薄肉射出成形による繊維強化品の変形挙動 —線膨張係数の異方性や繊維配向分布がそりに及ぼす影響—

佐藤 和人^{*1}・山部 昌^{*2}・古橋 洋^{*3}

The Deformation of Fiber Reinforced Thin Plates Obtained by Injection Molding —Influence of the Anisotropy of Thermal Expansion Coefficient and the Fiber Orientation Distribution on Warpage—

Satoh, Kazuhito^{*1}/Yamabe, Masashi^{*2}/Furuhashi, Hiroshi^{*3}

Injection molded plates using fiber-reinforced plastics often exhibit deformation due to fiber orientation. We would expect thin injection molded plates to have different material flow rates and fiber interactions than general thickness (3 mm) plates.

In this report, a detailed examination of the deformation, fiber orientation distribution and thermal expansion coefficient anisotropy in thin injection molded plates using fiber reinforced plastics was conducted, and the following conclusions were obtained.

- 1) Twisting (warpage) occurs in the thin injection molded plates using fiber-reinforced plastics.
- 2) Thin injection molded plates form a three layer structure normally seen in thicker 3 mm plates, however, the boundaries between the layers become indistinct.
- 3) The material property distribution in each layer in the thin injection molding plate is quite large when compared with thicker 3 mm injection molded plates.
- 4) Fiber orientation and anisotropy of the thermal expansion coefficient are likely causes for the generation of twist (warpage) in thin plates molded from fiber-reinforced plastics

Key words : Injection molding/Warpage/Fiber orientation ratio/Thermal expansion coefficient ratio/Shrinkage ratio

1. 緒 言

射出成形法は短時間に複雑形状の部品を大量生産出来ることから広く用いられるプラスチック成形法の一つである。また、デザイン自由度も高く、部品の一体成形が可能なことから、部品点数の削減や工程数削減等のメリットがあり、自動車、家電、航空機の機械部品等の樹脂化に大きく貢献している。しかし、その一方で、射出成形品はそり変形、

ひけ、フローマークといった成形不良の問題を抱える事が多い。特に、そり変形は寸法精度に影響を与えるため、品質低下を招くと共に、はめ合い部を有した部品への展開の妨げとなる。

射出成形品のそり変形は①成形過程中に分子鎖が配向する事により、線膨張係数の異方性や成形品の面内方向と板厚方向に線膨張係数の分布が発生する事による収縮の不均一によるもの（流動要因）、②冷却過程で成形品表層と内部に発生する冷却速度差による収縮の不均一（熱的要因）により発生すると考えられる。また、繊維強化樹脂の場合は、成形品板厚方向の繊維配向の違いによる収縮の不均一（繊維配向要因）により生じると考えられる¹⁾。

近年、環境負荷低減のため、自動車の低燃費化が望まれており、自動車外装部品などは軽量かつデザイン自由度が高い利点を生かし、スチール材から熱可塑性樹脂を用いた射出成形品への代替が検討されている²⁾。

一方、既存の射出成形部品では現行の肉厚から薄肉化することによる軽量化、更には材料削減による省資源化、コ

^{*1} 金沢工業大学大学院 材料設計工学専攻
白山市八東穂 3-1 石川リサーチパーク内 (〒924-0838)
Advanced Materials Science R&D Center, Kanazawa Institute of Technology

3-1, Yatsukaho, Hakusan 924-0838, Japan
^{*2} 金沢工業大学 工学部 機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology

^{*3} (株)デンソー 生産技術開発部
R&D Dept. DENSO CORP.
2005.2.22 受理

ストダウンが望まれている。このような薄肉化はセンサー等に代表される小型射出成形部品にも望まれている。

射出成形品では樹脂が冷却固化しながら流動するため、成形品の板厚方向に樹脂流速差が生じる。この樹脂流速差によりせん断力が生じ、分子鎖の配向に分布が発生する。薄肉射出成形では自動車用バンパー等に代表される一般的な成形品の肉厚（3 mm 程度）と射出率を同程度にした場合、キャビティー内部での樹脂流速は高速となる。よって、薄肉射出成形では成形品の板厚方向に生じる分子鎖の配向の分布は大きくなり、そり量も大きくなると推察される。

自動車用小型部品の場合、厳しい使用環境や薄肉化に伴う強度低下を防ぐために繊維強化樹脂が用いられている。よって、そり発生メカニズムは樹脂流動中の繊維挙動や繊維配向の影響も考える必要があり、繊維強化樹脂を用いた薄肉射出成形品におけるそりの発生メカニズムは複雑となる事が予想される。

これまで、繊維強化樹脂を用いた射出成形品に関して、多くの研究がなされており、山下らはガラス繊維強化樹脂を用い、成形品肉厚を变量した場合の繊維配向と層構造、層構造と板厚全体の線膨張係数に関しての検討を報告している³⁾。また、馬場らは炭素繊維強化 LCP を用いた薄肉射出成形品の繊維配向と曲げ特性の検討を報告しており⁴⁾、いずれも成形品の板厚方向に生じる繊維配向の分布が線膨張係数や弾性率といった機械的性質に大きな影響を与える事を明らかにしている。更に道井らはリブ付き射出成形平板を用い、リブ部と平板部の板厚方向における繊維配向観察を詳細に行い、両部の繊維配向の違いがそり変形に大きく影響を与えている事を明らかにしている⁵⁾。このように繊維強化樹脂を用いた射出成形品において、そり発生メカニズムや機械的特性を検討するためには面内や板厚方向における繊維配向の違いを詳細に把握する事が非常に重要である。

しかし、これまでの検討では成形品各層の繊維配向と線膨張係数の関係や薄肉射出成形品を詳細に層分割し、各層の繊維配向や線膨張係数の異方性とそり変形の関係を検討した研究例は少ない。

本論文では繊維強化樹脂を用いた薄肉射出成形時のそり発生メカニズムを明らかにすることを目的とし、成形板を詳細に層分割し、繊維配向度や線膨張係数を測定することで薄肉化や繊維を充填することがそり変形に与える影響を検討した。

2. 供試材料および成形条件

本研究では、薄肉化ならびに繊維がそり変形に与える影

響を確認するため、強化材としてガラス繊維を 30 wt% 含有した繊維強化グレードのポリブチレンテレフタレート（ポリプラスチック㈱製 DURANEX[®]3300 以後 PBT-GF とする）、および非強化グレード（ポリプラスチック㈱製 DURANEX[®]2002 以後、PBT-N とする）を用いた。

図 1 に本研究で用いた成形板形状を示す。成形板は 70 × 70 mm とし、板厚は 3, 0.7, 0.5 mm である。なお、板厚は入れ子を変更することで種々の板厚に変更が可能である。板厚を变量する事により、樹脂流動がゲート形状の影響を受けない様にするため、また、ジェットング防止の 2 点からゲート形状はオーバーラップとした。なお、本研究では 0.7, 0.5 mm を薄肉成形板と定義する。

表 1 に成形条件を示す。成形には型締力 980 kN の射出成形機（FANUC 製 α -100 iA）を用いた。

3. 変形量測定

3.1 変形量測定方法

PBT-GF を用いて成形した薄肉成形板では成形板の端部に大きなねじれが発生した。このねじれは成形板が 3 mm の場合では発生しない。そこで、変形モードとそり量を定量的に評価するため、各成形板の変形量を測定した。

PBT-GF を用いた薄肉成形板のねじれは、薄肉化によるものと繊維を含有した事の両因子の影響が考えられる。そのため、PBT-GF を用いた各肉厚（3, 0.7, 0.5 mm）並びに PBT-N における各肉厚（0.7, 0.5 mm）の変形量測定を行った。

測定には 3 次元的に変形量を測定できるレーザー変位計（KEYENCE 製 LT-80）を用いた。このレーザー変位計は三角測量を応用した方式で、受光素子は CCD（Charge coupled device）と光位置検出素子によって構成される。

Fig. 1 Size of injection plate

Table 1 Molding conditions

	PBT-GF			PBT-N	
	3 mm	0.7 mm	0.5 mm	0.7 mm	0.5 mm
Injection rate (cm ³ /s)	26.5	26.5	79.6	26.5	26.5
Holding pressure (MPa) : 1 st/2 nd	68.6/49.0	68.6/29.4	68.6/49.0	68.6/29.4	68.6/29.4
Holding Time (s) : 1 st/2 nd	7/3	3/2	3/2	3/2	3/2
Cooling time (s)	15	15	15	15	15
Resin temperature (°C)	250	250	250	250	250
Mold temperature (°C)	70	80	70	80	70

Fig. 2 Measuring method of warpage

Fig. 4 Deformation mode in PBT-GF (0.7 mm)

Fig. 3 Deformation mode in PBT-GF (3 mm)

Fig. 5 Deformation mode in PBT-GF (0.5 mm)

半導体レーザー光は投光レンズを通し、集光される。集光されたレーザー光は対象物に照射され、対象物から拡散反射された光の一部は受光レンズを通して光位置検出素子上にスポットを結ぶ。その対象物が移動する事によってスポットも移動するため、そのスポット位置を検出することにより変位量を知ることが出来る (図 2)。

測定はゲートを切り離れた後、定盤上に置いた成形板の上面にレーザーを照射し、x,y 方向へそれぞれ 5 mm 間隔でマーキングし、各々の交点を測定点とした。よって測定点は計 81 箇所となる。測定した結果は更に、点 A (0, 0), B (70, 0), C (0, 70) の 3 点を基準点とし、基準点より各々の点における変形量に補正した。

3.2 変形量測定結果

そり量測定結果を図 3~7 に示す。また、そり変形のモードを比較するため、各板厚の成形板における D 点の変形量を図 8 に示す。

PBT-GF を用いた薄肉成形板 (板厚が 0.7, 0.5 mm) では、D 点で最大のそり量となる事が分かった。しかし、同じくガラス繊維を含有した場合であっても板厚が 3 mm の場合、ねじれではなく、ゲート近傍にわずかなそりが発生する (図 3~5)。

PBT-N を用いた薄肉成形の場合、板厚が 0.7 mm ではねじれは発生しない (図 6)。しかし、板厚を 0.5 mm まで薄肉化した場合、PBT-GF の薄肉成形板と同様にねじれが生じる (図 7)。また、板厚が 0.5 mm において、PBT-

Fig. 6 Deformation mode in PBT-N (0.7 mm)

GF と PBT-N の D 点におけるそり量を比較した場合、PBT-N のそり量は減少する (図 8)。

前述の通り、射出成形品に生じるそりは分子の配向や繊維の配向により線膨張係数の異方性や成形品の板厚方向に線膨張係数の分布が生じることで発生する。

PBT-N を用いた薄肉成形板の場合も PBT-GF を用いた薄肉成形と同様に樹脂流速は高速となり、成形過程中のせん断力は大きくなると考えられる。高せん断力を受けた分子鎖は流動方向に強く配向するものの、配向した分子鎖は冷却過程に緩和し、分子鎖は安定な状態 (無配向) に戻ろうとする。そのため、せん断力を受けた状態の分子鎖と

Fig. 7 Deformation mode in PBT-N (0.5 mm)

Fig. 8 Magnitude of warpage at point D

比較し、成形板における配向は小さくなり、線膨張係数の異方性は小さくなると考えられる。一方、繊維強化樹脂の場合、線膨張係数の異方性は成形過程中的樹脂流動によりガラス繊維の配向が生じることで発現される。よって、冷却過程時の緩和の影響は少ない。そのため、PBT-GFを用いた成形板において線膨張係数の異方性はPBT-Nと比較し、大きくなり、そり量が大きくなったと予想される。

上記結果より、PBT-GFを用いた薄肉成形板に生じた大きなねじれは薄肉化に伴う影響と繊維を含有した事による影響の両因子により発生すると考えられ、そり量の大きさや変形モードは板厚方向に生じる線膨張係数の異方性や分布により決定され则认为られる。

本研究で用いたPBT-GFの薄肉成形板(0.7, 0.5 mm)では各肉厚で変形モードが数種存在した。更にその変形モードはショット毎に異なり、成形の不安定さが確認された。複数個の変形モード発生メカニズムは今後の課題とした。

なお、本検討では最も多い変形モードの成形板(D点で最大変形量)でそり量を評価した。

4. 断面観察による層間隔の検討

4.1 断面観察方法

前章の結果より、繊維強化樹脂を用いた薄肉成形板に生じるねじれは成形品内部に生じる線膨張係数の異方性や線

Fig. 9 The cross-section observation of molding varying thickness

膨張係数の分布による影響と推察される。よって、そり発生メカニズムの検討には、成形板を板厚方向に層分割し、各層の物性値(繊維の配向度合い、熱ひずみ)の測定が必要であると考えられる。そこで、物性値測定用の試験片の層間隔を決定するため、断面観察を行った。

断面観察は成形板中央の断面を流動方向に平行な面で行った。観察はミニスパッタコーター(株TOPCON電子ビーム製 SC 760)を用い、観察面をアルゴンで蒸着後、走査型電子顕微鏡(株 TOPCON 電子ビーム製 ABT-32)を用いて行った。

4.2 断面観察結果

PBT-GFを用いた成形板の断面観察の結果を図9に示す。3 mm 成形板の場合、主に繊維が流動方向に強く配向する層と流動直角方向に配向した層の3層構造を示すことを確認した。繊維強化樹脂を用いた射出成形品の成形過程におけるフローフロントはファウンテンフローを形成し、表層に移動した繊維は更にせん断力を受け、樹脂流動方向に配向する。また、中心層は伸長流動の影響を受け、繊維は樹脂流動直角方向に配向する⁶⁾。本検討で用いた3 mmの成形板でもこれまでの報告と同様の結果が得られた。

一方、薄肉成形板においても同様に表層の繊維は樹脂流動方向に配向する。しかし、中間層は樹脂流動方向に配向した繊維と流動直角方向に配向した繊維が混合した層の3層構造が形成され、各層の境界は不明瞭となる。薄肉成形板では3 mm 成形板と比較し、キャビティー厚さが薄いことから、成形板全体の冷却速度は速く、固化層の成長は成形板の内部まで進むと推察される。また、充填時間を比較した場合、0.7 mm の場合は0.22 秒、3 mm 成形板の場合は0.37 秒であったことから、成形時の射出率を3 mm 成形板と同値に設定した場合であっても、樹脂流速は高速となると考えられる。よって、成形過程における樹脂は急速に冷却固化されながら高速で流動するため、せん断力は大きく、せん断力を受ける領域が増加することで伸長流動領

Fig. 10 Method of dividing test pieces into layer

Fig. 11 Molded plate shape and test piece sampling method

域が減少したと考えられ、中心層は流動方向と流動直角方向に配向繊維が混在する層となったと考えられる。

これらのことから板厚が3mmの成形板と薄肉成形板では層構造や全板厚に対しての繊維が流動方向に配向している領域の比率に違いが生じると考えられ、板厚方向で繊維の配向度や線膨張係数の分布に違いが生じると考えられる。

5. 繊維配向度並びに熱ひずみ測定

5.1 物性値測定用試験片の作成方法

繊維強化樹脂を用いた射出成形品の場合、成形過程中的樹脂流動の影響により、面内や成形品の板厚方向に繊維配向の分布が生じる。更に繊維の配向が線膨張係数に異方性を与える。そこで、成形板内部に生じる繊維の配向度の分布を評価するため、また、そり発生要因である、線膨張係数の異方性とその分布を評価するため、繊維配向度と線膨張係数を測定した。

繊維の配向度測定は前節の断面観察の結果より、板厚方向に3層分割した。なお、前章の断面観察結果より板厚が3mmの成形板において繊維が流動方向に強く配向した層をスキン層、中間層をコア層とし、金型固定側をスキン-1、可動側の層をスキン-2とした。また、3mm成形板の場合、1層当たり0.858mmとした。0.7mm、0.5mmの場合は各肉厚の成形板を相似形と見なし、各層の比率が一定になるように、0.2mm、0.158mmとした(図10)。

薄肉成形板ではそりではなくねじれが発生していることから板厚方向の物性値分布だけではなく、面内の異方性も大きい事が予想される。そこで試験片採取箇所はゲート近傍の試験片をゲート部、成形板の端部の試験片をエンド部とした計4カ所、更に各場所で3層の12枚とし、合計36枚(N=3)の試験片を作成した(図11)。

3mm成形板の場合、試験片は、バンドソー(EXKAT製 BC 300 CP)を用い、各層にスライスした後、研磨機(マルトー製 ML-150 P)を使用して、所定の厚さまで研磨した。

一方、薄肉成形板の場合、バンドソーを用いた試験片の

スライスが困難であるため、研磨機を用い、成形板を上下から研磨し、所定の厚さに仕上げた。よって、一つの成形板からは1層しか採取出来ず、3層分の試験片を作成するためには3枚の成形板が必要となる。前述の通り、薄肉成形板ではショット毎にそり変形モードが異なる。この変形モードの違いにより、繊維配向度や線膨張係数に差が生じないようにするため、同一変形モードの成形板(図4中のD点で最大変形量を示す成形板)を9枚用意し、それぞれの成形板より各層の試験片を作成した。

なお、スライス並びに研磨時は摩擦熱による物性値への影響を避けるため、流水により十分冷却しながら試験片作成を行った。

5.2 繊維配向度測定方法

繊維並びに分子の配向度測定は高精度型分子配向計(王子計測機器㈱MOA-3012 A)を用いた。なお、測定周波数は12GHzである。分子配向計は分子の配向によって誘電率に異方性が生じることを利用し、測定を行う。分子配向計は空洞共振器内に試験片を投入し、試験片を回転させながら一定強度のマイクロ波を照射する。この場合、分子配向計では偏波を用いているため、面方向の誘電率に依存した共振カーブが得られる。マイクロ波の周波数を共振カーブのピークレベルの1/2になる高周波側の点で固定し、試験片を1回転することで共振カーブのシフトは透過強度の変化となる。これを極座標変換することで透過強度の角度依存性が得られる。この透過強度の角度依存性より誘電率の最大方向を求め、最大方向とその直角方向の透過強度の比から分子配向度(MOR: Microwave orientation ratio)を求める⁷⁾。

配向度はマイクロ波の透過強度比を測定するため、同配向度であっても試験片厚みの影響を受ける。そこで、配向度は厚み補正されたMOR-cを用いて評価を行う(式1)。

MOR-cはその数値が大きいほど分子の配向が大きいことを表し(異方性が大きい)また、MOR-cが1であれば、無配向であることを示す。

Fig. 12 Example of measurement result of observation result by SEM and fiber orientation ratio

$$\text{MOR-c} = \{tc(\text{MOR-c} - 1)/ts\} + 1 \quad (1)$$

これまで、永田らは分子配向計を用い、アラミド紙の分子配向度の測定を行い、繊維を含有した試験片での MOR-c は繊維の配向を評価していることを明らかにしている⁸⁾。よって、PBT-GF を用いた配向度測定では繊維の配向を評価し（以後、繊維配向度とする）、PBT-N での測定では分子鎖の配向を評価しているものとする。

また、分子配向度の測定にはマイクロ波を用いることから、試験片作成時の吸湿や装置内の空気中に含まれる水分が試験片表面に付着する事で測定誤差を招きやすい⁹⁾。

そこで、作成した試験片はシリカゲルを投入したデシケータ内で 48 時間以上乾燥した。測定時はコンプレッサーエアドライヤー（日本ピュアガス(株)製）を用い、分子配向計内に乾燥空気を投入し、測定した。

5.3 繊維配向度測定結果

分子配向計を用いた繊維配向度測定の妥当性を確認するため、繊維配向度測定における配向角と画像解析による繊維の配向角の比較を行った。図 12 に一例として PBT-GF を用いた 0.7 mm 成形板の SEM 観察結果（表面）と繊維配向度測定結果例（配向パターン）を示す。

図 12-b) において、配向度が小さい場合、配向パターンは円となり、配向度が高くなるに従い、楕円がくびれてくる。画像解析による繊維の平均配向角の計測結果は 4°（流動方向を 0° とした場合）、分子配向計を用いて測定した繊維の平均配向角は 0°（流動方向が 0°）であり、画像解析と分子配向度の配向角の測定結果は一致した。このことから本研究においても分子配向計を用いることで繊維の配向度を評価出来るものとする。

PBT-GF を用いた成形板のゲート部及びエンド部における各肉厚の繊維配向度の測定結果を図 13, 14 に示す。薄肉成形板と 3 mm の成形板での各層の繊維配向度の測定結果を比較した場合、コア層はほぼ同値を示すのに対し、薄肉成形板におけるスキン-1, 2 の繊維配向度は大きくなることが分かった。本研究において、層間隔は各板厚で同

Fig. 13 The measurement result of MOR-c in Gate right

Fig. 14 The measurement result of MOR-c in End right

比率になるよう決定した。薄肉成形板におけるスキン-1, 2 では、薄肉化に伴って、せん断力が大きくなり、3 mm 成形板におけるスキン-1, 2 と比較し、より多くの繊維が流動方向に引き揃えられ、繊維配向度が高くなったと考えら

Fig. 15 The measurement result of MOR-c in Gate right

Fig. 16 The measurement result of MOR-c in End right

れる。

また、0.7 mm においてゲート部とエンド部での繊維配向度を比較した場合、ゲート部ではスキン-1, 2 はそれぞれ、8.22, 7.81 であるのに対し、エンド部では 5.80, 5.78 となり、ゲート部におけるスキン層の繊維配向度は大きい事がわかった。これは樹脂充填完了までの時間をゲート部とエンド部と比較した場合、ゲート部は充填完了まで樹脂が流動しており、エンド部と比較して、せん断力を受ける時間が長くなったためと考えられる。

上記結果より、3 mm の成形板と薄肉成形板での比較、ゲート部とエンド部での繊維配向度の比較より、繊維の配向は、成形過程に生じるせん断力の大きさとせん断力を受ける時間に依存することを示唆していると考えられる。

図 15, 16 に板厚 0.5 mm における PBT-N と PBT-GF の各々の配向度測定結果を示す。PBT-N でも PBT-GF の結果と同様にコア層と比較し、スキン層の分子配向度は大きくなり、成形品板厚方向に生じた分子配向度の分布は大きくなる事がわかった。また、ゲート部とエンド部での比較においても PBT-GF の場合と同様にゲート部で分子配向度が大きくなる事が分かった。

さらに、PBT-N は PBT-GF と比較し、分子配向度そのものの大きさやその分布の大きさ(スキン層とコア層の差)は小さく、繊維を含有する事でスキン層とコア層の配向度

Fig. 17 The measurement result of thermal expansion coefficient in Gate right M.D

Fig. 18 The measurement result of thermal expansion coefficient ratio in Gate right T.D

差がより大きくなる事が分かった。

5.4 線膨張係数算出方法

前節の結果より、PBT-GF における薄肉成形板では成形板の各場所、各層で繊維配向度の分布が生じている事を確認した。繊維強化樹脂では繊維の配向が線膨張係数の異方性に大きな影響を与え、その異方性や分布が収縮率の不均一を与える。

そこで、成形板の板厚方向に生じる線膨張係数の異方性やその分布を測定するため、熱ひずみを測定した。

熱ひずみは繊維配向度測定後の試験片より、流動方向(以後、M.D.とする)、流動直角方向(以後、T.D.とする)を切り出し(図 11)、測定を行った。熱ひずみの測定は熱機械分析装置(島津製作所製 TMA-50)を用い、0.5 g の引張荷重を負荷する。

本論文では樹脂流動過程に生じた繊維配向等に起因した線膨張係数の測定を行う事から流動によって生じた配向の緩和の影響を受けないようにするため、測定は 30℃～65℃ の範囲内で昇降温し、降温時のデータを採取した。よって、線膨張係数の測定により各場所各層の熱収縮が得られる事になる。

得られた各方向の温度と熱ひずみの関係より線膨張係数を算出した。図 17, 18 に線膨張係数の測定例を示す。こ

Fig. 19 The measurement result of thermal expansion coefficient ratio in Gate right

Fig. 20 The measurement result of thermal expansion coefficient ratio in End right

Fig. 21 The measurement result of thermal expansion coefficient in PBT-GF (0.7 mm)

こで、符号が—の場合は熱収縮を表す。板厚が0.7 mmの場合、流動方向の線膨張係数は各層で小さい（流動方向の収縮が小さい）。一方、板厚が3 mmの場合、コア層はスキン-1、-2と比較し、線膨張係数は大きくなる（収縮は大きい）。しかし、T.D.の線膨張係数は両板厚ともM.D.と比較し、線膨張係数は大きくなる（収縮は大きい）。特に板厚が3 mmの場合、スキン層とコア層のM.D.とT.D.の線膨張係数の挙動は逆の傾向を示した。これは図9での断面観察結果より、3 mmの場合はスキンとコア層で繊維の主配向方向が異なるためであると考えられる。

次に測定した線膨張係数の結果を用い、線膨張係数の異方性の評価を行った。線膨張係数の異方性は両方向の線膨張係数の比（T.D./M.D.）により算出した。線膨張係数比が1より大きい場合、繊維はM.D.に配向している事を表し、1以下の場合にはT.D.に配向している事を表す。また、線膨張係数が等方性である場合、線膨張係数比は1を示し、線膨張係数比が1より大きくなるに従い（小さくなるに従い）、線膨張係数の異方性は大きい事を表す。

5.5 線膨張係数比の算出結果

PBT-GFにおける線膨張係数比の算出結果を図19、20に示す。薄肉成形板の場合、スキン層で線膨張係数比は大きく、コア層で線膨張係数比は小さくなり、繊維配向度と同様に成形板の板厚方向に線膨張係数比は大きな分布を示

す。一方、3 mmの成形板においてスキン層とコア層の差は小さく、板厚方向に生じる線膨張係数比の分布は小さくなる事が分かった。

図21にPBT-GFにおける0.7 mm成形板の線膨張係数比の算出結果を示す。本研究ではオーバーラップゲートを使用しており、樹脂がキャビティー内に充填された時点では平行流となっているため、左右で対称な線膨張係数比を示すと考えられる。しかし、線膨張係数比は同じゲート部であっても左右では同値を示さない。また、金型温度は対称条件である事から、成形過程の樹脂流動は成形板の中心を境に対称的な流動となり、物性値分布も対称性を示すと考えられる。しかし、実際の線膨張係数比はコア層を境に非対称な分布となる。このことから、PBT-GFを用いた薄肉成形板品において、線膨張係数比は成形板の層や場所により大きくなり、各層や場所では熱収縮が不均一である事を示唆している。

繊維強化樹脂を用いた薄肉成形板（0.7、0.5 mm）では面内と成形板の板厚方向に大きな繊維配向の分布が生じる。この繊維配向の分布により、面内や成形品の板厚方向に線膨張係数の分布や異方性が生じる。各場所や各層で線膨張係数の分布や異方性の違いにより、収縮率は不均一となり、図4に示すようなねじれが発生したと推察される。

6. 結 言

本論文では繊維強化樹脂を用いた薄肉射出成形に生じるそり発生メカニズムを明らかにすることを目的とし、繊維強化樹脂薄肉射出成形品を詳細に層分割し、各層の物性値を測定することで繊維を含有することや薄肉化がそり変形に与える影響を検討した結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 本研究で用いた繊維強化樹脂及び成形板形状においては、ねじれが発生し、ねじれは薄肉化によるもの、繊維を含有することにより発生する。
- 2) 板厚が3 mmの成形板では板厚方向に3層構造を形成する。薄肉成形板の場合、同様な層構造を形成するが層の境界は不明瞭となる。これは、薄肉化により成形過程中的樹脂は急速に冷却されながら高速で流動するためと推察される。
- 3) 板厚が0.7, 0.5 mmの薄肉成形板では、3 mmの成形板と比較し、成形過程に生じるせん断力が大きくなるため、各層に生じる繊維配向度や線膨張係数の異方性の分布が大きくなる。
- 4) 繊維強化樹脂を用いた薄肉成形板(0.7, 0.5 mm)に

生じるねじれは面内および各層に生じた線膨張係数の異方性の分布により生じる収縮率の不均一によって発生すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) プラスチック成形加工学会編：流す・形にする・固める，98，102，121(1996)，シグマ出版
- 2) 橘 学：成形加工，**15**(10)，665(2003)
- 3) 山下勝久，野々村千里，山田敏郎：成形加工，**13**(6)，400(2001)
- 4) 馬場文明，藤田章洋，濱田泰以：成形加工，**15**(12)，817(2003)
- 5) 道井貴幸，瀬戸雅宏，山部 昌，大塚弘己：成形加工，**16**(7)，467(2004)
- 6) D. ハル：複合材料入門，70(1984)，培風館
- 7) 永田紳一，小山清人：成形加工，**2**(11)，142(1997)
- 8) 永田紳一，川北嘉洋，小山清人：繊維学会誌，**54**(8)，66(1998)
- 9) 永田紳一，小山清人：成形加工，**9**(11)，897(1997)