

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4月16日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760149

研究課題名（和文） 高分子添加によるマイクロ流路内の乱れと伝熱促進機構の解明

研究課題名（英文） Measurement of Turbulence and Heat Transfer Enhancement Structure of Polymer Solution Flows in Microchannel

研究代表者：

巽 和也（TATSUMI KAZUYA）

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90372854

研究成果の概要（和文）：

本研究は、蛇行流路内粘弾性流体流れによる低レイノルズ数条件下における伝熱促進技術の開発を目的とし、流れの可視化と流路内の平均熱伝達率、圧力損失測定を行った。その結果、粘弾性流体流れでは、 $Re < 2.0$ においても流れの非定常化と縦渦状の二次流れの形成が観測され、これにより伝熱性能がニュートン流体流れと比較して著しく向上することを明らかにした。また、伝熱特性と圧力損失特性はワイゼンベルグ数と相関があることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Heat transfer and pressure loss measurements and flow visualization were carried out for viscoelastic fluid flow in a serpentine channel in order to evaluate the heat transfer enhancement performance of using such non-Newtonian fluids. Polyacrylamide water solution was used as viscoelastic fluid. The visualized flow patterns showed that unsteady flows and longitudinal vortex-like secondary flows are generated even under the condition of $Re < 2.0$ in the viscoelastic fluid case. These flows produced a remarkable heat transfer enhancement effect compared to the case of Newtonian fluid. Further, a good correlation was observed between the heat transfer and pressure loss characteristics with the Weissenberg number.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：マイクロ流体工学，伝熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：粘弾性流体，伝熱促進，マイクロ流路，蛇行流路，二次流れ，不安定性促進

1. 研究開始当初の背景

2. 研究の目的

粘弾性流体はニュートン流体と比較して種々の特徴的な流動特性を示すことが知られている。その中で蛇行流路内を流れる場合、低レイノルズ数領域でも流れの不安定性が増大し、非定常流れが生成されることが報告されている。このような流れでは、流体の混合および伝熱が促進されると考えられることから、本研究では、流れの可視化実験および、平均熱伝達率と圧力損失の測定を行い、蛇行流路内の粘弾性流体流れの伝熱と熱流動特性の解明をすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究では、図1に示すように、半円形湾曲が周期的に連なる蛇行流路を用いて、平均熱伝達率と圧力損失の測定、そして流れの可視化実験を行った。流路は一辺5mmの正方断面を持ち、半円形の湾曲部の内径と外径は、それぞれ5mmと10mmである。伝熱実験では、蛇行流路壁を設けた銅製流路の壁に恒温槽から温度一定の水を供給することで等温壁条件を適用した。加熱流路の入口と出口の流体バルク平均温度を測定することで、平均熱伝達率を求めた。また、流れの可視化では、流路上流から染料を供給し、流路上方と側方からデジタルビデオカメラを用いて、流脈線の撮影を行った。

本研究で用いる粘弾性流体は、ポリアクリルアミド(PAAm)水溶液であり、その成分はPAAm(Polysciences Inc., Polyacrylamide, 分子量 $=1.8 \times 10^7$)500ppm, NaCl 1wt%, スクロース 64.4%である。また、物性値の影響を検討するためにスクロース濃度を变化させた測定も行った。性能の比較として、スクロース 64.4wt%の水溶液(ニュートン流体)を用いた。粘性係数 μ と緩和時間 λ は、レオメータを用いて測定した。PAAm水溶液(スクロース濃度が57, 60, 64.4%)について、20°Cでは、 50s^{-1} のひずみ速度における μ はそれぞれ約0.09, 0.16, 0.37Pa sであり、緩和時間 λ は約2.5, 3.5, 4.0sである。水溶液の定圧比熱 c_p と熱伝導率 k 、密度 ρ は、それぞれ文献の値から求め、温度依存性を考慮した。実験の流量条件は、レイノルズ数($Re = \rho U_m D_h / \mu$), $Re = 0.2 \sim 5.5$ の範囲である。

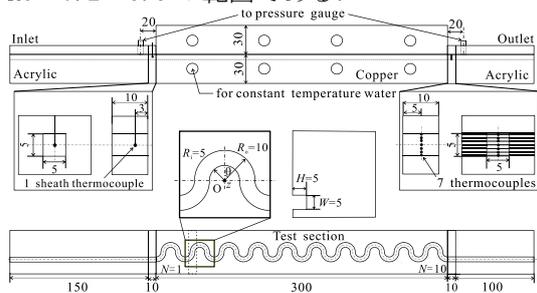


図1：実験装置の概観図

4. 研究成果

図1に、PAAm水溶液を用いた場合の、 $Re = 2$ における可視化結果を示す。流路内の黒色線は染料により可視化された流脈線を示す。図に示すように、流脈線は流路幅方向と高さ方向に変化しており、流路全体において非定常な流れが観察された。また、湾曲の変曲点近傍では、主流方向断面において縦渦の生成が観察された。一方、スクロース水溶液の場合は、流れは定常層流であり、また流脈線は流路に沿って流れ、流路内において2次流れは観測されなかった。従って、図2に示す流動特性は、流体の粘弾特性に起因するものである。

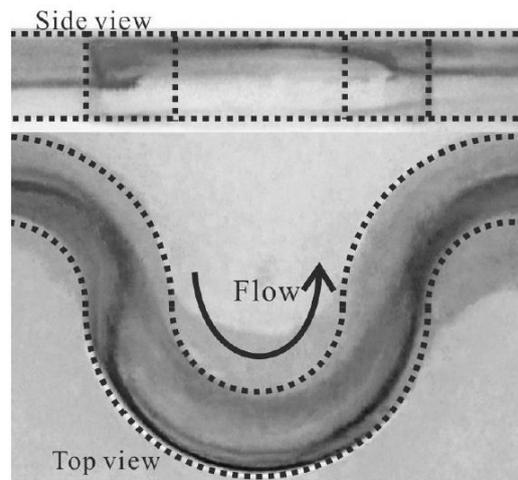


図2：可視化実験結果 ($Re = 2.0$)

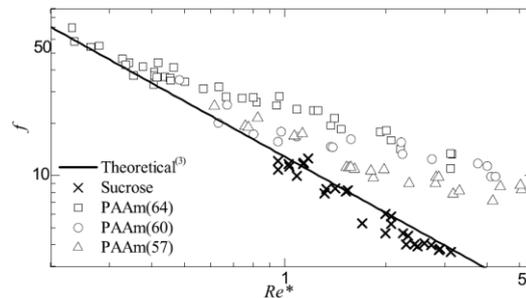


図3：管摩擦係数

スクロース水溶液と PAAm 水溶液における、摩擦損失係数 $f (= D_h \Delta P / 2 \rho U_m^2 L)$ と平均ヌッセルト数 Nu_m の結果を図3～5に示す。Lは蛇行流路の全長である。図3に示す Re^* を用いた理論解は、正方形断面定常層流流れの摩擦損失係数を示し、粘性係数のせん断速度依存性と温度依存性を考慮している。一方、図4に示す数値解析解は、ニュートン流体における正方形断面定常流れの平均ヌッセルト数を示し、流路断面内の温度分布が物性値に与える影響と助走区

間を考慮している。

まず、両図においてスクロース水溶液の場合の f と Nu_m は、理論解及び数値解析解に良好な一致を示し、測定 of 妥当性が確認できる。PAAm 水溶液の場合は、図 3 に示す通り、 Re^* の増加に伴って f が理論解より大きな値となる。従って、流路内ではずり減粘の効果以上に、非定常流れが強く影響して圧力損失が増加したことが分かる。さらに、スクロース濃度の異なる 3 種類の PAAm 水溶液を比べると、 f の増加開始 Re^* が異なっており、流れが非定常化する Re^* が一致しないことが分かる。

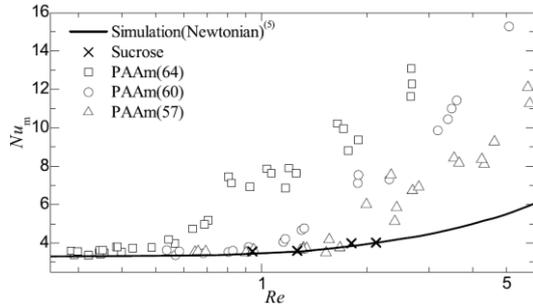


図 4 : 平均ヌセルト数 (vs Re)

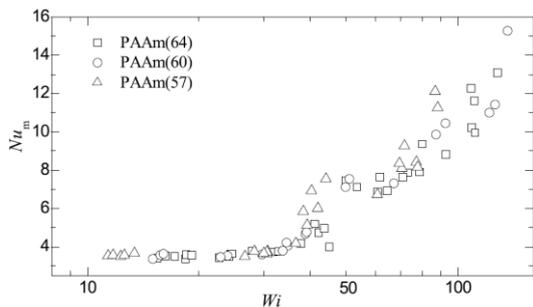


図 5 : 平均ヌセルト数 (vs Wi)

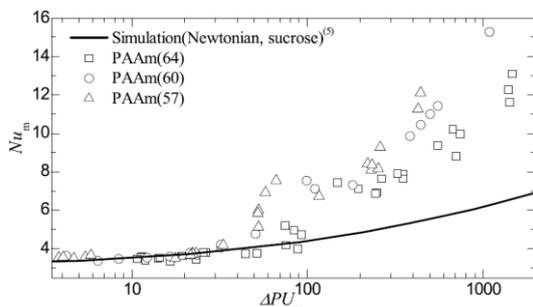


図 6 : ポンプ動力と伝熱性能

一方、 Nu_m については、図 4 に示す通り、PAAm 水溶液はスクロース水溶液と比べて高い値を示しており、縦渦の生成等による伝熱促進効果が得られた。また、スクロース濃度が 57, 60, 64wt% である PAAm(57~64) の場合を比較すると Nu_m の増加開始位置やその大きさが異なることが

分かる。

これに対して、図 5 に示す通り、ワイゼンベルグ数 $Wi (= 4\lambda U_m/D_h)$ に対する Nu_m の分布においては、 Nu_m の増加開始位置がよく一致する。従って、非定常流れ及び縦渦の発生とその強さを支配する主要な要因として、流体の緩和時間 λ と法線応力差であると考えられ、 Wi により伝熱特性を整理できることを示した。

最後に、図 6 にポンプ動力 ($=\Delta PU_m$) と Nu_m の関係を示す。同じポンプ動力に対してもスクロース水溶液と比較して、PAAm 水溶液の方が Nu_m が高いことが分かる。このことから、粘性が高く、 Re が低い条件下では、伝熱特性と圧力損失の関係性を考慮した場合でも PAAm 水溶液の方が、総合性能が高いことを示した。

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 2 件)

K. Tatsumi, R. Kuroki, M. Nakamura and K. Nakabe, Numerical Investigation on Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in a Peristaltic Micro Pump, Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 11 (2011), 160-168.

K. Tatsumi, Y. Nishitani, K. Fukuda, K. Katsumoto and K. Nakabe, Measurements of Electroosmotic Flow Velocity and Electric Field in Micro-channels using PIV, Measurements Science and Technology, Vol. 21, No. 10 (2010), pp. 105402-1 - 11.

[学会発表] (計 8 件)

O. Nakajima, K. Tatsumi, C. L. Heong and K. Nakabe, Measurement on Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in a Serpentine Channel, Proc. 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2012), pp. , March 18-21, Incheon.

T. Ikejima, O. Nakajima, Y. Takeda, K. Tatsumi and K. Nakabe, Flow and mixing characteristics of viscoelastic fluid flow in a serpentine microchannel - PIV and fluorescence intensity measurements -, Proc. Int. Workshop on Micro/Nano-Engineering, (2011), pp. , December 17-18, Kyoto.

K. Tatsumi, C.L. Heong, Y. Takeda and K. Nakabe, Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in Serpentine Channels, Proc. 11th Kyoto - Seoul National - Tsinghua University Thermal Engineering Conference, (2011), pp. , November 3-4, Jeju.

K. Tatsumi, C.L. Heong, K. Suga and K. Nakabe, Turbulence and Heat Transfer

Characteristics of Low Reynolds Number Viscoelastic Fluid Flow in a Serpentine Channel, Proc. 22nd Int. Symposium on Transport Phenomena (ISTP-22), (2011), November 8-11, Delft.

K. Tatsumi, Y. Takeda, K. Suga and K. Nakabe, Turbulence Characteristics and Mixing Performances of Viscoelastic Fluid Flow in a Serpentine Microchannel, Proc. 13th European Turbulence Conference (ETC-13), (2011), September 16-17, Warsaw.

中島 理, HEONG Chee Leong, 巽和也, 須賀 一彦, 中部主敬, 蛇行流路内における低レイノルズ数粘弾性流体流れの乱れと伝熱特性 (第2報 PIV を用いた2次元速度場と乱れ場の計測), 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2011, 2011/10/29.

Heong Chee Leong, 巽和也, 中島理, 須賀一彦, 中部主敬, 蛇行流路内における低レイノルズ数粘弾性流体流れの乱れと伝熱特性, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011/6/2.

HEONG Chee Leong, 横山崇朗, 中島理, 巽和也, 中部主敬, 蛇行流路内粘弾性流れにおける乱れと伝熱特性, 日本機械学会関西支部第86回定時総会講演会, 2011/3/19.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

()

研究者番号 :

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :