

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820049

研究課題名(和文) 光と音による印加磁場下の磁気機能性ナノ流体の物性計測と内部構造変化が及ぼす影響

研究課題名(英文) Measurement of Physical Properties of Magnetic Fluid under Magnetic Field by Optical and Acoustic Techniques

研究代表者

本澤 政明(MOTOZAWA, Masaaki)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：50516185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、内部粒子径が10nm程度の磁気機能性ナノ流体(磁性流体)を取り上げ、光や音により非接触で熱物性変化等の計測を行い、磁場による流体内部構造変化と物性変化の相関性を精査することを目的とした。実施事項・成果は次の通りである。強制レイリー散乱法により熱拡散率の計測を行った。その結果、熱拡散率が磁場印加後から経時的に増減するといった特徴的な変化や異方性が捉えられた。超音波流速分布計測(UVP)を用いて、UVP+PD法によるレオロジー特性の推定を行った。測定システムの問題からレオロジー特性の推定には至らなかったが、乱流下の流動計測に成功し、特徴的な乱流構造の変化が捉えられた。

研究成果の概要(英文)：Magnetic fluid is a colloidal dispersion which is composed of surfactant-coated nano-order particles and carrier liquid. Because the inner particles form chain-like structure by applying magnetic field, it can be expected the physical properties vary from time to time and have anisotropy. In this study, thermal diffusivity and rheological property of the magnetic fluid were attempted to measure by forced Rayleigh scattering method (FRSM) and using ultrasonic velocity profiler (UVP), respectively. Regarding thermal diffusivity, time series variation of the thermal diffusivity of magnetic fluid was successfully measured by FRSM and characteristic configuration was obtained. On the other hand, measurement of rheological property of magnetic fluid was not succeeded because of the problem of experimental system. However, characteristic streamwise variation of turbulent structure of turbulent magnetic fluid flow by applying magnetic field was successfully obtained by UVP measurement.

研究分野：流体工学

キーワード：磁気機能性ナノ流体 磁性流体 物性計測 強制レイリー散乱法 UVP 熱流動特性

1. 研究開始当初の背景

液体中にナノオーダーの大きさの粒子を分散させた流体はナノ流体と呼ばれ、熱輸送流体として、熱物性や伝熱特性について、世界中で研究が繰り広げられている。一方、重力や温度といった外部環境に応じて、その性質を変化させる流体は機能性流体と呼ばれ、なかでも、磁場に応答する機能性流体は磁気機能性流体と呼ばれる。磁気機能性流体は内部粒子のサイズによってもその性質は異なっており、特に内部粒子径が 10 nm 程度の流体は従来磁性流体と呼ばれている。磁性流体も一種のナノ流体であることを踏まえると磁気機能性ナノ流体と呼ぶことも出来る。磁性流体は、特に流動性や磁場印加に対する応答性に優れているため、従来のアクチュエーターへの応用に加え、近年では熱輸送流体への応用に向けた研究が広く進められている。

磁気機能性ナノ流体の大きな特徴の一つは磁場印加時の振る舞いであり、磁場印加により、見かけの粘度変化や熱物性の変化が報告されている。この変化の要因の一つは流体内部に形成される鎖状クラスターであると考えられている。磁気機能性ナノ流体に磁場を印加すると内部粒子が凝集し、磁場印加方向に凝集体が配列することで、鎖状のクラスターを形成することが知られている。この鎖状クラスターは磁場印加後の時間経過と共に成長するため、上記の物性変化にはクラスター形成に伴う異方性や経時変化が存在することが示唆される。磁性流体の磁場印加による熱伝導率の異方性については、これまでいくつか報告があるものの、熱物性やレオロジー特性のクラスター形成に伴う経時変化や内部構造変化と物性変化の相関性は詳しく調べられていないのが現状である。この要因は計測の困難さが挙げられる。例えば、熱物性計測については、熱伝導率計測に広く用いられている電熱線を用いた方法では、接触法であるため接触によるクラスター形成への影響、測定法の時間分解能や内部に発生する対流の影響から、クラスター形成に伴う経時変化・磁場印加方向に伴う異方性を捉える事が不可能であった。そこで、本研究では従来の手法に捉われない計測方法で磁気機能性ナノ流体の物性を捉える事を目指した。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、磁気機能性ナノ流体（磁性流体）の磁場印加による流体の内部構造変化に伴う物性変化を捉えることを目的とする。物性計測については、内部構造変化への影響を避けるため、非接触・非侵襲で行うことが望ましいことから光や音を用いた計測方法を用いることで、計測を行う。具体的事項は次の通りである。

(1) 熱拡散率の計測と内部構造変化の相関性

磁気機能性ナノ流体の熱物性計測は、強制レイリー散乱法を用いて実施する。本測定方

法はレーザーを用いた光学的手法であり、非接触・非侵襲の計測であることに加え、長時間・高空間分解能を有するため、磁場印加後の熱拡散率の異方性・経時変化を捉えることが出来る。さらに、内部構造変化の相関性を検討するために、磁気機能性ナノ流体中の超音波伝播速度の計測を行い、内部構造形成に伴う音速変化と比較することで実施する。

(2) レオロジー特性の計測

レオロジー計測については、超音波ドップラー効果を用いた流速分布計測法(UVP)を用いて、流動下における速度分布変化と差圧(PD)からレオロジー特性を推定する方法である「UVP+PD法」を用いて実施する。磁場印加方向に対するレオロジー特性の異方性や磁場強度の依存性について精査する。

3. 研究の方法

(1) 熱物性計測

本研究では熱物性の計測方法として強制レイリー散乱法(FRSM)を用いた。先に記したとおり、FRSMは光学系を用いた熱拡散率の計測手法で、液体や固体の熱拡散率を高時間・高空間分解能で捉えることが出来、異方性熱物性の計測にも適している。本測定法はレーザーの干渉縞パターンによって試験流体を瞬間加熱し、別波長の計測用レーザーを試験流体の加熱地点に当て、干渉縞パターンにより形成される回折格子で回折させる。試験流体への瞬間加熱により形成される回折格子は熱の拡散と共に減衰し、計測用レーザーの回折光も同様に減衰する。この回折光の発生から減衰までを捉えることで、熱拡散率を計測することが出来る。

本研究における光学系を図1に示す。本光学系では、加熱用レーザーとして、2Wの出力を持つYVO₄レーザーと計測用レーザーとして、He-Neレーザーを用いた。加熱用レーザーはオプティカルチョッパーを通して、パルスレーザーに変換し、ビームスプリッターで2光束に分けた後、ミラーを通して、試験流体に干渉縞を形成するよう照射している。一方、計測用レーザーは試験流体の干渉縞によって回折された一次回折光を光電子増倍管によって受光し、オシロスコープに出力することで回折光強度を記録している。

試験流体はシリコン製のスペーサを2枚のスライドガラスで挟み込むことで保持している。スペーサの厚みを変えることで試料厚さを調整でき、レーザーの強度や試料の光の透過率等を考慮して、適切な厚さに調整する。試料への磁場印加は永久磁石でスライドガラスを挟む事で一様磁場を印加している。磁石の位置を変えることで、熱の伝播方向と垂直・水平方向に磁場印加することが出来る。磁場強度は、磁石間の距離によって調整している。本報告書では、70 mTの磁場を印加したときの結果を示す。

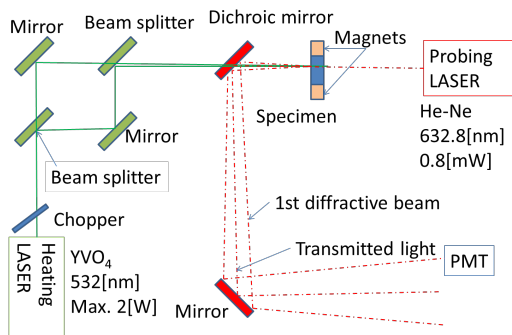


Fig.1 強制レイリー散乱法光学系

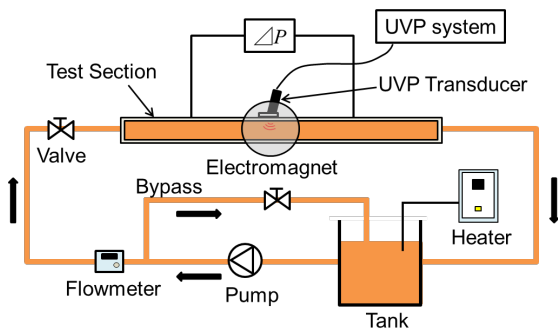


Fig.2 UVP+PD 法試験流路

(2) UVP+PD 法によるレオロジー推定

レオロジー特性の計測については、回転式のレオメーターにより測定することが多い。しかしながら、この測定法は、接触法であり、さらに磁気機能性ナノ流体においては磁場方向に対する異方性を捉える事は不可能である。そこで、本研究では UVP+PD 法によってレオロジー特性の推定を試みた。磁気機能性ナノ流体の流速分布計測については、流体が不透明であるため、従来の PIV や LDV といった光学的手法の適用が困難である。一方で、UVP では測定に超音波を用いるため、磁気機能性ナノ流体に対しても適用が可能となる。しかしながら、UVP の問題点は空間分解能が悪いことが挙げられる。

本研究で用いた測定装置の概略を図 2 に示す。試験流路は、閉回路でポンプ、タンク、試験区間である矩形管路で構成されている。矩形管路はアクリル製で、断面 18 mm × 18 mm、長さ 950 mm である。アクリルは音響インピーダンスが水と近いため、超音波が伝播しやすく、超音波を用いた試験に適している。試験区間中央部に電磁石を設置し、磁場を印加している。この電磁石は、鉄芯の直径が 150 mm であり、0 から 500 mT まで磁場を印加することが出来る。UVP のトランスデューサーは磁場印加部に設置し、磁場印加領域において主流方向・流路鉛直方向面の速度分布を計測した。また、電磁石をはさんで差圧計を設置し、差圧測定を行った。

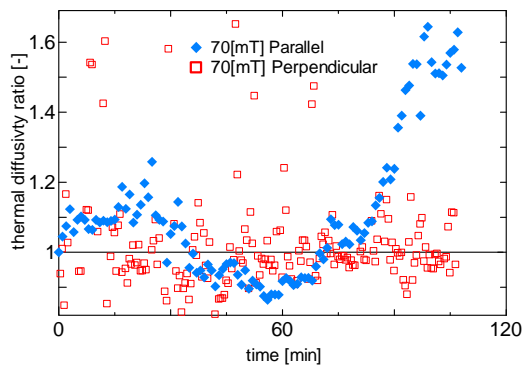


Fig.3 熱拡散率の経時変化

(3) 磁気機能性ナノ流体

本研究では、磁気機能性ナノ流体として市販の磁性流体を用いることで研究を行った。試験磁性流体としては、Ferrotec 社製の水ベース磁性流体(MSG-W10)を主に用いた。本磁性流体を各測定方法に応じて、適宜、水で薄める等の調製をしている。

4. 研究成果

(1) 熱物性計測と内部構造の相関性

磁気機能性ナノ流体は不透明なので、試料厚さを薄くして計測用レーザーを透過させ、光電子増倍管の感度を上げることでFRSMによる非接触の熱拡散率の測定に成功した。

図 3 に磁気機能性ナノ流体へ 70 mT の磁場を熱の伝播方向に垂直方向・平行方向に印加したときの熱拡散率の変化を示す。図の縦軸は無磁場下と印加磁場下の熱拡散率の比を示したもので、横軸は磁場印加後からの経過時間である。図に示されるように、熱の伝播方向と平行方向に磁場を印加した時に、非常に特徴的な熱拡散率の経時変化が捉えられた。具体的には、最初の 30 分で熱拡散率の増加が見られ、その後、30 ~ 60 分で、熱拡散率は減少に転じた。その後、熱拡散率は再び増加し、最終的には無磁場下の熱拡散率と比較して 1.5 倍程度となった。この変化は、鎖状クラスターの形成・成長に伴うものと考えられる。鎖状クラスターは磁場印加方向に形成されるため、クラスターが熱伝播路となり、熱拡散率が増加したのと考えられる。30 分 ~ 60 分における減少は、磁場印加により内部粒子が凝集することで相対的に内部粒子径が大きくなり、熱拡散率が減少したと考えられるが、今後、より詳細な検討が必要である。

一方、熱の伝播方向と垂直の磁場印加においては、熱拡散率の経時変化に大きなばらつきが見られた。しかしながら、平均的な熱拡散率の値については大きな変化が見られず、熱拡散率のクラスター形成に伴う異方性が確認できた。熱拡散率変化のばらつきについては、磁場印加による内部粒子の凝集体や垂直方向から見た鎖状クラスターが回折格子間を移動することでレーザー光の散乱を引き起こしたことが原因と考えられる。

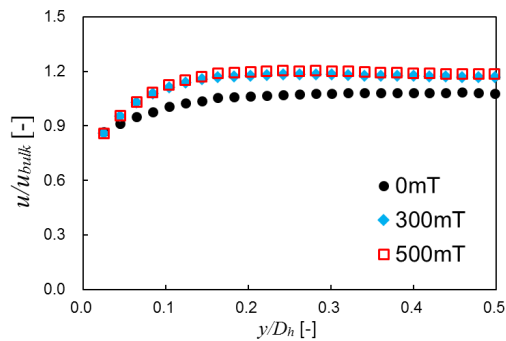


Fig.4 主流方向速度分布の変化

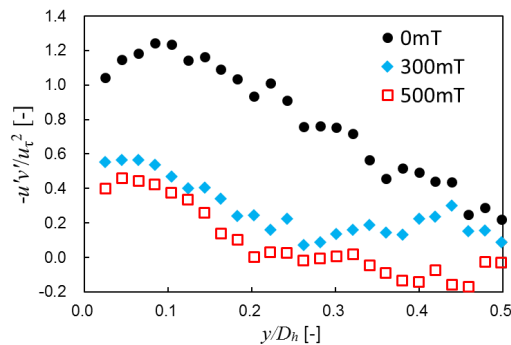


Fig.5 レイノルズせん断応力の変化

内部構造変化について、磁場印加による超音波伝播速度変化を測定することで検討を行った。熱拡散率の測定と同じ実験条件下では、わずかに磁場印加による音速変化が捉えられたのみであったが、垂直方向磁場印加時の磁場印加後 60 分後から値のばらつきが大きくなるという結果が得られ、内部に形成された鎖状クラスターが太く成長していることが示唆され、これにより熱拡散率において平行方向の磁場印加時の増加につながったものと考えられる。しかしながら、音速変化が非常に微小であるため、超音波伝播特性や物性変化との相関性については、引き続き、測定・検証を重ねる予定である。

(2)UVP+PD 法によるレオロジー特性の推定

レオロジー特性の推定

図 4 に磁場印加領域における主流方向の速度分布変化を示す。図に示されるように、磁場印加による速度分布の変化が捉えられた。本研究では、この速度分布の変化と差圧の変化を用いることで、レオロジー特性の推定を行うことを予定していたが、本研究では電磁石の鉄芯間隔が狭く、流路幅が限られてしまうため、壁面近傍の速度分布変化を捉えることが出来なかったことに加え、差圧測定領域と磁場印加領域の問題から、本課題におけるレオロジー特性の推定には至らなかった。しかしながら、本課題に関する実験を重ねる段階で、磁性流体乱流の乱流構造変化について、非常に興味深い特性が得られたため、磁性流体乱流の基礎流動特性について調べることにした、次節に成果を記す。

磁性流体乱流の流動構造

磁性流体乱流の流動構造について、UVP を用いて、磁場印加領域、磁場印加領域下流において、レイノルズせん断応力の計測を行った。図 5 に磁場印加領域におけるレイノルズ応力の変化を示す。図に示されるように、磁性流体に磁場を印加すると、レイノルズ応力が大幅に減少する。これは、内部の強磁性微粒子の運動が磁場によって拘束され、乱流の運動を抑制したものと考えられる。磁場印加領域下流においては、レイノルズ応力の回復が見られ、その過程にいったんレイノルズ応力が無磁場下と比較して大きくなった後、無磁場とほぼ同様の状態へ戻るといった特徴的な現象が捉えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) M. Motozawa, K. Takeda, Y. Kawaguchi, T. Sawada and M. Fukuta, Suppression of heat transfer of turbulent magnetic fluid flow by applying uniform magnetic field, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, in press.
- (2) M. Motozawa, K. Kino, T. Sawada, Y. Kawaguchi and M. Fukuta, Effect of magnetic field direction on forced convective heat transfer of magnetic fluid, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 23, No.3 (2015), pp. 612-617, DOI: <http://doi.org/10.14243/jsaem.23.612>.

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) M. Motozawa, K. Takeda, Y. Kawaguchi, T. Sawada and M. Fukuta, Recovery of suppressed turbulent diffusion of magnetic fluid flow in downstream of magnetic field region, 9th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Super-conducting, Multifunctional and Nanomaterials, (2015.7.6), Sofia (Bulgaria).
- (2) 村岡隆, 本澤政明, 元祐昌廣, 福田充宏, 磁性流体温度伝導率の経時変化に対する磁場強度依存性, 日本機械学会第 93 期流体工学部門講演会, (2015.11.8), 東京理科大学(東京, 葛飾区).
- (3) M. Motozawa, T. Muraoka, M. Motosuke and M. Fukuta, Measurement of thermal diffusivity of magnetic fluid by forced Rayleigh scattering method, 14th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, (2014.7.9), Granada (Spain).

他 8 件

6. 研究組織

(1)研究代表者

本澤 政明 (MOTOZAWA, Masaaki)
 静岡大学・工学部・助教
 研究者番号: 50516185