急縮小流路における高分子水溶液の流動誘起構造変化*

佐藤 大祐^{*1}, 保田 和則^{*2}, 岩本 幸治^{*2}, 十河 基介^{*2}, 鳴海 敬倫^{*3}Flow-Induced Structure Change of Aqueous Solution of Polymer
in an Abrupt Contraction ChannelTaisuke SATO^{*1}, Kazunori YASUDA, Yukiharu IWAMOTO,
Motosuke SOGO, and Takatsune NARUMI^{*1} Graduate School of Science and Technology, Niigata University
8050-2 Ikarashi, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan

Flow structures of a polymer solution in a planer channel with a 4 : 1 abrupt contraction have investigated utilizing an optical rheometric device which is combined with a microscope. Distributions of flow-induced birefringence and velocity field were measured with Xanthan gum solution. The measurement of the birefringence was conducted in every 100 μm step along the width direction of the channel. The birefringence measured around the centerline of channel became larger in the converging flow generated in the upstream region of the abrupt contraction. Moreover, in this region, average orientation of the polymer molecules were agree with the flow direction defined with velocity vectors. It is considered that contribution of the elongational flow and the shear flow generated in this region of the planer channel to stretch the polymer molecules has same direction.

Key Words : Flow-Induced Birefringence, Orientation Angle, Viscoelastic Fluid, Abrupt Contraction, Velocity Profile

1. 緒 論

近年、プラスチック成形加工品は最先端技術を支える基幹部品となっており、より高精度の成形を行うために、流動時や成形後の高分子の構造を知ることが重要となっている。このため、高分子流体の流動に関する実験的な研究が早くから行われており、最近では分子モデルによる高分子の平均的な配向構造などを明らかにする解析的研究も行われている。しかしながら、その多くの研究では、希薄系の2次元流れ場を対象としており、実際の成形流れで生じる複雑な変形過程を経て生じる構造に関する実験的な知見は少ない。すなわち、複雑な流れ場での解析結果を検証するためのデータは十分ではないと言える。その流れ場の一つである平面急縮小または急拡大流れ場は、平板の成形加工において多く生じる。そこでは、平面流れのため上下平面間で強いせん断流れが生じ、また、平面内の伸張流れも生じるため複合的な流れ場が発生している。このような、実際の流れ場における高分子の流動およびその構造変化を知ることが、解析的アプローチへの検証データとして有意義であるとともに、実験的にも成形時の高分子挙動に関するデータベースとしても貢献できると考えられる。

そこで本研究では、微小な平面急縮小流れにおける高分子流体の流れ場とその配向構造の変化を、速度分布の測定および流体の流動複屈折と配向角を測定することで明らかにすることを目的とする。そして、両者の相関を比較することにより、高分子の変形過程の解明を試みた。

* 原稿受付 平成 25 年 7 月 4 日

^{*1} 正員, 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 番地)^{*2} 正員, 愛媛大学 工学部 機械工学科 (〒 790-8577 松山市文京町 3)^{*3} 正員, 新潟大学 工学部 機械システム工学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地)

Email: f13k002a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置のシステム構成および本実験で用いた流路の概略を示す。光源は He-Ne レーザー (JDS Uniphase 社製, 出力 5 mW, ビーム径 0.81 mm, 波長 632.8 nm) を用い, 流動中の試料流体の複屈折および配向角を測定した。レーザー光は, 回転半波長板方式⁽²⁾を採用した PSG(Polarization State Generator) を通過することで偏光面が回転する直線偏光となり, 正立型顕微鏡 (オリンパス社製, BX51) に取り付けられた 20 倍の対物レンズで集光される。集光位置でのビーム直径は約 $6\text{ }\mu\text{m}$ であり, これによって, 微小流れ場での測定を可能とした⁽¹⁾。集光された光が測定領域を通過した後, 同じ仕様の対物レンズによりビーム径が拡大され平行光となる。その後, PSA(Polarization State Analyzer) を通過し, ディテクターによって光の強度が検出される。得られた情報を, オプティカルアナライザー (ジャパンハイテック社製, OAS Ver.4.2) によって解析した。光学特性の解析に関する詳細は文献⁽³⁾を参照のこと。

図 1(b) および (c) に示すように, 本実験で使用した流路はアクリルのスペーサーをガラス板 (40 mm $\times$ 80 mm, 厚さ 1.1 mm) で挟んで構成された, 矩形断面の急縮小流路である。流量は, シリンジポンプ (古江サイエンス社製, JP-H1) を用いて調整し, 急縮小部上流における平均せん断速度 $\dot{\gamma}$ が 1 s^{-1} となるようにした。平均せん断速度は, 上流部における平均流速 U_m を流路厚さの半分の長さ H_3 で無次元化したものと定義した。

速度分布計測に関しては, 第 3 章で述べる試料流体を流動させ, 高感度 CCD カメラで粒子の運動を撮影し, 動画を PC で記録した。得られた動画より, トレーサー粒子を追跡することで, xy 面の流速分布を求めることができる。本研究では, 流路厚さの中心面 ($z=0$) における速度分布を測定した。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup (a) and geometry of test channel : top view (b) and cross section A-A in the depth direction (c).

3. 試料流体

本研究では試料流体として, キサンタンガム (三栄源エフ・エフ・アイ社製) をイオン交換水に溶解させた高分子水溶液 (濃度は 0.5 wt%) を用いた。また, 速度分布測定用としてキサンタンガム水溶液にトレーサー粒子として直径 $40\text{ }\mu\text{m}$ のプラスチック粒子を少量混入させた流体も作成した。

コーンプレート型レオメータを用いて試料流体の定常せん断粘度特性を測定した結果を図 2 に示す。この図より, キサンタンガム水溶液は強い shear-thinning 性を有する流体であることがわかる。

4. 実験結果および考察

4.1 速度分布

本節では, 縮小比 4 : 1 の縮小部を有する流路を流動するキサンタンガム水溶液の流路厚さ中心面 ($z=0$) における速度分布の結果について述べる。キサンタンガム水溶液の速度分布の測定結果について述べる。その結果を図 3 に示す。本報では同図中に示す A~D の位置で測定した速度分布を用いて検討する。図 3(a) は流れ方向の速度分

Fig. 2 Shear viscosity of test fluid.

Fig. 3 Velocity profiles of xanthan gum 0.5 wt% at the shear rate of 1 s^{-1} .

布を表している。横軸には各位置における流れ方向の速度成分 u を急縮小部上流での平均流速 U_m で無次元化した u/U_m をとり、縦軸に流路幅方向の座標 y を急縮小部上流の流路幅の半分の長さ H_1 で無次元化した y/H_1 をとっている。図 3(b) には、速度ベクトルを示している。縦軸は図 3(a) と同じである。

図 3 の A の位置における結果は、上流の流れ場が十分に発達した位置での速度分布と考えられる。また、図 3(b) から、流体粒子は流れ方向に沿って流動していることがわかる。図 3 より、その後 B～D と急縮小部に近づくにつれて、流路中心線付近の流速が大きくなっていることから、この領域では正の伸張流れが生じていることがわかる。一方、図 3 より両壁面 ($y/H_1 = \pm 1$) 付近では、急縮小部に近づくにつれて速度が小さくなっていることがわかる。これは、急縮小角部の壁面による影響によって減速したものであり、明確な渦領域はないことがわかる。

4.2 複屈折および配向角

第 2 章で述べた装置を用いて流路幅方向 (図 1(b) 中の y 方向) の流動複屈折および配向角を測定した。得られた複屈折および配向角は配向楕円を用いてまとめた。結果を図 4 に示す。配向楕円において、扁平度は各測定位置における複屈折の値を本研究で測定した最も大きい複屈折の値 (位置は、急縮小部の流路中心) から規格化したもので算出し、楕円の長軸方向は測定した配向角を示す。なお、本研究で得られた測定値は、レーザー光が透過した領域 (流路厚さ方向) の平均値である。

図 4 で A の状態は、流れが十分に発達し、分子の状態も平衡状態になった位置での測定結果と考えられる。この位置の複屈折の測定結果は、伸張の効果は加えられておらず、流路厚さ方向の両壁面で生じるせん断によって配

Fig. 4 Distribution of birefringence and orientation angle of xanthan gum 0.5 wt% at the shear rate of 1 s^{-1} .

向した高分子の寄与が大きく影響していると考えられる。また、速度ベクトルの結果と比較すると、流路中心線 ($y/H_1 = 0$) 付近では、分子の平均配向方向と速度ベクトルがよく一致しているが、側壁面 ($y/H_1 = 1$) 付近ではわずかながら、分子は流路中心線方向に平均的に配向しており速度ベクトルと一致しないことがわかる。これは側壁面付近で生じる速度こう配によって生じるせん断が原因であると考えられる。

その後、図4でB～Eへと急縮小部に近づくにつれて、流路中心線 (y/H_1) 付近で複屈折の値が急激に大きくなっていることがわかる。これは、急縮小部付近で生じる正の伸張流れによって分子が流れ方向に強く引き伸ばされ、異方性が大きくなったためであると考えられる。急縮小部角部においては4.1節で述べたように減速流れが生じていることから、分子の平均的な配向度が小さくなったと考えられる。

以上より、強い正の伸張流れ場が生じる流路中心線付近では、流路厚さの中心面 ($z = 0$) における速度ベクトルと分子の平均配向方向が概ね一致することが明らかとなった。また、急縮小部付近における分子の平均的な配向度および配向方向は、流路幅方向において大きく異なることが明らかとなった。しかしながら、流路中心線付近における流れ場において、流動に伴う複屈折の増加に対するせん断と伸張の寄与の程度は明らかではなく、今後の課題である。

5. 結 言

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1. 流路幅方向における中心線付近で、複屈折の値が急縮小部に近づくにつれて大きな値を示した。これは、正の伸張流れによって高分子鎖が流れ方向に強く引き伸ばされ異方性が大きくなったためだと考えられる。
2. 急縮小部付近で生じる強い正の伸張流れ場では、速度ベクトルと分子の平均配向方向が概ね一致することが明らかとなった。しかしながら、側壁面に近い領域では、両壁面付近において速度ベクトルと分子の平均配向方向は一致しないことが明らかとなった。

文 献

- (1) 保田和則, 中村洋祐, 村上玄明, 千葉訓司, “高分子水溶液の微小円柱まわりの流れ中における流動複屈折分布”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 753 (2009), pp. 937–944.
- (2) Fuller, G.G., and Mikkelsen, K.J., “Optical Rheometry using a Rotary Polarization Modulator”, *Transactions of The SOR, Journal of Rheology*, Vol. 33, No. 5 (1989), pp. 761–769.
- (3) Fuller, G.G., “Optical Rheometry of Complex Fluids”, Oxford University Press(1995).