

## 粘弾性シミュレーションによる共押出ダイ内合流部における流動の解析

Viscoelastic simulations of flow at the confluence of a coextrusion die  
 (山形大院) ○ (正) 武田敬子, (正) サティシュクマル スクマラン,  
 (正) 杉本昌隆

Experiments indicate that interfacial instabilities can occur even during the coextrusion of the same polymer if the polymer exhibits strain hardening. However, the nature of the instability and the factors governing its onset remain poorly understood. We evaluated the effects of strain hardening during bilayer coextrusion using three-dimensional finite element method flow simulations. We used the multimode Phan Thien-Tanner constitutive equation to model the viscoelastic behavior. As expecting elongational flow to be especially important near the confluence of the die, we investigated the flow kinematics and the stress components both at the die confluence and further downstream. Just downstream from the confluence point, the velocity distribution appears to display a sharp, nearly discontinuous change near the interface only in the case of the strain hardening polymer.

Keywords: coextrusion, interfacial instability, strain hardening, viscoelastic flow simulation

## 1. 緒言

多層フィルムは層毎に機能性が付与できるため、医療品、食品包装等、様々な分野で使用されている。代表的な作製法に、複数の異なる樹脂を溶かして金型(ダイ)の中で合流させ押出して作製する共押出法がある。その際、生産性を上げようとすると層界面に製品物性に影響する荒れが起こることがある<sup>1,2)</sup>。

Martyn ら<sup>3)</sup>は、同一材料を使用しても界面の波状荒れが起こる事を報告した。流動複雑折による応力場測定と粘弾性モデルでのシミュレーションで解析した結果から、主層と副層の平均第一法線応力差の差で波状荒れ発生の予測が可能とした。合流部での高分子鎖の伸長と配向が重要であるとも述べているが、伸長速度分布等、不明な点が未だ多い。

ひずみ硬化性を持つ低密度ポリエチレン(LDPE)を流量比 1:8、二層共押出した実験<sup>4)</sup>で波状荒れが発生したが、ひずみ硬化性を持たない直鎖低密度ポリエチレンの場合、荒れは発生しなかった。

本研究ではこの実験結果を基に、同種二層共押出ダイ内合流部での 3 次元有限要素法による粘弾性流動解析を行った。実験結果との比較により、樹脂の非線形粘弾性がダイ内合流部の流動に与える影響を検討した。

## 2. モデル材料

ひずみ硬化性有りは実験と同じ LDPE (JPE 製 LF128 MFR=0.25g/10 min)を使用した。せん断粘度を同じにするため、ひずみ硬化性無しは後述のモデルの非線形パラメータで調整したものでシミュレーションを行った。

## 3. 流動解析

有限要素法流体解析ソフトウェア Ansys Polyflow®を使用し、定常流れ、非圧縮性流体として、それぞれひずみ硬化有り、無しの同種二層共押出ダイ内の 3 次元有限要素法による粘弾性流動解析を行った。高分子溶融体は、高粘性のため、慣性力、重力は無視できる。実験用共押出フラットダイ(幅 16 mm, 長さ 41 mm, 厚み 1.6 mm)を模した 3 次元形状を作成、計算負荷の低減のため、中央の対称性により幅を 1/2 とした。有限要素法を用いて運動方程式、連続の式、粘弾性の式を分離、圧力、余剰応力テンソル、速度を計算した。流路内での二層の流体の界面位置は Arbitrary Lagrangian-Eulerian 法により求めた。構成方程式は高分子溶融体の粘弾性特性を表すため、Phan-Thien Tanner (PTT) モデル<sup>5)</sup> (式 1) を

---

Keiko Takeda\*, Sathish K. Sukumaran,  
 Masataka Sugimoto  
 Graduate School of Organic Materials Science,  
 Yamagata University, 4-3-16, Jonan Yonezawa,  
 992-8510, Japan  
 Tel: 0238-26-3055, Fax: 0238-26-3411  
 E-mail: kei@yz.yamagata-u.ac.jp

使用し非線形パラメータ $\varepsilon$ の調整によりひずみ硬化性無しに設定したものと比較した。

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta}\text{tr}(\tau)\right]\tau + \lambda\left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right)\nabla\tau + \frac{\xi}{2}\Delta\tau\right] = 2\eta D \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ は余剰応力テンソル、 $\lambda$ は緩和時間、 $\eta$ は粘度、 $D$ は速度勾配テンソル、 $\nabla$ と $\Delta$ は Upper-convected、Lower-convected 時間微分、 $\xi$ と $\varepsilon$ は、それぞれせん断と伸長を制御する非線形パラメータを示す。図1に実験データ<sup>5)</sup>(LDPE 200°Cでのせん断粘度、貯蔵弾性率、損失弾性率の周波数依存性、一軸伸長定常粘度)(シンボル)とシミュレーション結果(線)を示す。このフィッティングにより5モードのPTTパラメータを決定した。

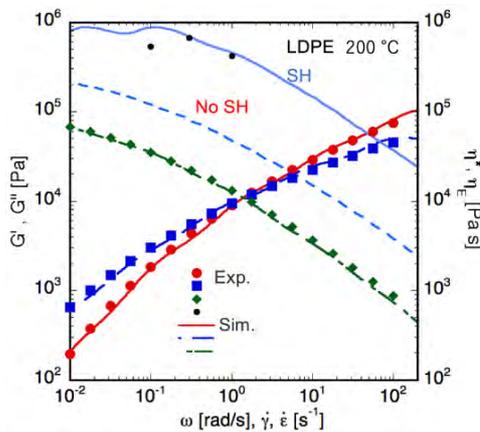


Figure 1 The fit of  $G'$ ,  $G''$ , shear viscosity  $\eta$  and steady uniaxial viscosities of LDPE at 200 °C. The symbols and the lines represent the experiments and the PTT model fitting respectively.

### 3. 数値解析結果

第一法線応力差( $N_1$ )は式(2)に従い求めた。

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} \quad (2)$$

$\sigma$ は応力テンソル、1は流線に対して接線方向、2は法線方向を表す。図2に流量比1:8、ダイ中央界面、合流部から流動(X)方向へ2 mm までの $N_1$ とせん断速度の解析結果を示す。ひずみ硬化性有り無しとも合流直後、 $N_1$ は最大値をとったが、約4倍の差、せん断速度は約2倍の差があった。また、合流部よりわずかに進んだ箇所でも最大値を取る粘弾性流体特有の挙動を示した。

図3にダイ中央合流直後の界面と合流部から流動(X)方向へ0.3 mmの箇所のひずみ硬化性有り、無しの流れを示す。ひずみ硬化性有りでは、

主層と副層で流速が不連続になる箇所が観察された。ひずみ硬化性有るために主層の高分子鎖が副層を押し上げたときに、副層の高分子鎖が抵抗を示すためではないかと考えられる。一方、ひずみ硬化性無しではこの現象は見られなかった。

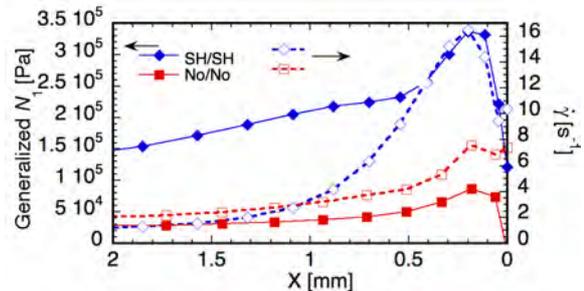


Figure 2 Generalized first normal stress difference and shear rate of the PTT model along with the interface in the merging area in the middle of the die. SH denotes strain hardening; No denotes no strain hardening.

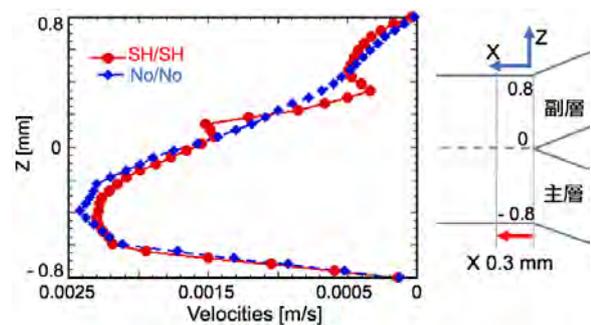


Figure 3 Velocities of the PTT model at 3 mm from the merging point in the middle of the die. SH denotes strain hardening; No denotes no strain hardening.

### 4. 結言

同種二層共押出のダイ内合流部での3D有限要素法による粘弾性流動解析を行った。ひずみ硬化性有りの樹脂では、せん断速度がひずみ硬化性無しより、高速になり、第一法線応力差も高い値を示した。さらに、合流直後、界面近くの主層と副層の流速が不連続になることがわかった。界面荒れの要因となっていると考えられる。

### 参考文献

- 1) C. Tzoganakis and J. Perdikoulis: *Polym. Eng. Sci.*, **40** (5), 1056 (2000)
- 2) M. Zatloukal et al.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **98**, 153 (2005)
- 3) M. T. Martyn et al.: *J Non-Newt Fluid Mech*, **156**, 150 (2009)
- 4) 見川尚輝: 山形大学工学部学位論文 (2017)
- 5) N. Phan-Thien and R.I. Tanner: *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **2**, 353 (1977)