クラスタリング手法を用いた衝撃吸収材料の 三次元繊維配向分布解析

川 村 宗 弘^{*1}・守 田 了^{*2}・池 田 悟 至^{*1}・友 永 文 昭^{*1}・
井 上 敏 夫^{*3}・森 直 樹^{*4}・尾 本 正 明^{*4}・佐 野 村 幸 夫^{*5}

An Analysis of 3D Fiber Orientation Distribution Using a Clustering Method in Image Processing

Kawamura, Munehiro^{*1}/Morita, Satoru^{*2}/Ikeda, Satoshi^{*1}/Tomonaga, Fumiaki^{*1}/
Inoue, Toshio^{*3}/Mori, Naoki^{*4}/Omoto, Masaaki^{*4}/Sanomura, Yukio^{*5}

The fiber orientation distribution in fiber reinforced thermoplastics (FRP) affects the strength and final shape of products. Therefore, for effective product design, it is necessary not only to estimate the fiber orientation distribution by using computer simulation, but also to measure it.

The purpose of this research is to measure the 3D fiber orientation in characteristic sections of molded parts such as the skin or core layer and the weld or gate line. We applied a clustering method used in image processing to determine the fiber orientation distribution from the measured 3D parameters and visualized the state of this fiber orientation distribution.

In this experiment, we used energy absorbers molded with a liquid crystal polymer. First, we cut samples from the weld and gate sections and observed them through a scanning acoustic microscope (SAM). Next, we calculated the parameters of the 3D fiber orientation from the SAM images, and made an image of the fiber orientation distribution visualized from the calculated parameters by the K-means method, one of the clustering methods. We confirmed that the fiber orientation distribution in the outside and the fiber orientation in the inside were reversed, which corresponded with the expectations in product design.

We could visualize the fiber orientation distribution and explain the numerical values of the fiber orientation distribution by the clustering method, and could confirm that this method was effective in the analysis of the fiber orientation distribution.

Key word : Fiber orientation/Fiber reinforced thermoplastics/Scanning acoustic microscope /
Energy absorber/Clustering method

1. 緒 言

高機能性複合材料の一つである繊維強化プラスチック（以下 FRP と称す）に含まれる繊維の配向分布は、外観不良、力学的特性、成形収縮の異方性等に影響がある^{1)~3)}。そのため、製品設計を行う際に、繊維の配向分布をシミュレーションによって推定するだけではなく、試作した製品の繊維配向分布を調べる必要がある。

従来、成形品の三次元繊維配向や繊維長を計測する方法がいくつか提案されているが^{4)~9)}、これまでの手法は成形品一部のみについて計測したもので、成形品広域に適用し分布を計測した例はない。しかし、成形品設計において成形品の配向の分布を成形品ゲート部、ウエルド部、スキン層およびコア層など特徴的な部分を広く計測することは重要で、その手法が強く求められている。

一方、FRP 成形品の特性を生かすため、繊維配向を制

^{*1} 山口県産業技術センター
宇部市あすとぴあ 4-1-1 (〒755-0195)
Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute
4-1-1 Asutopia, Ube-city, Yamaguchi 755-0195, Japan

^{*2} 山口大学工学部
宇部市常盤台 2-16-1 (〒755-8611)
Faculty of Engineering, Yamaguchi University
2-16-1 Tokiwadai, Ube-city, Yamaguchi 755-8611, Japan

^{*3} 新日本石油化学㈱
東京都千代田区内幸町 1-3-1 (〒100-8530)
Nippon Petrochemicals Co., Ltd.
1-3-1 Uchisaiwai-cho Chiyoda-ku, Tokyo 100-8530, Japan

^{*4} ㈱メイホー
直方市感田 811-1 (〒822-0001)
Meiho Co., Ltd.
811-1, Ganda, Nohgata, Fukuoka 822-0001, Japan

^{*5} 玉川大学工学部
町田市玉川学園 6-1-1 (〒194-8610)
Faculty of Engineering, Tamagawa University
6-1-1 Tamagawa-Gakuen, Machida-city, Tokyo 194-8610, Japan
2002. 6. 13 受理

御する方法もいくつか提案されている^{10),11)}。本論文で計測の対象とした試料もその一つで、衝撃吸収特性を向上させるため、コアを回転させながら成形を行う LCP パイプを用いている^{12),13)}。本試料は設計時の流動解析によって、パイプのスキン層外側と内側で繊維配向が反転することの予測はされている¹⁴⁾。しかし、本試料はパイプ状の形状のため、従来の平面を観察する手法によって、本試料のスキン層やコア層の繊維配向の計測をすることは困難である。また、従来の配向計測手法の多くは一部の配向を計測しており、成形品全体における配向計測の分布を計測した例はない。

本研究ではパイプ状成形品の全体の三次元配向分布を計測するため、最初に繊維配向が特徴的であると考えられるウエルドおよびゲートラインに沿って切断し、次に切断面を各部 12 ヶ所について観察し、それぞれ三次元配向の計測を行った。また、本手法によって得られる三次元配向パラメータは各繊維 4 つで、計測される繊維数も多いため、各パラメータそれぞれのヒストグラムによる分布解析¹⁵⁾では計測結果について、推定された結果と比較検討することが困難である。さらに、すでに予測している配向分布と計測した配向分布を比較するためには、計測されたパラメータからスキン層、コア層の配向分布を視覚化する必要があり、そのためには計測された 4 つのパラメータを空間的に分類する必要がある。そこで本論文では、クラスタリング手法 (K-平均法) を用いて、繊維配向を空間的に分類し、視覚化する手法について提案する。以下にその結果について報告する。

第 2 章では観測を行った成形品の特徴と計測方法について、第 3 章で超音波顕微鏡によって観察された画像と配向計測結果について、第 4 章で計測された繊維配向の分布解析手法についてその方法と結果について述べる。

2. 計測を行った成形品と配向計測手法

計測を行った試料を図 1 に示す。大きさの比較のため試料とともにタバコの箱が写っている。試料の形状は高さ 80 mm、外径 19 mm で肉厚 1 mm のパイプ状である。試料はガラス繊維を 30 wt% 含む液晶ポリマー (商品名: Xydar®, BP-Amoco 社製) の射出成形品で、自家用自動車の衝撃吸収材料として試作したものである。また、本成形品は衝撃吸収の効果を持たせるため、成形中にコアを回転させる回転コア法によって配向を制御している。文献 13)

Fig. 1 The appearance of the specimen

および 14) の流動解析等の結果によると、本成形法ではコアの回転により図 2 に示すような配向の分布が予測されている。図 3 は衝撃実験¹³⁾を行った後の破壊形状を示すもので、(1) は配向制御していない非配向制御品、(2) は配向制御を行った配向制御品を示す。図 3 から、配向制御品は放射型のような形状で破壊し、非配向制御品は縦方向に破壊する。著者らは、文献 13) の実験によって静的圧壊試験を行った。その荷重-変位曲線を図 4 に示す。(1) は非配向品、(2) は配向制御を行った成形品の結果である。これは図 2 による交差した螺旋状の配向が、軸方向のクラック伝

Fig. 2 The expected fiber orientation distribution

(1) Non-oriented specimen (2) Oriented specimen

Fig. 3 Energy absorption characteristics under crash test

(1) Non-oriented specimen

(2) Oriented specimen

Fig. 4 Energy absorption characteristics of LCP tubes

Fig.5 Observed image through the microscope of cross section of the specimen

搬の抵抗として作用しエネルギーを吸収すると考えられ、配向制御することによりエネルギー吸収特性が向上したと言える。

実際に切断面を顕微鏡によって観察した結果を図5に示す。(1)は非配向制御品で(2)は配向制御品の写真で、それぞれ図上部がパイプの内側、下部はパイプの内側である。観察結果から、非配向制御品は繊維が一様に並び、配向制御品は成形品の内側、外側およびコア層で配向が異なっていることが確認できる。本実験では、配向制御品がどのような配向の状態であるかを調べるため、実際に以下の試料および方法によって三次元配向計測を行った。

3. 超音波顕微鏡によって観察された画像と配向計測結果

試料を図6のように縦に切断し、ウエルド部とゲート部それぞれ下部から4ヶ所を超音波顕微鏡によって500倍で観察した。ゲート部とウエルド部それぞれの観察画像を図7に示す。下部で計測された部分はゲート部でG1, G5, G7, ウエルド部でW1, W5, W7に示し、上部で観察された画像は同様にG4, G8, G12およびW4, W8, W12に示す。またG1~G4およびW1~W4は成形品のスキン層外側、G5~G8およびW5~W8はコア層、G9~G12およびW9~W12はスキン層内側の計測結果を示す。各画像に繊維の切断面と繊維の傾きにに応じた干渉縞が観察できる。

超音波顕微鏡によって計測した400×400画素の画像

Fig.6 The part of the observation

(1) The part of gate line

(2) The part of welding line

Fig.7 The image through SAM

Fig. 8 The parameters of 3D fiber orientation

データを、Sobel オペレータによってエッジ抽出を行い、階調ごとのヒストグラムの極小値をしきい値として2 値化する。2 値化された画像データから、文献6 の手法によって繊維切断面の形状と干渉縞から、図8 に示す各繊維の配向パラメータ (x_0 , y_0 , α , β) を求めた。(x_0 , y_0) は繊維と計測面とが接触する中心の座標 (0~400), α は繊維と計測面の深さ方向の角度 (伏角: 0~90°), および β は繊維が中心座標 (x_0 , y_0) からどちらの方向に傾いているかの角度 (方位角: 0~360°) を示す。求めたパラメータから繊維の状態を再配置したものを図9 に示す。図9 の

円形状および楕円形状は検出された繊維一本一本の位置を示し、円形状は表面に対して垂直に配向する繊維、楕円形状は伏角を持った繊維を示す。また、楕円形状の矢印は繊維の伏角の方向を示す。

また、ゲート部およびウエルド部を計測したパラメータをスキン層の外側と内側およびコア層について分類し、伏角 (Depression angle) について集計した結果を図10 に、方位角 (Azimuth angle) について集計した結果を図11 に示す。それぞれ (1) はゲート部, (2) はウエルド部の結果である。

図10 の横軸は伏角を示し、縦軸は検出されたすべての繊維に対するそれぞれの角度の分布比率を示す。この図からコア層では、いずれも伏角 90° の繊維が90% 以上であることがわかる。また、伏角 50°~70° の区間において、ゲート部では外側に比較して内側が多く分布し、ウエルド部では反対に外側に多く分布するという違いが見られるが、伏角において顕著な違いは見いだせない。

図11 の横軸は方位角を示し、縦軸に分布の比率を示す。図11 ではコア層ではウエルド部ゲート部ともに方位角 0° の繊維が大半を占めている。これは、計測面に垂直な繊維が多く存在していることを示す。またゲート部ウエルド部ともにスキン層外側では方位角 90° あたりにピークがある

Fig. 9 The image reconstructed from the measuring results of fiber orientation

(1) Part of gate line

(2) Part of welding line

Fig. 10 Distribution of depression angle

(1) Part of gate line

(2) Part of welding line

Fig. 11 Distribution of azimuth angle

反面、スキン層内側では方位角 270° 付近にピークがあることがわかる。これは、回転コア法によって成形することにより、回転するコアに接するパイプ内側の部分は樹脂が「連れまわり」をするのに対し、キャビティに接する外側は回転コアの反力によって配向が反転すると考えられ、文献 13) および 14) において予想された現象を実証するものである。

4. 計測された繊維配向の分類手法と分布計測結果

それぞれ求めた各繊維の三次元配向のパラメータは 4 つの要素から構成されるため、一様に定量化して評価することは容易ではない。そのためパターン分類を行うため画像処理で用いられるクラスタリング手法を適用し、三次元配向分布の分類を行うことを試みた。クラスタリング手法を適用することにより、三次元配向のパラメータから配向分布の定量化をすることが容易になることが期待できる。以下にその手法を示す。

4.1 K-平均法によるクラスタリング

三次元配向分布のパラメータを分類するため、画像情報処理で代表的なクラスタリング手法である K-平均法¹⁶⁾ の考え方を利用した。本手法は画像におけるパターンを類似するものにまとめていくもので、多次元要素（本パラメータの x_0, y_0, α, β ）においても効率的に分類が可能である。以下に 3. で得られた各繊維のパラメータ集合 $P = (x_0, y_0, \alpha, \beta)$ を K-平均法に適用する手法を示す。

- 1) 任意の K 個のクラスタリング中心 ($c_1, c_2, \dots, c_k$) を決定する。

$$c_1 = (x_{01}, y_{01}, \alpha_1, \beta_1)$$

$$c_2 = (x_{02}, y_{02}, \alpha_2, \beta_2)$$

⋮

$$c_k = (x_{0k}, y_{0k}, \alpha_k, \beta_k)$$

- 2) クラスタリング中心 $c_1, c_2, \dots, c_k$ を用いて、全パラメータを最も近いクラスタリング中心に帰属させる。

- 3) 新しいクラスタリング中心を 2) で帰属した全パラメータの平均値パラメータによって定める。すなわち、

$$c_n = (\Sigma x_{0n}/N, \Sigma y_{0n}/N, \Sigma \alpha_n/N, \Sigma \beta_n/N)$$

N: 各クラスに含まれるパラメータ個数

n: 1~k

- 4) すべてのクラスタリング中心 c_n が以前求めたクラスタリング中心と比較して変化がなければ終了し、変化があった場合は 2) の処理へ戻る。

この一連の処理の繰り返しによってクラスタリングが終了する。また、本処理を行う前に各パラメータに重みの係数を掛けることにより注目するパラメータごとの分類も可能になる。

- 5) クラスタリングされたパラメータのごとに各繊維の画像上座標値 (x_0, y_0) を中心に領域分割を行い、画像データ上で色分けを行いマッピングする。

4.2 画像によるクラスタリング結果の視覚化

4.1 の手法によってクラスタリングしてマッピングした結果の画像を図 12 および図 13 に示す。本実験におけるクラスタリングの初期値は 4 つのパラメータを任意に与えた。図 12 は方位角 α を基にクラスタリングした結果で、図 6 の各画像に対応し、(1) はゲート部、(2) はウェルド部の結果

Fig. 12 The clustering image by azimuth angle

Fig. 13 The clustering image by depression angle

Table 1 Result of clustering

Cluster No.	Outside				Core				Inside			
	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance
1	0.00	61.53	90.00	0.00	0.00	72.77	90.00	0.00	0.00	9.18	90.00	0.00
2	94.94	38.47	61.95	15.08	85.78	15.32	61.75	8.09	271.84	90.82	61.55	7.25
3					267.57	11.91	62.04	4.36				

(1) Gate line

Cluster No.	Outside				Core				Inside			
	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance	Mean Value of Azimuth Angle (Degrees)	Rate (%)	Mean Value of Depression Angle (Degrees)	Variance
1	0.00	38.94	90.00	0.00	0.00	76.49	90.00	0.00	0.00	58.39	90.00	0.00
2	106.26	61.06	61.27	7.59	84.28	14.96	60.85	2.09	97.55	12.72	61.03	3.49
3					262.50	8.55	60.74	2.20	268.00	28.89	64.71	25.29

(2) Welding line

を示す。コア層で垂直な繊維が多く分布しているため外側および内側のスキン層とは分布が異なっていることが確認できる。しかし、スキン層外側と内側の違いについては確認できない。

図 13 は同様に方位角 β を基にクラスタリングを行った後の結果を示したものである。コア層は伏角と同様にスキン層と分布が異なっていることが同様に確認できる。スキン層の外側と内側については方位角が約 180° 反転しているため、色分けした状態で大きく異なっていることが視覚的に確認できる。これは本手法の特徴の一つで、繊維の楕円形状のみでは方位角は $0\sim 180^\circ$ の範囲でしか求めることができないが、干渉縞の情報により $0\sim 360^\circ$ の方位角を求めることができる。従って、本試料のような対象物の三次元配向を求める場合、本計測手法は有効であることが確認できる。

4.3 クラスタリング結果の定量化について

表 1 にゲート部、ウエルド部それぞれ先端部分 G 4, G 8, G 12 および W 4, W 8, W 12 について方位角によってクラスタリングした結果を示す。(1)はゲート部、(2)はウエルド部を示し、それぞれスキン層外側、コア層およびスキン層内側の方位角中心値と面積比率、および分類された伏角と分散を示す。ゲート部スキン層の外側ではクラスタ中心の方位角 94.94° の繊維が 38.47% に対し、内側では方位角 271.84° の繊維が 90.82% と配向が交差している。ウエルド部外側では、方位角 106.26° の繊維が 61.06% に対し、内側では垂直な繊維が 58.39%、方位角 268.00° の繊維が 28.89% とゲート部に比較してばらつきは見られるが、配向が交差している傾向は確認できる。伏角は垂直な繊維以外は全般的に 60.00° 前後で分散が低い値を示している。ただし、ウエルド部内側では伏角 64.71° の分散値が 25.29 で、他の部分と比較して高い値を示し、ばらつきが高いことが言える。

以上の結果、ゲート部とウエルド部のいずれも図 9 で示されたスキン層における配向の交差を確認できた。また伏角についてウエルド部では若干のばらつきが確認できた。

5. 結 言

衝撃吸収材として用いられる LCP パイプの三次元配向

の分布を計測するため、パイプ切断後ウエルド部、ゲート部の各 12 ヶ所について計測し、提案したクラスタリング手法による分布の視覚化を行うことを試みた。その結果、次のことが確認できた。

- (1) 計測した LCP パイプのゲート部、ウエルド部それぞれ計測を行った結果、スキン層とコア層の配向の違いなど、LCP パイプの全体的な配向の様子を観察することができた。
- (2) 計測された配向パラメータをクラスタリング手法によって分類した結果、配向分布の状態を視覚化することができ、配向分布の定量化を行うことができた。その結果、内側と外側の方位角の配向が 90° と 270° にそれぞれ集中しており、設計時に予測された配向の交差が確認できた。

今後はさらに衝撃試験と繊維配向の関連について研究を行うことにより、配向計測のシステムとして完成度の高いものの構築が可能である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、研究の機会を与えていただいた山口県産業技術センターの浅田宏之所長、白上貞三次長、有益な助言をいただいた企画情報室香川正信室長、生産システム部藤本正克専門研究員および職員の皆様に感謝します。

また、本研究遂行にあたりご協力、ご助言いただいた元宇部興産 橘 輝夫様、トクヤマ 藤山光美様に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 竹田 啓：成形加工，**2**(1)，21 (1990)
- 2) 前川善一郎：成形加工，**2**(3)，177 (1990)
- 3) 水谷治靖，小泉順二，奥本忠興：成形加工，**6**(6)，426 (1994)
- 4) 川村宗弘，守田 了，田中 稔，橘 輝夫：成形加工，**9**(11)，913 (1997)
- 5) Kawamura, M. and Morita, S.: *PPS-14*, Yokohama, 778 (1998)
- 6) 川村宗弘，池田悟至，守田 了，佐野村幸夫：成形加

- 工, **5**(13), 317 (2001)
- 7) Averous, L., Quantin, J. C. and Alain Crespy, A.: *Polymer Processing and Science*, **37**(2), 329 (1997)
- 8) 鈴木 寛: 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 395 (1999)
- 9) 鈴木 寛: 日本複合材料学会誌, **25**(2), 55 (1999)
- 10) 宮崎広隆: 成形加工, **9**(11), 854 (1997)
- 11) 荒井貞夫, 森 直樹: 成形加工シンポジア'93, 22 (1993)
- 12) 井上敏夫: *6th Japan International SAMPE Symposium*, 697 (1999)
- 13) 尾本正明, 森 直樹, 井上敏夫: 成形加工シンポジア'00, 341 (2000)
- 14) 森 直樹, 荒井貞夫, 清水 恭: 成形加工シンポジア'95, 23 (1995)
- 15) 関根英樹, 鈴木 寛, 山本圭介: 日本機械学会論文集 (A 編), **62**(594), 15 (1996)
- 16) 鳥脇純一郎: 認識工学, 89 (1993), コロナ社
-