合流円管路内における粘弾性流体の流れ

大 阪 大 学 工 学 部	中	村	喜 代 次 (会 員)
京 都 工 芸 繊 維 大 学 繊 維 学 部	西	村	太 良 ()
大 阪 大 学 工 学 部	宮	原	一 郎
〃	〃	野	田 隆 司
〃	〃	堀	川 明 (会 員)

Viscoelastic Merging Flow in a T-Shaped Tube

Kiyoji Nakamura*, Taro Nishimura**, Ichiro Miyahara*,

Takashi Noda* and Akira Horikawa*

*Faculty of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka

**Faculty of Textile Science, Kyoto Institute of Technology,

Sakyo-ku, Kyoto

Abstract

A viscoelastic merging flow in a T-shaped tube is examined using polymer (polyacrylamide) solutions. Streamlines near the junction were observed from the two- or three-dimensional standpoint of view. Upstream of the junction, we observed circulating secondary flows in the T-shaped tube as well as in a T-shaped channel which is composed of parallel plates. The streamline length changes according to the growth of circulating secondary flow. Curves of streamline length plotted with Weissenberg number present an elastic effect of viscoelastic liquid and nearly become one straight line for the various throttling ratio and polymer concentrations. Hence, the elastic property of polymer solution contributes to the growth of the circulating secondary flow.

(Received 27, Nov. 1985)

摘 要

目的 2本の円管をT形に結合した合流路を用いて、三次元的にニュートン流体と粘弾性流体の流れを可視化して観察し、さらに粘弾性流体とニュートン流体の流れを比較してその特徴について検討する。

結果 粘弾性流動においては、平行平板管路を用いたT形流路の場合と同様、合流部の凸状角部の上流側に循環二次流れが発生する。循環二次流れの生長による合流部付近の流線長さの変化は、流れの弾性的効果を現わすワイセンベルグ数で整理すると、管路の絞り比や流体の高分子濃度にかかわらずほぼ1本の曲線に載る。これらのことから循環二次流れの発生及び生長には流体の弾性的性質が大きく寄与していることがわかった。

(昭和60年11月27日受理)

1. 緒 言

筆者らは2つの平行平板管路を結合した分岐合流管路を用いて、粘弾性流体とニュートン粘性流体の流動とを比較してその特徴を明らかにした¹⁾。本報では二次元T形管路内流れよりも複雑に流動し、コンジュゲートヤーンの紡糸ダイなどに見られるT形円管路内合流流れについて検討する。

円管内流れについての報告は、分岐流れに対しては血管中の血流に関連した流動が観察されている²⁻⁵⁾。又、伊藤ら^{6,7)}は分岐合流管路のエネルギー損失と流れの状態との関係を報告している。しかし、これらはいずれもニュートン流体についての報告で、レイノルズ数の大きい場合が多い。

粘弾性流体については、紡糸技術に関連して、高分子熔融物の急収縮流れについて数多くの報告があ

る⁸⁻¹⁴⁾。しかしこれらは管の収縮前後で流れの方向が変わらない管路であり、その観測は主として管収縮部の循環二次流れについて行われている。

円管内での粘弾性流体の流速分布については、高分子水溶液を用いて流速を測定した報告がある¹⁵⁻¹⁸⁾。しかし合流管路の上流側の流れについて報告した例はない。本研究では2本の円管を結合したT形管路内の合流流れを観測し、合流部付近における粘弾性流体の流れの特徴を、ニュートン流体と比較して述べ、流体の弾性的な性質が円管内の流れに及ぼす影響について検討する。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

流れの観測には、流体中にアルミ箔製粉末を混入し、スリット光を用いて二次元的に観測する方法と、着色流体を流し1本の流れを三次元的に追跡し観測する方法とを用いた。

図1に円管を用いたT形合流路の測定装置の概略図を示す。①と③は試料溜めで、オーバーフローによって一定のヘッドを保つことができる。②④⑤は流量調節用バルブ、⑥は光源で、⑧のスクリーンで光を散乱させ管路⑦を均一に照らす。⑨、⑩の2台のカメラは、トレーサタンク⑪から供給された着色流体の流れを撮影する。

アルミ箔製粉末を用いた二次元的な測定の場合には、⑨のカメラの位置に光源を置いて、y軸方向にスリット光を管路の中央に入射し、⑩の位置のカメラでz軸方向から撮影する。

図2 円管によるT形管路部と座標系

ラでz軸方向から撮影する。

図2にはT形円管路部とその座標系を示す。座標の原点は2本の円管の中心軸の交点とした。流体は直径40 mmの円管の左右から流入し、直径20 mmの円管に流出する。それぞれの入口から合流部までの長さを500 mmとし、合流部の流れに出入口部の影響がないように充分長くとった。観測は合流部からそれぞれの管路の方向に約100 mmとした。又、別に図中の括弧内に示したように、直径10 mm長さ250 mmの円管を流出管に使用した。この場合他の寸法は20 mmの管を用いた流路と同じである。この2つの流路は合流前と合流後の流速の比が異なり、直径20 mmの管を用いた場合にはその流速比すなわち絞り比は8、10 mmの管の場合には絞り比は32になる。

着色流体による流れの三次元的な観測は図1の⑪のトレーサタンクから細い管で管路中へ着色流体を注入し、zy軸上に位置している2台のカメラでの写真撮影による。このような位置にカメラを置くとz-y面に平行な面内で移動する流れの位置は決められない。しかしそのような面内での流れの移動は合流後の流出管路内に限られ、合流部での流れの位置の決定には支障はない。流れは、図3に示すような位置を6点設定し、合流部から約200 mmの位置にある着色流体の注入口をほぼその設定位置になるように管横断面内で移動して観測した。

試料流体はニュートン流体として粘度1.7 Pa・sのグリセリン、粘弾性流体としてポリアクリルアミドSEPARAN-AP30 (PAA) 0.1%、0.4%及び0.8%水溶液を用いた。又、トレーサとして用いた着色流体はそれぞれの試料流体と染料を混合して、流れが浮力によって影響を受けないようにした。

①試料タンク ②④⑤バルブ ③オーバーフロータンク ⑥光源 ⑦管路部 ⑧スクリーン ⑨⑩カメラ ⑪トレーサタンク

図1 実験装置の概略図

図3 着色流体の注入位置

2.2 観測された位置の補正

写真撮影された流線は、液体、円管、空気それぞれの屈折率の違いによって真の位置を示していない。図4に示すように、半径 R の管中で a の位置にあるトレーサは a' の位置に観測される。 y 軸上にスリット光を入射させる管中央の縦断面内の流線観測では、トレーサは y 軸上にあるので z 軸方向の1方向からの観測と屈折率による補正で位置は決定できる。しかし断面内の任意の位置にあるトレーサについては1つの方向からの観測では流線の位置は決らない。しかし図4の①②のような2つの方向から観測することにより位置が求められる。例えば a の位置は直線 ac と ab の交点として求まる。直線 ab を表わす式は a' 及び a の y 座標 (Y' および Y) を観測位置と真の位置との関係を用いて求める。同様に直線 ac も観測結果から得られる。図5に観測位置と真の位置との関係を PAA 0.1% 水溶液及びグリセリンについて測定した結果を示す。測定結果によれば、実験に使用した各試料液体の測定結果に大きな違いが認められないので、図中に実線で示す(1)

図4 トレーサからの光路

図5 トレーサの観測位置と真の位置との関係

式の近似式を用いて屈折率による観測位置を補正した。

$$Y/R = 0.52(Y'/R)^2 + 0.48 Y'/R \quad (1)$$

3. 合流部における流線の膨らみ

3.1 管中央縦断面内の流線

図6にスリット光による管中央の縦断面内(図1に示した $x-y$ 面上)における、粘弾性流体の流線の観測結果を示す。ここで v , R は流入管中の平均流速及び管径で与えられるレイノルズ数である。

$$Re = \frac{Dv\rho}{\eta} \quad (2)$$

D は代表寸法で合流前の管の直径を用いた。 ρ は流体の密度。粘度 η は、ポアズイユ流れを仮定して、その流れの平均流速の位置の剪断速度における粘度

- (1) PAA 0.1%, 絞り比 8, $v = 0.034$ cm/s, $Re = 0.06$
- (2) PAA 0.1%, 絞り比 32, $v = 0.040$ cm/s, $Re = 0.07$
- (3) PAA 0.4%, 絞り比 8, $v = 0.13$ cm/s, $Re = 0.03$
- (4) PAA 0.4%, 絞り比 8, $v = 2.6$ cm/s, $Re = 0.9$

図6 PAA 水溶液の管中央縦断面内の流線

を Bewersdorff¹⁹⁾ が測定した結果を用いて得た。

(1)に示すように流速が小さい場合には、流線は合流部から離れた位置から緩やかに流出流路とは反対の方向に膨らんでいる。図6(2)や(3)に示すように、絞り比が大きい場合や、高分子溶液の濃度が高く流速が小さい場合には流れはほぼ管に沿い、角部においてのみ小さく膨らむ。(4)に示すように流速がさらに大きくなると、角部に循環二次流れが現れるため、流線は合流部で大きく膨らんでいる。合流部から離れた位置での流線は管軸の方向とはほぼ平行になっている。すなわち絞り比が大きくなり合流部で受ける流体の変形が大きい場合や、高分子溶液の濃度が高い場合のように、流体の非ニュートン粘性や弾性の効果が流れに影響をおよぼす場合には、角部に発達した循環二次流れによって流線は合流部で大きく膨らむようになる。

この流線の膨らみを評価するために、図7のように合流部から充分離れた位置で管路径 (D) を4等

図7 流線の膨らみの模式図

分する管路に平行なA,B,Cの3本の流線を用いて、それらの流線が最大に膨らんだ位置での管壁からの距離 L_a , L_b , L_c を測定した。図8に種々の濃度のPAA水溶液における測定結果を流入管内での平均流速に対して示す。絞り比8については、濃度0.8%の場合に3本の流線とも流速が増すにつれてその値は大きくなり、膨らみが大きくなっていることを示している。濃度0.4%の場合には、CとBの流線長さのプロットは極小を持ち、流速が約0.5 cm/s 以上では0.8%に認められたと同じく流速の増加とともに流線が膨らみ、小さい流速においても流線が膨らむことを示している。0.2%水溶液ではA, B, Cの3本の流線とも極小値を持ち、小さい流速においても大きい流速においても流線の膨らみが観測される。さらに濃度の低い0.1%水溶液では小さい流速での膨らみが見られるだけで、流速が増すにつれてその値は緩やかに小さくなっている。

絞り比32の場合には、3本の曲線とも流速が増すにつれて単調に大きくなっている。その変化は絞り比8の管路の場合より急である。

以上のように、絞り比が小さく流体の弾性的性質がほとんど現われていないと考えられる低い高分子濃度で流速が小さい場合においては流線は膨らんでいる。これは、管中央断面内だけを考えると膨らまない方がエネルギー比は小さいと考えられるが、管中央断面にない流体も膨らまずに近道をする方がエネルギー消費は少ない。

○ 絞り比8 ● 絞り比32

図8 平均流速と流線の膨らみとの関係

それゆえ、管全体のエネルギー消費を考えると絞り比が大きくなるにつれて管中央断面内の流線が膨らむ方がエネルギー消費が小さくなるためと考えられる。流速が大きくなり、従って、レイノルズ数が大きくなるにつれて、合流部付近の流速の速い部分で慣性の効果が生じその膨らみがなくなる。溶液の高分子濃度が高く、流体の弾性的性質の強い場合や、絞り比が大きく流体の受ける変形が大きい場合には、流速が増すにつれて流体の弾性的性質が流れ場に大きく作用し、流れの曲る角部上流側に循環二次流れが発生するため流線の膨らみが大きくなる。

3.2 種々の位置での流線移動

T形円管路の合流部では、前項に示した管中央縦断面以外では流線は三次元的に移動している。図9にニュートン流体であるグリセリンについて、図3に示した管内の6点を起点とする流線の軌跡を示す。それぞれの流線の測定条件(平均流速 v 及びレイノルズ数 Re)を表1に示す。流速の大きい2つの流線は重なっている。AとBの流線は合流部に近付くにつれて流出路と反対の方向にいったん膨らんでいる。これは前項に述べた高分子濃度が低い場合の、流速が小さくレイノルズ数が小さい場合に流線が膨らむのと同じ現象である。この場合には、D

図9 グリセリンを用いたニュートン流体の流線

やEの管壁に近い流線は、次に示す粘弾性流体の場合より早くから z 方向に移動して、A, Bなどの中央断面上の流線を出口と反対の方向に押しやる形になる。又、流速が大きくレイノルズ数が大きくなると、管壁に近い流線が流出方向に向きを変える位置が流出流路に近くなり、流路中央の流線の膨らみが小さくなる。

図10に粘弾性流体であるPAA 0.4%水溶液に対する測定結果を示し、それぞれの流速を表2に示す。

表1 図9に示す流線の平均流速
(cm/s)とレイノルズ数

		実線			点線		
		v	Re		v	Re	
A	v	0.21	0.44	0.58			
	Re	0.06	0.13	0.18			
B	v	0.16	0.38	0.50			
	Re	0.05	0.11	0.15			
C	v	0.16	0.23	0.42			
	Re	0.05	0.07	0.13			
D	v	0.10	0.22	0.48			
	Re	0.03	0.07	0.14			
E	v	0.11	0.27	0.48			
	Re	0.03	0.08	0.14			
F	v	0.11	0.17	0.50			
	Re	0.03	0.05	0.15

図10 PAA 0.4%水溶液の流線

表2 図10に示す流線の平均流速
(cm/s) とレイノルズ数

		実線	点線	一点鎖線
A	v	0.12	0.42	0.85
	Re	0.03	0.17	0.51
B	v	0.14	0.41	0.80
	Re	0.03	0.17	0.47
C	v	0.13	0.37	0.72
	Re	0.03	0.14	0.40
D	v	0.13	0.36	0.85
	Re	0.03	0.14	0.51
E	v	0.13	0.37	0.72
	Re	0.03	0.14	0.40
F	v	0.16	0.47	0.85
	Re	0.04	0.21	0.51

図11 流線の模式図

粘弾性流体の場合には、管中央縦断面の観察に見られたように、流速が増すと合流部の角部上流側に循環二次流れが発生する。図には循環二次流れの影響によってA, B, Cの流線の膨らみが、流速が増すにつれて大きくなっていく様子が示されている。膨らみの大きさとその変化の割合は、流出流路から遠い流線ほど、すなわちA, B, Cの順に小さくなっていることが流速が増すにつれて顕著に観察される。

管壁に近いE, F, Gの流線についても、A, B, Cの流線と同様に、流速が増すにつれて膨らみが大きくなっている。膨らみの大きさとその変化の割合も流出流路に近いDの流線が、E, Fの流線より大きく、管中央縦断面上と同じ傾向を示している。流線のz方向への移動は、流速が大きくなるにつれて早くから始まっている。これは、出口流路入口に生長した循環二次流れが流速の増加とともに大きくなり、流れを妨げているためと考えられ、x-y平面上で観測された循環二次流れは、流出管路入口の円周上全域にわたって存在していることを示している。

3.3 流線の移動

断面内の6つの位置の流線は、合流部近くで流体の性質や流れの条件によって、それぞれ異なった軌跡を描く。その変化の様子を一定区間の流線の長さを測定することによって表した。図11に示すように、流線がそれぞれの管軸に平行な部分の延長線の長さ L_1 , L_3 と、その2本の直線を結ぶz軸に平行な直線の長さを L_2 とし、それらの長さの和 L が140mmとなる区間を測定区間とし、その区間内の流線長さ l を測定した。 L_1 の値を約100mmとして区間を設

図12 流線の長さ比

定すると、流線はそれぞれ2本の管内で管軸に平行な部分を持つ。

図12に流線Eについての流線長さの測定結果を示す。図は流線長さ l と区間長さ L の比で示す。(1)には流線長さ比 l/L を流速に対して示した。ニュートン流体であるグリセリンの絞り比32の場合には小さい流速で流線長さ比は大きく、流速が増すにつれて小さくなり、ほぼ一定の値になるように変化している。濃度が低く粘弾性的性質の弱い0.05%水溶液の場合には、ニュートン流体で一定に達したあとの流線長さ比とはほぼ等しい値を示す。高分子濃度が高くなると、流速の増加とともに流線長さ比は大きくなる。さらに流速が増すと一定の値に達するが、一

定の値に達する流速は濃度の高い流体の場合ほど小さい。又、管路の絞り比が大きいほど小さい流速で一定の値に達する。

次に、流線長さ比を、流れ場を表わす無次元数であるレイノルズ数とワイセンベルグ数 (W_e) で整理した。ワイセンベルグ数の定義を(3)式に示す。

$$W_e = \lambda \frac{v_0}{D_0} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{N_1}{2\eta\dot{\gamma}^2} \quad (4)$$

弾性の効果については、弾性に対しては流体の受ける変形量が影響を及ぼすため、管径を2種類変えた合流後の管径 D_0 とそこでの平均流速 v_0 を用いた。又、 λ は緩和時間で、マックスウェルモデルを用いると(4)式となる。 $\dot{\gamma}$ は平均流速の位置の剪断速度。剪断速度の関数である PAA 水溶液の粘度 η 及び第一法線応力差 N_1 の値は Bewersdorff の測定結果を用い、レイノルズ数及びワイセンベルグ数を計算した。

レイノルズ数に対する流線長さ比を図12(2)に示す。0.05% PAA 水溶液とグリセリンの曲線は、流速で整理した(1)では交わっていたのが離れて1本の曲線で結べるようになる。このことは PAA 0.05% 水溶液では濃度が低く、このような流れではほとんど弾性効果が現われなくてニュートン流体とほぼ同様に取扱うことができることを示している。これに反して高分子濃度の高い場合には、試料や絞り比の違いによるそれぞれの曲線が1つの曲線に集まる傾向は見られない。

高分子濃度が0.1%と0.4%のものについてワイセンベルグ数で整理した結果を図12(3)に示す。この場合には、同一濃度では絞り比が違ってほぼ同一の曲線に乗るようである。濃度の変化に対する相違は少し見られるが、流速やレイノルズ数で整理した結果と比べるとかなりの良い一致が見られる。

他の A, B 等の位置から出発した流線長さ比についても同様な結果が得られることから、合流部での流線の膨らみが、流速が増すにつれて小さくなるのは慣性の効果であり、さらに流速が増すと循環二次流れが発生し、流線が再び膨らむのは弾性の効果であると考えられる。

4. 循環二次流れの形状

図6に示したスリット光を用いた二次元的な流れの観察から、粘弾性流動では平行平板の管路を2つ結合した場合と同様に合流部で循環二次流れの発生が観測された。この循環二次流れは、合流部付近で

PAA 0.4% 水溶液, $v=0.21$ cm/s, 絞り比32
図13 循環二次流れ内の流れ

図14 循環二次流れの模式図

の流線の軌跡から推測すると、出口管路の入口の円周上に広がっていることが予想される。図13にトレーサ流体が循環二次流れの中に入った場合の写真を示す。(1), (3)はトレーサ流体が循環二次流れ内に入って間もなく、(2), (4)は時間が経過して後の流線で、(1), (2)の写真は z 方向から、(3), (4)の写真は y 方向から撮ったものである。 y 方向からの観察によって、循環二次流れが流出管路入口の円周上全域にわたって大きく広がっていることが分かる。

これらの観測から得た循環二次流れの合流部での形状を模式的に図14に示す。循環二次流れは x 方向から見ると流出管路側の壁面から管壁に沿って広がっており、 z 方向から観測すると、角の取れた逆三角形形状である。 y 方向からの観測では流出管路の周囲に同心円状に観測されることを示している。循環

二次流れの $a-a$ 断面の大きさは、主流の流れのため小さく、 $b-b$ 断面の領域は管壁に沿って大きく広がった形となっている。

5. まとめ

2本の円管をT形に結合した合流路における粘弾性流動を、二次元及び三次元的に観察した。

円管を用いたT形管路の合流部で、流出管路に平行な断面内で流速が小さい場合に流線の膨らみが観察される。この膨らみは流速が増すにつれてみられなくなり、ほぼ管と平行な流れとなる。粘弾性流体ではさらに流速が増すと、流速が小さい場合に流線の膨らみが観察された流出管の入口付近に循環二次流れが発生し、その付近の流線に再び膨らみが見られるようになる。循環二次流れの発生する場所は流れの曲る角部上流側で、平行平板を用いたT形管路で観測されたと同じ位置である。

循環二次流れの大きさは、流速が増すほど大きくなり、又、高分子濃度の高いほど、管路の絞り比が大きいほどその変化は急で、高分子流体の弾性的性質によるものと考えられる。

管路横断面の種々の位置から流れ始める流線を観測し、合流部での流れを三次元的に検討した。合流部における一定区間内の流線長さは、流れに膨らみが観測される場合には長くなる。ニュートン流体や濃度の低い高分子流体では平均流速が小さいところで流線は長い、流速が増すにつれて短くなり、一定の長さに近づく。この流線長さの変化はレイノルズ数で整理すると1本の曲線にまとまるようである。高分子流動の場合の流線長さは、平均流速の増加とともに長くなる。これは角部に発生した循環二次流れのために流線が膨らむ結果である。この場合にはレイノルズ数で整理すると、平均流速で整理した場合と同様に、高分子濃度や管路の絞り比でそれぞれ個々に曲線を描くが、流動の弾性的性質を示すワイセンベルグ数で整理するとほぼ1つの曲線に集

まる傾向が見られた。これらのことから、平均流速の小さいところで流速が増すにつれて流線の膨らみが小さくなるのは慣性の効果、さらに流速が増して循環二次流れが発生し流線が膨らむのは弾性の効果であると考えられる。

円管を用いたT形管路の合流部に発生する循環二次流れは、出口流路の入口の円周上に発生し、主流の方向には比較的小さく、管壁に沿って大きく広がっていることがわかった。

なお、本研究の一部は日本繊維機械学会第38回年次大会において発表した。

参考文献

- 1) 西村, 中村, 堀川; 繊維機械学会論文集, 36, T66 (1983)
- 2) T. J. Pedley, R. C. Schroter and M. F. Sudlow; *J. Fluid Mech.*, **46**, Part 2, 365 (1971)
- 3) C. M. Rodkiewicz and C. L. Roussel; *J. Fluids Eng.*, **95**, 108 (1973)
- 4) 岡; 材料, **29**, 321 (1980)
- 5) F. R. Haselton and P. W. Scherer; *J. Fluid Mech.*, **123**, 315 (1982)
- 6) 伊藤, 佐藤, 岡; 日本機械学会論文集 (第2部), **44**, 3902 (1978)
- 7) 伊藤, 佐藤, 岡; 日本機械学会論文集 (B編), **47**, 214 (1981)
- 8) E. B. Bagley and A. M. Birks; *J. Appl. Phys.*, **31**, 556 (1960)
- 9) T. F. Ballenger and J. L. White; *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 1191 (1970)
- 10) 大柳, 山口; 材料, **20**, 659 (1971)
- 11) T. F. Ballenger, I.-J. Chen, J. W. Crowder, G. E. Hagler and D. C. Bouge; *Trans. Sci. Rheol.*, **15**, 2, 195 (1971)
- 12) T. F. Ballenger and J. L. White; *J. Appl. Polym. Soc.*, **15**, 1949 (1971)
- 13) H. P. Hurlimann und W. Knappe; *Rheol. Acta.*, **11**, 292 (1972)
- 14) 西村, 西条, 宗圓; 繊維学会誌, **33**, T246 (1977)
- 15) M. J. Rudd; *Nature*, **224**, 587 (1969)
- 16) W. A. Hanson, D. F. Jankowski and N. S. Berman; *Phys. Fluid*, **12**, 2702 (1969)
- 17) J. S. Chung and W. P. Graebel; *Phys. Fluid*, **15**, 546 (1972)
- 18) M. J. Rudd; *J. Fluid.*, **51**, 673 (1972)
- 19) H. W. Bewersdorff; *Rheol. Acta.*, **23**, 522 (1984)