

射出成形品の繊維配向における層構造の解析(1)

—線膨張係数のそり変形挙動におよぼす影響—

山下 勝久^{*1}・野々村 千里^{*1}・山田 敏郎^{*2}

Analysis of Layered Structure Distinguished by Fiber Orientation in Injection Molding(1)

—Effect of Thermal Expansion Coefficient on Warpage Deformation Behavior—

Yamashita, Katsuhisa^{*1}/Nonomura, Chisato^{*1}/Yamada, Toshiro^{*2}

One of the most important issues to guarantee high quality is the ability to predict the warpage deformation behavior of injection molded thermoplastics. This is especially true for the glass fiber (GF) reinforced thermoplastics, where anisotropy in fiber orientation can lead to the increase of warpage deformation.

In this study, we observed cross sections and measured the multi-directional thermal expansion coefficients of GF reinforced polyamide 6 (PA 6) samples of varying weight fractions of glass fiber and thicknesses. In photomicrographs of cross sections, the fiber orientation showed a symmetrical structure of three layers, skin/core/skin, which depended on the weight fraction of glass fiber and the thickness of the molding. The thermal expansion coefficient showed an anisotropy that depended on the fiber orientation. In addition, numerical results obtained using a model that considered the fiber orientation distribution at each layer thickness qualitatively agreed with the experimental measurements of warpage deformation.

Key words : Injection molding/Fiber orientation/Layered structure/Warpage deformation/
Thermal expansion coefficient

1. 緒 言

熱可塑性樹脂においてガラス繊維を充填材とした複合化は、力学的特性や熱的特性などの改質方法として、使用される製品の要求性能に応じて様々に利用されている。ガラス繊維強化の樹脂を用いた射出成形品は、繊維配向を原因とする成形収縮の異方性により、そり変形が助長される傾向があり、繊維配向挙動やそり変形挙動を数値解析によって予測することは、成形加工分野における重要な課題の一つである。

射出成形品における強化繊維の配向挙動やそり変形挙動の予測技術については、これまで多くの研究がなされてきた。繊維配向挙動については、配向状態の観察や力学的特

性の計測^{1)~3)}により、配向方向が成形品の強度、剛性、線膨張係数などの力学的特性に影響をおよぼすことが報告されている。また、射出成形の可視化実験から、充填過程の金型断面を観察することにより、中央部では樹脂の平面流動に影響する領域、金型壁面近傍部では樹脂の冷却効果によるせん断流動に影響する領域が存在することを確認し、厚み方向で層構造の繊維配向分布が形成されることが報告されている。さらに、キャピティ寸法や成形条件についても検討され、これらの要因と繊維配向の層構造との関係が報告^{4),5)}されている。

一方、繊維配向の数値解析については、平面流動場を仮定する Jeffery の運動理論によって予測する手法⁶⁾や、厚み方向の五層構造を予測する手法⁷⁾などによって、成形品の厚み方向で配向状態を考察した結果が報告されている。また、これらの理論解析によって、成形後のそり変形挙動を予測する手法⁸⁾も報告されており、成形品のモデル化において繊維配向の影響が大きいことが示されている。射出成形時のそり変形挙動は、前述した繊維配向以外にも、成形過程における結晶化挙動⁹⁾や、残留応力分布¹⁰⁾などの構造や特性の影響も大きく作用し、そり変形挙動の予測には、これらの詳細な検討も必要と考えられる。

^{*1} 東洋紡績(株) 総合研究所
大津市堅田 2-1-1 (〒520-0292)
TOYOBO Co., LTD. Research Center
2-1-1, Katata, Otsu 520-0292, Japan

^{*2} 金沢大学工学部物質化学工学科
金沢市小立野 2-40-20 (〒920-8667)
Kanazawa University, Faculty of Engineering
2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa 920-8667, Japan
2001. 2. 28 受理

筆者らは、ポリアミド6(PA6)を用いた射出成形品を対象として、そり変形挙動を予測する数値解析方法を検討^{11~13)}し、繊維配向の考慮によって実際の成形品のそり変形挙動を再現するモデルの構築を試みることで、繊維配向とそり変形の関係について考察を行ってきた。その結果、ガラス繊維強化の樹脂におけるそり変形挙動は、繊維配向の影響を大きく受けることが確認された。しかし、実際の射出成形においては、成形品の形状や樹脂に配合されるガラス繊維の重量比率など様々な状況が存在し、そり変形挙動は複雑さを増しており、これまでの研究では、これらの挙動に対して詳細な検討を行った例は少ないと思われる。

本報では、ガラス繊維強化のPA6を使用した成形品を対象とし、繊維の重量分率と成形品の肉厚を変化させた場合において、成形品断面を観察することにより繊維配向の層構造について考察を行った。また、これらの部分において各方向の線膨張係数の測定を行い、成形品の異方性について検討した。さらに、配向状態と線膨張係数の実測結果からそり変形予測の数値解析におけるガラス繊維配向モデルの構築を行い、リブ付平版におけるそり変形挙動の肉厚依存性に対し、数値解析結果と実験結果の比較により、配向モデルの適合性を検討した。以下、その結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究に使用した材料は、PA6 (T-803：東洋紡績製) に、直径 1.3×10^{-2} mm のガラス繊維を重量分率 $V = 0 \sim 60$ wt% で複合させた樹脂である。成形品は、図1に示すように、寸法が縦100 mm、横100 mmの平板 (Type-A) であり、厚さ $T_b = 2, 3, 4$ mm の三種類に変更できるように入れ子方式の金型を使用した。金型は、サイドゲート方式 (ゲート幅4 mm、ベース厚さ1.5 mm、ランド長2 mm) で、射出成形機 (IS-100 E：東芝製) に取付け成形を行った。成形条件は、ジェッティングなどの成形不良が発生しないように配慮して、表1に示すような射出圧力38 MPa、保圧力40 MPa、シリンダー温度280℃、金型温度60℃、射出時間8 s、冷却時間20 sで成形を行った。以上の成形品から縦10 mm、横10 mmの寸法でダイヤモンドカッターを使用して切出し、繊維配向観察と線膨張係数測定用の試験片を作製した。

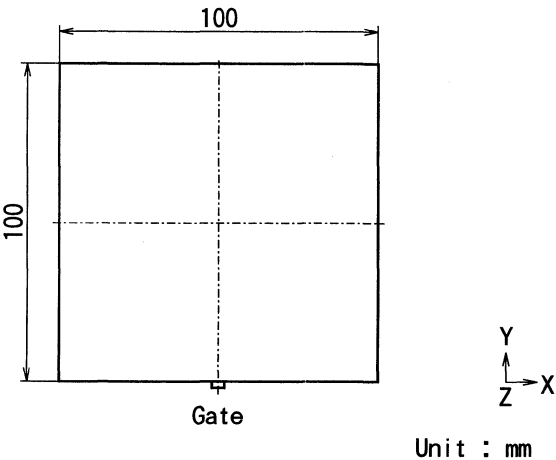


Fig.1 Dimensions of test specimen (Type-A)

2.2 ガラス繊維の配向観察方法

成形品の繊維配向は、試験片の断面を研磨器によって研磨し、実体顕微鏡 (SMZ-100 E：ニコン製) を使用して表面から裏面までの間を連続的に写真撮影を行った。観察位置は、繊維配向の層構造について検討が容易に行える成形品の中央部とした。また、樹脂の流動距離と繊維配向の関係について検討するため、 $V = 30$ wt% の成形品では、ゲートからの距離が異なる位置について観察を行った。

2.3 線膨張係数の測定方法

線膨張係数を測定する位置は、前述と同じ成形品の中央部とした。なお、試験片は樹脂の再結晶化の防止と試験片内部での結晶化度の分布を除去するため、100℃の環境下で24 hの熱処理を行い、その後、23℃のデシケーター中に吸湿しない環境で保存した。線膨張係数は、熱応力ひずみ測定装置 (TMA/SS：セイコーインスツルメンツ製) を用い、試験片の図1に示すX方向 (樹脂流動方向に対して垂直方向)、Y方向 (樹脂流動方向に対して平行方向)、Z方向 (厚さ方向) について、 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ の測定を行った。温度条件は、10℃/minの昇温速度で、30~120℃までの範囲で測定した。

2.4 そり量の測定方法

そり量を測定した成形品は、 $V = 30$ wt%の樹脂を使用し、図2に示すようにリブ厚さ $T_r = 2$ mm、ベース厚さ $T_b = 2, 3, 4$ mm の三種類のリブ付平板 (Type-B) で、Type-Aの金型において移動側金型の入れ子を取り替えて同一の射出成形機、成形条件で作製した。なお、ショット間の寸法バラツキをなくすため、移動側、固定側の金型温度が安定する成形開始から10ショット目以降を連続的にサンプリングした。また、成形品は、吸湿を避けるため防湿袋中にて保管して48 h以上経過した後、そり変形挙動を測

Table 1 Experimental conditions

Injection machine	TOSHIBA IS-100 E	
Melt temperature	(℃)	280
Mold temperature	(℃)	60
Injection pressure	(MPa)	38
Packing pressure	(MPa)	40
Injection time	(s)	8
Cooling time	(s)	20

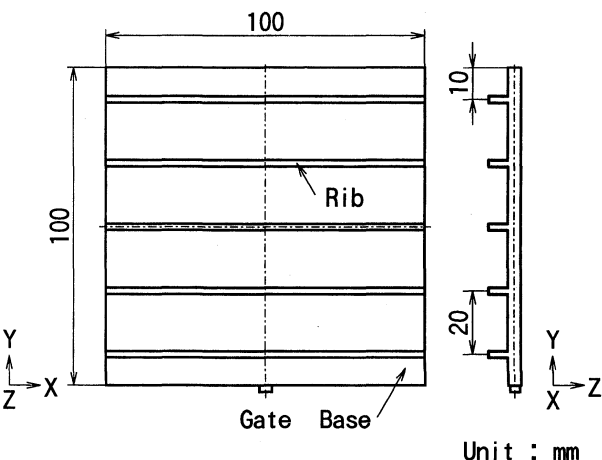


Fig.2 Dimensions of test specimen (Type-B)

定した。そり量の測定は、三次元測定器（GEOPAC：三豊製）を用い、リップを下にした状態でベース面のZ方向の高さについて計測し、両端の平均値から中央部の値を減じた量をプラス側のそり量として、X方向とY方向について、ゲートから異なる位置について三箇所を測定を行った。

3. 実験結果

3.1 繊維配向状態

成形品においてガラス繊維が層構造を示す代表的な例について、断面の観察位置および方向を模式的に表わしたものと代表的な断面写真（ $V = 30 \text{ wt\%}$, $T_b = 3 \text{ mm}$ ）とを図3に示す。同図よりガラス繊維は、肉厚方向の中心で対称性を示しており、成形品の両側の表面部近傍において樹脂流動方向に強く配向する領域（以下、スキン層と定義する）が確認された。また、その間の領域（以下、コア層と定義する）では、中心の近傍において樹脂流動方向に対し垂直方向に強く配向する領域が存在しており、スキン層との境界に近づくほど垂直方向から樹脂流動方向の配向に変化することが確認された。図4に示す断面写真は、前述の $V = 30 \text{ wt\%}$, $T_b = 2, 3, 4 \text{ mm}$ と異なる厚さの場合を比較したものである。同図よりガラス繊維が樹脂流動方向に強く配向するスキン層は、肉厚によらずほぼ同じ厚さであり、コア層は肉厚の増加にしたがって、流動方向に対し垂直方向の配向が強くなる領域が増加することが確認された。また、 $T_b = 4 \text{ mm}$ の場合では、コア層において成形品の表面

と平行でないガラス繊維が多く存在し、三次元的な配向状態も確認された。樹脂流動方向に強く配向する層をスキン層と考える場合、成形品の繊維配向は全ての肉厚の場合でスキン/コア/スキンの三層構造におおよそ分布することが確認された。

図5に示す断面写真は、 $T_b = 2 \text{ mm}$ の成形品で $V = 10, 20, 30, 50 \text{ wt\%}$ の場合を比較したものである。同図より、ガラス繊維の重量比率が増加するにしたがって、樹脂流動方向に対して垂直方向に配向するガラス繊維が分布する領域が減少しており、スキン層の厚さが増加することが確認された。また、 $V = 30 \text{ wt\%}$, $T_b = 2 \text{ mm}$ の繊維配向について、ゲートからの距離を変更した場合の観察結果を図6に示す。同図より、全ての位置で三層構造が現れており、スキン層の厚さはゲートから離れるにしたがって増加し、ゲートの反対側の部分で減少することが確認された。

3.2 線膨張係数の異方性

ガラス繊維の重量分率が変化する場合（ $V = 0 \sim 50 \text{ wt\%}$ ）において、 $T_b = 2, 3, 4 \text{ mm}$ の試験片におけるX, Y, Z方向の線膨張係数の測定結果をそれぞれ図7～9に示す。 $T_b = 2 \text{ mm}$ の場合において、各方向の線膨張係数は、以下に示す傾向が確認された。Y方向は、 $V = 5 \text{ wt\%}$ でわずかに値が増加し、それ以降で重量分率の増加にしたがって低下する。X方向は、 $V = 20 \text{ wt\%}$ まではY方向より低い値で減少し、 $V = 30 \text{ wt\%}$ で増加に転じ、Y方向より高い値になり、それ以降の重量分率でわずかに減少し、Y方向より高い値で推移する。Z方向は、 $V = 30 \text{ wt\%}$ までは増加し、それ以降では減少する。 $T_b = 3 \text{ mm}$ の場合においても、各方向の線膨張係数の変化は、 $T_b = 2 \text{ mm}$ の場合とほぼ同

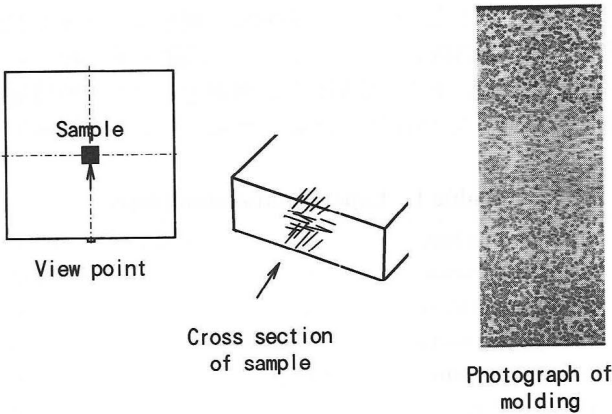


Fig. 3 Schematic diagram in cross section of molding

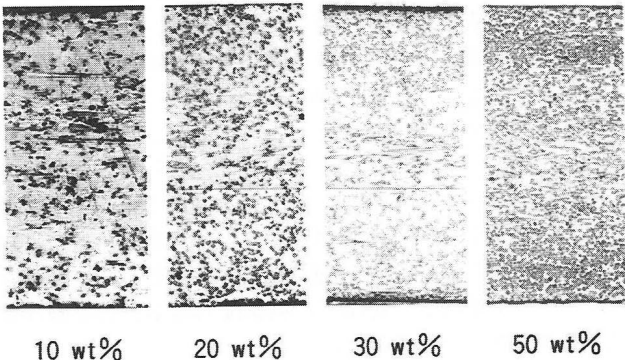


Fig. 5 Photographs in cross section of molding with varying glass fiber content ($T_b = 2 \text{ mm}$)

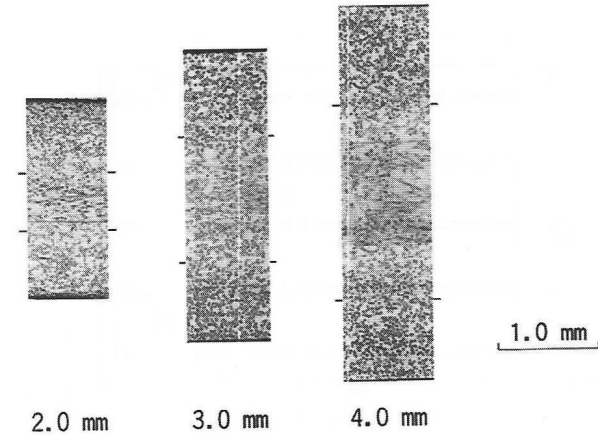


Fig. 4 Photographs in cross section of molding with varying thickness ($V = 30 \text{ wt\%}$)

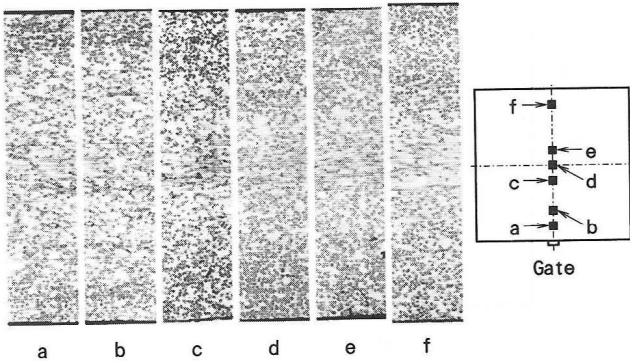


Fig. 6 Photographs in cross section of molding at each point ($T_b = 2 \text{ mm}$, $V = 30 \text{ wt\%}$)

じ傾向が確認された。 $T_b = 4 \text{ mm}$ の場合においては、線膨張係数の変化は、 $V = 30 \text{ wt\%}$ までは $T_b = 2, 3 \text{ mm}$ と同じ傾向になるが、それ以降において $T_b = 2, 3 \text{ mm}$ に見られた Y 方向の値が X 方向より高くなる傾向がなく、全ての重量分率において Y 方向の値が X 方向より大きくなることが確認された。

4. 有限要素法による変形解析

Type-B 成形品のそり変形の予測に使用した流動解析、繊維配向解析、熱応力解析の数値解析方法について、その要約を以下に示す。なお、熱応力解析では、そり変形挙動が繊維配向のみに支配されると仮定し、金型内における収

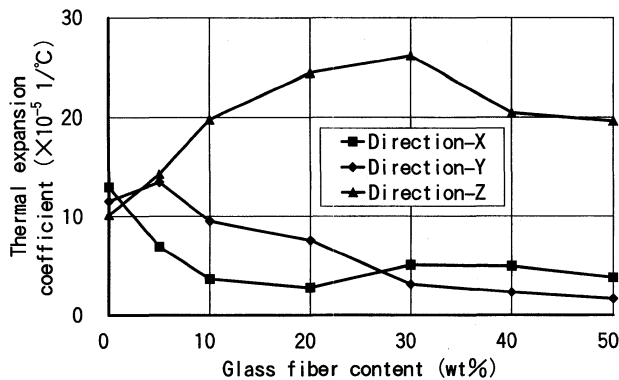


Fig. 7 Relationship between thermal expansion coefficient and glass fiber content ($T_b = 2 \text{ mm}$)

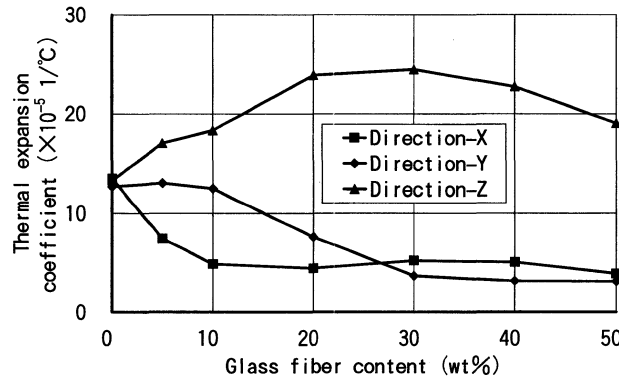


Fig. 8 Relationship between thermal expansion coefficient and glass fiber content ($T_b = 3 \text{ mm}$)

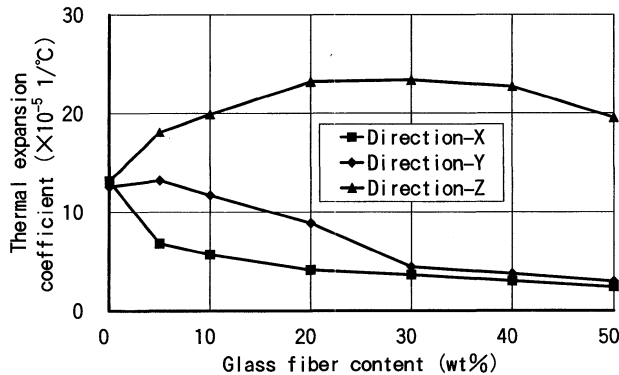


Fig. 9 Relationship between thermal expansion coefficient and glass fiber content ($T_b = 4 \text{ mm}$)

縮量や結晶化度の分布などは無視し、金型離型後の熱収縮量を境界条件として与えた。

4.1 流動解析

金型キャビティ内の充填から金型離型時までの経時的な変化を推定するため、CIMP-PACK 3 DM (Cornell Injection Molding Program, Cornell University) を用いて、圧縮性非ニュートン流動解析を行った。三角形シェル要素を使用し、金型内の充填過程における樹脂流動を Hele-Shaw 流れと、保圧過程におけるラミナー流れを仮定し、三次元形状を平面場における二次元流動として数値解析を行った。成形中における金型内の熱伝導は、厚み方向のみの熱移動を仮定した。材料定数は、溶融粘度について温度およびせん断速度依存性を、比容積について温度および圧力依存性を、比熱および熱伝導係数について温度依存性をそれぞれ考慮して数値解析を行った。

4.2 繊維配向解析

数値解析におけるガラス繊維配向のモデルは、上述の実験結果から以下の項目を仮定した。

- ① ガラス繊維配向は、三層構造で肉厚方向の中心で対称性を持つ。
- ② スキン層は、充填過程に樹脂が冷却する流動停止層となり、せん断流動場に支配される。このためスキン層のガラス繊維は樹脂の流動方向に配向する。
- ③ コア層は、充填過程において樹脂の流動層(コア層)となり、平面流動場に支配される。薄肉品の場合に、肉厚方向の配向を無視し、平面方向の配向のみを考慮する。

これらの仮定は、図 10, 11 に示す線膨張係数の X 方向、Y 方向の比 α_y/α_x と重量分率の関係や成形品肉厚との関係が図 4, 5 に示すスキン-コア層の厚みの関係に対応することから、成形品の配向状態を近似するモデルであると考えられる。スキン層の配向角は、前節で計算した流動ベクトルを主軸方向と定義した。また、コア層の配向角は、Jeffery の理論を応用して以下の式を用いて定義した。平面流動場において任意の時間における繊維重心の位置 x, y は、図 12 に示すように繊維を楕円形と仮定するとき、

$$U = dx/dt = a_{11}x + a_{12}y + c \quad (1)$$

$$V = dy/dt = a_{21}x + a_{22}y + c \quad (2)$$

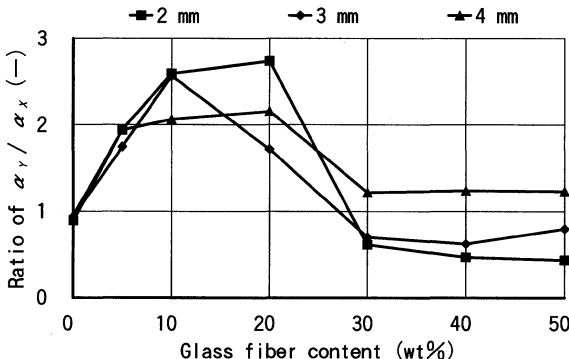


Fig. 10 Relationship between ratio of thermal expansion coefficient α_y/α_x and glass fiber content

となり、流動解析から得られる流動ベクトル U , V を初期条件として与えられる。このときの繊維の回転角 ϕ は、

$$\begin{aligned}\phi &= d\phi/dt \\ &= \phi + B [dxy \cos 2\phi - 1/2(dxx - dyy) \sin 2\phi]\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned}dxx &= \partial U / \partial x \\ dyy &= \partial U / \partial y \\ dxy &= 1/2(\partial V / \partial x + \partial U / \partial y) \\ \phi &= 1/2(\partial V / \partial x - \partial U / \partial y) \\ B &= (r_p^2 - 1) / (r_p^2 + 1) \\ r_p &= a/b\end{aligned}$$

である。本報の数値解析では、ガラス繊維のアスペクト比を $r_p = 20$ の一定値と仮定して、ガラス繊維長の分布を無視した。以上の方法で充填開始から終了時までにおける繊維の運動と配向角の計算を行い、各要素に配向角の平均値を求め、コア層の主軸方向を定義した。

4.3 熱応力解析

成形品のそり量の計算は、金型離型から室温までの熱収縮量を境界条件として、汎用の線形応力解析プログラム (I-DEAS) を用いて行った。使用した要素は、四辺形厚肉シェル要素で、各要素に強化方向および各方向のヤング率、線膨張係数、ポアソン比を定義した。要素の主軸方向は、前述した繊維配向解析のスキン層とコア層の厚さの構成比率で重ね合わせて定義し、繊維配向の層構造を考慮した。なお、スキン層の厚み (T_s) は、成形品中において一定と仮定して、図 13 で計測された値の平均値 ($T_s/2 = 0.67$ mm) を任意の位置について定義し、成形品の肉厚が異なる場合において、コア層の厚さ (T_c) のみを変化させた。線膨張係数は、図 7~9 のデータを利用し、スキン層とコア層の

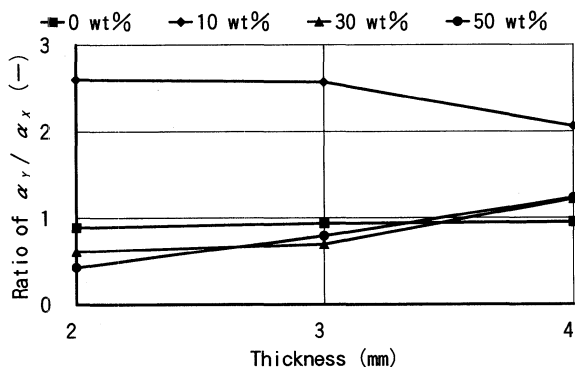


Fig. 11 Relationship between ratio of thermal expansion coefficient α_y/α_x and thickness

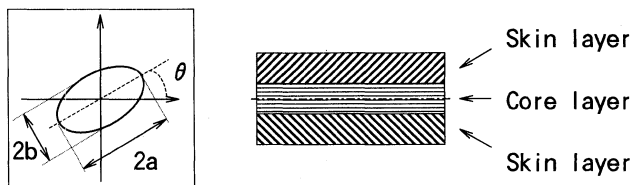


Fig. 12 Schematic diagram of composite laminate model

X 方向と Y 方向について推定値を算出し、次に、任意の要素において各層の厚さの構成比率と強化方向から主軸方向と直行方向の値を推定して定義した。ヤング率は各要素で定義された線膨張係数を Schapery 式¹⁴⁾に適用して配向強度を計算し、配向強度から Halpin-Tsai 式¹⁵⁾により修正して定義した。

要素分割図は図 14 に示すように、前述の 4.1~2 で使用した三角形要素の重心を求め、三つの四辺形状に要素を再分割して、解析モデルの剛性が適正になるよう考慮した。なお、新たに分割して作成された要素の材料定数や主軸方向などデータは、元の要素と同じものを使用し、また、要素の重心と節点間に新たに発生した節点の熱収縮量などのデータは、元の節点の線形補間を行って定義した。変位境界条件は、ゲート側の節点の全自由度を、また、ゲートと反対側にある節点の Z 方向を拘束した。温度条件は、金型の固定型側温度を 65℃、移動型側の温度を 75℃ として、移動型側の蓄熱を考慮した。

5. 数値解析結果

5.1 成形品の繊維配向について

Type-B 成形品の繊維配向の一例として、 $T_b = 3$ mm, $T_s = 2$ mm, $V = 30$ wt% における数値解析結果を図 15 に示す。なお同図は、配向方向をベクトル表示したものである。同図よりスキン層の配向は、ベース部ではゲートから放射線状になり、成形品の中央部以降では全て Y 方向となり、また、ほとんどのリブ部では、リブに平行な X 方向となる。コア層の配向は、ベース部では外周部近傍にお

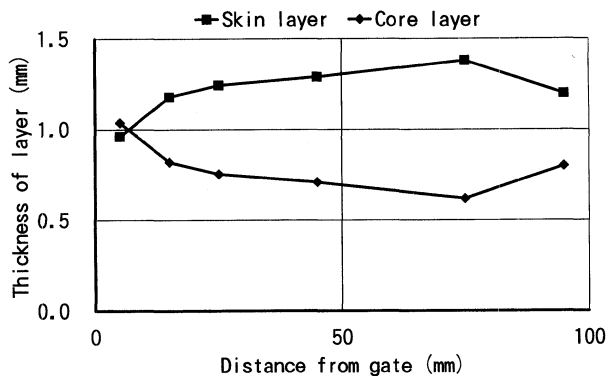


Fig. 13 Relationship between thickness of layer and distance from gate ($T_b = 2$ mm, $V = 30$ wt%)

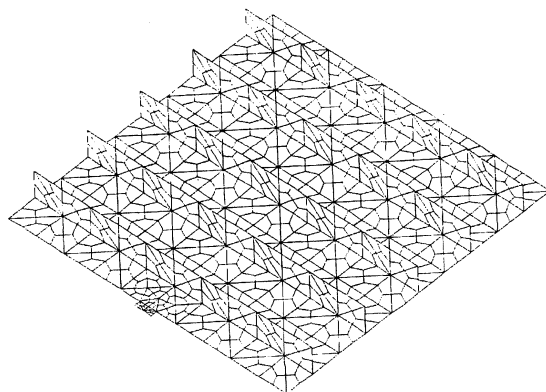


Fig. 14 Finite element mesh

いて外周に沿っており、それ以外の中央部では樹脂流動方向に対して垂直な方向となり、また、リブ部ではスキン層と同様にX方向となる。Type-Bの成形品において、Type-Aで断面の観察を行った位置の中央部の繊維配向は、スキン層がY方向、にコア層がX方向であり、図4のガラス繊維の観察結果と同じ傾向であることが確認できた。

5.2 そり変形挙動について

Type-Bの成形品において、 $T_b=2, 3, 4$ mm, $T_r=2$ mm, $V=30$ wt%の場合における熱応力解析と実験を比較した結果について以下に示す。図16, 17は、成形品の中央部においてベース部の肉厚が変化した場合におけるXおよびY方向のそり量の比較である。なお、解析結果では上述の解析方法の妥当性を検証するため、解析方法において、Case-1では上述した三層モデルの解析方法により、Case-2ではコア層の強化方向をスキン層と同じ方向にして数値解析を行った。両図より、実験結果は、全てのベース肉厚の場合でY方向ではプラス側、X方向ではマイナス側のそりが発生し、成形品全体として鞍型に変形する。また、Y方向のそり量は $T_b=2$ mmで顕著に大きくなり、ベース肉厚の増加にともなって減少する。また、X方向のそり量はY方向に比較して肉厚依存性が少ないが、ベース肉厚の増加にともなって同様に減少する。

数値解析結果のそりは、Case-1, 2とも実験結果のそり量と一致しないが、そりの方向が同じ状態を示す。しかし、Y方向のそり量におけるベース部の肉厚依存性は、図16に示されるようにCase-1において $T_b=2$ mmで顕著であり、実験結果と同じ傾向があるのに対し、Case-2においては、この傾向がない。また、X方向のそり量はCase-1においてベース部の肉厚による変化が少ないが、Case-2においては、ベース部の肉厚にともなって減少する。以上

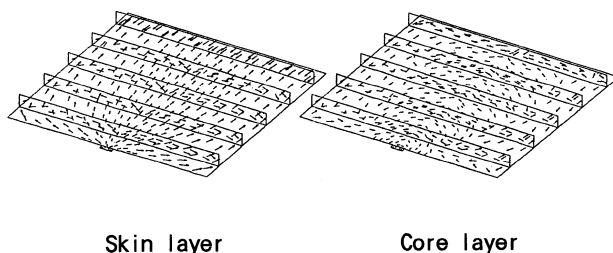


Fig. 15 Glass fiber orientation in skin and core layers by FEM

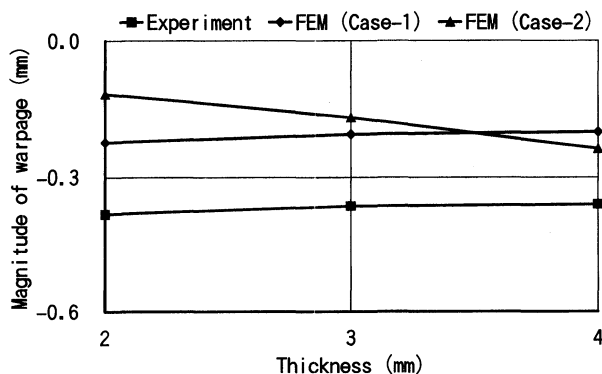


Fig. 16 Relationship between magnitude of warpage and thickness ($T_r=2$ mm, $V=30$ wt%, Direction-X)

から、リブ付平板におけるベース部の肉厚依存のそり挙動は、Case-1の三層モデルが実験結果と同じ傾向が示されている。また、図18, 19は、 $T_b=3$ mm, $T_r=2$ mm, $V=30$ wt%の成形品におけるX方向、Y方向のそり量について、実験結果とCase-1の数値解析結果を比較したものである。両図より、実験結果は、X方向、Y方向ともゲート側のそり量が大きく、数値解析結果も、ゲート側のそりが最も大きく、実験と同様な傾向が示されている。また、この条件における数値解析の変形状態を図20に示す。同図では、高さ方向のみの変位を20倍で表示しているが、数値

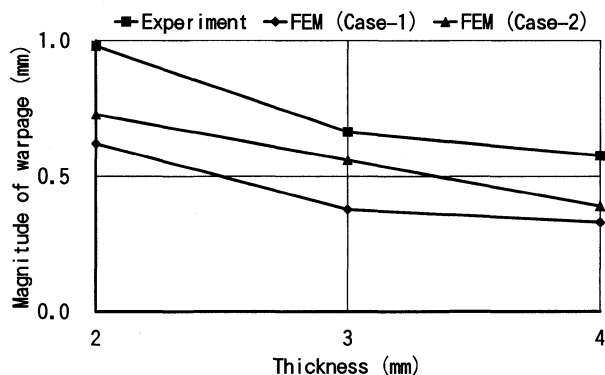


Fig. 17 Relationship between magnitude of warpage and thickness ($T_r=2$ mm, $V=30$ wt%, Direction-Y)

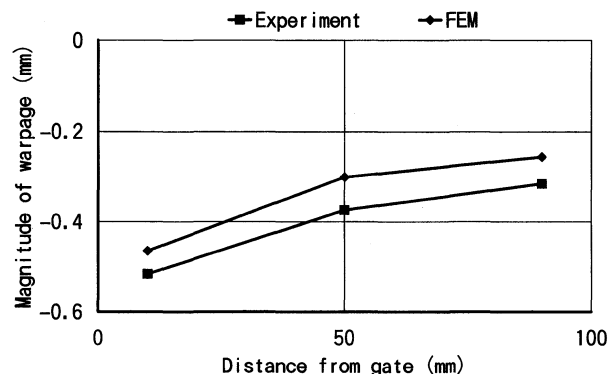


Fig. 18 Relationship between magnitude of warpage and distance from gate ($T_b=3$ mm, $T_r=2$ mm, $V=30$ wt%, Direction-X)

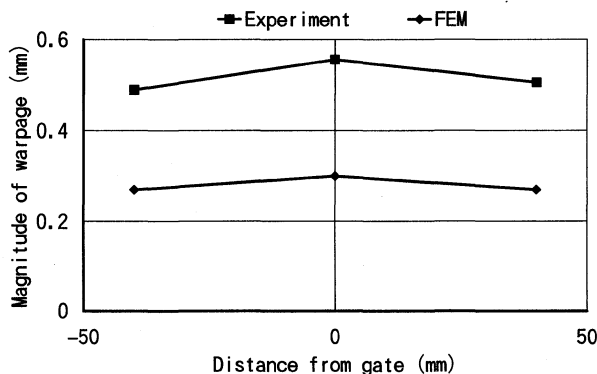


Fig. 19 Relationship between magnitude of warpage and distance from gate ($T_b=3$ mm, $T_r=2$ mm, $V=30$ wt%, Direction-Y)

解析結果は、実際の成形品で生じる鞍型のそりが再現されている。

6. 考 察

繊維配向と線膨張係数の異方性の関係、および、数値解析結果から得られた知見について以下に述べる。

6.1 繊維配向が線膨張係数におよぼす影響

本報において成形品の層構造は、せん断流動場に支配される樹脂流動方向に配向する層をスキン層として、それ以外の部分をコア層として考察した。図3~6の断面写真においてコア層には、平面流動場に支配される層とスキン層との境界に両方の流動場の影響を受ける層があるが、繊維配向の層構造をスキン/コア/スキンの三層構造として、繊維配向と線膨張係数との関係について考察する。X方向、Y方向の線膨張係数の比 α_Y/α_X は、図10より $V=20$ wt%までは、全ての肉厚で1以上であり、ガラス繊維が流動方向に対して垂直方向に配向することが示唆される。 $V=30$ wt%以上においては、 α_X/α_Y が大きく減少し、 $T_b=2, 3$ mmの場合で1以下、 $T_b=4$ mmの場合で約1.2になり、ガラス繊維の重量比の増加にともなって、繊維配向が垂直方向から流動方向に変化することが示唆される。このときのガラス繊維の層構造は、図5に示すようにスキン層の厚さが、ガラス繊維の重量分率の増加にともなって大きくなる状態が観察されており、これらの状態が線膨張係数の測定結果に対応するものと考えられる。また、図11に示すように線膨張係数の比 α_Y/α_X は、 $V=30, 50$ wt%において、肉厚の増加にともなって増加しており、繊維配向が流動方向に沿う方向から垂直方向に変化することが示唆される。このときのガラス繊維の層構造は、図4に示すように成形品の肉厚によらずスキン層の厚さがほぼ同じで、コア層の厚さが肉厚の増加にともなって大きくなる状態が観察されており、これらの状態が線膨張係数の測定結果に対応するものと考えられる。このような結果からX方向およびY方向の線膨張係数は、スキン、コア層の厚さの影響を大きく受けるものと考えられる。

また、図7~9に示す各方向の線膨張係数において、ガラスの重量分率が極めて小さい $V=5$ wt%の場合には、ガラス繊維を含まない場合 ($V=0$ wt%) に比較して、Y方向ではわずかに大きくなり、X方向では著しく低下する。Y方向が増加する原因として、Schapery式¹⁰⁾で示されるポアソン比の影響が確認され、このような挙動からも、線膨張係数の変化は、繊維配向の影響を大きく受けているも

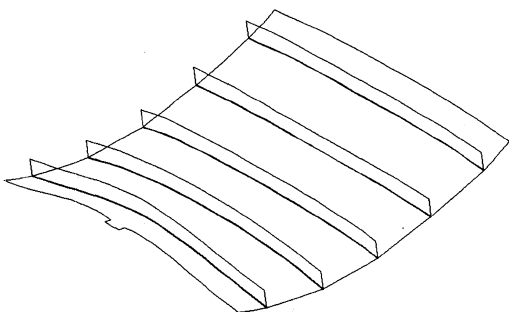


Fig. 20 Deformation diagram of warpage by FEM ($T_b=3$ mm, $T_s=2$ mm, $V=30$ wt%)

のと考えられる。

6.2 そり変形と繊維配向状態について

Type-B 成形品のそり変形の状態は、実験結果と数値解析の両方とも図16, 17に示すようにX方向でマイナス側、Y方向でプラス側の鞍型の変形になる。このようなそり変形挙動を示す原因として、数値解析結果から以下の状態が推定される。図15に示す繊維配向の数値解析結果から、ベース部のガラス繊維はコア層の中央部とゲート側の両側の領域を除いて、スキン層、コア層ともY方向に強い配向を示すと考えられる。一方、リブ部のガラス繊維は、スキン、コア層ともX方向に強い配向を示しており、このような配向状態からベース部のX方向の収縮がリブ部より大きくなり、成形品のX方向のそりがマイナス側になると推定される。また、成形品の位置によるそり変形挙動の変化は、図18に示すように実験結果と数値解析の両方ともX方向のゲート側のそり量が、他の位置に比べ大きい状態である。この原因として、ベース部においてゲート近傍のガラス繊維が、スキン、コア層ともY方向に強い配向を示すと考えられ、この部分のX方向の収縮が大きくなり、ゲート側のそり量が増加するものと推定される。

次に、ベース肉厚に依存するそり変形挙動の変化は、図16に示すようにX方向について、実験結果と数値解析のCase-1において、肉厚の増加にともなってマイナス側のそりが減少する傾向がある。一方、数値解析のCase-2では、この傾向とは反対にそりが増加する。これらの現象から、ベース肉厚に依存するそりは、コア層の繊維配向の影響が大きいと考えられ、ベース肉厚の増加にともなってコア層が大きくなり、ベース部の収縮の異方性が減少することが肉厚依存性の原因と推定される。また、そり変形挙動の数値解析において、スキン/コア/スキン層を考慮するモデル化が、リブ付き平板における肉厚依存のそり変形挙動を定性的に再現するものと考えられる。

7. 結 言

ガラス繊維強化のPA6を対象に、ガラス繊維の重量分率と成形品の肉厚を変化させた場合について、繊維配向の観察と線膨張係数の異方性について測定を行い、繊維配向の層構造について検討した。また、これらの結果からガラス繊維配向モデルの構築を行い、現実の成形品のそり変形挙動に対し、数値解析結果と実験結果の比較を行った結果、以下に示す結論を得た。

- ①断面の顕微鏡写真より、Type-A 成形品の中央部において繊維配向は、スキン/コア/スキンの対称的な三層構造が観察され、各層の厚みにおいてガラス繊維重量分率と成形品の肉厚依存性があることを確認した。また、スキン層の厚みは成形品の肉厚が変化しても、ほとんど変化しないことを確認した。
- ②線膨張係数は、繊維配向のスキン/コア/スキンの三層構造における各層の厚さによって変化し、繊維配向の影響を受けることを確認した。
- ③Type-B 成形品のそり変形挙動に対して、繊維配向の層構造分布を考慮した数値解析モデルを構築し、数値解析結果と実験結果との比較を行った結果、数値解析結果は肉厚依存性を示すそり変形挙動における実験結果と定性

的に一致することを確認した。

本報において、スキン/コア/スキン層の三層構造の数値解析モデルを用いてそり変形挙動の予測を試みた結果、簡易な三層構造のモデルにおいても、そり変形挙動を定性的に予測することができることを示した。しかし、定量的な検討ができる数値解析方法ではないため、各層の肉厚分布、樹脂流動や結晶化など成形加工過程における詳細な挙動について分析し、これらを考慮した数値解析方法を構築することが今後の研究課題として残る。

本研究の線膨張係数、繊維配向観察を実施するに当たり、協力を頂いた東洋紡績の中川珠緒氏、山田君子氏にお礼申し上げます。

本研究の発表を許可された東洋紡績に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 平井恒夫, 片山伝生, 平井三友, 米田 慎: 材料, **34**, 256 (1984)
- 2) Crowson, R. J., Folkes, M. J. and Bright, P. F.: *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 925 (1980)
- 3) Bright, P. F., Crowson, R. J. and Folkes, R. J.: *J. Mater. Sci.*, **13**, 2497 (1978)
- 4) 横井秀俊, 村田泰彦, 西 芳夫, 関 武邦: 成形加工, **7**, 600 (1995)
- 5) 村田泰彦, 横井秀俊, 長谷元弘, 原田浩次: 成形加工, **7**, 663 (1995)
- 6) Matsuoka, T., Takabatake, J., Inoue, Y. and Takahashi, H.: *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 957 (1990)
- 7) Gupta, M. and Wang, K. K.: *Polym. Comp.*, **14**, 367 (1993)
- 8) Kikuchi, H. and Koyama, K.: *Polym. Eng. Sci.*, **34**, 1411 (1994)
- 9) Trotignon, J. and Verdu, J.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **34**, 1 (1987)
- 10) 石島 守, 山部 昌, 永田真一, 新保 實, 宮野 靖: 成形加工, **7**, 582 (1995)
- 11) 山下勝久, 野々村千里: 成形加工 '94, **9** (1994)
- 12) 江口英樹, 山下勝久, 野々村千里: 成形加工 '95, **45** (1995)
- 13) 山下勝久, 野々村千里, 上辻靖智, 山田敏郎: 成形加工シンポジウム '00, **31** (2000)
- 14) Schapery, R. A.: *J. Comp. Mater.*, **2**, 380 (1968)
- 15) Halpin, J. C.: *J. Comp. Mater.*, **3**, 732 (1969)