

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

田上秀一*

1. はじめに ブロー成形では、パリソンとよばれるチューブ状の形状が成形品の品質に重要な影響を及ぼす。ブロー成形に関する様々な要求を満足させるために、パリソン形状のコントロール技術とパリソンコントロールプロセスにおける CAE 技術が様々な研究者により研究されている。パリソンコントロールプロセスの概要を図 1 に示す。図に示すように二重円筒状のダイのコア部分を上下させることによりダイ出口付近における流路幅が変化し、押出物の肉厚を変えることができる。

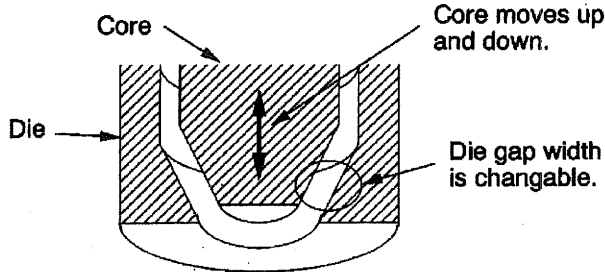


図 1 パリソンコントロールプロセスの概要

このプロセスはパリソン形成過程において連続的に行われているため、ダイレクトな解析を行うには非定常解析を行わなければならない。そのため、何らかの簡略化した解析モデルを利用しなければ、計算機上でこのプロセスを実現することは難しい^{1,2)}。ただ、パリソンコントロール過程においてダイコアをどれだけ動かせば押出物形状がどうなるかという情報を、仮に定常流動解析であっても明らかにすることができれば、パリソンコントロールを行う上での指針を与えることができると考えられる。以上のことから、本研究では、パリソンコントロールプロセスで瞬間的に見られる各流路形状を通る二重管押出物について定常粘弾性流動解析を行った³⁾。この研究は、パリソンコントロール過程の CAE 研究の初期段階の位置づけができる。

2. 支配方程式および計算手法 流れによる純粋な押出物の形状を捉えるため、高粘度粘弾性流体の無重力下での等温定常流れを考えた。粘弾性流体を表す構成方程式には次式に示すような単一モードの Giesekus モデル⁴⁾を用いた。

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

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

ここで、 $\boldsymbol{\pi}$ は偏差応力テンソル、 \mathbf{D} は変形速度テンソル、 η_0 はゼロせん断速度、 λ は緩和時間、 α 、 s は物質定数であ

る。計算手法には、計算の安定化をはかる目的で、流線流型有限要素法⁵⁾と変形速度に関する不足緩和法⁶⁾を併用した手法を用いた。

3. 流路形状 図 2 に本研究で検討した流路形状を示す。ダイ出口領域に縮小および拡大部を有する二重管ダイを考

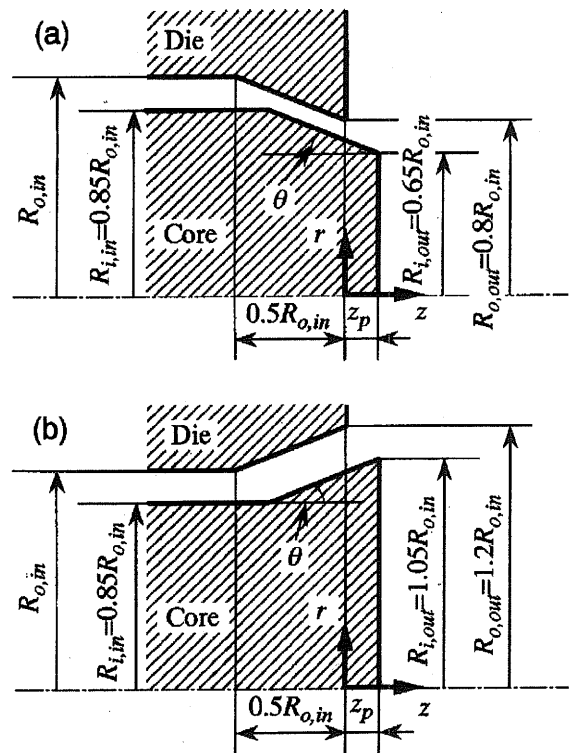


図 2 ダイ形状と記号図 (a) 縮小ダイ、(b) 拡大ダイ

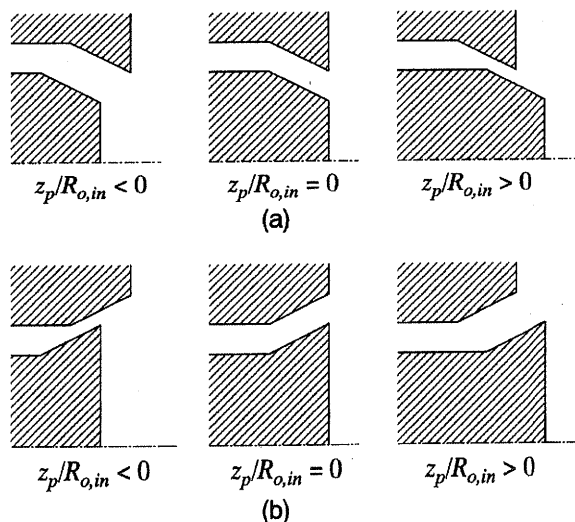


図 3 様々な $z_p/R_{o,in}$ 値における二重管ダイ形状 (a) 縮小ダイ、(b) 拡大ダイ

えた。ダイコア部には、コア先端部の座標 z_p を定義し、その座標値を上下させることでコア部の位置を決定した。図3に各 z_p 値におけるダイコア部の位置と流路形状との関係を示す。縮小ダイの場合 (図3 (a))、コア先端部の座標を入口境界におけるダイ外側半径 $R_{o,in}$ でわった無次元値 $z_p/R_{o,in}$ が正のときには流路出口におけるダイギャップが小さくなり、 $z_p/R_{o,in}$ が負のときには大きくなる。拡大ダイの場合 (図3 (b)) にはその逆になる。

4. 結果および考察 まず、単一モードの Giesekus モデルを用いたシミュレーション結果が実験値とどれほどの一致を示すのか検討するために、ストレートな二重管ダイスウェルシミュレーションを実施し、その計算結果を Orbey and Dealy⁷⁾によって行われた LDPE による実験結果と比較した。図4に計算で用いた流体のせん断流動特性、表1に Giesekus モデルの物質定数を示す。今回の計算では計算容量の都合などで単一モードモデルを使用しているため図の程度のフィッティングが限界である。図5は各種スウェル比とワイセンベルグ数 We との関係における計算結果と実験結果⁷⁾との比較である。ワイセンベルグ数 We は弾性の程度を示す無次元数であり、次式で定義される。

$$We = \frac{2\lambda\langle u \rangle}{R_{o,in} - R_{i,in}} \quad (3)$$

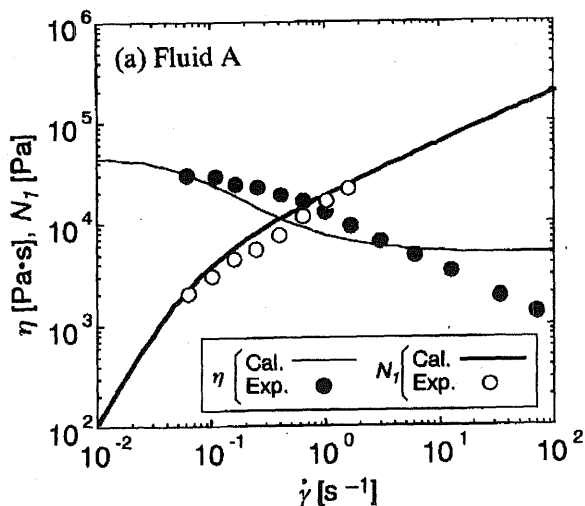


図4 LDPE を用いたせん断流動特性の実験結果⁷⁾および Giesekus モデルによるフィッティング結果

表1 Giesekus モデルの物性定数。LDPE のせん断流動特性の実験結果⁷⁾にフィッティングさせたときの値

$\eta_0, \text{Pa}\cdot\text{s}$	45,000
λ, s	15
α	0.5
s	1/9

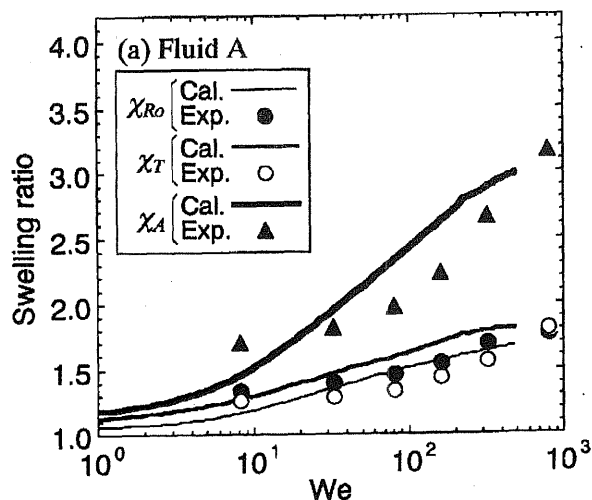


図5 各種スウェル比とワイセンベルグ数 We との関係における計算結果と実験結果⁷⁾との比較 χ_{Ro} : 外径スウェル、 χ_T : 肉厚スウェル、 χ_A : 面積スウェル

ここで、 λ は緩和時間、 $\langle u \rangle$ は入口境界における平均流速である。同じ材料の流れを検討する場合、緩和時間と入口境界におけるダイ寸法は同じなので、 We の増加は平均流速つまり、流量の増加に対応する。各種スウェル比はそれぞれ次式のように定義した。

外径スウェル χ_{Ro}

$$\chi_{Ro} = \frac{R_{fo}}{R_{o,out}} \quad (4)$$

肉厚スウェル χ_T

$$\chi_T = \frac{R_{fo} - R_{fi}}{R_{o,out} - R_{i,out}} \quad (5)$$

面積スウェル χ_A

$$\chi_A = \frac{R_{fo}^2 - R_{fi}^2}{R_{o,out}^2 - R_{i,out}^2} \quad (6)$$

ここで、 R_{fo} および R_{fi} はダイ出口から十分離れた領域における押出物の外径および内径である。外径スウェル χ_{Ro} は、押出物の外径がダイ出口におけるダイ外径に比べ、どれだけ膨らんだかを表す指標である。肉厚スウェル χ_T は、押出物の肉厚がダイ出口におけるギャップ幅に比べ、どれだけ増加したかを表す指標である。面積スウェル χ_A は、押出物の断面積がダイ出口部における断面積に比べどれだけ増加したかを表す指標であり、重量スウェルと等価である。実験結果と計算結果との偏差はたかだか 20%以内に収まっている。加えて、各種スウェル比とワイセンベルグ数との関係は、ワイセンベルグ数とともにスウェル比が増加するという実験結果で得られている傾向が計算でも捉えられている。以上のことから、単一モードの Giesekus モデルを用いた本計算結果の妥当性が確かめられた。

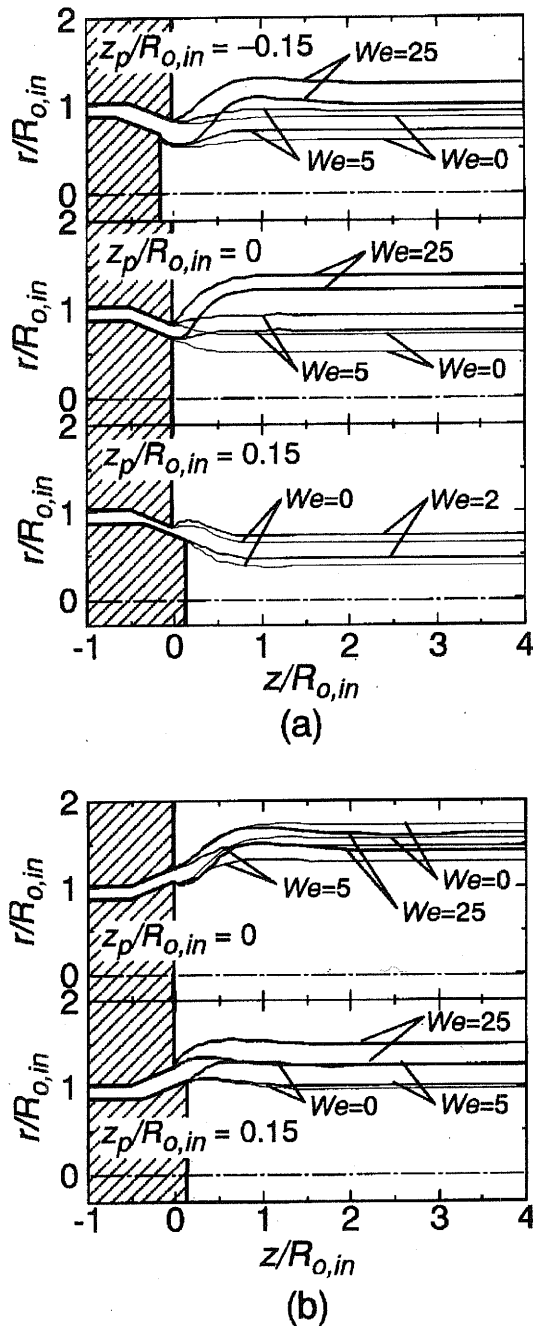


図6 様々なダイを通る二重管ダイスウェルの押出物形状とワイゼンベルグ数 We との関係

次に、表1のモデルパラメータを用いて、各種ダイ形状を通る押出物形状について計算機シミュレーションを実施した。図6は、三種類のダイ形状 ($z_p/R_{0,in} = -0.15, 0, 0.15$) を通る二重管押出物の形状に関する計算結果である。 $z_p/R_{0,in} = -0.15$ では、コア部がダイ出口部において外側ダイ先端よりも内側に位置する。流れに沿った方向における流路形状は外側よりも内側が短いので、ダイリップ近傍では、押出物の内側における自由表面上の速度が外側における速度よりも大きくなる。したがって、押出物全体が外側に移動しようとする寄与が強くなり、押出物の外径は $z_p/R_{0,in} = 0$ の場合に比べて大きくなる。なお、本研究では拡大ダイにおける $z_p/R_{0,in} = -0.15$ での計算はできなかった。 $z_p/R_{0,in} = 0.15$

では、ダイコア先端が外側ダイ先端よりも突出する。流れに沿った方向における流路形状は内側よりも外側が短いので、押出物の外側自由表面上の速度が内側のそれよりも大きくなる。そのため、押出物は内側へ移動しようとする寄与が大きくなり、押出物の外径は $z_p/R_{0,in} = 0$ の場合に比べて小さくなる。 We の押出物形状に対する影響を見ると、拡大ダイの場合、せん断流れにより生み出される弾性の寄与が拡大流れにより緩和されるため、押出物形状は We にあまり依存しない。一方、縮小ダイでは、押出物外径は We と共に増加する。縮小流れの領域で弾性の寄与が増加するので、拡大ダイの場合に比べ、 We との依存性が大きくなる。

次に、ギャップ幅とスウェル比の関係について検討する。図7は、縮小ダイを通る二重管押出物の各種スウェル比と $z_p/R_{0,in}$ との関係を示したものである。における結果を示す。低い We では、外径スウェルはダイギャップ幅とともに大きくなる。しかしながら、スウェル比の変化の傾向は、高い We では低い We とは逆の傾向を示す。縮小流れの領域で中心軸へ押さえ込まれた流体が、弾性回復により外側へ膨張するからである。肉厚スウェルは $z_p/R_{0,in} = 0$ で最小値を示す。 $z_p/R_{0,in} > 0$ の場合、つまり縮小部でダイギャップ幅が増加するケースでは、肉厚スウェルは $z_p/R_{0,in}$ が小さくなるとともに増加している。この場合、ダイギャップ幅の大小関係と押出物の肉厚の大小関係が一致している。しかし、 $z_p/R_{0,in} < 0$ の場合、つまり縮小部でダイギャップ幅が減少するケースでは、肉厚スウェルは $z_p/R_{0,in}$ とともに増加しており、ダイギャップ幅の大小関係と押出物の肉厚の大小関係が一致していない。これは、ダイギャップ幅が狭くなるとともに流体中に作用する弾性が増加するためである。その上、肉厚スウェルは、 $z_p/R_{0,in} > 0$ において We に対して著しく変化する。面積スウェルの変化は肉厚スウェルとほぼ同様である。以上のことから、ダイギャップを減少させる操作はパリソンの肉厚コントロールプロセスでは有用であると判断できる。

図8は、拡大ダイを通る二重管押出物のスウェル比と $z_p/R_{0,in}$ との関係を示したものである。外径スウェルの $z_p/R_{0,in}$ に対する依存性は We の増加と共に減少する。拡大している流路形状の影響により、流体中の弾性が下流へすすむにつれ解放されたためである。肉厚スウェルは、計算できた範囲内では $z_p/R_{0,in}$ とともに、つまりダイギャップ幅の増加と共に増加している。この傾向は縮小ダイの場合でも見られる。 $z_p/R_{0,in} > 0$ 、つまりダイギャップ幅が増加する場合における肉厚スウェルの We 依存性は、ダイギャップ幅が大きくなるにつれ減少する。以上のことから、拡大ダイにおいてもギャップ幅を広げる操作はパリソンの肉厚コントロールプロセスにおいて有用であると判断できる。

5. まとめ

本研究により得られた結論を以下にまとめる。

(1) ダイギャップを増加させるパリソンの肉厚コントロールプロセスは有用であると判断できる。この場合、ワイ

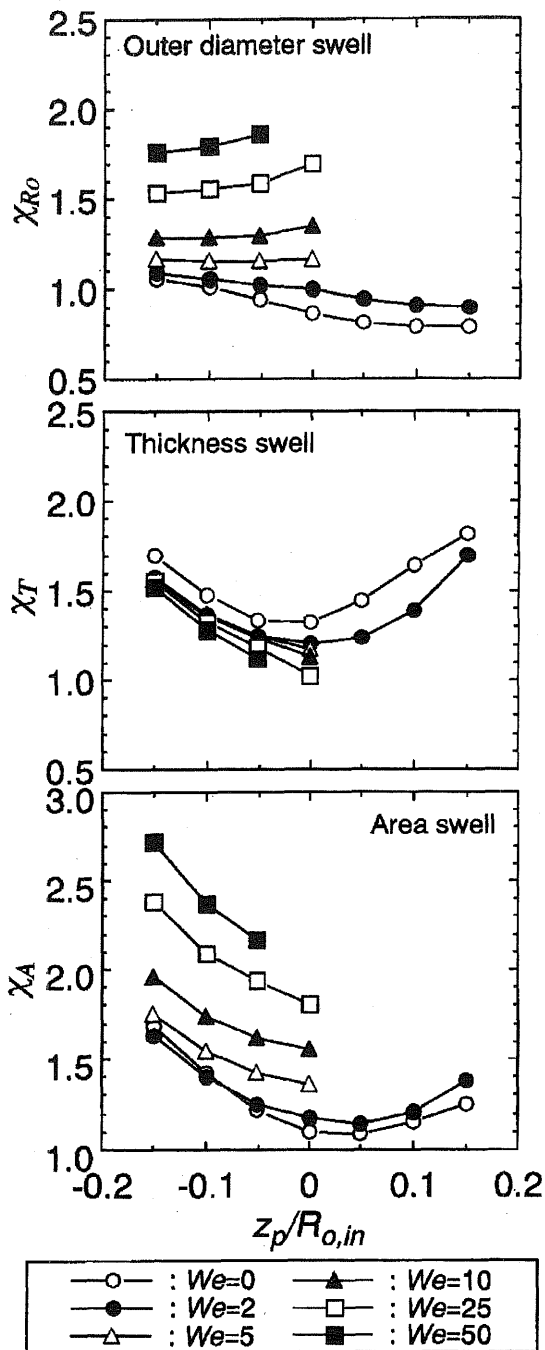


図7 縮小ダイを通る二重管ダイスウェルシミュレーションにおける各種スウェル比と $z_p/R_{o,in}$ との関係

センベルグ数の増加に対するスウェル比の変化量は小さい。

(2) ダイギャップを減少させるパリソンの肉厚コントロールプロセスは有用と判断し難い。この場合、ワイセンベルグ数の増加に対するスウェル比の変化量は顕著である。

(3) 拡大ダイを通る押出物の外径スウェルはワイセンベルグ数の増加に伴う変化量は小さいが、縮小ダイを通る押出物の外径スウェルはワイセンベルグ数の増加に伴う変化量が顕著である。

(4) より精度の高い予測を行うために、シミュレーション結果と実験結果との比較、非定常計算を行う計算手法の確立などが今後の課題としてあげられる。

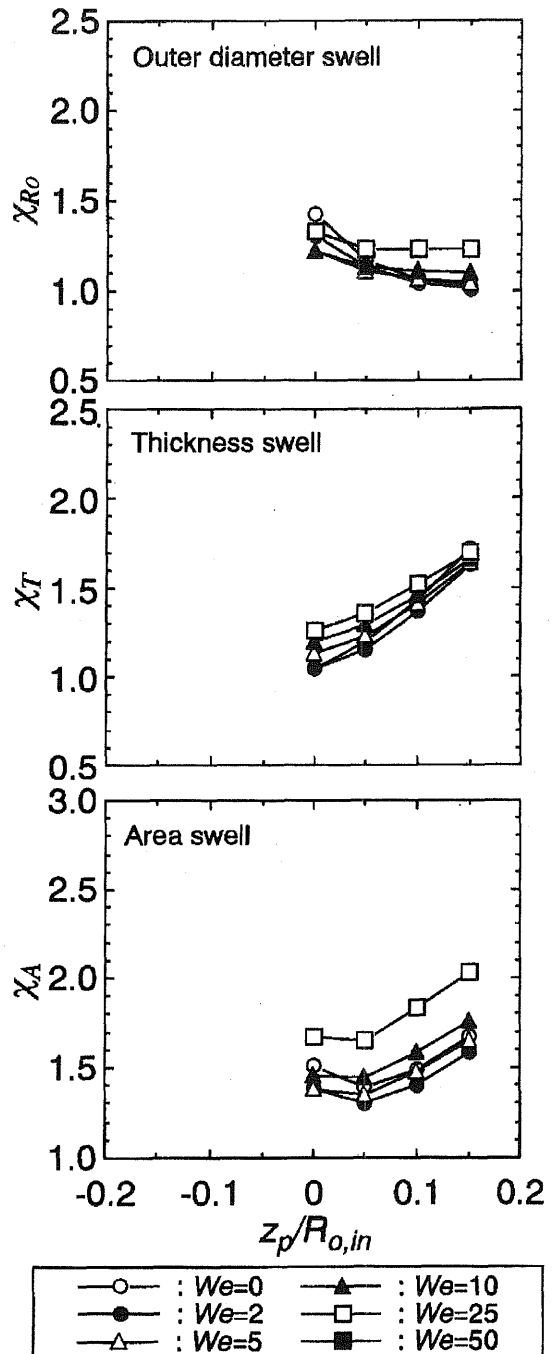


図8 拡大ダイを通る二重管ダイスウェルシミュレーションにおける各種スウェル比と $z_p/R_{o,in}$ との関係

終わりに、本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団から助成によってなされたことを付記し、深く謝意を表します。

文献

- 1) S. Tanoue, et al., *Polym. Eng. Sci.*, **35**, 1546 (1995)
- 2) S. Tanoue, et al., *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 2008 (1996)
- 3) S. Tanoue and Y. Iemoto, *Polym. Eng. Sci.*, **39**, 2172 (1999)
- 4) H. Giesekus : *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **11**, 69 (1982)
- 5) J. M. Marchal and M. J. Crochet : *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **26**, 77 (1986)
- 6) S. Tanoue, et al. *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 409 (1998)
- 7) N. Orbey and J. M. Dealy : *Polym. Eng. Sci.*, **24**, 511 (1984)