

# 液晶プラスチック成型を想定したべき乗則流体の縮小流れの数値解析

## Numerical Analysis of Reduced Flow of Power-Law Fluids for Liquid Crystal Plastic Molding Applications

システム工学群

流体工学研究室 高橋 然

### 1. 緒言

高分子液晶プラスチック(LCP)は、成形時の流動によって生じる分子配向が成形物の機械的特性に大きく影響する材料である。成形過程において分子は流れの影響を強く受け、その配向状態が成形過程で不均一に分布することが知られている。特に、壁面近傍では高いせん断速度が作用するため分子が流れ方向に強く配向しやすく、一方で中心部ではせん断速度が比較的低く、分子配向が小さい領域が形成される。このような違いにより、図1に示すような壁面近傍と中心部で分子配向状態が異なるスキン-コア構造<sup>(1)</sup>が形成されることが知られている。このスキン-コア構造は成形物の強度特性に影響を及ぼす重要な要因である。

一方、高分子液晶プラスチックの成形過程にはせん断流に加えて伸長流も存在し、特にテーパ角を有する縮小流路では、流路断面の縮小に伴って流体が加速され、流れ方向に伸長流が発生する。このような伸長流は、せん断流とは異なる配向メカニズムを有しており、低配向状態にある分子の配向を改善することが報告されている<sup>(2)</sup>。そのため、縮小流路における伸長流を利用することで、成形品内部の分子配向状態を制御できる可能性がある。

本研究では、液晶プラスチック成型を想定した縮小流れを対象とし、べき乗則流体モデルを用いた数値解析により、圧力差、特に伸長流の違いが流動構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

### 2. 解析モデルおよび数値計算手法

今回解析したモデルの寸法を図1に示す。

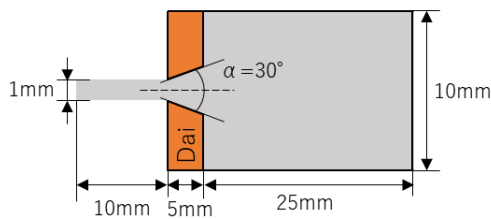


Fig.1 Schematic of the computational model

流れは、上流側の広い断面から下流側の狭い断面へ向かう。なお、テーパ角 $\alpha$ が $0^\circ$ の場合にはテーパ部を持たない直線流路とし、成形物が流路外へ流出する直線部の長さを15mmとした。

本研究では、非圧縮性・定常・軸対称流れを仮定している。このとき、流れ場は連続の式および運動量保存式によって支配される。

まず、連続の式は次式で与えられる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトルである。

次に、運動量保存式は次式で表される。

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$\rho$ は密度、 $p$ は圧力、 $\mathbf{t}$ はべき乗則流体モデルに基づく応力テンソルである。

Weiらによる粘度測定結果<sup>(3)</sup>から以下の式により高分子液晶ベクトラ A950 はべき乗則流体に近似できる。単純せん断流におけるせん断応力 $\tau$ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係は

$$\tau = k|\dot{\gamma}|^{n-1}\dot{\gamma} \quad (3)$$

で表せられる。なお、 $k$ は粘性係数、 $n$ はべき指数である。

本研究では、縮小流れにおける伸長流の評価指標として伸長速度を用いる。

伸長速度は変形速度テンソル

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \quad (4)$$

に基づいて定義され、次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{u} \quad (5)$$

なお、 $\mathbf{u}$ は流れ方向の単位ベクトルである。

また、せん断速度は以下の式で与えられる。

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}} \quad (6)$$

べき乗則流体における粘度は、せん断速度依存の見かけ粘度を考慮した

$$\mu_{app} = \kappa\dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

で与えられる。

本研究における数値流動解析は、既往研究<sup>[2]</sup>を参考に設定した計算条件の下で実施した。流入条件には一定流量を与え、実際の成形過程を想定して一様流とした。解析対象は軸対称縮小流路とし、上流側に直線流路、下流側にテーパ流路を有する形状を用いた。テーパ部の形状はテーパ角を解析パラメータとし、複数条件について解析を行った。なお、テーパ角が $0^\circ$ の場合にはテーパ部を持たない直線流路とした。

流体の密度はすべての解析条件で共通とした。ニュートン流体モデルでは動粘度を一定とし、べき乗則流体モデルの最大動粘度を比較用の基準条件として用いた。

べき乗則流体モデルでは、各温度条件に対応する粘性係数およびべき指数を解析パラメータとした。解析に用いた流量 $Q$ 、テーパ角 $\alpha$ 、密度 $\rho$ 、設定した最大動粘度 $\nu_{max}$ を表1に示す。

Flow rate	$Q = 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
Taper angle	$\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
Density	$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$
maximum kinematic viscosity	$\nu_{max} = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$

Table 1 Calculation Conditions

べき乗則流体モデルでは、各温度における粘性係数 $k$ およびべき指数 $n$ を解析パラメータとし表2に示す4条件について解析を行った。

Temperature T (°C)	Consistency Index k	Power-law Index n
290	3554.166	0.487031
300	1439.993	0.522285
310	1283.825	0.50804
320	1028.875	0.511569

Table 2 Material Parameters of the Power-Law Fluid

これらの流動場は、流体解析ソフトである OpenFOAM<sup>[4]</sup>を用いて数値解析を行った。

なお、計算は定常状態に到達した時点で終了した。

### 3. 結果および考察

本研究では、縮小流路内のせん断速度、伸長速度着目し流路形状、テーパ角の違いが流動に及ぼす影響について検討した。

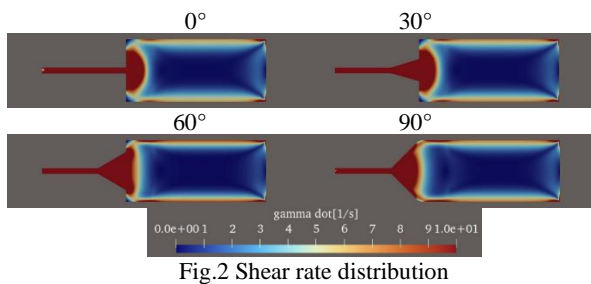


Fig.2 Shear rate distribution

いずれのテーパ角においても、せん断速度は壁面近傍で大きく、中心軸付近では小さい分布を示した。

また、テーパ開始部の角部付近では顕著なせん断速度は確認されなかった。

流れ方向に沿って見ると、せん断速度は縮小部に近づくにつれて増加する傾向を示し、縮小部通過後も壁面近傍で比較的大きな値を示した。

以上より、せん断速度は主として壁面近傍に分布し、中心軸付近では比較的小さい値を示すことが確認された。

図3に解析に用いた座標系を示す。

図4に各テーパ角、温度、流体における伸長速度分布の拡大図を示す。

なお、図3に示した座標系に基づき、 $z=0\sim 0.03\text{m}$ の範囲を対象としている。

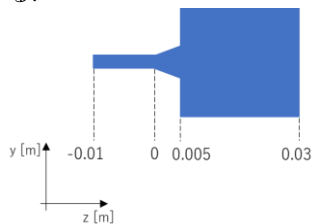


Fig.3 Coordinate system of the computational model

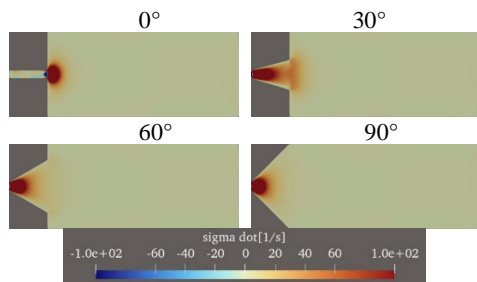


Fig.4 Elongational rate distribution at 290 °C

いずれのテーパ角でも、伸長速度は縮小部に分布し、通過直後に負の値を示した。30°では最も上流側から分布が見られ、

60°がこれに続いた。一方、急縮小および大きなテーパ角では縮小部近傍に集中した。以上より、伸長速度の分布位置はテーパ角に依存することが示された。図3の座標系に基づき、軸方向位置  $z$  と中心軸近傍の伸長速度の関係を図5に示す。

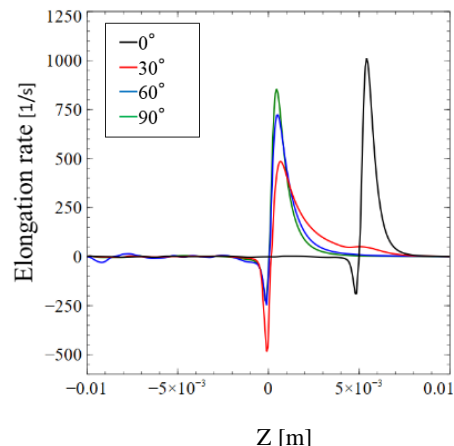


Fig.5 Axial distribution of elongational rate near the centerline

中心軸上の伸長速度に着目すると、テーパ角0°の急縮小条件において最大伸長速度が最も大きい値を示した。一方、テーパ角30°では最大伸長速度が最も小さくなった。

また、縮小部通過後に生じる負の伸長速度については、テーパ角30°の条件で最も大きな圧縮が確認された。

さらに、テーパ角が30°を超えると、テーパ角の増加に伴い最大伸長速度は再び増加する傾向を示した。ダイ出口部付近では、テーパ角90°の条件で最大伸長速度が最も大きく、圧縮成分は最も小さい値を示した。

以上より、中心軸上の伸長速度はテーパ角に対して単調には変化せず、中間的な角度で異なる挙動を示すことが確認された。

### 4. 結言

本解析から、縮小流れ場における流動特性はテーパ角に強く依存することが明らかとなった。せん断速度は主として壁面近傍で大きく、中心軸付近では小さい分布を示し、縮小部に近づくにつれて増加する傾向が確認された。一方、伸長速度は主として縮小部において発生し、その分布位置および大きさはテーパ角の変化に伴って顕著に変化した。特に、中心軸上の最大伸長速度はテーパ角に対して単調には変化せず、中間的な角度で特有の挙動を示した。これらの結果は、流路形状が、縮小流れにおけるせん断速度および伸長速度を決定する重要な要因であることを示している。

### 文献

- (1) Nguyen, T. N., Geiger, K., & Walther, T., *Flow behavior of LCP melts and its influence on morphology and mechanical properties of injection molded parts*, Polymer Engineering & Science, vol.40, no.7, 2000.
- (2) 辻 知宏, 前河 俊大, 楠川 量啓, せん断流と伸長流が高分子液晶成形物の強度に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 877, 2019.
- (3) Wei, G. and Kiss, G. Rheological behavior of thermotropic liquid crystalline polymers *Rheologica Acta*, Vol.35, No.6 (1996), pp.523–536.
- (4) OpenFOAM Foundation. (2026). OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox. <https://www.openfoam.com/>