

Flow Analysis of Long-Fiber-Reinforced Thermoplastic in Injection Molding



高木 香
Kaori Takagi
技術研究所 化学研究
部門



尾野 友重
Tomoshige Ono
技術研究所 化学研究
部門 主任研究員 (掛
長)



花谷 誠二
Seiji Hanatani
化学事業部 樹脂部
主査 (課長)

要旨

長繊維強化樹脂「Verton®」の射出成形に関して、市販ソフトを使用した流動解析を実施した。解析対象は中央にリブのある平板状成形品である。ウエルドの発生、面内および板厚方向の繊維配向分布、機械物性の異方性の予測結果は、実成形品の分析および試験結果とよく一致し、長繊維系樹脂の流動解析に市販のソフトが適用できることを確認した。また、成形品の破壊試験を行い、そのシミュレーション計算を実施した。計算には、流動解析から得られた異方性機械物性値を用いた。計算で求めた荷重-変位曲線は、実験結果とよく一致した。

Synopsis:

Flow analysis of long-fiber-reinforced polypropylene “PP-Verton®” in injection molding was carried out to predict the weld line location, the orientation distribution of fibers and the anisotropic material properties based on the fiber orientation. The predicted results were in good agreement with the experimental data of real molded parts. It was confirmed that the commercially-available flow analysis program could be successfully applied to the above-mentioned analysis of long-fiber-reinforced resin. A bending test of the molded part was carried out along with the FEM simulation of the bending test in which the anisotropic material properties obtained by flow analysis were employed. The load-deflection curve obtained by the simulation was in good agreement with the measured one.

1 緒 言

当社が製造、販売しているガラス長繊維強化ポリプロピレン「PP-Verton®」は、高強度であり、耐衝撃性や耐クリープ性、疲労強度特性に優れている。これまでの用途は短繊維ナイロンやその他の繊維強化樹脂に対する材料代替が中心であったが、最近では、初期設計の段階から、PP-Verton を前提とした部品開発が活発化してきている。Verton の特長を活かす部品とは、静的荷重、動的荷重（衝撃）、あるいは繰り返し荷重を対象とした（準）構造部品である。

新規部品開発においては開発のスピードアップが求められ、製品設計-金型試作-本金型-生産といった流れの中で、製品設計-金型試作の繰り返しを少なくし、時間を短縮する必要がある。

繊維強化樹脂成形品では、成形時の樹脂流動にともない、繊維配向分布が生じることが不可避で、結果として成形品中各所の機械的特性の差（機械的異方性）が生じる。また、繊維強化材に限らず、樹脂成形では流動の合流部はウエルドと呼ばれ、しばしば強度的欠陥となる。したがって、初期設計の段階で、繊維配向に基づく機械的特性を知り、荷重荷重時の応力集中箇所でのウエルド発生回避

を検討することが必要であり、この検討により、開発期間を短縮することができる。

繊維配向にともなう成形品の機械的物性の異方性を予測する手段として流動解析がある。すでに市販の流動解析ソフトが開発され、短繊維系の樹脂を対象とした解析精度の検証はかなり進んでいる^{1,2)}。

本研究では、Verton の射出成形品に関して、(株)プラメディアリサーチの市販解析ソフトを使用した流動解析により、ウエルドの発生、繊維配向分布、機械物性の異方性を予測し、実成形品との比較から、解析精度を検証し、市販ソフトの長繊維系樹脂への適用性を検討した。さらに、流動解析ソフトと構造解析ソフトをインターフェースを介してつなぎ、流動解析で得られた異方性機械物性を用いた構造解析を行い、解析結果と破壊試験結果の荷重-変位曲線を比較した。

2 実 験

2.1 成形品形状

成形品の形状を Fig. 1 に示す。成形品は、60 mm × 90 mm の平板の中央に、長さ 40 mm のリブを持つ形状であり、板厚およびリ

* 平成9年8月29日原稿受付

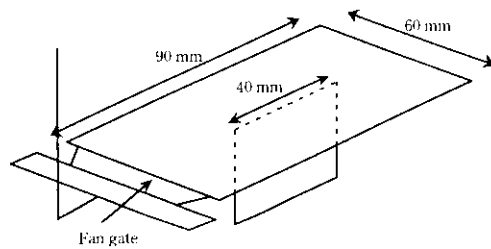


Fig. 1 Geometry of a molded part

Table 1 Sizes of molded parts

	(mm)		
Sample	T2H10	T3H15	T5H25
Thickness of wall and rib	2	3	5
Rib height	10	15	25

Table 2 Molding conditions

Melt temperature	(°C)	240
Mold temperature	(°C)	60
Injection rate	(cm ³ /s)	30
Holding pressure	(MPa)	3.5
Holding time	(s)	5
Cooling time	(s)	30

ブ高さが変更できる。本検討で使用した成形品の寸法および形状名を Table 1 に示す。

2.2 成形

成形材料としては川崎製鉄製ガラス長繊維強化ポリプロピレン (Verton MFX700-10; ペレット長 9 mm, ガラス含有率 50 mass%, ガラス繊維径 17 μ m) を使用した。成形は, Table 2 に示す Verton の標準的な条件を採用した。

2.3 評価

成形品の繊維配向状態は, 軟 X 線写真, および光学顕微鏡により観察した。繊維配向角分布は, 軟 X 線写真を画像処理⁹⁾すること

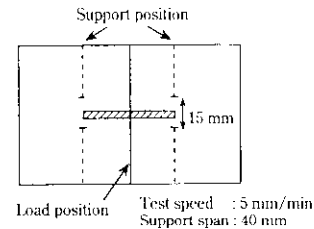


Fig. 3 Bending test method of a molded part

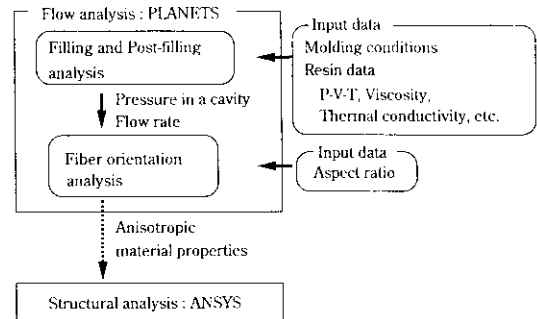


Fig. 4 Flow chart of the analysis

により求めた。成形品から切り出した試験片の弾性率の測定は, JIS K 7055 A 法に準拠した。配向角分布測定, 断面観察, および曲げ弾性率測定部位を Fig. 2 に示す。さらに, Fig. 3 に示すような 3 点曲げ試験方法により, 成形品の破壊試験を行った。リブ長手方向にスパンを 40 mm とり, リブをはさんで 15 mm 開けて拘束し, 成形品中央に荷重をかけた。試験速度は 5 mm/min とした。

3 解析

解析の流れを Fig. 4 に示す。数値解析の離散化手法は流動解析, 構造解析とも有限要素法である。流動解析ソフトは PLANETS ((株)プラメディアリサーチ製) を使用し, 充填保圧冷却解析ならびに繊維配向解析を実施した。

充填保圧冷却解析では, 充填解析で充填開始から終了までの溶融樹脂の流動挙動を, 保圧冷却解析で充填終了から離型までの P-V-T 線図に沿った樹脂の状態変化をシミュレートする。2 次元薄肉流れ,

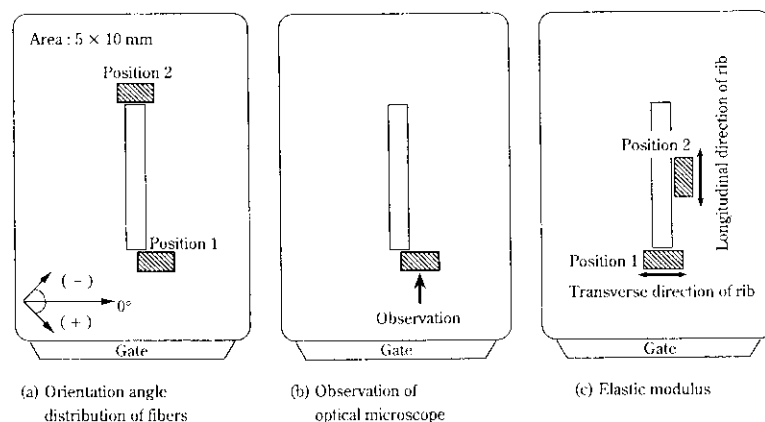


Fig. 2 Position and direction of the specimens taken for the measurements of fiber orientation and flexural modulus, and for the optical microscopic analysis

圧縮性、非ニュートン純粘性を仮定して導かれる、式(1)～(5)の基礎方程式にしたがい計算が行なわれる。

運動方程式：

$$(\partial p / \partial x) = (\partial \tau_{xz} / \partial z) \dots\dots\dots (1a)$$

$$(\partial p / \partial y) = (\partial \tau_{yz} / \partial z) \dots\dots\dots (1b)$$

連続の式：

$$(\partial \rho / \partial t) + (\partial \rho u / \partial x) + (\partial \rho v / \partial y) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

構成方程式：

$$\tau_{xz} = \eta \dot{\gamma}_{xz} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\tau_{yz} = \eta \dot{\gamma}_{yz} \dots\dots\dots (3b)$$

エネルギー方程式：

$$\rho C_p \{ (\partial T / \partial t) + u (\partial T / \partial x) + v (\partial T / \partial y) \} \\ = \{ \partial (\lambda (\partial T / \partial z)) / \partial z + \tau_{xz} (\partial u / \partial z) + \tau_{yz} (\partial v / \partial z) + Q \dots\dots (4)$$

状態方程式：(Spencer と Gilmore の式)

$$(\rho + \dot{\rho})(\rho^{-1} - \hat{\rho}^{-1}) = \dot{R}T \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 x, y, z ：直交座標系 (m) u, v ： x, y 方向流速 (m/s)

t ：時間 (s) p ：圧力 (Pa) τ ：表面力 (Pa)

ρ ：密度 (kg/m³) η ：粘度 (Pa·s) $\dot{\gamma}$ ：剪断速度 (s⁻¹)

λ ：熱伝導率 (J/m·s·°C) C_p ：比熱 (J/kg·°C)

T ：温度 (°C) Q ：内部発熱 (J/m³·s)

$\dot{R}$ (J/kg·°C), $\dot{p}$ (Pa), $\dot{\rho}$ (kg/m³)：近似係数

繊維配向解析では、充填解析により予測された樹脂流動場に繊維を導入することで実施され、繊維配向分布と、その分布に基づいた機械物性が求められる。繊維挙動は、繊維どうしの相互作用、および繊維と樹脂の相互作用を無視した Jeffery モデル⁴⁾で表現している。

$$\dot{\phi} = \{ (\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y) \} + b \{ (1/2) \{ (\partial u / \partial y) \\ + (\partial v / \partial x) \} \cos^2 \phi - (1/2) \{ (\partial u / \partial x) + (\partial v / \partial y) \} \sin^2 \phi \} \dots\dots (6)$$

ここで、 ϕ ：配向角 $b = (r_c^2 - 1) / (r_c^2 + 1)$ r_c ：アスペクト比
繊維配向分布に基づく異方性機械物性値の算出には、Eshelby の等価介在物法⁵⁾を用いた。Eshelby の等価介在物法とは、繊維中に仮想の歪みを仮定することで、繊維をマトリクス樹脂と等価な物性をもつ介在物として扱い、複合材物性を予測する手法である。Fig. 4 中の流動解析の流れ、および上述の基礎方程式の取り扱い他は他の市販ソフトにおいても同じであり、他の市販ソフトを用いた場合にも、得られる結果に本質的な違いはないと考えられる。

算出された異方性機械物性値は、PLANETS-ANSYS インターフェイス ((株) プラメディアリサーチ製) を介して構造解析ソフト ANSYS (ANSYS, Inc. 製) に取り込まれる。構造解析では、線形静的解析を実施した。有限要素モデルは、両者共用で三角形の多層シェル要素を使用した。

充填保圧冷却解析における成形条件には、Table 2 に示した実成形の条件を用いた。構造解析の境界条件は Fig. 2 に従った。成形品中央の荷重位置に強制変位を与え、その部分における反力を求め、初期たわみ-反力曲線を得た。

本報では、繊維配向および機械的特性についての予測結果について述べる。

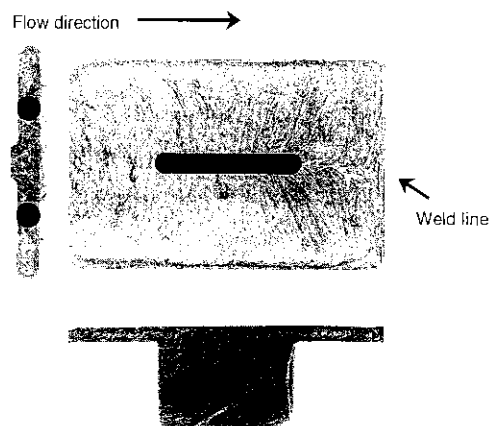


Photo 1 Soft X-ray photographs (T5H25)

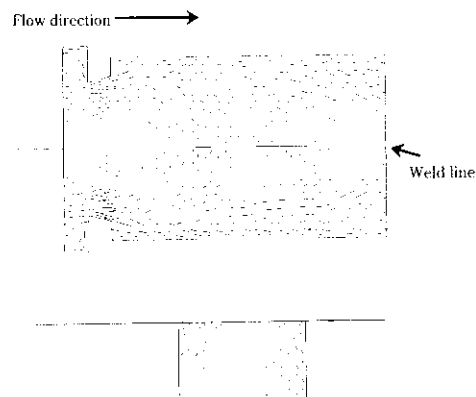


Fig. 5 Fiber orientation distribution obtained by flow analysis (T5H25)

4 結果および考察

4.1 繊維配向

4.1.1 面内配向分布

成形品の軟X線写真を Photo 1 に、また繊維配向状態の解析結果を Fig. 5 に示す。解析結果のベクトルは、向きが要素内の平均配向方向を示し、長さが配向度を示している。形状はともに T5H25 である。平板部、リブ部とも解析による繊維配向の状態は、成形品における実状態と比較的よく一致した。特に、充填解析では不明確であった、リブ後方のウエルドの発生を繊維配向解析は明確に示した。このウエルドは、リブへの充填のために平板部の中央で流れが遅くなった結果発生したものである。

さらに Fig. 6 には Fig. 2(a) 中に示した箇所において測定および算出した繊維配向角分布を比較して詳細に示す。測定箇所 1 および 2 のいずれにおいても、配向角分布の実測値と計算結果はよく一致した。測定箇所 1 では、繊維の主配向方向は約 +30° であった。これは樹脂の流れが拡大流であり、繊維がその流動方向に直角に配向していることを意味する。測定箇所 2 では +50° と -50° の 2 方向に繊維の主配向方向があり、ウエルドになっていることが分かる。

4.1.2 板厚方向配向分布

形状 T2H10 および T5H25 の平板部断面の構造を Photo 2 に示す。観察方向は樹脂流動方向 (リブ長手方向) である。繊維の主配

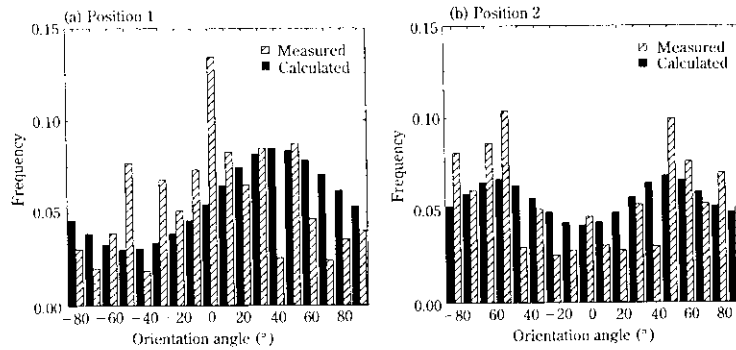


Fig. 6 The distribution of fiber orientation angles (T5H25)

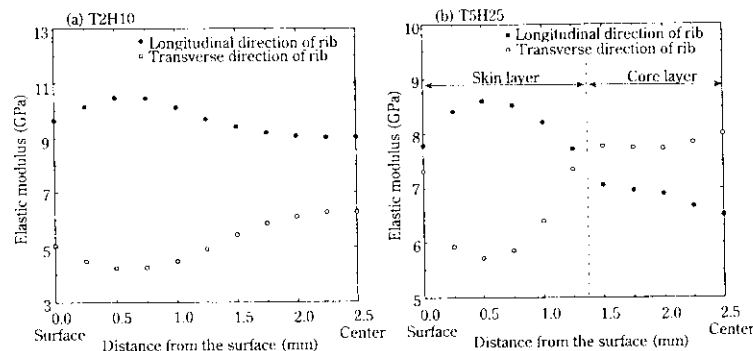


Fig. 7 Change of calculated elastic modulus from surface to center

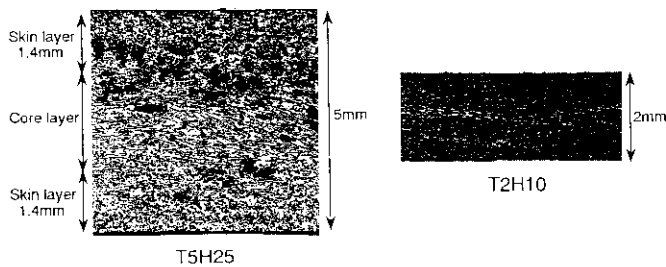


Photo 2 Microscopic photographs of cross section

向方向が流動方向である部分をスキン層、主配向方向が流動方向と垂直方向である部分をコア層と呼ぶが、T2H10 の場合には、繊維は、ほぼ板厚全体で流動方向に向いており、全体がスキン層である。一方、T5H25 のように板厚が厚くなると、板厚の中央に樹脂の流動方向と垂直に繊維が配向しているコア層が発生し、スキン-コア構造が形成される。スキン層厚みは上下とも約 1.4 mm である。

Fig. 2(b) 中に示した箇所における、繊維配向角分布に基づき算出した、平板部のリブ長手方向およびリブ直交方向の弾性率の板厚方向への変化を Fig. 7 に示す。形状 T2H10 の場合には、板厚の中央部まで、リブ長手方向の弾性率の方がリブ直交方向の弾性率より高い。この結果は、板厚全体にわたって、樹脂流動方向へ繊維が配向したスキン層であることを表わしており、実成形体の構造と一致している。また、T5H25 の形状では、平板の表層ではリブ長手方向の弾性率がリブ直交方向の弾性率より高いが、中央に近づくとその関係が逆転する。中央部では繊維の流動方向と垂直な方向への配向が強くなっており、スキン-コア構造が形成されていることを示唆している。リブ長手方向と直交方向の大小関係が逆転するところを、スキン-コアの境界と考えた場合、この結果から求まるスキン層厚

みは 1.4 mm であり、実成形体から求めたスキン層厚みと一致する。板厚の違いによって、平均的な繊維配向の異方性の発現状態が異なるという過去の経験が裏付けられた。

4.2 機械的特性

成形品平板部から切り出した試験片の 3 点曲げ試験により測定した弾性率と、繊維配向解析により得られた弾性率を、Table 3 に示す。解析では樹脂と繊維の界面の接着状態を考慮していないので、実測値より高い値となることは予想されたとおりであるが、実測値にかなり近い値が得られている。成形品の破壊試験により破壊した箇所は、全ての形状において共通で、ゲート側のリブの付け根部であった。

形状 T5H25 の構造解析により得られた最大主応力分布を Fig. 8 に示す。応力分布は上下左右で非対称となっており、機械物性の異方性が反映された結果となっている。解析による応力集中箇所もリブの付け根であったが、より高い応力が発生したのは反ゲート側のリブ付け根であった。リブ後方では、リブ長手方向への繊維配向が強いために発生応力は高くなるが、その分破壊強度も高くなっている。そのため破壊試験ではゲート側のリブ付け根で破壊したと考えられる。

破壊試験および構造解析により求めた初期たわみと反力の関係を Fig. 9 に、解析結果から求めた見かけの弾性率を Table 4 に示す。

Table 3 Elastic modulus of test specimens (GPa)

	T2H10		T5H25	
	Longitudinal direction	Transverse direction	Longitudinal direction	Transverse direction
Measured	5.0	9.0	6.0	6.5
Calculated	6.2	10.3	6.2	7.1

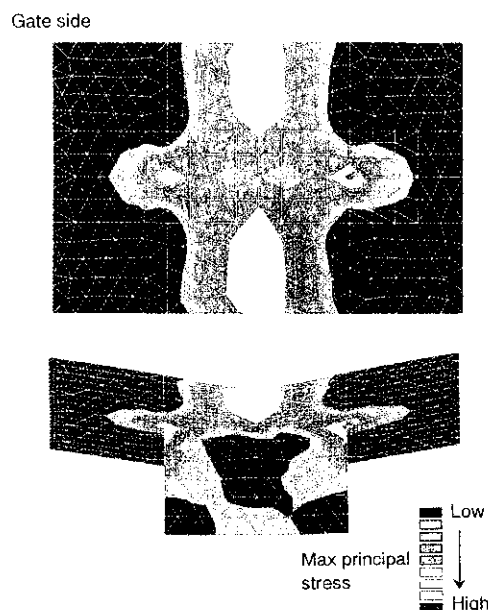


Fig. 8 Distribution of maximum principal stress obtained by structural analysis (T5H25)

見かけの弾性率は板厚が大きくなるにしたがって低下した。これは繊維の主配向方向がリブ長手方向からリブ直交方向へ変化する、すなわちスキン層/コア層比が小さくなるためと考えられる。初期たわみ量と反力の関係は、実測値と計算値でかなりよく一致した。

板厚の影響に関しては、まだ検討の余地が残っているが、ほぼ本システムで、繊維配向に基づく機械的特性を考慮した解析が可能であるとえられる。

5 結 言

長繊維強化樹脂「Verton」の射出成形に関して、市販ソフトを使

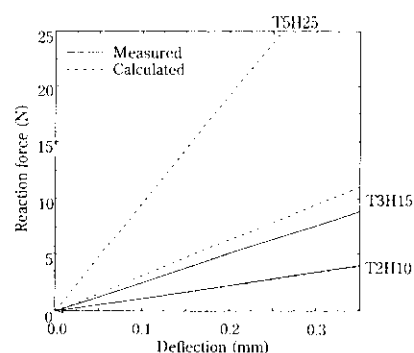


Fig. 9 Reaction force-deflection curve

Table 4 Elastic modulus obtained by structural analysis (GPa)

T2H10	T3H15	T5H25
6.3	5.7	5.1

用した流動解析を実施し、以下の点を確認した。

- (1) ウェルドの発生、繊維配向分布、および機械物性の異方性は、長繊維系樹脂に関しても精度よく予測することができ、市販の流動解析ソフトの適用が可能である。
- (2) 繊維配向角分布に基づく機械物性値の異方性を考慮することにより、構造解析と破壊試験の荷重-変位曲線はよく一致する。

以上のように、繊維配向に基づく機械的特性、ウェルド位置などを精度良く推定できることが確認されたことにより、部品開発の迅速化の可能性が示された。

本研究の遂行にあたり、(株)プラメディアリサーチ殿には各種プログラムの作成によりご協力いただきました。ここに付記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 伊藤 渚基, 大藤 晋男, 安沢 孝久: 「射出成形品の繊維配向を考慮した機械的特性の予測」, 第4回プラスチック成形加工学会年次大会, A101, (1992), 7
- 2) 松本 一昭, 辻村 勇夫, 伊奈 文夫: 「PDC 射出成形 CAE システムによる繊維配向, 機械物性, 反りの予測」, 第4回プラスチック成形加工学会年次大会, A102, (1992), 11
- 3) 矢口 仁, 中居 倫夫, 松田 伸慶, 穴戸 郁郎: 宮城県工業技術センター研究報告, (1991)23, 112
- 4) Jeffery, G. B.: "The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in Viscous Fluid", Proceedings of Royal Society, A102, (1922), 161
- 5) 辻村 勇夫: 「繊維強化樹脂の物性予測への等価介在物法の適用」, 第6回プラスチック成形加工学会年次大会, A103, (1994), 15