

要 旨

射出成形ランナーの設計では、ランナー内での樹脂の圧力損失を事前に見積っておくことが重要である。また、多数個取り成形の場合には、さらに樹脂の充填バランスの評価も必要となる。これらの評価に対し、射出成形CAEの樹脂流動解析ソフトは有効なツールである。しかし、これまでに開発された樹脂流動解析ソフトの多くは、ランナー部を1次元要素によりモデル化して解析を行うため、充分な解析ができなかった。そこで、我々は解析の高度化を目的に、3次元樹脂流動解析ソフトRemylop-Flowを開発した。本ソフトではランナー部も3次元要素により解析できるため、詳細な樹脂流動の予測が可能である。本報では、従来のソフトで予測が困難であったランナー曲がり部での圧力損失(曲がり損失)および等距離ランナー系での充填アンバランスの解析を3次元で行った。その結果、いずれの解析に対しても現象解明まで含めた詳細な解析が可能であることが示された。

キーワード 射出成形,ランナー,3次元流れ,計算機シミュレーション,圧力損失,曲がり,充填バランス,CAE

Abstract

For the design of the runner system of an injection mold, it is important to initially estimate the pressure loss through the runner system. Furthermore, an evaluation of the filling balance is necessary for multi-cavity molds. Flow analysis in injection molding CAE is a useful tool for this estimation. However, most of flow analysis programs, which have been developed, are not powerful enough for studying the flow behavior of a polymer melt in the runner system because beam elements are used for the modeling of the runner system. We have developed a full 3-D flow analysis program, called Remylop-Flow. Solid elements are available to actually model the runner system. Therefore, it is possible to simulate in detail the flow in the runner system. In this paper, the 3-D program was applied to two analyses of the pressure loss through a bend in a runner and the filling unbalance of a naturally balanced runner system. The analysis results showed enough accuracy of Remylop-Flow program for the flow simulation of the runner system.

Keywords

Injection molding, Runner, Full 3D flow, Computer simulation, Pressure loss, Bend, Filling balance, CAE

1.はじめに

プラスチックの射出成形では,溶融した樹脂を金型 内のキャビティに流し込み,所望の製品形状を成形す る。射出成形機のシリンダー内で溶融された樹脂を金 型内のキャビティに導く流路を一般にランナーと呼 ぶ。通常,ランナーは廃材となるために,その体積は 小さい方が望ましい。しかし,ランナーの断面積を小 さくして体積を減少させると,ランナーでの圧力損失 が増加し射出圧の大きな成形機が必要となる。したが って,ランナーの流路設計に当っては,この相反する 効果を適正化する必要があり,このためにランナーで の圧力損失を事前に見積ることが重要となる。また, 複数の製品を同時に成形する多数個取り成形では,製 品の品質を合わせるため,各キャビティへの樹脂の充 填を均等に保つ必要がある。そこで,多数個取り成形 のランナー設計では,ランナー内での樹脂の充填バラ ンスを事前に評価しておくことも重要となる。

一方,我々は射出成形解析の高度化を目的に,3次 元樹脂流動解析ソフトRemylop-Flow^{1,2)}をこれまでに 開発した。従来のシェル要素を用いた2次元解析ソフトでは,ランナーは通常1次元要素として扱われるため,ランナー内での樹脂流動の詳細を解析することができなかった。これに対して,Remylop-Flowではランナー部も3次元要素により解析できるため,詳細な樹脂流動の予測が可能である。本報ではランナー設計にて重要となる圧力損失および充填バランスの評価に関連して,ランナー部を1次元要素で扱う従来の解析では困難なランナー曲がり部での圧力損失(曲がり損失) および等距離ランナー系での充填アンバランスの解析をRemylop-Flowにより試みた。

2. Remylop-Flowの概要

2.1 基礎方程式

3次元樹脂流動解析ソフトRemylop-Flowで用いてい る基礎方程式を以下に示す。ここでは,射出成形の充 填中の樹脂流れを自由表面を伴う非圧縮性非ニュート ン流体の3次元非等温流れとして扱っている。

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla P \cdot \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} = 0$$
⁽²⁾

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T \right\} = \nabla \cdot k \nabla T + \vec{\tau} : \nabla \vec{u}$$
(3)

$$\log \eta = C_1 + C_2 \cdot \log \dot{\gamma} + \frac{C_3}{T}$$
(4)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)F = 0 \tag{5}$$

なお,記号は次の通りである。

 \vec{u} :速度ベクトル ρ :密度 t:時間 P:圧力 $\vec{\tau}$:応力テンソル \vec{g} :重力加速度 C_{ρ} :比熱 T:温度 k:熱伝導率 η :粘度 $\dot{\gamma}$:ひずみ速度 C_1, C_2, C_3 :モデルパラメータ F:擬似濃度 ここで, $\vec{\tau}$ と $\dot{\gamma}$ は変形速度テンソル \vec{D} を用いて以 下のように表される。

$$\vec{\tau} = 2\eta \vec{D} \tag{6}$$

 $\dot{\gamma} = \sqrt{2\vec{D}:\vec{D}}$ (7)

$$\vec{D} = \frac{1}{2} \left\{ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right\}$$
(8)

式(1),(2) および(3) はそれぞれ連続の式,運動方 程式およびエネルギー方程式である。運動方程式にお いては,樹脂の粘性が高いことから,ストークス近似 を適用し慣性項を無視した。エネルギー方程式では生 成項を導入し,樹脂のせん断発熱を考慮した。式(4) は非ニュートン流体の構成方程式として用いたアレニ ウス型べき乗モデルを表す式である。自由表面(メル トフロント)の計算には擬似濃度法を採用した。本手 法は,実在の樹脂とともに流れる仮想的な流体の濃度 つまり擬似濃度により自由表面の位置を求める手法で あり,擬似濃度の変化が式(5)の移流方程式により表 される。

2.2 離散化方法

基礎方程式の空間微分項の離散化には有限体積法を 用いた。運動方程式の時間積分には2段階の有理ルン ゲ・クッタ法を採用し,これにより計算時間の短縮を 図った。速度と圧力の補正はSimplified Marker & Cell 法により行った。また,擬似濃度の移流方程式の離散 化には,数値拡散により自由表面の位置が鈍るのを防 ぐために,Donor-Acceptor法を用いた。

3.曲がり損失解析

曲がり損失解析に使用したランナー形状をFig. 1に 示す。Fig. 1(a)は直線状のランナーであり, Fig. 1(b)は 曲がり部を持つランナーである。以後,それぞれを直 線ランナーおよび曲がりランナーと呼ぶ。両ランナー



Fig. 1 Injection molding runners: (a) straight runner, (b) bent runner.

では、曲がりによる影響のみを抽出するために、スプ ルー形状、ランナーの断面形状およびランナー中心軸 上の距離を同一にしている。検討した樹脂はポリカー ボネート(日本GEプラスチックスLEXAN141)であ り、その材料特性をTable 1に示す。成形条件は流入 樹脂の温度が290°C,金型温度が90°Cおよびスプルー 入口での流量が3.5cm³/s である。解析で使用した形状

 Table 1 Material properties of polycarbonate used in calculation.

Thermal conductivity	W/(m·K)	0.188
Density	kg/m ³	1200
Specific heat	J/(kg·K)	1840
Viscosity coefficients *)		
C_1		-5.091
C_2		-0.302
C_3		4788

 $\dot{\gamma}$: Shear rate [1/s]

*) $\log \eta = C_1 + C_2 \cdot \log \dot{\gamma} + \frac{C_3}{T}$

η : Viscosity	[Pa·s]

T: Temperature [K]



Fig. 2 Mesh models: (a) straight runner, (b) bent runner.

モデルをFig. 2に示す。Fig. 1のランナー形状をそれぞ れ一辺が1mmの立方体要素により分割し作成した。 いずれのモデルにおいても,要素数は4122,節点数は 6208である。

圧力測定位置(Fig. 1参照)における樹脂の圧力変化 の解析結果をFig. 3に示す。ここでは,圧力センサー により測定した実験結果も合わせて示している。また, 横軸の充填率はスプルーも含めて算出しているため, 圧力測定位置にて圧力が検出されるのは充填率が約 50%以降である。本図より,解析および実験のいずれ においても,曲がり部以降(充填率が約70%以降)で は両ランナーの樹脂圧力にわずかではあるが差異が見 られる。そこで,この差異を詳細に調べるために,曲 がりランナーの樹脂圧力から直線ランナーの樹脂圧力



Fig. 3 Pressure at the location of the pressure measurement.



Fig. 4 Pressure difference between the bent runner and the straight one.

を引いた圧力差をFig. 4に示す。これより,圧力差は 解析および実験ともに負の値をとり,曲がリランナー の圧力損失が直線ランナーの場合に比べ小さくなると いう結果を得た。一方,水や空気などでは曲がり部の 存在により圧力損失が増す^{3,4)}ために,同様の圧力差 を求めると正の値を示す。したがって,今回得られた 結果は水や空気などの場合とは異なり,水や空気の場 合を正の曲がり損失とすれば,樹脂では負の曲がり損 失を示すと言える。

負の曲がり損失が生じる原因を次に考察した。その 結果,次の三つの原因が考えられた。第1は曲がり部 におけるメルトフロントの形状に起因するものであ る。充填率70%におけるランナー中央断面での樹脂の 充填状態をFig.5に示す。本図はメルトフロント近傍 のみを拡大して示したものであり、樹脂が完全に充填 した要素を灰色で表している。曲がり部にある樹脂で は曲がった方向に壁が無く,直線ランナーにおいて両 側にある壁の片方が無くなった状態に相当する。した がって,曲がリランナーでは壁から受ける流動抵抗が 直線ランナーに比べて半減し,負の曲がり損失が生じ たと考えられる。第2の原因は樹脂の流動距離に起因 したものである。充填率99.5%におけるランナー中央 断面での樹脂速度の絶対値をFig. 6に示す。本図は曲 がリランナーの曲がり部付近とそれに対応する直線ラ ンナーの部分を拡大して示したものである。速度分布 より,曲がりランナーでは曲がり部のコーナーに速度 の低い領域が現れ,主流はランナーの中心軸上よりも 内側を通過している。このため,流動距離は直線の場 合よりも短くなり,これに伴う圧力損失の低下の結果, 負の曲がり損失を示したものと考えられる。第3の原 因は樹脂の粘度変化によるものである。充填率99.5% におけるランナー中央断面での壁面近傍の樹脂粘度を



Fig. 5 Simulated flow fronts when the polymer reached the bend: (a) straight runner, (b) bent runner.

Fig. 7に示す。横軸に表した距離は,それぞれのラン ナーについてスプルー側のランナー端部から反スプル ー側のランナー端部までの距離である。Fig. 7より, 曲がリランナーの曲がり部以降では壁面近傍の樹脂粘 度が直線ランナーに比べ低下している。このような粘 度低下は壁からの流動抵抗を減少させ,圧力損失を低 下させる。したがって,この壁面近傍での樹脂粘度の 低下により,負の曲がり損失がさらに拡大されると言 える。

4.充填アンバランス解析

複数の製品を同時に成形する多数個取り成形におい て、インレット(樹脂の流入口)から各キャビティま での距離が等しい等距離ランナーでは、通常いずれの キャビティも同様に充填されるものと予想される。し かし、実際にはキャビティの位置により充填状況が異 なる場合がある。これが等距離ランナーの充填アンバ ランスである。その一例をFig.8に示す。この例はポ リカーボネートを用いた8個取り成形により得られた ものであり、インレットに近いキャビティが速く充填 している。また、他の樹脂を用いた場合でも同様のア ンバランスが観察されている⁵⁾。そこでRemylop-Flow を用いて本現象の解明を試みた。

解析で使用した形状モデルをFig.9に示す。ここではFig.8に示したランナーの分岐部を模擬した形状を



Fig. 6 Calculated distributions of the absolute value of velocity : (a) straight runner, (b) bent runner.

特

集

考え,この形状の左右および上下の中央に対称面を設 けた1/4モデル(Fig.9のメッシュ部分)を作成した。 要素分割には一辺が1mmの立方体要素を用い,要素 数は7790,節点数は10616である。対象とした樹脂は 前章と同じポリカーボネート(日本GEプラスチック スLEXAN141)である。成形条件は流入樹脂の温度が 270°C,金型温度が80°Cおよびインレットでの流量が 30 cm³/s である。

解析より得られた樹脂の充填状態をFig. 10に示す。 黒い部分が樹脂を表している。これより,樹脂の充填 はインレット側のランナーが速く,Fig.8に示した実 成形の結果を定性的ではあるが,解析からも再現でき た。そこで解析結果に基づき,充填アンバランスの発 生原因を考察する。まず,ランナー中央断面での樹脂 の温度分布をFig. 11に示す。青色から赤色になるに 伴い,樹脂温度が高くなることを表している。また, 解析領域はカラー表示の部分であり,灰色の部分は解 析領域に対して対称な部分を表す。Fig. 11より,イン レットから2方向に分岐するまでの区間(以後,導入 区間と呼ぶ)では,壁面近傍にて樹脂の温度が高くな っている。これは,壁面近傍の高いせん断速度により 樹脂のせん断発熱が生じたためと考えている。導入区 間以降の温度分布としては,導入区間の壁面近傍で高 温になった樹脂が壁を沿うように流れるために,イン レット側のランナーでは高温に,反インレット側のラ ンナーでは低温になる温度分布を示している。次に, 樹脂粘度の同様の分布図をFig. 12に示す。ここでは通 常とは逆に,赤色から青色になるに伴い,樹脂粘度が



Fig. 7 Calculated viscosity profiles near the side walls.



Fig. 8 Example of filling unbalance.



Fig. 9 Mesh model for the simulation of the filling unbalance.



Fig. 10 Calculated filling pattern.



Fig. 11 Calculated temperature distribution.



Fig. 12 Calculated viscosity distribution.

高くなることを表している。本図より,導入区間以降 の部分では樹脂温度の高いインレット側のランナーに て樹脂粘度が低くなっている。したがって,樹脂はイ ンレット側のランナー内を流れやすくなり,これによ リインレット側が速く充填するアンバランスが生じた ものと考えられる。

5.まとめ

3次元樹脂流動解析ソフトRemylop-Flowにより,射 出成形ランナーの曲がり損失解析および充填アンバラ ンス解析を実施した。その結果,本ソフトによりラン ナー内の詳細な樹脂流れを解析することができ,樹脂 流動に関連した現象の解明にRemylop-Flowが有効な ツールであることが示された。

謝辞

本研究を行うに際し,実験面でご協力頂きました (株) デンソーの方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 井上良徳, 松岡孝明: 日本レオロジー学会誌, 21, (1993), 175
- 井上良徳,山本智,東智美,松岡孝明:成形加工シンポジア '95, (1995), 111
- 村田進,小川徹,三宅裕共訳:空気力学実験法,(1970),115, 朝倉書店
- 4) 輸送工学ハンドブック, 植松時雄, 池森亀鶴, 森芳郎, 伊藤四郎編, (1966), 152, 朝倉書店
- 5) 横井秀俊, ほか4名: 成形加工'92, (1992), 207 (2000年10月30日原稿受付)

著者紹介



 井上良徳
 Yoshinori Inoue

 生年:1962年。

 所属:材料モデリング研究室。

 分野:射出成形CAEソフトの開発。

 学会等:日本レオロジー学会,プラスチック成形加工学会,高分子学会会員。