短繊維含有樹脂のスリット状キャビティ冷却金型内への
射出成形における流動, 配向解析*張 佑 新^{*1}, 加藤 和 典^{*2}, 大竹 尚 登^{*2}Analysis of Fiber Orientation and Velocity Distribution in Flow
of Short Fiber-Polymer Melt Mixture through Cooled Mold Slit Channel
in Consideration with Fiber-Mold Wall InteractionYouxin ZHANG, Kazunori KATO^{*3} and Naoto OTAKE^{*3} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering and Science,
Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In injection molding of short fiber-polymer melt mixture, influence of the interaction between a fiber and a mold wall on fiber distribution and flow property cannot be neglected, when fiber length is not very short comparatively to the thickness of a mold cavity. In the flow through a cooled mold cavity, solidifying layer grows and it affects that relation further. In this paper, effects of these causes on fiber orientation and velocity distribution have been made clear by using numerical analysis, in which each fiber motion is analyzed from equilibrium conditions and fiber orientation distribution is obtained by integrating frequency of orientation angles of each fiber over the whole angles, and the following results have been obtained. (i) Near a mold wall, mixture is cooled and no flow layer is generated. On the other hand, apparent viscosity increases in the region, apart from a mold wall by more than half of fiber length, because of high fiber concentration, and plug flow-like velocity distribution is generated. (ii) Pressure gradient increases toward downstream in low injection rate, because of cooling of mixture, whereas it decreases in high injection rate, because of viscosity decrease due to shear heating. (iii) As fiber length decreases, pressure gradient decreases. (iv) Fiber orientation distribution changes considerably with injection rate change.

Key Words: Stratified flow, Injection molding, Short fiber-polymer melt mixture, Fiber-mold wall interaction, No flow layer, Fiber orientation

1. 緒 言

樹脂の射出成形においては強度および剛性を高めるために短繊維を含む樹脂が用いられる。繊維濃度が高くなると繊維と熔融樹脂との間の干渉によりみかけ粘度は大きく変化するが^(1~4), 実際に用いられる材料では繊維濃度はさらに高く, 繊維同士の干渉の影響が発生する^(5~8)。また, 繊維長さが金型キャビティ厚さに比べて十分小さくはないため繊維と金型壁面との干渉が材料流動及び繊維配向に及ぼす影響を無視することはできなくなる。このような問題に対して, ランダムに配置させた繊維の個々の運動を直接数値解析することも試みられているが^(9,10), 大規模な計算になり, 多様な流動特性を把握するためにこのような解析法を利用することは困難である。この問題に対して筆者らは種々の方位にある個々の繊維の運動を平均化して繊維配向を求める方法を示し, まずニュートン流体と繊維の混合物を対象として材料流動, 繊維配

向特性について検討した^(11,12)。そして, 繊維と金型壁面との干渉により壁面近くの繊維濃度が低下しこの領域のみかけ粘度が低下すること, 及びこれが繊維配向, 圧力損失等に大きく影響することを明らかにした。次いで, これを非ニュートン流体との混合材料に拡張して, 金型温度が材料温度に等しい場合について検討を行った⁽¹³⁾。

ところで, 射出成形においては冷却された金型内への流れが対象となる。この場合金型面近傍では固化層が形成されるため, これが上述の繊維と壁面との干渉に大きな影響を及ぼす可能性がある。本研究ではこの問題について前報と同様の数値解析を行い, 冷却金型面近傍の材料流動及び繊維配向特性を明らかにする。

2. 解析の方法

解析法について要点のみを簡単に述べる。スリット状流路の2次元流れを対象とし, 座標軸を図1のようにとる。ここでX軸は流れに沿う方向とする。繊維の方位は図の θ , ϕ により表す。また, 繊維の直径を d , 長さを l , キャビティ厚さを $2H$ とする。

樹脂はポリプロピレンを想定し, 粘度 η は次のCrossの近似式で与えられるものとする。

* 原稿受付 1999年9月22日。

^{*1} 東京工業大学大学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*2} 正員, 東京工業大学理工学研究所。
E-mail: kkato@mech.titech.ac.jp

Fig. 1 Coordinate and fiber inclination angles

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0}{1 + C(\eta_0 \dot{\gamma})^{1-m}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right)$$

ここで $m = 0.35$, $B = 0.0096 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $C = 0.00048 \text{ Pa}^{m-1}$, $T_b = 5900 \text{ K}$ とした. なお, Cross の式としては式 (1) の分母に $(1 + (K\dot{\gamma})^{m-1})$ を用いる場合があり⁽¹⁴⁾, 両者の間では材料温度の影響に若干の差があるが, その違いは小さい.

(a) 繊維の運動の解析

まず, 流路を X 方向に 1000-2000 分割, Y 方向に 20 分割する. 次に X 方向の k 番目の領域の列に注目し, 各領域についてその中の繊維を各方位 θ , ϕ に分割する. ここで θ , ϕ は, $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ の範囲をそれぞれ 5° とびの粗さに分割した各立体角の中の中心の値とする. そしてこの θ , ϕ の方位に分配された繊維の中の 1 本の運動を以下の方法によって求め, 時間増分 Δt 後の繊維の位置及び方位を求め, さらに上述の過程で θ , ϕ に分配された繊維がすべて代表の 1 本の繊維と同じ運動をするものとして, その繊維数だけの重みをつける. このような処理を各 θ , ϕ について行った後, Δt 後の各 θ , ϕ の方位についてこれを含む微小立体角 ($\Delta\theta = \Delta\phi = 5^\circ$) に含まれる繊維数を求め, 配向分布 $\psi(\theta, \phi)$ とする.

壁面との干渉のある場合は壁面垂直方向への繊維の移動があるのでこれも考慮する.

任意の方位にある 1 本の繊維に注目する. 繊維は周囲より種々の力を受ける. 第 1 に流体から受ける力がある. 流れが繊維に直交するとき単位長さあたりに加わる力 D は, 繊維の流体に対する相対速度 ΔV が小さく, $\text{Re} (= \rho \cdot d \Delta V / \eta) \ll 1$ (ρ : 流体の密度) の場合, 次式で与えられる.

$$D = k_d \eta \Delta V, \quad k_d \approx 10.0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

流体の相対速度は一般には繊維の軸に直交はしないが, この場合相対速度の直交成分が式 (2) で与え

られるとする. そして繊維の長手方向の摩擦力は無視する⁽¹³⁾.

第 2 に, 他の繊維から受ける力がある. Tucker ら⁽⁶⁾ の干渉モデルによれば他の繊維との干渉により生じる繊維の回転速度 $\dot{\theta}_B$, $\dot{\phi}_B$ は配向密度の角度に関するこう配とせん断ひずみ速度の大きさに比例し ψ の大きさに反比例する, その比例定数は

$$C_l = 0.000391 \left(\frac{l}{d} \right)^2 \cdot c, \quad (0.08 < c < 0.16 \text{ の場合}) \dots\dots (3)$$

ここで ψ は各 θ , ϕ の方向に沿う繊維の密度分布, c は繊維濃度 (体積率) である. 繊維間の干渉は稜長さ l の立方体に含まれる繊維数 nl^3 (n : 単位体積中の繊維の数) に依存するが, 幾何学的に与えられる関係式

$$nl^3 = (4/\pi)(l/d)^2 \cdot c$$

より, 式 (3) は C_l が nl^3 に比例することを示すものである. このモデルで得られる回転速度の変動 $\dot{\theta}$, $\dot{\phi}$ に対応するモーメントが流体から繊維に加わる. なお, 繊維間の干渉が繊維の並進速度に及ぼす影響は平均化されてほとんど消失する.

第 3 に, 繊維が金型壁面に接触すると壁面より反力を受ける. この影響で繊維は壁から離れる方向に移動する.

以上の 3 つの力の釣合より繊維の並進, 回転運動が求められる. これをすべての方位について求め積分することにより, 繊維の配向密度 ψ の変化率を求めることができる.

なお, スリット状流路の入り口で与える繊維濃度及び配向分布は次のようなものとする. まず入口の断面にわたってランダム配向の様な濃度の繊維分布を与える. ここで金型壁面近くにおいて金型壁面と干渉する繊維についてはこれを除き, 残った繊維分布の形を固定したまま繊維濃度 (体積率) が所定の値 c_0 に達するまで各方位の繊維量を増す. このような操作の結果流路入口の壁面近くですでにある配向分布をもつ結果になる (文献 13 の図 5(a) 参照). ただし繊維濃度は一様な値 c_0 になる.

(b) 流れの解析 熱伝導解析は Y 方向への 1 次元問題として取扱い, X 方向へは対流項のみを考える. また力学的な平衡方程式は X 方向のみを考慮する. なおフロントの噴水流れは考えない.

流れの解析と繊維配向の解析は連成させることが必要である. そこで, まず繊維を含まない流体について速度分布を求め, この速度分布に対して繊維の並進, 回転速度を求める. 次に, この解において繊維が受ける力の反力が流体に与えられるものとして, これを平衡方程式に体積力として加え流体速度を解析する. このような操作を繰り返し, 流体速度と繊維の運動の整合した解を得る. その後繊維配向密度の変化の解析と熱伝導解析を行う.

Fig.2 Flow properties at standard molding condition (Average flow velocity $U_{avg}=0.0382 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Fiber volume fraction $c_0=0.1$, Fiber length $l=2 \text{ mm}$, Cavity thickness $2H=4 \text{ mm}$, Fiber aspect ratio $R_p=40$, Fiber interaction parameter $nl^3=204$, Mold temperature $T_{d0}=60^\circ\text{C}$, Suspension temperature $T_{m0}=200^\circ\text{C}$).

3. 流速, 圧力分布及び繊維濃度の検討

本研究で行う解析の繊維条件及び成形条件は次の通りとする. 下線の数値は標準値である. 繊維濃度(体積率) $c_0=0.1$, 繊維長さ $l=1, 1.6, 2\text{mm}$, 繊維干渉パラメータ $nl^3=51, 204$, キャビティ厚さ $2H=4\text{mm}$, 材料温度 $T_{m0}=200^\circ\text{C}$, 金型温度 $T_{d0}=30^\circ, 60^\circ, 100^\circ\text{C}$, 材料平均速度 $U_{avg}=0.0038, 0.0382, 0.382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 材料の粘度 η は式(1)で与えられるとする.

まず標準の繊維条件及び成形条件における材料の流速分布, 圧力分布等の計算結果について検討する.

3.1 流速及び温度分布

繊維濃度を $c_0=0.1$ とした場合の流路厚さ方向にわたる流速分布を図2(a)に示す. ここでパラメータ X は流路入口からの距離である. 速度分布は入口近くで急激に変化し, ある程度の助走区間を経た後十分発達した流速分布になる. そして, 定常の速度分布においては金型面からの冷却によって壁面に沿って流動停滞層が形成され, この領域を除く内部の流動領域では繊

維濃度が高くみかけ粘度が高くなるためプラグフロー的な流れになる.

このプラグフロー的な流れについては金型温度を材料温度と等しくとった前報⁽¹³⁾の結果とほぼ同様であるが, 本報告の結果では流動停滞層が形成されること, 及びその層の成長の影響で助走区間が前報の値 X_a ($\approx 10\text{mm}$, ただし $2H=4\text{mm}$)に比べて大きくなる点異なる. 後述する繊維濃度分布, 圧力こう配の流れ方向にわたる変化等を考慮すると助走区間の大きさ X_a は約3倍($X_a=30\text{mm}$)と考えることができる.

さて, 材料温度の流路横断面にわたる分布は図2(b)の通りで, 温度分布は流路入口により $X=50\text{mm}$ に至るまで大きく変化している. そしてこの結果は, 速度分布の方が $X=10\sim 50\text{mm}$ の間であり変化していないことと矛盾するように見えるが, このことは次のように解釈することができる. 金型壁面付近の流速の小さい領域(仮に流動停滞層と呼ぶことにする)の厚さ δ は材料温度が「固化温度」に達する条件によって規定されるものではなく, 流動停滞層と高繊維濃度の流動部の見かけ粘度の大きさとの関係で決まるが, δ が一定

(a) U - Y curves (b) T - Y curves

Fig. 3 Flow of low fiber volume fraction suspension ($U_{avg}=0.00382\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $c_0=0.001$, $l=2\text{ mm}$, $nl^3=2$, $T_{d0}=60^\circ\text{C}$, $T_{m0}=200^\circ\text{C}$).

になることはこの関係が大きく変化していないことによる結果である。

流動停滞層の厚さ δ を

$$\delta = \alpha \sqrt{l/2} \quad (4)$$

とおき (l : 繊維長さ), またブラグフローが壁面から

$$\xi = \beta \sqrt{l/2} \quad (5)$$

以上離れた流路内部で生じるとすると, Fig. 2 の例では $\alpha \approx 0.5$, $\beta \approx 0.8$ になる。

3.2 繊維濃度の分布

図 2(c) は繊維濃度 c の分布を示す。すでに等温流体の流れについて述べたように, 金型壁面近くの繊維は壁面との干渉により壁から離れる方向へ押しやられ壁から $l/2$ (l : 繊維長さ) の位置に集積する。なお, (a) 図の $X=50\text{ mm}$ 及び 100 mm の線図において速度こう配 $|dU/dY|$ が $Y=1\text{ mm}$ 前後の位置で極端に小さくなっていることについては, この位置が(c)図における繊維濃度 c の高い位置にあたることによる結果として理解できる。

図 2(d) は繊維が流体に及ぼす力の X 方向成分 f_x の分布を示す。流路入口付近では壁面近くで流体を加速

(a) U - Y curves (b) T - Y curves

Fig. 4 Flow properties at high flow rate ($U_{avg}=0.382\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $c_0=0.1$, $l=2\text{ mm}$, $nl^3=51$, $T_{d0}=60^\circ\text{C}$, $T_{m0}=200^\circ\text{C}$)

する向きの力が働くが, $X=10\text{ mm}$ ではすでにこの領域の c が低下するため f_x は減少する。また, X がさらに増加すると, 壁面近くの f_x の増大する層の厚さが大きくなる。これは壁面近くの温度低下とそれに伴う粘度上昇によるものである。

3.3 圧力こう配の分布

X 方向への圧力こう配 $|dP/dX|$ の X 方向にその分布は, 射出速度を変化させた場合の結果をまとめた図 5(d) (後述) の中の中空の丸印で示される。この値は流れに沿って漸増するが, これは図 2(d) において壁面近くの f_x が増大する層の成長に対応する現象である。なお, 圧力こう配の増加率 $|d^2P/d^2X|$ はせん断発熱の影響により漸減する。

3.4 繊維のない場合との比較

比較のために, 繊維濃度が極めて小さい場合の結果を図 3 に示す。ここで金型温度 $T_0=60^\circ\text{C}$, 繊維濃度 $c_0=0.001$ である。 $nl^3=2$ であり, これは 'dilute' と 'semi-dilute' の境界付近の濃度である。速度分布は(a)図に示すように滑らかな曲線で表され, 流れの進行に従って金型壁面に沿って流動停滞層が成長するが, $X=30\text{ mm}$ 以上になるとせん断発熱の増大の結果その成長はほぼ停止する。

Fig.5 Effect of flow rate on flow properties ($U_{avg}=0.00382 \sim 0.382 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{d0}=60^\circ\text{C}$, $c_0=0.1$, $l=2\text{mm}$, $nl^3=51$).

一方、繊維濃度が大きく金型温度の高い場合の速度分布は、図2(a)の線図から流動停滞層の部分を除いた形のプラグフロー的な線図になる。これらの結果より、本論文の成形条件における速度分布(図2(a))は金型からの冷却による流動停滞層の形成と高濃度の繊維による流動領域内部のプラグフロー的な流れを組み合わせたものになっていることがわかる。

4. 各種成形条件の影響の検討

4.1 射出速度の影響

まず、成形特性への影響の大きい射出速度について検討する。ここで、射出速度 U_{avg} は金型の $X=10$ 及び 100mm の位置に埋め込んだ圧力センサーの立ち上がり時期の実測値より算出する。

射出速度 U_{avg} を標準条件(図2)の10倍にとった場合の速度分布及び温度分布を図4(a)(b)に示す。壁面に接して成形される流動停滞層の内側には速度の急変する大きなせん断ひずみ速度の領域があり、ここで大きなせん断発熱を生じることが予想されるが、この計算結果では流動が進むにつれて予想通り $20\sim 30^\circ\text{C}$ の温度上昇が生じることが認められる。そして、この温度上昇領域の内側ではいくらか上昇する傾向にある。

図5は主要な成形特性値について流速の影響を比較したものである。ここで、比較する位置は入口から十分離れた点($X=100\text{mm}$)としている。また、繊維干渉パラメータは $nl^3=51$ である。

材料温度の分布は流速 U_{avg} を $0.00382 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ から $0.382 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ まで変化させた場合、大きく変化し((a)図)、これが直ちに速度分布に反映する((b)図)。すなわち、流速が速いときはせん断発熱層にひずみ速度が集中するため((c)図)、流動停滞層とその内側のプラグフロー領域が形成される。そしてこれらの間にせん断ひずみ速度の極端な集中が生じる。なお図5(b)と図2(a)の $U_{avg}=0.0382 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の線図の傾向の違いは繊維干渉パラメータ nl^3 の値の違いによるものである。

圧力こう配 $|dP/dX|$ は必要な射出成形圧力の評価に関係するので重要である。そこで流路の X 方向にわたる分布を(d)図に示す。まず流速が比較的小さい場合に注目すると、せん断発熱に比べて金型面からの冷却の影響が大きいので圧力こう配 $|dP/dX|$ は X が大きくなるにつれて増加する。しかし流路が長い場合、やがて両者がバランスする状態になり一定値に近づく。

一方流速が大きい場合、入口近くの助走区間を除くと、 $|dP/dX|$ は X の増加とともに低下する。なお入口部および助走区間での大きな変動は主に繊維配向の

(a) U-Y curves

(b) Pressure gradient distribution

Fig.6 Effect of mold temperature on flow properties ($U_{avg}=0.0382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $c_0=0.1$, $nl^3=204$, $l=2\text{mm}$, $2H=4\text{mm}$, $X=100\text{mm}$ in (a)).

変動によるものである。

4.2 金型温度の影響

金型温度 T_0 を変化した場合の結果を図6に示す。 $X=100\text{mm}$ における流速の流路厚さ方向にわたる分布は(a)図の通りで, T_0 が高い場合 ($T_0=100^\circ\text{C}$)は流動停滞層厚さ δ が小さくなり ($\alpha \approx 0.3$, 式(4)), また壁面近くの温度こう配 $|dT/dY|$ が比較的小さいため速度こう配 $|dU/dY|$ も小さくなる。 T_0 が低い場合 ($=30^\circ\text{C}$)はこの逆で δ は大きくなる ($\alpha \approx 0.7$)。

X 方向への圧力こう配 $|dP/dX|$ の分布は(b)図の通りである。まず助走区間を過ぎた後の値に注目すると, 圧力こう配は T_0 が 100°C , 60°C , 30°C と低下するにつれて大きくなる。このことは, 流動停滞層厚さが T_0 の低下とともに増大し, 流動領域との境界付近の速度こう配 $|dU/dY|$ が増大することに対応する。

4.3 繊維長さの影響

繊維長さ l を変化した場合の結果を図7に示す。ここで流路厚さ $2H=4\text{mm}$ である。速度分布は(a)図の通りで, 流動停滞層厚さ δ は繊維長さが長いほど大きくなる。式(4)の α は一定 (≈ 0.4) で, δ は l にほぼ比例するとみることができる。このことは次のように解釈できる。すなわち, 壁面近くの繊維は壁から $l/2$ の

(a) U-Y curves

(b) Pressure gradient distribution

Fig.7 Effect of fiber length on flow properties ($c_0=0.1$, $2H=4\text{mm}$, $U_{avg}=0.0382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{d0}=60^\circ\text{C}$, $X=100\text{mm}$ in (a)).

位置に集積するため, この位置におけるみかけ粘度は増大し速度こう配 $|dU/dY|$ は減少する。一方壁面近傍では冷却により速度こう配は零になる。よって, これらの中間に速度の急変部が生成される。ここでプラグフロー領域の壁からの距離 ξ は $(0.4 \sim 0.7)l/2$ になる(式(5))。

上述のように, 壁面から $l/2$ の位置の繊維集積層と壁との間の繊維濃度低下層の厚さが繊維長さ l が大きくなると厚くなる結果, $|dP/dX|$ は小さくなる。このことはニュートン流体を母材とする場合の等温流れにおける結果と同様である。

5. 繊維配向分布と成形条件の影響の検討

まず標準成形条件による成形品について, 表面からの深さ ξ が $\xi/l = 0.25$ 及び 0.5 の位置にある繊維の配向分布を図8(i), (ii)に示す。ここで流路厚さ $2H$ は 4mm , $l=2\text{mm}$ であるから, これらの位置は $\xi/H = 0.25$, 0.5 の位置にあたる。入口からの距離 $X=100\text{mm}$ である。

繊維濃度の高くなる $\xi/l = 0.5$ の位置の分布図(ii)に注目すると, $\theta = 90^\circ$, $\phi \approx -15^\circ$, 及び $\theta = 0^\circ$ において配向密度関数 ψ が大きくなる。これらの方向はそれぞれ流れ方向(正しくは 15° 傾斜した方向)及び流れに直交する方向(壁面に平行)にあたる。極大点における ψ の値はそれぞれ約 0.3 及び 0.25 で, 平

Fig.8 Fiber orientation distribution at standard molding condition(ξ : Distance from mold surface, $c_0=0.1$, $l=2\text{mm}$, $2H=4\text{mm}$, $nl^3=204$, $U_{\text{avg}}=0.0382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{\text{d0}}=60^\circ\text{C}$, $X=100\text{mm}$).

Fig. 9 Effect of flow rate on fiber orientation distribution($U_{\text{avg}} = 0.0038\sim 0.382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $c_0 = 0.1$, $l=2\text{mm}$, $2H=4\text{mm}$, $nl^3=204$, $T_{\text{d0}}=60^\circ\text{C}$, $X=100\text{mm}$, $\xi/H=0.5$)

均値($=1/(4\pi)$)に比較して大きく、かなり大きな配向集中を生じていることになる。

壁面に近い位置においては、 $\xi/l = 0.25$ の図(i)の二つのピークを連ねるような稜線ができる。この稜線にあたる配向分布は、流れに直交する横断面内のランダムな配向を示す。

次に、射出速度により流速分布 $U(Y)$ が大きく変化したことより(図 5(b)), この場合の繊維配向分布に注目する。壁面からの距離は $\xi/l=0.5$ とする。射出速度が小さい場合($U_{\text{avg}}=0.0038\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)の分布は図 9(i)の通りで、標準条件の結果(図 8(ii))と比較して大きな変

化はない。一方射出速度が大きい場合($U_{\text{avg}} = 0.382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)は、図 9(ii)に示すように流れの方向の配向の集中がほとんど消失し流れに直交する方向への配向がさらに強くなる。このような配向の変化について直感的に理解できる説明を加えることは困難であるが、射出速度が大きい場合にせん断発熱が著しく速度分布が著しく変化していること(図 5(a)(b))に対応する現象と考えられる。

金型壁面に近い位置($\xi/l = 0.25$)においては、 $U_{\text{avg}} = 0.00382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では流れ方向の配向が強くなるが、この位置では繊維濃度自体かなり低下しており、成形品

Fig. 10 Effect of fiber length on fiber orientation distribution, $l=1\text{mm}$, $c_0=0.1$, $2H=4\text{mm}$, $nl^3=204$, $U_{\text{avg}} = 0.0382\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{\text{d0}}=60^\circ\text{C}$, $X=100\text{mm}$)

特性に関連した実用的意味は小さいと思われるので省略する。

流速分布への影響の大きい繊維長さについての結果を図10に示す。繊維長さ $l=1\text{mm}$ である。図(i), (ii)は $\xi/l=0.5, 1.0$ に対するもので、 $\xi/H=0.25, 0.5$ に対応する。金型壁面近くにおける繊維配向分布は繊維と壁面との干渉によって決まり、 l の値直接ではなく ξ/l に依存するものと推測される。これは図10(i)の結果と標準条件の結果(図8(ii))がほとんど一致することから確認できる。

壁面から離れた $\xi/l=1$ の位置では壁からの干渉はほとんどない。この位置では流れ方向への繊維の集中はなく、ほとんど幅方向への配向のみになる。

以上、本解析の結果繊維配向は流速、繊維長さ等の条件によって大きく変化し、またその流速分布は金型からの冷却より大きな影響を受けることが明らかになった。繊維配向の実験的な検証については、現状では繊維の濃度、配向及び長さの分布が均一な材料の製作及び繊維配向の計測法など、技術的に問題が多く、また本解析で用いている繊維間の干渉モデルも十分検証されたものとは言い難い。よって、今後実験技術の開発を併せた総合的な検討が必要である。

6. 結 言

短繊維を含む樹脂をスリット状キャビティを有する冷却金型内へ射出成形する場合を対象として、繊維と金型壁面との干渉が流動挙動及び繊維配向に及ぼす影響について数値解析的に検討を行い、流動、繊維挙動等の特性を明らかにした。得られた結果を以下要約する。

- (1) 金型キャビティ内では壁面から $l/2$ (l : 繊維長さ) 以上の距離の高繊維濃度領域①と壁面近傍の温度低下領域②が形成され、両者の間に速度が大きく変化する薄い領域ができる。そして、領域②が流動停滞層に、また領域①はプラグフロー的な流動層になる。ここで流動停滞層厚さ(δ)は領域①と②のみかけ粘度の大きさの関係で決定される。本研究の成形条件の範囲では $\delta = \alpha (l/2)$ ($\alpha=0.3\sim0.6$)である。
- (2) 横断面上の速度分布がほぼ一定になるまでの助走区間は、金型温度の高い場合の値(約10mm)に比べると大きい(約30mm, 流路厚さ $2H=4\text{mm}$ の場合)。
- (3) 一般の射出速度の場合助走区間通過後も材料温度は低下し流動方向の圧力こう配 $|dP/dX|$ は流れの進行とともに増大する。一方、高速で射出する場合は、逆に壁からの冷却よりせん断発熱の影響の方が大きく、圧力こう配は入口で高く、漸時低下する。
- (4) 繊維長さが長くなると流動停滞層厚さ δ は厚くなるが、流動方向への圧力こう配 $|dP/dX|$ は低下する。
- (5) 金型壁面から $l/2$ だけ離れた繊維集中層にお

いて、繊維配向は標準の流速の場合流れ方向と幅方向(直交する方向)に集中するが、流速が速くなるとほとんど後者に集中するようになる。壁面から $l/2$ より離れた内部では一般的に幅方向に配向する。

文 献

- (1) Batchelor, G. K., The stress system in a suspension of force-free particles, *J. Fluid Mech.*, 41-3 (1970), 545.
- (2) Batchelor, G. K., The stress generated in a nondilute suspension of elongated particles by pure straining motion, *J. Fluid Mech.*, 46-4 (1971), 813.
- (3) Shaqfeh, E. S. G. and G. H. Fredrickson, The hydrodynamic stress in a suspension of rods, *Phys. Fluids A*, 2-1(1990), 7.
- (4) Shaqfeh, E. S. G. and D. L. Koch, Orientational dispersion of fibers in extensional flows, *Phys. Fluids A*, 2-7(1990), 1077.
- (5) Folgar, F. and C. L. Tucker, Orientation behaviour of fibers in concentrated suspensions, *J. Reinf. Plas. Comp.*, 3-4 (1984), 98.
- (6) Advani, S. G. and C. L. Tucker, The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites, *J. Rheology*, 31-8 (1987), 751.
- (7) Ranganathan, S. and S. G. Advani, Fiber-fiber interactions in homogeneous flows of nondilute suspensions, *J. Rheology*, 35-8 (1991), 1499.
- (8) Advani, S. G., *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, Elsevier(1994).
- (9) Sundararajakumar, R. R. and Koch, D. L.: *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 73(1997), 205
- (10) Thomasset, J., Grmela, M. and Carreau, P. J.: *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 73, 195 (1997)
- (11) 加藤和典・張佑新・大竹尚登: 機械学会論文集, C編, 64-626 (1998), 1848.
- (12) 加藤和典・張佑新・大竹尚登: 機械学会論文集, C編, 64-626, (1998), 4045
- (13) 加藤和典・張佑新・大竹尚登: 成形加工, 11-10(1999), 847.
- (14) Chung, S. T. and T. H. Kwon, Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short fiber reinforced thermoplastics, *Polym. Eng. Sci.*, 35-7 (1995), 604.