

蛇行流路内における粘弾性流体の流動および伝熱特性*

巽 和也^{*1,*2}, 永坂 亘^{*1}, 中島 理^{*1}, Heong Chee Leong^{*1}, 中部主敬^{*1,*2}

Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid Flow in a Serpentine Channel

Kazuya TATSUMI^{*3,*4}, Wataru NAGASAKA, Osamu NAKAJIMA,
Chee Leong HEONG, Kazuyoshi NAKABE

^{*3} Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

^{*4} Advance Research Institute of Fluid Science, Kyoto University
Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 615-8530 Japan

The heat transfer and fluid flow characteristics of a viscoelastic fluid flow in a serpentine channel are described in this paper. The average heat transfer coefficient, pressure loss, and flow visualization were measured under the Reynolds number conditions of $Re = 0.5 \sim 2.0$. Water solutions of polyacrylamide with sucrose and plain sucrose were employed as viscoelastic fluids and Newtonian fluids, respectively. An increase in the Nusselt number with increasing Reynolds number in the case of the viscoelastic fluid flow was observed in the serpentine channel, while in the case of the Newtonian fluid flow, the Nusselt number remained approximately constant. The visualization results revealed that unsteady flows with a large fluctuation and longitudinal vortex-like secondary flows were generated in the case of the viscoelastic fluid flow, particularly downstream of the inflection point of the serpentine channel. This was believed to be attributed to the increase in the flow instability and the normal stresses produced by the elastic property of the fluids. Further, the Nusselt number increased even in the case of the viscoelastic fluid flow in the straight channel, relative to that in the case of the Newtonian fluid flow. However, this increase moderate in comparison to that in case of the serpentine channel, which indicates that the heat transfer enhancement can be obtained effectively by a combination of the viscoelastic fluid flow and channel geometry. A considerable increase in the pressure loss penalty was observed in the case of the viscoelastic fluid flow. However, the viscoelastic fluid case showed a higher overall performance in terms of the pumping power.

Key Words : Viscoelastic Fluid, Serpentine Channel, Flow Visualization, Low Reynolds Number Flow, Heat Transfer, Pressure Loss

1. 緒 言

これまで低レイノルズ数流れにおける伝熱・混合性能の促進について数多くの研究が行われ、特に拡大伝熱面としてのフィンや、はく離・再付着渦を形成する流路など、流路形状の改良による促進効果が図られてきた。一方、作動流体の特性を変化させて、伝熱・混合促進を行う方法も報告されている。例えば、Nano-Fluids と称されるものは、流体中にナノ粒子を懸濁することで、見かけの熱伝導率と壁面熱伝達率を向上させることができるとされている⁽¹⁾⁽²⁾。また、作動流体に微量の高分子を添加した粘弾性流体を活用する方法も発表されている。粘弾性流体では、流れのせん断応力による高分子の伸縮・変形運動により付加的な粘性と共に弾性特性が生じるが、その弾性による応力により二次流れと流れの不安定性が促進される場合があると考えられている。これにより、微小流路内における低レイノルズ数流れでも流れが非定常化して乱れを生成し、混合・物質伝達・熱伝達を促進す

^{*1} 正員, 京都大学工学研究科 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

^{*2} 京都大学工学研究科高等研究院流体理工学研究部門 (〒 615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

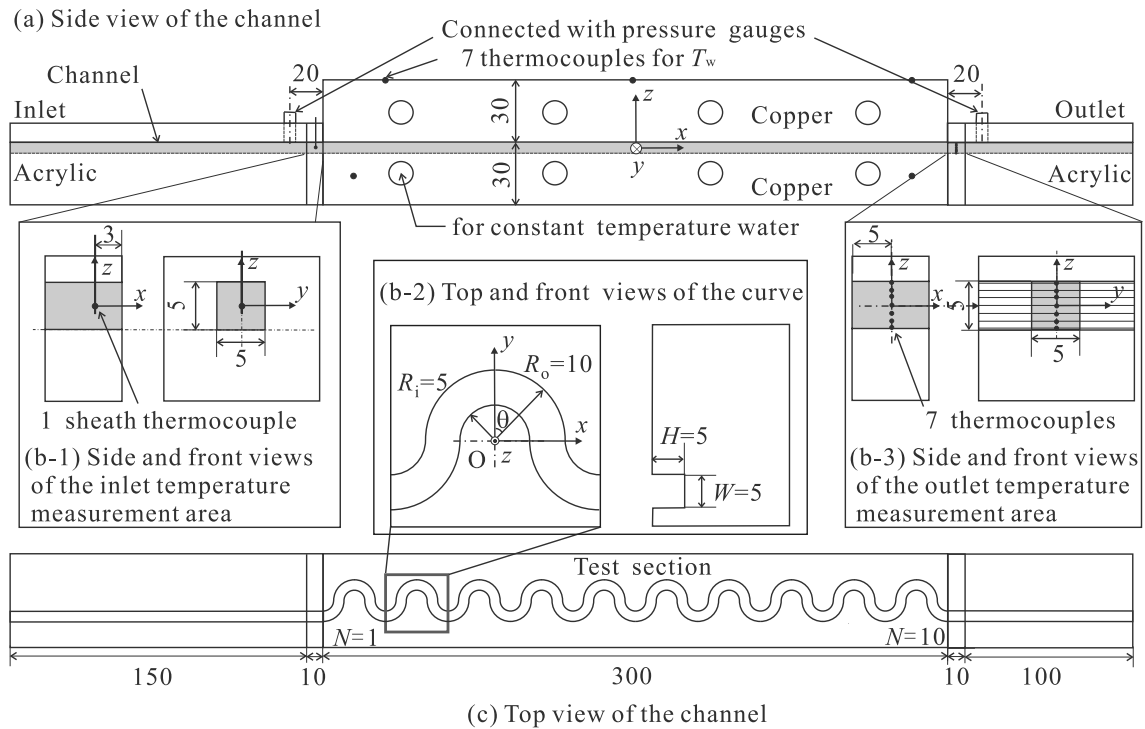


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus and the serpentine channel used in the heat transfer measurements.

ることが新たな技術として以下のように試みられている。

粘弾性流体流れの不安定性に関する研究では, Shaqfeh らが摂動解析や実験により同軸回転二重円筒内の Taylor-Couette 流れ⁽³⁾, Taylor-Dean 流れ⁽⁴⁾を対象に詳細な研究を行っている。また, 横山・富田は⁽⁵⁾, 曲がり管内助走区間における高分子添加溶液の流動について固体トレーサ法を用いた速度計測を行い, 層流と乱流の両領域で乱れの生成が促進されることを示した。近年では, Groisman ら⁽⁶⁾は, 矩形断面蛇行流路内での流れの可視化とレーザドップラー流速計 (LDV) を用いた速度計測を行い, 粘弾性流体による乱れと混合促進が得られると報告している。さらに, 玉野ら⁽⁷⁾は, 円形断面蛇行流路の下流領域での流れの可視化と粒子画像流速計 (PIV) による速度場計測を行い, 時間平均速度分布において 2 次流れが形成されることを報告している。これに加えて, マイクロスケールの蛇行流路内流れについても, 可視化実験の結果から流路内において流れの変動と混合促進効果が得られることが報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

このように, 蛇行流路内における粘弾性流体に関する流動および混合特性に関する研究が行われているが, 伝熱特性に関連づけた実験的知見はほとんど見当たらず, 伝熱促進技術の開発を指向した計測を行う必要がある。粘弾性流体を用いた低レイノルズ数流れにおける伝熱促進効果としては, 直線流路内において二次流れ⁽¹⁰⁾が生成されることにより熱伝達率が増加することが報告されている^{(11)~(13)}。また, Norouzi らは⁽¹⁴⁾, 矩形曲がり管における伝熱特性に関する数値解析を行い, 第一法線応力差の増大に伴い Taylor 渦が生成され, 平均ヌッセルト数が増加することを示した。そこで, 前述の蛇行流路ではこれら直線流路や曲がり管と比較してさらに流れの変動と強い二次流れが形成されることが考えられることから, 本研究では, ミリメートル寸法の蛇行流路内の低レイノルズ数粘弾性流体流れにおける伝熱特性を解明することを目的とした。実験では, 作動流体として, スクロース水溶液にポリアクリルアミドを添加した粘弾性流体である溶液を用い, 等温加熱条件下での平均熱伝達率測定と圧力損失測定, ならびに流れの可視化を行うことでその基本特性を示すと共に, ニュートン流体としてスクロースのみを添加した水溶液の結果と比較することで, 伝熱促進効果の評価を行った。

2. 実験手法と条件

2.1 伝熱実験

図 1 に実験で用いた流路の概観図と各部の寸法を示す。伝熱実験で用いる流路は、銅製の蛇行流路部とその入口と出口に接続したアクリル製の直線流路部から構成される。

流路形状および寸法として、図に示すように、測定部である蛇行流路は半円形状の湾曲部が周期的に彫り込まれた厚さ 30mm の銅製ブロックから成る。流路の断面は 1 辺 5mm の正方形である。湾曲部の内半径 R_i と外半径 R_o は、それぞれ $R_i = 5\text{mm}$ と $R_o = 10\text{mm}$ であり、この湾曲部を切削した蛇行流路の上壁として下壁部と同じく厚さ 30mm の銅ブロックを設置した。また、比較実験で用いた直線流路も銅製で、その断面が 1 辺 5mm の正方形であり、主流方向長さが蛇行流路の流路長（断面中心線の長さ）に等しい 471mm である。

蛇行、直線いずれの流路についても、その流路上流には作動流体で満たされた加圧容器が設置され、容器内を昇圧することで流体を流路へ供給する。流体の質量流量は、実験中に流路出口から排出される流体の質量を電子天秤（A&D：GF-3000）を用いて測定し、時間で除した平均値として求めた。実験中の流量の変動はおよそ 0.4mL/min であり、実験条件の最大流量に対して約 1% である。

銅製の流路上下壁部には貫通孔が複数設けられ、そこに恒温槽とポンプを用いて温度一定の水を循環させる。これにより、流路壁の温度を一定に保ち、等温加熱条件を適用した。また、流路内の気泡の発生の抑制と高分子の変性を防ぐため、壁面の最高温度は 40°C を越えないように設定して実験を行った。流体温度は、図 1 に示すように、流路入口では 0.5mm 径の K 型シース熱電対を流路内に挿入し、流路断面中心の流体温度を測定した。流路出口では、0.1mm 径の K 型裸熱電対を流路幅方向に張り渡し、その中心温度を高さ方向に等間隔で 7 箇所測定した。この場合、流路断面内において高さ方向にも幅方向にも温度分布が相似であることを仮定して、測定した y 方向の温度分布から $y-z$ 断面内の 2 次元温度分布を算定した。これに正方断面流路内の層流流れの速度分布を適用することで流体のバルク平均温度を見積もった。速度分布については、作動流体として 2.3 節で述べるスクロース水溶液の場合には、ニュートン流体に関する矩形流路内速度分布⁽¹⁵⁾を用いた。

等温加熱条件下における流路内の平均熱伝達率 h_m と平均ヌッセルト数 Nu_m は、それぞれ式 (1) と (2) を用いて求めた。

$$h_m = \frac{\dot{m}c_p}{A_s} \times \ln \frac{T_w - T_{b,i}}{T_w - T_{b,o}} \quad (1)$$

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k} \quad (2)$$

$\dot{m}$ と c_p は流体の質量流量と等圧比熱容量であり、 A_s は伝熱面積である。 T_w は壁面温度であり、 $T_{b,i}$ と $T_{b,o}$ はそれぞれ流路入口と出口での流体バルク平均温度である。また、 D_h と k はそれぞれ流路の水力直径と流体の熱伝導率である。

一方、粘弾性流体であるポリアクリルアミド水溶液では、Wiginton と Dalton ら⁽¹⁶⁾が示す円管内のべき乗則流体流れの速度分布を適用した。この場合、ニュートン流体における円管と矩形流路の速度分布の関係に基づいてべき乗則流体流れの矩形流路内速度分布に変換した次式を用いた。

$$\frac{u}{u_m} = \left[0.14 \left(\frac{r}{a} \right)^4 - 0.334 \left(\frac{r}{a} \right)^3 + 0.28 \left(\frac{r}{a} \right)^2 + 0.0161 \left(\frac{r}{a} \right) + 1.06 \right] \times \frac{3n+1}{n+1} \left[1 - \left(\frac{y}{2.5} \right)^{(1.2n+1)/n} \right] \left[1 - \left(\frac{z}{2.5} \right)^{(1.2n+1)/n} \right] \quad (3)$$

ここで、 $r/a = y/2.5 = z/2.5$ であり、 $n = 1/3$ である。

流路壁面温度は流路の壁面を構成する銅ブロックに熱電対を 7 箇所埋込んで温度を測定し、その平均値を壁面温度 T_w とした。この場合、各位置における測定温度の T_w に対するばらつきはおよそ 0.2°C であった。また、この場合、銅の熱伝導率と直線流路内の層流熱伝達率を用いて求めたビオー数 Bi は $Bi < 0.1$ であることから、等温加熱条件を妥当であるとした。

また本実験では、圧力損失の測定も熱伝達率測定と同時に行った。この場合、流路入口と出口における流路上壁に設けた 1mm 径の穴にチューブを介して圧力計を接続することで差圧を測定した。圧力計は、流路内の流量（差

圧)に応じて微差圧計 (SMC 製:PSE550) と圧力計 (キーエンス:AP-C30) を使い分けた。これらの熱電対および圧力計からの出力信号は全て、A/D 信号変換器 (横河電機:WE7231 W7000) を介してパソコンに収録した。

2.2 可視化実験

流動特性を定性的に観察するために、染料 (メチレンブルー) を用いた可視化実験を行った。実験では、図 1 に示す銅製の蛇行流路部を透明アクリル製の流路と取り替えて測定を行った。したがって、可視化実験は非加熱の等温 (室温) 条件下で行った。蛇行流路の上流にある直線流路上壁中央に設けた穴には、外径 1.06mm、内径 0.56mm の PTFE チューブを挿入した。このチューブには流路断面中央の位置に微小孔が流れに対向して設けられており、シリンジポンプ (日本光電:CFV-3200) を用いて 200~750 μ L/min の流量で染料をチューブに供給することで、微小孔から染料が流路内に供給される。この時、染料の粘性を作動流体のそれと等しくするために、64.4wt% のスクロース水溶液に染料を混入したものを用いた。動画の撮影には 2 台のデジタルビデオカメラ (Sony:HDR-CX370V, 30fps) を用い、流路上方および側方の 2 方向から可視化撮影を行った。これら両方向からの撮影は同期させて行った。

2.3 作動流体と実験条件

実験で用いる粘弾性流体は、64.4wt% スクロース水溶液に 1wt% NaCl と 500ppm のポリアクリルアミド (Polyscience:分子量 MW=1.8 $\times 10^7$) を添加した溶液である (以降 PAAm 水溶液と称す)。本実験では、スクロース水溶液を溶媒として用いることで後述する緩和時間 λ の増大を図った。また、PAAm の凝集を抑制するために NaCl をカウンターイオンとして混入している。実験では、粘弾性流体との比較を行うためのニュートン流体として 64.4wt% のスクロース水溶液を用い、測定時のレイノルズ数範囲を合わせた。

溶液の作成手順を以下に示す。スクロース水溶液については、水道水に 64.4wt% のスクロースを混ぜた溶液を円筒容器に封入し、室温にて容器を回転ミルを用いて 120rpm で 12 時間回転することで作製した。一方、PAAm 水溶液の場合は、はじめに水道水に 1wt% の NaCl と 500ppm の PAAm を混ぜて、同様に回転ミルで 120rpm で 12 時間容器を回転させて PAAm を十分に混合する。その後、64.4wt% のスクロースを追加して、さらに 12 時間回転させて作製した。

各溶液に関する物性値の求め方を以下に示す。流体の密度 ρ については、電子天秤を用いて求めた。また、式 (1) と (2) で用いる定圧比熱容量 c_p と熱伝導率 k については、それぞれ文献⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾で示されたスクロース水溶液に関する温度と濃度に対する両物性値の関係式を利用した。実験における流体の温度変化 15~40 $^{\circ}$ C に対するこれらの物性値の変化は、 ρ では約 1%, c_p と k では共に約 5% である。実験で用いた流体の代表温度は、流路入口部、出口部におけるバルク平均温度から求まる対数平均温度を用いた。また、PAAm 水溶液では、PAAm の濃度がスクロースの濃度と比較して小さいことから、 c_p と k についてはスクロース水溶液の場合と同じ関係式を用いた。

粘性係数 μ と緩和時間 λ は、溶液の濃度と温度の影響を顕著に受ける。そのため、レオメータ (Anton Paar:MCR301) を用いて実験ごとに温度およびひずみ速度との関係を測定した。はじめに、スクロース水溶液の μ の測定では、一定せん断速度 ($\dot{\gamma} = 50\text{s}^{-1}$) で約 1 $^{\circ}$ C の間隔で μ を測定し、文献⁽¹⁹⁾に記載の式 (4) に基づいて相関式を求めた。なお式中の T_m [$^{\circ}$ C] は流体温度である。測定の結果、各係数は $\alpha_\mu = 0.58$, $\beta = -3.1 \times 10^3$, $\varepsilon = 8.0 \times 10^5$ であった。ここでスクロース水溶液の場合における各測定の α_μ , β , ε について精密度を基にして誤差を求めた場合⁽²⁰⁾, それぞれ最大で $\pm 19\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 2.7 \times 10^{-5}\%$ であった。また μ に関する誤差は最大で $\pm 5.2\%$ であった。

$$\log_{10}\mu(T_m) = \alpha_\mu + \frac{\beta}{(T_m + 273)} + \frac{\varepsilon}{(T_m + 273)^2} \quad (4)$$

PAAm 水溶液における μ と温度の関係については、 $\dot{\gamma}$ を変化させてもそれぞれの流体温度に対する式 (4) に示した関係では、 β と ε は変化せず、 $\beta = -3.6 \times 10^3$, $\varepsilon = 7.9 \times 10^5$ でほぼ一定であった (β と ε に関する誤差はそれぞれ $\dot{\gamma} = 5.0\text{s}^{-1}$ の場合で $\pm 2.7\%$ と $\pm 8.0 \times 10^{-5}\%$ であり、 $\dot{\gamma} = 50\text{s}^{-1}$ では $\pm 1.9\%$ と $\pm 5.5 \times 10^{-5}\%$ であった)。そこで、実験ごとの μ を以下の手順で求めた。はじめに、PAAm 水溶液はべき乗則流体であるとして、実験ごとに作動流体の 20 $^{\circ}$ C における関係式

Table 1 Experimental conditions of the heat transfer measurements.

fluid	U_m [mm/s]	Re	N_D	Wi
Sucrose	10-40	0.82-2.40	0.40-1.60	-
PAAm (with sucrose)	10-81	0.23-2.64	0.04-0.49	11.7-140

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

を $\dot{\gamma} = 1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ の範囲で予め求める。PAAm 水溶液の 20°C における値の一例として、 $K = 0.55$ 、 $n = 0.88$ であった。次に、実験における流路内の代表せん断速度を $\dot{\gamma} = 4U_m/D_h$ として定め、そのせん断速度における μ を式 (5) から求める。ここで、 U_m は流路内流れの断面平均流速である。その結果、式 (4) における α_μ が求まる。最後に、実験の代表温度を求め、これを式 (4) に代入することでその温度における μ を求めた。

PAAm 水溶液の緩和時間 λ については、本実験で用いる溶液の濃度が小さくレオメータによる直接測定が難しいため、一定ひずみ付加後の応力分布に対して、応力緩和に関する Maxwell の一般化モデルを適用して求めた。はじめに、流体温度による λ への影響を求めるため、 $15, 20, 30, 40^\circ\text{C}$ における λ をそれぞれ測定した。PAAm 水溶液における μ と温度との関係における β と ε を λ にもそのまま適用できると仮定すれば、この結果に式 (4) を適用して λ と温度の関係も求めることが可能となる。実際、 β と ε における誤差はそれぞれ $\pm 9\%$ と $\pm 2.4 \times 10^{-4}\%$ であった。そこで、実験ごとに予め 20°C における λ を測定し、その値から式 (4) と同形式の λ に関する式における α_λ を求める。その式に、実験の代表温度を適用し、実験における λ を定めた。

測定の一例として PAAm 水溶液の粘性係数 μ は 20°C 、 $\dot{\gamma} = 200 \text{ s}^{-1}$ において $\mu = 0.31 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であり、緩和時間 λ は 20°C で $\lambda = 3.2 \text{ s}$ であった。また、最終的に $\mu - T_m$ 、 $\lambda - T_m$ の関係式による近似の誤差は、最大で μ では $\pm 2.6\%$ 、 λ では $\pm 7.5\%$ であった。また、PAAm 水溶液の物性値に関する経時変化が存在する場合があるため⁽²¹⁾、レオメータにより溶液作成後 72 時間以内では物性値変化がないことを確認した上で、全てその時間内で実験を行った。

伝熱実験の条件を表 1 に示す。実験では流量を変化させて、レイノルズ数 Re ($Re = \rho U_m D_h / \mu$) の範囲が $0.82 \leq Re \leq 2.40$ となる条件で、熱伝達率および圧力損失の測定を行った。表中の N_D と Wi は、それぞれディーン数とワイゼンベルグ数であり、式 (6) のように定義され、いずれも Re 数と共に増加する。可視化実験については、スクロース水溶液と PAAm 水溶液について、それぞれ $Re = 2.3$ と $Re = 0.1 \sim 2.3$ の条件について測定を行った。

$$N_D = Re \sqrt{\frac{D_h}{(R_i + R_o)}}, \quad Wi = \frac{4\lambda U_m}{D_h} = Re \left\{ \frac{4(\mu/\rho)}{D_h^2/\lambda} \right\} \quad (6)$$

3. 結果と考察

3.1 可視化実験の結果と考察

図 2 は、PAAm 水溶液を用いた場合の、上流から 2 周期目 ($N = 2$) 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。(a) は $Re = 0.1$ の画像対を示す。(b)~(d) は $Re = 1.3$ の結果であり、異なる時刻における画像対をそれぞれ示す。

図 2(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、スクロース水溶液の場合では、検討した Re 条件 ($Re = 2.3$) において同様の特性を示した。表 1 に示すように、伝熱実験でもスクロース水溶液の場合の Re と 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 2(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ことが分かる。

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。この条件では蛇行流路上流に位置する直線流路でも流脈線のスパン方向への移動が見られた。これは粘弾性流体の第一、第二法線応力差によって生じる二次流れの影響であると考えられるが、湾曲

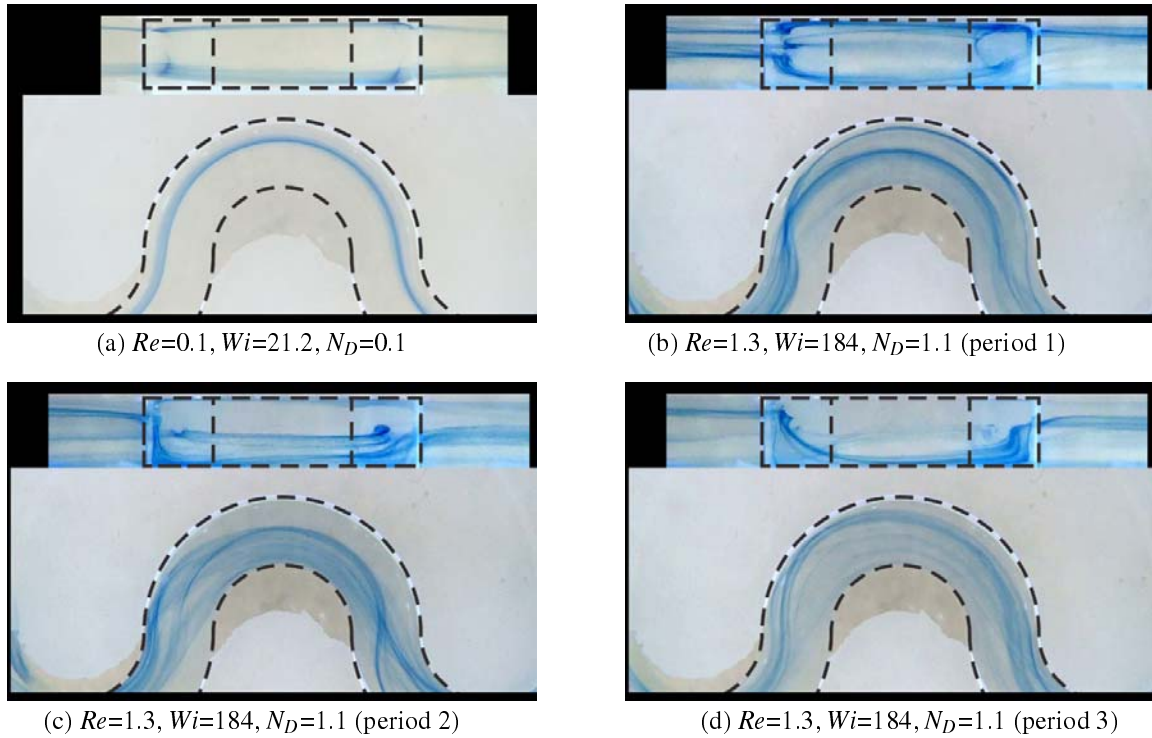


Fig. 2 Visualization for the streak lines (upper and lower images shown in each figure are the side view and overhead view of the channel respectively).

部における変動と比較するとその大きさは小さかった。したがって、蛇行流路内流れに対する上流の直線流路部における変動の影響は小さいと考えられる。

以下に流路内の流動特性を検討するために、図 2(b)~(d) に示すそれぞれの時刻における流脈線について考察を行う。はじめに、(b) では半円の湾曲部が接続する蛇行流路の変曲点である $\theta = -90^\circ$ のすぐ下流において、側方から見た場合、流路中央から上壁側と下壁側へそれぞれ向かう 2 種類の流脈線が見られる。これらを流路上方から撮影した画像と比較した場合、前者は半径方向内向きに移動するもの、後者は逆に外向きに移動するものに対応した。したがって、この時刻では、 $\theta = -90^\circ$ 近傍の領域で分岐する一対の双子渦状の二次流れが形成されていると考えられる。一方、(c) では、 $\theta = -90^\circ$ において、流路中央と湾曲外縁近くを通る 2 つの流脈線が観測される。下流では、前者は高さ方向と半径方向に位置を変えず、後者は湾曲外縁に沿って下壁側へ向かうと共に、半径方向内側へ流れる。また、(d) でも同様に $\theta = -90^\circ$ の下流では、流脈線は流路外縁の上壁近傍から側壁に沿って下壁側へと流れることが分かる。これらのことから、(c) と (d) の時刻では、流路中央を中心とした反時計まわりの単一の縦渦状の二次流れが形成されていると考えられる。

図 2(b)~(d) の全てにおいて、このように流脈線が大きく変化する領域は $\theta \simeq \pm 90^\circ$ の変曲点近くに位置する。これに対して、湾曲部やその頂点である $\theta = 0^\circ$ では、流路高さ方向と半径方向への流脈線の位置の変化は小さい。これは他の時刻においても同様に見られる傾向であり、上述の二次流れは主に変曲点近くにて存在し、湾曲部では減衰してその影響も減少すると言える。さらに、単一渦と双子渦のように、渦の構造は時間と共に変化することが分かる。他の湾曲部を含めた可視化動画で見られた流脈線の変動、すなわち蛇行流路内の非定常な流れは、主にこの二次流れの時間的変化に伴うものであると考えられる。このことから、流れの空間的および時間的変動は、湾曲の頭頂部近傍よりも変曲点の方が顕著であり、次節で述べる伝熱促進効果はこの二次流れによるものであると言える。

3.2 圧力損失測定の結果と考察

Fanning の管摩擦係数 $f = \Delta P D_h / 2\rho U_m^2 L$ とレイノルズ数 Re の関係を図 3 示す。ここで、 ΔP は流路内の圧力損失である。図には、直線流路と蛇行流路におけるスクロース水溶液流れの結果と、直線流路と蛇行流路における

PAAm 水溶液流れの結果を示す。また、図に示す破線は、ニュートン流体における正方断面流路内の発達流れに関する解析解 $f = 14.2/Re^{(15)}$ である。同図からスクロース水溶液の場合での直線流路（×印）と蛇行流路（○印）の結果は同じような傾向を示していることが分かる。前節の可視化実験の結果でも述べた通り、本実験条件ではディーン数 N_D が小さいため、蛇行流路内の湾曲部においても二次流れが弱く、圧力損失や伝熱に与える影響は無視し得る。そのため、蛇行流路の場合の f は、直線流路の値とほぼ等しくなると考えられる。一方、両者を破線の解析解と比較すると f がやや小さいことが分かる。これは、本実験で用いるスクロース水溶液は PAAm 水溶液と同様に流体温度の粘性係数 μ への影響が大きいためであると考えられる。すなわち、流路断面内での μ の顕著な変化のために一様温度の場合と異なる速度分布が得られ、それにより f が減少したと考えられる。そこで、円管内流れに関する補正式ではあるが、流路内の温度分布の影響を考慮して、式 (7) に示すような修正管摩擦係数 f' を用いる⁽²²⁾。

$$f' = \frac{14.2}{Re} \left[\frac{\mu(T_w)}{\mu(T_m)} \right]^\zeta \quad (7)$$

$\mu(T_w)$, $\mu(T_m)$ は、それぞれ壁面温度 T_w と流体バルク平均温度 T_m における粘性係数である。べき数 ζ は、定数として 0.58 を適用する⁽²²⁾。実験で得られた温度分布を基に計算した f' の直線を、図 3 に実線として示す。図に示す通り、スクロース水溶液の分布は蛇行流路、直線流路を問わず f' と良好に一致することが分かる。これにより、圧力損失測定法の妥当性が確認できる。

次に、PAAm 水溶液（●印と＋印）の結果については、 $Re < 0.35$ の領域でスクロース水溶液の場合と近い値を示す。一方、 $Re > 0.35$ の領域では、 Re の増加に伴い管摩擦係数は増加して、スクロース水溶液および f , f' の分布から大きく離れる。これは蛇行流路の場合においては、可視化実験で述べたように Re が小さい場合では流れは定常で二次流れも生成されないが、 Re が増加すると流れが非定常となるだけでなく、主流方向断面内に二次渦が形成され、それが成長するためと考えられる。

PAAm 水溶液はべき乗則流体に属し、せん断速度によって粘性係数が変化するため、速度分布および管摩擦係数の値はニュートン流体の場合と異なる。この場合、べき乗則流体の直線流路における定常流れに関する管摩擦係数は、式 (8) で示される修正レイノルズ数 Re^* を用いた $f = 16/Re^*$ を採用することにした⁽¹¹⁾⁽²³⁾。

$$Re^* = \frac{\rho U_m^{2-n} D_h^n}{8^{n-1} K (B + A/n)^n} \quad (8)$$

ここで、 K , n は 2.3 節で示したべき乗則における定数であり、 A , B は正方断面流路の値としてそれぞれ 0.2121, 0.6766 を適用する。図 3 に示す結果を f と Re^* の関係に直した分布を図 4 に示す。また、 $f = 16/Re^*$ の関係を破線で図中に示す。さらに PAAm 水溶液の場合もスクロース水溶液の場合と同様に、流路断面内における温度分布の影響を考慮する必要があるため、式 (7) と同様の補正を行った。その結果を実線として図に示す。

$Re^* < 0.4$ ($Re < 0.35$) の領域では、PAAm 水溶液を用いた場合の直線流路（＋印）と蛇行流路（●印）の結果は互いによく一致する。またその分布は図 3 の場合に比して実線とより良い一致を示す。前述の可視化実験の通り PAAm 水溶液流れが定常流であるこの領域では、 Re^* で良く整理できることが分かる。

一方、 $Re^* > 0.4$ の領域では、図 3 の傾向と同様に、直線流路と蛇行流路の管摩擦係数は共に Re^* の増加に対する減少率が小さくなり、その値は解析解よりも大きくなる。また、 $f = 16/Re^*$ から外れる時の Re^* の値は両流路で同じであるが、さらに Re^* が増加すると、蛇行流路の場合の方が f は大きくなる。直線流路の場合において、 Re^* が増加する場合に、 $f = 16/Re^*$ の関係が満たされず、文献⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽²³⁾の結果と異なる結果となる理由として、 Wi の違いが挙げられる。本実験では、スクロース水溶液に PAAm を混ぜることで低い Re 領域でも Wi は高い値を示す。このため、程度に違いはあっても直線流路内流れにおいても、蛇行流路内流れで観測されたような流れの非定常性や大規模な縦渦の形成へと発展する二次流れが顕われ、それに伴って圧力損失の増大が顕著になったと考えられる。

3.3 熱伝達率測定の結果と考察

本節では伝熱実験の結果について検討を行う。図 5 に平均ヌッセルト数 Nu_m と Re の関係を示す。また、図 6 に Nu_m と修正レイノルズ数 Re^* の関係を示す。

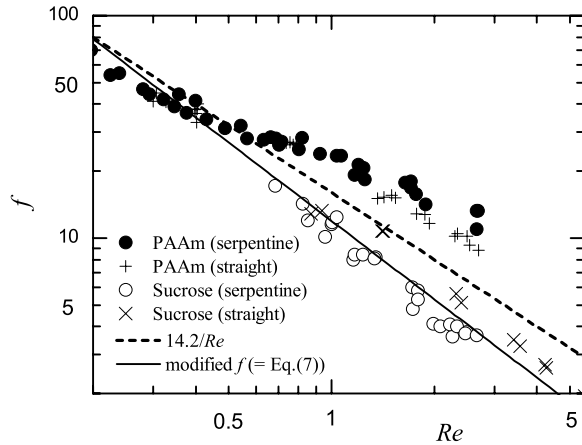


Fig. 3 Relationship between friction factor, f and Reynolds number, Re .

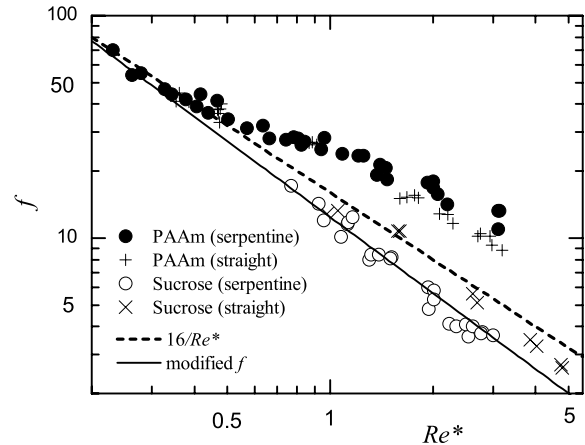


Fig. 4 Relationship between friction factor, f and modified Reynolds number, Re^* on the basis of the power law fluid.

はじめに、図5においてスクロース水溶液を用いた場合における直線流路（×印）と蛇行流路（□印）について考察を行う。図には比較のため、等温加熱条件下における正方断面の直線流路内での、助走区間の影響を考慮したニュートン流体の解析結果⁽²⁴⁾を破線で示す。さらに、この解析結果について、管摩擦係数 f の場合と同様に流路断面内の温度分布による Nu_m に対する補正⁽²²⁾を適用した結果を図中に実線で示す。図において、スクロース水溶液の場合では、図3の場合と同様に、直線流路と蛇行流路の Nu_m 分布は互いにほとんど一致し、蛇行流路内にて顕著な二次流れが形成されていないことが分かる。また、これらの結果は補正した解析解と良好な一致を示すことから、本実験の妥当性が確認できた。

次に、図5と図6においてPAAm水溶液を用いた場合を見ると、 $Re < 0.4$ ($Re^* < 0.47$) の領域では直線流路（+印）および蛇行流路（■印）の両方の結果は、解析結果に漸近していることが分かる。したがって、図3および4でも述べた通り、この領域において流れは定常であり顕著な二次流れが存在しないと考えられる。その結果、粘弾性流体を用いた伝熱促進効果が得られないことが分かる。

これに対して、 $Re > 0.4$ ($Re^* > 0.47$) では、PAAm水溶液の場合はスクロース水溶液の場合と比較して、 Re の増加と共に Nu_m が増加する。特に、蛇行流路内流れの場合では増加は顕著である。 $Re = 2.7$ ($Re^* = 3.1$) では Nu_m は約12となり、同 Re 条件におけるスクロース水溶液の場合と比較して約3倍の値を示すことから、高い伝熱促進効果が得られることが分かる。一方、PAAm水溶液の直線流路の場合には、その増加率は蛇行流路の場合と比較して小さく、 $Re = 2.6$ では $Nu_m = 6.8$ とスクロース水溶液の場合に対して1.5倍程度である。前節の末尾で議論したように、本研究で用いた粘弾性流体流れでは、 Re は小さいが Wi は比較的大きい。このため、直線流路においても二次流れが f や Nu_m の増大に寄与していると考えられる。しかし、式(6)に示される粘弾性流体特有の諸物性を変化させて熱流動現象に及ぼす影響を別途より詳細に調査し、第一、第二法線応力差による二次流れへの影響について評価する必要がある。本実験の蛇行流路では図2で示した可視化実験で見られたような、流路断面全体を占める程の強い縦渦による流体混合が得られるのに対して、直線流路においてはGiesekus⁽¹⁰⁾やHartnettら⁽¹¹⁾が示すような矩形直線流路における軸対称な渦形成は弱く、伝熱促進効果が低くなったと考えられる。

Re に対する管摩擦係数 f と平均ヌッセルト数 Nu_m の関係が示すように、伝熱性能が増加すると共に、圧力損失も顕著に増加することが分かる。そこで、蛇行流路内の粘弾性流体流れの伝熱に係る総合性能を評価するために、図7にポンプ動力 ΔPU_m と Nu_m の関係を示す。スクロース水溶液とPAAm水溶液の場合共に $\Delta PU_m < 100$ の領域では、定常流れとして流動特性が等しく、前述の通り f と Nu_m はいずれも同一の値を示したことから、直線流路（+印）と蛇行流路（■印）の場合に依らず、ポンプ動力に対する Nu_m は同じ値を示し、スクロース溶液の実線とも一致する。これに対して、 $\Delta PU_m > 100$ の領域では、流れが非定常となり二次流れが形成されることで蛇行流路については、ポンプ動力に対する Nu_m の増加率はPAAm水溶液の場合の方がより大きく、より高い性能を示すことが分かる。これに対して、PAAm水溶液で直線流路を用いた場合では、ポンプ動力に対する Nu_m の分布はスクロース水溶液の場合とほぼ同じである。したがって、図3（あるいは4）と6で示したように、直線流路で

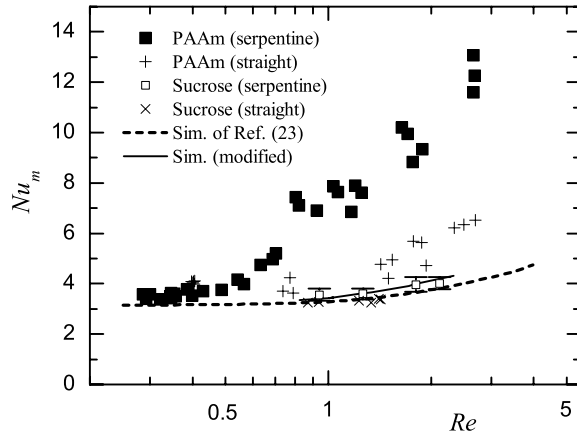


Fig. 5 Relationship between Nu_m and Re in the cases of sucrose and PAAm solutions.

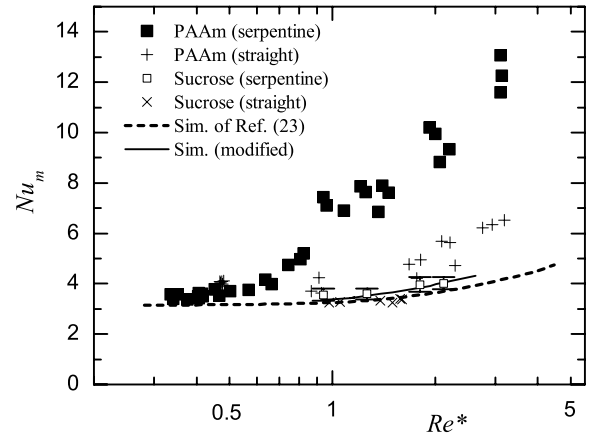


Fig. 6 Relationship between Nu_m and Re^* in the cases of sucrose and PAAm solutions.

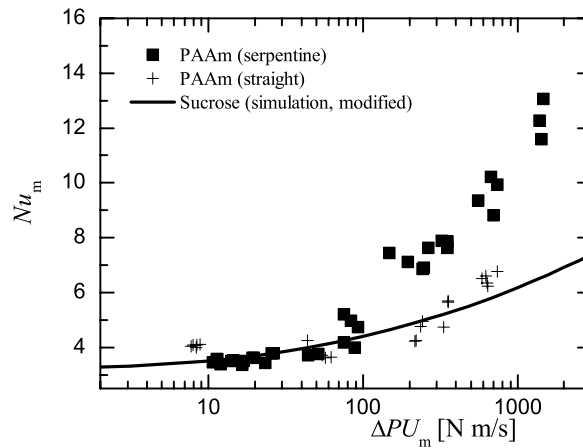


Fig. 7 Total performance evaluated by the relationship between the pumping power ΔPU_m and Nu_m .

は粘弾性流体により二次流れが形成されて伝熱促進効果が得られるものの、同程度の圧力損失の増大が生じるため総合性能としてはスクロス水溶液とほぼ等しくなることが分かった。

従って粘弾性流体を用いることで低レイノルズ数領域でも伝熱促進効果が得られるだけでなく、蛇行流路内粘弾性流体流れの場合では、蛇行流路の変曲点近くで強い縦渦状の二次流れが形成されたため総合性能でも高い値を示すことが分かった。

4. 結 言

本研究では、正方断面を持つ蛇行流路内の粘弾性流体流れにおける伝熱および流動特性の解明を目的として、ポリアクリルアミドとスクロス混合水溶液（PAAm 水溶液）を用いて、可視化実験ならびに等温加熱条件下における平均熱伝達率と圧力損失の測定を行った。以下に、得られた主な結果を示す。

1. 可視化実験では、PAAm 水溶液の場合において低レイノルズ数領域（ $Re < 0.35$ ）では、ニュートン流体であるスクロス水溶液の場合と同様に、流れは定常で顕著な二次流れは観測されなかった。 Re が 0.35 以上に増加すると PAAm 水溶液の場合では非定常流れが観測された。特に、湾曲が接続する蛇行流路の変曲点とその近傍において、強い変動と単一渦や双子渦の形を有する縦渦状の二次流れが生成された。

2. 粘弾性流体流れの管摩擦係数 f は、 Re が小さい領域ではニュートン流体の定常層流流れの値と一致するが、流れが非定常となる Re の領域では f はスクロス水溶液の場合と比較して顕著に増加した。直線流路と蛇行流路の場合では、 f は共にべき乗則流体の f の値を上回るが、両者を比較すると蛇行流路内流れの方が高い値を示した。

したがって、蛇行流路内ではより非定常性と渦の規模が強くなると考えられる。

3. 平均ヌッセルト数 Nu_m は、PAAm 水溶液はスクロース水溶液の場合と比較して顕著に増大し、低いレイノルズ数条件下でも高い伝熱促進効果が得られる。また、同一ポンプ動力の条件下では、PAAm 水溶液の方が Nu_m が大きく、ポンプ動力が増加するに従ってその差が顕著となる。一方、直線流路内の粘弾性流体流れでは、同一ポンプ動力に対する Nu_m がスクロース水溶液の場合とほぼ等しくなることから、蛇行流路内の粘弾性流体流れの方がより高い総合性能が得られることが分かった。

謝 辞

本研究は、(独) 日本学術振興会科学研究費補助金 (若手研究 (B): 22760149) による研究成果である。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W., and Pradeep, T., “Nanofluids, Science and Technology”, John Wiley & Sons, (2007).
- (2) Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., and Wongwises, S., “Enhancement of Heat Transfer Using Nanofluids - An Overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, (2010), pp. 629-641.
- (3) Larson, R.G., Shaqfeh, E.S.G., and Muller, S.J., “A Purely Elastic Instability in Taylor-Couette Flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 218, (1990), pp. 573-800.
- (4) Joo, Y.L., and Shaqfeh, E.S.G., “Observation of Purely Elastic Instabilities in the Taylor-Dean Flow of a Boger Fluid”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 262, (1994), pp. 27-73.
- (5) 横山俊雄, 富田幸雄, “希薄高分子溶液の曲がり管内流動に関する研究(助走区間内流動)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 56, No. 8 (1990), pp.983-989.
- (6) Groisman, A., and Steinberg, V., “Efficient Mixing at Low Reynolds Numbers Using Polymer Additives”, *Nature*, Vol. 410, (2001), pp. 905-908.
- (7) 玉野真司, 伊藤 基之, 笹川哲, 横田和彦, “高分子水溶液の屈曲流路流れにおける二次流れの PIV 計測”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 9 (2009), pp.2115-2121.
- (8) Teodor, B., Enrico, S., Groisman, A., and Steinberg, V., “Chaotic Flow and Efficient Mixing in a Micro Channel with a Polymer Solution”, *Physical Review E*, Vol. 69, (2004), 066305.
- (9) Li, F.-C., Kinoshita, H., Li, X.-B., Oishi, M., Fujii, T., and Oshima, M., “Creation of Very-low-Reynolds-number Chaotic Fluid Motions in Microchannels Using Viscoelastic Surfactant Solution”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, (2010), pp. 20-27.
- (10) Giesekus, V.H., “Sekundärströmungen in Viskoelastischen flüssigkeiten bei Stationärer und Periodischer Bewegung”, *Rheologica Acta*, Vol. 4, (1965), pp. 85-101.
- (11) Hartnett, J.P., and Kostic, M., “Heat Transfer to a Viscoelastic Fluid in Laminar Flow Through a Rectangular Channel”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 6 (1985), pp. 1147-1155.
- (12) Xie, C., and Hartnett, J.P., “Influence of Rheology on Laminar Heat Transfer to Viscoelastic Fluids in a Rectangular Channel”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 31, (1992), pp.727-732.
- (13) Naccache, M.F., and Mendes, P.R.S., “Heat Transfer to Non-Newtonian Fluids in Laminar Flow Through Rectangular Ducts”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, (1996), pp. 613-620.
- (14) Norouzi, M., Kayhani, M.H., Nobari, M.R.H., and Demneh, M.K., “Convective Heat Transfer of Viscoelastic Flow in a Curved Duct”, *World Academy of Science Engineering and Technology*, Vol. 56, (2009), pp. 327-333.
- (15) Shah, R.K., and London, A.L., *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Advances in Heat Transfer, Supplement 1, Academic Press (1978).

- (16) Wiginton, C.L., and Dalton, C., "Incompressible Laminar Entrance Flow in a Circular Sector Duct", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 37, (1970), pp. 854-856.
- (17) Gucker, F.T., and Ayers, F.D., "The Specific Heat of Aqueous Sucrose Solutions at 20°C and 25°C and the Apparent Molal Heat Capacity of Non-electrolytes", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 59, No. 3 (1937), pp. 447-452.
- (18) Werner, M., Baars, A., Werner, F., Eder, C., and Delgado, A., "Thermal Conductivity of Aqueous Sugar Solutions under High Pressure", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 28, (2007), pp. 1161-1180.
- (19) Mirsa, B.N., and Varshni, Y.P., "Viscosity-Temperature Relation for Solution", *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 6, (1961), pp. 194-196.
- (20) ASME, Measurement Uncertainty, Performance Test Codes ANSI/ASME PTC 19.1-1985, (1986), The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- (21) Busse, W.F., "Mechanical Structures in Polymer Melts. II. Roles of Entanglements in Viscosity and Elastic Turbulence", *Journal of Polymer Science Part A-2*, Vol. 5, (1967), pp. 1261-1281.
- (22) Kays, W.N., and Crawford, M.E., *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd ed. (1980), pp. 275-287, McGraw-Hill.
- (23) Kozicki, W., Chou, C. H., and Tiu, C., "Non-Newtonian Flow in Ducts of Arbitrary Cross-sectional Shape", *Chemical Engineering Science*, Vol. 21, (1966), pp. 665-679.
- (24) Chandrupatla, A.R., and Sastri, V.M.K., "Laminar Forced Convection Heat Transfer of a Non-Newtonian Fluid in a Square Duct", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 20, (1977), pp. 1315-1324.