射出成形における強化繊維の配向に関する研究†

平井恒夫* 片山伝生*

平井三友** 米田慎***

Prediction for the Configuration of Fiber Orientation in Injection Moulding

by

Tsuneo HIRAI*, Tsutao KATAYAMA*, Mitomo HIRAI**
and Makoto YONEDA***

Thermoplastics filled with short fibers have been used in injection moulding for more than ten years in order to improve or control mechanical properties of moulded parts such as mould shrinkage, stiffness, heat distortion, etc.. In the moulded parts of Fiber Reinforced ThermoPlastics (FRTP), the orientation of short fibers is determined by the flow of the molten resin and therefore their mechanical properties are highly dependent on the orientation state of fibers. For example, their elastic moduli and tensile strength in the oriented direction have been known to be greater than those in order directions. In FRTP composite industry, it is desired that the fiber orientation becomes predictable quantitatively and the mould design can be carried out to utilize the desirable orientation positively.

This paper shows how to predict the fiber orientation distribution in injection moulded parts, from the modelling study on the flow properties of composites. In this model, it is assumed that the behaviour of fibers is completely governed by the flow state of matrix. This prediction might be limited to simple thin products, since the flow of the molten resin is considered to have 2-dimensional isothermal properties and the fibers have an in-plane orientation. The experimental results for a simple injection moulded plate revealed the process of the fiber orientation in short-shot samples. The numerical prediction is quantitatively in good agreement with the experimental results.

キー・ワード：射出成形，強化繊維配向，複合材料，繊維含有率，熱可塑性マトリックス

1 緒 言

熱可塑性プラスチック成形品は射出成形により大量に生産されており，これを繊維強化した FRTP により，比強度・比剛性・耐熱性・寸法安定性などの機械的性質の大きな改善がもたらされ高強度，精密軽量化工業部品として広く応用開発されつつある。

射出成形における鍵は金型設計にあり，コンピュータを用いた流動解析を応用し，経験による試行錯誤を軽減させる努力がなされている¹⁾。しかし，FRTP を射出成形した場合，強化繊維に配向が生じるために機械的性質に異方性を生じ，配向分布によってはソリや変形^{2)~4)}などの欠陥として成形品に現れることが多い。そのため，繊維配向の流動機構よりなる変化を十分に考慮

した金型設計システムの確立が強く望まれている。

そこで本研究では，射出成形に対する CAD システム構築の一環として，FRTP の射出成形品に生ずる異方性問題を解明することを目的とし，その原因となる強化繊維の配向を予測する簡便な数値解析手法の開発を試みた。まず有限要素法を用いた非定常流動解析を行い，その結果を用いて繊維配向のシミュレーションを行った。繊維が流れに完全に支配されるものと理想化し，流動解析結果により得られた速度こう配テンソルにより繊維の配向を求めた。この有効性については実験解析において軟 X 線写真より繊維の配向を測定して，それぞれの結果の比較検討を行った。

2 解析対象

† 原稿受理 昭和59年6月9日 Received June 9, 1984

* 正会員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川, Faculty of Engineering, Doshisha University, Karasumaimadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

** 正会員 大阪府立工業技術研究所東大阪分所 東大阪市高井田中, Osaka Prefectural Industrial Research Institute, Takaidanaka, Higashiosaka

*** 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区烏丸今出川, Graduate School, Doshisha University, Karasumaimadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

射出成形の対象となる製品は、一般に薄肉で複雑な形状が多く、解析には多くの困難が伴うが、ここでは繊維配向モデルの確立を目的とするため、Fig. 1 に示す最も単純な円形平板と、Fig. 2 に示すような、実際の成形品を考慮してかど部をもった単純な形状の矩形平板を解析対象とした。ゲート方式はソリが最も顕著に現れることが知られているダイレクトゲート方式を用いた。ゲートの位置は、重心、ならびにそれより偏心させた数種の場合を設定した。これはゲート位置にもとづく材料流動の様相の変化、ならびにその強化繊維の配向に及ぼす影響を検討するためである。ここで、ゲートが重心の位置にある場合を偏心 0 mm、25 mm 離れた場合を偏心 25 mm、最も端部にある場合を偏心 50 mm と呼ぶことにする。

3 繊維配向の数値解析

Fig. 1. Shape and dimensions of the specimen (circular plate).

Fig. 2. Shape and dimensions of the specimen (square plate).

射出成形品中の強化繊維の配向は材料流動によって引き起されるものと考えられる。そこで流動解析により得られた結果を用いて繊維配向のシミュレーションを行った。ただし、本論文で扱う繊維配向は2次元平面に限られるものとする。

3・1 繊維の運動原理

単純な流れとして、単純せん断流れ、拡大流れ、および縮小流れを挙げ、これらの流れの中に存在する繊維状物体の運動について考察を行う。ただし、ここでは繊維状物体の太さは無視して考える。それぞれの場合の繊維状物体の運動の概念図を Fig. 3 (a)~(c) に示す。このように、繊維状物体の存在を仮定した範囲の長手方向に分布する速度成分によって回転を生じ、安定化の方向へと配向するものと考えられる。すなわち、単純せん断流れおよび縮小流れでは流線方向、拡大流れでは流線に垂直に向う方向をとるときが最も安定化するものと考えられる。

実際の樹脂中に存在する強化繊維は長さが0.5~0.8 mm でアスペクト比が50~80程度となり、繊維の太さ方向の速度分布の影響は、長手方向の影響に比べて十分無視できるものと考えられる⁵⁾。したがって、長手方向に分布する速度によって繊維の回転運動を考慮しよう。

3・2 繊維配向のモデル化

射出成形過程における材料流動解析に関しては、構成関係としては擬塑性性を仮定し、粘性係数 μ を、

$$\mu = \frac{K}{3} (\sqrt{4J_2/3})^{n-1}$$

(K : 擬塑性粘度, J_2 : 第2不変量, n : べき乗数)^{7)~9)}とし、粘性流体の非定常運動方程式によって解析し、対象とした流路に対する要素分割の各要素において速度こう配テンソルを求め、Fig. 4 に示すように流れ様相と繊維の運動を関連づける。ここに、2次元速度こう配テンソル $[D]$ は次式で表されよう。

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} & \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial x} & \frac{\partial V}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、 U および V はそれぞれ x および y 方向の速度成

Fig. 3. Orientation mechanism (a) shear flow, (b) radial flow, (c) contraction flow.

Fig. 4. Schematic diagram of fiber rotation displacement.

分を表す。

いま、繊維状物体の軸方向を x 軸とする繊維軸座標系をとると、繊維軸に沿って分布する垂直方向速度成分の分布こう配は、繊維状物体を含む流体要素の $[D]$ の成分 $\partial V / \partial x$ によって表される。また、速度こう配テンソル $[D]$ を用いた本数値解析手法では以下のような仮定をおく必要がある。

- (i) 繊維状物体の軸方向に分布する $\partial V / \partial x$ は一定である。
- (ii) 繊維状物体の慣性力は、流体の粘性に比べて無視できるほど小さく、繊維状物体は流体の変形に完全に支配されて動く。
- (iii) 繊維状物体間の相互作用は無視できるほど小さい。

以上の仮定のもとに、まず式(2)に示す時間増分 Δt における変形こう配テンソル $[D']$ を求めた。

$$[D'] = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \Delta t & \frac{\partial U}{\partial y} \cdot \Delta t \\ \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \Delta t & \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式において、 $[D']$ の成分 $\partial V / \partial x \cdot \Delta t$ は回転する繊維状物体の時間増分 Δt における傾きを表すと考えられるので、次式によって繊維状物体の時間増分 Δt における回転角変位 $\Delta\theta$ を算出することとした。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \cdot \Delta t \right) \quad (3)$$

繊維配向の数値解析において、仮想繊維の本数は流体の単位体積に対して設定することとし、要素間における仮想繊維の引き継ぎは要素間での流量計算より、その流量に見合った本数をその要素間で授受することとした。

3・3 繊維配向に対する数値解析手法

前述の繊維配向の数値解析モデルを用いた解析手法について述べる。その要素分割と境界条件を矩形平板の偏心 25 mm の場合を例にとり Fig. 5 に示す。

(i) まず、初期配向状態を設定する。ゲート付近の配向状態の実験結果は、充てん期間を通じて常にランダムであったので、数値解析においても初期解析領域でそのような仮想繊維を設定することとした。仮想繊維

Fig. 5. Boundary condition for flow analysis.

の設定の仕方は 0.5 mm^2 に対して 4 本を 1 組とし、ランダムであるという条件に基づいて、それぞれ -45 度、 0 度、 45 度、 90 度の配向角を与えた。(ii) つぎに、時刻 t において時間増分 Δt とする有限要素法を用いた非定常流動解析により、速度場が求められる。(iii) これにより時刻 t における速度こう配テンソル $[D]$ を各要素ごとに求める。(iv) この $[D]$ を各要素内に存在する各仮想繊維の繊維軸座標系に変換した後、 Δt を乗じて $[D']$ を求める。(v) $[D']$ より仮想繊維の回転角変位 $\Delta\theta$ を求め、時刻 t における配向角 θ に加え、 $\theta + \Delta\theta$ を時刻 $t + \Delta t$ における仮想繊維の配向角とする。(vi) 上記の操作の後、材料流動に伴う繊維の移動を考慮するため、各要素間の境界において時刻 t から $t + \Delta t$ 間における流量を計算し、この流量に見合う本数の仮想繊維を要素間で引き継ぐこととした。ただし、流動先端部の充てん中要素 (Filling Element) では、スキン層の厚み分だけ流動材料の損失を考慮している

Fig. 6. Flow chart of orientation analysis.

ので、このスキン層への損失流量に見合う本数の仮想繊維をこの要素から先に到達した順に取り去るものとした。

以上の(ii)~(iv)を金型キャビティが充満するまで繰り返す。この繊維配向のシミュレーションのフローチャートを Fig. 6 に示す。

4 繊維配向の実験解析

成形材料にポリプロピレンを用い、射出成形機により Fig. 1 および Fig. 2 に示す試験片を成形した。材料の中には、繊維配向の傾向を測定するためのトレーサ繊維を混入し、あわせて強化繊維の含有率による繊維配向への影響を調べるため、ガラス繊維 20 wt % の試験片の成形も行った。それらの成形条件および実験条件を Table I に示す。

Table I. Experimental condition.

Used resin		Polypropylene
Injection pressure	(MPa)	60
Injection ratio		10
Glass fiber contents	(wt%)	0, 20
Shape		Square, Circle
Eccentric distance	(mm)	0, 25, 50
Holding pressure	(MPa)	20
Holding pressure time	(sec.)	5
Cooling time	(sec.)	10
Mould temperature	(°C)	45
Melt temperature	(°C)	205

試験片中の繊維配向の測定に関して、X線透過率の低い、ニッケルでメッキした炭素繊維をトレーサとして、約 0.01 wt % を樹脂に混入し、軟X線写真撮影を行った。その写真の一例を Fig. 7 に、また○印がゲート位置を示す。数値解析結果との比較を対象として、Fig. 8 に示した偏光写真により、スキンの厚みを測定し、スキン層を十分に削り取った試験片を用いて、コア層の繊維配向を求めた。この軟X線写真を 7.5 mm×7.5 mm の方眼に分割し、各方眼内のトレーサ繊維を20本選び、その配向角を測定した。同一成形条件に対して3個の試験片を、また同一位置の方眼に

Fig. 7. Soft X-ray photograph of injection moulded test piece (square plate; Eccentric distance=25mm).

Fig. 8. Photographs of the cross section of an injection-moulded polypropylene under a polarized microscope.

対して60本のトレーサ繊維の配向角を測定した。配向の強さを表すため、平均配向角に対する配向率を次式によって定義し、算出した。

$$\text{平均配向角 } \bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{60} \theta_i}{60} \quad (4)$$

$$\text{配向率 } I = 50 - \sigma \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{60} (\theta_i - \bar{\theta})^2}{60}} \quad (6)$$

ここで、 θ_i は各トレーサ繊維の配向角、 σ は平均配向角に対する標準偏差である。

測定された繊維配向結果の図示には、各方眼の重心の位置に平均配向角を向いた線分にて表示し、その線分の長さが配向率に比例するように描いた。各配向図には配向率に対する尺度を示した。

5 結果および考察

繊維配向の数値解析結果を実験解析結果と比較して、その解析手法の有効性・実用性についての検討を行う。

5.1 繊維配向解析結果

一例として矩形平板の偏心 25 mm の場合について充てん過程の繊維配向の数値解析結果を Fig. 9 (a)~(d)に、実験解析結果（ガラス繊維含有率 0 wt %）を Fig. 10 (a)~(d)に示す。なお、図は対称軸より上半分のみを示す。

数値解析結果の繊維配向図に示されるように、ゲート左側の壁面に接するまでは、拡大流れにより同心円状に配向する。その後、壁面に沿うせん断流れを生ずるため、壁面に沿う配向となる。充てんが進むにつれてゲート上側壁面によりせん断流れを生ずるようになり、上側壁面に沿う繊維配向を示すようになる。また、ゲートから上方向および右方向へ向って拡大流れが生じているため繊維が流れ方向に垂直に配向している。これにより、壁面に沿う配向と拡大流れに垂直な配向との境界が生じている。さらに、充てん間ぎわの流動状態が右上のすみ角部へ向かう縮小流れであるため、その領域の繊維配向がわずかにすみ角方向へ向かっていることがわかる。全体の傾向としては、壁面の拘束

境界と壁面近傍の先行流れにより, 強いせん断流れによる配向の傾向がみられる。

つぎに実験解析結果の繊維配向図に示されるように, せん断流れによる配向と拡大流れによる配向の境界が解析結果ほどはっきりしないが, 壁面に沿った強い配向と, ゲート右側および上側部分において流れ方向に垂直な配向状態となっている。

これらの繊維配向図を比較すると数値解析結果は実験解析結果と定性的に良い一致が得られていることが

わかる。しかし, 数値解析の理想化によるものと思われるが, 全体的に数値解析結果の方が繊維配向の状態が配向モデルに従ってその傾向が強く現れているようである。

Fig. 11~15 にそれぞれ円板の偏心 0 mm, 偏心 25 mm, 偏心 50 mm, 矩形板の偏心 0 mm, 偏心 50 mm の最終段階の数値解析結果を示す。これらは, 矩形板の偏心 25 mm の場合と同様, 実験結果と比較すると少々強い配向率を示しているが, 定性的に良い一致が

Fig. 9. Fiber orientation obtained by numerical analysis (square plate; eccentric distance = 25 mm).

Fig. 10. Diagram of the tracer fiber orientation in core layer (square plate; glass fiber content = 0 wt%; eccentric distance = 25 mm).

Fig. 11. Fiber orientation obtained by numerical analysis (circular plate; eccentric distance = 0 mm; time = 0.657 sec.).

Fig. 12. Fiber orientation obtained by numerical analysis (circular plate; eccentric distance = 25 mm; time = 1.242 sec.).

Fig. 13. Fiber orientation obtained by numerical analysis (circular plate; eccentric distance = 50 mm; time = 2.124 sec.).

Fig. 14. Fiber orientation obtained by numerical analysis (square plate; eccentric distance=0 mm; time=0.954 sec.).

Fig. 15. Fiber orientation obtained by numerical analysis (square plate; eccentric distance=50 mm; time=2.730 sec.).

Fig. 16. Diagram of the tracer fiber orientation in core layer (square plate; glass fiber content=20 wt%; eccentric distance=25 mm).

みられた。

5・2 繊維含有率の影響

本論文においては、繊維間の相互作用が繊維配向におよぼす影響がないものとして数値解析を行っているが、実際の射出成形品においては、30~40 wt%に達する強化繊維を混入する場合もあり、繊維相互間の影響を考慮する必要がある。そこで、ガラス繊維含有率が0 wt%と20 wt%におけるトレーサー繊維の配向を調べ、本数値解析手法の実用性を検討する。

流れ様相の極端な場合として、矩形平板の偏心25 mmのガラス繊維含有率20 wt%の繊維配向図をFig. 16に示す。この場合、ガラス繊維含有率0 wt%(Fig. 10(d))と比較して繊維配向状態にほとんど差がないことがわかって、一般に、ガラス繊維含有率が高くなると繊維間で互いの回転を妨げる相互作用が強まり、同一試験片内における繊維配向の分布に急激な変化を与える要因が減じ、平均化されるものと想像されるが、本実験のように比較的繊維含有率が少なく、また配向状態に急激な変化を生じさせるような流動状態の急変する領域が存在しなければ、ガラス繊維含有率の差による繊維配向への影響は、顕著に現れないものと考えられる。

円形平板の場合もガラス繊維含有率の違いによる繊維配向の変化はわずかで、ガラス繊維含有率20 wt%程度までは、ガラス繊維含有率と繊維配向の相関関係はほとんどないものと考えられる。

6 結 言

本研究においてFRTPの射出成形に対するCADシステム構築への一指針として、成形品に生ずる機械的性質等の異方性の原因となる強化繊維の配向を予測する数値解析手法の開発を試み、実験解析結果と比較検討することにより、その手法の有効性・有用性の検

証を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) 材料流動に完全に支配されて運動する繊維配向モデルを用いて、繊維配向のシミュレーションを行い、実験結果との検証において配向率に関しては定量的に多少の差異が認められたが、平均配向角の様相や配向率の分布状態など定性的に良い一致が得られた。

(2) ガラス繊維含有率の増加による繊維配向への影響を実験解析により検討した結果、本実験で用いた20 wt%以下の含有率では、繊維間の相互作用の影響がほとんどないと考えられた。

以上により、平板形状の射出成形品における強化繊維の配向を定性的に予測することができる数値解析手法が確立されたものと考えられる。

(昭和59年3月22日 第13回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 高橋秀郎, 松岡孝明, プラスチックス, **32**, No. 12, 24 (1982).
- 2) 高分子学会, “プラスチック加工の基礎”, p. 180 (1982) 工業調査会.
- 3) 平井恒夫, 片山伝生, 平井三友, 米田 慎, 松本直樹, 第28回 FRP 総合講演会講演要旨集, p. 61 (1983).
- 4) 森 隆, “射出成形品の設計”, p. 93 (1974) 工業調査会.
- 5) W. C. Jackson, C. L. Tucker III, SPE 41st Annual Technical Conference, p. 751 (1983).
- 6) 富田幸雄, “レオロジー”, p. 102 (1975) コロナ社.
- 7) T. Tanaka, T. Hirai and T. Katayama, Proc. of 2nd Int. Sympo. on Finite Element Methods in Flow Problems, p. 275 (1976).
- 8) T. Hirai and T. Katayama, Proc. of the 1978 Int. Conf. on Composite Materials, p. 1283 (1978).
- 9) T. Hirai, T. Katayama and H. Hamada, Advances in Composite Materials, p. 1606 (1980).