

X線CTによる樹脂成形品中のガラス繊維の観察と三次元解析

3D image analysis by X-ray CT for glass fiber within resin casts

滝 克彦 (taki@nvs.co.jp), 高塩 創, 千 容星 *¹
塩田忠弘 (shiota@shimadzu.co.jp), 開本 亮 *²
速水弘樹, 中野 亮 *³

Katsuhiko TAKI, Hajime TAKASHIO, Yong-Sung CHEON*¹
Tadahiro SHIOTA, Akira HIRAKIMOTO*²
Hiroki HAYAMI, Ryo NAKANO*³

*¹ 日本ビジュアルサイエンス株式会社

*² 株式会社島津製作所

*³ 東レエンジニアリング株式会社

*¹ Nihon Visual Science, Inc.

*² Shimadzu Corporation

*³ Toray Engineering Co.,Ltd.

Abstract : プラスチック製品にガラス繊維を加えて成形した場合、繊維の配向状態と機械物性や反りなどの成形不良には深い相関がある。容易に繊維の配向状態を知る手段として、産業用 X 線 CT 装置を用いた観察手法を検討し、三次元画像から繊維の形態や分布を評価するソフトウェアを開発した。例として、平板状の成型品において、スキン層とコア層の繊維の配向状態を分析し、コンピュータシミュレーションによる解析結果との比較を行った。

Key Words: X線 CT, Computed Tomography, 三次元画像, 射出成形, 繊維, 配向

1. はじめに

短繊維強化樹脂の射出成形では、樹脂流動の影響を受けて繊維の配向状態が異なってくる。この配向分布により生じる剛性や収縮の異方性が、表面品質や反りなどの寸法精度に影響を及ぼし、成形不良の原因となることが知られている。従来は繊維配向状態を観察するために成形品を裁断して断面を撮影し、二次元的に画像処理することが一般的であったが、この方法では評価に手間が掛かり、また観察面から傾いた三次元的配向状態を正確に把握することが難しい。そこで非破壊検査などに用いられる産業用 X 線 CT(Computed Tomography) 装置による観察手法を検討し、三次元画像から繊維の形態や分布を評価するソフトウェアを開発した。例として、平板状の成型品において、層ごとの繊維の配向状態を分析し、CAE による配向シミュレーションと比較した内容について報告する。

2. X線CT装置について

2.1 産業用X線CT撮像の原理

一般に「CT」というと、医療用途に広く用いられる装置のように、X線発生器と検出器が患者のベッドを中心に回転する構成が知られている。これに対し、産業用X線CT装置は、文字通り産業用途に特化しており、X線発生器と検出器は固定して、逆に試料の方を回転させる構成となっている。図1に示すように、X線は水平に放射され、測定対象の試料をステージ上で回転させて、X線の透視像をあらゆる角度から捉えてコンピュータに蓄積し、断層像を再構成計算して表示する[1]。

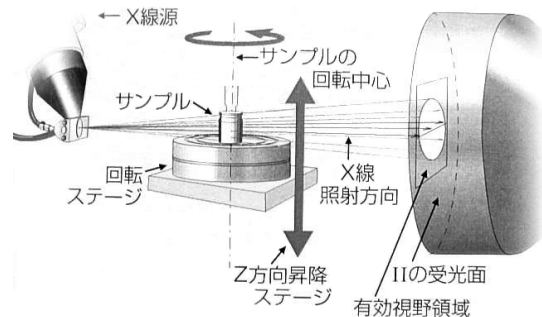


図1: 産業用X線CT装置の原理

また、回転ステージは鉛直方向に移動し、試料の任意の位置で断層像を得ることが可能である。そして、回転テーブルと検出器の位置を変位移動できるので、数mmの小型材料から100mm以上の大型成形品まで、様々な寸法の試料について、観察及び解析の目的に応じた撮像領域と分解能を設定することができる。

CT再構成の原理を簡単に説明する。まず、図2のようなX線吸収量を持つ試料があるとする。この試料に対し、図3のように様々な方向からX線を透過させ、そのプロファイルを収集する。例えば①の方向からのX線吸収の合計は $X1 + X5 + X9 = 12$ となる。同様に以下の方程式を得ることができる。

- ② $X1 + X4 + X7 = 12$
- ③ $X2 + X5 + X8 = 3$
- ④ $X3 + X6 + X9 = 16$
- ⑤ $X3 + X5 + X7 = 7$
- ⑥ $X3 + X2 + X1 = 11$
- ⑦ $X6 + X5 + X4 = 9$
- ⑧ $X9 + X8 + X7 = 11$
- ⑨ $X2 + X6 = 5$
- ⑩ $X4 + X8 = 7$
- ⑪ $X2 + X4 = 8$
- ⑫ $X6 + X8 = 4$

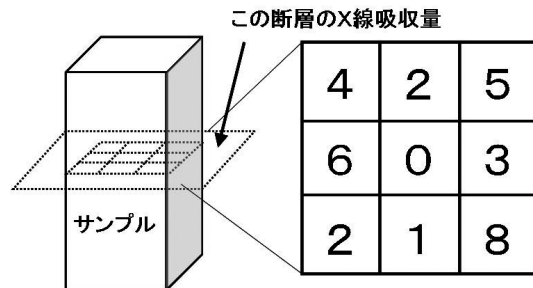
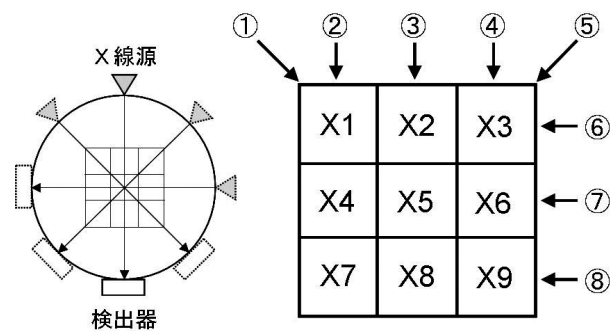


図2: X線吸収量の分布



様々な方向のプロファイルから計算

図3: 異なる角度での投影

これらの連立一次方程式を解くと、 $X_1 \sim X_9$ から、図 2 に示す試料断層の X 線吸収量に相当するプロファイルが求められる。こうして得られた解としての配列に濃淡をつけることで、断層像がグレースケールの濃淡図として表される。なお、実際の CT 装置では、より細かい吸収係数の分布を求めるので計算量は膨大になり、その計算を高速に行なうための特別な演算処理を行なっている。

2.2 マイクロフォーカス X 線 CT 装置



図 4: SMX-100CT の外観

今回、用いた装置は(株)島津製作所製マイクロフォーカス X 線 CT 装置「SMX-100CT」である。外観図を図 4 に示す。SMX-100CT は、X 線発生器には最小焦点サイズ $5 \mu\text{m}$ 、最大電圧 100kV の密閉型マイクロフォーカス X 線管球を採用し、X 線検出器には 4 インチの高感度型ベリリウム窓イメージインテンシファイアを採用している。先述した CT の原理により得られる断層像は 1 枚であるが、試料内部の三次元的な観察のためには、この断層像を縦方向に数百枚分求めて、それらを積

み重ねた三次元データが必要である。従来、三次元データを再構築するためには、X 線焦点位置高さと平行する X 線検出器の中央部分のライン状のデータ領域のみを利用して 1 枚から数枚の断層像を作り、試料を少しずつ鉛直方向に移動させて三次元データを構築していた。このため撮影には膨大な時間を必要としていた。この問題を解決するため、本装置ではコーンビーム CT を採用している。コーンビーム CT は検出器の二次元情報を利用し、試料を 1 回転させる間に複数の透視画像を収集し、その後三次元データを一気に再構築するもので、これにより三次元の内部データを短時間で得ることができる。

以下に樹脂製コネクタを三次元 CT 撮像した例を示す。図 5 は試料内部を 3 方向から切断した場合の断層像を表示しており、表示する断面は任意に変更することができる。これを MPR¹(多断面再構成) 画像と言う。図 6 は得られた三次元データをコンピュータグラフィックスで立体的に可視化して再構築したボリュームレンダリング (VR) 像である。

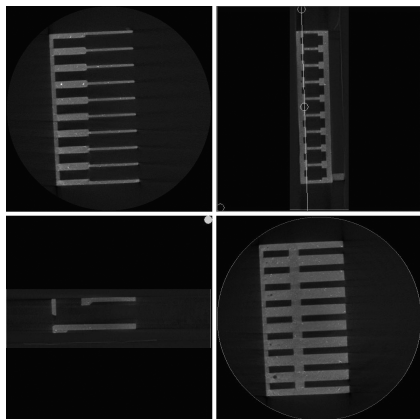


図 5: コネクタの MPR 画像

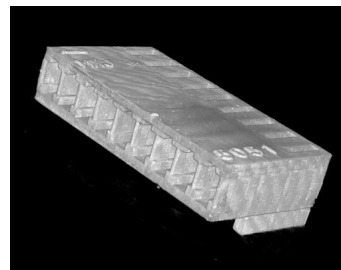


図 6: コネクタの VR 画像

¹Multi Planer Reconstruction

3. 試料について

3.1 樹脂材料の X 線 CT 撮像について

樹脂は一般に炭素、水素、酸素、窒素等の軽元素で構成されているため、X線吸収率が低く、樹脂のみのCT画像はコントラストが明瞭につかない場合が多い。しかし樹脂にガラス繊維が含まれる場合は、同繊維が珪素から構成されているため、軽元素との明瞭なコントラストがつき、ガラス繊維を判別できる画像を得ることができる。ガラス繊維を明瞭に判別するためには、分解能を上げたCT像を得る必要がある。分解能を上げるためには、試料をX線の発生点に近付けて倍率を高め、回転させる必要があることから、今回の撮像では樹脂の試料を小さくカットし、平板状の試験片を作成した。

3.2 試験片とその観察条件

図7にテストピースの形状(一辺が80mmの正方形で、角板肉厚2mm、ゲート肉厚1mm)と繊維配向観察用の試験片を抽出した位置(角板中央部)を示す。使用材料はナイロン66樹脂 GF30wt%強化(CM3001G30: 東レ株式会社製)を用い、樹脂温度290、金型温度80、射出圧40MPa、保圧40MPaの条件にて成形した。今回のCT撮像のために試料のガラス繊維やマトリックス樹脂について特殊な処理は施していない。図8にCT撮像から得られた繊維をボリュームレンダリング表示した三次元画像を示す。

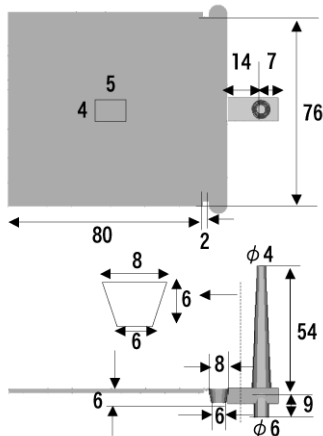


図7: 試験片の形状と寸法

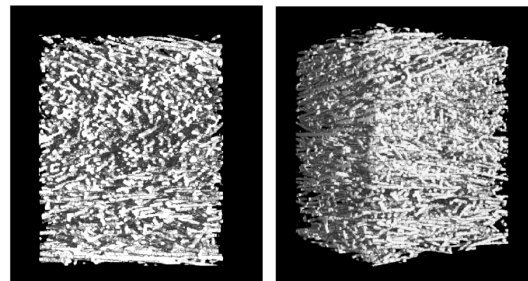


図8: 繊維配向のVR画像

4. CTデータの画像解析

ソフトウェアによる三次元画像解析を実現するには、十分な密度分解能と空間分解能が必須であるため、試料に応じて、X線CTの撮像条件を良く検討する必要がある。今回は約 $2.2 \times 2.2 \times 2.0$ mmの視野に裁断した試験片を置いて撮像し、16bitグレースケール、解像度 512×512 pixels、460枚の断層画像を出力した。

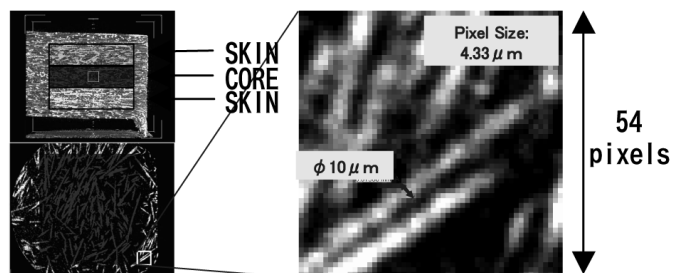


図9: 得られたCT画像と分解能

撮像したデジタルデータを VGStudio MAX(日本ビジュアルサイエンス) を使って読み込み、材料密度の差により生じた樹脂と繊維の輝度分布に適切なコントラストを設定したところ、明瞭に繊維を視認することができた。この撮像条件では、X, Y, Z 方向の画素サイズは、 $4.33\ \mu\text{m}$ であり、約 $10\ \mu\text{m}$ の径を持つ繊維が太さ方向に 3~4 個の画素で描画される (図 9)。次に試料の板厚方向について、上下の最表層を除いて三等分したスキン層(外層)、コア層(内層)、スキン層(外層) からなる画像領域を抽出し、そのデータを ExFact Analysis for Fiber(日本ビジュアルサイエンス) に渡して解析を行った。同ソフトウェアでは、三次元画像中の繊維を細線化し、その形態や分布について、様々な統計的パラメータを算出して評価することができる [2][3]。

今回の事例では、まず三次元画像中の繊維について、複雑につながった繊維同士の構造を維持したまま、全ての三次元的な経路を図 10 のように細線化する。

そして、抽出した三次元画像領域の X(流動方向)、Y(直交方向)、Z(肉厚方向) それぞれの方向の矩形の対面について、経路の最短経路の端点が存在する場合に最短経路長と両端の最短距離の比を求めた。このようにして得られた、複雑に連続する繊維の両端が X, Y, Z 軸方向にそれぞれ、どの程度、遠回りしているかを表す指標 Tortuosity(迂回度) (図 11) を用いて、繊維配向の傾向を評価した。

図 12 にスキン層とコア層における X, Y 方向の迂回度 (横軸) と頻度 (Probability)(縦軸) の関係を示す。迂回度が 1 に近いほど基準とした方向へ配向する傾向を示し、頻度が 1 に近いほど迂回度に対応したガラス繊維が多いことを示す。グラフから、次の傾向を説明することができる。

- スキン層の繊維は流動方向へ配向する傾向がある。
- コア層の繊維は流動直交方向へ配向する傾向がある。

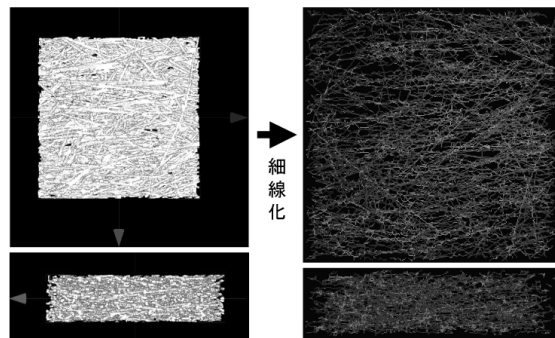


図 10: CT 画像中の繊維の細線化処理

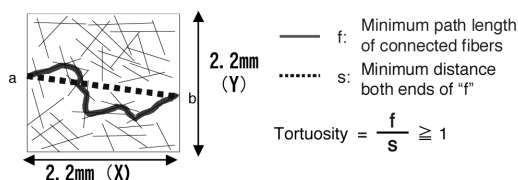


図 11: Tortuosity(迂回度) の算出方法

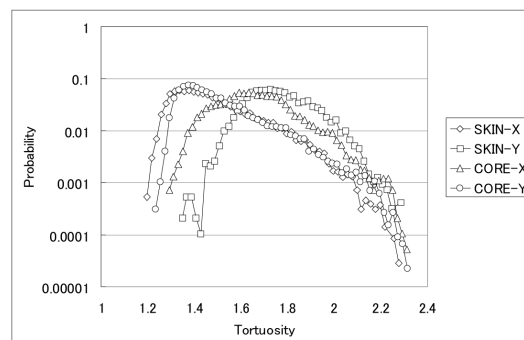


図 12: スキン層とコア層の繊維の配向状態

さらに細線化した繊維を検出した結果 (表 1) から、以下の傾向を確認した。

- コア層は、スキン層に比べて繊維が多い。
- コア層では、繊維の交差が多い。つまり、よりランダムな向きを持っている。
- この傾向は、板厚が異なる試料についても同様である。

		繊維の体積比	検出された繊維の数	繊維の交差数
試料 1 板厚 1.0mm ゲート厚 0.7mm	スキン層	0.101	3129	3098
	コア層	0.132	4151	4717
	スキン層	0.107	3171	3318
試料 2 板厚 2.0mm ゲート厚 1.0mm	スキン層	0.167	7869	9833
	コア層	0.187	9056	11425
	スキン層	0.171	7340	9213
試料 3 板厚 3.0mm ゲート厚 1.5mm	スキン層	0.133	5691	7687
	コア層	0.191	10174	12803
	スキン層	0.147	6429	8234

表 1: 繊維の検出結果

5. 繊維配向シミュレーション

射出成形 CAE において、短繊維の配向解析が実用化されている。配向解析では射出成形中の流動解析より得られる速度分布を用いて繊維の配向方向とばらつきを求める。そして繊維と樹脂との剛性や線膨張収縮の差異を用いて異方性収縮による成形時変形を予測したり、異方性弾性と異方性線膨張を用いた強度計算などに活用されている [4]。粘性ニュートン流体中の楕円形状剛体の単体としての挙動は Jeffery によって記述され、その後、繊維の相互干渉を考慮するための解析手法が検討された。本稿では Advani と Tucker による配向テンソルを用いる手法 [5] を用いた。図 13 に示すように座標系と繊維配向角度を定義する。ベクトル (p_1, p_2, p_3) 方向の配向確率密度を $\psi(\vec{p})$ とし、その分布を表現した配向テンソル a_{ij} を式 (1) のように導入すれば、 a_{ij} の変化速度は式 (2) となる。

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(\vec{p}) d\vec{p} \quad (1)$$

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = -\frac{1}{2}(\omega_{ik}a_{kj} - a_{ik}\omega_{kj}) + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ik}a_{kj} + a_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2\dot{\gamma}_{kl}a_{ijkl}) + 2D_r(\delta_{ij} - 3a_{ij}) \quad (2)$$

ここで、渦度 ω_{ij} 、変形速度 $\dot{\gamma}_{ij}$ 、形状係数 λ 、右辺第 3 項は繊維の干渉による拡散をあらわす項であり、等方的な拡散を仮定して平均せん断速度 $\dot{\gamma}$ に対して $D_r = C_1\dot{\gamma}$ と表す。ここでは干渉係数 $C_1 = 0.01$ とした。また式 (2) 中の 4 階テンソルは Hybrid Closure Approximation にて決定した。解析モデルは 8 節点ブリック要素を用いてキャビティ部分は厚さ方向 15 層に分割した。解析ソフトウェアは 3D TIMON(東レエンジニアリング)を用いた。

解析結果より、充填時の流動パターン及び主配向ベクトルを
 図 14 に示す。流動パターンはゲートの幅方向中央から円弧状に
 拡大する流れとなり、その後 Y 軸方向への平行流となる。

この拡大流れの影響により流れ方向に直交し、円弧に沿った
 配向が発生している。また表面近傍では金型表面の摩擦により
 生じるせん断歪のため、流れ方向の配向が発生する。図 15 に平
 板試験片の中央部における厚さ方向各層における主配向角度を
 示す。流れ方向への配向と直交配向の層に分かれており、CT に
 よる実測と同様の傾向となることが判明した。

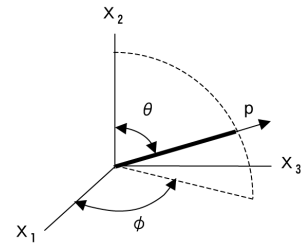


図 13: 繊維配向角度の定義

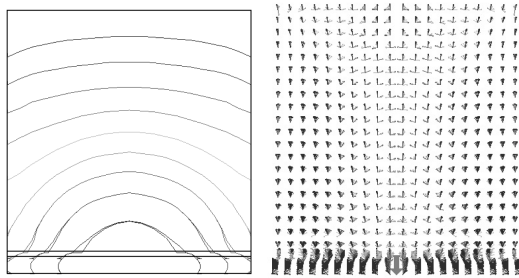


図 14: 平板試験片の CAE 解析結果

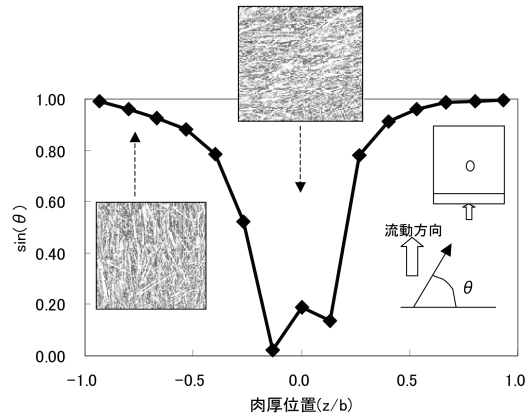


図 15: 配向解析による主配向方向と CT 画像の比較

6. おわりに

射出成形品の繊維配向について、産業用 X 線 CT 装置による観察手法を検討し、繊維の三次元的な配向状態を評価した。従来、困難であった三次元方向の配向が直感的に把握できる手法として、今後の活用の拡大が期待できる。またコンピュータシミュレーションによる三次元繊維配向解析と組み合わせることにより、配向状態の詳細な分析が可能になるものと考えられる。

参考文献

- [1] 開本ら: 実験力学, Vol.1, N0.3, pp. 127, (2001).
- [2] 滝ら: 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究 (第 5 回) 論文集, pp. 245, (2005).
- [3] 滝: 第 23 回分析電子顕微鏡討論会予稿集, 日本顕微鏡学会 分析電子顕微鏡分科会, pp. 93, (2007).
- [4] 坂場ら: 日本機械学会 計算工学講演会論文集, Vol.15, pp. 91, (2002).
- [5] Advani S.G., C.L.Tucker III, J.Rheol.31, pp. 751-784, (1987).