非対称な平板状縮小金型流路における

粘弾性流体流動場のPIV計測*

穴澤 朝彦¹⁾, 藤澤 延行²⁾

PIV Measurements of Viscoelastic Flows through an Asymmetric Planar Contraction Geometry inside Slot Die

Tomohiko ANAZAWA and Nobuyuki FUJISAWA

ABSTRACT

In the present paper, the viscoelastic flow through an asymmetric planar contraction geometry inside slot die was studied experimentally. The velocity field in the geometry was measured by particle image velocimetry (PIV), and the statistical characteristics of the entrance flow were evaluated. It was found that the entrance flow attached to the side wall on the contraction and the flow around the lip wall became unstable, which were due to the viscoelastic effect of the fluid. This resulted into the vortex formation on the corner of the contraction at large Weissenberg number $Wi > 30$ in the Reynolds number $Re < 7$. It is concluded that the entrance flow can be categorized into Newtonian-like flow region, transitional region, and the vortex formation region in the geometry.

Keywords : Flow visualization, Viscoelastic fluid, PIV, Contraction flow, Slot die

1. 緒言

押出し塗布は、一様な塗膜を形成するための塗布方法の一つであり、近年、光学フィルムや樹脂フィルム等のスモールスケールのコーティング製品（膜厚さは数百 μm のオーダーで、膜厚基準のレイノルズ数 $Re = 1-10$ ）の製造に用いられている。Fig. 1 に押出し金型の概念図を示す。この種の金型では、半円筒形容器である分配室において軸方向に流体を加圧流入させるとき、スロット部を通して流体が押出され、その出口側に一様な厚さの塗膜が形成される。このような押出し塗布では、塗膜厚さの一様性が金型設計上特に重要な評価項目である¹⁾。一般に、押出し塗布は非ニュートン流体を用いることが多い。その金型の内部流れの評価には、流れ計算用汎用コードがしばしば用いられるが、縮小を伴う非ニュートン流体の数値計算ではしばしば収束解が得られないことも報告されている²⁾。一方、現象論的には、縮小流れの入口部では低速領域が形成され、渦発生に至ることもあり得る。このような渦発生により、形成された塗膜の一様性が劣化することも定性的ではあるが指摘されている³⁾。

塗布における流体力学的現象の解明には、流れの可視化が有効である。Schweizer⁴⁾は、水素気泡法による流れの可視化を塗布に関連した流動現象に適用し、その有効性を確

認した。その後、流れの可視化によってマイクロ流路での非ニュートン流体の流動現象の研究が行われてきた⁵⁾。一方、最近になって、PIVによる速度場の定量計測法が塗布に関連した流動現象に応用され、ニュートン流体を対象とした研究^{6), 7), 8)}を初めとし、わずかではあるが非ニュートン流体を対象とした研究も見られる。しかしながら、これらの非ニュートン流体を対象とした研究のうち、粘弾性流体を対象とした研究は、わずかに Rodd ら⁹⁾の研究が報告されているのみである。Rodd らは対称な平板状縮小マイクロ流路（最小寸法 26 μm ）の粘弾性流体を対象に μPIV 実験を行い、入口流路内部で渦が形成される特異現象を発見した。このような現象は、押出し金型の設計上重要であるが、実験で用いられた流路形状は実機で用いられる非対称流路ではない。したがって、実機金型で用いられる非対称な平板状縮小流路の粘弾性流れを対象とした実験が急務であると言える。

以上のことから、本研究では、実機押出し金型の非対称な平板状縮小金型モデルを製作し、内部の速度分布を PIV によって計測することで、金型流路入口部の流れ場を定量

Fig. 1 Schematic of slot coating.

* 原稿受付 2009 年 11 月 9 日

1) 学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050, E-mail: anazawa-t@mail.dnp.co.jp)

2) 正会員 新潟大学 可視化情報研究センター

Table 1 Rheological liquid properties of blends of polyethylene oxide (PEO) with polyethylene glycol (PEG) in water.

Fluid	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
PEG (wt.%)	34.0	34.0	34.0	33.9
PEO (wt.%)	0.00263	0.0105	0.0310	0.0525
η_s (Pa s)	0.0743	0.0743	0.0743	0.0743
η_0 (Pa s)	0.0713	0.0819	0.0922	0.0939
ρ (kg/m ³)	1052	1052	1052	1052
$[\eta]$ (m ³ /kg)	0.00141	0.00141	0.00141	0.00141
λ_{zimm} (s)	0.0111	0.0272	0.0541	0.0762
El	5.2	14.6	32.7	47.0

化する．さらに，この種の非対称縮小流路入口部における渦の発生条件について実験的に考察する．

2. 実験装置および方法

2.1 供試流路

本実験で対象とする平板状の縮小流路を Fig. 2 に示す．この流路は，実機押し出し金型形状に習って非対称な平板状の縮小流路であり，図の流れの方向に流路断面積が急激に減少する．なお，この流路構造は，Fig. 1 に示した実機押し出し金型の分配室からスロットへ至る流れに対応する．流路の上流側は $L = 5 \text{ mm}$ の正方形断面であるが，下流側では $0.538 \text{ mm} (= H_0) \times 5 \text{ mm}$ の矩形断面となる．ただし，この流路は，可視化観察のためアクリル樹脂製である．座標系は，図に示すように，平板状縮小流路の中央断面の入口を原点として位置座標 x, y を設定した．

2.2 流れ場の可視化と PIV システム

実験装置は，Fig. 3 に示すように，供試流路，液供給部および計測部からなる．タンクに供給された供試流体は，容積式シリンジポンプによって，測定部である平板状縮小流路に供給される．供試流体にアクリル製球形粒子（平均粒径 $10 \mu\text{m}$ ）を少量加えることで流れの可視化を行った．

速度場の定量化には PIV を用いた．ただし，本実験では，光源としてダブルパルス Nd:YAG レーザ（出力 15 mJ/pulse ，周波数 15 Hz ，波長 $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ ），撮像にはフレ

Fig. 2 Schematic of asymmetric planar contraction geometry.

ームストラドリング機能を有する CCD カメラ（空間分解能 $1,018 \times 1,008$ ，階調レベル 8 bit），そして，レーザとカメラの露光タイミングを設定するパルスジェネレータを用いた．流れの可視化観察は，シート光学系を用いて流路中央断面付近で行った．ただし，流路の両壁面付近を除く他の断面でもほぼ同様な流れパターンであることは予備実験において確認済みである．ただし，ライトシートの厚さは 1 mm である．一方，CCD カメラにはマイクروسコープ（倍率 2.7，開口数 0.066，絞り 5，焦点距離 0.095 m ）を装着した．PIV 画像の時間間隔 Δt はトレーサ粒子の平均移動ピクセル量が 5 pixel 程度となるように設定した．ただし，粒子の平均直径はおおよそ 2 pixel である．

速度場の PIV 計測は，可視化画像に対し直接相互相関解析を適用することで行った．ただし，計測精度を高めるためガウス近似に基づくサブピクセル解析を用いた．ここに，相関領域は $31 \times 31 \text{ pixel}$ ，探索領域は $15 \times 15 \text{ pixel}$ ，オーバーラップ率は 50% で解析を行った．また，エラーベクトルは，周囲 8 近傍の速度ベクトルの大きさと方向を比較することで除去したが，その発生割合は，全ベクトル数の 1% 以下である．時間平均速度場および速度変動場の評価は， 0.1 s 毎に計測された瞬時速度場の総数 300 を用いて行った．なお，PIV による瞬時速度の計測精度は 3% 程度である¹⁰⁾．

2.3 供試流体のレオロジー特性

本研究では，供試粘弾性流体としてポリエチレングリコール（PEG，平均分子量 $M_w 8 \text{ kg/mol}$ ）とポリエチレンオキシド（PEO，平均分子量 $M_w 4 \times 10^3 \text{ kg/mol}$ ）の混合水溶液を使用した．この流体は，コーティング流れに対する粘弾性の影響を研究するために Dontula ら¹¹⁾により提案されたボガー流体であり，せん断粘度が一定であることが特徴である．また，PEG および PEO の濃度を変えることで，せん断粘度 η_0 および緩和時間 λ_{zimm} を調整できる．本実験では，PEG の重量濃度をほぼ一定 (34wt.%) とし，PEO の重量濃度を種々変えることで (0.00263-0.0525wt.%），四種類の供試流体を作成した．ただし，濃度の決定は実機金型のワイゼンベルグ数 $Wi (= 2\lambda_{\text{zimm}}Q_0/(LH_0^2))$ を参照して決定した．ただし， Q_0 ：流量である．

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus.

本流れ場は、ワイゼンベルグ数 Wi 、レイノルズ数 $Re (= \rho Q_0 / (L \eta_0))$ 、エラスティシティ数 $El (= Wi / Re = 2\lambda_{Zimm} \eta_0 / (H_0^2 \rho))$ によって支配される。なお、 El 数は供試流体のレオロジー特性および流路寸法で決定されるが、 Wi 数と Re 数は、流量に比例して変化することに注意する必要がある。ここに、本実験の液温 25℃における供試流体のレオロジー特性は、Table 1 に示すとおりである。ただし、 η_s ：溶媒のせん断粘度、 η_0 ：溶液のせん断粘度、 ρ ：密度、 $[\eta]$ ：固有粘度、 λ_{Zimm} ：緩和時間である。ここに、せん断粘度 η_0 は、応力制御型レオメータ (直径 7.50×10^{-2} m, コンプレート角度 1°) により計測した。この計測結果によると、 η_0 はせん断速度 ($0.001 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 628 \text{ s}^{-1}$) によら

ず一定であった。一方、 λ_{Zimm} については、希薄系の Zimm 理論¹²⁾に従い式 (1) から算定した。なお、供試流体は、せん断粘度 η_0 と PEO 濃度との相関関係から高分子鎖間の相互作用が無視できる希薄な濃度範囲にあることは確認済みである¹³⁾。

$$\lambda_{Zimm} = F \frac{[\eta] M_w \eta_s}{N_A k_B T} \left(\frac{c}{c^*} \right)^{0.65}; 0.01 \leq c/c^* \leq 1 \quad (1)$$

ここに、 c ：溶質の濃度、 c^* ：臨界オーバーラップ濃度、 F ：リーマン・ゼータ関数、 N_A ：アボガドロ数、 k_B ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 ν ：溶媒の品質指数である。

Fig. 4 Velocity field in asymmetric planar contraction ($Q_0 = 0.302 \text{ ml/s}$, $Wi = 11.4$, $Re = 0.78$, $El = 14.6$).

Fig. 5 Velocity field in asymmetric planar contraction ($Q_0 = 0.739 \text{ ml/s}$, $Wi = 27.8$, $Re = 1.9$, $El = 14.6$, for sub caption see Fig. 3).

Fig. 6 Velocity field in asymmetric planar contraction ($Q_0 = 1.00 \text{ ml/s}$, $Wi = 37.8$, $Re = 2.6$, $El = 14.6$, for sub caption see Fig. 3).

Fig. 7 Velocity field in asymmetric planar contraction ($Q_0 = 1.42 \text{ ml/s}$, $Wi = 53.6$, $Re = 3.7$, $El = 14.6$, for sub caption see Fig. 3).

3. 結果および考察

3.1 流れ場の PIV 計測結果

Figs. 4-7 は、エラスティシティ数 $El = 14.6$ の条件下で流量を増加させたときの平板状縮小流路入口部の中央断面における時間平均速度場の変化を示す。ただし、これらの結果は、PIV から得られた速度ベクトル図 (a), 平均速度の大きさ $\sqrt{U^2 + V^2}/V_0$ を示すコンター図 (b), 流線図 (c) ならびに速度変動 $\sqrt{u'^2 + v'^2}/V_0$ (d) である。ただし、流線図 (c) は、PIV 結果から算出した流線とトレーサ法による可視化実験 (露光時間 20 ms) から得られた流跡線の結果を合成し作成した。なお、図の横軸は流路高さ方向位置 x , 縦軸は主流方向位置 y であり、速度 U, V および速度変動 u', v' は、それぞれ x, y 方向成分である。なお、 H_0 : 縮小部幅, V_0 : 縮小部における断面平均速度である。

Fig. 4 は、低流量 ($Q_0 = 0.302$ ml/s, $Wi = 11.4$, $Re = 0.78$) の条件下における速度場の計測結果である。平板状縮小部の上流側では、流路中央付近に最大速度を示すほぼ対称な速度分布 (Fig. 4 (a), (c)) であるが、縮小部付近では、流路内の速度ベクトルは縮小部に向かう傾向が見られる。また、速度の大きさに増速効果 (Fig. 4 (b)) が現れ、その傾向は縮小部に接近するにつれて強まる。また、Fig. 4 (d) に示すように、速度変動は流路内部のいずれの位置 (速度計測精度の低下する縮小部近傍を除く) でも小さく、流れが層流状態にあることを示す。なお、このような流れ場がニュートン流体のそれとよく一致することは、トレーサ法による流れの可視化にて確認済みである。

流量をわずかに大きくすると ($Q_0 = 0.739$ ml/s, $Wi = 27.8$, $Re = 1.9$), 流路内の速度分布 (Fig. 5 (a)-(c)) の最大速度位置は縮小部寄りに移動する。このため、速度の大きさを示すコンター図 (Fig. 5 (b)) によると、縮小部側の流路壁面 (流路の左側壁面) に沿って増速効果が認められるが、その反対側の流路内には低速領域が拡大し、流路内における流れ場の非対称性は強まる。一方、速度変動図 (Fig. 5 (d)) を見ると、平板状縮小部リップ (流路の上側壁面) に沿って速度変動が増加することが分かる。これは、流路流れと上側リップ壁面に形成されたせん断層の速度勾配が増加し、粘弾性効果の増加によって流れが不安定となることを示唆する。その結果として、流路内の流線には、流路内で湾曲した後、平板状縮小部に流入する様子が見られる。

Fig. 6 は、さらに流量を増加させたときの結果 ($Q_0 = 1.00$ ml/s, $Wi = 37.8$, $Re = 2.6$) である。流路内の速度分布 (Fig. 6 (a), (c)) は、Fig. 5 と同様に、縮小部側の流路壁面に沿った速度分布を示すが、縮小部リップに形成されるせん断層は壁面から離れる。これに対応して、速度変動の大きい領域 (Fig. 6 (d)) も壁面から離脱する。したがって、流路内の流線は、流路内で大きく湾曲するようになる。このとき、縮小部リップの近傍には低速領域が形成され、渦の

初生を示唆する。さらに大きな流量 ($Q_0 = 1.42$ ml/s, $Wi = 53.6$, $Re = 3.7$) では、Fig. 7 に示すように、縮小部側壁への流れの付着と縮小部リップからせん断層が離脱する現象はさらに強く認められる。また、発生する渦のスケールも増大しコーナ部を中心として流路全域に及ぶようになる。

Fig. 8 は、縮小部近傍における流路断面内の速度分布の測定結果である。その一例として、位置 ($y/H_0 = -2$) における主流方向の時間平均速度分布 V/V_0 を示す。ただし、Figs. 4-7 と同様に $El = 14.6$ の結果である。低流量領域 ($Wi = 8.1$, $Re = 0.56$ ならびに $Wi = 11.4$, $Re = 0.78$) の速度分布は、互いに良く一致し、速度分布に及ぼすレイノルズ数の影響はわずかであることを示唆する。しかしながら、 $Wi = 27.8$, $Re = 1.9$ の速度分布には、流路壁付近の速度分布に増速効果が認められ、流路壁への付着効果が増強されていることを示す (Fig. 5 (a)-(c)). 同様な速度分布の変化は、さらに流量を増加させた場合 ($Wi = 37.8$, $Re = 2.6$) にも観測されるが、これらの場合には、流路内部で速度の増加現象が観測され ($x/H_0 = 3$ 付近), 流量が特に大きい場合 ($Wi =$

Fig. 8 Variation of velocity distribution in the contraction geometry at $y/H_0 = -2$.

Fig. 9 Summary of flow regions in Wi - Re space, (●) Newtonian like flow region, (□) Transitional region, and (▲) Vortex formation region.

53.6, $Re = 3.7$) には速度分布に第 2 ピークの発生に至る. このような流路内部における速度分布の変化は, 縮小部リップに沿って発生するせん断層の離脱と渦形成 (Figs. 6, 7) によるものであり, 流体の粘弾性の影響と考えられる.

以上のような流量増加に伴う流れ場の特異的变化は, エラスティシティ数 $El = 14.6$ の場合の結果であるが, 本実験の他の粘弾性流体においても同様な流動現象が確認された. したがって, これらの結果は, 粘弾性流体の非対称流路流れにおける渦発生現象を示唆しており, 特に, 大流量時に発生する大規模な渦形成は注目すべきである.

3.2 流れ場の分類と渦発生条件

Fig. 9 は, 四種の流体に対する実験から得られた渦発生条件を Re 数と Wi 数の関係で示した結果である. ただし, Re 数, Wi 数は流量に比例して増加するが, その勾配が El 数に相当する. Fig. 9 によると, 急縮小流路入口流れは, 擬似ニュートン流れ領域 (Newtonian-like flow region), 遷移領域 (Transitional region), そして渦形成領域 (Vortex formation region) の三領域に分類できることがわかる. ここに, 擬似ニュートン流れ領域は, 流路内の速度分布が流量変化の影響をあまり受けない領域 (Fig. 4 の流れ場に対応) でニュートン流体に類似の特性を示す. 遷移領域は, 縮小部側の流路壁面に沿って増速効果が現れ速度分布に変化が認められる領域 (Fig. 5 の流れ場の対応) である. また, 渦形成領域は, 縮小部リップ付近の低速領域が発達し, それがリップ部から離脱し, 渦形成に至る領域 (Figs. 6, 7 の流れ場に対応) を示す. なお, 擬似ニュートン流れ領域と遷移領域の境界は速度分布形状の変化から, 遷移領域と渦形成領域の境界はリップ部付近の流れのはく離に注目して判断した. 本実験結果によると, これらの三領域は, いずれの El 数の流体においても, $Re < 7$ の範囲では Re 数にほとんど依らず Wi 数によって規定されることが分かる. すなわち, 擬似ニュートン流れ領域 ($Wi < 15$), 遷移領域 ($15 < Wi < 30$), そして渦形成領域 ($Wi > 30$) に分類できる. 以上のように, 平板状の縮小流れでは, $Wi > 30$ で渦発生を伴う流れとなるが, これは対称流路の実験結果 ($Wi > 15$)⁹⁾と定量的に相違する. この相違の原因については, 流路形状の影響が主原因であると予想されるが, その詳細についてはさらに詳しい検討が必要である.

4. 結言

実機押出し金型で使われる粘弾性流体の非対称な平板

状の縮小流路における渦発生条件を明らかにするため, 四種の流体を用いて PIV による速度場計測を行った. 本実験結果によると, 縮小流路の流れ場は, $Re < 7$ の範囲では Re 数の影響をあまり受けず, Wi 数によって規定されること, 流れ場は擬似ニュートン流れ領域 ($Wi < 15$), 遷移領域 ($15 < Wi < 30$), そして渦形成領域 ($Wi > 30$) に分類できることが分かった. 以上のことから, 押出し金型の設計においては, 塗膜の一様性の観点から, 入口流路内部で渦形成を避けるように Wi 数を設定することが重要である.

謝辞

本実験ならびにデータ整理に協力いただいた新潟大学大学院山縣貴幸助教ならびに新潟大学工学部学生矢島隆宏君に感謝申し上げます.

参 考 文 献

- 1) Araki, M.: New Coating Nosubete, Converting Technical Institute ed. (2009) Tokyo.
- 2) Baaijens F.P.T.: Mixed Finite Element Methods for Viscoelastic Flow Analysis: A Review, J. Non-Newtonian Field Mech. Vol.79 (1998) pp. 361-385.
- 3) Nam, J., Scriven L.E., Carvalho M.S.: Tracking Birth of Vortex in Flows, J. Comp. Phys., Vol.228 (2009) pp.4549-4567.
- 4) Schweizer, P.M.: Visualization of Coating Flows, J. Fluid Mech., Vol.193 (1988) pp.285-302.
- 5) Rodd, L.E., Scott, T.P., Boger, D.V., Cooper-White, J.J., McKinley, G.H.: The Inertio-elastic Planar Entry Flow of Low-viscosity Elastic Fluids in Micro-fabricated Geometries, J. Non-Newtonian Field Mech., Vol.129 (2005) pp.1-22.
- 6) Becerra, M.Z., Romero, O.J., Azevedo, L.F.A., Carvalho, M.S.: Measuring the Velocity Field in Film-Splitting Flows of Newtonian Liquids, AIChE J., Vol.53, No.2 (2007) pp.281-289.
- 7) Clarke, A.: The Application of Particle Tracking Velocimetry and Flow Visualisation to Curtain Coating, Chem. Eng. Sci., Vol.50, No.15 (1995) pp.2397-2407.
- 8) Ozalp, C., Pinarbasi, A., Fakilar, M.S., Sahin, B.: PIV Measurement of Flow through a Sudden Contraction, Flow Meas. Inst., Vol.18 (2007) pp.121-128.
- 9) Rodd, L.E., Cooper-White, J.J., Boger, D.V., McKinley, G.H.: Role of the Elasticity Number in the Entry Flow of Dilute Polymer Solutions in Micro-fabricated Contraction Geometries, J. Non-Newton. Fluid Mech., Vol.143 (2007) pp.170-191.
- 10) Fujisawa, N., Ugata, M., Suzuki, T.: A Study on Drag Reduction of a Rotationally Oscillating Circular Cylinder at Low Reynolds Number, J. Visualization, Vol.8 (2005), pp.41-48.
- 11) Dontula, P., Macosko, C.W. and Scriven, L.E.: Model Elastic Liquids With Water-Soluble Polymers, AIChE J., Vol.44 (1998) pp.1247-1255.
- 12) Tiratmadja, V., McKinley, G.H., Cooper-White, J.J.: Drop Formation and Breakup of Low Viscosity Elastic Fluids: Effects of Molecular Weight and Concentration, Phys. Fluids, Vol.18 (2006) pp.1-18.
- 13) Romero, O.J., Scriven, L.E., Carvalho, M.S.: Slot Coating of Mildly Viscoelastic Liquids, J. Non-Newtonian Field Mech., Vol.138 (2006) pp.63-75.