研究速報

射出成形品の繊維配向解析

(株)豊田中央研究所 松岡 孝明, 高島 淳一, 小岩井明彦
井上 良徳, 高橋 秀郎, 上垣外修己

Takaaki Matsuoka, Jun-ichi Takabatake, Akihiko Koiwai, Yoshinori Inoue, Hideroh Takahashi and Osami Kamigaito: Analysis of Fiber Orientation in Injection Molding.

Fiber orientation induced during injection mold filling of fiber filled thermoplastics causes material properties to be anisotropic and molded parts to warp. Predicting fiber orientation is important for parts and mold designs to produce sound molded parts. A computer program has been developed to predict planar fiber orientation in thin walled molded parts by using Folgar and Tucker's orientation model for concentrated suspensions. Computed result was compared with experimental one for an injection molded square plate of glass fiber reinforced polypropylene.

(Received January 19, 1989)

1. 緒言

繊維状粒子（以後、単に繊維とする）を含有した材料の射出成形では、充填過程における流動のために繊維が配向し、成形品物性に異方性がもたらされる。そのために、成形品が変形したり、残留歪みが生じたりして問題になっている。このような問題に対処するためには、元になる繊維の配向挙動を解明し、予測することが重要である。ここでは、薄肉の成形品を対象に高濃度系サスペンションにおける繊維の平面配向を予測する計算機プログラムを開発し、繊維強化ポリプロピレン樹脂を射出成形した平板成形品について計算と実験とを比較した結果について述べる。

2. 理論

充填過程における溶融材料の流れは狭い隙間の平板間における非ニュートン流体の非等温Hele-Shaw流れであるとし¹⁾、繊維配向には繊維と繊維との干渉を考慮できるFolgar-Tuckerモデル²⁾を用いた。繊維は剛直で様な円柱形状であり、平面方向の2次元配向を考え、繊維に動く浮力と慣性力は粘性力に対して小さく無視できるものと仮定する。

計算に用いる座標系をFig. 1に示す。XYZの3次元空間にある平板においてx-yを平面方向、zを板厚方向にとった局所直交座標系を考える。局所直交座標系において流れの式、エネルギーの式、配向の式はそれぞれ次のようになる。

Fig.1 Definition of coordinates.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H^3}{12\bar{\mu}} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H^3}{12\bar{\mu}} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\eta}{\rho C_p} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} + v_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + v_y \frac{\partial \psi}{\partial y} &= C_1 \dot{\gamma} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \\ &- \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\psi \left(-\sin \phi \cos \phi \frac{\partial v_x}{\partial x} - \sin^2 \phi \frac{\partial v_x}{\partial y} + \cos^2 \phi \frac{\partial v_y}{\partial x} + \sin \phi \cos \phi \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、Pは圧力、Hは厚さ、Tは温度、tは時間、vは速度、sは流れ方向、wは流れ方向への速度である。材料物性値として、 $\bar{\mu}$ は等価ニュートン粘度、 η は粘度、 α は熱拡散率、 C_p は比熱、 ρ は密度である。 ψ は配向分布関数、 ϕ は配向角、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 C_1 は相互作用係数である。式(3)の右辺の第1項は繊維の回転に対する相互作用の効果を第2項は流体力学的な効果を表す。

非ニュートン流体の粘度は次の指数則とアレニウス式を組み合わせた式により近似する。

$$\log \eta = a + b \cdot \log \dot{\gamma} + c / (T + 273) \quad (4)$$

ここで、a、b、cは溶融材料の流動性試験により求められる粘度係数である。

配向分布関数は、ある角度 ϕ から $\phi + \Delta\phi$ までの積分によりその間に配向する繊維の確率を表す。角度 ϕ の繊維と $\phi + \pi$ の繊維は区別できなく、従って、 $0 \sim \pi$ の間にすべての繊維が配向することから、配向分布関数は以下の条件を満足しなければならない。

$$\psi(\phi + \pi) = \psi(\phi) \quad (5)$$

$$\int_0^\pi \psi(\phi) d\phi = 1 \quad (6)$$

式(1)を有限要素法、式(2)と式(3)を差分法により離散化した。式(1)、(2)、(4)を連成して充填過程における速度分布およびその時間変化を求めた。板厚方向に平均化した平面方向の速度分布から式(5)と式(6)の条件下で式(3)を解き配向分布関数を求めた。計算した配向分布関数から次式の配向パラメータ f_p を定義し、配向の度合いを評価した。

$$f_p = 2 \langle \cos^2 \phi \rangle - 1 \quad (7)$$

$$\langle \cos^2 \phi \rangle = \int_0^\pi \psi(\phi) \cos^2(\phi - \phi_i) d\phi \quad (8)$$

配向パラメータは-1から1の値になり、Fig. 2のように角度 ϕ_i に対して、 $f_p = -1$ の場合は直交方向に完全配向、0はランダム配向、1は平行方向に完全配向していることを示す。

Fig.2 Definition of orientation parameter.

3. 計算と実験方法

成形品形状をFig. 3に示す。サイドゲートで射出成形した幅100mm×厚さ3mmの正方形平板である。計算では、三角形平板要素によりFig. 4のように要素数は200、節点数は121に分割モデル化した。計算条件をTable 1に示す。成形条件は後で述べる実験での実測値であり、材料物性値は実験で用いた20wt%ガラス繊維強化ポリプロピレン樹脂 (FRPP) の値である。初めに樹脂流動解析を行い、求めた樹脂の速度分布をもとに繊維配向解析を行った。実験ではFRPPにわずかに金属繊維をトレーサとして混入し、正方形平板を成形した。成形後に平板内に分散した金属繊維の配向状態をX線観察により調べた。

Table 1 Data for computation.

Injection temperature	: 223 °C
Mold temperature	: 41 °C
Filling time	: 3 s
Thermal conductivity	: 0.179 W/(m·K)
Density	: 1030 kg/m ³
Specific heat	: 2600 J/(kg·K)
No-flow temperature	: 156 °C
Latent heat	: 8.96×10^4 J/kg
Viscosity coefficients	: $a = 2.901$ Pa·s $b = -0.680$ $c = 544$
Interaction coefficient	: $C_1 = 0.1$

Fig.3 Square plate.

Fig.4 Mesh model of square plate.

4. 結果

流動解析による充填過程における速度分布をFig. 5に示す。矢印は充填部の厚さ方向平均速度を、矢印のない部分は未充填部を表す。材料は充填初期にはゲートを中心にして半円状に進み、側壁に達した後には徐々にフロント形状が平坦になり、右側の上下端が最終充填箇所になる。このような充填挙動はショートショット成形により確認できた。流れはゲートから放射状に広がりながらフロントの速度が遅くなるが、充填完了時には最終充填箇所に流れが集中するため、その方向への速度が速くなる。

Fig.5 Computed velocity distribution.

Fig.6 Computed orientation distribution function at the end of filling.

Fig.7 Computed orientation parameter at the end of filling.

充填完了時における配向分布関数を計算した結果をFig. 6に示す。各角度ごとの値を線分にして表しランダム配向の場合には全角度の値が同じであるために円形になる。ほとんどの部分が円形になっており、繊維が配向している。配向分布関数が最大になる配向角に対する配向パラメータの計算結果をFig. 7に示す。線分の方角と長さにより配向角とその方角への配向の強さを表す。ゲート周辺では流れ方向に直交し、壁面近傍では壁面に沿い、最終充填箇所では流れ方向に配向する。

金属繊維トレーサのX線観察結果をPhoto. 1に示す。金属繊維がガラス繊維の配向と厳密に対応しているとは言えないが、およその配向方向は表現していると考えられる。配向方向の計算結果はこの実験結果と良く一致した。このような配向は拡大流れ、せん断流れ、縮小流れにおける配向挙動³⁾から説明される。

5. まとめ

射出成形品の繊維配向解析プログラムを開発した。ガラス繊維強化ポリプロピレン樹脂の正方形平板について解析を試みた結果、ゲート周辺では流れ方向に直交し、側面では壁面に沿い、最終充填箇所では流れ方向に配向することを予測した。この予測結果を金属繊維トレーサを混入して成形した平板のX線観察により確認することができた。

6. 文献

- 1) 松岡孝明, 高橋秀郎, 上垣外修己: 粉体および粉末冶金, 34[9](1987), 21.
- 2) F. Folgar and C. L. Tucker III: J. Reinf. Plast. Compos., 3[2](1984), 98.
- 3) F. J. Lockett: Plast. and Rubber Process., 5[3/4](1980), 85.

Photo.1 X-ray observation of metal fiber orientation.