急拡大流路における高分子水溶液の流動誘起構造変化

Flow-induced structure change of aqueous solution of polymer in an abrupt expansion channel

○学 佐藤 大祐 (愛媛大院), 正 保田 和則 (愛媛大)

正 岩本 幸治 (愛媛大), 正 十河 基介 (愛媛大)

Taisuke SATO, Ehime University, 3 Bunkyocho, Matsuyama, Ehime, 790-8577 Japan

Kazunori YASUDA, Yukiharu IWAMOTO, Motosuke SOGO, Ehime University

Key Words: Flow-induced birefringence, Viscoelastic fluid, Non-Newtonian fluid, Abrupt expansion

1. はじめに

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いる. 特に, マイクロスケールという超微細・微小成形加工技術の一つであるマイクロモルディングに関して様々な研究開発が進められている. このような背景から高分子流体の流れの解析が, プラスチック成形加工に関連して, 早くから行われている. しかしながら, 特に微小流れ場での流動による高分子流体の内部構造変化に関しては研究例が少なく⁽¹⁾, 不明な点が数多く残っている.

これらの点から, 微小な流れ場での構造変化を明らかにすることは, 上述した微小成形加工技術の一つであるマイクロモルディングなどの分野の発展に寄与できると考えられる. そこで本研究では, 微小な平面流れにおける急拡大流路での高分子流体の配向構造を, 流体の流動複屈折および配向角をレーザーで測定することで明らかにすることを目的とする.

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. 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 (エムティーカンパニー社製, OAM 2ch) によって解析した.

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で挟んで構成された, 矩形断面の急拡大流路である. 流路の拡大比は 1:4 (1 mm:4 mm) であり, 厚みは 1 mm である. 流量は, シリンジポンプを用いて調整し, 急拡大部上流における平均せん断速度が 4 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速度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. また, 実験は液温が $25 \pm 1^\circ\text{C}$ で行った.

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

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).

Fig. 2 Illustration of measurement position.

フ・エフ・アイ社製, サンエース C) をイオン交換水に溶解させた高分子水溶液を用いた. 水溶液の濃度は 0.5 wt% を用いた.

4. 実験結果および考察

第2章で述べた装置を用いて測定した流路幅方向 (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. このとき図2に示すように流路内を6つの領域に分割し, 測定結果を整理した. 測定結果を図3に示す. 図3の (a) においては, 横軸に複屈折の絶対値 $|\Delta n|$ をとり, 縦軸に流路幅方向の座標を急拡大部下流の流路幅の半分の長さで無次元化した y/H_2 をとった. 複屈折の正負は高分子の種類によって異なり, 本研究で用いた試料流体は負の値であるので, この絶対値が大きいほど複屈折が大きいことを示している. よって本研究では複屈折が大きいと称する場合, 複屈折の絶対値が大きい

Fig. 3 Distribution of birefringence and orientation angle of xanthan gum 0.5 wt% at the shear rate of 4 s^{-1} .

Fig. 4 Distribution of birefringence on the distance x along the flow direction at the shear rate of 4 s^{-1} .

ことを意味する。ここで複屈折の値は、その値が大きいほど分子がある方向に強く配向していることを意味し、0に近いほど分子がランダム配向に近い状態であることを意味する。また、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3の(b)においては、表示してある矢印は、分子の平均配向方向を示しており、矢印の長さは意味を持たない。また

図中の英字記号(A~F)は、図2中で示す位置A~Fに対応している。

図3のAの領域は、流れが十分に発達した位置での測定結果を示している。これより、発達した流れ場では、図3(b)より分子はほぼ流れ方向($\theta = 0^\circ$)に平均的に配向し、図3(a)より複屈折の値は壁面付近でわずかに大きくなることとわかる。

続いて、流体が急拡大を通過した後、複屈折の値は流路幅方向(y 方向)の中心線付近において急激に小さくなっていることがわかる(図3(a)のC領域)。その後、流路中心線付近における複屈折の値がわずかながら大きくなり(D領域)、再び複屈折の値が0に近い値を示していることがわかる(E領域)。

ここで、このAからE領域での複屈折の変化をより詳細に測定した、流路中心線上($y = 0$)の流れ方向(図1(b)中の x 方向)における複屈折の分布を図4に示す。この図では、横軸に流路流れ方向の座標 x をとり、縦軸には複屈折の絶対値をとった。図4より、上で述べたように複屈折の値が急拡大後、急激に減少し、再びわずかながら増加していることがわかる。

このことに関して、まず急拡大による減速流れによって流体の内部構造が一度流れ方向に圧縮され、この圧縮過程において分子がランダム配向に近い状態になり($x = 0.8 \text{ mm}$)、複屈折の値が急激に減少したものと考えられる。その後さらに圧縮が続き分子が流れ方向に対して直交する方向へと配向したため($x = 1.2 \text{ mm}$)、複屈折の値が増加したものと考えられる。

次に、図3のF領域からわかるように、配向角に関しては流路中心線付近での分子は再び流れ方向へと配向しており、複屈折に関しては、図3(a)のA領域における複屈折分布と似たような結果を示している。これより、本研究で測定した最下流部(F領域)では、急拡大による影響が消滅し、流体の内部構造が平行平板における発達した状態に近い状態(図3のA領域)へと戻っていると考えられる。また、急拡大後における両壁面付近($y/H_2 = \pm 1$)の複屈折および配向角の変化は図3よりあまり見受けられない。これらの結果から、遅い流れでの急拡大による流体の平均的な内部構造の変化は、主に流路幅方向の中心線付近で生じることが明らかになった。

5. 結言

高分子水溶液の0.5 wt% キサンタンガム水溶液を用い、拡大比1:4の急拡大を有する流れ中において、流動複屈折および配向角の分布を測定した。結論を以下にまとめる。

- (1) 急拡大後、流路中心線付近において、複屈折の値は急激に減少し、分子は流れ方向に対してほぼ垂直方向に配向した。これは急拡大部で生じる減速流れによるものと考えられる。
- (2) 急拡大後における両壁面付近の複屈折および配向角の変化は見受けられなかった。これより、遅い流れにおける急拡大による流体の内部構造の変化は、主に流路幅方向の中心線付近で生じることが明らかになった。

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”, *Journal of Rheology*, Vol. 33, No. 5 (1989), pp. 761-769.