

令和元年6月19日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06074

研究課題名(和文)粘弾性ナノ流体による抵抗低減流れにおける伝熱促進に関する基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental Study on Improvement of Heat Transfer in Drag Reduced Flow by Viscoelastic Nanofluid

研究代表者

本澤 政明(Motozawa, Masaaki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50516185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ある種の界面活性剤水溶液である粘弾性流体では流れの抵抗を低減できる事が知られている。これは大きな省エネルギーにつながるものの、伝熱が大きく低下する欠点がある。一方、流体中に粒径がナノオーダーの微粒子を添加することで伝熱促進を図る研究が広く実施されている。本研究では粘弾性流体にナノ粒子を添加した流体(本研究では「粘弾性ナノ流体」と呼ぶ)により抵抗低減流れにおいて低下した伝熱を改善できるかを調べた。その結果、上記を達しうる粘弾性ナノ流体として、ファイバー状で熱伝導率の大きなナノ粒子(本研究ではカーボンナノチューブ)を用いることが効果的であるという指針が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な熱輸送システムの高効率化に向けて、粘弾性流体の抵抗低減効果やナノ流体による伝熱促進に関する研究が世界中で広く実施されている。本研究では、粘弾性流体による抵抗低減流れにおける伝熱低下について、その改善方法としてナノ粒子を添加することによる効果を調べたものである。熱流動現象のアナロジーから流動抵抗低減と伝熱促進は相反するもので、このアナロジーを破ることを目指す基礎研究として学術的意義がある。また、近年、様々な場面で熱発生が問題となっており、より高効率の冷却技術が求められている。抵抗低減流れにおける伝熱改善を図る本研究はこれらの解決につながるものとして社会的意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：A viscoelastic fluid which is a certain kind of surfactant solution has the function to reduce drastically flow resistance in turbulent flow. However, heat transfer is largely suppressed in the drag reduced flow. On the other hand, there are many studies on heat transfer enhancement of fluid flow by adding nano-particles. In this study, the fundamental study on the improvement of the suppressed heat transfer in the drag reduced flow of the viscoelastic fluid by adding nano-particles. Such fluid which is the viscoelastic fluid by mixed with nano-particles is called as viscoelastic nanofluid in this study. The result shows that the suppressed heat transfer is slightly improved by addition of nanoparticles compared to the drag reduced viscoelastic fluid flow. The viscoelastic nanofluid in which contains the fiber shape nano-particles having large heat conductivity is more effective for achievement of improvement of heat transfer in drag reduced flow.

研究分野：流体工学

キーワード：粘弾性ナノ流体 粘弾性流体 ナノ流体 抵抗低減 伝熱促進

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

配管内を流れる流体は管壁との摩擦抵抗により圧力損失を生じる。この流体中にある種の界面活性剤を添加すると、乱流の流れでは管内壁の摩擦抵抗を大幅に低減できることが知られている。このような界面活性剤溶液は粘性に加えて変形に対し弾性的な性質を示すため、「粘弾性流体」と呼ばれている。この粘弾性流体による抵抗低減効果は直管において最大 70%にも及ぶことから、非常に大きな省エネルギー効果が期待でき、すでに液体循環型ビル空調などにおいて実用され、ポンプ動力の削減効果が報告されている。この抵抗低減流れにおける大きな欠点は流れの層流化に基づく伝熱性能の低下にある。この伝熱低下を改善できれば、更なる省エネルギー効果が期待できるため、抵抗低減流れにおける低下した伝熱の改善方法が重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、上記の抵抗低減流れにおける伝熱低下に対して、粒径がナノメートルオーダーの微粒子であるナノ粒子を添加することで改善を図ることを提案する。21世紀に入り、ナノ粒子の合成技術が飛躍的に向上し、様々な種類のナノ粒子が合成されるようになった。流体中にナノメートルオーダーの微粒子を添加した流体は「ナノ流体」と呼ばれ、溶媒と比較して大きな熱伝導率の向上や異常伝熱と呼ばれる熱物性以上に伝熱が改善される現象が報告されている。ナノ流体はマイクロシステムなどの熱輸送流体として期待され、ナノ流体の伝熱特性について世界中で広く研究が進められている。しかしながら、本研究のような抵抗低減流れへのナノ粒子の添加による伝熱改善に関しては、中国でわずかに行われている^[1]ものの知見が少ないのが現状である。本研究では、上記の粘弾性流体にナノ粒子を添加した流体（本研究では特に「粘弾性ナノ流体」と呼ぶものとする。）を作成し、粘弾性ナノ流体における熱流動特性を調べ、抵抗低減流れにおいて低下した伝熱の改善性能を精査することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

本実験装置における試験流路の概略を図1に示す。試験流路は、流れの助走区間と熱流動特性を調べる試験区間から成り、内径(d)11.1 mm、肉厚 0.8 mm のステンレス円管を用いて作成している。助走区間は乱流域において流れが発達するよう 0.5 m 設けており、試験区間に差圧測定間距離(L)1.5 m でマンメータを取り付けて差圧を測定し、マンメータ区間内に加熱区間を 1.4 m 設けている。加熱区間は、両端に電極を取り付けて直流電源装置を用いて通電加熱することで熱流束一定の加熱条件で過熱し、ステンレス管の外部には断熱材を貼り付けている。図1に示されるように試験区間の出入口と加熱区間の外壁面に等間隔で 11 点の位置に T 型熱伝対を設置している。各地点において、出入口の温度から見積もられるバルク温度と壁温から局所熱伝達率を算出することが出来る。実験流路はポンプを用いてタンクから試験流体を試験流路へ導く循環型の閉水路としている。試験流体の温度は、タンクに設置したヒーターと恒温冷却水によって制御している。実験は、バイパスにより流量を変えることでレイノルズ数(Re) 2000~17000 の範囲で行っている。

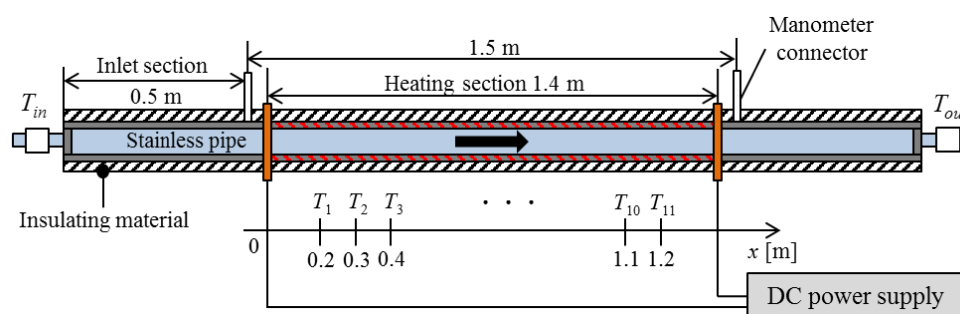


図1 試験流路概略

(2) 粘弾性ナノ流体

本研究では、市販のナノ流体に界面活性剤を添加することで粘弾性ナノ流体を調整した。ナノ流体、界面活性剤、濃度の調整方法の詳細は次に記すとおりである。

○界面活性剤

界面活性剤として塩化セチルトリメチルアンモニウム（以下、CTAC と記す）、対イオンとしてサリチル酸ナトリウム（以下、NaSal と記す。）を用いた。本研究では、CTAC と NaSal を同質量比で水もしくはベースとなるナノ流体に溶解させることで、界面活性剤溶液（粘弾性流体）とした。

○ナノ流体

本研究では、あらかじめ溶媒にナノ粒子が安定分散されている市販のナノ流体を使用した。使用した主なナノ流体は、全て水ベースのナノ流体で、内部のナノ粒子が球状の流体として、 Al_2O_3 ナノ流体、 SiO_2 ナノ流体、内部のナノ粒子がファイバー状の流体として、カーボンナノチューブ（以下、CNTと記す）ナノ流体、セルロースナノファイバー（以下、CNFと記す）分散液である。

○粘弾性ナノ流体濃度の調製

粘弾性ナノ流体の濃度の調製は、まずナノ流体を純水で希釈してナノ粒子の濃度を調節し、その後、CTACを目的の濃度になるようナノ流体に添加し、溶かした後NaSalを添加した。本報告書では粘弾性ナノ流体の表記方法を「“ナノ粒子濃度”粒子の種類+“界面活性剤濃度”CTAC」と記すものとする。例えば、「0.5 vol% Al_2O_3 + 200 ppm CTAC」は Al_2O_3 ナノ粒子の体積濃度が0.5 vol%、界面活性剤濃度が200 ppmの粘弾性ナノ流体となる。

4. 研究成果

本研究の研究成果として、主要なものを下記に記す。

(1) 粘弾性流体へのナノ粒子添加による抵抗低減効果への影響

種々の界面活性剤濃度、ナノ粒子濃度の粘弾性ナノ流体における抵抗低減効果を調べたところ、ナノ粒子を含む粘弾性流体では、界面活性剤の濃度、ナノ粒子の体積分率、ナノ粒子の形状により、抵抗低減効果に影響を与えることが分かった。一般的な関係としては、界面活性剤濃度が希薄でナノ粒子の量が多い場合、界面活性剤がナノ粒子の分散剤として作用しているものと考えられ、抵抗低減につながるミセルの形成が阻害され、抵抗低減効果が失われてしまうという結果が得られた。表1に代表的な結果として、界面活性剤濃度、ナノ粒子の濃度、ナノ粒子の種類による抵抗低減効果への影響を示す。

表1 ナノ粒子の存在による抵抗低減効果への影響

CTAC	0.25 vol%		
	Al_2O_3	SiO_2	CNT
100 ppm	消失	消失	保持
250 ppm	消失	低下	低下
500 ppm	低下	保持	消失

表に示されるように、粘弾性ナノ流体では、ナノ粒子の存在により抵抗低減が低下し、失われてしまう条件が存在する。伝熱向上へはナノ粒子の分散量を増やすことが必要になるが、抵抗低減を保持したままナノ粒子量を増やすためには界面活性剤の濃度を増やす必要がある。一方で、高濃度の界面活性剤水溶液では粘度が大きくなり、却って流動抵抗が増大してしまう。従って、ナノ粒子を添加しつつ抵抗低減効果を保持するためには、ナノ粒子の添加量、界面活性剤濃度に適切なバランスが存在する。本研究においては、ファイバー状のCNTが存在した時に低い界面活性剤濃度でも抵抗低減効果を保持することが分かり、粘弾性ナノ流体におけるナノ粒子としてはファイバー状の粒子（ナノファイバー）を添加することが望ましいことが示唆された。実際に、次の文献でもミセル構造にファイバー状の粒子が存在することで粘弾性を補強する効果の存在が議論されている。Qinら^[2]は、粘弾性流体にCNTを添加することで粘弾性が増強したことを報告しており、Helgesonら^[3]も同様の研究で、棒状ミセルにCNTが混入した構造を“Double Networks”と呼んでいる。以上から、本研究ではファイバー状の形状を持つCNTやCNFに注目することに至った。次節以降にCNT粘弾性ナノ流体、CNF粘弾性ナノ流体について代表的な結果を取り上げて記す。

(2) カーボンナノチューブ添加粘弾性ナノ流体の熱流動特性^[4]

CNT粘弾性ナノ流体のReと抵抗低減率(DR [%])の関係を図2に、Reと熱伝達低下率(HTR [%])の関係を図3に示す。本報告における界面活性剤の濃度は100 ppm、CNTの濃度は0.25 vol%である。DRとHTRの定義は次の通りである。

$$\text{DR} = \frac{\lambda_w - \lambda_{tf}}{\lambda_w} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{HTR} = \frac{h_w - h_{tf}}{h_w} \times 100 \quad (2)$$

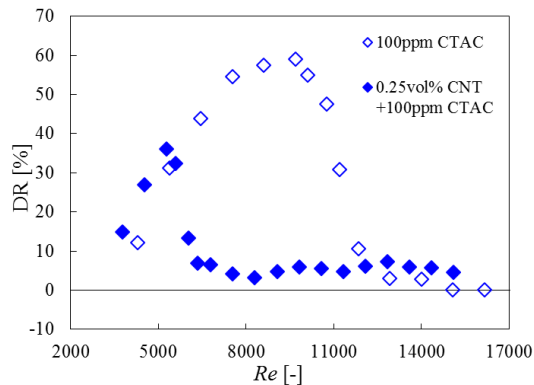


図2 CNT粘弾性ナノ流体の抵抗低減

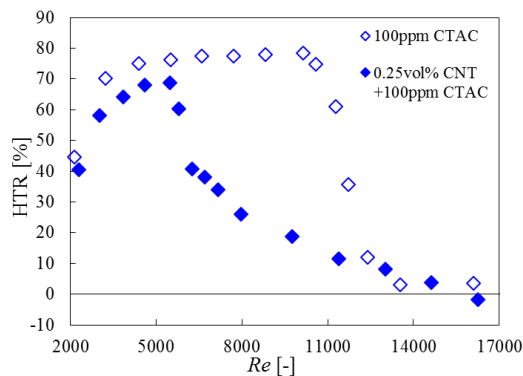


図3 CNT粘弾性ナノ流体の伝熱特性

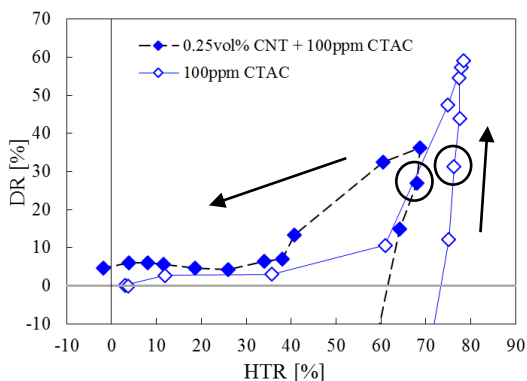


図4 CNT粘弾性ナノ流体の伝熱改善

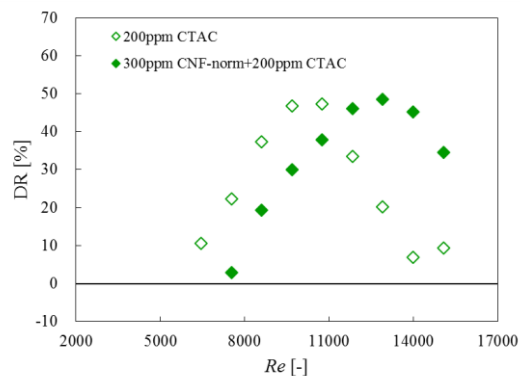


図5 CNF粘弾性ナノ流体の抵抗低減

ここで、 λ 、 h はそれぞれ管摩擦係数と熱伝達率であり、添え字の w と tf はそれぞれ水と試験流体を示す。

図2に示されるように、界面活性剤水溶液における抵抗低減率は Re の増加と共に増加し、 $Re = 10000$ 程度で最大の約60%となり、その後、 Re の増加と共に抵抗低減効果が消失している。CNT添加の粘弾性ナノ流体では、抵抗低減が得られる Re 領域が、低 Re 側に移行し、抵抗低減率も低下した。上記の通り、粘弾性流体にナノ粒子を添加すると、界面活性剤が分散剤として消費され、ミセルが十分に形成されず抵抗低減効果が減少したものと考えられる。図3に示される伝熱低下率では、抵抗低減効果の発現と共に伝熱も低下し、最大で約80%もの低下が見られた。加えて、伝熱低下率の大きい Re 領域は抵抗低減の発現する Re の領域よりも広範囲であった。CNT添加粘弾性ナノ流体についても同様の傾向が見られており、抵抗低減が発現する Re 領域よりやや広い領域で伝熱が低下しており、その領域も抵抗低減と同様に低 Re 側であることが分かる。

これらの図に示されるように、粘弾性流体とCNT添加粘弾性ナノ流体では、抵抗低減が起こる Re 領域が異なるため、抵抗低減流れにおいてナノ粒子の添加により伝熱が改善されているかの議論が難しい。そこで、Yangら^[1]と同様の評価方法として、図4に界面活性剤溶液とCNT添加粘弾性ナノ流体における抵抗低減率と伝熱低下率の関係を示し、同程度の抵抗低減率が見られる領域において伝熱低下率がどの程度かの比較を行う。図の縦軸は抵抗低減率を横軸は伝熱低下率を示している。図中の「→」は Re 増加に伴うプロットの移動を示す。図に示されるとおり、 Re の増加に伴い、抵抗低減と伝熱低下率が増加し、プロットは右上に移動する。その後、両者は減少し、プロットが左下へ移動し、抵抗低減が消失され伝熱も低下しない流れに戻る。CNT添加粘弾性ナノ流体では、これらのプロットの変化が全体的に左側にシフトしている。これは、同じ抵抗低減率において、伝熱低下率の比較を行うとCNTの添加により伝熱低下率がやや低下、すなわち伝熱がやや改善していることを示している。例えば、図4中の円で示したプロットは約30%の抵抗低減率が得られた時で、このプロットを比較するとCNTの添加により、伝熱低下率が低下していることが確認できる。先に記したとおり、両者のプロットでは Re が違うため一概に比較することは出来ないが、このような評価では、抵抗低減流れにおいてCNTの添加による伝熱の改善が見られた。

(3) セルロースナノファイバー添加粘弾性ナノ流体の熱流動特性

ファイバー状のナノ粒子（ナノファイバー）の繊維長、熱伝導率により、粘弾性流体の熱流動特性にどのような影響があるかを調べるため、ファイバー長の異なる CNF を粘弾性流体に添加して、抵抗低減効果への影響と伝熱特性について調べた。本報告では、研究で用いた CNF の中で中程度の長さのファイバー長を持つ CNF を添加した添加粘弾性ナノ流体の Re と抵抗低減率の関係を図 5 に示す。本報告における界面活性剤の濃度は 200 ppm, CNF の濃度は 300 ppm である。図に示されるように界面活性剤水溶液の抵抗低減は、抵抗低減の発現する Re 領域がわずかに変わっているものの、図 2 と同様の傾向を示していることがわかる。一方、CNF 添加粘弾性ナノ流体では、抵抗低減が発現する領域が高 Re 領域側に移行していることが分かる。これは、CNF の繊維同士が絡まってできる繊維塊が界面活性剤のミセルと絡み合い、このミセル同士の絡み合いをより高せん断の高 Re 数側まで保ったため、抵抗低減効果が高 Re 側に移行したものと考えている。本報告には示していないが、混入する CNF の繊維長によって抵抗低減効果が発現する Re 領域や抵抗低減率が変化しており、CNT の結果と併せて、粘弾性流体へのナノファイバー添加によるレオロジー特性変化の興味深い知見であり、今後さらに研究を続けていきたいと考えている。一方で伝熱については、熱伝導率の低い CNF において、異常伝熱による伝熱改善を期待したが、大きな効果は見られず、CNF 自体の熱伝導率が低いため伝熱に大きな改善は見られなかった。

(4) まとめ

本研究成果として、粘弾性流体に球状のナノ粒子を添加すると抵抗低減率が消失する傾向にあるが、ファイバー状のナノ粒子（ナノファイバー）の添加によって、抵抗低減率の消失を抑制する傾向が見られた。また、粘弾性ナノ流体へのナノファイバー添加によるレオロジー特性変化に基づく流動現象の変化は非常に興味深い知見であった。伝熱改善には先に記したナノ粒子添加による異常伝熱の効果も期待したが、大きな効果は見られず添加する粒子の熱伝導率自体が伝熱改善の役割を果たした。従って、本研究の目的を達成しうる粘弾性ナノ流体として、ファイバー状で熱伝導率の大きなナノ粒子を用いることが効果的であるという指針が示された。

<引用文献>

- [1] J. C. Yang et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 62(2013), pp. 303-313.
- [2] W. L. Qin et al., *PD Research Station of Oil and Gas Eng.*, (2014), pp. 1-6.
- [3] M. E. Helgeson et al., *American Chem. Soc.*, 26(2010), pp. 8049-8060.
- [4] 本澤政明, 稲葉充紀, 福田充宏, 川口靖夫, 第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 札幌, (2018), J323.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① M. Motozawa, M. Inaba, M. Fukuta, Experimental Study on Improvement of Suppressed Heat Transfer of Viscoelastic Drag Reducing Flow by Adding Nano-particles, 12th European Fluid Mechanics Conference (EFMC12), Vienna, (2018)
- ② 本澤政明, 稲葉充紀, 福田充宏, 川口靖夫, カーボンナノチューブを添加した粘弾性流体の流動抵抗と伝熱特性～流動抵抗と伝熱に対するカーボンナノチューブ濃度の効果～, 第 55 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, (2018).
- ③ M. Inaba, M. Motozawa, M. Fukuta, Experimental Study on Influence of Various Nanoparticles on Flow Resistance and Heat Transfer of Viscoelastic Fluid Flow, 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017), Sendai, (2017).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

静岡大学工学部機械工学科福田・本澤研 HP

<https://www.shizuoka.ac.jp/fluidmech-lab/>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。