_0$  はそれぞれ無磁場での音速、音速伝播時間である。 $L$  は超音波伝播距離であり、式(1)からわかるように、音速変化率は  $L$  に依らないため、本手法は精度の高い評価方法といえる。

本研究では交流磁場の強さ  $B_{rms}$  を次式で定義した。

$$B_{rms} = \left( \frac{B_{max}}{\sqrt{2}} \right) \quad (2)$$

### (3) 磁性流体のダクト内流れ

図 4 に実験装置を示す。流路は全長 2350 mm の開放型流路である。計測部の流路断面は 13 mm × 13 mm の正方形断面となっており、計測部前方には、安定した流れを得るために 1250 mm の助走区間を設けた。磁性流体は下部タンクから上部タンクへとポンプでくみ上げられ、流路に流入する。手動バルブで流量を、電磁弁によって流動の開始・停止を制御している。計測部側面に 2 つの電磁石を設置し、流れ方向と垂直に磁場を印加した。流路下部の 2 箇所の圧力孔より差圧を計測し、圧力損失を算出した。磁性流体には水ベースの MSGW11 (フェローテック社) を使用した。

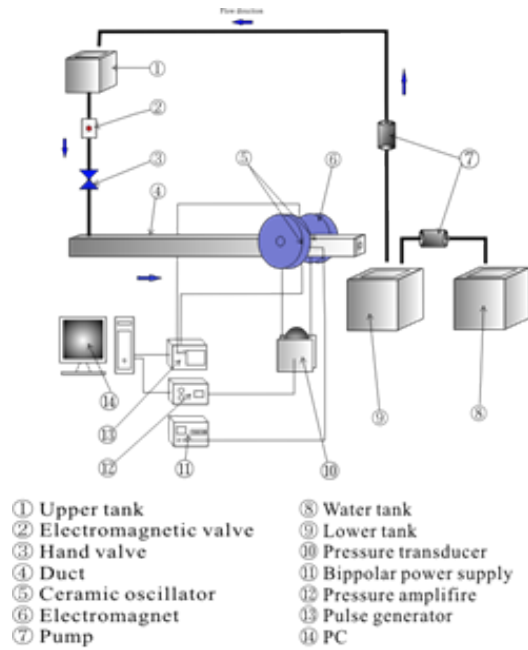


図 4 磁性流体のダクト内流れ実験装置

本研究では、直流磁場に交流磁場を加えた合成磁場下で実験を行った。単純な交流磁場では時間平均磁場強度はゼロであるが、直流・交流合成磁場では、直流磁場の磁場強度  $B_{dc}$  を中心に磁場強度は変動する。

### 4. 研究成果

(1) U 字管内の液柱振動については、 $h = 30, 0, 30$  mm として、一自由度強制振動実験を行い、無次元液面振幅  $a_m / a_0$  周波数応答得た。その代表的な結果を、図 5 に示す。なお、 $a_m$  は磁性流体液柱液面振幅を表す。レーザー変位計を用いて液面振幅を測定することによって、共振点付近を含めて全体的に滑らかな応答曲線を得ることができた。しかし、 $h = 30$  mm で磁場を強く与えると液面勾配が急になり測定結果に少しばらつきが見られた。一自由度強制振動系では、周波数応答の極大値における加振周波数が液柱固有振動数と一致する。実験結果を見てみると、 $h = -30$  mm

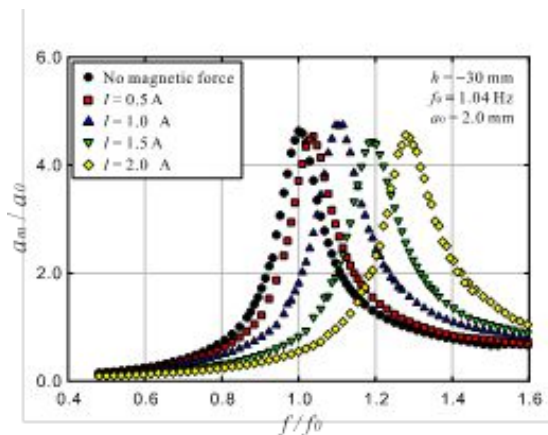


図 5 周波数応答



の場合には電流を大きくし磁場を強くすることで共振点が右側へ推移していることがわかる。つまり、この場合には液柱固有振動数は増加している。逆に、 $h = 30$  mm の場合には磁場を強く与えるほど固有振動数は減少している。また、 $h = 0$  mm の場合、左右の液面に働く磁気体積力が振動中に常に互いに打消しあうため、見かけ上は磁性流体に力が加えられていない状態となる。しかし、磁場を強くするにつれて少しずつではあるが固有振動数が減少している。これは磁場印加による液面形状変化が原因であると考えられる。磁場印加時、液面は中心位置が下がるように勾配を作る。この傾向は磁場が強いほど顕著であり、これによって設定した  $h$  よりも少し大きな値を実際の  $h$  は取ったため固有振動数は減少したと考えられる。

(2) MR 流体中の音速変化に関する実験では、 $B_{rms}=10$  mT、周波数 1 Hz、2 Hz、3 Hz の磁場を印加した時の音速変化率の経時変化をまず求めた。試験流体は MR122 で、測定時間は 600 s である。測定開始から音速変化率が上昇後、600 s 時点ではそれぞれの条件で音速変化率がほぼ一定と見なせる状態となった。これは、磁場印加後に形成されるクラスターの成長が止まり、定常状態となっていることを示す。以下の実験結果はクラスターの成長が止まったと見なせる測定開始後 600 s での測定結果を用いた。

図 6 に MR122 に  $B_{rms}$  を 10, 30, 50 mT、周波数を 1, 2, 3 Hz の条件で、それぞれ磁場印加した時の音速変化率と  $B_{rms}$  の関係を示す。これによると、 $B_{rms}$  が増加するに従い、音速変化率は減少傾向にあることがわかる。MR 流体中に形成されるクラスターの大きさが振動磁場によって変動するのだが、周波数が増加するにつれてその変動幅が減少すると考えられる。その結果、音速変化率が周波数増加に伴って減少したものと考えられる。また、各周波数で音速変化率に大きな変化がなかったことがわかる。これは周波数によるクラスターの大きさへの影響が小さかったことを示す。

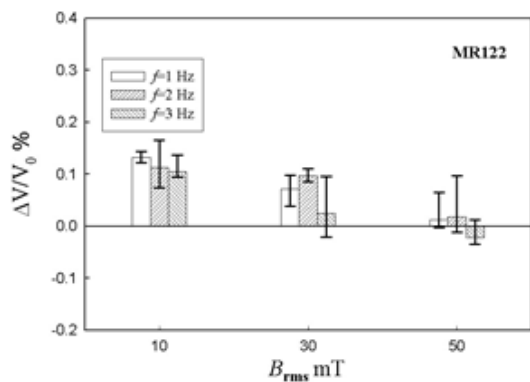


図 6 音速変化率の周波数依存性

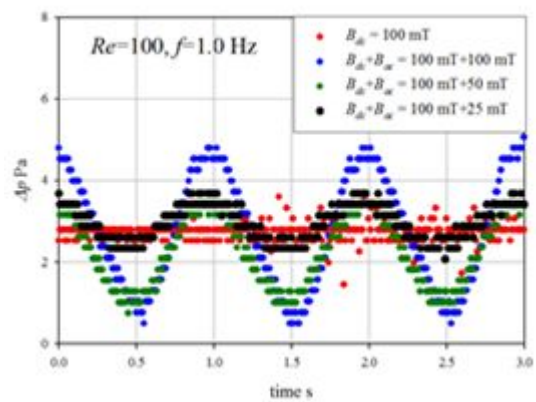


図 6 圧力損失と磁場強度との関係

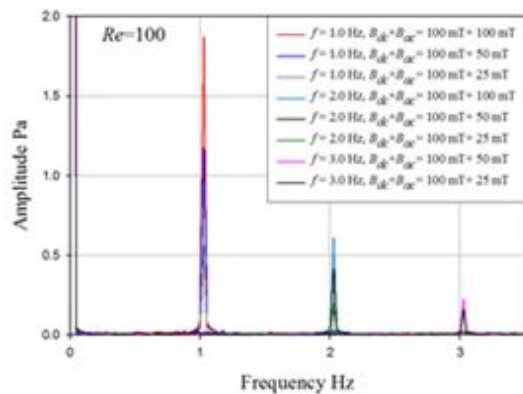


図 7 圧力損失の FFT 解析

(3) 磁性流体図 6 に磁場強度と圧力損失との関係を示す。レイノルズ数は、 $Re (= \rho a U / \mu) = 100$ 、である。ここで、 $\rho$  は、密度である。直流磁場下では圧力損失の値は交流磁場下と比較して一定だが、合成磁場下では直流磁場下での圧力損失の値を中心に変動し、変動周期にも規則性が見られた。圧力損失の振幅は、磁場強度に応じて増加するが、高い磁場周波数では減少した。圧力損失の変動は、内部粒子または、磁性流体クラスターの振動に起因すると考えられる。そこで、圧力損失の FFT 解析を行った。図 5 に各磁場周波数における圧力損失の FFT 解析結果を示す。圧力損失は磁場周波数と等しい周波数で変動する。振幅は交流磁場強度に伴って増加し、磁場周波数が増加すると減少した。単純な交流磁場では、磁場強度はその絶対値となるために、磁場強度変動周波数は磁場周波数の 2 倍で与えられる。しかし、合成磁場下では、直流磁場強度  $B_{dc}$  を中心に変動するため、磁場強度の変動周期は、磁場周期と一致する。よって、圧力損失は磁場周波数と等しい周波数で変動したと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

Takayoshi Ishiyama, Shunsuke Kaneko, Shin-ichiro Takemoto and

Tatsuo Sawada, Relation between the dynamic pressure and displacement of the free surface in two-layer sloshing with magnetic fluids and silicone oil, Materials Science Forum, 査読有り, Vol. 792, 2014, pp.33-38.  
10.4028/www.scientific.net/MSF.792.33

Ahmad Isnikurniawan, Yasuhiro Fujita, Sachio Tanimoto and Tatsuo Sawada, Investigation of inner structure in magnetic fluid under compression using ultrasonic measurement, Materials Science Forum, 査読有り, Vol. 792, 2014, pp.147-152.  
10.4028/www.scientific.net/MSF.792.147

Kazuki Ikari, Hideaki Masuda, Toshiyuki Oyamada and Tatsuo Sawada, Frequency analysis of semi-active tuned magnetic fluid column damper with two electromagnets, Materials Science Forum, 査読有り, Vol. 792, 2014, pp.275-280.  
10.4028/www.scientific.net/MSF.792.275

Toshiyuki Oyamada, Hideaki Masuda, Kazuki Ikari and Tatsuo Sawada, Damping characteristics of a magnetic fluid tuned liquid column damper under static magnetic fields, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有り, Vol. 45, 2014, pp.659-665.  
10.3233/JAE-141890

Hideaki Masuda, Toshiyuki Oyamada and Tatsuo Sawada, Experimental study on damping characteristics of the tuned liquid column damper with a magnetic fluid, Journal of Physics: Conference Series, 査読有り, Vol. 412, 2013, 012049 (9pp).  
10.1088/1742-6596/412/1/012049

Ahmad Isnikurniawan, Jun Kuroiwa, Shunnosuke Abell and Tatsuo Sawada, Investigation of cluster growth in MR fluids using an ultrasonic wave propagation, Journal of Physics: Conference Series, 査読有り, Vol. 412, 2013, 012019 (5pp).  
10.1088/1742-6596/412/1/012019

Akihiro Nakamura, Satoshi Suzuoka and Tatsuo Sawada, Cluster formation in two-dimensional channel flow of a magnetic fluid under uniform magnetic field, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有り, Vol. 39, 2012,

pp.563-568.  
10.3233/JAE-2012-1511

[学会発表](計35件)

Tomohiko Kato, Yasuhiro Fujita and Tatsuo Sawada, Magnetic fluid clusters creation process and effect of clusters on two-dimension flow, 14th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, 2014年7月8日, Granada (Spain).

Takayoshi Ishiyama, Shunsuke Kaneko, Shin-ichiro Takemoto and Tatsuo Sawada, Two-Layer fluids sloshing under a horizontal magnetic field, The 12th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, 2013年11月2日, 奈良県新公会堂 (奈良県・奈良市).

Yasuhiro Fujita, Ahmad Isnikurniawan, Sachio Tanimoto and Tatsuo Sawada, Ultrasonic propagation characteristics of a magnetic fluid under AC magnetic fields, Abstract Book of The 16th edition of the International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013年8月2日, Quebec (Canada).

Toshiyuki Oyamada, Hideaki Masuda, Kazuki Ikari and Tatsuo Sawada, Damping characteristics of a magnetic fluid tuned liquid column damper under static magnetic fields, Abstract Book of The 16th edition of the International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013年7月31日, Quebec (Canada).

Takayoshi Ishiyama, Shunsuke Kaneko, Shin-ichiro Takemoto and Tatsuo Sawada, Dynamic pressure change of two-layer sloshing using a magnetic fluid, ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2013年7月8日, Lake Tahoe (USA).

Kazuki Ikari, Hideaki Masuda, Toshiyuki Oyamada and Tatsuo Sawada, Frequency analysis of semi-active tuned magnetic fluid column damper with two electromagnets, The 8th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, 2013年6月25日, Athens (Greece).

Yasuhiro Fujita, Ahmad

Isnikurniawan, Sachio Tanimoto and  
Tatsuo Sawada, Ultrasonic  
characteristics of a magnetic fluid  
under compressive force, The 13th  
International Conference on Magnetic  
Fluids, 2013 年 1 月 10 日, New Delhi  
(India).

〔その他〕

ホームページ等

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/0170/0005937/pblc1.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

澤田 達男 (SAWADA, Tatsuo)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号 : 00162545

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし