

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760113

研究課題名（和文） 高分子水溶液の曲り管内流れにおける弾性乱流

研究課題名（英文） Elastic turbulence in curvilinear pipe flow of polymer solutions

研究代表者

玉野 真司 (TAMANO SHINJI)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：40345947

研究成果の概要：Glycerin 50%水溶液、粘弾性流体である高分子水溶液(PAA 0.05 及び 0.1 wt% 水溶液)について、円形断面を有する多段屈曲流路(屈曲段数 1～60)の下流直後の直管部において、流体混合の可視化観察により、二次流れパターンの変化に伴い流体混合が急激に促進され始めることを、PIV 計測により、Glycerin 50%水溶液及び PAA 0.1 wt%水溶液の二次流れの相違をそれぞれ明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	0	2,300,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：粘弾性流体、曲り管、二次流れ、流体混合、可視化観察、PIV、弾性乱流、高分子水溶液

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究で扱う曲がり管路内の流れは、基本的な流れの一つであり、その二次流れに関してはこれまでに数多くの数値的・実験的研究が報告されている。しかしながら、その報告例のほとんどがニュートン流体に関するものであり、非ニュートン流体に関する研究、特に実験的研究は極めて少ない。Jones & Davies は曲率半径と曲がり段数が異なる円形断面ベンドパイプにおける希薄高分子水溶液の圧力損失測定を行っている。また、横山・富田は希薄高分子水溶液の曲がり管流れにおいて、曲がり部開始から 180° までの流れ場の発達過程を、断面の速度分布及び二次流れの可視化観察から検討している。

(2) 一方、非ニュートン流体の曲がり管流れの数値的研究として、分子モデル、Power-law モデル、2 次流体モデル、UCM モデル、Oldroyd-B モデル、及び Oldroyd3 定数モデルなど様々なモデルを用いた報告例がある。Tsang & James は、高分子水溶液のネットワーク構造による高い伸長粘度特性が二次流れを減衰させるとした。また、Fan らは、せん断粘度一定の粘弾性流体の完全発達円管内流れの数値シミュレーションにより、第一法線応力差はニュートン流体と同じ向きの二次流れを強める方向に、第二法線応力差は弱める方向にそれぞれ作用し、それらのバランスにより二次流れが強くなるか弱くなる

かが決定されるとした。このように、二次流れに及ぼすレオロジー特性が議論されてきているものの、ニュートン流体のものと比較すると、非ニュートン流体の曲がり管流れの二次流れの発生メカニズムについては不明な点が多い。

(3) 近年、化学工学分野において、多段屈曲構造を有するマイクロチャネルの静的ミキサーとしての利用が注目されてきている。Liu らは、3次元多段屈曲構造を有するマイクロチャネルにおいて、Yamaguchi らは、多段ヘアピンカーブ構造を有するマイクロチャネルにおいて、ニュートン流体の2液間の界面面積が増加することにより、層流域における流体混合が促進されることを報告している。一方、非ニュートン流体については、Groisman & Steinberg 及び Burghelea らが、分子量が大きい希薄高分子水溶液の多段屈曲流路内流れにおいて、溶液の弾性効果によって誘起される弾性乱れにより、非常に低いレイノルズ数においても、流体混合が促進されることを明らかにしている。また、Pathak らは、ジグザグマイクロチャネルにおいて、第一法線応力差と曲がり流線の複雑な複合効果により生じる流れの不安定性(弾性不安定性)により、流体混合が促進されるとしている。しかしながら、多段屈曲流路における二次流れと流体混合効果との関連については不明である。

(4) 180° ベンド下流に設けられた十分に長い直管部におけるニュートン流体の二次流れに関して、Rowe は様々な管径の全圧測定及び数値計算により、二次流れの歪みの下流方向変化を明らかにしている。また、Cheng & Yuen は可視化観察により、二次流れの下流方向への減衰過程を明らかにしている。一方、非ニュートン流体の曲がり管の下流部における二次流れについては、著者らの知る限り報告例はない。さらに、近年、化学工学の分野において注目されてきている多段屈曲流路の下流部における二次流れについては、ニュートン流体、非ニュートン流体に関わらず明らかにされていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、円形断面を有する単段及び多段屈曲流路の下流直後の直管部において、高分子水溶液の混合の様子を可視化観察により明らかにすることを目的とする。また、可視化画像の輝度値の標準偏差を算出することにより、多段屈曲流路による流体混合促進効果についても明らかにする。

(2) さらに、円形断面を有する単段及び多段

屈曲流路により発生したニュートン流体及び非ニュートン流体の二次流れを、最終曲がり管下流の直管部の流入部付近における PIV 計測により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に、可視化観察用の多段屈曲流路の概略図を示す。流路は、半径 $a = 4 \text{ mm}$ の円形断面を有し、流路中心線の曲率半径 $R = 12 \text{ mm}$ 、角度 180° の半円形のカーブを互い違いに組み合わせたものである。円形断面の半径 a と流路中心線の曲率半径 R の比である曲率半径比は $a/R = 0.33$ である。屈曲段数 N は装置を組み替えることにより、1 から 60 まで様々に変化させることが出来る。本研究では、 N を 1, 2, 6, 32 及び 60 とした。なお、円形断面を持つ流路は、厚さ 10 mm の透明アクリル板 2 枚それぞれに半円形の溝を加工し、それらを上下対称になるように重ねることにより製作した。

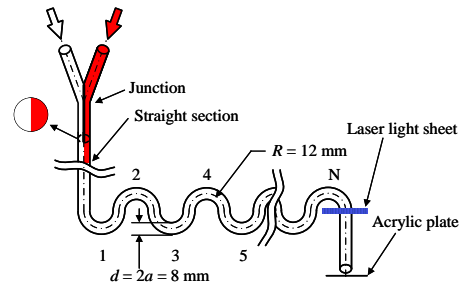


図 1 可視化観察用の多段屈曲流路

(2) 図 2 に、可視化観察用の実験装置の概略図を示す。実験装置は主として、2つのヘッドタンク、合流部、直管部及びテストセクションから構成される。2つのヘッドタンクには同じ作動流体が満たされるが、片側の流体には可視化染料が混合される。2つのヘッドタンクからそれぞれ流出した流体は、ビニールチューブを通り合流部で1つの流路にまとめられる。合流部直後では、図 1 に示すように直管部の垂直断面の左側に染料の混入していない流体、右側に染料の混入した流体が左右対称に分かれる。流体はその後、長さ 446 mm ($\approx 56d$) の直管部を通過して十分発達した後、テストセクションに流入する。そして、テストセクションを通過した流体は流路出口から長さ 46 mm ($\approx 6d$) の下流直管部を通過して流出する。流路出口には、下流方向からの可視化観察を行なうために、透明なアクリル板が僅かな隙間 ($< 1 \text{ mm}$) を空けて設置されている。重量法により流量 Q を求め、ヘッドタンクの高さを変えることにより Q を調節した。なお、実験の際、作動流体の流出によるヘッド差の変化を 3%以下とした。

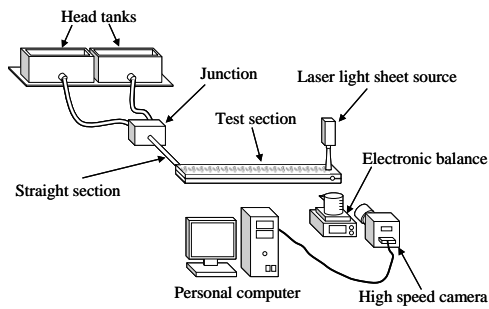


図2 可視化観察用の実験装置

(3) 本研究では、流路に垂直な断面で流路中心を原点とする直交座標系 (x, y, z) を用いる[図3(a)]. x 軸の正の方向は、曲がりの外向きとした。また、図3(b)に示すように、下流直管部において、最終曲がり管の終端を原点とし、主流方向に z' 軸を取った。

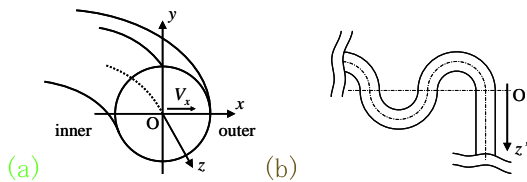


図3 座標系：(a) $x - y - z$, (b) z' .

(4) 二次流れの可視化観察実験では、可視化用染料としてローダミン B (Rhodamine B, ナカライテスク(株)製) を作動流体に 2 ppm 加えた。Nd: YAG レーザーシート光源 (1.5 W, 厚さ約 3 mm, 波長 532 nm, DPSS Green Laser, (株)日本レーザー製) により流路垂直断面を光切断し、マイクロレンズ (Micro Nikkor 105 mm F2.8S, PN-11, (株)ニコン製) を取り付けた高速度ビデオカメラ (FASTCAM-1024PCI, (株)Photoron 製) を用いて、流路出口に設置した透明アクリル板を通して下流方向から撮影した。可視化観察における撮影位置は、レーザーシート光の厚さの中心が、 $z' = 1.5$ mm となる位置 (曲がり管下流直管部) とした。

(5) PIV 計測では、可視化観察における実験装置のヘッドタンクの1つと合流部を取り除いたものを実験装置として使用した。トレーサ粒子として作動流体に中空ガラス粒子 (Hollow Glass Spheres, 粒径 9 ~ 13 μm , 比重 1.10, 日本カノマックス(株)製) を 12 ppm 懸濁させた。テストセクション下流の直管部の流路垂直断面をレーザーシート光で光切断し、高速度ビデオカメラで撮影した。実験条件により、フレームレートを 60 から 1000 fps まで、シャッタースピードを 1/60 から 1/1000 s まで変化させた。撮影画像の画素数は 1024 \times 1024 pixels とし、本研究において 1 pixel は約 15 μm に対応する。検査領域のサイズは 50 \times 50 pixels とし、探査領域のサ

イズは、トレーサ粒子の移動量に応じて、20 \times 20 pixels または 50 \times 50 pixels とした。また、すべての検査点の値において、周囲 8 点の検査点の値の正規分布を求め、標準偏差の 2 倍よりも大きい場合には異常値として排除し、周囲 8 点の値を用いた 3 次スプライン補間法により補間した。本研究では、100 個の解析結果の平均を取ることで速度分布を求めた。なお、本研究では、曲率半径比が $a/R = 0.33$ であり、従来の横山・富田の研究の $a/R = 0.033$ よりもかなり大きく、曲がり管部における流路垂直断面での撮影画像に屈折率の影響が強く現れたため、現時点においては、曲がり管部での可視化観察は行なえていない。

(6) 作動流体として、ポリアクリルアミド (Polyacrylamide, SANFLOC AH70P, 分子量 200 ~ 400 万, 三洋化成工業(株)製) を水道水に溶解させたものを使用した。所定量のポリアクリルアミド (PAA) を少量ずつ混合し、機械的なせん断による劣化を防ぐため、手で約 30 分攪拌することにより PAA 水溶液を作成した。その後、1 日以上放置し、PAA 水溶液中の気泡を取り除いた。また、実験直前に、PAA 水溶液をふるい (目開き: 0.5 mm) にかき、僅かではあるが溶けきらなかった PAA を除去し、再び手でよく攪拌して容器内の濃度の分布が一樣になるようにした。PAA 水溶液の密度 ρ は、水と等しいものとした。本研究では、PAA 水溶液の濃度は、0.05 及び 0.1 wt% の 2 種類とした。また、溶液温度は約 20 $^{\circ}\text{C}$ とした。

(7) 使用した PAA 0.05 及び 0.1 wt% のゼロせん断粘度 η_0 、緩和時間 λ 、Giesekus モデルのモビリティ係数 α 、ゼロせん断粘度に対する溶媒のせん断粘度 β 、及び弾性数 $E_0 = \lambda \eta_0 / (4 \rho a^2)$ を表 1 に示す。ここで、 η_0 、 λ 、 α 及び β は、せん断粘度と第一法線応力差の測定結果 (図は示されていない) が単純せん断流れにおける Giesekus モデルの近似曲線に最も合うように算出した。また、局所せん断粘度 η によるレイノルズ数 Re は次式により定義される。

$$Re = (2 \rho a V_m) / \eta \quad (1)$$

ここで、 V_m は断面平均速度である。また、 η には、壁面せん断速度における壁面せん断粘度の値を用いた。壁面せん断速度 γ_w は、Giesekus モデルでは算出が困難であるため、流れを定常層流のべき乗則流体のポアズイユ流れと仮定することにより得られる次式により求めた。

$$\gamma_w = (3n + 1) Q / (n \pi a^3) \quad (2)$$

ここで、 n はべき乗則モデルの指数であり、せん断速度に対するせん断粘度の測定値を両対数グラフで直線近似することにより、PAA 0.05 及び 0.1 wt% 共に $n = 0.38$ を得た。

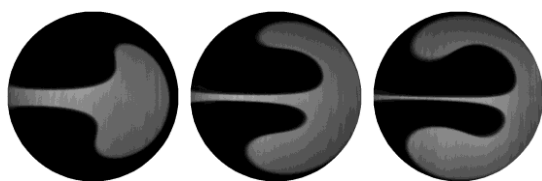
表 1 PAA 水溶液のレオロジー特性

PAA (wt%)	η_0 (Pa s)	λ (s)	α	β	E_0
0.05	0.20	1.8	0.15	0.035	5.6
0.1	0.28	3.0	0.15	0.030	13

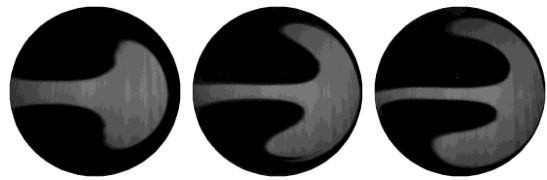
4. 研究成果

(1) 屈曲段数 $N = 1$ 及び 60 について, Glycerin 50%水溶液, PAA 0.05 及び 0.1 wt% 水溶液の流路垂直断面での可視化観察結果を示す. ここで示す可視化画像において, 円形断面の左側は流路の曲がりの内側, 右側は曲がり外側に対応する. また, 図の左から右の順にレイノルズ数 Re が大きくなる. 白く写っているのが染料であり, 白色が強いほど染料の濃度が高いことを意味する. 染料を含む作動流体は初期に, $N = 1$ では, 曲がり管部の内側に, $N = 60$ では, 最終曲がり管部の外側に入っている.

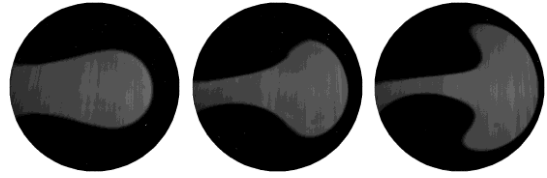
(2) 図 4 に, $N = 1$ における可視化観察結果を示す. 図 4(a)より, Glycerin 50%水溶液の場合, Re が大きくなるのに伴い, 染料が断面中央部分で曲がりの外側に張り出し, さらに壁に沿って曲がりの内側方向に流れる様子が見取れる. これは, 断面中央で外向きに流れる二次流れが Re の増加に伴い強くなるためである. PAA 0.05, 0.1 wt%水溶液の場合, 染料の分布パターンが Glycerin 50%水溶液のものと同様であり [図 1(b), (c)], 断面中央部で曲がり外向きの二次流れであると推察される. このことは, 層流の場合, 水と PEO 100 ppm 水溶液の二次流れの渦の発達パターンに明瞭な違いがないとした横山・富田の知見と整合している. また, Glycerin 50%水溶液, PAA 0.05, 0.1 wt%水溶液の順に, 染料の広がり幅が小さくなる. これは, PAA 水溶液の濃度が高くなるにつれて, 二次流れの強さが弱くなることを示唆している. このことは, Tsang & James の知見とも整合している. なお, $N=1$ の場合, 実験を行った Re の範囲 ($Re < 150$) では, 2液が混合している様子は見られなかった.



(a-1) $Re = 36$ (a-2) $Re = 61$ (a-3) $Re = 90$



(b-1) $Re = 31$ (b-2) $Re = 60$ (b-3) $Re = 102$

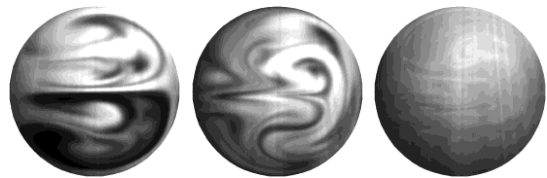


(c-1) $Re = 31$ (c-2) $Re = 60$ (c-3) $Re = 94$
 図 4 $N = 1$ での可視化結果: (a) Glycerin 50%, (b) PAA 0.05 wt%, (c) PAA 0.1 wt%.

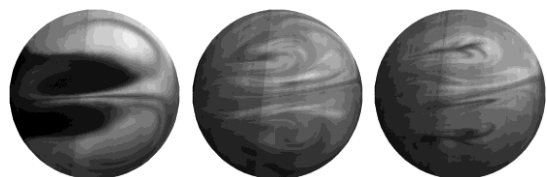
(3) 図 5 に, $N = 60$ における可視化観察結果を示す. Glycerin 50%水溶液の場合 [図 5(a)], $N = 1$ と比較して, 曲がり段数が増加しているために, 2液間の境界面は複雑になり, 2液界面も少し不明確になっていることから, 混合が促進されていると推察される.



(a-1) $Re = 30$ (a-2) $Re = 60$ (a-3) $Re = 103$



(b-1) $Re = 30$ (b-2) $Re = 59$ (b-3) $Re = 110$



(c-1) $Re = 30$ (c-2) $Re = 60$ (c-3) $Re = 91$
 図 5 $N = 60$ での可視化結果: (a) Glycerin 50%, (b) PAA 0.05 wt%, (c) PAA 0.1 wt%.

(4) PAA 0.05 wt%水溶液について [図 5(b-1)], $Re = 30$ では, $N = 1$ の場合よりも, 2液間の界面が不明確で, 複雑であることが分かる.

図 5(b-2), 5(b-3)の静止画像からでは分かりにくいですが, $Re = 59$ では中央で外向き流れ, $Re = 110$ では中央で内向き流れとなっており, $Re = 59$ と 110 の間において, 二次流れの向きが逆転する. また, $Re = 110$ では, 染料の分布がほぼ均一となっており, 流体混合が十分に進んでいることが推察される. なお, この時の $Re (= 110)$ は, Glycerin 50 %水溶液において染料分布がほぼ均一となる Re の約半分である(図は示されていない).

(5) PAA 0.1 wt%水溶液について[図 5(c-1)], $Re = 30$ では, 二次流れの様子は, PAA 0.05 wt%水溶液の場合[図 5(b-1)]と変わらず, 中央で内向き流れである. $Re = 60$ では, 静止画からは分かりにくい, 中央付近で二次流れの向きは内向きである[図 5(c-2)]. つまり, $Re = 30$ と 60 の間で二次流れパターンが変化すると推察される. また, $Re = 91$ までレイノルズ数が増加しても, $Re = 60$ での二次流れパターンから変化した様子は見られない[図 5(c-3)].

(6) 取得した画像の輝度値分布より, 次式で定義される輝度値の標準偏差 Di を算出し, 2液の混合度合いを評価する.

$$Di = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{\max})^2} \quad (3)$$

ここで, n はピクセル数, I_i はピクセル i の輝度値, I_{\max} は解析画像内における最大の輝度値である.

(7) 図 6 に, $N=1, 60$ における Glycerin 50%水溶液, PAA 0.05 及び 0.1 wt%水溶液の輝度値の標準偏差 Di/Di_0 の Re に対する変化を示す. ここで, Di_0 は, 実験を行った最も低い Re における輝度値の標準偏差である. $N = 1$ では, 溶液に依らず, Re が増加しても混合はほとんど進行しない. 一方, $N = 60$ では, Glycerin 50 %水溶液の場合には, Re の増加に伴い Di/Di_0 が緩やかに減少しており, 徐々に混合が進むのに対して, PAA 0.05 wt%水溶液の場合には, $Re \approx 60$ において, Di/Di_0 の減少割合が急に大きくなり, 混合が急激に促進されることが分かる. また, $Re > 80$ においては, Di/Di_0 はほぼ一定値(≈ 0.6)となり, 実験を行った定常流れと見なせる Re の範囲 ($Re < 100$) では, 完全に均一な混合($Di/Di_0 = 0$)とはならなかった. PAA 0.1 wt%水溶液では, $Re \approx 40$ において, PAA 0.05 wt%の場合と同様に, 急激に混合が促進されるが, その値($= 40$)は PAA 0.05 wt%水溶液の値($= 60$)に比べて小さい. これらの混合が急激に促進され始める Re は, 可視化観察によって確認された二次流れパターンが変化する Re とほぼ対応している.

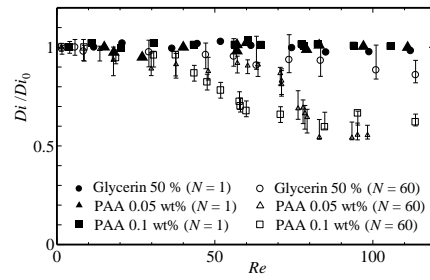


図 6 輝度値の標準偏差

(8) Glycerin 50 %水溶液の二次流れの強さを評価するために, 屈曲段数 $N = 1, 2$ 及び 60 , レイノルズ数 $Re \approx 41, 64$ 及び 85 において, 主流方向位置 $z' = 0, 1.5, 4.5$ 及び 7.5 mm での x 軸方向速度成分 V_x/V_m の y 軸上分布を図 7 に示す. V_x/V_m が正のとき曲がり外向きの速度, 負のとき内向きの速度となる. 図 7 より, すべての測定条件において, 断面の中央部で外向き, 上下壁面近くで内向きに流れる二次流れパターンであることが分かる. この二次流れパターンを Type N と呼ぶ[図 8(a)参照]. 二次流れの強さは, Re, N に依らず, 下流に向かうにつれて弱くなる. 特に, Re が小さい場合($Re \approx 41$)には, 粘性の影響が大きいため, 下流に向うにつれて急激に二次流れが弱くなる. また, Re に依らず, $z' = 0$ mm においては, $N = 1, 2, 60$ の順に二次流れが僅かに弱くなり, 下流に向うにつれて N による相違は見られなくなる.

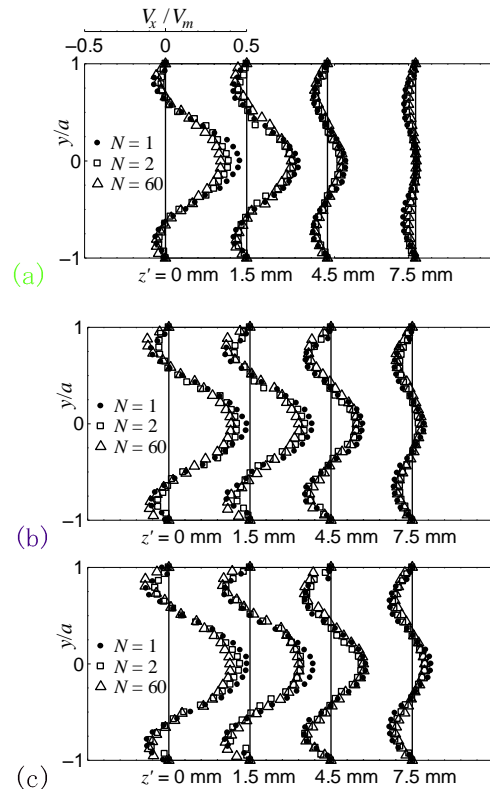


図 7 Glycerin 50%での V_x/V_m の y 軸上分布: (a) $Re \approx 41$, (b) $Re \approx 64$, (c) $Re \approx 85$.

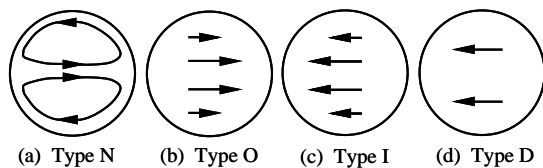


図 8 典型的な二次流れパターン

(9) 図 9 に、PAA 0.1 wt%水溶液について、主流方向位置 $z' = 0, 1.5, 4.5, 7.5$ mm, レイノルズ数 $Re \approx 41, 64, 85$, 屈曲段数 $N = 1, 2, 60$ での V_x/V_m の y 軸上の分布を示す。曲がり管部直後 ($z' = 0$ mm) では、 N, Re に依らず、断面の大部分で曲がりの外向きに流れており、Glycerin 50 %水溶液の二次流れパターンとは異なる。この二次流れパターンを Type O と呼ぶ[図 8(b)参照]。また、 $z' = 0$ mm での二次流れの強さは、同じ Re, N での Glycerin 50 %水溶液の場合(図 7)よりもかなり弱いことが分かる。 $z' = 1.5$ mm では、 N, Re に依らず、全体的に二次流れがほぼゼロとなり、同じ位置での Glycerin 50 %水溶液の場合よりも極めて弱いことが分かる。 $z' = 4.5$ mm では、 $Re = 64, N = 60$, 及び $Re = 85, N = 2, 60$ の場合を除き、断面の大部分で曲がりの内向きに流れていることが分かる。この二次流れパターンを Type I と呼ぶ[図 8(c)参照]。また、 $z' = 4.5$ mm において、 $Re = 64, N = 60$, 及び $Re = 85, N = 2, 60$ の場合、中央部分では二次流れがほぼゼロとなり、その上下では内向きの流れ、上下の壁面近くでは非常に僅かではあるが外向きの流れとなっている。この二次流れパターンを Type D と呼ぶ[図 8(d)参照]。 $z' = 7.5$ mm では、 $N = 60, Re = 64, 85$ の場合には Type D, それ以外の N 及び Re では Type I の二次流れパターンとなることが分かる。以上のように、僅かな主流方向位置 z' の違い(直径 d 程度の違い)により、二次流れパターンが Type O から、ほぼゼロとなり、Type I または Type D へと大きく変化すること、ならびにその変化は屈曲段数 N 及びレイノルズ数 Re にも依存することが明らかになった。

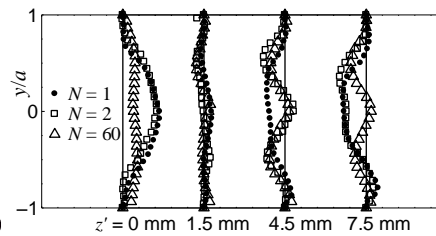
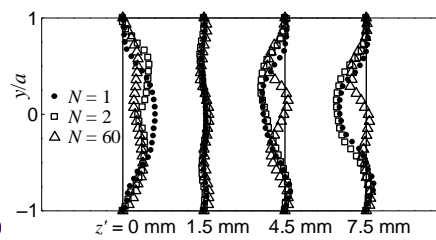
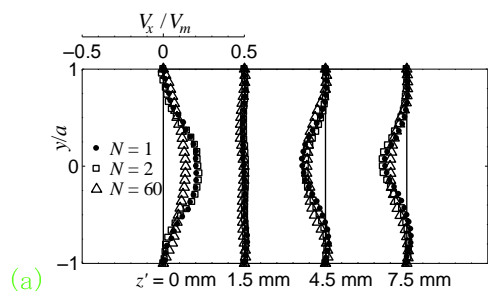


図 9 PAA 0.1 wt%での V_x/V_m の y 軸上分布 : (a) $Re \approx 41$, (b) $Re \approx 64$, (c) $Re \approx 85$.

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)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Shinji TAMANO, Mixing of polymer solution in curvilinear pipe, Proceedings of the XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, No.11374, 25-29 August, 2008, Adelaide, Australia.
- ② 馬場貴之, 粘弾性流体の多段曲り流路内流れに関する実験的研究, 日本機化学会東海支部第 57 期総会講演会, 2008. 3. 10, 名古屋大学, 名古屋.
- ③ 笹川哲, 多段曲がり流路における粘弾性流体の二次流れに関する実験的研究, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 2007. 11. 18, 広島大学, 東広島.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO SHINJI)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号 : 40345647