Entry Flow of Polymer Solutions through Multi-hole Abrupt Contractions

Yuichi NAKA^{*1}, Kunji CHIBA^{*2}, Kiyoji NAKAMURA^{*1}

^{*1} Department of Mechanophysics Engineering, Graduate School of Engineering,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{*2} Faculty of Education, Shiga University,
Otsu, Siga 520-0862, Japan

Flow visualizations and velocity measurements for entry flows of shear-thinning aqueous solutions of polyacrylamide through three kinds of multi-hole contractions have been carried out using the tracer method and LDV technique. In these experiments effects of the number of contractions, distance between contractions and rheology of solutions on the flow structures have been studied. For the multi-hole contractions square arrays of 9 holes and 25 holes were used. In the steady flow regime dimensionless lip vortex length is almost the same for all multi-hole contractions. Swirling-like vortices are also observed for both three-by-three and five-by-five contractions with dimensionless pitch 4, while two-dimensional lip vortices are observed for the three-by-three contraction with dimensionless pitch 8. It is found from LDV measurements that periodic oscillations of the main flow occur at the onset of unsteady flow for all multi-hole contractions and the frequency of the oscillation increases as the Weissenberg number increases. For multi-hole contractions, flow interaction through each contraction is very important factor which decides both steady and unsteady flow structures.

Key Words: Multi-hole contraction / Flow visualization / LDV measurement / Polymer solution / Lip vortex

多数の円孔急縮小部を有する流路における高分子溶液の流れ

中 雄一^{*1} ・ 千葉 訓司^{*2} ・ 中村 喜代次^{*1}

(原稿受理: 1998 年 7 月 7 日)

1. 緒 言

高分子流体は、水や Glycerin などのニュートン流体とは著しく異なる性質を有する。一つはせん断速度により粘度が変化する非ニュートン粘性を示すことであり、もう一つは跳ね戻り現象などに見られるような弾性的性質を有することである。

高分子物質の射出成形加工や紡糸工程では、様々な形状の流路が用いられるが、急縮小形状の流路内での流れが製品の品質に大きく影響を与える場合がよく見られる。従って流路の効率的な設計を行うために、急縮小部での流れの機構を知ること

は非常に重要である。

高分子溶液や融液などの粘弾性流体が、急縮小流路を流れるとき、収縮管の上流角部に循環 2 次流れが発生することがよく知られている。流量増加にともなう渦の発生、成長については、多くの研究がある。それらのうち慣性力が支配的な流れでは渦が小さくなった後、非定常流へと遷移し、粘弾性的な力に支配される流れでは渦の成長後、非定常流れを引き起こすと報告されている^{1)~3)}。渦発生の原因として、Cable と Boger^{4)~6)} は第一法線応力差に代表されるせん断特性を挙げている。一方、White と Kondo⁷⁾、White と Baird⁸⁾ は LDPE および PS 融液について伸長応力の過渡的な成長過程を調べ、伸長応力の

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

^{*2} 滋賀大学教育学部 〒520-0862 滋賀県大津市平津 2-5-1

急激な成長が渦の原因であると結論した。さらに森ら⁹⁾も伸長粘度の stretch-thickening 性と渦の増大について言及している。一方, Bulters ら¹⁰⁾は循環2次流れの大きさが Deborah 数の関数であることを示し, また Evans ら¹¹⁾は管入口の角部に発生する lip vortex が循環2次流れの成長に大きな影響を及ぼすことを報告している。さらに流れの変動を定量的に調べた報告も多い。Lawler ら¹²⁾はレーザードップラー流速計による流速測定により, 非定常流への臨界 Deborah 数を見出した。また, McKinley ら¹³⁾は lip vortex 付近の流速変動により, 定常流から非定常流までを5つの領域(steady, periodic, period doubling, quasi-periodic, aperiodic)に分類している。

このように, 急縮小管路の流れについての研究は数多くなされているが, そのほとんどは軸対称の円管流路や矩形管流路内の流れを取り扱ったものである。現在までにこれら以外の流路を取り扱った研究報告は少なく, 上流管と下流管との中心軸を偏心させた流路を取り扱った中村ら¹⁴⁾や中ら¹⁵⁾, 複数の急縮小部を有する流路を取り扱った Koelling ら¹⁶⁾の研究報告が見られる程度である。しかし現在, 成形加工や紡糸工程において, 複数の急縮小部を有する流路が頻繁に使われており, このような流路における流れ構造を知ることが重要になっている。そこで本研究では, 多数の円孔急縮小部を有する流路を使用し, それら縮小管の個数や縮小管の間隔を変化させた時の流れ構造の違いを調べた。

2. 試料流体について

2.1 試料流体の特性

本研究では, 高分子溶液として polyacrylamide (商品名 SANFLOC-AH70P, 三洋化成工業製, 以下 PAA と略記する) の 0.2, および 0.5wt% 水溶液を用いた。液温 20 で測定した試料流体のレオロジー特性を図1に示す。これより明らかなように, PAA 水溶液はせん断速度が増加するとせん断粘度が減少する (shear-thinning 性) とともに第一法線応力差は増大する。

2.2 流動状態を表すパラメータ

本研究では, 実験時のせん断速度を式(1)のように下流管の平均せん断速度 $\dot{\gamma}_d$ で代表する。

$$\dot{\gamma}_d = \langle v_z \rangle_d / R_d \quad (1)$$

ただし, $\langle v_z \rangle_d$ は下流管平均流速, R_d は下流管半径である。

実験はすべて 25 の液温で行ったため, 実験時のレオロジー特性値を求めるには温度補正が必要である。温度補正の方法については既報³⁾¹⁵⁾で詳しく説明しているのでここでは省略する。一方, せん断応力 τ と第一法線応力差 N_1 の関係は温度に関わらず両対数グラフ上では一直線で表される^{17)~20)} (図2参照)。そこで実験時の第一法線応力差は実験時のせん断応力を

Fig.1 Rheometrical data for the aqueous solutions of PAA at 20 °C. Solid symbols (●, ▲); shear viscosity and hollow symbols (○, △); first normal stress difference.

Fig.2 First normal stress difference as a function of shear stress for the aqueous solutions of PAA at 20 °C.

用いて求め, 緩和時間 λ は式(2)により算出する。

$$\lambda = \frac{N_1}{2\tau \cdot \dot{\gamma}_d} \quad (2)$$

本研究では流動状態を示すパラメータにレイノルズ数およびワイゼンベルグ数を用いる。

$$Re = \frac{\rho \cdot \langle v_z \rangle_d \cdot 2R_d}{\eta} \quad (3)$$

$$We = \frac{\lambda \cdot \langle v_z \rangle_d}{2R_d} \quad (4)$$

3. 実験装置および実験方法

本研究では流れ模様を調べるために固体トレーサー法による可視化実験を行い, また流速測定にはレーザードップラー流速計(以下 LDV と略記する)を使用した。

本研究では可視化実験および LDV による流速測定で図3に示すような流路を使用した。図3において Head tank から Test section に流入する試料流体は, 縮小部の十分上流ですでに発

Fig.3 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Fig.4 Schematic diagram of the contraction geometry and observation planes.

Fig.5 Schematic diagram of the laser-Doppler velocimetry system.

達した流れとなっている。また縮小部はフランジを介して取り付けることにより、複数の流路に対応するように設計されている。流量は出口部を固定し、Head tank を上下に移動させることにより調節している。

急縮小部の概略を図 4 に示す。本研究では各方向からの流れの観察を可能にするため上流管には一辺 100mm の矩形管を採用した。縮小管は半径 2mm の円孔で図 4 のように 9 個正方形に配列したものと、25 個配列したものを使用した。比較のため中心部に 1 個だけ配置したものも用意した。本研究ではすべての流路で上流管と縮小管の形状を固定し、図に示すように円孔の半径 R_d と円孔間の中心間距離の半分 R_u との比 R_u/R_d および縮小管数で流路を特徴付ける。この R_d と R_u との比 R_u/R_d を無次元ピッチと定義する。また R_u/R_d は Koelling ら¹⁶⁾ の実験における contraction ratio に相当する。

3・1 可視化実験

本研究では可視化実験に固体トレーサー法を採用した。固体トレーサー法では、直径 0.1mm 以下の polystyrene 粒子を溶液に約 0.025wt% 混入した。スリット光は厚さ約 1mm で、図 4 に示す上流管中心軸を含む 1 点鎖線の断面および縮小面と平行な 2 点鎖線の断面に入射した。流れ模様はカメラ(Nikon FM2)を使用して撮影した。カメラの露光時間はトレーサーがファインダー内を通過する時間を基準にし、流動状態によって決定した。

3・2 LDV による流速測定

本研究で使用した LDV 測定装置は図 5 に示すように 2 本のレーザーの交差部を photomultiplier で検出する 1 次元前方散乱システムである。frequency tracker および shifter にはそれぞれ DISA 55N20, 55N10 を使用し、これにより得られた電気信号を A/D 変換ボード(Canopus ADJ-98)を介してコンピュータで流速データに換算した。また得られた流速データは高速 Fourier 変換し²¹⁾、速度変動も同時に調べた。

Fig.6 Flow patterns for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a single-hole contraction; $Re=1.36$, $We=2.88$.

Fig.7 Flow patterns for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 4); $Re=0.309$, $We=1.89$.

Fig.8 Flow patterns for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole five-by-five contraction (dimensionless pitch 4); $Re=0.103$, $We=1.39$.

Fig.9 Flow patterns for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8); $Re=0.343$, $We=1.92$.

4. 実験結果

本研究では、定常流から非定常流に遷移するレイノルズ数、ワイセンベルグ数をそれぞれ臨界レイノルズ数、臨界ワイセンベルグ数と称し、これらの判断は撮影した流跡に交錯が見られるか否かによって行う。

4.1 定常流

4.1.1 流れ構造

図6は中央に1個だけ円孔を配置した流路における流れ模様である。主流のまわりに粘弾性流体特有の大きな渦、secondary vortexが発生しているのが分かる。この実験条件の場合、 $Re=2$ 、 $We=3$ を越えないと非定常流へは遷移しない。

図7は無次元ピッチ4、縮小管数9の流路における撮影結果

である。左側が中央の縮小管中心軸を含む図4の1点鎖線の断面、右側が縮小面近傍の2点鎖線の断面である。縮小管と上流管壁面との間に、下流側に尖ったsecondary vortexが観察される。この渦と主流との境界に注目すると、渦内の流跡が主流側に入り縮小管へ流出している様子が見られる。すなわちsecondary vortexと主流とは完全には閉じていない。また各縮小管の間のlip vortexは巻き込んでいるように見えるが、これは渦が3次元流れであるために観察されるものと考えられる。さらに図7の縮小面近傍での撮影結果では、縮小管のまわりの状況に応じて、渦を3つのパターンに大別することができる。まずまわりをすべてほかの縮小管に取り囲まれた中心の縮小管の場合、縮小管のまわりに4つのブロックに分類されたlip vortexが発生する。まわりに上流管の隅がある角の縮小管の場合、縮小管を取り囲むようにsecondary vortexが存在する。そして外側に流路壁面がある縮小管の場合は細長いsecondary vortexとなる。

図8は円孔をさらに外側に1列配置した無次元ピッチ4、縮小管数25の流路における撮影結果である。中央の3列の縮小管では無次元ピッチ4、縮小管数9(図7)の流路における中心の縮小管と同様の流れ構造が観察される。したがって、仮にさらに外側に縮小管数を増やしたとしても、同様の流れ構造が続くものと考えられる。

図9は無次元ピッチ8、縮小管数9の流路における撮影結果である。縮小管の間のlip vortexは、他の流路と異なり、巻き込んだ渦にはならない。また縮小面近傍の撮影結果から、各縮小管のまわりの渦が均等に配置しており、縮小管の間での流れの相互干渉は極めて小さいことがわかる。

図6~9はすべて0.2wt%PAA水溶液を用いた可視化実験結果である。0.5wt%PAA水溶液についても実験を行ったが、同様の流れ構造が観察された。

4.1.2 縮小管の間に発生するlip vortex

図10は各濃度の溶液の可視化実験から、縮小管の間に発生するlip vortexの大きさを示したグラフである。渦の大きさは図4における H_v を計測し、それを縮小管の中心間距離 $2R_u$ で割った無次元量($\chi \equiv H_v/2R_u$)で表している。また無次元ピッチ4、縮小管数9および無次元ピッチ4、縮小管数25の両流路における0.2wt%PAA水溶液での実験については非定常流の初期ではlip vortexの大きさにそれほど変動がなかったので、この領域まで計測を行った。

0.2wt%PAA水溶液ではすべての流路において、非定常流遷移直前から非定常流初期にかけてそれまでよりも渦が大きく増大していることが分かる。0.5wt%PAA水溶液についてはそのような現象は見られないが、0.5wt%PAA水溶液の場合、どの流路でも非定常流に遷移するとすぐに流れ全体が乱れ渦高さが計測できなかったため、現時点ではこの現象が0.2wt%PAA水溶液特有のものとは断言することはできない。この現象を除けば、全体的に流路形状や溶液の濃度の違いによる渦の大きさの差

Fig.10 Lip vortex length as a function of Weissenberg number. Hollow symbols ( ); 0.2wt% aqueous solution of PAA and solid symbols ( ); 0.5wt% aqueous solution of PAA.

Fig.11 Dimensionless axial velocity profiles along the y-axis for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole five-by-five contraction (dimensionless pitch 4); $Re=0.0626$, $We=1.21$.

Table. Critical Reynolds and Weissenberg numbers for the multi-hole contractions and aqueous solutions of PAA.

contraction	three-by-three pitch 4	five-by-five pitch 4	three-by-three pitch 8
	Re	Re	Re
0.2wt%PAA	0.58 ~ 0.80	0.10 ~ 0.13	0.60 ~ 0.82
	We	We	We
	2.2 ~ 2.4	1.4 ~ 1.5	2.2 ~ 2.4
	Re	Re	Re
0.5wt%PAA	0.049 ~ 0.064	0.023 ~ 0.029	0.044 ~ 0.066
	We	We	We
	2.0 ~ 2.2	1.6 ~ 1.8	2.0 ~ 2.2

はそれほどなく、すなわち lip vortex の大きさが流路形状や溶液のレオロジー特性にはあまり影響されず、ワイセンベルグ数によって決まることを示す。この結果は中ら¹⁵⁾が行った偏心流路における実験結果と定性的に一致する。

4.1.3 流速分布

図 11 は無次元ピッチ 4、縮小管数 25 の流路における y 軸方

向の速度分布である。流速は LDV により測定し、下流管平均流速 $\langle v_z \rangle_d$ で割った無次元量 $v_z / \langle v_z \rangle_d$ で表している。また図に示している x/R_d は各列の縮小管の中心軸を通るように選定し、縮小面近傍の $z/R_d = 3$ を採用した。LDV による流速測定ではすべて 0.2wt%PAA 水溶液を使用した。

図 11 よりすべての縮小管にほぼ同じ流速で主流が流出していることが分かる。他の流路についても測定を行い、同様の結果になることが確認された。したがって、本研究のような多数の縮小管を持つ流路内の定常流においては、流体はそれぞれの縮小管にほぼ同程度の流量で流出するものと考えられる。

4.2 定常流から非定常流への遷移

4.2.1 臨界レイノルズ数および臨界ワイセンベルグ数

可視化実験における撮影結果から流跡の交錯を調べ、表に臨界レイノルズ数、臨界ワイセンベルグ数を示す。実験ごとに多少変化するため、表の値には幅を持たせている。すべての流路、溶液において臨界レイノルズ数は $Re < 1$ であり、すなわち本研究のような実験条件の場合、慣性の影響が小さい領域ですべてに非定常流へ遷移することが分かる。すなわち、非定常流への遷移は慣性によって生ずるのではなく、せん断流れと伸長流れの混在による複雑な流れに起因するものと考えられる。また縮小管数 25 の流路の方が縮小管数 9 の流路より低い値で非定常流へ遷移している。さらに縮小管数 9 の流路では無次元ピッチにかかわらずほぼ同じ値になっている。したがって、臨界値は縮小管数と溶液のレオロジー特性に依存して決まり、縮小管数が多いほど小さくなる。

4.2.2 流れ構造

無次元ピッチ 4、縮小管数 9 の流路および縮小管数 25 の流路では、渦が成長した後、表の臨界点に達すると非定常流へ遷移する。しかし無次元ピッチ 8、縮小管数 9 の流路については、単純に渦が増大することではなく、他の流路と異なった流れ構造を示す。ごく低流量から次第に流量を増大させると、0.2wt%PAA 水溶液の場合、 $Re=0.33$, $We=1.9$ を越えたあたりから縮小管の間にある一対の lip vortex の渦中心の位置が軸方向にずれ始める(図 12(a))。0.5wt%PAA 水溶液では $Re=0.011$, $We=1.4$ あたりからこの現象が見られ、0.2wt%PAA 水溶液の場合と比較するとかかなり小さい。さらに流量を上げるとこの現象は顕著になり、図 12(b)のように片方の lip vortex が崩れかけるような様子を示した後、非定常流へ遷移する。非定常流に遷移してもその直後、 We の領域が臨界値 ~ 臨界値+0.2 の非常に初期の非定常流においては、流れに定常流の領域と非定常流の領域とが混在する。非定常流初期の可視化実験結果(図 13)では、図 13(a)だけ見れば流れ全体が非定常流であるように見えるが、図 13(b)から写真の左上が非定常流の領域、右下が定常流の領域と混在している様子がよく分かる。図 13 は 0.2wt%PAA 水溶液を用いた可視化実験結果であるが、0.5wt%PAA 水溶液についても同様の

Fig.12 Location of vortex centers in a pair of lip vortex for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8); (a): $Re=0.392$, $We=2.01$, (b): $Re=0.694$, $We=2.34$.

Fig.13 Flow patterns at the onset of unsteady flow for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8); $Re=0.797$, $We=2.41$.

現象が見られた。

4・3 非定常流

4・3・1 流れ構造

図 14, 15 は 0.2wt%PAA 水溶液を用い, 無次元ピッチ 4, 縮小管数 9 の流路における非定常流を 15 秒間隔で (a) ~ (d) へと連続撮影した結果である。図 14 より中央の主流を含む 3 本の主流が外側に膨らんだり, 中心に近づいたりといった動作を繰り返していることが分かる。また図 15 より中央にある lip vortex が上下, 左右の渦の隙間に食い込む様子が分かる。図 15 では矢印で示すように, 左右の渦の隙間へ食い込んでいた lip vortex が, 上下の隙間へと食い込み位置を変えて行く様子が見られる。さらにこの連続撮影により, その変動周期が約 45s であることが分かった。0.5wt%PAA 水溶液についても同様の実験を行い, 0.2wt%PAA 水溶液の場合と同様の流れ構造, 周期的変動を示すことが確認された。

無次元ピッチ 4, 縮小管数 25 の流路についても同様に, 非定常流における連続撮影を行ったが, 0.2wt%PAA 水溶液および 0.5wt%PAA 水溶液いずれについても, 明確な流れ構造のパターンや周期的な変動は観察されなかった。

無次元ピッチ 8, 縮小管数 9 の流路の場合, 完全に非定常流

Fig.14 Consecutive photographs of the unsteady flow for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 4); (a) ~ (d): $Re=1.22$, $We=2.75$.

Fig.15 Consecutive photographs of the unsteady flow near the contraction plane for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 4); (a) ~ (d): $Re=1.27$, $We=2.71$.

Fig.16 Consecutive photographs of the unsteady flow for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8); (a) ~ (d): $Re=1.08$, $We=2.64$.

Fig.18 Consecutive photographs of the unsteady flow for the 0.5wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8); (a) ~ (d): $Re=0.136$, $We=2.70$.

Fig.17 A flow pattern of the unsteady flow and illustration of the spiraling flows for the 0.2wt% aqueous solution of PAA through a multi-hole three-by-three contraction (dimensionless pitch 8).

へ遷移した後は溶液の濃度により異なった流れ構造を示す。図 16 は 0.2wt%PAA 水溶液を用い 15 秒間隔で非定常流の連続撮影を行った結果である。この非定常流では縮小管の間にある 2 つの lip vortex の領域が交互に成長と収縮を繰り返す現象が見られる。図 16 では左側の渦が収縮すると同時に、右側の渦が成長していく様子が確認できる。また縮小面近傍の連続撮影により、各縮小管まわりの渦が旋回していることが分かった。すなわち各縮小管に流入する 9 本の主流は spiral flow であると考えられる。さらにこの撮影結果より、それぞれの渦はバラバラに旋回するのではなく、隣同士の渦との接点において運動の向きを一致させるよう、図 17 のイラストに示す方向に旋回していることも確

認できた。

0.5wt%PAA 水溶液における非定常流の連続撮影結果を図 18 に示す。0.5wt%PAA 水溶液の場合、縮小管の間にある lip vortex は 0.2wt%PAA 水溶液のときのよう交互に成長、収縮を繰り返すのではなく、同時に成長、収縮を行っている。主流に注目すると、3 本の主流は渦の変動に伴い、外側に膨らんだり中央に集まったりを繰り返していることが分かる。すなわちこの流れは無次元ピッチ 4、縮小管数 9 の流路での非定常流に非常によく似ている。残念ながら縮小面近傍での撮影結果では、渦内の流速が小さすぎるため流れが分からなかったが、中央の lip vortex は上下、左右へと交互に成長を繰り返していると予想される。

4.3.2 流速変動

LDVを用いて非定常流の流速を測定した。測定点は各流路とも縮小面近傍の $(x/R_d, y/R_d, z/R_d) = (0, 0.3)$ とし、流速変動を明らかにするため、測定周波数を 5Hz、測定時間を 210s とした。また流速データは高速 Fourier 変換を行い、変動の周期性についても調べた。この結果を図 19 に示す。

無次元ピッチ 4、縮小管数 9 の流路では $Re=0.33$, $We=1.9$ を越えたあたりから流速に周期的変動(周波数 f)が見られ、さらにワイセンベルグ数が増加すると $0.5f$, $1.5f$ が出現する。前述の可視化実験結果(図 15)では非定常流の変動周期が約 45s、周波

Fig.19 Frequency of oscillations in the velocity at the position of $(x/R_d, y/R_d, z/R_d) = (0, 0, 3)$ for the 0.2wt% aqueous solution of PAA.

数にすると約 0.022Hz となるが、いずれの周波数もこれには一致しない。LDV ではあくまでも主流の軸方向流速成分の変動を測定しているため、流れ全体の変動とは必ずしも一致しないと考えられる。

無次元ピッチ 4、縮小管数 25 の流路では $Re=0.065$ 、 $We =$

1.2 を越えたあたりから f_1 が発生する。表 に示す非定常流への臨界点に達すると $2f_1$ が現れ、しばらくは $f_1, 2f_1$ の共存状態が続く。 $Re=0.22$ 、 $We = 1.7$ 付近ではさらに周波数の低い f_2 が出現し、これに伴い、 $f_1, 2f_1$ は減衰し、消失する。 $Re>0.30$ 、 $We > 1.8$ になると f_3 が出現する。この領域での可視化実験結果では、明確な非定常流の構造や変動のパターンは観察されなかったが、主流は明確に周期的変動を示していることが明らかになった。

無次元ピッチ 8、縮小管数 9 の流路では無次元ピッチ 4、縮小管数 9 の流路と同様、 $Re=0.34$ 、 $We = 1.9$ を越えたあたりから周波数ピークが見られる。初期の段階から f と $0.5f$ の共存が見られるが、 $1.5f$ は $Re>0.95$ 、 $We > 2.5$ にならないと出現しない。この流路の場合も、可視化実験により明確な非定常流の構造が観察されているが、その変動周期と LDV における周波数ピークとは必ずしも一致しないと考えられる。

このように縮小管数 9 の流路では無次元ピッチにかかわらず、 $0.5f, f, 1.5f$ の周波数ピークが発生し、縮小管数 25 の流路では $f_1, 2f_1$ が発生する。すなわち変動の周波数特性は縮小管数によって決まるといえる。またすべての流路において周波数ピークは非定常流への臨界点より $We \approx 0.2$ 程度小さいところから出現し、その後ワイセンベルグ数の増加に伴い増大する。さらにパワースペクトルの振幅は低い周波数ほど大きくなるという傾向を示す。

5. 結 言

本研究では、複数の円孔急縮小部を有する 3 種類の流路を用い、可視化実験および LDV による流速測定により、定常流から非定常流に至るまでの流れ構造を調べた。その結果定常流、非定常流への遷移、非定常流の各領域の流れ構造がそれぞれ、縮小管数、無次元ピッチ、溶液の濃度に依存していることが明らかになった。

定常流における流れ構造は、縮小管数や溶液の濃度には依存せず、無次元ピッチによって分類することができる。したがって縮小管数 9 の流路について実験を行えば、同じ無次元ピッチでさらに縮小管数の多い流路についても容易に流れ構造を予測することができる。

定常流から非定常流へ遷移する臨界ワイセンベルグ数は縮小管数と溶液の濃度に依存して決まり、縮小管数が多いほど小さくなる。さらに全体的に臨界レイノルズ数は小さく ($Re < 1$)、すなわち慣性の影響が小さいことから、この原因は White と Kondo⁷⁾ が伸長応力に関連付けて提唱した stress-relief mechanism に基づいて考えることができる。PAA 水溶液は伸長速度が増大するにつれ、伸長粘度が増加する tension-thickening 性を有している。このため伸長速度が増大すると、伸長応力はニュートン流体に比べ急激に増大することになる。しかし粘弾性流体は、この伸長応力の増大を押さえるように流れる。すなわち流量増加とともに伸長応力が増大することになるが、渦の成長により伸長速度の増大が押さえられるため、伸長応力の増大を抑制することがで

きる。単一の縮小管を有する流路では縮小面の面積が広く渦が大きくなり増大することができるが、縮小管数が増えるにつれ、縮小面の面積が小さくなりさらに複数の主流により渦が分割される。このため渦の成長が抑制されより低いワイセンベルグ数で非定常流に遷移する。さらに溶液の濃度が高くなると、同じ伸長速度に対し伸長粘度がより大きくなるため、臨界ワイセンベルグ数はさらに低くなる(しかしながら 0.5wt%PAA 水溶液における縮小管数 25 の流路にはこの考察が当てはまらず、現時点では未解決である)。

非定常流になると、縮小管数、無次元ピッチ、溶液の濃度すべてに依存して流れ構造は大きく変わる。これは各縮小管に流出する主流同士の相互干渉の度合いによって決まるものと考えられる。主流同士の相互干渉が非常に強い無次元ピッチ 4、縮小管数 25 の流路の場合、0.2wt%、0.5wt%PAA 水溶液ともに、明確な流れ構造や周期的変動は観察されない。無次元ピッチ 4、縮小管数 9 の流路および無次元ピッチ 8、縮小管数 9 の流路に 0.5wt%PAA 水溶液を流した場合は、主流同士の相互干渉も中程度となり、主流は外側に膨らんだり中心に近づいたりを繰り返す。縮小管同士の間隔が広く(無次元ピッチ 8)、溶液の濃度も薄い(0.2wt%PAA)場合は主流同士の相互干渉は小さくなり、主流は spiraling flow となる。さらに LDV により非定常流における主流の流速変動を測定した結果、主流における変動の周波数特性は、縮小管数によって分類できることが分かった。

参考文献

- 1) Boger DV, Hur DU, Binnington RJ, J Non-Newtonian Fluid Mech, **20**, 31(1986).
- 2) Chiba K, Tanaka S, Nakamura K, J Non-Newtonian Fluid Mech, **42**, 315(1992).
- 3) 中 雄一, 千葉 訓司, 中村喜代次, 日本レオロジー学会誌, **26**, 41(1998).
- 4) Cable PJ, Boger DV, AIChE J, **24**, 869(1978).
- 5) Cable PJ, Boger DV, AIChE J, **24**, 992(1978).
- 6) Cable PJ, Boger DV, AIChE J, **25**, 152(1979).
- 7) White JL, Kondo A, J Non-Newtonian Fluid Mech, **3**, 41(1977/1978).
- 8) White SA, Baird DG, J. of Non-Newtonian Fluid Mech., **20**, 93(1986).
- 9) 森 教安, 中村 喜代次, Walters K, 繊維機械学会論文集, **42**, T179(1989).
- 10) Bulters MJH, Meijer HEH, J Non-Newtonian Fluid Mech, **38**, 43(1990).
- 11) Evans RE, Walters K, J Non-Newtonian Fluid Mech, **32**, 95(1989).
- 12) Lawler JV, Muller SJ, Brown RA, Armstrong RC, J Non-Newtonian Fluid Mech, **20**, 51(1986).
- 13) McKinley GH, Raiford WP, Brown RA, Armstrong RC, J Fluid Mech, **223**, 411(1991).
- 14) 中村 喜代次, 森 教安, 松村 賢治, 日本機械学会論文集, **63**, 1264(1997).
- 15) 中 雄一, 千葉 訓司, 中村 喜代次, 日本機械学会論文集, **64**, 2019(1998).
- 16) Koelling KW, Prud'homme RK, Rheol Acta, **30**, 511(1991).
- 17) Tanner RI, "Engineering Rheology", Clarendon Press, p354(1988).
- 18) Barnes HA, Hutton JF, Walters K, "An Introduction to Rheology", Elsevier, p109(1989).
- 19) Ferguson J, Hudson NE, J Non-Newtonian Fluid Mech, **52**, 121(1994).
- 20) Binding DM, Maia J, Walters K, J Non-Newtonian Fluid Mech, **52**, 137(1994).
- 21) 丹 慶 勝市, 奥村 晴彦, 佐藤 俊朗, 小林 誠, "Numerical Recipes in C(日本語版)", 技術評論社, p379(1993).