急収縮流路における高分子流体の不安定流動

第1報 変動の発生及び周期

大阪大学工学部 中 村 喜 代 次* (会員)
 大阪大学工学部 五 明 聡
 京都工芸繊維大学 西 村 太 良** (会員)
 大阪大学工学部 堀 川 明*† (会員)

Instability of Polymeric Flow through an Abrupt Contraction

Part 1. Shear rate at the onset of instability and the cycle of instability phenomena

Kiyoji Nakamura*, Satoru Ituaki*, Taro Nishimura**

and Akira Horikawa*

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

**Department of Textile Fibres, Kyoto Institute of Technology, Kyoto.

Abstract

The flow of polymeric liquids through an abrupt contraction is known to become unstable at high shear rates. To clarify these phenomena, we visualized the flow and measured fluid velocity with a laser-doppler velocimeter. This instability is characterized by two circulating secondary flows near the contraction becoming larger and smaller periodically and alternately. The shear rate at the onset of instability and the periodic time of flow instability depend on the elastic property of polymeric liquids. (Received 28, May, 1986)

摘 要

目的 二次元急収縮流路を用いて、粘弾性流体の不安定流動に対し流れの可視化及びレーザ流速計を用いた流速変動の測定によって、不安定流動の発生と周期を流体の粘弾性的性質と関連づけて検討する。

成果 二次元急収縮流路における粘弾性流体の不安定流動は、急収縮部で左右交互に起こる循環二次流れの膨張収縮によるものである。又、不安定流動が発生し始めるときのずり速度、不安定流動の変動周期などには流体の弾性的性質が大きく関与している。
(昭和61年5月28日受理)

1. まえがき

急収縮流路における高分子流体の流動に関する研究は、紡糸・成型加工などに関連して数多く報告されている。しかし、これらのほとんどは比較的低流速下における流動を取扱っており、高流速下での研究報告は少ない。

軸対称急収縮管路における粘弾性流動の特徴として、急収縮部で循環二次流れが発生し、主流はワイングラス状になる^{1,2)}。高流速下ではこの循環二次流れの大きさが変動して主流は円周方向に回転することが報告されている³⁾。この急収縮部での循環二次流れの変動はメルトフラクチャの原因とも考えられ^{4,5)}成型物の品質や生産性を向上する上で重要な問

† 現帝塚山学院短期大学教授，大阪大学名誉教授

題である。

本研究では、矩形断面を有する急収縮部における粘弾性流体の不安定流動を可視化するとともに、レーザ流速計を用いた流速変動を測定して、不安定流動現象の解明とそれに及ぼす流体の粘弾性的性質の影響について検討する。

2. 実験装置及び実験方法

実験はあらかじめ試料流体中に混入されたアルミ箔製粉末をトレーサとした流れの可視化による観察とレーサ流速計を用いた流速測定の2つの方法による。図1に流れの可視化実験装置の概略を示す。試料流体はヘッドタンク②でオーバフローし、圧力水頭が一定に保たれて測定部③に流入する。流量調節はバルブ④で行う。光源⑥からの光を幅1 mmのスリット⑦を通し、トレーサの流れを写真撮影する。

①試料溜め、②ヘッドタンク、③測定部、④流量調節バルブ、⑤試料溜め、⑥光源、⑦スリット、⑧カメラ

図1 可視化実験装置

カメラ⑧にはモータドライブ装置を付け、一定時間間隔で連続撮影を行った。

図2にレーザ流速計を用いた流速測定用の実験装置の概略を示す。供給タンク①の試料流体はバルブ②を通してヘッドタンク③に供給され、圧力水頭が一定に保たれて流路④に送られる。2つのバルブ⑤、⑥は流量調節用と開閉用である。流路を通過した試料とヘッドタンクからオーバフローした試料流体はタンク⑦に流入し、ポンプ⑧で再び供給タンクに揚げられる。ステージ⑨は流路④を置く台で、流速測定の位置を任意に設定できるように3次元に移動可能である。AからIはレーザ流速測定システムである。レーザ光が光源Aから発振され、測定部④を通過したレーザドップラ信号はフォトマルチプライヤBで電気信号に変換される。この信号は周波数シフタE、周波数トラッカFで処理され、流速データに変換され、デジタル信号として出力される。これをマイクロコンピュータHに取り込みフロッピーディスクドライブIで記録する。

図2にそれぞれの実験で用いた透明アクリル板を用いて作製した急収縮流路を示す。寸法は絞り部上流の流路幅を40 mm、絞り部下流の流路幅を2 mm、すなわち、絞り比20:1、流路高さを100 mmとし、矩形断面を有している。図1に示したスリット⑦は流路高さの中央にあり、図3ではZ=0 mmの位置である。

粘弾性流体としては、ポリアクリルアミド (PAA)

①供給タンク、②バルブ、③ヘッドタンク、④流路、⑤ストップバルブ、⑥ボールバルブ、⑦タンク、⑧ポンプ、⑨ステージ、⑩オーバフローホース
Aレーザ光源、Bフォトマルチプライヤ、Cレーザ光源用電源、Dオシロスコープ、E周波数シフタ、F周波数トラッカー、G CRT、Hマイクロコンピュータ、Iフロッピーディスクドライブ

図2 流速測定装置

図3 流路形状

Separan AP-30 の水溶液, ヒドロキシエチルセルロース (HEC) HEC-ユニセル QP-4400H の水溶液及びこれらの混合溶液を用いた。図4は同心二重円筒型回転粘度計を用いて測定した、ずり速度 $\dot{\gamma}$ と定常流粘度 η との間の関係である。PAA 水溶液と HEC 水溶液を比べると、PAA 水溶液のほうが HEC 水溶液より shear-thinning 性が高い。

図4の曲線は測定データを Carreau モデル

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(p-1)/2} \quad (1)$$

に適用して得られたものである。ここで、 η_0 と η_{∞} はずり速度零の場合と無限大の場合の粘度、 λ は時定数、 p は無次元の指数である。表1に各パラメータの値を示す。ニュートン流体としては水飴を使用した。表2に水飴の粘度の測定値を示す。これは PAA 0.1% 水溶液の η_0 に近い値である。

このような非ニュートン粘性流体のレイノルズ数 R_e は以下のようにして求めた。レイノルズ数は流体の密度を ρ , V_m を平均流速, W を流路幅とする

と次式のように定義される。

$$R_e = \frac{\rho V_m W / 2}{\eta}$$

定常流粘度は、実験データから得た Carreau モデル曲線を用いて得た、ずり速度を流路幅に関して平均

表2 水飴の定常流粘度

溶液の種類	η (Pa·s)	液温 (°C)
水飴	0.133	17.2

図4 PAA 水溶液, HEC 水溶液及び PAA と HEC の混合水溶液の定常流粘度

表1 Carreau モデルのパラメータ

溶液の種類	η_0 (Pa·s)	η_{∞} (Pa·s)	λ (s)	p	液温 (°C)
PAA 1.0%	10.3	5.80×10^{-3}	8.79	0.374	20.9
PAA 0.5%	1.54	8.93×10^{-3}	1.98	0.412	19.8
PAA 0.1%	0.131	9.61×10^{-4}	1.89	0.593	17.9
HEC 1.0%	1.70	0.01	5.90	0.61	15.4
HEC 0.5%	0.0841	0.001	0.141	0.70	13.3
PAA 0.5% + HEC 0.5%	9.25	2.56×10^{-4}	19.4	0.493	24.5
PAA 0.2% + HEC 0.6%	1.01	0.0146	9.10	0.564	16.6

した平均ずり速度 $\dot{\gamma}_m$ を求め、その値を用いて決定した。流路幅 W は収縮前の流路幅 40 mm を、 V_m は収縮前の平均流速を用いた。

図 5 に法線応力差が測定できるように改造した円錐円板型の回転粘度計を用いて測定した第 1 法線応力差の結果を示す。第 1 法線応力差の値は、ずり速

図 5 高分子溶液の第 1 法線応力差

度が増すとともに増加する。又、PAA 濃度の高いほどその値は大きく、HEC を混合した影響は定常粘度におけるほど顕著ではない。HEC 水溶液や PAA 0.1% 水溶液はその値が小さく測定できなかった。

3. 循環二次流れの発達と変動

粘弾性流体が小さいレイノルズ数で急収縮流路を流れるとき、急収縮部直前に図 6 に示すような大きな循環二次流れが生じ、主流はウィングラス状になることが知られている⁶⁾。さらに、流速を大きくすると、図 7 に示すような不安定流動が生じる。これは PAA 0.1% 水溶液を平均流速 $V_m = 3.53$ mm/s で流し、モータドライブ付カメラで連続撮影したものである。図 7 の(a)では循環二次流れはほぼ左右対称であるが、時間の経過とともに左側の循環二次流れ部は収縮し、右側の循環二次流れ部は膨張する。このため主流は(b), (c)のように左側に寄る。(c)より後

図 6 PAA 0.1% 水溶液の流動状態, $V_m = 1.43$ mm/s, $\dot{\gamma}_m = 0.0981$ s⁻¹, $Re = 0.225$

図 7 PAA 0.1% 水溶液の不安定流動, $V_m = 3.53$ mm/s, $\dot{\gamma}_m = 0.242$ s⁻¹, $Re = 0.531$

図8 PAA 0.1%水溶液の不安定流動, $V_m=8.78$ mm/s, $\dot{\gamma}_m=0.602 \text{ s}^{-1}$, $Re=1.50$

はいままでとは逆に右側の循環二次流れ部の収縮が始まり, 左側の循環二次流れ部が膨張する. このため, (d), (e)のように流れは再び対称形に戻ろうとする. しかし(e)のような対称な形は保たれず, 主流はそのまま右側へ寄り, (f), (g)のように左側の循環二次流れ部が大きく右側は小さくなる. その後, 再び左側の循環二次流れ部の収縮と, 右側の循環二次流れ部の膨張が始まる(h). 以上のような流動状態のサイクルをここでは粘弾性流体の不安定流動と呼ぶ.

図8は平均流速 $V_m=8.78$ mm/sの流動状態で,

図9 PAA 0.1%水溶液の不安定流動, $V_m=21.5$ mm/s, $\dot{\gamma}_m=1.48 \text{ s}^{-1}$, $Re=5.21$

図7より平均流速が大きいため変動が一層著しくなっている. さらに平均流速を大きくすると, それまで周期的に繰返されていた不安定流動が乱れてくる. そのときの流動状態を図9に示す. これに対し, ニュートン流体である水飴では図10に示すように小さいレイノルズ数では粘弾性流体にみられるような循環二次流れは発生せず, 従って不安定流動も認められない.

不安定流動の発生している場合には主流の移動が観測されることから, 安定流動から不安定流動への移行を, 主流の中心の移動距離を測定することによって求めた. 図11に主流中心が移動している場合の模式図を示す. 不安定流動が始まると, 循環二次流

図10 水あめの流動状態, $V_m=10.5$ mm/s, $\dot{\gamma}_m=0.788 \text{ s}^{-1}$, $Re=2.16$

図11 主流の中心位置

れの大きさの変動に応じて、主流の中心は破線で示すように移動する。そこで、主流中心が流路中央より最も離れたときの最大の膨らみ点の位置 a , b を可視化写真から読取った。図中に A , B で示した線と流路中心線との交点を原点とし、流路中心線から主流が最大に偏ったときの流路中心線からの偏りを屈曲角 θ とした。

図12に PAA 0.5% 及び PAA 0.1% 水溶液に対する測定結果を示す。 X , Y はそれぞれ a , b を流路の壁面から中央までの距離 H で割った値である。 X

図12 主流中心の移動と平均ずり速度

表3 PAA0.5%水溶液及びPAA0.1%水溶液の遷移領域

溶液の種類	遷移領域 $\dot{\gamma}_m$ (s^{-1})
PAA 0.5%	0.068~0.095
PAA 0.1%	0.12 ~0.13

の値は平均ずり速度 $\dot{\gamma}_m$ が変化してもほとんど変化しない。 Y の値はある平均ずり速度の領域（図12の破線で囲まれた領域）で急に大きくなる。この領域で流れは安定状態から不安定状態へ変化する。表3にこれらの遷移領域の値を示す。遷移領域はPAA濃度が高いほど低い平均ずり速度側に寄る。遷移領域よりさらに平均ずり速度が増すと、 Y の値は一定の値に近づくようである。その値はPAA 0.1%, 0.5%水溶液ともほぼ等しいが、 X の値はPAA 0.1%水溶液の場合のほうが明らかに小さい。これは濃度の小さい水溶液の循環二次流れ部は小さく、主流の屈曲角が大きいことを示している。

4. 不安定流動時の流速変動と周期

図13に平均流速を変化させた場合のレーザ流速計による測定の結果を縦軸に流路 v , 横軸に時間 t をとって示す。粘弾性流体としてPAA 0.1%水溶液を用いた。測定位置は図2に示した座標系に従って x の負の方向に7.5 mm, y 方向に2.5 mm, z 方向に0 mmの位置である。流速は主流の中心が測定点に

図13 種々の平均流速でのPAA 0.1%水溶液の流速変動

図14 PAA 0.1%水溶液における流速変動の自己相関関数

近付くにつれて速くなり、主流の中心が遠ざかり循環二次流れ部が近付くに従って遅くなる。又、循環二次流れの流速は主流と比較して遅いので、測定点が循環二次流れ部に入った場合も観測される流速は遅い。それ故、流速の周期的な変動は循環二次流れ部の大きさの変動とそれに伴う主流の位置の移動によって発生する。図では平均流速が増加するに従って流速変動の周期は短くなり、振幅は大きくなっている。(c)の流速波形では、流速の増加時に変化が大きく減少時はなだらかになっているのが認められる。これは循環二次流れの収縮時間が膨張時間よりも短いことを表わしている。

次に、レーザ流速測定で得られた図13の流速変動のデータ(c), (d)に対して、高速フーリエ変換 (FFT) 処理をして得た自己相関関数を図14(a), (b)に示す。図14の(a)は単一周期的変動であるが、平均流速の大きな(b)は複数の周期が重なっている。図15は $x = -10$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 0$ mm の位置における自己相関関数から求めた変動周期と平均ずり速度の関係である。これより平均ずり速度が増加すると変動周期は小さくなるが、変動周期の減少率も小さくなるのがわかる。この場合には3つの濃度ともほぼ同一の曲線上に乗り、濃度の変化に対する相違は見られなかった。

図15 種々の濃度のPAA水溶液における変動周期と平均ずり速度、測定位置 $x = -10$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 0$ mm

5. 不安定流動時の循環二次流れ

5.1 流れに平行な平面 (xy 平面) における循環二次流れ部の変化

急収縮部直前で粘弾性流体は流速が増すにつれて循環二次流れ部の収縮、膨張が始まり、その収縮膨張につれて主流が左右に移動することがわかった。図16に不安定流動時の流れに平行な平面 (図2でのxy平面) 内における循環二次流れ部の変化を模式的に示す。図中ハッチング部分は循環二次流れ部を

図16 xy 平面内 ($z = 0$ mm) での循環二次流れの模式図

表わし、破線は上流における流路中央を通る流線である (図7, 8 参照)。(1)では図右側の循環二次流れ部が主流から一部流れを取込みながらさらに大きくなっていく。主流は左へ偏っている。(2)では左側の循環二次流れ部が右のものより小さいが主流から流れを取込み大きくなりつつあり、右側の循環二次流れ部は一部主流へ合流する流出が始まり、主流の偏りも小さくなる。(3)ではさらに左の循環二次流れ部が大きくなり、右側が最も小さくなり主流は右側に偏る。(4)では(2)と左右対称で左の循環二次流れ部が最大となり流出が始まる。右の循環二次流れ部は大きくなりつつある。この繰返しが不安定流動となっている。

5.2 流れに平行な平面 (xz 平面) における循環二次流れ部の変化

図17に示したA-A断面内でのy軸方向から観測したPAA 0.5%水溶液における循環二次流れ部の動きを図18に示す。撮影間隔は約1.5秒である。図19は図18における循環二次流れ部の動きを模式的に表わしたものである。図中のハッチング部は循環二次流れ部の領域を表わす。この変化は図18の(a)に示した台形の循環二次流れ部が

- (1) 中央部の1点で主流に押され急速につぶれ始める (図18(b), (c))

図17 xz 平面内 ($y=10$ mm) での循環二次流れ観測のスリット位置

図18 xz 平面内 ($y=10$ mm) での循環二次流れの動き, $V_m=6.05$ mm/s, $\dot{\gamma}_m=0.391$ s $^{-1}$, $R_e=0.083$

- (2) (1)の影響が流路端部にまで及んでゆく (図18(d), (e))
- (3) 中央部が再び膨張し始める (図18(f), (g))
- (4) 徐々に循環二次流れ部全体も膨張してゆく (図18(h))

その後、全体がある程度まで膨張すると、循環二次流れ部は再び中央部からつぶれ始め(1)の状態に戻る。急収縮部直前の不安定流動はこの(1)~(4)の状態が図17に㊶及び㊷で示した領域で逆位相で繰返されている。

6. 流動状態に及ぼす粘弾性的性質の影響

ここで用いた流体の中で粘度曲線が比較的似た3種類の高分子溶液の流動状態を図20に示す。(a)はPAA 0.5%水溶液, (b)はPAA 0.2%とHEC 0.6%を混合した水溶液, (c)はHEC 1.0%水溶液で, (a)に示したPAA 0.5%水溶液と(b)に示した混合溶液は平均流速がほぼ等しい。どちらの場合にも収縮部に循

図19 xz 平面内での循環二次流れの模式図

(a) PAA 0.5% 水溶液, $V_m = 1.14 \text{ mm/s}$, $\dot{\gamma}_m = 0.0736 \text{ s}^{-1}$, $R_e = 0.0127$
 (b) PAA 0.2% + HEC 0.6% 水溶液, $V_m = 1.24 \text{ mm/s}$, $\dot{\gamma}_m = 0.0844 \text{ s}^{-1}$, $R_e = 0.026$
 (c) HEC 1.0% 水溶液, $V_m = 14.6 \text{ mm/s}$, $\dot{\gamma}_m = 1.01 \text{ s}^{-1}$, $R_e = 0.399$

図20 各種水溶液の流動状態

環二次流れが観察され、その大きさは比較的似ているが PAA 0.5% の方が少し大きい。図 6 に示した PAA 0.1% 水溶液の場合には、平均流速はほぼ等しいがその領域が小さい。(c) の HEC 1.0% 水溶液の場合には、他と比較して平均流速が大きいにもかかわらず循環二次流れ部が小さい。これらのことから等しい平均ずり速度における循環二次流れ部の大きさの関係は次のようになる。

PAA 0.5% > (PAA 0.2% + HEC 0.6%) > PAA 0.1% > HEC 1.0%

PAA 0.1% 水溶液の粘度が他の 3 種の溶液より小さく、他は比較的似た粘度であることから、この大小関係は主として粘性によって支配されているのではないことがわかる。第一法線応力差の値は図 5 に示したように、PAA 0.5% 水溶液が大きく、混合溶液は小さい。他の 2 種の溶液はその値が小さいため測定できなかったが、上記のことから、循環二次流れ部の大小関係は高分子溶液の弾性的性質が大きく関与していると考えられる。

7. まとめ

矩形断面を有する急収縮部における粘弾性流体の不安定流動を可視化するとともに流速変動を測定して、不安定現象に及ぼす流体の粘弾性的性質の影響を調べた。

急収縮部を流れる粘弾性流体においては、流速が増すと、急収縮部に循環二次流れが発生し成長する。これよりさらに流速が大きくなると、循環二次流れ

部は左右交互に収縮膨張を繰返し、急収縮部で流れが不安定になる。不安定流動が始まる流速は弾性的性質の強い PAA 0.5% 水溶液において小さく、弾性的性質の弱い流体では大きいことから、その発生は流体の弾性的な性質が大きく関与していると考えられる。

不安定流動中には主流の方向が、循環二次流れ部の収縮膨張に応じて変化するが、その最大の屈曲角は PAA 濃度の小さい方が大きい。不安定流動の変動周期は単一周期で、流速が増すにつれて減少し、濃度の違いにかかわらず同一曲線上に乗っている。しかし平均流動が大きくなると変動波形が乱れ、複数の周期の重なりが観測されるようになる。

不安定流動中の循環二次流れは、スリットに直角的な断面内では、左右交互に収縮膨張を繰返すが、スリットに平行な断面内の観察によれば、流路壁面の影響を受けない中央部の変動が先行する。

このような粘弾性流体の流動状態は、粘度がほぼ等しく、弾性的性質の異なった流体などの流動状態の観察から、流体の弾性的性質が大きく関与していると考えられる。

参考文献

- 1) T. F. Ballenger and J. L. White : Chem. Eng. Sci., 25, 1191 (1970)
- 2) P. J. Cable and D. V. Boger : AIChE J., 24, 869 (1978)
- 3) P. J. Cable and D. V. Boger : AIChE J., 25, 152 (1979)
- 4) Y. Oyanagi : Appl. Polym. Symp., 20, 123 (1973)
- 5) Y. Tomita and T. Dhimbo : Appl. Polym. Symp., 20, 137 (1973)
- 6) 堀川, 中村, 梅垣 : 繊維機械学会論文集, 29, T 63 (1976)