

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560186

研究課題名（和文） 超音波を用いた磁気機能性流体の磁気応答特性に関する研究

研究課題名（英文） Ultrasonic propagation properties in magnetic functional fluids under magnetic fields

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

研究成果の概要（和文）：内部に強磁性体微粒子を含んだ懸濁液は、磁性流体や磁気粘性流体（MR 流体）と呼ばれている。これらの流体に磁場を印加すると、内部の微粒子が集まって磁力線の方向に微粒子の凝集構造が（クラスター）が形成される。磁性流体や MR 流体は黒色不透明であるので、クラスターを通常の方法では調べる事は難しい。そこで、本研究では流体中の超音波伝播特性が磁場によってどのように変化するかを調べ、磁場とクラスターの関係を検討した。

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. Usual conventional measuring technique cannot be applied because MF and MRF are opaque. In this study, measurement of ultrasonic propagation velocity in each of MF and MRF were reported precisely. Based on these results, the clustering structures of these fluids were analyzed and the application of non-contact inspection in these fluids by ultrasonic techniques was discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：磁性流体, MR 流体, 超音波, クラスター, 音速

1. 研究開始当初の背景

現在、機能性流体力学は、新たな研究分野としての体系化が図られてきている。特に磁場に応答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ナノ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(磁性流体：約 10nm, MR 流体：数 μm)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応答して半固体化する。これらの特性は、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。

しかし、クラスター構造と様々な現象変化との因果関係は明らかにされていない。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いる。その結果、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。

2. 研究の目的

上述したように、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ことによって、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、超音波伝播特性の磁場による変動メカニズムは未だ明らかになっていない。これまでも、いくつかの理論研究がなされているが、様々な条件下での理論展開であり、実験結果を明確に説明しうる研究はなされていないのが現状である。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と超音波伝播特性との因果関係を明らかにすることを目的としている。そして、磁気機能性流体中に形成される内部構造を解明するための、超音波非接触測定技術を確立していく。

3. 研究の方法

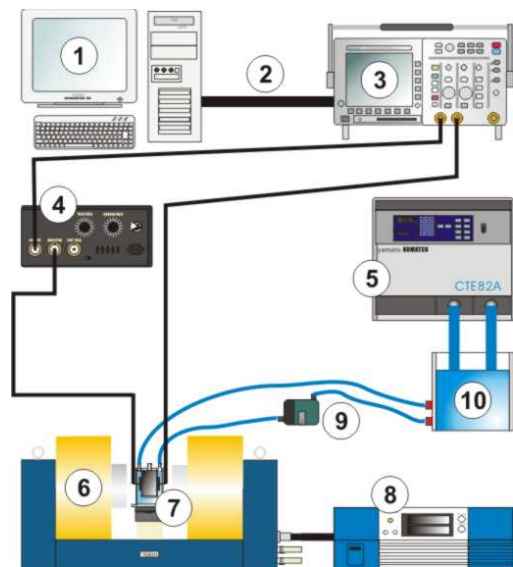
(1) 磁性流体および MR 流体中を伝播する超音波の伝播速度を測定する計測システムを構築した。その実験装置図が、図 1 である。試験容器⑦には 2 個セラミック振動子が取り付けられており、④のパルス発生装置からの信号が流体中を伝播し、デジタルオシロスコープ⑤に取り込まれる。恒温水供給装置⑤によって一定温度の水が試験容器を循環している。①の PC においては、データ取り込み関連のソフトウェアの構築を行っている。

(2) 計測においては、以下のパラメータを変化させて、実験を遂行した。(a)磁場強度、(b)

磁場印加方向、(c)印加磁場強度の時間変化率、(d)磁性流体の磁化・微粒子濃度、(e)磁性流体温度

(3) これまでの研究成果を踏まえ、実際の流れ場での計測を試みる。超音波振動子の設置の関係から、アスペクト比の大きな矩形管を用いた流動実験を行う。磁場印加時の、流動抵抗、流量、超音波伝播特性を同時に計測する実験装置の設計・製作を行った。装置全体の概要を図 2 に示す。磁性流体はポンプ⑥によって上部タンク②に移送される。⑧の電磁弁によって、磁性流体の流動が開始される。①の矩形流路には、圧力センサー⑩と超音波振動子⑨が設置され、圧力降下および超音波伝播速度を計測することができる。永久磁石⑨によって磁場を印加している。流路内の磁性流体温度を一定に保つために、恒温水供給装置⑤によって、一定温度の水が下部および上部タンクの回りを循環している。

(4) 磁性流体の円管内振動流に関する過去の実験から、クラスター成長形態、流動に基づくクラスター崩壊過程が、磁場印加時間によって大きく異なる事がわかっている。そこで、定常流の場合にも同様の事が生じているかどうかの検討を行った。流動の開始・停止、磁場強度の増減、磁場印加時間の制御、超音波伝播特性の計測を、同時にコントロールす



1 Personal computer 6 Electromagnet
 2 GPIB cable 7 Test cell
 3 Digital oscilloscope 8 DC power supply
 4 Pulse generator 9 Pump circulator
 5 Temperature Control Unit 10 Tank

図 1 超音波伝播速度計測システム

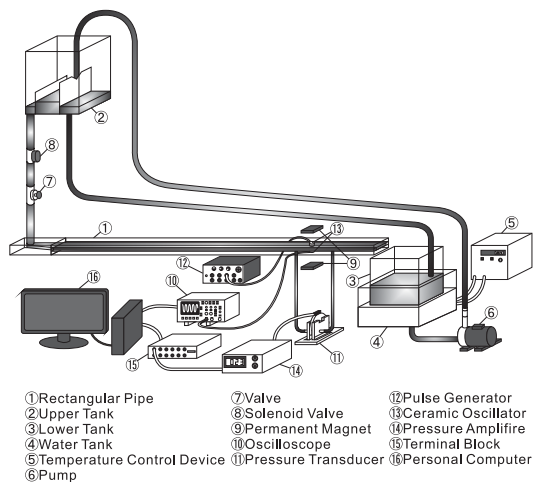


図2 矩形流路内の磁性流体流動装置

る測定系を構築した。磁場強度，磁性流体の種類を色々変化させて，流動実験を行った。

4. 研究成果

(1) 磁性流体の超音波伝播速度に関する実験から，特徴的な事を述べる。

クラスターによって生じる濃度分布に起因する超音波伝播特性変化を検討するため，水ベース磁性流体を純水によって希釈して，音速変化率を測定した。図3では，磁性流体中の音速変化の異方性を 100 mT, 300 mT, 500 mT の各磁場において濃度別に示した。まず，30 wt%, 20 wt% の濃度の磁性流体では， $\theta = 45^\circ$ 付近に音速の最大部分が現れている。

磁性流体をネマティックな液晶と見なした Parsons の理論研究によると，液晶状態では，内部を伝播する音速は $\sin^2 2\theta$ に依存する事が報告されている。液晶は，棒状あるいは円盤状の異方的な形をもつ分子からなり，結晶と液体の中間相と言え，秩序の低い相から順に，ネマティック相，スメティック相，柱状相に分類される。従って，30 wt%, 20 wt% の濃度の磁性流体においては，磁場印加によって，クラスター構造が，Parsons の理論で示されるネマティック液晶の状態に近づいたものと予想される。さらに，10 wt% の磁性流体では $\theta = 0^\circ$ 付近で異方性は見られるものの， θ の大きな領域では，異方性はほとんど捉えられていない。これは，磁性流体内部の磁性体微粒子の割合が小さく，磁性流体が溶媒の状態に近づいており，磁場による影響が小さくなったからと考えられる。

以上より，磁性流体内部の磁性体微粒子の割合によって，磁場印加時の内部状態は異なり，それぞれに特有の異方性があるものと考えられる。

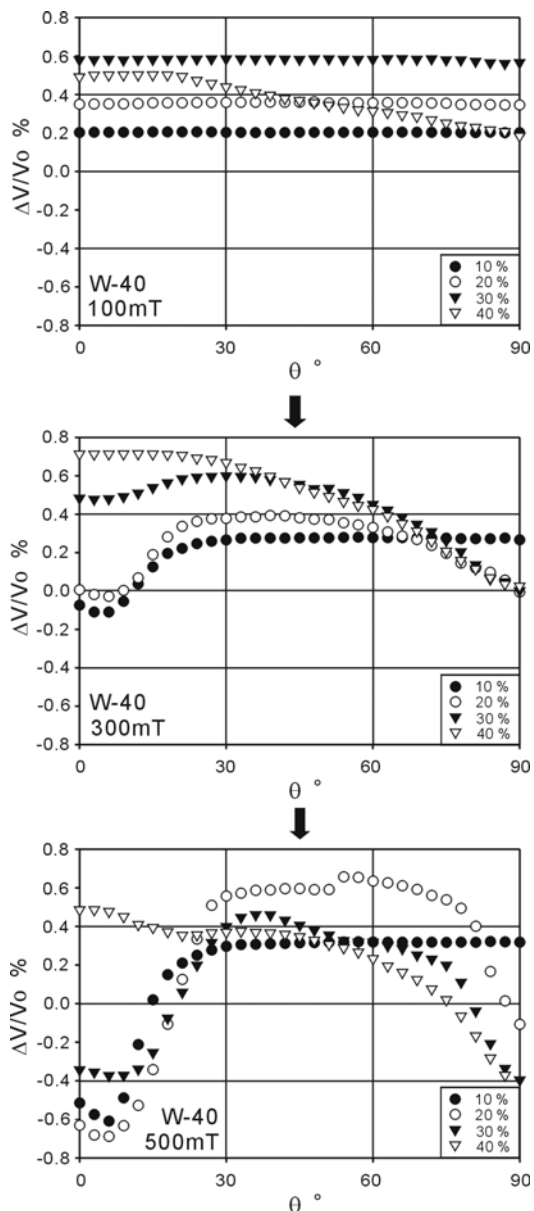


図3 微粒子濃度の音速異方性への影響

(2) 矩形流路を用いた実験では，磁場を長時間印加させた後の流動特性に関する結果を述べる。

図4は，磁場の印加時間 $Ta = 240$ min によって鎖状クラスターが形成された場合の圧力損失 p の経時変化を表している。 $Ta = 20$ min の場合，磁場強度が 55 mT 以下では， $Ta = 0$ の時と似た p の変化を示した。しかし，磁場強度が 65 mT においては過度応答後に再び p が上昇しているのがわかる。従って，静止場における鎖状クラスターの成長が何らかの形で圧力損失 p に影響を与えていることが考えられる。

実験は $t = 1000$ s までしか実施していなかったため，本結果だけでは鎖状クラスターに

起因する圧力損失変化の原因を特定することは難しい。考えられる一つの要因は、静止場で成長した鎖状クラスターが流動によって崩壊することなく存在している事が推測できる。そのため、磁場強度が強い時、また磁場印加時間が長い時ほど鎖状クラスターは多いと考えられ、圧力損失も大きく変化するものと考えられる。

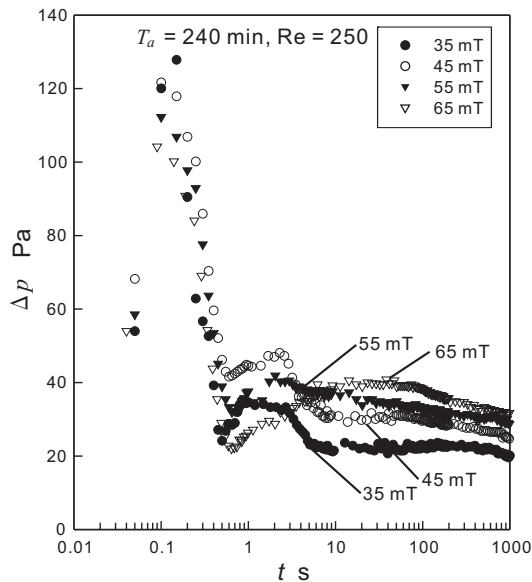


図4 圧力損失の経時変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

Muhammad Agung Bramantya and Tatsuo Sawada, The influence of magnetic field swept rate on the ultrasonic propagation velocity of magnetorheological fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 査読有, Vol. 323, No. 10, 2011, pp. 1330-1333.

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki Takuma, Jun Kuroiwa and Tatsuo Sawada, Ultrasonic investigation of the effect of volume fraction on the clustering structures of magneto-rheological fluids, 査読有, *Materials Science Forum*, Vol. 670, 2011, pp. 198-206.

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki Takuma and Tatsuo Sawada, Hysteresis phenomena of ultrasonic velocity change in magnetorheological

fluids, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 査読有, Vol. 33, Nos. 3-4, 2011, pp.365-1372.

Muhammad Agung Bramantya, Masaaki Motozawa and Tatsuo Sawada, Ultrasonic propagation velocity in magnetic and magnetorheological fluids due to an external magnetic field, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 査読有, Vol. 22, No. 32, 2010, 324102 (5pp).

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki Takuma, Mohd Faiz, and Tatsuo Sawada, Ultrasonic propagation velocity in magneto rheological fluid under a uniform magnetic field, *日本 AEM 学会誌*, 査読有, Vol.17, No.3, 2009, pp.433-436.

本澤政明, 長谷川亮, 澤田達男, 磁性流体管内振動流の超音波による速度分布計測と流体内部構造変化の流動に及ぼす影響, *日本機械学会論文集(B編)*, 査読有, Vol.75, No.753, 2009, pp.1013-1020.

[学会発表] (計 35 件)

Ahmad Isnikurniawan, Jun Kuroiwa, Shunnosuke Abell, and Tatsuo Sawada, Ultrasonic propagation attenuation in an MR fluid under an external magnetic field, *The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia*, 2011年11月14日, Kaohsiung (Taiwan).

Akihiro Nakamura, Satoshi Suzuoka, and Tatsuo Sawada, Cluster formation in two dimensional channel flow of a magnetic fluid under uniform magnetic field, *The 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2011年9月7日, Napoli (Italy).

中村彰宏, 鈴岡聡, 澤田達男, 磁性流体の二次元流路内流れにおける速度場におよぼす磁場の影響, 第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2011年5月19日, 名古屋.

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki Takuma, Jun Kuroiwa, and Tatsuo Sawada, A study on the inner structure of magnetorheological fluids by image processing, *The 6th Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010年7月28日, Kuala Lumpur (Malaysia).

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki Takuma, and Tatsuo Sawada, Hysteresis phenomena of ultrasonic velocity change in magnetorheological

fluids, The 14th International
Symposium on Applied
Electromagnetics and Mechanics, 2009
年 9 月 23 日, Xi'an (China).

Muhammad Agung Bramantya, Hiroki
Takuma, and Tatsuo Sawada, The
effect of volume fraction on the
clustering structures of
magnetorheological fluids by ultrasonic
investigation, The 6th Japanese-
Mediterranean Workshop on Applied
Electromagnetic Engineering for
Magnetic, Superconducting and Nano
Materials, 2009 年 7 月 27 日, Bucharest
(Rumania).

[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