ホットランナにおけるスピア発熱密度による樹脂境界層形成*

横山 孝男^{*1}, 佐藤 敦^{*2}
伊藤 忠一^{*3}, 吉田 卓司^{*4}Formation of Flow Interface of Resin around Spear Implemented
in Hot-Runner Varied by Heating DensitiesTakao YOKOYAMA, Atsushi SATOH,
Chuichi ITOH and Takushi YOSHIDA

The SPEAR-SYSTEM, one of the Hot-Runner molding, is rational and economical thermal valve-gate system. A resin around the SPEAR which is heating object like a spear, sorts into the solidification-layer and flow-layer. The former takes important role of insulator, then prevents a resin leak at molding. Though location of the interface of solidification varies due to flow and thermal condition, quantitative treatment is not applied yet. Engineers have just depended on their experiences for thermal design as to Hot-Runner System. In this paper we have measured temperature field inside the Runner-bush and location of the interface, on the other hand established a numerical code and compared both values. As a result, we have confirmed agreements between the experiment and the numerical. Therefore we could forecast what happens in flow and temperature field around Spear under a variety of conditions.

Key Words: Heat Conduction, Solidification, Injection molding, Interface, Resin, Hot-Runner

1. 緒 言

プラスチックの成形加工法の中でもホットランナ成形はコールドランナ成形と異なり材料のほとんどを製品とすることができ、ゲート処理などの二次加工を必要としない経済的かつ合理的な成形加工法である。しかし一方では伝熱回路が複雑であることなどから微妙な温度制御が要求され、これまでも著者らを含め実験や数値解析などさまざまな角度から焦点が当てられてきた。しかしながら、それらは著者によっても行われてきた Hele-shaw 流れの式に基づいた解析⁽¹⁾や形成過程の樹脂の冷却を抑制し成形品に生じる不良現象を解決する試み⁽²⁾、金型・樹脂間熱伝達率⁽³⁾のようにキャピティを扱ったものがほとんどであり、ランナ部のポリマ温度を制御する重要部分について解析された例はほとんど見当たらない。このホットランナ成形に属するスピアシステムでは特に重要で、とりわけスピア

周りに形成される溶融流動層はもとより、断熱や樹脂漏れ防止などの重要な役割をもつ固化層についても熱流動系を複雑にするばかりか不適切な場合にはその障壁となるにもかかわらず、十分にその把握がなされ熱設計が行われているとはいえない。そのため、温度や圧力などの制御は現場の技術者の勘や経験に頼っているのが現状である。

スピアシステムの原理を図1に示す。ゲート部の開閉を制御するチップヒータ、ランナ部の樹脂を溶融状態に保持するボデーヒータの二つのヒータが内蔵されたやり状の発熱体がスピアであり、このスピアをランナ部の樹脂温度制御に用いる成形法がスピアシステム

Fig. 1 Spear system

* 原稿受付 1998年4月1日。

^{*1} 正員, 山形大学工学部 (☎ 992-8510 米沢市城南4-3-16)。^{*2} 正員, 富士ゼロックス(株) (☎ 107-0052 東京都港区赤坂2-17-22)。^{*3} 世紀(株) (☎ 992-1125 米沢市万世町片子4364)。^{*4} トップランレーベル(株) (☎ 111-8577 東京都台東区浅草橋5-20-8)。

E-mail: tb126@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

である。スピアは図1のようにゲート部付近に取付けられ、型締め時にはチップヒータを発熱させてゲート部の樹脂を瞬時に溶融させることによってキャビティに樹脂を押し出し、型開き時には冷却孔からの冷却によって固化しゲート部を閉じる。

本研究の最終目標は種々射出条件に追従する適正なホットランナの熱設計にあるが、本論ではその礎となるホットランナ部熱流動についての実験および工学上有用な数値解析を行う。はじめに、成形時の高温・高圧の条件に耐えうるセンサを開発しランナブッシュに埋め込んで成形時の樹脂流動・固化層温度の測定を試みる。次に、樹脂の色替えによって結果的にホットランナ内に形成させた固化サンプルから固液界面位置を実測する。数値解析では流線渦度法による流れ場解析をベースに差分法を用い実験結果との比較検討を行う。そのうえで本シミュレーションの効用として、ポデーヒータ出力分布に対応する固液界面位置変化などの机上予測を行う。

記号表

AT : Δt [h] 後の温度 $^{\circ}\text{C}$

Af : Δt [h] 後の固相率

c : 比熱 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

f : 固相率

H : ヒータ出力 W

PT : 仮の温度 $^{\circ}\text{C}$

Pf : 仮の固相率

R : 壁面距離 m

r : 半径方向 m

T : 温度 $^{\circ}\text{C}$

t : 時間 s

T_{melt} : 樹脂の融点温度 $^{\circ}\text{C}$

u : 軸方向流速 m/s

v : 半径方向流速 m/s

x : 軸方向 m

Δh_s : 潜熱 J/kg

Δt : 微小時間 s

λ : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

ρ : 密度 kg/m^3

μ : 粘度 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

ω : 渦度 s^{-1}

Ψ : 流れ関数 m^2/s

A^+ : 溶融潜熱超過時の温度 $^{\circ}\text{C}$

A^- : 凝固潜熱超過時の温度 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Analytical model of hot-runner

2. 理論解析

数値解析は差分法を用い、座標系は円筒座標系における軸方向と半径方向の二次元とする。図2に実際に実験で使用したDタイプスピアSTT-13 DBX[世紀(株)製]を模した解析モデルを示す。ランナブッシュ壁温度 T_r 、マニホールドと呼ばれるランナ入口での樹脂流入温度 T_b については一定とし図2のポデーヒータにはa, b, c各領域ごとに発熱密度分布付与可能とするが時間変化は考慮しない。実験において使用したセンサが周囲の樹脂およびスピア内部から熱を奪い温度を低下させることが予想されるため、センサを考慮したシミュレーションも並行して行う。

ホットランナ部を流れる樹脂は非圧縮、物性値一定の層流とし、流線・渦度法を用いてニュートン流体近似で解析する。流れの非ニュートン性について解いた数値シミュレーション例⁽⁴⁾は多々あるが、本解析モデルのように樹脂流動層が発熱体に接しつねに高温に保たれる場合、粘性は極めて低くニュートン流体近似の仮定が成り立つと考えられる。しかしながら、固相近傍では高い粘弾性を示しこの仮定は成り立たない。また、結晶性高分子の成形過程では、溶融された材料は高圧、流動による応力下で冷却により結晶化する。近年、射出成形過程の結晶化について、冷却速度、圧力およびせん断応力が結晶化に及ぼす影響⁽⁵⁾や流動中の結晶化⁽⁶⁾、大形射出成形過程での充てん中の結晶化⁽⁷⁾などのシミュレーションが試みられているが、本解析コードは実用性を旨とするためランナブッシュ内の熱流動現象を大局的にとらえることを主眼とする。よってこれら固相近傍樹脂の粘弾性、結晶化挙動は今回は考慮しない。

樹脂内の支配方程式のうち連続の式、運動方程式およびエネルギー式は以下ようになる。なお、 f は固相率とし要素内において固相が占める体積比と定義する。すなわち、 $f=0$ の要素は液相、 $f=1$ は固相でその間の値をとる要素を固液混合相とし、その要素内での界面はその途上にあるとだけし、要素内の平均的固相率変化だけを考慮する。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \nu \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\nu}{r} \omega = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \omega \right) \quad (1)$$

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \quad \nu = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\Delta h_s}{c} \frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

各要素において式(4)から仮の温度 PT ・固相率 Pf を計算し、仮の温度が融点をまたぎ超える場合などそれぞれの場合で表1のように場合分けし $\Delta t[h]$ 後の温度 AT , 固相率 Af を決める。ただし、 Λ^+ , Λ^- は以下で定義する。

Table 1 Sorting of solidification related to temperature

f	PT	Pf	AT	Af
1	$PT \geq T_{melt}$	$Pf \leq 0$	Λ^+	0
		$Pf > 0$	T_{melt}	Pf
	$PT < T_{melt}$		PT	1
0	$PT \geq T_{melt}$		PT	0
		$Pf < 1$	T_{melt}	Pf
	$PT < T_{melt}$	$Pf \geq 1$	Λ^-	1
$0 < f < 1$		$Pf > 1$	Λ^-	1
		$0 < Pf < 1$	T_{melt}	Pf
		$Pf \leq 0$	Λ^+	0

Fig. 3 Flow-chart

$$\Lambda^+ \equiv T_{melt} + \frac{\Delta h_s}{c} (0 - Pf) \quad (5)$$

$$\Lambda^- \equiv T_{melt} + \frac{\Delta h_s}{c} (1 - Pf) \quad (6)$$

フローチャートを図3に示す。射出・固液界面の移動の有無、流れ場の収束の各要因により必要に応じて流れ場を計算し、その後に温度・固相率の計算を行う。解析に用いるポリプロピレン樹脂の物性値 λ , c , ρ は線形近似の温度依存性とし、それ以外は一定としおもなものを表2に示す。

3. 樹脂温度測定とサンプリング

3.1 樹脂流動・固化層温度測定 供試樹脂はポリプロピレンである。実験ではセンサを埋め込む穴を設けたランナブッシュを用意し、それを成形機に組み込んで成形時の固化層の温度を測定した。供試射出成形機は一般的なもので、型締力は100 tである。測定用に開発したセンサを図4に、ランナブッシュを図5に示す。

センサは熱電対(Kタイプ)をランナブッシュ内の数百 atm(数十 MPa)に及ぶ高圧の条件に耐えうるようにセラミックスボンドにガラス粉をまぜてコの字形に折り曲げたステンレス板間に固定し、それをさらに

Table 2 Physical properties in calculation (Polypropylene)

Melting point[°C]	165
Latent heat[kJ/kg]	238.6
Viscosity[kg/(m·s)]	200

Fig. 4 Thermo-sensor

Fig. 5 Configuration around spear

ランナブッシュに固定した。その場合センサはフィン状に突出した形状となりシミュレーションにおける周方向に変化がないドーナツ状のものとは異なる。実験ではセンサによるフィン効果下の温度場測定となるが、従来の実測データがほとんど見当たらない実状からして極めて重要な知見になると考えられる。シミュレーションではセンサを考慮する際、周方向の熱損などは無視となるが、半径方向のみでもフィン効果の大半は推察できる。

3・2 実測温度場 図6は射出成形時においてボデーヒータ温度を変化させた場合のランナ樹脂温度の経時変化をまとめたグラフである。センサはスピアから1 mmまで突き出し、測定点はスピア表面から2, 4, 6 mmの位置となり、軸方向ではスピア先端から35 mmと55 mmの距離にて比較した。成形サイクルは30 sとしている。樹脂の温度分布がボデーヒータの影響を受けているのが読取れる。図7に射出成形時において成形サイクルを変化させボデーヒータを250°Cとした場合のランナ樹脂温度の経時変化を示す。グラフを見ると成形サイクルが短いほど樹脂温度が高くなり、長いほど樹脂静止時の温度分布に近づいている。これは、成形サイクルが短いほど単位時間当たりには射出される樹脂の量が多く、投入される熱量も多くなるためであり、実験では自らのフィン効果の影響は

あるものの供試センサは極めて妥当な温度応答をしていることがわかる。

3・3 固液界面サンプリング 実際の固液界面の分布を調べるために次のようにしてそのサンプルをとった。よく用いられる方法であるが、白い樹脂で数十回成形を行ってほぼ所定の固液界面を形成させ、図8に示すように半熔融層を含む液相だけを色別して見分けるためにその直後に黒い染料を混入した樹脂に切換える。同じ条件で成形を繰返したのちにすべてを固化させ、それを取り出せば、固化層が白、流動層が黒、そして半熔融層が混濁色領域として区別される。サンプルを取り出し切断したあと表面を仕上げ、固液界面位置を測定し中心軸からの距離としてまとめた。

4. 実験結果と解析結果との比較

図9はゲートから35, 55 mmの位置で図6および図7の三角印(△と▲)条件で実験した結果と解析結果を半径方向に比較したもので、ボデーヒータ温度は250°C、サイクルは30 sである。センサを考慮しない解析結果を見ると流入樹脂の到達とともに流動層で流入温度の200°Cとなっており、熔融層の樹脂が流れ込

Fig. 6 Resgn temperature related to Body-Heater

Fig. 7 Resgn temperature related to shut-cycle

Fig. 8 Schematic view of sampling

Fig. 9 Comparison of the experiments to the numerals in radius direction

んできた樹脂と入れ替わっている様子がわかる。センサを考慮していない解析結果と実験結果を比較するとスピア表面をはじめ、樹脂部についても実験値のほうが低めの値になっているが、数値解析でもセンサを考慮すると両者の値がほぼ一致した。センサ考慮の場合でも流入孔に近い $x=55\text{ mm}$ の位置での解析値では樹脂温度が流入温度の 200°C 近くになっているが、センサを超えた $x=35\text{ mm}$ の位置では 170°C 程度である。これもセンサによる温度低下と考えられる。

図 10 はボデーヒータ温度を 250°C 、サイクル時間を 30 s とし軸方向位置をゲートから $x=55\text{ mm}$ と固定して、半径方向 3 点における経時変化を実験・解析間で比較したものである。センサがない場合の解析値を実線、センサを考慮した場合の解析値を点線、実測値を黒点で示した。周方向熱損は考慮外ながらも局所的センサの影響が 3 点において加味されたことにより実測値に近づいていることがわかる。

次に外乱を防ぐため温度センサを取り去って色替法により採取した実験サンプリングによる固液界面実測値とセンサなし解析値との比較例を図 11 に示す。スピアには図 11 に示すように中心軸を挟んで対称となる位置に二つの樹脂流入孔があるため、周方向でも固液界面位置が異なるが、実測値からもその影響が見ら

れる。しかし、流入孔から 20 mm ままで、それ以降スピア先端にかけては周方向変化は見られない。樹脂流入孔からスピア中間部にかけての流動層は実測値に対して解析値が若干狭くなっているが、これはポリプロピレンのような結晶性樹脂は融点よりも低い結晶点で融解する傾向があり、そのため解析値よりもいくぶん広い領域まで流動した結果と考えられる。また実測値では半熔融層と呼ばれる流れが停滞した半濁色領域も流動層に含めたため実際に比べ広めに実測されたことも要因である。それらの点を考慮すれば数値解は実測値を再現しており、特にスピア中間部に当たる $x=35\text{ mm}$ 付近から先端にかけての領域では実測値と解析値との間に実用上十分な一致が見られる。

5. 机上計算

ホットランナ内樹脂熱流動解析値が固液界面形成を含め実験結果とほぼ一致したので、いくつかの成形条件下での形成固液界面結果の差違をシミュレーションで例示する。

5.1 ボデーヒータ出力による固液界面差違 ボデーヒータの出力は軸方向で図 12 の a, b, c の領域のように割り振るようになっている。通常はボデーヒータとチップヒータの間の領域を加熱するために a 領域は b 領域の約 3 倍の出力を割り当てるが、その効果を確認するため a 領域に出力を与えないで通常の場合と比較してみた。結果を図 12 に示す。ランナブッシュ温度を 80°C 、チップヒータ出力を 0.5 W とし、樹脂は静止状態としている。a 領域に出力を与えない場合、通常の場合に比べて最大 30°C 近くスピア表面温度が低くなっており、また、熔融層についてもスピア中間部から先端にかけて狭くなる傾向が見られる。この領域はスピアに沿って進んできた樹脂の流れ方向が急激に変化する領域でもあり、a 領域に多くの出力を

Fig. 10 Comparison of the experiments to the numerals of sequential profile

Fig. 11 Comparison of the experiments to the numerals of interfaces between the two phases

Fig. 12 Surface temperature of Spear and location of interface between two phases

Fig. 13 Deviation of interface around injection

割り当てることによって流動層を広くし圧損を最小限に抑える効用が推察される。

5・2 射出に伴う固液界面の揺れ 図13は、成形を想定したシミュレーションにおいて一サイクル内の固液界面の揺れを例示したものである。ランナブッシュ温度を80°C、ボデーヒータ出力を、80 W、チップヒータ出力を0.5 Wとし、成形サイクルは30, 15 sとした。それぞれのサイクルで、射出の前後で固液界面が移動している様子が確認できる。また、サイクルが異なる場合で比較すると、サイクルが短い15 sのほうが単位時間当たりの投入熱量が多いため流入樹脂がぶつかる入口や先端から5 mm から20 mmの付近で流動層が若干広がるのが再現されている。

図14は成形を想定したシミュレーションにおいて固液界面がやがて周期定常へ至るまでの違いを示したものである。各ヒータ出力や温度条件は図13の条件と等しく、比較はゲートから4, 6, 8, 10, 18, 72 mmの位置で行った。グラフで実線は成形サイクルが30 sの場合で、点線が15 sの場合である。また、グラフの横軸は射出を開始した瞬間を0 sとした。サイクル30 sの場合を見ると射出の直後に流動層が広がり、徐々に冷却されて元の流動層に戻っている。それに対してサイクル15 sの場合は、始めの数回は射出後に流動層が広がっても元に戻らずに次の射出でさらに流動層が広がる傾向が見られる。サイクルが短い場合、上述のように単位時間当たりの投入熱量が多く、冷却されて流動層が狭まる前に次の射出となってしまうため、周期定常化が遅れるわけである。その他、例えば成形サ

Fig. 14 Movement of interface since the injection

イクルによる差違、樹脂吐出し量が変わった場合の固液界面変動に対応した加熱密度の見直しなどが本コードによって行える。

6. 結 論

フィン効果などの外乱を受けながらも試作した温度センサにより成形時のホットランナ部実樹脂温度場をとらえることが可能となり、さらにニュートン流体近似による熱流動数値解析を付加することにより固液界面実測値も実用上机上再現することができた。本解析コードは二次元性、結晶点未考慮などで不十分ではあるが、諸条件による固液界面位置やスピア表面温度などが実用上再現・予測でき、ホットランナ部の熱設計への寄与へと結び付けることが可能である。

文 献

- (1) 横山孝男・ほか4名, 機論, 58-555, B(1992), 221-227.
- (2) 斎藤卓志・ほか2名, 機論, 63-613, B(1997), 212-220.
- (3) Kim, T. G. and Lee, Z.-H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 40-15 (1997), 3513-3525.
- (4) 石川拓司・ほか3名, 機論, 62-600, B(1996), 2957-2964.
- (5) 伊藤浩志・ほか4名, 成形加工, 6-4(1994), 265-270.
- (6) 滝本淳一・ほか4名, 成形加工, 8-10(1996), 675-681.
- (7) 伊藤浩志・ほか3名, 高分子論文集, 53-6(1996), 333-338.