

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360080

研究課題名(和文) マイクロ・微小流路内の粘弾性流体流れの乱れと伝熱促進機構の解明

研究課題名(英文) Unsteady Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in Micro and Millimeter Scale Channels

研究代表者

巽 和也 (Tatsumi, Kazuya)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90372854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、マイクロ・ナノスケールの蛇行流路内の粘弾性流体流れについて、流れの可視化とPIV計測、流体の粘弾特性評価、圧力損失測定、平均と局所の熱伝達率測定、さらに3次元熱流動計算をそれぞれ行い、流路内の流れの不安定性と熱流動特性を明らかにした。流路内には1つ渦と双子渦が形成され時間的にも渦構造が変化するが、他者が報告する粘弾性乱流とは異なることを示した。実際は壁面近傍での法線応力に起因する非定常層流流れが湾曲の編曲により増幅される。一方、低レイノルズ数条件下ではニュートン流体と比較して混合と伝熱性能は向上し、異なる物性の流体の場合を含めて、伝熱と圧力損失特性を無次元量で整理することができた。

研究成果の概要(英文)：Flow visualization and PIV measurements; measurements of viscoelastic fluid properties, pressure loss, and average and local heat transfer characteristics; and three-dimensional numerical simulation were performed in the present study for viscoelastic fluid flow in serpentine micro and milli-meter channels. The unsteady and three-dimensional characteristics of flow and heat transfer were clearly explained. The unsteady flow was not the one reported in other references so-called "viscoelastic turbulence" but unsteady laminar flow. Secondary flows were produced by the normal stress differences near the walls and the flow instability was enhanced by the inflection point of the channel. The fluid mixing and heat transfer performance enhanced markedly compared with the Newtonian fluid case under low Reynolds number conditions. It was also shown that pressure and heat transfer characteristics could be correlated by non-dimensional values even when applying fluids with different properties.

研究分野：伝熱工学

キーワード：粘弾性流体、蛇行流路、低レイノルズ数流れ、伝熱促進、不安定性促進、縦渦、無次元化、ポリアクリルアミド水溶液

### 1. 研究開始当初の背景

水溶液に微量の高分子を添加して作成した粘弾性流体(非ニュートン流体)では、適切な高分子と流動条件において、流れのせん断力による高分子の伸縮・変形・配向運動と、それに伴う流れの不安定性の増大によって、非常に小さいレイノルズ数の領域( $Re < 10^{-3}$ )でも、流れの非定常化と乱れの生成が起こることが、本研究のこれまでの結果で示され、また他の研究でも報告されている。しかしながら、粘弾性流体流れの乱れについては、高レイノルズ数の乱流領域における流れの層流化現象に関しては数多くの研究が行われているが、本研究課題である微小流路内での流れの不安定性増大と非定常化に関する研究、特に乱流解析と壁伝熱・物質伝達との関係に関する研究は極めて少ない。化学工学と医療の分野では、成形や製剤など、高分子溶液を用いる産業が多く、低レイノルズ数条件下での粘弾性流体流れの非定常化現象と乱流構造の解明と知見の収集は、機器の設計と開発に資するところが大きい。本研究では、上述の流動特性の解明と併せて、粘弾性流体(高分子溶液)流れの不安定性の増大による乱れの生成を活用して、伝熱・混合促進(数倍~数十倍)を図る。もし、粘弾性流体流れにおける流動特性と伝熱促進効果を定量的に評価できれば、熱工学・医療の分野に大きく資すると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究は、微量の高分子添加によるマイクロ・微小流路内における低レイノルズ数流れの不安定性増大と乱れの生成について、その生成機構と乱流・3次元流動構造の解明、および、この流れを活用した流路内の伝熱と混合性能を向上させる技術の開発を目的とする。実験では、マイクロ( $\mu\text{m}$ )流路内の流速、乱流特性、物質混合と輸送に関する測定と、微小( $\text{mm}$ )流路内の伝熱特性、圧力損失、流れの可視化、流速・乱流特性に関する測定を定量的に行い、高分子の伸縮・配向運動や粘弾特性との関係を含めた流動構造を解明すると共に、諸量の相関と、諸特性を整理する無次元量と実験式を提示する。さらに、得られた知見を基に、最適流路形状の検討や、数値解析モデル開発や溶液・冷媒開発などの工学的・産業的用途を視野に入れたデータの収集を行う。

### 3. 研究の方法

基礎研究フェーズでは、マイクロ流路における高分子溶液(粘弾性流体)流れの、速度・乱流場の計測、混合特性と温度場の計測、圧力損失測定、流体物性測定を行い、特に流路形状と流れ場、流体の粘弾特性、乱流構造がどのような関係を持つのかを明らかにする。これにより、現象の解明と適切な無次元量の定義を行う。この知見を基に、

萌芽的研究フェーズである蛍光標識によるマイクロ流路内の高分子運動の計測技術の開発に向けた測定環境と条件の構築、および工学的展開を指向した流路形状と高分子特性の設計指針提示の礎を築く。

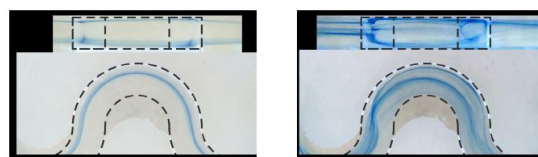
また、マイクロ流路内流れの計測結果を基に、ミリスケール流路における高分子溶液流れについて、平均熱伝達率測定、局所熱伝達率測定、速度・乱流場の計測、流れの可視化、圧力損失測定を行い、熱工学分野への展開を目的とした知見の収集を行う。

### 4. 研究成果

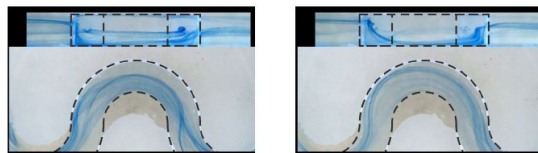
#### 4.1 可視化実験の結果と考察

図1は、粘弾性流体であるポリアクリルアミド水溶液(PAAm)水溶液を用いた場合の、蛇行流路の上流から2周期目の湾曲部における可視化実験の結果である。図の上下に示す画像はそれぞれ流路の側面と上面から同期させて撮影したものであり、これらは同時刻の画像対である。

図1(a)では、流脈線が蛇行流路に沿って流路の高さと幅方向にほとんど変動せず、拡散もしないことが見てとれる。ここでは示さないが、ニュートン流体であるスクロース水溶液の場合では、 $Re=2.3$ において同様の特性を示した。伝熱実験でもスクロース水溶液の場合の $Re$ とディーン数 $N_D$ は、それぞれ最大でも2.4と1.6と小さい。このため、流れは定常であり、また湾曲部においても顕著なディーン渦は形成されない。PAAm水溶液においても、図1(a)に示すように $Re$ が小さい条件では、流れは定常で二次流れも形成されない。ところが、PAAm水溶液の $Re$ が増加すると流れは非定常となり、(b)~(d)に示す $Re=1.3$ の条件では、流路スパン方向に流脈線が大きく変動する。



(a)  $Re=0.1, Wi=21.2, N_D=0.1$  (b)  $Re=0.1, Wi=21.2, N_D=0.1$



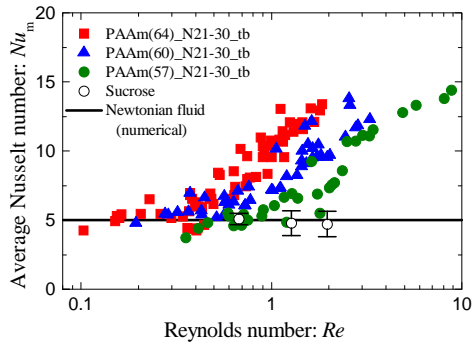
(a)  $Re=0.1, Wi=21.2, N_D=0.1$  (b)  $Re=0.1, Wi=21.2, N_D=0.1$

図1: 蛇行流路内の流跡線(流れの可視化)

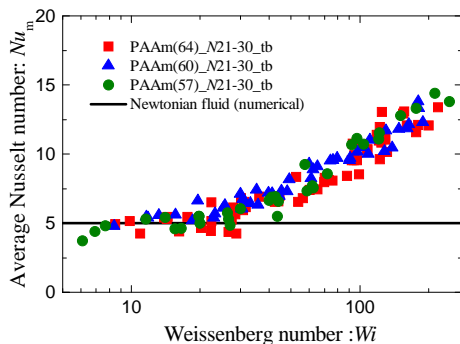
#### 4.2 伝熱特性と流れ場

蛇行流路内の粘弾性流体流れの局所と平均伝熱特性を評価するために、図2に熱伝達率分布を示す。図(a)と(b)は、流路上下壁におけるヌセルト数をレイノルズ数とワイゼンベルグ数で整理したものである。図(c)

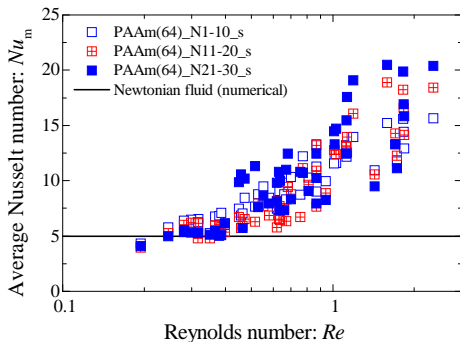
と(d)は、側壁でのヌッセルト数分布を示したものである。蛇行流路内の粘弾性流体流れの熱伝達率分布を考慮した場合、局所ヌッセルト数  $Nux$  が位置に依らず一定となり、伝熱特性が発達する領域は 22 番目の湾曲領域 ( $N=22$ ) よりも下流であった。そこで、 $N=21-30$  の範囲で平均したヌッセルト数  $Nu_m$  を用いて発達領域における伝熱と圧力損失特性を評価する。図の実線は正方断面流路内のニュートン流体流れに関する数値解析解である。また、PAAm(57)-(64)は PAAm 水溶液中のスクロース濃度を指し、それぞれ異なる粘弾特性を持つ流体である。



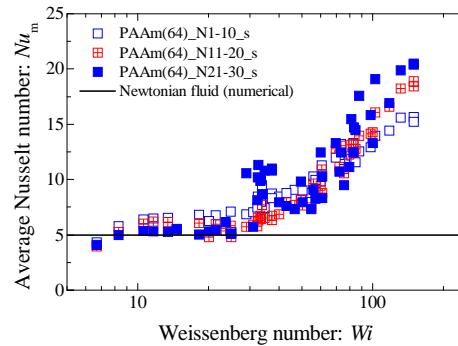
(a) Nusselt 数と Reynolds 数 (上下壁)



(b) Nusselt 数と Weissenberg 数 (上下壁)



(c) Nusselt 数と Reynolds 数 (側壁)



(d) Nusselt 数と Weissenberg 数 (側壁)

図 2: 平均熱伝達率の無次元量による整理。異なる物性の流体に関する流路上下壁と側壁および異なる主流方向位置の分布。

PAAm 水溶液では、 $Re$  が低い領域では  $Nu_m$  はスクロース水溶液の結果と一致する。この領域では流れにおける粘弾特性の影響は小さく、ニュートン流体流れと等しい流動構造を持つ。 $Re$  が増加すると後述する二次流れと非常常流れの生成により  $Nu_m$  は増大する。一方、PAAm(64)-(57)の各場合において、ヌッセルト数が増加を開始する  $Re$  は異なり、同じ  $Re$  でも  $Nu_m$  の値が異なる。

これに対して図 2(b)では、PAAm(64)-(57)の場合の  $Nu_m$  分布は一致し、 $Wi$  により整理できる。 $Wi$  は法線応力差を含めた粘弾特性の大きさを表す指標でもある。二次流れは主にこの法線応力差に起因すると考えられるが、 $Nu_m$  と  $Wi$  とで強い相関が得られることは、伝熱促進は主にこの二次流れに起因するからである。

流路の主流方向の領域を上流から  $N=1-10$ ,  $11-20$ ,  $21-30$  の 3 領域でそれぞれ平均したヌッセルト数  $Nu_m$  と  $Wi$  の関係を考えて場合、各主流方向位置だけでなく、上下壁と側壁とで局所伝熱特性が異なった。これらは流動場の変化に起因するが、流れの可視化と PIV 計測による速度分布の測定により、その形態に応じておよそ (A) ~ (D) の領域に分けることができた。

領域 (A) では、前述の通り、流れはニュートン流体と同様の定常層流である。(B) では、法線応力差により流路下流において 1 対の縦渦状の双子渦が形成され、湾曲外側の側壁へと流体が輸送されることで  $Nu$  が著しく増加する。(C) では、下流から双子渦が 1 つ渦へと遷移する。これにより側壁の  $Nu$  が減少する。一方、主流は流路の上下壁近傍に偏流し、これにより上下壁の  $Nu$  が増加する。この 1 つ渦と偏流の領域は上流 ( $N=11-20$ ) へと遷移し、特に上下壁の  $Nu$  が顕著に増大する。(D) では、法線応力差の増加により、下流にて再び強い双子渦が安定して形成され、主流の偏流が抑制されることで側壁の  $Nu$  が増加し、上下壁の  $Nu$  が相対的に減少する。

このように、PAAm 水溶液では、平均熱伝

達率がレイノルズ数  $Re \sim O(1)$  の領域でもニュートン流体と比較して高い値を示し伝熱促進効果が得られることが分かる。また、異なる粘弾特性を有する溶液では、平均ヌセルト数および圧力損失係数は  $Re$  よりもワイゼンベルグ数  $Wi$  により適切に整理できることを示した。これは流動構造が主に粘弾性流体により生成される法線応力差に起因するためである。

マイクロ流路内でも同様の傾向が見られ、粘弾性流体を用いて流れの不安定性を促進し、流れを非定常化することで物質混合や伝熱促進できることを確認した。ただし、この非定常流れは粘弾性乱流というよりは非定常層流であり、それが湾曲の切替で渦の方向が変化することで規則性が低下することで複雑な流動構造を形成していることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 3 件)

巽和也, 永坂亘, Heong Chee Leong, 中部主敬, 蛇行流路内における粘弾性流体流れの流れと伝熱特性, 日本機械学会論文集, B 編, Vol. 79, No. 797 (2013), pp. 93-103.

K. Tatsumi, Y. Takeda, K. Suga and K. Nakabe, Turbulence characteristics and mixing performances of viscoelastic fluid flow in a serpentine microchannel, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 318, Issue SECTION 9, (2012), Article number092020.

K. Tatsumi, Y. Komori, T. Arakawa, K. Nishitani and K. Nakabe, Development of a Numerical Model for Single Red Blood Cell Motions in Stationary Fluid in the Presence of Uniform Magnetic Field, Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 13, No. 3/4, (2013), pp. 228-241.

### 〔学会発表〕(計 11 件)

K. Tatsumi, W. Nagasaka, T. Matsuo and K. Nakabe, A Numerical and Experimental Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in A Serpentine Channel, Proc. 15th International Heat Transfer Conference, (2014), IHTC15-9615, August 10-15, Kyoto (10.1615/IHTC15.hte.009615).

K. Tatsumi, W. Nagasaka, K. Kanaiwa and K. Nakabe, Influences of Fluid Properties on Heat Transfer and Pressure Loss Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in Serpentine Channel, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, (2013), June 16-20, Lisbon.

W. Nagasaka, K. Tatsumi, O. Nakajima and K. Nakabe, Flow and heat transfer characteristics of viscoelastic fluid flow in a serpentine channel - Influences of the fluid properties on the performance -, Proc. 3rd Int. Forum on Heat Transfer, (2012), pp. , November 13-15, Nagasaki.

K. Tatsumi, O. Nakajima, W. Nagasaka and K. Nakabe, Flow Observation and Heat Transfer Performance of Viscoelastic Fluid Flow in a Serpentine Channel, Proc. 7th Int. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, (2012), pp. , September 24-27, Sicily.

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.

木村隆一, 永坂亘, 巽和也, 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 4 報 助走域 ~ 発達域の局所熱伝達測定), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014, 2014/11/8.

中山開, 松尾拓哉, 永坂亘, 巽和也, 中部主敬, 蛇行流路内粘弾性流体流れの伝熱特性に関する数値解析, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014/5/21.

巽和也, 蛇行流路内粘弾性流体流れの熱流動特性, 日本伝熱学会関西支部 2013 年度第 3 回講演討論会, 2013/12/10.

松尾拓哉, 巽和也, 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 3 報 流動特性に関する数値解析), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013, 2013/10/20.

永坂亘, 巽和也, 中島理, 中部主敬, 蛇行流路内粘弾性流体流れの伝熱特性に与える流体物性の影響, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012/5/30.

中島理, 巽和也, 永坂亘, 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 3 報 3 次元流動場の測定と解析, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012/5/30.

### 〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

### 〔その他〕

該当無し

6 . 研究組織

(1)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

(2)連携研究者

中部主敬 ( NAKABE Kazuyoshi )

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80164268