特集-プラスチック成型加工における圧力効果-

射出成形金型内の保圧下における 樹脂挙動と成形不良

Behavior of Polymer Melt in the Mold Cavity during the Packing-Holding Process of Injection-Molding and the Effects on the Molding Failure

佐藤 勲

Satoh, Isao

This article deals with the polymer behavior within the mold cavity during the packing-holding process of injection-molding from the viewpoint of pressure transmission. The packing-holding process is used to be adopted in the practical injection-molding of polymeric materials to reduce the generation of molding failure due to shrinkage of polymer melt, but sometimes the packing-holding process may induce another type of failure such as residual strain and birefringence. The author revealed the behavior of polymer melt in the mold cavity by using visualization techniques, and the reduction mechanism of molding failure due to the packing-holding process was discussed on the basis of *P-V-T* characteristics of the polymer material.

[injection molding, packing-holding process, visualization, molding failure, *P-V-T* characteristics]

1. はじめに

昨今では、筆記具や台所用品からコンパクトディスクやカメラレンズの一部などの情報・光学機器に至るまで、身の回りの多くのものがプラスチック材料で作られている。プラスチック材料、特に熱可塑性材料は、加熱して温度を上昇させると金属などに比べて低い温度でも流動性を呈して自由な形に変形でき、しかもその後に冷却して温度を低下させるともとのように固体状態に戻るから、これによって様々なものを形づくろうと考えるのは当然のことと思われる。しかし実際のプラスチック成型加工は、このことから想像されるほどには簡単ではない。

プラスチック成型加工を難しくしている要因は次の二つに大別される。すなわち、その第一はプラスチック材料の粘弾性体としての性質であり、成形品内に加工にともなう変形に基づくひずみや材料を構成する分子鎖の配向などが残留する原因となる。もうひとつの要因は、材料の加熱熔融・冷却固化にともなう材料の密度の変化である。すなわち、プラスチック材料を加

熱熔融して成形しても、その後の冷却固化段階で材料が収縮していくと、その形状や寸法を保てず、結果として成形品の精度が低下する。このことは、材料をいったん熔融して所定の形状に成形し、これを冷却して形状を固定化するすべての成形法に共通する問題であって、実用成形ではそれぞれの成形原理に合致した対策が採られている。

代表的なプラスチック成型加工手法である射出成形法 (Fig. 1) では後者の問題を解決するために「保圧プロセス」と呼ばれる手法が用いられることが多い。この保圧プロセスは、熔融材料が金型キャビティを満たした後も金型入口 (ゲートと呼ばれる) に熔融材料を押し込み続けて金型内材料の収縮分を外部から補填するものである。しかしこのためには金型内で固化しつつある材料を流動させねばならず、金型ゲート部に数 100 MPa オーダーの高圧力を印加することが必要である。本稿では、著者らが行ってきた可視化を利用した金型内材料の振る舞いの実験的検討結果 [1] をもとに、このような保圧プロセスにおける金型内材料の振る舞いとそれによる成形不良改善機構について概説す

Fig. 1. Injection-molding process of thermoplastic resin materials.

る。

2. 保圧プロセス中の金型内材料の振る舞いの可視化

2.1 実験装置と可視化手法

射出成形法に限らずほとんどのプラスチック成形法では、材料の変形や冷却固化は金型内で行われる。したがって保圧プロセスにおける材料の振る舞いを検討するためには、金型という閉じた空間のなかでの現象を評価することが必要である。このための手法としては、従来から金型キャビティ内壁に複数の圧力センサーを設置して、材料内の圧力分布から材料の挙動を予測しようとする試みが数多く行われてきた [2, 3]。しかし金型キャビティ内の材料の振る舞いのイメージ

Fig. 2. Mold used for the visualization and the size and shape of the molded.

Fig. 3. Optical setup used for birefringence visualization.

をつかむためには、材料に生じる現象を実際に「目で見る」にしくはない。そこで著者らは金型に透明な窓を取り付け、これを通して金型キャビティ内の材料の振る舞いを可視化することとした [1]。可視化対象としては、金型キャビティ内での材料の流動状況とそれにもなう材料内部のひずみ・分子鎖配向状況を取り上げ、それぞれ、材料に混入したアルミニウム粉末をトレーサとするトレーサ法と、材料の光学的異方性を可視化する光弾性法を用いて評価した。

Fig. 2にこの検討のために使用した金型の概略を示した。成形品の形状はFig. 2中に示すような単純な平

Fig. 4. Polymer melt velocity during the injection and packing-holding processes in the mold cavity near the gate.

板であり、成形材料には一般的なポリスチレンを用いている。金型キャビティを構成する相対する2壁面には透明なアクリル樹脂製の窓が取り付けられており、内部の様子を観察できるようになっている。材料の流動状況を可視化観察するときには、一方の窓の背面に

白色光源を設置し、他方の窓を通して内部の材料の振る舞いを観察する。材料内のひずみ・分子鎖配向の可視化では、Fig. 3に示すような光弾性可視化光学系を用いた。可視化結果はビデオカメラで撮影し、これを再生することで金型内材料の振る舞いの時間的変化を評価した。

2.2 金型内材料の流動状況

まず金型内に充填される材料の流動状況について述べる。前述のとおり、射出成形で用いられる保圧プロセスの目的は、金型キャビティに充填された材料の冷却固化にともなう体積収縮を外部から材料を押し込み続けることで補填しようとするものであるから、成形プロセスを通してどれだけの材料が金型キャビティ内に充填されたかを評価することは、保圧プロセスの効果を知る上で重要である。そこで金型ゲート近傍における材料の流動速度を可視化結果から評価してみることにする。

Fig. 4は金型ゲート近傍の材料の流動速度の経時変化を示したものである。この図に示すように、キャビティ充填中の溶融材料はほぼ一定の速度で移動するが、キャビティが満たされると急速に減速する。しかし、保圧プロセスが用いられている場合には、その後も数秒間は材料がゆっくり前進する様子がわかる。これが保圧プロセスによる補償流動である。補償流動は保圧条件、特に保圧力の大きさによって変化するが、Fig. 4中に示すように、その影響は補償流動の速度ではなく流動の継続時間のみにおよぼ傾向が見られる。このことは保圧プロセスによる補償流動が金型内材料の圧縮性のみによって生じているのではないことを示唆している。すなわち、もしこの補償流動が材料の圧縮性のみで生じているのであれば、保圧開始(充填完了)直後に集中して流動が生じるはずであるし、その速度は保圧力に直接関係したものになるからである。ただし、このことは保圧プロセスによる補償流動に金型キャビティ内材料の圧縮性が寄与しないということを示すものではない。すなわち、実際の射出成形加工では、保圧力は成形サイクル全体にわたって印加し続けられるわけではなく、次の成形工程の準備のためにある時刻に終了する。Fig. 4の測定条件では成形開始後10sで保圧が終了するよう設定されているが、その際にキャビティ内の材料にはきわめて速い逆流が生じている。これはキャビティ内で圧縮されていた材料が保圧力の低下にともなって膨張し、ゲートから外部へ漏れ出すためである。

補償流動の根本要因は保圧プロセス中の金型キャビ

Fig. 5. Residual birefringence (or strain) frozen in the molded near the gate: injection temp. $T_i = 503$ K.

ティ内材料の冷却・収縮にあるが、これについては第3章で詳しく述べよう。

2.3 成形材料内のひずみの発生状況

プラスチック成形加工を難しくしている要因が、材料の粘弾性的性質と材料の冷却・固化にともなう収縮であること、後者による成形精度の低下を抑える手法の一つが保圧プロセスであることは既に述べた。しかし保圧プロセスにおいても、扱っている材料が粘弾性的性質を有しているプラスチック材料である以上、前者による障害も問題となるのみならず、後者の要因による障害を抑制するために前者による障害を増大してしまうことがある。ここでは保圧プロセスによる前者の要因に基づく障害の増大状況とその原因を、光弾性法による材料内のひずみ・分子鎖配向状況の可視化結果をもとに簡単に述べる。

Fig. 5は金型ゲート近傍の成形材料内に残留するひずみの様子を、保圧プロセスを用いずに成形した場合と用いた場合とで比較したものである。これらの写真(ビデオ映像から起こしたものであるため、解像度が低い点にご容赦いただきたい)は材料内の複屈折(光学的異方性)の程度を表す等複屈折線で、直感的には縞の数が多いほど内部に存在するひずみや分子鎖配向が大きいと考えて良い。Fig. 5に示したゲート近傍の成形品内に残留する複屈折を比較すると、保圧プロセスの使用によって成形品内の光学的異方性が格段に増加していることが良くわかる。これは保圧力が印加された影響であるが、単に圧力による材料の圧縮に

Fig. 6. Developing behavior of the birefringence within the polymer melt during filling and packing-holding processes: injection temp. $T_i = 503$ K, packing-holding pressure $P_h = 152$ MPa.

よって生じた現象ではない。

この現象を理解するためには、保圧プロセス中の材料内の複屈折分布の変化を連続的に観察する必要がある

ある。Fig. 6は保圧プロセス中のゲート近傍の材料内の複屈折の可視化結果の連続写真であるが、ゲート近傍の材料内のひずみは材料に圧力が印加される保圧開始直後に増大するのではなく、保圧プロセスを通して徐々に増大していき、特に保圧力が取り除かれる保圧終了時 (Fig. 6 (e)) に急激に大きくなっていることがわかる。これは冷たい金型壁によって継続的に冷却される材料内に Fig. 4に示したような流動が生じるため、材料の温度が低下するほど内部のひずみや分子鎖配向が緩和し難くなる高分子材料の特徴によるものである。

3. 材料の振る舞いと成形不良

保圧プロセスによって金型キャビティ内に材料の流動が生じること、それによって成形品内に残留するひずみや分子鎖配向が増大することが前章の可視化結果から確認された。しかし、前述のように保圧力による金型内材料の流動挙動は材料の圧縮性のみでは説明できないから、これを考えるためにはいわゆる P - V - T の概念に立ち返る必要がある。

P - V - T ダイアグラムは材料の比体積 (V) の圧力 (P) と温度 (T) に対する依存性を示したもので、金型キャビティ内の材料の振る舞いは、このグラフの上で射出成形プロセス時々刻々の圧力と温度をプロットしていくことで予測することができる。例えば、Fig. 7はポリスチレン樹脂の P - ρ - T ダイアグラム (ρ は材料の密度で、比体積 V の逆数) を模式的に示したものである。グラフ中の細曲線は材料の密度を圧力の関数として表したものであり、パラメータは材料の温度を示している。

いま、射出成形機の可塑化塔から金型に設けられた流路を通して金型キャビティに射出された材料の振る舞いを考えてみよう。金型キャビティ内に至った材料は、それまでの流路に於ける圧力損失や冷却によって可塑化塔ノズルから出た直後の材料 (Fig. 7中A点) とは異なった状態にある (B点)。金型キャビティが熔融材料で満たされると、材料の流動がほぼ停止するから、流動にともなう圧力損失が解消され、材料の圧力は射出圧力 (あるいはその直後の保圧力) になる (B→C点) が、この圧力上昇は瞬時に起こるからこの間の冷却にともなう温度低下は無視でき、(材料の断熱圧縮による温度上昇を無視すれば) B点とC点は同一の温度の曲線上にある。その結果、金型内材料の密度が上昇することになるが、金型キャビティの体積は一定

Fig. 7. Polymer behavior on the P - ρ - T diagram during the entire injection molding process. P , pressure; ρ , density; T , temperature.

であるから、金型キャビティ内に充填されている材料の質量が増加する、すなわち金型キャビティ内へ外部から材料が流入してくることになる。これが保圧力に基づく材料の圧縮による補償流動である。

さて、前章で述べた金型内材料の流動挙動の可視化結果が示すように、保圧プロセスによる補償流動は数秒オーダーの比較的長い間、継続的に生じる。このことは保圧による補償流動が、金型内材料の瞬時の圧力上昇による圧縮のみによって生じているのではないことを示している。すなわち、継続的に生じる補償流動の原因は保圧プロセス中の金型内材料の冷却にある。保圧プロセスは通常数～10数秒間継続し、その間、金型ゲートには保圧力が印加され続ける。この間に金型内材料が冷却され温度が低下すると、材料は収縮して密度が上昇しなければならない (Fig. 7中のC→D点) から、これを補償するように材料の流動が生じる。これが保圧による補償流動が継続する理由である。

それでは保圧力の大小によって補償流動の継続時間が変化するのは何故であろうか。これを考えるためには、金型内を補償流動によって移動する熔融樹脂が保圧プロセス中に徐々に冷却され固化していくことに注意しなければならない。すなわち、金型内で冷却された材料の収縮を補償するためには、冷却によって時間の経過とともに徐々に粘くなっていく材料を流動させねばならないが、保圧力が小さいと冷却があまり進まない (粘度が比較的低い) うちにその流動抵抗に保圧力が打ち勝てなくなり、逆に保圧力が高い場合には時間が経過してより粘度の増した材料でも流動させられ

る。それ故に、補償流動の継続時間が保圧力の大小によって変化するのである。

一方、保圧プロセスが終了し、金型ゲートに印加されていた保圧力がなくなると、金型内の材料は膨張し、ゲートから漏れ出す (D→E点)。この流動もきわめて短時間のうちに生じるから、(材料の断熱膨張による温度低下を無視すれば) D点とE点は同一温度の曲線上にある。E点の圧力が大気圧と保圧力の間のどの圧力になるかは、材料が漏れ出す流路の圧力損失の大きさ (現実には流路幅の狭いゲート部分の圧力損失の大きさ) によって変化するが、このときも材料の粘度が冷却の程度、言い換えると時間の経過によって変化することに注意する必要がある。つまり、保圧プロセスの長さや金型内材料の冷却の程度によってE点の位置が間接的に制御される。

このE点における材料の密度は成形完了後の材料 (成形品) の性質を決めている。すなわち、保圧終了後は金型内材料が冷却され収縮してももはや新たな材料は金型キャビティ内に補填されることはないから、金型内の材料の質量 (Fig. 7では材料の密度) は一定のまま温度と圧力だけが低下していく (E→F点)。成形品が完全に冷却され金型から取り出されて常温・常圧となったときの材料の密度 (G点) とF点の密度とが異なると、成形品にひずみが生じることになる。例えばF点の密度がG点の密度より小さいということは、金型内に充填された材料の質量が不足していることを意味している。金型内材料の過不足は成形品の形状をひずませるから、このひずみを抑制するという保圧プロセス本来の目的が果たせないことになる。すなわち、Fig. 7のF点の密度をG点のそれに一致させることが保圧プロセスによって成形不良を抑止する上での必要条件であると言える。

Fig. 7のような P - V - T (P - ρ - T) ダイアグラム上での保圧プロセスによる金型内材料挙動は、様々な成形条件によって変化する。上で述べたように保圧プロセスによって材料の収縮に基づく成形不良を抑止するための必要条件はF点とG点の材料の密度を一致させることであるが、F点に至るまでの道筋も成形品の品位、成形不良に深く関連している。2.3節で述べた成形品内のひずみの発生は金型内材料の流動に呼応して生じているが、それが成形品に残留する程度は材料の温度が低下するほど大きくなる。したがって、Fig. 7の材料挙動の道筋のうち特に材料の冷却が進んだ材料内に生

じるD→E点の流動は、Fig. 6 (e) に示すとおり成形品内に大きなひずみを残すことになるから、これを小さくすることが重要である。すなわち、Fig. 7のF点の密度をG点のそれに一致させつつ、D→E点の流動を小さくすることが保圧プロセスを成功させる必要・十分条件である。

4. おわりに

本稿では、高分子射出成形加工の保圧プロセスにおける金型内材料の振る舞いとそれによる成形不良改善機構について概説した。ここで述べたように、高分子射出成形加工を圧力の観点からながめなおしてみると、材料の挙動の詳細が見えてくる。

射出成形で成形される熔融材料は、成形品を形づくる材料であると同時に、成形のための圧力を伝える作動流体でもある。このような見方をすると、この作動流体は金型内で徐々に冷却され体積が減少していくとともに粘度が上昇するという通常の圧力伝播媒体にはない特徴を有しており、このことが射出成形の金型内材料の振る舞いを複雑なものにしている。しかも圧力作動流体の体積収縮と粘度上昇は、金型内材料の冷却という現象によって間接的に支配されているため、実際の射出成形加工に携わる技術者は金型内材料の振る舞いを制御するために大いに苦心しているのが現状である。この意味で、圧力の観点から射出成形加工を見る研究者が増えることは、高分子成形加工学の発展にきわめて有益であるといえる。本稿がそのための契機になれば幸いである。

参考文献

- [1] 黒崎晏夫, 佐藤 勲, 金 亨洙: 成形加工, 4-4, 256-264 (1992), "射出成形の保圧過程に生じる金型内樹脂流動の可視化観察と成形品の残留ひずみに与える影響".
- [2] 水野 渡, 前川善一郎, 濱田泰以, 泊 清隆: 成形加工 '90, 197-198 (1990), "射出成形の保圧過程における樹脂圧力挙動について".
- [3] G. Titomanlio, M. Saiu: Polymer Processing Society, 7th Annual Meeting, 7, 277-278 (1991), "Simulation of the injection molding process – the packing-holding stages for crystalline polymers".

[1996年9月4日受理]