樹脂流動を考慮した金型の熱解析*

横山 孝男^{*1}, 佐藤 敏哉^{*2}, 加藤 泉^{*3}
笠原 良夫^{*4}, 川村 謙一^{*5}

Heat Analysts of a Metal Mold with Resinous Flow

Takao YOKOYAMA, Toshiya SATOH, Izumi KATO,
Yoshio KASAHARA and Kennichi KAWAMURA

This study simulates cooling of a metal mold in 3-dimensions, compares it with experiments, and furthermore, attempts to establish a more precise simulation. We have analyzed heat generation at a gate and resinous flow in a cavity, and have considered the mold-temperature field in the filling process. The code enables both re-construction of 3-dimensional any practical molds with water jackets and its reform. Moving coordinates system is used to calculate the transient temperature-field in polymer-flow. As a result, we have been able to confirm agreements between the results of the experiment and the simulation. Therefore we have found that we are able to apply this program code to practical cooling process. There are still some problems in its further advancement, but this study is a foundation for cooling simulations.

Key Words: Heat Transfer, Heat Conduction, Injection Molding, Metal Mold, Hele-Shaw Flow, Cavity, Moving Coordinates System, Viscous Heat-Generation

1. 緒 言

射出成形は近年の成形技術の進歩により、成形品は大形化、精密化、高機能化の傾向にある。これに伴い適正な冷却効率を目的とした、成形時における温度場の制御が要求され、金型温度場と樹脂との冷却挙動の関係を明らかにする必要性が高まっている⁽¹⁾。この中で射出成形冷却シミュレーションは多くの機関で確立され、いくつかの市販プログラムも開発されている。しかしその詳細についてはブラックボックスのままであり、それぞれの目的や成形品に合った解析を行うためには独自のシミュレーションコードの開発が必要な状況である。この中で本研究室もこの研究に名乗りを上げ、プログラムコードの作製および実験との比較検討を始めた。

他の機関で行っている充てん解析は、ウェルドラインの位置予測など樹脂流動について重きをおき、樹脂-

金型間の境界伝熱について、金型面温度を一定としたり、樹脂流れ方向熱伝導項を省略するなど、熱輸送場については必ずしも十分な配慮を行っていない。そもそもニュートン流体近似が多く見られるが、プラスチックのような高分子流体は、温度などによる流動物性の変化が非常に大きいため、このような簡略化が適切であるかどうかは疑わしい。

本研究は最終的に成形品および金型のはん用冷却シミュレーションコードの開発を目的としているが、その途中段階として上記のことに着目し、樹脂流動時の伝熱、さらには適正な冷却効率に悪影響を及ぼしているものと思われる、ゲート部の発熱を考慮した冷却シミュレーションを行った。

著者らはまだ薄肉く形平板の単純キャビティについてしか扱っておらず、まだ初歩的な段階である。しかしながら金型の熱設計という観点からは樹脂流動については簡単な取扱いでも可能である。このような趣旨から研究を進めたところ、実験との良い一致も見たのでここに報告する。

記 号 表

2b: キャビティ肉厚 m

C_p: 比熱 J/kg

* 平成4年5月29日 第29回伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成4年3月27日.

^{*1} 正員, 山形大学工学部(〒992 米沢市城南4-3-16).

^{*2} (株)リコー(〒107 東京都港区南青山1-15-5).

^{*3} 世紀(株)(〒992-11 米沢市万世町片子4364).

^{*4} 日本フロウエア(株)(〒992-11 米沢市八幡原3-4452-25).

^{*5} HMTシステムエンジニアリング(株)(〒143 東京都大田区大森中2-21-10).

h_{pm} : 樹脂-金型間の熱伝達率 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
 h_{wm} : 冷却水-金型間の熱伝達率 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
 k_h : 流れ面内方向熱伝導率 $W/(m \cdot ^\circ C)$
 k_z : 肉厚方向熱伝導率 $W/(m \cdot ^\circ C)$
 P : 圧力 Pa
 S : 式(10)で定義される係数 $m^5/(N \cdot s)$
 T : 温度 $^\circ C$

u, v : x, y 方向流速 m/s
 $\bar{u}, \bar{v}$: 肉厚方向平均流速 m/s
 x, y : 樹脂流れ方向 m
 z : 樹脂肉厚方向 m
 $\dot{\gamma}$: ずり速度 s^{-1}
 η : 粘度 $N \cdot s/m^2$
 η_0 : ずり速度零のときの粘度 $N \cdot s/m^2$
 Λ_x, Λ_y : 圧力こう配 Pa/m
 ρ : 密度 kg

2. 理 論 式

キャビティ内の樹脂の流れを解析するための第1段階として Hele-Shaw 流れを仮定する⁽²⁾。

連続の式

$$\frac{\partial}{\partial x}(b\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(b\bar{v}) = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

熱輸送方程式

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = k_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで粘度 η は温度とずり速度に依存する。

$$\eta \equiv \eta(\dot{\gamma}, T) \quad (5)$$

またずり速度は次式で定義される。

$$\dot{\gamma} \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (6)$$

粘度の温度依存性およびずり速度依存性を図1, 2に示す。式(4)右辺第3項は粘性発熱項と呼ばれ、ずり速度の大きな成形に対する熱輸送場に影響を及ぼす。右辺第1項は一般には無視されているが本研究では考慮する。

3. 数 値 解 析

3.1 流れ場解析 流れ場の解析において実際に離散化を行うのは式(1)~(3)の3式を連立し、 $\partial P/\partial z = 0$ の条件をあてはめた次式である。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S \frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(S \frac{\partial P}{\partial y}\right) = 0 \quad (9)$$

ただし、

$$S \equiv \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz \quad (10)$$

本研究では差分法による数値解析を行った。式(9)の階差方程式の導出を以下に記述する。

図3のようなボリュームを持った要素を設定する。要素の各辺における平均流速をそれぞれ $\bar{u}(lm)$, $\bar{u}(mn)$, $\bar{v}(om)$, $\bar{v}(mp)$ とし、この要素内で質量保存則が成立する式をたてる。

図2 粘度のずり速度依存性

図1 粘度の温度依存性

図3 要素モデル

$$\bar{u}(lm)dy - \bar{u}(mn)dy + \bar{v}(om)dx - \bar{v}(mp)dx = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

また式(2), (3)と式(10)を組合せた式

$$\bar{u} = (\Lambda_x/b)S, \bar{v} = (\Lambda_y/b)S \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで

$$\Lambda_x \equiv -\frac{\partial P}{\partial x}, \Lambda_y \equiv -\frac{\partial P}{\partial y} \quad \dots\dots\dots(13)$$

を代入すると次式

$$\Lambda_x(lm)S(lm)dy - \Lambda_x(mn)S(mn)dy + \Lambda_y(om)S(om)dx - \Lambda_y(mp)S(mp)dx = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

が得られる。ここで

$$\Lambda_x(lm) \cong \frac{P(l) - P(m)}{dx}, \Lambda_y(om) \cong \frac{P(o) - P(m)}{dy} \quad \dots\dots\dots(15)$$

他の n, o, p についても同様である。また同式に示される $S(lm), S(mn), \dots$ は要素境界での値であることに注意し、その算出は隣接節点値の平均化により最終的に求める。式(14)と式(15)を組合せて $P(m)$ について展開した式を示す。

$$P(m) = \frac{P(l) \times F_l + P(n) \times F_n + P(o) \times F_o + P(p) \times F_p}{F_l + F_n + F_o + F_p} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで

$$F_l = S(lm)dy^2, F_n = S(mn)dy^2, F_o = S(om)dx^2, F_p = S(mp)dx^2 \quad \dots\dots\dots(17)$$

式(16)を逐次近似法により計算を行う。

ところで式(9)は粘度 η の関数 S を含んだ式であ

るので非線形方程式である。よって収束に注意しながら図4の方法で計算を行う。

3・2 熱輸送場解析 キャピティ内の樹脂流動は、空の状態からゲート部付近より順に満たされる、射出流れである。このときの進行する樹脂の先端を本研究ではフロントと呼ぶ。このような流れの熱輸送場解析において、通常の固定節点を設定する分割要素ではフロント近傍の温度場解析が行いづらい。そこでこの問題を解消しかつフロントの進行を把握するのに有利な方法として、移動座標系による熱輸送場の解析を採用する⁽⁴⁾。

この座標系で式(4)を変換した式は次のようになる。

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad \dots\dots\dots(18)$$

このように移動座標系における解析では、実質時間微分項を設定することにより純熱伝導問題として扱うことができる。図5にこの手法で用いる移動粒子の配置と進行を示す。

(1) 入口部(ゲート)に任意数の移動粒子を配置する。

(2) 各粒子をその点の速度で1ステップ時間に進む距離だけ移動させる。この流速値は粒子が存在する近傍における、固定節点の実流速の線形補間により算出する。

(3) 式(18)より、移動粒子の温度場を求める。

(4) 各固定節点について、樹脂が満たされているかどうか(フルノードかエンプティノードか)判断する。

(5) フルノードの固定節点については、その点を囲む近傍の移動粒子3点によるラグランジュ補間より温度を設定する。

このルーチンを必要数繰返す。

3・3 解析手順 前述したキャピティ内樹脂流動

図4 流れ場解析のフローチャート

図5 キャピティ内移動粒子の進行

は、空の状態からゲート部付近より順に満たされていく流れであるが、本研究ではまだこの条件下では行えない。そこで、本解析では入口と出口の圧力をそれぞれ一定とし、反対側より樹脂が連続的に流れ出しているとして充てん時の流れ場を計算し、この流れ場を借用して熱輸送場解析に用いた。

4. 射出成形実験

実験は、日精樹脂工業社 TYPE FS-150/355 成形機を用いて実験用金型に熱電対を埋め込み、型締め-充てん-保圧-冷却-型開き-製品取出しの一連のサイクルを、金型温度場が周期定常に至るまで連続的に行う。

4.1 実験装置 実験装置の測定系を図6に示す。金型内部に設置した熱電対をデジタルボルト計で測定し、データをフロッピーディスクに格納する。また冷却水回路の金型への入口部、および出口部にも熱電対を設置する。冷却水の流量測定には積算流量計を用い、実験開始から終了までの総流量を測定する。

4.2 熱電対設置図 図7は射出成形金型を概略化したもので、ハッチングで示された部分はキャビティである。充てんの際、固定側金型と可動側金型が密着し、ゲートからキャビティへ高圧の下で樹脂が流入

図6 射出成形実験装置

図7 金型概略図

し製品が型どられる。可動側金型を拡大したものが図8である。境界条件の設定や三次元的に温度分布の測定を行うため、この領域内に熱電対を計72点埋めこんだ。図8ではその中心部を示す。この金型に対する境界条件を図9に示す。測定の結果、領域境界面での温度はほとんど変化が見られないことから境界条件は断熱、あるいは等温とした。冷却水通路に関しては水温一定の下で熱伝達の条件を設定している。

5. 樹脂流動解析結果

Hele-Shaw 流れの特性を把握するためにキャビティ内流速分布、フロントの進行、および温度分布をそれぞれシミュレートした。5.1節ではそれぞれの特性を確認しやすい寸法の仮想キャビティについてシミュレートし、5.2節では本実験用キャビティと同じ寸法、ゲート部圧力で行った。

ここで注意しなければならないことは粘度の非線形性である。図2に示したように結局は、圧力こう配が高くなるにしたがい粘度は極端に減少する。この影響により、現段階でのプログラムコードではずり速度依存性の強い場合、高圧の下の実験は、逐次近似法の収束性が非常に悪い。

今回は、式(8)の指数 n を非線形性の強い値(0.29)

図8 熱電対設置図

図9 境界条件

にし、ゲート部圧力を実験の約 1/10 (5 MPa) にしたり、あるいは逆にゲート部圧力を実験と同じ値 (60 MPa) とし、 n の値を 1 に近づけて (ずり速度による粘性の影響を緩和して) 解析を近似した。

5・1 Hele-Shaw 流れ特性 モデルとなるキャビティは、実際の成形を想定して入口がゲートのように小さな穴になっている。また形状も本実験用金型に設けられているものと同様、薄肉平板のく形である。

5・1・1 流速分布 上記で示した試し計算における、厚み方向中心面での流速分布を図 10 に示す。流速値はゲート付近で非常に大きく、離れると圧力こう配が急激に減少し流速は小さくなる。樹脂の粘性発熱はほとんどこの地点で行われることがわかる。

5・1・2 流れ場の温度依存性 図 11 の実線は金型

図 10 キャビティ内流速分布

図 11 フロントの進行

図 12 流動時の温度分布

との熱授受により冷却されるフロントの進行を示したものである。合せて樹脂温度一定と仮定した場合の進行を破線で示す。実線は時間がたつにつれフロントの進行が鈍くなっており、樹脂の冷却による粘度上昇の影響がシミュレートされている。流動時の冷却状況を図 12 に示す。粘性発熱の影響でゲート付近の温度こう配は小さい。

5・2 η の γ 依存性を緩和した場合 本節では高分子流体に顕著であるとされる、粘性発熱について着目し、高压条件下でのその影響をシミュレートした。結果を図 13 に示す。

図 13 は実験と同じ寸法、ゲート部圧力の設定で、充てん完了直後のキャビティ内各厚み方向断面での温度分布である。境界面付近では、ゲートから離れるにしたがい冷却による温度降下が著しい。しかし境界面から少し離れた図では、粘性発熱の影響によりゲートから離れるにしたがって逆に温度上昇が見られる。これは前節のような圧力が低い条件での解析では見られなかった現象である。中心面においては、この位置での粘性発熱は零であるが、厚み方向の熱伝導によりわずかながら温度は上昇する傾向にある。

高压の下での充てん過程の樹脂の温度分布は著しい粘性発熱のため、各 z 方向の断面によって大きな違い

図 13 実験モデルでの各肉厚方向の温度分布

図 14 実験による金型温度場経時変化

図 15 樹脂流動を考慮しない解析結果

図 16 樹脂流動を考慮した解析結果

がある。この解析結果は、内部でほとんど冷却されずに充てんされていくが金型境界面では強い冷却速度にさらされる、という実感と一致する。

6. 金型温度場の実験結果と解析結果との比較

実験は冷却サイクル、冷却水温度の設定などを変化させ種々行ったが、シミュレーションとの比較で代表的に冷却水温 30°C、成形サイクル 24 s、樹脂温度 250°C の設定での実験結果を図 14 に示す。実験では 32 点の熱電対を比較対象としたが、代表的に 5 点の経時変化を示す。キャビティ下 2 mm の 32 番温度は周期定常の温度が高く、振幅も大きいことが確認できた。なお、32 番温度の振幅に“うなり”が見られるが、これは、測定周期と実験との間は微妙なずれが生じているためであり、実際の振幅は図 14 の最大振幅と同じで、ほぼ一定である。14, 20, 22 番の温度はキャビティ下の距離が同じ (15 mm) であることから似通った変化を示すが、25 番については水穴が近いので、温度上昇は他に比べて小さい。

次に数値解析結果を示す。なお解析においては、実験値との突合せから全体的に実験値と一致するよう

図 17 ゲート部発熱を考慮したキャビティ内温度分布

に、樹脂-金型間、および冷却水-金型間の熱伝達率を図 15 および図 16 中に示すような値に設定した。実験における充てん時間は 0.8 s 弱であったが、図 15 に示す解析ではこの過程を無視し、瞬間的に樹脂がキャビティを満たすという設定を施した。実験結果と比較してみるとそれぞれの位置での経時変化に酷似した結果となり、この解析プログラムコードでも本実験用金型の冷却シミュレーションに適用できることを示している。

これに対しキャビティ内の樹脂流動を考慮した場合の解析結果を図 16 に示す。樹脂流動を考慮しない場合と比べてみると、ゲート付近に位置する 14, 32 番が温度上昇が大きく、ゲートから離れた 22, 25 番は温度上昇が小さいことが確認できる。これは樹脂が先に満たされるゲート付近のほうが金型への放熱量が大きいという、現象をより反映した結果である。実験結果と比較してみてもゲート付近である 14 番の温度変化が樹脂流動を考慮しない結果に比べて近づいている。すなわち樹脂流動を考慮したことによって、本解析が実際の現象に一步近づいたものであることがわかる。

さらに実測は行えなかったが、ゲート部の発熱を考慮したシミュレーションを図 17 に示す。ゲート部発熱が樹脂の冷却速度、温度分布のむらに深刻な影響を与えていることがわかる。

7. 結 論

本シミュレーションはキャビティ内樹脂流動を連続流れで近似した解析に基づくものであるなど不十分な点が多い。しかしながら実験との一致、また樹脂流動の興味深い特性を確認できたことは、今後より高度なシミュレーション作製への手掛かりとなった。以下結論を列挙する。

(1) 本実験での金型の熱容量、および冷却水の冷却効果は、金型温度場の定常、安定化を保つのに十分である。

(2) 冷却効率の高い水穴位置算定などを目的としたほぼ実用に供する金型温度場のシミュレーションコードが作製できた。

しかしながら今後成形品の冷却挙動をより明らかなものにするためには、射出する流れ場の解析および熱伝達係数の検討などが残されている。

文 献

- (1) 後藤, 射出成形の数値シミュレーション技術, 成形加工, 2-1 (1990), 45~51.
- (2) Hiber, C. A. and Shen, S. F., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 7 (1980), 1-32.
- (3) Wang, K. K., ほか 3 名, Cornell Injection Molding Project, *Proc. I. C. Polym. Process.* MIT, (1977), 293-314.
- (4) 初井, 地下水数値計算法, (11) 2-2, 差分法と特性曲線法による物質輸送解析の応用, 地下水学会誌, 33-3 (1991-9), 177~184.