

ブロー成形における高分子溶融体の流動シミュレーションに関する研究

福井大学 工学部 材料化学科

助手 田上秀一

(平成8年度奨励研究助成 AF-96035)

1. はじめに

ブロー成形ではパリソンと呼ばれるチューブ状の押出物の形状が成形品の品質に大きく影響する。近年、形状の複雑化に対応すべくパリソンの肉厚をコントロールする技術開発が進められている。

本研究では、ブロー成形におけるCAE研究としてパリソンコントロール過程で見られる流路を通る定常状態の二重管ダイスウェル計算を行い、押出物形状に対する流路のギャップ開度の影響やダイ形状の影響について検討し、金型設計や操作条件の設定に関する知見を得ることを目的とする。

2. 支配方程式及び計算方法

等温定常の非圧縮性粘弾性流体の定常流れを考え、重力項と慣性項は無視するとした。この仮定のもとで連続の式、運動方程式、構成方程式を連立させて、速度、圧力、応力を変数として一度に解く混合法を用いて計算を行った。構成方程式には次式で示す単一モードのGiesekusモデルを用いた。

$$\tau = 2\eta_0 s \mathbf{D} + \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} + \lambda \overset{\nabla}{\mathbf{E}} + \frac{\alpha}{G} \mathbf{E}^2 = 2\eta_0(1-s) \mathbf{D} \quad (2)$$

ここで、 η_0 は零せん断粘度、 \mathbf{D} は変形速度テンソル、 λ は緩和時間、 G は緩和弾性率、 α 、 s は物質定数、 $\overset{\nabla}{\mathbf{E}}$ はupper-convected時間微分である。支配方程式の離散化には、高弾性領域の計算に効果のある流線上流型有限要素法¹⁾と不足緩和法²⁾を用いた。

3. 流路形状

本研究で検討したダイ形状をFig.1に示す。流

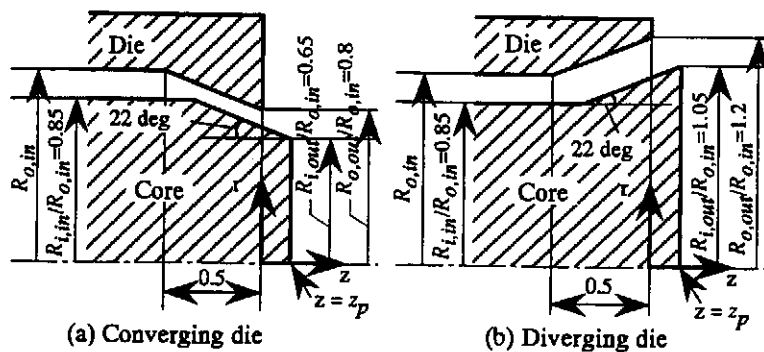


Fig.1 Die geometries and notations for the calculation. All values in this figure are divided by $z_p/R_{o,in}$.

路の拡大角および縮小角は約22degである。ギャップ開度を表す指標として、本研究ではコア先端の z 座標を z_p とし、コアを $z_p/R_{o,in} = -0.15 \sim 0.15$ の範囲内で0.05おきに移動させた流路形状を考えた。コア先端の z 座標とギャップ開度との関係をFig.2に示す。 $z_p/R_{o,in} = 0$ では流路のギャップ幅が一定の場合である。その状態から、縮小ダイでは $z_p/R_{o,in} > 0$ で縮小部におけるギャップ開度が狭くなり、 $z_p/R_{o,in} < 0$ では広がる。拡大ダイではその逆で、 $z_p/R_{o,in} > 0$ で拡大部におけるギャップ開度が広がり、 $z_p/R_{o,in} < 0$ では狭くなる。

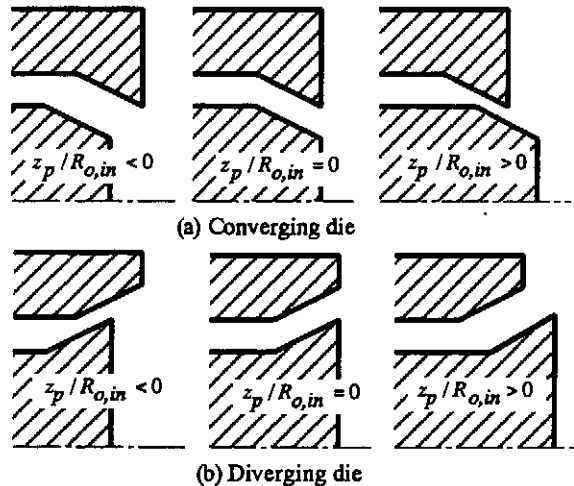


Fig.2 Illustration of die geometries at various values of $z_p/R_{o,in}$.

4. 結果および考察

4. 1 実験結果との比較

まず、流路の角度のないストレートな二重管ダイ(ダイ出口における流路内径/外径比 $\kappa = 0.75$)を通るダイスウェルについて実験結果³⁾との比較を行った。Fig.3は押出物の形状を表す指標である外径スウェル χ_{R_o} 、肉厚スウェル χ_{R_i} と We (ワイゼンベルグ数)との関係を示す。それぞれ次式により定義される。

$$\chi_{R_o} = \frac{R_{fo}}{R_{o,out}} \quad (3)$$

$$\chi_T = \frac{R_{fo} - R_{fi}}{R_{o,out} - R_{i,out}} \quad (4)$$

$$We = 2 \lambda \langle u \rangle / (R_{o,in} - R_{i,in}) \quad (5)$$

ここで、 $\langle u \rangle$ は入口境界における平均流速、 R_{fo} 、

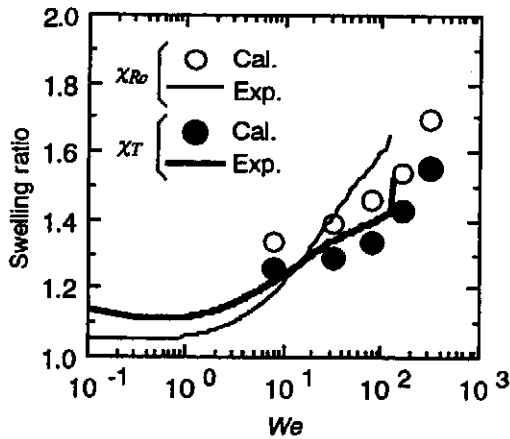


Fig.3 Comparison of Swelling ratios as a function of We in the annular extrudate swell through the straight die ($\kappa=0.75$) between the simulation results and the experimental data for the Giesekus model ($\alpha=0.5$, $s=1/9$).

R_{fi} はそれぞれ十分発達した領域での押出物の外径、内径を示す。ここで計算で用いた Giesekus モデルの物性定数 ($\alpha=0.5$, $s=1/9$) は実験で用いた HDPE のせん断流動特性より設定した。実験値と計算値はほぼ一致しており、本計算結果の妥当性が示された。

4. 2 押出物に及ぼすダイ内流路形状の影響

Fig.4 は $\alpha=0.5$, $s=1/9$ の流体について $z_p/R_{o,in} = -0.15, 0.0, 0.15$ の 3 種類の流路形状における押出物形状を示す。本研究では Fig.1 に示すように入口境界におけるダイ内径および外径は一定としているので、同一材料を用いたと仮定すれば We の増加は流量の増加に対応する。なお、拡大ダイの $z_p/R_{o,in} = -0.15$ における計算結果は得られなかった。コアがダイ内に入り込んだケース ($z_p/R_{o,in} = -0.15$) では、ダイ内の流路は流路方向に対し内側の壁が先になくなる。そのため、ダイ出口近傍での押出物の自由表面上の速度は内側が外側より大きくなり、押出物は外側へ移動しようとする寄与が大きくなる。従って、ギャップ開度が一定

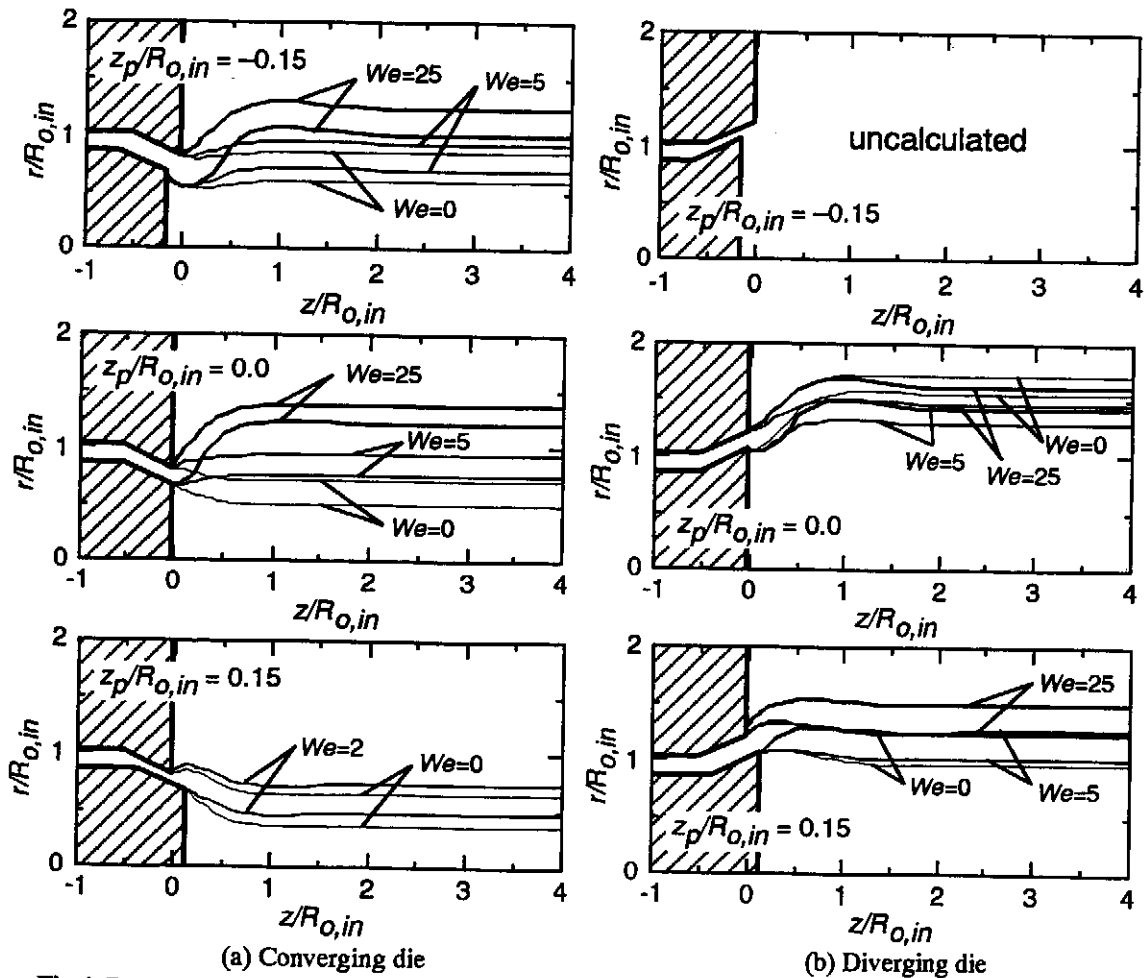


Fig.4 The calculated free surfaces of the annular extrudates through the die with various values of $z_p/R_{o,in}$ for the Giesekus model ($\alpha=0.5$, $s=1/9$).

の場合 ($z_p/R_{o,in}=0.0$) に比べ、押出物は外側へ膨らむ。逆にコアがダイ先端から突出したケース ($z_p/R_{o,in}=0.15$) では、ダイ内の流路は流路方向に対し外側の壁が先になくなるので、ダイ出口近傍での押出物の自由表面上の速度は外側が内側より大きくなり、押出物は内側へ移動しようとする寄与が大きくなる。従って、ギャップ開度が一定の場合に比べ、押出物の外径は小さくなる。押出物の We に対する変化は、拡大ダイでは拡大流れによりダイ内剪断流れで流体中に生じる弾性の寄与が緩和されるため We による変化が小さい。縮小ダイでは、 We の増加とともに押出物の外径は大きくなるが、縮小流れによりダイ内で生じる弾性の寄与が増すため、押出物形状の We に対する変化が拡大ダイの場合に比べ顕著になっている。

次に、押出物の形状を表す指標である外径スウェル x_{ro} 、肉厚スウェル x_r と We との関係について検討した。Fig.5 に結果を示す。

まず、縮小ダイについて検討する。 x_{ro} はいずれの流路においても We の増加とともに値は増加する。ギャップ開度を広げるケースでは、流路幅が広がるために流体中の弾性回復の寄与が緩和されるため、ギャップ開度が一定のケースに比べ We の増加に対するスウェル比の増加量が小さい。 x_r はギャップ開度を狭くするケースで We の変化に対するスウェル値の変化が大きい。 We の増加とともに $We < 1$ ではスウェル比が増加するが、それ以上の We では急激なスウェル比の減少を示している。ギャップ開度を狭くする操作は、流路幅が狭くなるので流路内の剪断速度が大きくなるのでダイ内において流体中の弾性の寄与が増大する。これが押出物の形状に大きく影響するため、安定した肉厚制御が行いにくくなると考えられる。ギャップ開度を広げるケースでは、 We の変化に対する肉厚の変化が小さく、安定した肉厚制御のことが推察される。

一方、拡大ダイでは、ギャップ開度一定の場合の x_{ro} は、 We の増加とともに一旦スウェル値が減少するが $We=10$ あたりから増加に転じる。ただし、縮小ダイの場合に比べ拡大流れにより押出物に対する弾性回復の緩和されているので全体的に We の変化に対するスウェル値の変化は小さい。 x_r は、ギャップ開度が一定の場合には We とともにスウェル値は増加するが、ギャップ開度を広げた場合には We が変化してもスウェル比はほぼ一定な値を示した。

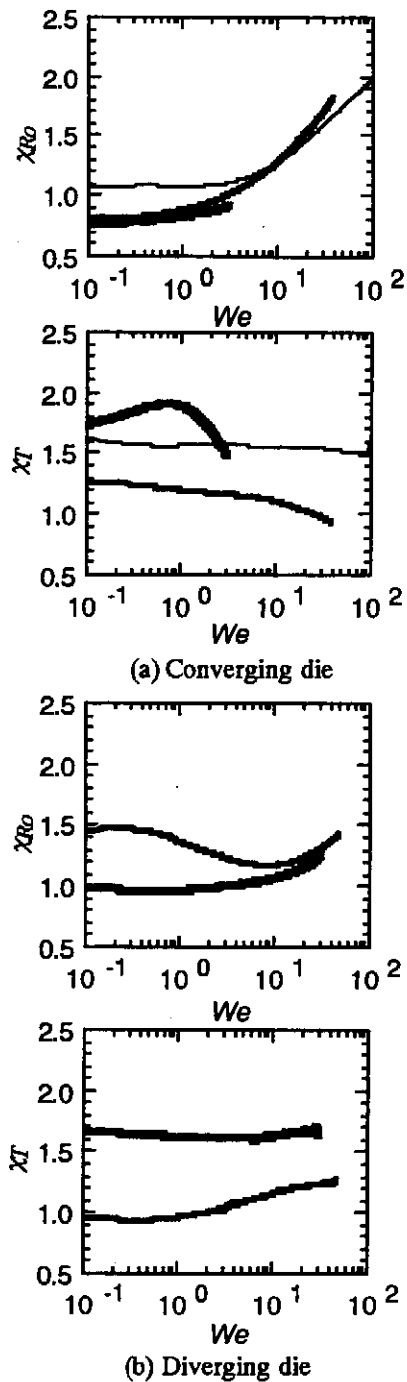


Fig.5 Swelling ratios as a function of We in the annular extrudate swell simulation through the dies with various values of $z_p/R_{o,in}$ for the Giesekus model ($\alpha=0.5$, $s=1/9$).

— : $z_p/R_{o,in} = -0.15$ — : $z_p/R_{o,in} = 0.0$
 — : $z_p/R_{o,in} = 0.15$

次に、スウェル比に対するギャップ開度の影響を検討するために、コア先端の座標 $z_p/R_{o,in}$ とスウェル比の関係を Fig.6 に示す。

まず、縮小ダイについて検討する。 x_{ro} は低い We でギャップ開度が大きくなるにつれて大きく

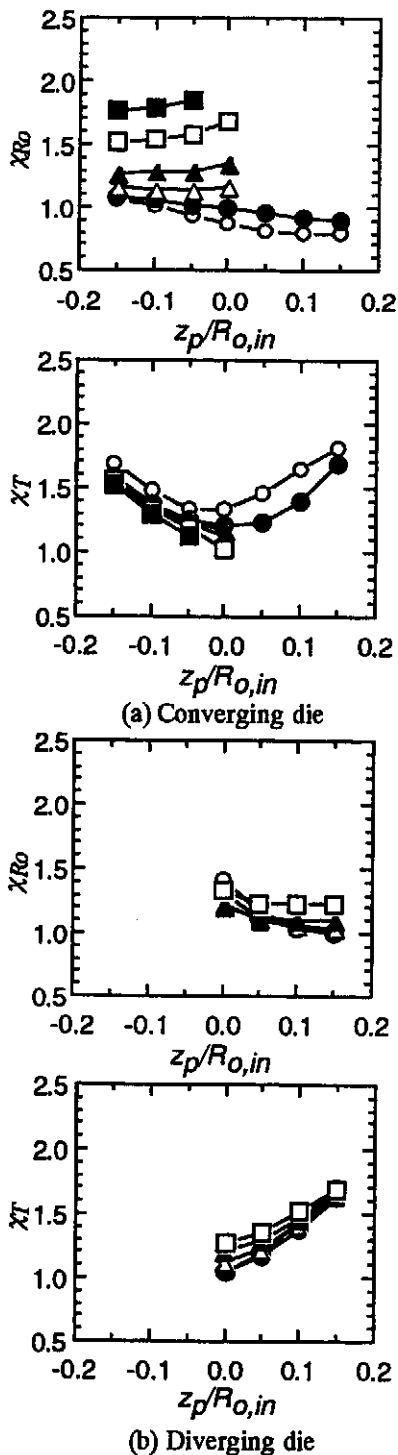


Fig.6 Swelling ratios as a function of $z_p/R_{o,in}$ in the annular extrudate swell simulation at various We for the Giesekus model ($\alpha=0.5$, $s=1/9$).

○ : $We=0$ ● : $We=2$
 △ : $We=5$ ▲ : $We=10$
 □ : $We=25$ ■ : $We=50$

なるが、 We が高い領域ではその傾向は逆になる。 x_r はギャップ開度が一定の場合 ($z_p/R_{o,in}=0$) が最も値が小さくなる。ギャップ開度が狭くなる場合では、ギャップ開度が狭くなるにつれ押出物の肉

厚が大きくなっており、ギャップ開度と肉厚の変化の傾向が一致していない。流路が狭くなることで増加した流体中の弾性の寄与が影響していると思われる。また Fig.4 で示すように、このケースでの x_r は We の変化に対して大きく変化することから、ギャップ開度を狭くする操作は、有用な肉厚制御の操作法とは判断しづらい。しかし、今回計算できた We の範囲は小さい ($We < 3.1$) ので、より現実的な検討を行うために高 We 領域の計算を実現させ、操作の有用性を再検討する必要がある。ギャップ開度を大きくした場合には、 We によらずギャップ開度が大きくなるにつれ肉厚も増大しており、ギャップ開度と変化の傾向と一致した肉厚を持つ押出物が得られる。

以上の傾向は拡大ダイのケースでも見られる。さらに、このケースではギャップ開度が大きくなるにつれ x_{Ro} が大きくなるが、流路が拡大する影響で弾性の寄与が緩和されるため We に対する変化量は小さい。

5. まとめ

- ①ギャップ開度を広げる操作は、ギャップ開度の変化の傾向と一致した肉厚をもつ押出物が得ることができ、有用な操作であると判断できる。
- ②ギャップ開度を狭くする操作は、得られた結果の範囲内では We の変化に対する押出物形状の変化が大きく、ギャップ開度と肉厚の変化の傾向が一致しないので、有用な操作とは判断しづらい。
- ③ダイ形状による押出物の影響は拡大ダイの場合が縮小ダイに比べて小さい。
- ④今後の課題として、流路形状を連続的に変化させた非定常計算の実現、円周方向の肉厚制御に関する計算手法の開発、などが挙げられる。

謝 辞

本研究の実施に当たり、ご支援いただいた財団法人天田金属加工機械技術振興財団に、心より厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Marchal, J. M. and Crochet, M. J. : *J. Non-newt. Fluid Mech.*, **26**, 77 (1986).
- 2) Tanoue, S., Kajiwara, T., Iemoto, Y. and Funatsu, K. : *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 409 (1998).
- 3) Orbey, N. and Dealy, J. M. : *Polym. Eng. Sci.*, **24**, 511 (1984).