ポリマー押出金型の設計に関する数値計算

福岡寛,萩岡宣旭 *,峯岸豊 **,児玉謙司 **

Computational Fluid Dynamics to Design of Polymer Extrusion Dies

Hiroshi FUKUOKA, Nobuaki HAGIOKA, Yutaka MINEGISHI, Kenji KODAMA

Extrusion is one of the most widely used processes for polymer processing, e.g., producing film, pipe, sheet, cable and pellet. The shape of extrusion die has an important part for the manufacturing products. The purpose of this study has been to optimize the dimensions of the die for pelletizing. We calculated the die flow simulations in the various parameters. The calculation results are expected to improve the efficiency of pelletization. A commercial computer fluid dynamics program Ansys Fluent was used to calculate the die passage. The parameters for the calculations were taper angle, outlet diameter, properties of polymer and two models. The governing equations were the incompressible momentum equations and the continuity equations. As results, the increase in flow rate was confirmed by increasing taper angle and outlet diameter in the specific dimensional range. The average outlet velocity of single and multi-nozzle models almost corresponded in each same parameter.

1. 緒言

押出加工はポリマー成形において広く使われている方 法の一つである.押出加工により作られる製品はフィル ム,パイプ,シート,ケーブル,ペレットなど多岐にわたる. どのタイプの押出加工においても,ポリマーが金型を通り ぬけることにより望まれた形を作り出している.そのた め,金型の形状は製品の製造において重要な役割を持つ. その役割とは主に製品の断面形状を決定し,流れを均一に 近づけ形状のムラを低減することである.押出金型の設計 には,ポリマーの物性,流体の流れ,熱現象,押出加工に ついての様々な知識,経験が必要となる^[1].例えば,バラ ス効果による加工後の変形量の考慮や,粘性散逸による温 度上昇に伴う焦げ付きの対策などが存在する.しかし,そ れら諸効果の影響を予測することは難しい.そのため,複 雑な押出加工金型の設計は未だに科学ではなく,熟練者の 経験に依存するところが大きい.

本研究では押出加工におけるプラスチックペレットの 製造過程に注目した.プラスチックペレットの製造過程は ポリマーの押出と切断技術を組み合わせて行われている. ポリマーが押出加工により紐状,いわゆるストランドに加 工され,ストランドが俵状に冷却,切断されたものがプラ スチックペレットとなる.このペレット製造における課題 の一つに加工時間の短縮が挙げられる.押出加工の際,ポ

* システム創成工学専攻 機械制御システムコース2年 ** アスカ工業株式会社 リマーは反応しながら金型を通り抜ける.そのため,加工 時間によって反応の度合いが異なり、ペレットの物性がわ ずかに異なっていく.加工時間を短縮することにより、ペ レットの物性の安定化と生産効率の向上が期待できる.加 工時間の短縮する一つの方法として、ペレットを流す際の 圧力の増加がある.しかし、圧力の調整は装置の制約上実 現が難しい.

そこで、私たちは金型の最適化を提案する.ポリマーが 通り抜けやすい金型を設計することにより、加工時間の短 縮と安定した物性のペレットを得ることができる.ペレッ ト製造用の金型にはいくつか型が存在するが、どれも先細 ノズル形状が基本となっている.本紙では先細ノズルが二 列千鳥型に並んだ金型に注目した.

金型設計における試行錯誤の方法の一つとして数値計 算が注目されている.今まで金型の改良や新製品の開発は 実験や工場内試験を基礎として発達してきた.数値計算は 高価な試験,実験の代用として期待されている.数値計算 は目視できない内部の詳細を明らかにするポテンシャル があり,速度,せん断速度,温度場等を定量的に比較する ことができる^[1,2].さらに実験に比べ,時間やコストの改 善も期待できる.

押出加工の金型に対する数値計算のアプローチは様々 な研究が行われている.しかし,そのほとんどが基礎的 事例や,特殊な形状に注目したものがほとんどである^[1-9]. そのため、ペレット製造における金型の改良について報告 されたものはほとんどない.ペレット製造の金型について 代表的な形状パラメータは知られていない.

本研究の目的はノズル形状がポリマーの流れに与える 影響を調べることである.計算のパラメータはノズルの出 口径 D_{out},テーパ角度 θ,ポリマーの物性である.モデル として,出口が一つの単純な二次元モデルと実際の金型を 模した三次元モデルを準備した.各モデルの理由は二次元 ノズルにおいてノズル形状及びポリマー物性の効果,三次 元モデルにおいてはノズル形状の配列が与える影響の確 認である.比較の対象として,各条件の出口の速度に注目 した.

主な記号

Dout :出口径[mm]

k :粘性係数

n :べき乗則指数

- p : 圧力 [Pa]
- v :速度[m/s]
- γ : せん断速度 [1/s]
- η :粘度[Pa·s]
- *θ* : テーパ角度 [°]
- τ_{ij} : せん断応力 [Pa]
- ρ :密度 [kg/m³]
- t :時間[s]

2. 計算方法

本研究では計算ツールとして, Ansys Fluent 17.2 を使用 した.本計算に用いたモデルを図1および図2に示す.図 1のシングルノズルモデルは Ansys に組み込まれている DesignModeler を用いて作成した.図2のマルチノズルモ デルは三次元 CAD ソフト, SolidWorks で作成した.この 数値計算はシングルノズルモデルと同様の条件で行われ た.シングルノズルモデルの寸法は図2から決められた. 流体は流入口 Inlet からテーパ部を通り流出口 Outlet へ流



Fig.1 Single nozzle model



Fig.2 Drawing of multi-nozzle model

れることを想定した.これらのモデルにおいていくつかの パラメータを変え計算を行った.

支配方程式は式(1)および(2)に示す非圧縮性のナビエ ストークスの式および連続の式である.式中では重力の影響を無視した.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau_{ij} \qquad (1)$$
$$\nabla \cdot v = 0 \qquad (2)$$

また離散化の手法として有限体積法および SIMPLE 法 を用いた.境界条件として,流入口 Inlet には pressureinlet,絶対圧 216325Pa, Outlet には pressure-outlet,絶対圧 101325 Pa が設定されている.壁条件 Wall には滑りなしの 条件が与えられている.本計算は非定常,time step size 0.01 s, time step 数は 300 で行った.結果と考察では最後の time step における速度に注目した.

計算は出口径,テーパ角度,ポリマーの種類および計算 モデルを変えて行った.出口径 D_{out} は7.5,9.5,11.5 mm で 行った.テーパ角度 θ は60°,90°で行った.ポリマーは 二種類の物性を準備し,粘性は式(3)に示す.

 $\eta = k \gamma^{n-1} \tag{3}$

ポリマーの物性を図3に示す.計算の発散を防ぐため, 粘性には上下限値が設けられた.ポリマーAは上限値800 Pa・s,下限値70Pa・sに設定した.ポリマーBには上限値 1400Pa・s,下限値100Pa・sと設定した.

メッシュの密度は計算の正確さに多大な影響を与える. そのため、メッシュの要素サイズによる影響を確認する必要がある.同じモデルにおいて要素サイズを変え計算し、比較を行った.モデルはシングルノズルモデル、 $\theta = 60^\circ$ 、 $D_{out} = 7.5$ mm、ポリマーAで行った.要素サイズは D_{out} に対し、5分の1、10分の1、15分の1、20分の1、100分の1の大きさで計算した.それらの結果から、どの要素サイズにおいても解析結果の差はほとんどなかった.本紙において、メッシュの要素サイズは D_{out} /10で計算された.



3. 結果と考察

3.1 シングルノズルモデル

図4にテーパ角 θ =60°, 出口径 D_{out} =9.5 mm, ポリマー A,シングルノズルモデルの速度分布を示す.モデル上部 は下部より流れが遅く,壁付近よりも中心よりの場所が速 くなっている.最大速度は出口の中心に存在する.また, テーパ部の中ほどから速度が速くなっている.

ポリマーはテーパ部にて加速し、出口の中心で最大速度 を得た.そのため、テーパ領域は速度に影響を与えると考 えられる.テーパ角度が流れ場に与える影響を調べるた め、図5に出口平均速度とテーパ角度の関係を示す.図5 は $\theta = 60^\circ$,90°, $D_{out} = 9.5$ mm,ポリマーA、シングルノ ズルモデルの平均出口速度を比較している.他のパラメー タの条件と比較するために、出口の平均速度を算出してい る.90°における出口平均速度は60°と比べ、1.09倍大き い結果となった.

ノズルの出口直径はポリマー流れに影響を与える要素 の一つであることは明らかである.その効果を確認するた め、出口径を変えた場合の出口平均速度を図 6 に示す.ま た、赤いプロットが $\theta = 90^{\circ}$ 、青いプロットが $\theta = 60^{\circ}$ を示



Fig.4 Velocity contour for $\theta = 60^{\circ}$, $D_{out} = 9.5$ mm, polymer A and single nozzle model

す. 平均出口速度は出口径が大きくするにつれ,増加している. どの穴径においても $\theta = 90^\circ$ の平均速度が $\theta = 60^\circ$ の平均速度を上回っている.

生産現場において、1つの金型を用いて物性が異なる複 数種類のポリマーが使われる.そのため、ポリマーの物性 による影響を確認することは重要である.図7に二種類の ポリマーにおける出口平均速度の比較を示す.赤いプロッ トがポリマーA、青いプロットがポリマーBを示す.ま



Fig.5 Average outlet velocity for $\theta = 60^{\circ}$, 90° , $D_{out} = 9.5$ mm, polymer A and single nozzle model



Fig.6 Average outlet velocity for $\theta = 60^{\circ}$, 90° , $D_{out} = 7.5-11.5$ mm, polymer A, and single nozzle model



Fig.7 Average outlet velocity for $\theta = 60^{\circ}$, 90° , $D_{out} = 7.5-11.5$ mm, polymer A, B and single nozzle model

た、丸プロットが $\theta = 90^{\circ}$ 、ひし形プロットが $\theta = 60^{\circ}$ を示 す.ポリマーAの平均速度はどの条件においてもポリマー Bの平均速度より大きいという結果となった.出口径を大 きくした場合の平均速度上昇の勾配はポリマーAがポリ マーBよりわずかに大きいことがわかる.そのため、ポ リマーAは出口径の大きさの影響を受けやすいといえる. ポリマーAはポリマーBより粘度が低いため、粘度が低 いと出口径の影響が大きくなると考えられる.また、本計 算においてはテーパ角の影響は他のパラメータと比べ影 響が小さいと言える.

3.2 マルチノズルモデル

ペレット製造用金型には一般的に、テーパノズルが複数 並ぶことにより流れの通り道が構成される.それらテーパ ノズルの間隔,数および配列により、テーパノズルが重な りあい独特な形状になる.この形状はノズルとノズルの継 ぎ目において最も形状が変化しており、このような形状の 効果は明らかにされていない.そのため、このような形状 の影響を確認することは重要だと考えられる.そこで、図 8 にマルチノズルモデルにおける速度分布の断面を示す. このマルチノズルモデルはテーパ角 θ=60°、出口径 Dout = 9.5 mm、ポリマーAで計算された.マルチノズルモデル における出口毎の最大速度はその出口の中心に確認され



Fig.8 Velocity contour for $\theta = 60^{\circ}$, $D_{out} = 9.5$ mm, polymer A and multi-nozzle model



Fig.9 Average outlet velocity for $\theta = 90^{\circ}$, $D_{out} = 7.5$ -11.5 mm, polymer A, single and multi-nozzle model

た. この速度分布は図4に示した速度場とほぼ同じ傾向が 見られる.しかし,ノズル継ぎ目の上において異なった速 度分布が見られた.次にその速度分布が出口平均速度にど のように影響を与えるかを定量的に調べる.

図9にシングルノズルモデルおよびマルチノズルモデル の平均出口速度の比較を示す.赤いプロットがポリマーA, 青いプロットがポリマーBを示す.また,丸プロットが シングルノズルモデル,ひし形プロットがマルチノズルモ デルを示す. 平均出口速度はシングルおよびマルチノズル モデルともにほぼ一致した. このことから, この寸法範囲 ではノズル継ぎ目の形状変化の影響はほとんどないと言 うことができる.計算時間の観点では、シングルノズルモ デルが有利である.そのため、このような事例ではシング ルノズルが有用であるといえる.一方,より大きな出口径, テーパ角度を設定した場合、ノズル継ぎ目の形状変化が大 きくなると予想される. そのため, マルチノズルモデル独 自の傾向が大きくなると考えられる.また、テーパノズル の数,配列および間隔についてもノズル継ぎ目の形状に影 響を与えるため、さらなる三次元モデルによる計算が必要 である.

4. 結論

本研究の目的はノズル形状がポリマーの流れに与える 影響を調べることである.そのために、様々なパラメータ を変え、金型内流れの計算を行った.そのパラメータは出 口径 D_{out} ,テーパ角度、ポリマーの物性、シングルおよび マルチノズルモデルである.計算の結果、最も出口速度が 速い条件は $D_{out} = 11.5$ mm、 $\theta = 90^{\circ}$ およびポリマーAだっ た.一方、最も出口速度が遅い条件は $D_{out} = 7.5$ mm、 $\theta = 60^{\circ}$ およびポリマーB となった.また、条件ごとの出口平 均速度はシングル、マルチノズルモデルでほとんど一致し た.さらに計算時間の観点から、本紙の寸法範囲において はシングルノズルモデルが有用であるといえる.しかし、 三次元化に伴う様々なパラメータの考察のためマルチノ ズルモデルによる計算は必要である.

参考文献

- Kostic, Milivoje M., and Louis G. Reifschneider. Design of extrusion dies, Encyclopedia of Chemical Processing, 10, pp633-649, 2006.
- [2] Sienz, J., A. Goublomme, and M. Luege., Sensitivity analysis for the design of profile extrusion dies, Computers & structures 88.9-10, pp610-624, 2010.
- [3] Reifschneider, Louis G., M. Kostic, and Srinivasa Rao Vaddiraju, Computational Design of U-Profile Die and Calibrator, ANTEC-CONFERENCE PROCEEDINGS-, Vol. 1., 2004.
- [4] Pandey, Vinay Prakash, and Gurmeet Singh Gahir, Analysis of the Effect of Die Angle Variation on the Behavior of Temperature Profile in Extrusion Process by using ANSYS Poly Flow Software, International Journal of Engineering

and Management Research (IJEMR) 7.3, pp 494-500, 2017.

- [5] Pepliński, Karol, and Arkadiusz Mozer, Design of extrusion die for plastic profile using ansys polyflow software, Journal of Polish CIMAC, 6.3, pp221-226, 2011.
- [6] Kouzilos, G. N., Seretis, G. V., Provatidis, C. G., and Manolakos, D. E, Design of Polymer Extrusion Dies Using Finite Element Analysis, Extrusion of Metals, Polymers and Food Products. InTech, 2018.
- [7] Lin, Z., Juchen, X., Xinyun, W., and Guoan, H. Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion process, Journal of Materials Processing Technology 142.3, pp659-664, 2003.
- [8] Hatzikiriakos, S

- vvas G., and Evan Mitsoulis., Slip effects in tapered dies, Polymer Engineering & Science 49.10, pp1960-1969, 2009.
- [9] Ahmed A M A, Computer Aided Design for Polymer Extrusion and its Dies, Doctoral dissertation of Sudan University of Science and Technology, 2014.