Y形流路における粘弾性流体の流れ

(続報) 分岐流れと合流流れ

大 阪 大 学 工 学 部	中	村	喜 代 次 (会 員)
大 阪 大 学 工 学 部	温	洪	昭 *
京 都 工 芸 繊 維 大 学 繊 維 学 部	西	村	太 良 (ﾖ)
大 阪 大 学 工 学 部	五	明	聡
大 阪 大 学 工 学 部	堀	川	明 (ﾖ)

Viscoelastic Flow in a Y-Shaped Channel.

Part 2 : Branching Flow and Merging Flow.

Kiyoji Nakamura*, Wen Hong Zhao***, Taro Nishimura**,

Satoshi Itsuaki* and Akira Horikawa*,

* *Department of Mechanical Engineering,
Osaka University, Osaka.*

** *Department of Textile Fibers, Kyoto University
of Industrial Arts and Textile Fibers, Kyoto.*

Abstract

The viscoelastic flow in a Y-shaped channel is observed by means of flow visualization and is numerically simulated by using the finite difference method. Influences of parameters such as rheological constants, flow-rate ratio and branching angle on the flow pattern are discussed.

- (1) In the branching flow of the viscoelastic liquid, stream lines swell near the channel wall just upstream of the acute angle turn of the fluid at the branch.
- (2) Characteristics of the viscoelastic flow become pronounced as the fluid viscosity becomes more shear thinning.
- (3) In a merging flow the region of the secondary flow just upstream of the acute angle turn becomes larger with increasing the outflow rate ratio.

(Received July 26, 1984)

摘 要

目的 粘弾性流体のY形流路における分岐合流流れについて、可視化実験ならびに数値計算により、非ニュートン粘性、弾性効果、合流流路比等の影響を検討した。

結果 (1) 非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の分岐流れで、鋭角側角部の上流に2次流れがあると考えられる流線のふくらみがみられた。

(2) 粘弾性流体のレオロジパラメータが非ニュートン粘性を強調する方向に変化すると、鋭角側角部上流の2次流れが大きくなり、流線が大きく膨らむなど粘弾性流体特有の流れ挙動が顕著になる。

(3) 合流流れにおいて角部上流側に生じる2次流れの領域の大きさは合流流量に依存する。(昭和59年7月26日受理)

† 現在の所属：中華人民共和国天津市，天津紡織工学院

1. まえがき

前報¹⁾ではY形流路における粘弾性流体の合流流れについて報告した。粘弾性流体は合流部でニュートン粘性流体と異なった特異な流れ挙動を示すことを報告し、その原因は粘弾性流体の非ニュートン粘性と弾性の効果の相乗作用であると考えた。

本報では、まずY形流路における粘弾性流体の分岐流れについての数値計算の結果を流れの可視化実験の結果と比較し、分岐部の流れ挙動に対する非ニュートン粘性および弾性の効果の影響を検討する。さらに合流流れについて、前報の内容に引続き粘弾性流体のレオロジパラメータ、Y形流路の分岐角および流量比の影響について報告する。分岐流れや合流流れの方向はY形流路の場合種々考えられるが、ここでは合流流れについては前報と同じ方向、分岐流れについては合流流れの場合と反対の方向の流れを、また合流流量比については1:3と1:7の2つの場合を検討した。

2. 実験装置および試料

図1に可視化実験の装置の概略図を示した。合流

Fig. 1 Experiment equipment.

流れの流量比を正確に測るために、一定ヘッドで液体を送るタンク①②とY形流路を結ぶ輸送管中に差圧式流量計⑦を取付けた。差圧式流量計の詳細は図2に示した。流量測定は、2つの圧力取出口間に着色した四塩化炭素の入ったU字管をつなぎ、その液

Fig. 2 Differential pressure flow measuring device.

面の高さの差を読み取り、さらにあらかじめ作成しておいた流量との検定曲線を用いて流量を得た。

流量比は、分岐流れの場合には2つの流出口でそれぞれ一定時間に流出する液体をメスシリンダで受けてその流出量を測定し、合流流れの場合にはメスシリンダで測定した総流量と差圧式流量計から一方の流量を測定して得た。

実験試料は分岐流れの場合前報と同じく Polyacrylamide (PAA) 0.8%水溶液を用いた。粘弾性流体特有の流れ現象にレオロジパラメータが及ぼす影響を調べる目的では0.1%, 0.4%, 0.8% PAA水溶液を用いて可視化実験を行った。流れの可視化方法は前報と同じである。0.4% PAA水溶液、0.1% PAA水溶液の粘度曲線を図3に示す。

Fig. 3 Viscosity of the PAA solution and theoretical flow curve by Carreau viscosity equation.

3. 分岐流れに関する数値計算の結果

本節では、Y形流路における非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の分岐流れに対する非ニュートン粘性および弾性の効果の影響を数値計算により調べる。数値計算の手法は前報とまったく同じで、境界条件を変えることにより分岐流れの結果を得ることができる。図4に流路のY形部を示した。Y形を構成している各流路に1, 2, 3と番号を付けLEG 1, LEG 2, LEG 3と名付け、そこを流れる流量を Q_1 , Q_2 , Q_3 で示す。ここで報告する流れは、LEG 3を上流としLEG 1, LEG 2を下流とする分岐流れで、Y形流路の3つの固定壁面AB, CD, EFでの流れ関数を ψ_{AB} , ψ_{CD} , ψ_{EF} として壁面上の流れ関数の値をつぎのように決めた。

$$\psi_{AB}=0, \psi_{CD}=-2, \psi_{EF}=2$$

計算は分岐部の流量比および分岐角 θ をそれぞれ1と45°について行った。Carreauモデルのレオロジ

Fig. 4 Schematic diagram of Y-shaped channel.

定数は前報と同じく PAA 0.8% 水溶液を近似した $n=0.5$, $\eta_0=12 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty=0.006 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\zeta=20$ とする. 合流流れの場合には前報で 4 つの流体モデルを用いて数値計算を行ったが, 非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体が流れの場に対して特徴的な挙動を示すことを報告した. それゆえここでは非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体と, 比較のためにニュートン流体の 2 つのモデルについて数値計算を行った.

図 5 にニュートン流体の数値計算結果を示す. ニュートン流体の分岐流れでは, 合流流れと同じレイノルズ数で比較して, 鋭角側の角部の下流で生ずる 2 次流れの領域が大きくなる. これは合流流れでは

Fig. 5 Streamlines in "Y" shaped branching flow: $\theta=45^\circ$, Newtonian liquid.

流れは相対的に広い流路から狭い流路に流れ加速されるが, 分岐流れでは逆に狭い流路から広い流路に流込み減速され慣性の影響が大きくなるためであると考えられる. 図にはレイノルズ数 0, 7.07, 14.14 の場合の結果を示した. 分岐部の鋭角側の角部の下流で, レイノルズ数が小さいときには 2 次流れは生じていないが, レイノルズ数が増大するとともに 2 次流れが広がって大きくなる.

図 6 に可視化実験から得た水の分岐流れの写真を示した. レイノルズ数が増すと鋭角側角部の下流の 2 次流れが大きくなっている様子が明らかにみられる.

Fig. 6 Photographs of "Y" shaped branching flow: $\theta=30^\circ$, water.

図 7 に数値計算から得たレイノルズ数 $Re=14.14$ の 2 次流れがみられる場合のニュートン流体の流速分布を示した. (a) には流路の主要部の流速分布を, (b) には数値計算の全差分点における流速分布を, さらに(c)には 2 次流れの発生しているあたりの領域の

Fig. 7 Velocity profiles for Newtonian liquid in "Y" shaped branching flow: $\theta=45^\circ$, $Re=14.14$.

分布をそれぞれ示した。流路幅方向の流速分布の最大点の位置は、分岐部より上流の流路内では上流の入口から分岐部までの間に流路の中心線の図の右側から左側に移動する。分岐部より下流の流路内では、分岐部から出口までの間に最大流速点は流路の中心線の下側から流路中央まで移動する。下流では流速分布の最大点は出口で流路中央にあるのに反して上流の入口では最大点が流路中央にないのは、上流の流速が下流の2倍であり、分岐部の影響の及ぶ距離が流速に比例して長くなるためと考えられる。

図8に非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の数値計算結果を示す。このような流れはニュートン流体

Fig. 9 Contours of constant viscosity for non-Newtonian liquid.

(a) $We = 0.01$ $Re^* = 0.057$

(b) $We = 0.015$ $Re^* = 0.057$

Fig. 10 Velocity profiles for viscoelastic liquid in "Y" shaped branching flow : $n = 0.5$, $\zeta = 20$.

(a) $Re^* = 0.057$ $We = 0.01$
 $n = 0.5$ $\zeta = 20$

(b) $Re^* = 0.057$ $We = 0.015$
 $n = 0.5$ $\zeta = 20$

Fig. 8 Streamlines for viscoelastic liquid in "Y" shaped branching flow : $\theta = 45^\circ$.

と違って、鋭角側角部の上流で流線が膨らむ。しかし合流の場合と比べて膨らみの程度は小さい。合流流れの場合と違って分岐流れでは、分岐部を通る流れが減速される。この場合2次流れが生じにくい。図にはワイセンベルグ数が違った場合の流線の計算結果を示した。ワイセンベルグ数の増大に従って、すなわち弾性の効果が大きいほど流線の膨らみが大きくなっている。

図9に非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の流れ場での無次元粘度分布を示した。非ニュートン粘性のために流れ場内に粘度分布を持つ。壁面に近い場所および分岐部の交叉点あたりは、ずり速度が大きいため、比較的小さい粘度を示す。このような粘度分布が分岐部における粘弾性流体の流速分布、応力分布に影響し、粘弾性流体特有の流れ挙動が生じる原因の一つになる。

図10に非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の流速

分布の数値計算結果を示した。非ニュートン粘性の影響によって、図7で示したニュートン流体と違って流速分布は放物線状になっていない。

図11に非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体であるPAA 0.8%水溶液の、流路LEG 3での平均流速 V_3 が 71.0 mm/s の場合の分岐流れの可視化実験結果を示した。鋭角側角部の上流に2次流れができたような流線の膨らみがみられた。数値計算結果はこの現象をよく現わしていると考えられる。

Fig. 11 Photographs of "Y" shaped branching flow : $\theta = 45^\circ$, PAA 0.8%, $Q_1/Q_2 = 1.02$, $V_3 = 71.0$ mm/s.

4. 粘弾性流体の合流流れにおけるレオリジ定数の影響

本研究で用いた粘弾性流体の構成方程式は、 λ , η_0 , η_∞ , n , ζ の5つのレオリジ定数を含んでいる。緩和時間 λ は弾性効果に直接影響を与えるが、基礎方程式を無次元化するとワイセンベルグ数に含まれ、 λ が流れに及ぼす影響はワイセンベルグ数が流れに及ぼす影響と同じである。

非ニュートン粘性に影響を与えるのは、Carreau モデルの零粘度 η_0 、無限大粘度 η_∞ 、無次元の指数 n 、時間定数 ζ の4つのレオリジ定数である。特に大きい影響を与えるのは n と ζ である。 n が小さいほど、 ζ が大きいほどずり速度に対する粘度の変化率は大きくなる。すなわち粘弾性流体が持つ非ニュートン粘性の性質が強くなる。これらの定数を変えて、PAA 0.4% および 0.1% 水溶液の粘度曲線に近い Carreau モデルによる粘度曲線 M I と M II を図3に一点鎖線と実線で示した。曲線 M I のレオリジ定数の値は $n = 0.5$, $\eta_0 = 1.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty = 0.007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\zeta = 3.5$ で、M II 曲線の定数の値は、 $n = 0.59$, $\eta_0 = 0.18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty = 0.0007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\zeta = 3.5$ である。これらの値と先に用いた PAA 0.8% 水溶液の粘度曲線を近似したレオリジ定数の値から、非ニュートン性は 0.8% 粘度曲線、M I モデル、M II モデルの順に弱くなっていることがわかる。これら3つのモデルを用いて計算を進めた。

図12は数値計算から得られた合流流れで、合流比が等しい ($Q_1/Q_2=1$) 場合の、鋭角側の上流での壁面上の無次元粘度分布である。実線は 0.8% 粘度モデル、一点鎖線は M I モデルを用いた無次元粘度分布である。前者は強い非ニュートン粘性を持つので、壁面上では小さい値を示している。2本の曲線とも角部近くで粘度がいったん大きくなっているのは、このあたりで流速が遅くなっているためである。

Fig. 12 Viscosity distributions on the wall in the acute angle side.

図13, 図14に M I モデル, M II モデルの粘度曲線を示す粘弾性流体の合流流れの流線を示した。前報の図10に示した鋭角側の角部の上流に2次流れが生じている合流流れの流線と比べて、鋭角側角部上流の流線の膨らみは小さく2次流れは生じなかった。また M II モデルの流線の膨らみは M I モデルの場合より小さくなっている。

Fig. 13 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $R^* = 0.107$, $n = 0.5$, $\zeta = 0.5$.

Fig. 14 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $R^* = 0.755$, $n = 0.59$, $\zeta = 3.5$.

図15と図16に、粘度曲線に M I モデル, M II モデルを持つ粘弾性流体の合流流れの流速分布を示した。ニュートン流体の速度分布と比べると、粘度分布の影響で壁面近くで流速が速く、流路の中央付近で流速が遅くなっている。この傾向は M I モデルでより明かである。前報の強い非ニュートン性を示す粘弾性流体の流速分布はこの傾向が更に顕著であった。

Fig. 15 Velocity profiles for merging flow of viscoelastic liquid. $R^* = 0.107$, $n = 0.5$, $\zeta = 3.5$.

すなわち Carreau モデルのレオロジ定数が粘度の非ニュートン性を減少させる方向に変化すると、粘弾性流体の特徴的な流れ挙動は現われにくくなる。

5. 粘弾性流体の流れ挙動に対する合流流量比の影響

図17, 図18に合流の上流流量比 $Q_1/Q_2 = 3$ と $Q_1/Q_2 = 7$ の場合の、非ニュートン粘性を持つ粘弾性流体の流線を示した。計算は図3に示した AB, CD, EF 壁面上の流れ関数をそれぞれ ϕ_{AB} , ϕ_{CD} , ϕ_{EF} として、境界条件を流量比 3 の場合

Fig. 16 Velocity profiles for merging flow of viscoelastic liquid. $R^* = 0.755$, $n = 0.59$, $\zeta = 3.5$.

Fig. 17 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $Q_1/Q_2 = 3$, $R^* = 1.219$, $n = 0.59$, $\zeta = 3.5$.

Fig. 18 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $Q_1/Q_2=7$, $R^*=1.480$, $n=0.59$, $\zeta=3.5$.

には

$$\phi_{AB}=0, \phi_{CD}=1, \phi_{EF}=-3$$

流量比 7 の場合には

$$\phi_{AB}=0, \phi_{CD}=0.5, \phi_{EF}=-3.5$$

として行った。Carreau モデルのレオロジ定数は 0.1% PAA 水溶液に近い M II モデルの値を用い、流路の分岐角度 θ は 45° である。図 14 に流量比 1 の場合の計算結果が示されているが合流部上流の膨らみは小さい。流量比 3 ではその膨らみは大きくなり、流量比 7 ではさらに大きくなり明らかに 2 次流れがみられるようになる。それぞれの流量比でワイセンベルグ数が大きくなると 2 次流れの領域も少し大きくなる。

図 19 と図 20 にそれぞれ流量比 3 と 7 の場合の上述の粘弾性流体の流速分布を示した。それぞれ (a) は主要部の流速分布、(b) は計算した全差分点の流速分布を示した。図 20 の (c) は 2 次流れの発生している付近を拡大したものである。

図 21 に PAA 0.4% および 0.1% 水溶液の流量比の違った合流の流れ模様を示した。ほぼ同じ流速の結果を示したが、高分子濃度の濃いほど、流量比 Q_1/Q_2 の値の大きいほど鋭角側角部上流に発生する 2 次流れが大きい。流量比が大きくなると循環 2 次流れが大きくなるのはつぎのように考えられる。流量比が大きいと LEG 3 で Q_2 の占める流路幅が

Fig. 19 Velocity profiles for merging flow of viscoelastic liquid. $Q_1/Q_2=3$, $W_r=0.01$, $R^*=1.219$, $n=0.59$, $\zeta=3.5$.

Fig. 20 Velocity profiles for merging flow of viscoelastic liquid. $Q_1/Q_2=7$, $W_r=0.015$, $R^*=1.480$, $n=0.59$, $\zeta=3.5$.

狭くなり合流部での加速が大きくなる。そこでは流体が大きな変形を受けるため流体の弾性的な性質が流れに大きく寄与し、このことによって循環 2 次流れが大きくなる。数値計算結果はこれらの実験結果とほぼ同様の傾向を示した。

6. 合流流れに対する分岐角の影響

図 22 と図 23 に合流の流量比 $Q_1/Q_2=1$ の場合の分岐角 $\theta=30^\circ$ と $\theta=60^\circ$ についての数値計算から得た流線を示した。鋭角側角部に現われる流線の膨らみ

- (1) 0.4% PAA, $Q_1/Q_2=4.35$, $V_3=13.9$ mm/s
 (2) 0.4% PAA, $Q_1/Q_2=0.35$, $V_3=14.8$ mm/s
 (3) 0.1% PAA, $Q_1/Q_2=6.67$, $V_3=18.5$ mm/s
 (4) 0.1% PAA, $Q_1/Q_2=0.37$, $V_3=14.7$ mm/s

Fig. 21 Photographs of merging flow: $\theta=30^\circ$.

Fig. 22 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $\theta=30^\circ$, $R^*=0.057$, $n=0.5$, $\zeta=20$.

Fig. 23 Streamlines for merging flow of viscoelastic liquid. $\theta=60^\circ$, $R^*=0.057$, $n=0.5$, $\zeta=20$.

は、その大きさについては2つの分岐角での結果にあまり差はみられなかったが、その位置は角度が小さくなるにつれて角部の頂点の方へ近づく傾向がみられた。

7. まとめ

Y形流路における粘弾性流体の分岐流れは、合流流れと同様ニュートン流体と異なった挙動を示す。ニュートン流体の場合レイノルズ数が大きくなると鋭角側角部の下流に2次流れが現われるが、粘弾性流体の場合2次流れが分岐部の鋭角側角部の上流に現われ、ワイセンベルグ数が大きくなるとともに2次流れは大きくなる。ただし合流の場合と比べれば2次流れの大きさは小さい。これらの結果は可視化

実験と数値計算の双方から得られた。

合流流れに関する可視化実験と数値計算からつぎの結果が得られた。粘弾性流体のレオロジ定数が非ニュートン粘性および弾性の効果を強調する方向に変化すると、鋭角側角部上流側の2次流れが大きくなり流線は大きく膨らむ。また合流部上流での流量の比 Q_1/Q_2 が大きくなると2次流れが大きくなる。分岐角 θ が小さくなるに従って流線の膨らみは角部の頂点の方向に移動する傾向がみられた。

参考文献

- 1) 中村, 温, 西村, 堀川: 繊維機械学会論文集, 37, T71 (1984)