高アスペクト比成形品の精度向上に関する研究[†]

森 直樹* 北村 貴祐** 是澤 宏之**

檜原 弘之** 鈴木 裕**

Physical Properties Improvement of High Aspect Ratio Plastic-Molding Parts

by

Naoki MORI*, Takahiro KITAMURA**, Hiroshi KORESAWA**,

Hiroshi NARAHARA** and Hiroshi SUZUKI**

In case of high aspect ratio plastic parts molding, the deterioration of parts accuracy will occur by various deformations such as warp due to molding shrinkage. In this research, the resin flow control molding method has been developed which can control the flow of resin during molding and improve the dimensional accuracy and the mechanical strength of the molded parts. In this paper, we applied the developed new molding method to high aspect ratio pipe shape molding and examined whether it is possible to realize the high-precision molding.

Key words:

Resin flow control molding method, High aspect ratio plastic, High-precision molding

1 緒 言

プラスチック材料の製品への使用量は近年増加傾向にある。成形品の精度は使用される部品および製品の機能を左右する重要な要素であるため精度向上のための開発が取り組まれている。複写機やプリンターに搭載される転写用ロールは現在、アルミの磨きパイプが使用されている。アルミの磨きパイプを使用することで精度は向上するが、コストが高くなってしまったという問題がある。パイプ状成形品の反りやたわみを改善する方法として樹脂の収縮特性を制御する方法が提案されている¹⁾。この方法では成形後にパイプ状成形品の内側のピンを温度調整し精度を向上させるが、内側のピンが長くなるほど温度調整の時間と温度分布の差異が発生し、精度上の課題が顕著になると考えられる。さらに高アスペクト比のパイプ成形品を射出成形時に高精度を実現するためパイプの端面に複数の注入口を設定し繊維や樹脂の配向させる方法が提案されており²⁾、パイプの真直度が向上することが示唆されている。しかしながらこの方法ではパイプ内部に複数のウェルドラインが生成されるので強度面での低下が懸念される。この他にパイプの成形過程に於いて、溶融樹脂の流動中に軸方向と円周方向に延伸させて繊維や樹脂の異方性を付与する提案³⁾があるが、押し出し成形

によるもので単純なパイプ形状へ限定されるため、成形品端面へフランジやリブを追加する等の対応は充分なものとはいえない。高アスペクト比の成形品である転写ロールではそりやたわみに対する精度は厳しいものがある。このような機能部品の要求精度は、反り率（反り／パイプ成形品の長さ）として **0.01** 以下で、たわみは **2mm** 以下を要求されている²⁾。

筆者らはアルミパイプの代替として樹脂を使用することで、コストを下げるができたと考えた。しかし、高アスペクト比の樹脂パイプ成形品において成形収縮に起因するそりや倒れといった変形が起こり、精度に問題が生じる。そこで上記目的を達成するため、熱可塑性樹脂ペレットを溶融し射出成形してパイプ状成形品を得る方法において、パイプの内側を形成する中心ピンを回転させながら溶融樹脂や繊維を金型のキャビティ内に充填させることで、曲げ強度や剛性の向上させることを実現してきた⁴⁾。

本研究では、樹脂流動制御の効果を確認するため溶融時の流動長が長く成形特性が良好である汎用樹脂の PP（ポリプロピレン）を用いて、流動制御に於けるパイプの内側を形成する金型中心ピンの回転数および動作パターンの条件を見出す。さらに電気的特性が他の樹脂に対

[†] 原稿受理 平成25年10月16日 Received Oct.16,2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 九州工業大学 情報工学部 情報工学研究院 〒820-8502 飯塚市川津

Mechanical Information Science and Technology, Kyushu Institute of Technology, Kawazu, Iizuka, 820-8502

** 九州工業大学 情報工学部 機械情報工学科 〒820-8502 飯塚市川津

Mechanical Information Science and Technology, Kyushu Institute of Technology, Kawazu, Iizuka, 820-8502

して安定である PBT (ポリブチレンテレフタレート) に適用し、パイプ状成形品の長手方向の振れ幅を計測し、本手法が高アスペクト比のパイプ状成形品の精度向上に有効であることを確認した。

Fig.1 Articles Produced with and without Rotation.
a) Normal Molding
b) Flow Controlling Molding

2 樹脂流動制御による精密成形法の提案

2.1 成形手法

本手法の工程概要を Fig.1 に示す。高アスペクト比のパイプ成形品において、金型内樹脂の流動中に型内の部位を可動し、強制的に異方性を付与することでウェルドラインを形成させることなく精度が向上出来ると考えた。

金型キャビティ内部へ射出する際に、樹脂の流動を制御する機能を有する金型システムを構築した。金型中心ピンの回転数を上昇させ、射出成形時の回転動作パターンを組み合わせ成形を行った。

Fig.2 に実験用金型を示す。回転する中心ピンは高アスペクト比であることから長尺となるため、両端部を保持する構造とし成形過程に於けるピンの倒れや変形を防止するようにした。図には示していないがキャビティ部の周辺には温度調整用の回路が設けられ、温度調整器の媒体が循環し所定温度に保持している。

Fig.2 Experimental Mold.
a) Rotational Center Pin
b) Cavity
c) Drive Gear

金型の駆動歯車を動作するモータには減速機を取り付け、必要な回転数とトルクを得た。射出成形機には(株)

日精樹脂製 FNX280-71X を使用し、駆動モータには(株)安川電機製 AC サーボモータ SGMGV-30ADA6C を使用し、減速機は(株)アベックスダイナミックス製 AB142-S2-P1 を使用した。

Fig.3 に樹脂流動制御に使用する金型の駆動部を制御するシステム、フロー図を示す。

Fig.3 Block diagram of system.

Fig.4 Plastic Molding Pipe.
End face; Molding Gate area

本研究では、Fig.4 に示す高アスペクト比のパイプ形状を各種の条件下で成形し、成形品の精度を調査した。なお円周方向に収縮を均一化させることと、ウェルドラインを複数設けてパイプの断面形状の真円度を保持する。真円度は、測定した円の形状に対して2つの同心円で挟む、その際の同心円の間隔が最小になる2円の半径の差とする。円周方向の各測定点がばらつき、円の形状がひずみむと真円度の値は大きくなり悪化する。樹脂の注入箇所は中村らの実験結果⁵⁾を考慮し成形品端面の4点とした。さらに成形後の離型を容易とするために樹脂の注入形式はピンゲートタイプとした。

2.2 射出成形での樹脂流動制御の条件

ここで、金型中心ピンを駆動せずに成形を行うことを通常成形、中心ピンを駆動させて成形を行うことを樹脂流動制御成形と称する。始めに中心ピンの回転速度を

60[min^{-1}]とし、回転数ごとに中心ピンの駆動パターンを変化させ、成形を行った。駆動パターンを変更することによる成形品への影響を確認するために、樹脂充填開始と同時に中心ピンを駆動させる2通り (Drive Pattern a) と、保圧工程開始と同時に動作させる2通り (Drive Pattern b) の計4通りとした。次に駆動パターンにおいて、中心ピンの回転速度を30, 60, 90, 120[min^{-1}]と変化させ、成形を行った。射出成形条件と金型中心軸の駆動パターンをTable1に示す。

Table1 PP Molding Conditions.

Cylinder Temperature	[°C]	230
Injection Speed	[mm/s]	85
Holding Pressure	[MPa]	60
Rotation Speed	[min^{-1}]	0, 30, 60, 90, 120
Mold Temperature	[°C]	40

Drive Pattern Rotation Center pin.

Drive Pattern a) Injection During Hold / End Hold
Drive Pattern b) Holding During Hold / End Hold

3 PPを用いた成形

3.1 実験方法

成形材料はポリプロピレン(株)日本ポリプロ製ノバテック MA3を使用した。繊維等が添加されていない非強化グレードであり、流動性の指標である Melt Flow Rate (以下 MFR) は 11g/10min である。

パイプ成形品の真円度および寸法の測定を接触式により行う。3次元測定機には、(株)ミットヨ製 FALCIO Apex 7106 を、タッチプローブには RENISHAW 製 TP200 を用いた。試験片の測定位置はゲート部から軸方向に 30[mm]の位置 A およびゲート反対部から軸方向に 30[mm]の位置 B とした。測定点の A 点はパイプの内径および外径を測定した。B 点については Fig.5 に示すように外周部にフランジが付いており、成形収縮の影響が少ないことが確認されているため⁶⁾、この地点に関しては内径の真円度のみ測定を行った。

Fig.5 Mold Shape.

A) Measure point gate side
B) Measure point anti gate side
M) Measurement location

3.2 実験結果

Fig.6 に中心ピンの駆動パターンを変化させた際の A 地点の真円度変化のグラフを示す。保圧終了まで中心ピンを回転させると真円度の悪化が見られる。

樹脂流動制御成形において、一部の中心軸駆動パターンで真円度が向上することが確認できた。これは中心ピンに溶融樹脂がからみつき、連れ回りながら充填されるが、その際に過度に樹脂を連れ回し過ぎると樹脂の成形収縮量が不均一となり、その結果として真円度が悪化すると考えられる。

Fig.6 Inside Circularity.

Fig.7 に樹脂流動制御での成形に於いて、中心ピン回転数 60rpm に於ける射出開始から保圧途中および射出開始から保圧終了までモータを回転させた際の成形サイクル中でのモータトルク波形変化グラフを示す。他の回転数でも同様の波形を得た。

Fig.7 Torque Waveform.

Fig.7 より, モータのトルク波形が成形時間 4[s]あたりから急激な上昇をしている, これは固化が進んだ溶融樹脂を無理に回転させるためモータのトルクが急激な増加を示しており, 最大で 4 倍近い負荷がかかっている. モータにかかる負荷は, 中心ピンと成形品内側との間にかかる力に等しいと考えられる.

成形時間の経過に伴いトルクの上昇が見られた. 中心ピンを駆動させることで, 溶融樹脂は回転方向に流動先端が巻き込まれる連れ回りが起こるが, 溶融樹脂の固化が進み樹脂の粘度が上昇する. 粘度の上昇に伴い, 溶融樹脂が中心ピンにからみつきモータへの抵抗が高くなるが, モータは設定した回転速度を維持するためトルクが上昇したと考えられる. 固化が進んだ樹脂を無理に回転させたことで成形品の真円度に悪影響を及ぼしたと考える⁷⁾. 溶融樹脂が中心ピンにからみつき, モータ駆動系への回転抵抗が高くなるが, 樹脂のスキン層が固化する際に金型表面からはく離が進行する. その結果モータの回転トルクが低下すると考えられる.

Fig.9 に A 点および B 点の中心ピン回転速度による内径の真円度変化を示す. Fig.9 に A 点の中心ピン回転速度による外径変化を示す. また, 参考として樹脂の成形収縮率が 1~2[%]であることを考慮した成形品の寸法を点線にて示す.

樹脂流動制御成形を行った成形品の真円度が向上することをすべての回転速度において確認できた. 樹脂流動制御成形において, 溶融樹脂が連れ回りながら充填されるが, その際に 90 rpm 以上の回転領域においては, 樹脂を連れ回し過ぎる状態になる. その結果樹脂の成形収縮量が不均一となり, A 部の真円度が 90 rpm で極小値化すると考えられる.

ここで, 繊維を添加した樹脂にて成形したときの繊維の配向状態を確認した. 通常成形だと繊維の配向がランダムとなり樹脂の充填付近にあたるゲート領域と溶融樹脂の合流部分にあたるウェルド領域で成形収縮差が出るため, 真円度の値が大きくなる. それに比べ, 樹脂流動制御成形だと溶融樹脂が回転方向に連れ回することで, 繊維配向が回転方向に対して, 一様に配向したと考える.

Fig.8 に樹脂流動制御成形を行った際の成形品の繊維が配向している状況を示す. パイプ形状の成形品を軸方向に切断し, その断面に対して X 線 CT 解析を行った. 断層画像より断面に関して軸方向と周方向に繊維が配向していることがわかる.

Normal Molding Flow Controlling Molding
Fig.8 The fault picture in X ray CT analysis.

成形品内部の配向状態において, 異方性の存在が成形収縮の不均一の要因であり, これにより成形品の精度を低下させることが佐藤らから報告されている⁸⁾. 樹脂流動制御成形法ではゲート領域とウェルド領域の樹脂の収縮差が通常成形に比べ小さくなり, 真円度が向上したと考えられる. また, 真円度測定結果において, 内径と外径真円度の向上率を比較すると内径の向上率が高くなっていることを確認した.

Fig.9 Inside Circularity.
(A) Measure point gate side
(B) Measure point anti gate side

Fig.10 Outside Diameter.
Dotted line; shrinking 1~2[%] numeric

3.3 中心ピン速度と結果および考察

Fig.10 に中心ピン回転速度による外径真円度の変化を示す. 真円度の測定結果が外径よりも内径の向上率が大きくなるといった同様の傾向を示している. 通常成形時において収縮量が過少化していることが分かる. 中心ピン回転速度の増加に伴い樹脂の成形収縮率の増加が見られる. 通常成形時の成形収縮率は収縮を考慮した破線部分を超過しているが, これは成形中の熱ひずみにより外径が収縮したと考えられる.

しかし, 本手法を適用した成形品においては, 金型壁面と接する表層部から固化が始まり, 溶融状態である内部は中心ピンによる連れ回りが起きていると考えられる⁹⁾. この連れ回りにより溶融状態である内部には, 回転方向と逆方向にせん断応力がはたらいっており, 通常成形に比べ樹脂内の残留応力が高い状態となっていると考えられる. また, 成形時におけるモータのトルク波形を見ても速度の上昇に伴い樹脂内部に働く力が増加することが分かる. そのため, 回転速度の上昇に伴いひずみが大きくなり成形収縮率が増加したと考えられる.

4 PBT を用いた成形

4.1 実験方法

中心ピンの駆動パターンおよび中心ピンの回転速度は PP で真円度の向上が見られた条件を元に中心ピンの駆動条件を決定した。PBT 成形材料は (株)ポリプラスチックス製ジュラネックス 701SA を使用した。ガラス繊維強化グレードであり、繊維長は 1.0–2.0mm とし、含有量は 30wt% である。Melt Flow Rate (以下 MFR) は 6g/10min であり、PP に比べ流動性はやや劣る。この樹脂は、成形を行う際に事前の乾燥が必要となるため、温度を 80℃ に設定し 6 時間の乾燥を行った。乾燥には (株)ハーモ製の除湿乾燥装置 MDR-75F を用いた。今回成形中の金型の温度を推奨温度の上限である 80℃ に設定し成形を行った。理由として、本実験における成形品は長さが約 300mm 近くあるため樹脂を充填する際に、充填途中で熔融樹脂の固化が進み完全充填ができないためである。射出成形条件を Table2 に示す。

Table2 PBT Molding Conditions.

Cylinder Temperature	[°C]	270
Injection Speed	[mm/s]	115
Holding Pressure	[MPa]	60
Rotation Speed	[min ⁻¹]	0, 60,
Mold Temperature	[°C]	80

成形品真円度および寸法の測定を接触式により行う。試験片の測定位置はゲート部から軸方向に 30mm の位置 A のみ内径、外径の測定を行った。測定点数は内径、外径ともに 32 点とし、公差幅は 0.04mm とした。

4.2 実験結果

Fig.11 に A 点における内径および外径の真円度測定結果を示す。縦軸は真円度を表しており、通常成形と樹脂流動制御成形の比較を行っている。この結果から、内径に関しては樹脂流動制御成形を行うことで通常成形に比べ真円度の値が向上しており本手法の有効性を確認することができるが、外径に関してはあまり変化が見られなかった。

PP においても外径真円度の向上率は内径真円度の向上率に比べると小さくなる傾向を示すことが確認されている。本手法は中心ピンと接している内側部分に特に有効であることを示唆していると考えられる。

Fig.12 に A 点における内径および外径の真円度測定結果を示す。縦軸は真円度を表しており、通常成形と樹脂流動制御成形の比較を行う。この結果から、内径に関しては樹脂流動制御成形を行うことで通常成形に比べ真円度の値が向上しており本手法の有効性を確認することができた。

Fig.11 Outside Circularity.

Fig.12 Circularity (Inside-Outside).

4.3 パイプ成形品の振れ幅測定

本手法は中心ピンと接しているパイプ内側部分に特に有効であることが判明した。そこで PBT を用いて樹脂流動制御成形法を適用した高アスペクト比パイプ形状成形品の、成形品の重要特性である長手方向の倒れ振れ幅の精度向上の効果を確認するために測定を行った。

本成形方法の特徴は金型の中心軸を回転させることで、高アスペクト比のパイプ形状成形品の真直度を向上することにある。そこで、パイプの軸方向に対する振れ幅を調査した。Fig. 13, 14 の縦軸は樹脂の注入口であるゲート位置毎の振れ幅を示す。横軸はパイプの軸方向の位置を示す。測定については中心ピンを回転させない通常成形と、中心ピンを回転させた樹脂流動制御成形法による長手方向の振れ幅を測定した。

測定に際してはパイプの長手方向のたわみを定盤へ固定し高さ方向の振れ量を Z 軸方向へ検出した。Fig.13 に測定時の定盤への固定状態と各軸の方向を示す。

Fig.13 Pipe shape measure tool
Measurement X,Y,Z axis.

4.4 測定結果

Fig.14 に中心ピンを回転させない通常成形での測定点であるゲート位置 1~4 での振れ幅を示す。Fig.15 に中心ピンを回転させた樹脂流動制御成形法による、振れ幅を示す。それぞれ長手方向 (X 軸) に対する振れ幅 (Z 軸) の変化を示す。振れ幅が 75%向上しており真直度は転写ロールに要求される反り率を満足する。

Fig.14 Shaped width (Normal Molding).

Fig.15 Shaped width (Flow Controlling Molding).

Fig.16 に中心ピンを回転させた樹脂流動制御成形法を適用した、高アスペクト比パイプ形状成形品におけるガラス繊維配向状況を撮影したパイプ表面を示す。

ガラス繊維が成形品に関して円周方向に配向しているため、通常成形での軸方向への繊維配向に比べ機械的強度は向上していると考えられる。

Fiber orientation
(Circumference orientation)

Fig.16 Mold Surface (Flow Controlling Molding).

4.5 結果の考察

樹脂流動制御成形を行うことで、中心ピンによる溶融樹脂の連れ回りが行われ、それに伴いガラス繊維の配向が流動方向ではなく流動方向と直交する円周方向に対して一様に変化したと考えられる。このことより、成形収縮率の異方性が通常成形に比べ小さくなり、パイプの真直度が向上したと考えられる。

5. 結 言

本研究では、PP および PBT を用いて樹脂流動制御成形法を適用した高アスペクト比パイプ形状成形品の寸法および真円度測定を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) PP の真円度に関して、中心ピンの駆動パターンとして最も真円度の向上が見られたのは、保圧開始から保圧途中まで回転させた条件であり、中心ピンの停止タイミングを保圧終了まで継続すると成形品の真円度が悪化した。
- (2) 中心ピンの回転速度を変化させた場合でも成形品の真円度に変化が見られ、通常成形と比べ真円度が最大で約 78%向上した。
- (3) PBT 樹脂に関しては、内径の真円度が通常成形に比べて約 50%向上した。
- (4) 繊維を含んだ PBT 樹脂に関しては、繊維が樹脂の流動方向に配向するため流動方向の収縮が抑えられ、中心ピンを回転させた樹脂流動制御成形法により、高アスペクト比のパイプ成形品の長手方向 (X 軸) に対する振れ幅 (Z 軸) が 75%向上しており真直度は転写ロールに要求される反り率を満足する結果が得られた。

以上の結果から、本成形法は高アスペクト比成形品の精度を向上させるための方法として有効であることが分かった。しかし収縮特性に影響を及ぼす樹脂への添加物の有無、他の樹脂に適用した場合の効果、成形品物性への影響はまだ明らかではない。

参 考 文 献

- 1) M. Imaizumi, "Process development in precision injection molding by cooling rate control". Journal of the Japan Society of Polymer Processing, Vol.22, No.10, pp.590-597 (2010).
- 2) J. Nakane, "Long filament thermoplastic resin pipe and its production method", JP.2007-320090(2007).
- 3) M. Nakamaru, "Development of the highly efficient biaxial drawing resin pipe production technology based on the DieDrawing method". Journal of the Japan Society of Polymer Processing, Vol.10, No.6, pp.394-398, (1998).
- 4) N. Mori, "Orientation control and its prediction of an injection-molded product", JSPP Symposium95, pp.23-25 (1995).
- 5) H. Tateyama, "The influence of the Rib layout of an injection molding part on the initial warpage behavior", Journal of the Japan Society of Polymer Processing, Vol.20, No.4, pp.245-250 (2008).
- 6) T. Nakamura, "Performance gain of the injection-molded product using center pin rotation/orientation control injection molding", 21th. Japan Society of Polymer Processing Annual Meeting, pp.355-356 (2010).
- 7) N. Mori, "About change of the physical properties which resin flow control gives to a cast", JSPP Symposium2009, pp.253-254 (2009).
- 8) K. Sato, "The Deformation of Fiber Reinforced Thin Plates Obtained by Injection Molding Influence of the Anisotropy of Thermal Expansion Coefficient and the Fiber Orientation Distribution on Warpage", Journal of the Japan Society of Polymer Processing, Vol.17, No.11, pp.779-787, (2005).
- 9) H. Yokoi, "Shearing stress distribution measurement which acts on an injection mold side", SEISAN KENKYU, Vol.46, No. 4, pp. 75-78 (1994).