

X線マイクロCTを用いた薄肉射出成形品の ガラス繊維配向解析(第一報): 円柱フィッティングによるガラス繊維抽出および定量化

鈴木 亨^{*1}・杉田 寿夫^{*1*2}・瀬戸 雅宏^{*1}
柿島 浩徳^{*1}・田中 宏明^{*1}・山部 昌^{*1}

Analysis of Glass Fiber Orientation of an Injection Molded Thin Part Using X-ray Micro CT (Part 1) : Extraction and Quantification of Glass Fibers Using Cylinder-Model Fitting

Suzuki, Tohru^{*1}/Sugita, Toshio^{*1*2}/Seto, Masahiro^{*1}
Kakishima, Hironori^{*1}/Tanaka, Hiroaki^{*1}/Yamabe, Masashi^{*1}

It is important to know the distribution of the length and the orientation of glass fibers (GFs) in GFRP moldings to predict their warpage. In this study, we developed a novel method to extract GFs one-by-one from 3-dimensional data acquired with X-ray micro CT using cylinder-model fitting. We defined equations to evaluate the fitness between the cylinder model and the CT data, and optimized the model's parameter to maximize the fitness evaluation. To validate our method's efficacy, we compared the GF length distribution of our method to the real measured one, and confirmed that our method could reproduce well the real measured GF length distribution.

Key words : Injection Molding, GFRP, Fiber Orientation, X-ray Micro CT, Optimization Problem

1. 緒 言

近年、電子機器等に用いられるプラスチック射出成形品は精密化、薄肉化が進んでおり、部品の剛性を向上させるためにガラス繊維（以下、GF）強化された樹脂材料が用いられている。しかし、GF強化樹脂成形品（GFRP）は、成形後にそり変形が発生しやすい問題があり、効率的な金型設計を行うために、成形品のそり変形を事前に予測することが重要である。成形品のそり変形は、線膨張係数や弾性率などの熱的・機械的特性に影響されるため、そり変形の事前予測には、これらの物性値を定量的に把握しておく

必要がある。これまで、樹脂成形品内の繊維配向を、顕微鏡やX線写真により2次元的に観察することは多く行われている^{1)~4)}。著者らも、薄肉射出成形平板を対象に、樹脂に含有されるGFの配向や長さ分布を顕微鏡で観察し、その配向により熱的・機械的特性が変化することを明らかにしてきた⁵⁾。しかし、GFの配向や長さ分布による物性値への影響を詳細に検討するためには、GFの3次元配向の把握が必要不可欠である。そこで近年、射出成形品に含有されるGF等のフィラーの3次元配向の観察方法として、マイクロフォーカスX線CT装置（以下X線CT）を用いた方法が報告されている^{6)~9)}。中野ら⁶⁾は、CT画像から2値化によりGF部分を抽出後、細線化処理を行って様々な統計情報を計算している。また、多比良ら⁷⁾は、2値化によりメタルフレーク（MF）部分を抽出後、ラベリング処理により個々のMFを識別して配向を計算している。しかし、これらの方法では、フィラーを周りの樹脂から2値化で容易に識別できるほどの鮮明な（解像度の高い）CT画像を必要としている。また、GFの含有率が高くGFどうしの接触がある場合に、個々のGFを1本1本区別してその繊維長分布を出す等のニーズには対応できない。鮮明

^{*1} 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology
白山市八東穂 3-1 (〒924-0838)
3-1 Yatsukaho, Hakusan, Ishikawa, Japan
tsuzuki@neptune.kanazawa-it.ac.jp

^{*2} パナソニック株式会社 エコソリューションズ社
Panasonic Corporation Eco Solutions Company
門真市大字門真 1048 (〒571-8686)
1048 Kadoma, Kadoma, Osaka, Japan
2014. 10. 10 受理

なCT画像を撮れる装置は国内にまだ少なく、不鮮明な画像でも配向分布を解析できる手段が望まれる。西川⁸⁾は、CT画像にフーリエ変換および散乱理論を適用して、局所毎のGFの配向分布を出している。この方法は解像度の低いCT画像であっても適用でき、各所におけるGFの配向が分かるが、個々のGF1本1本を特定できる方法ではない。

本研究では、円柱モデルをCT画像中の個々のGFの領域にフィッティングする、という方法により、個々のGFを抽出できるのではないかと考え、そのアルゴリズムを実装した抽出ツールを開発した。この方法では、GFを1本1本抽出し、各繊維の3次元配向だけでなく、繊維長も把握できる。開発したツールで実際にGFRPから繊維配向抽出を行い、その繊維長分布を実測データと比較して、本アルゴリズムによる抽出精度を検証した。

2. 方 法

2.1 成形品形状および成形条件

本研究で使用した成形品(図1)は、外形長さ17.8×幅1.83×高さ0.4 mm、開口部長さ16.5 mm、底面部厚み0.12 mm、側面厚み0.163 mmの箱形状である。供試材料は、LCP樹脂(ベクトラS475、ポリプラスチック製、フィラー含有率30 wt%)で、最大型締力196 kNのプリブラ式射出成形機(TR 20 EHV、㈱ソディック製)を用いて成形を行った。

2.2 X線CTで3Dデータ取得

成形品内GFの3D観察は、X線CT(㈱ビームセンス製FLEX-M543)を用いて成形品を撮像し、成形品の一部の3Dデータを再構成した。図2は、3Dデータを3DView(RMR Systems製のフリーの画像解析ソフト)で表示した画面例である。3Dデータの大きさは、300×348×200ボクセルで、1ボクセルの1辺の実サイズは3 μmである。図1に示す成形品横断面の約半分にあたるL字型の成形品形状と、内部のGFの存在を目視確認できる。(図中、明るい部分がGF、暗い部分が樹脂。)

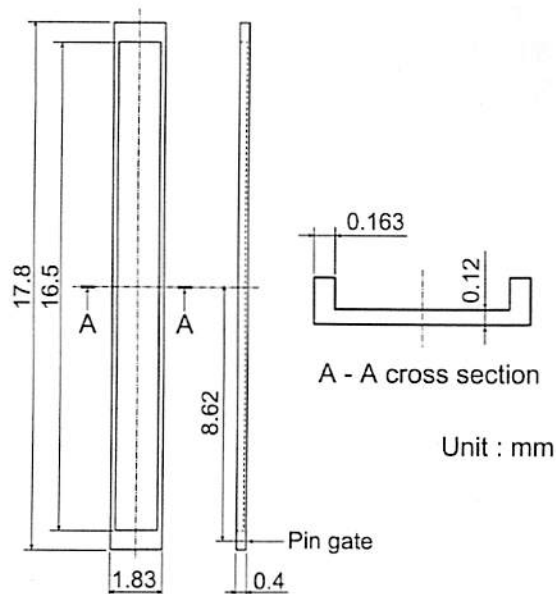


Fig.1 The shape of the test molding

2.3 3Dデータの基本的な分析

図3は、ImageJ(NIH製のフリーの画像解析ソフト)で表示した、CTの輝度値(部位毎のX線の吸収率を表す、以下CT値)の3Dデータ全体におけるヒストグラムである。山が2つあり、左側の急峻な山はCT値の低い“空気”の部分であり、右側のなだらかな山はCT値が空気より高い樹脂/GFの部分である。GFの方が樹脂よりCT値が高いが、GFと樹脂を明確に分ける境界はヒストグラム上には見られない。

また、図4は、ImageJでCTデータの成形品内部での1断面上で、直線に沿ってのCT値のプロファイルを見たものである。プロファイルの中でCT値の高い山の部分がGF、CT値の低い谷の部分が樹脂と考えられるが、このプロファイルからもGFと樹脂の境界になるCT値の閾値を明確に決めるのは難しい。

2.4 円柱フィッティングによるGF抽出の着想

CT値の3Dデータ全体で、適当に閾値を決めて高CT値の領域のみを表示すると、図5のようになる。我々は、GFを円柱に見立てて、円柱の中心軸がデータ中のGFの軸に重なるようにフィッティングすることで、明確な閾値がなくてもGFを1本1本特定できるのではないかと考えた(図6)。もう少し具体的に説明すると、図7および以下のようなになる。

- ① まず適当な閾値(後述)を決め、閾値以上のボクセルを一つ選ぶ。
- ② そこに円柱モデル(後述)を1つ置く。
- ③ CTデータとの適合度(後述)を評価(計算)する。

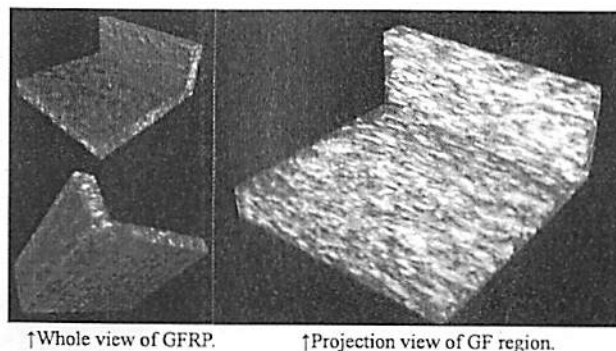


Fig.2 Visualization examples of the test molding acquired with micro-focus x-ray CT

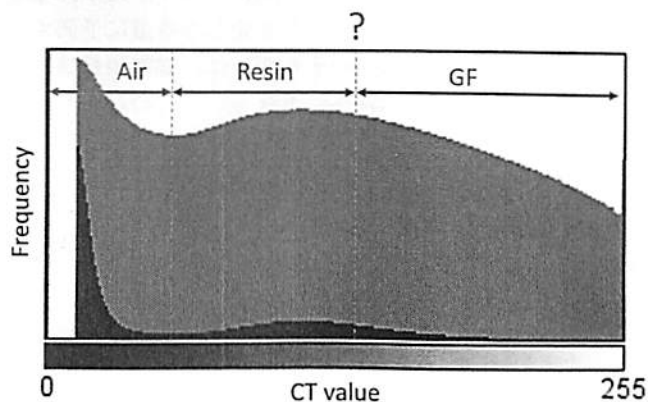


Fig.3 The histogram of the whole 3D data of CT. Black : frequency, gray : logarithmic one

- ④ 円柱モデルのパラメータを微小に変動させ（後述），CT データとの適合度を再評価する，
- ⑤ 適合度の評価が変動前よりも改善したら，変動後のパラメータを採用する．

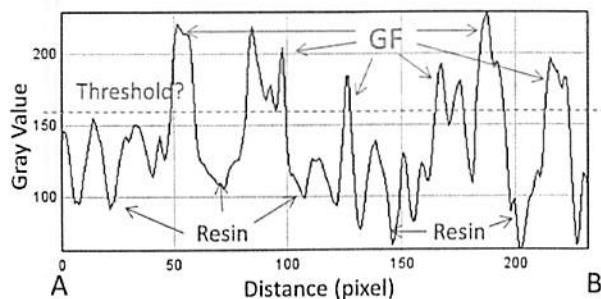
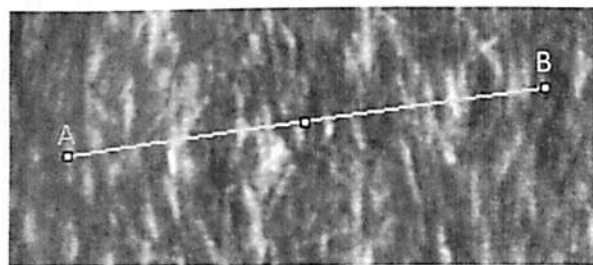


Fig. 4 A CT value profile (below) along the line on a slice (above)

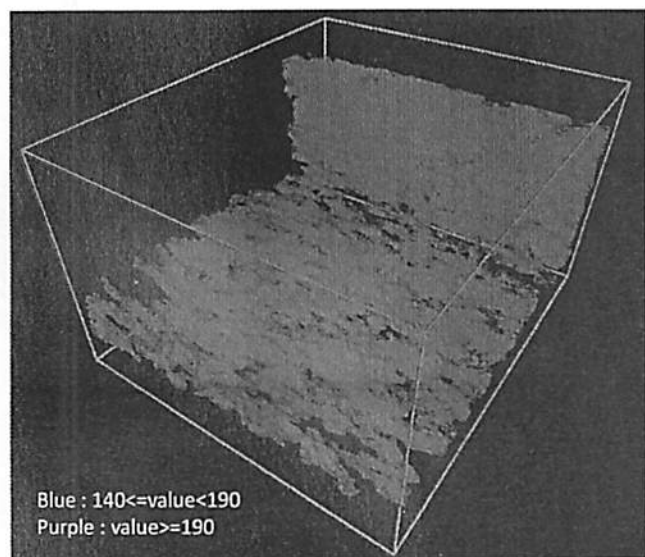


Fig. 5 High CT value region

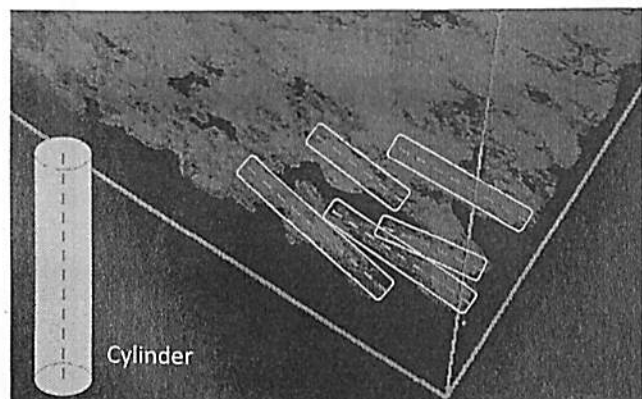


Fig. 6 Cylinder fitting. Locate cylinders in the way their center axes should overlay the GF's axes

- ⑥ 適合度の評価が改善しなくなるまで，パラメータ修正を繰り返す．
- ⑦ それ以上適合度が改善しなくなったら，円柱モデルのパラメータを確定する（1本抽出完了）．

この手順を残りの領域でも実行して，全ての GF を円柱でフィッティングして抽出する，というのが我々の考えた GF の抽出方法である．次節で我々の抽出アルゴリズムについて詳述する．

2.5 円柱フィッティングによる GF 抽出アルゴリズム

a. アルゴリズム全体のフロー 図8および以下に，本抽出アルゴリズム全体のフローを示す．

- ① CT 画像の 3D データを読み込む．
- ② GF とする適当な閾値を決め（b 項参照），閾値以上の対象ボクセルを隣接関係でグループ化する（2 値化およびラベリング処理）．
- ③ ランダムに円柱のパラメータ（c 項参照）を複数生成し，それぞれで CT データとの適合度（d 項参照）を計算し，最も適合度の高いものを初期パラメータとして採用する．
- ④ パラメータをランダムに動かし，適合度が改善した場合のみ，パラメータを動かした後のものに修正する（e 項参照）．
- ⑤ ④の手順を反復し，一定回数適合度が改善しない状態が続いた場合，収束したとして円柱モデルのパラメータを確定する．（適合度の改善が見られる限り，④の手順を反復してパラメータを修正し続ける．）
- ⑥ CT データ上で，確定した円柱モデルに含まれる領域を以降の抽出処理から除外する．
- ⑦ 残りの領域に対して，同様の円柱フィッティングを繰

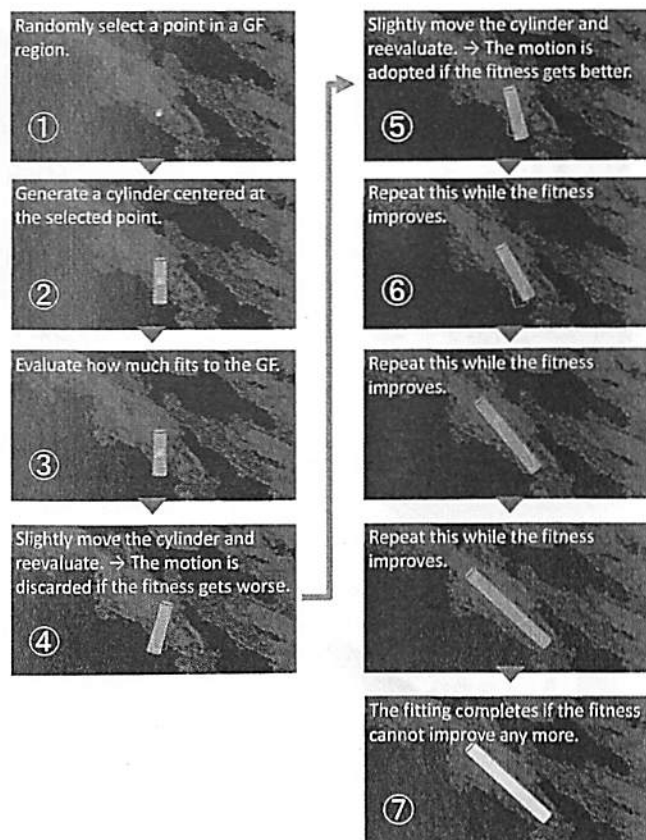


Fig. 7 The fitting procedure

り返す。

⑧ 全ての領域で行ったら抽出完了。

b. 閾値の決定 上記手順における適当な閾値として、前述したように明確な決定基準はないが、本研究では、CT画像の目視観察から、明らかにGF部分と考えられるCT値の下限(170)と、明らかに樹脂部分と考えられるCT値の上限(110)の中間値140を、今回の閾値として採用した。

c. 円柱モデルのパラメータ 図9に示すように、円柱には、大きさの情報(長さと半径)、空間的位置の情報(中心軸の2つの端点と中心の座標)、および、方向の情報(方位と高度)がある。しかし、実際には、中心軸の2つの端点の座標と半径が決まれば、円柱モデルが確定する。本研究では、成形品に含まれているGFの半径は、CT画像の解析から5 μ mとして、2端点の座標のみを円柱モデルのパラメータとしてフィッティングを行った。

d. モデルパラメータの適合度の計算方法 その円柱がどれだけCTデータのGF領域に合っているか(適合度)を評価(計算)する必要がある。以下の手順で適合度を計算する。

(1) 円柱内のサンプリング点の生成

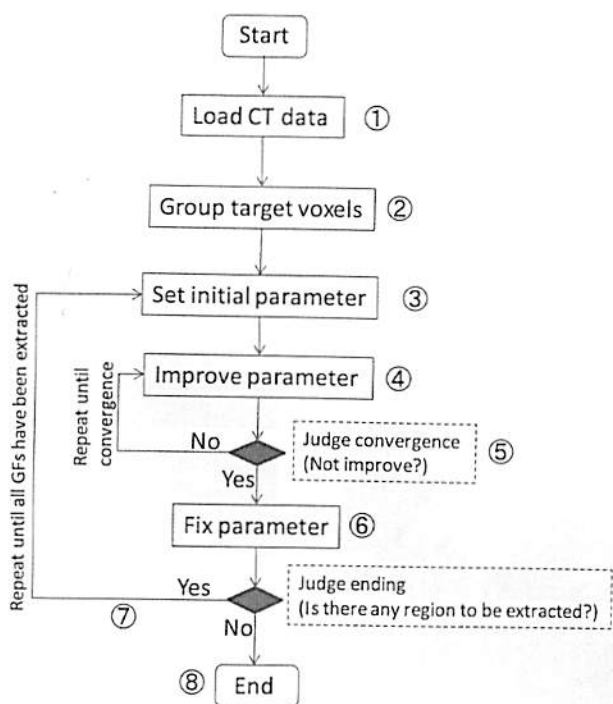


Fig. 8 Flowchart of the whole algorithm

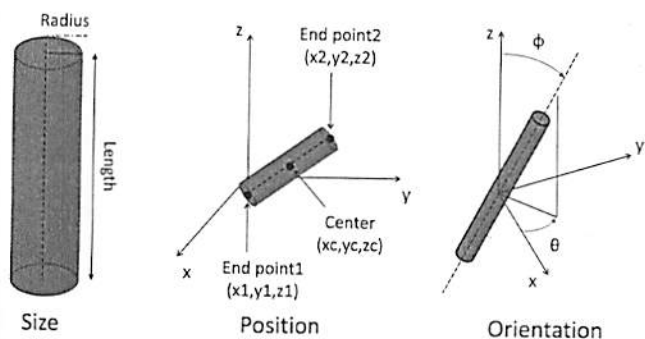


Fig. 9 The parameter set of the cylinder model

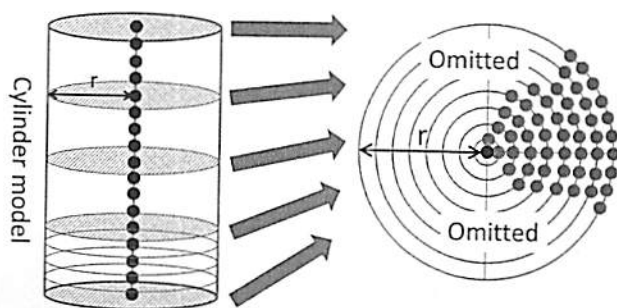
- (2) サンプリング点毎の評価素点の計算
- (3) 評価素点に各種ウェイトの適用
- (4) モデルパラメータの適合度の計算

(1) 円柱内のサンプリング点の生成 円柱全体に渡り、等間隔で細かく(ボクセルサイズの1/2以下)サンプリング点を生成する。図10に示すように、まず、円柱の中心軸上に等間隔に並ぶ点列を考え、さらに各点を中心とする円盤を考える。次に、各円盤上で、同心円状に等間隔にサンプリング点を生成する。図11に実際に生成されたサンプリング点の例を示す。

(2) サンプリング点毎の評価素点の計算 生成したサンプリング点毎に、そのサンプリング点の座標でのCT値を、CTの3次元データから3重線形補間により求める。そこからあらかじめ決めた閾値を差し引く。

(3) 評価素点に各種ウェイトの適用 評価素点がマイナスになった場合(閾値以下の場合)、ペナルティとして数倍にする。これにより、円柱が閾値以下のCT値の領域に入り込むのを強く抑制することができる。また、中心軸に近いほど、評価素点に高いウェイトを掛ける。これにより、高CT値領域(GF中心軸に相当)が円柱の中心軸に来るようにできる。

(4) モデルパラメータの適合度の計算 最後に、全てのサンプリング点の評価素点(ウェイト適用後)を合計して、モデルパラメータとしての適合度を算出する。この時、そのサンプリング点が支配する円柱内の微小領域(隣接サンプリング点との境界までの領域)の体積を掛けることで、より正確に適合度を評価している。以下に、適合度の計算式を示す。



Suppose points located along the center axis equi-distantly, and disks whose centers are at those points.

Generate sampling point set on each disk equi-distantly.

Fig. 10 Generation of the sampling point set

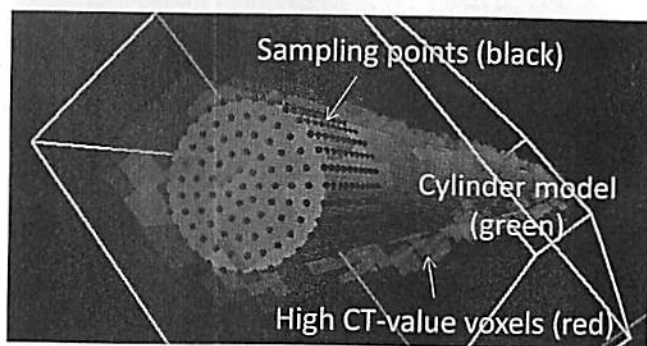


Fig. 11 An example view of the generated sampling point set

$$e_i = W_{1,i} \times W_{2,i} \times W_{3,i} \times (C_i - T_i)$$

$$E = \sum_i e_i \times \Delta V_i$$

E : モデルパラメータの適合度

e_i : サンプル点の評価素点

C_i : サンプル点での CT 値

T_i : 閾値

$W_{1,i}, W_{2,i}, W_{3,i}$: 各種のウェイト

ΔV_i : サンプル点が支配する円柱内の微小体積

サンプリングの間隔が細かい方が適合度の計算精度が上がるが、それだけ計算量も多くなる。本研究では、サンプリング間隔をボクセルサイズの 1/2 を上回らないように設定した。(ボクセルサイズ = 3 μm → サンプル間隔 $\leq 1.5 \mu\text{m}$)

e. モデルパラメータの反復修正の手順 図 12 および以下に、円柱モデルパラメータの反復修正の部分の手順を示す(図 7 の⑥および図 8 の④⑤に対応)。

- ① 高 CT 値領域に、まだフィッティングしきれてない円柱モデルがあるとする。
- ②③ 端点 1 を微小範囲で変動させて (XYZ 各座標の変動幅を ± 0.5 ボクセルの範囲の一樣乱数で決定)、適合度の変化を見る。
- ④ その中で最も適合度が改善した方向を選んで、直線探索を行う。
- ⑤ 直線上で最も適合度が改善した位置を、新しい端点 1 とする。
- ⑥⑦⑧ 端点 2 でも同様に行う。
- ⑨⑩ 端点 1 を長さ方向に直線探索を行い、最も適合度が改善した位置を、新しい端点 1 とする。
- ⑪⑫ 端点 2 でも同様に行う。

⑫の手順を完了した時点でパラメータの適合度を再計算し、適合度が改善しない状態が一定回数以上続いていた場合に、収束したとして円柱モデルのパラメータを確定する。それまでは①～⑫の手順を、収束するまで繰り返す。

f. 最適化手法 本アルゴリズムでは、円柱モデルのパラメータの反復修正(最適化)に、乱数を用いてパラメータを変動させて、適合度が改善する方向にパラメータを改善していく方法(モンテカルロ法)を用いた。最適化問題には、通常、最急降下法や準ニュートン法などの勾配法が用いられることが多いが、本研究では、最適化の目標関数である円柱モデルパラメータの適合度の計算に、離散的なサンプリング点を使用しており、パラメータの微小変化に応じて、サンプリングの分割数が変わる。そのため、パラメータ空間上で目標関数が不連続になり、勾配法ではローカルミニマムに捕まると考えられたため、使用しなかった。

g. その他の工夫 以下の工夫も行っている。

(1) 対象ボクセルのグループ化 閾値以上の隣接ボクセルをグループ化して(2 値化およびラベリング処理)、ボクセル数の多いグループから優先して抽出を行うことで、適合度の高い、長い繊維が優先的に抽出されるようにした。また、ボクセル数が一定数に満たないグループはノイズとして除去した。

(2) 初期パラメータの決定方法 複数の初期パラメータ

からある程度の反復修正を行い、その中から最も適合度の高くなったものを最終の初期パラメータとして採用した。これにより、適合度の高いものが優先して抽出されるようにした。

2.6 GF 抽出プログラムの開発環境および実行環境

本円柱フィッティングによる GF 抽出アルゴリズムを実装したプログラムは、Visual Studio® (Microsoft 製)を用い、C 言語で開発した。3D 表示の部分は、OpenGL + GLUT ライブラリで作成した。また、GF 配向の抽出は、Windows PC (CPU : Xeon W 3690/3.46~3.73 GHz/6 コア、ビデオカード : Quadro 2000、メモリ : 8 GB、OS : Windows 7/64 bit) 上で行った。

2.7 GF の抽出精度の検証方法

CT 撮影および GF 配向抽出に使用したのと同じ種類の成形品を高熱で焼き、GF のみを取り出してその繊維長を実際に測定し、本研究での抽出アルゴリズムでの GF 抽出結果と比較した。

3. 結 果

3.1 GF の抽出過程

抽出プログラムで GF を抽出中の様子を図 13 に示す。黄色が GF にフィッティングした円柱モデルである。赤い領域は、現在フィッティング中の円柱モデルの周囲にある高 CT 値領域を表示している。黄色い円柱モデルがだんだん増えていくのが分かる。赤色の線枠は、CT データ全体を表す。空色の線枠は、現在抽出対象となっているグループを表す。抽出中、3 次元的に把握しやすくするために、表示を回転している。

3.2 GF の抽出結果

円柱フィッティングにより、全部で 1908 本の GF が抽出された。抽出に約 9 時間かかった。図 14 に抽出した結果を示す。

3.3 GF の抽出精度の検証

抽出した GF の円柱モデルのパラメータは、ファイルに保存され、以後の解析で活用可能になっている。本アルゴリズムでの抽出の精度を検証するために、今回の抽出に使用したのと同じ種類の成形品を高熱で焼き、ガラス繊維のみを取り出してその繊維長を実測し、本研究での抽出アルゴリズムでの抽出結果と繊維長分布を比較した。図 15 に両者の繊維長分布のヒストグラムを示す。若干長めへのシフトがあるものの、本アルゴリズムによる GF 抽出で、実験により求めた繊維長分布と比較的よく合致した。

4. 考 察

今回の抽出アルゴリズムが実測値より長めにシフトする理由としては、①実測で行っている高熱処理・計測作業時に GF が折れている、②複数の GF 領域をまたいで長く抽出されている、等の理由が考えられる。①については実際に作業中に折れたものが若干あることが確認されている。②についても GF が密集していると、複数の GF を斜めにまたいで長い円柱モデルが作成されていると思われるケースが確認されている。すなわち、GF の含有率が高く、密集状態になっていると、本アルゴリズムでは複数の GF にまたがっての誤抽出が生じ、繊維長は実際より長めに、繊

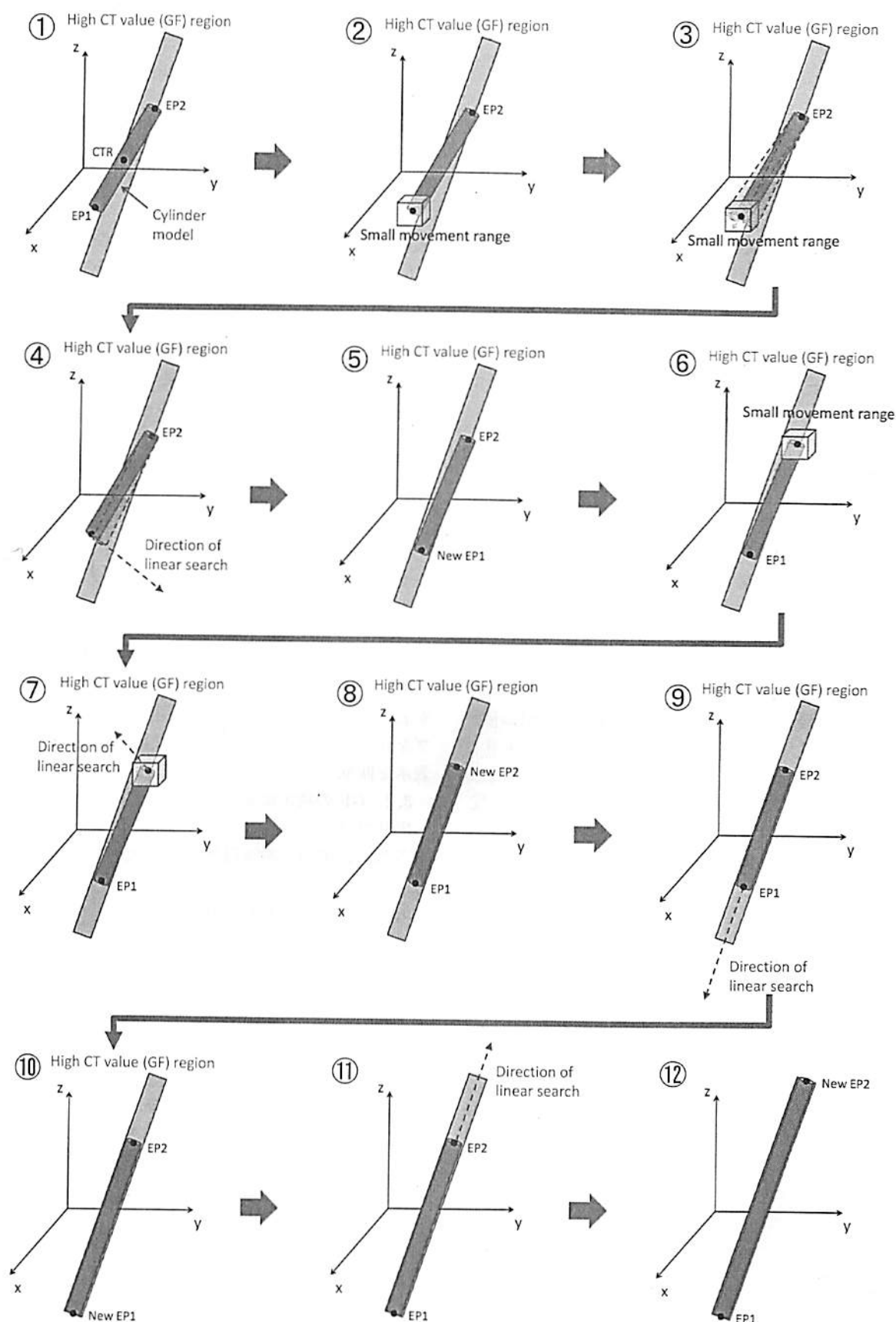


Fig. 12 The optimization procedure of the cylinder model's parameter

維本数は実際より少なめに出る恐れがある。GF 含有率と本アルゴリズムでの抽出精度の関係について、アルゴリズムの改良と並行して、今後の課題である。

今回の GF 抽出における CT 値の閾値を決めるに当たり、

閾値を幾つか変えて予備実験を行った。閾値を高くしすぎると、抽出対象となる GF 領域が減り、抽出された GF の本数が少なくなる傾向があり。また、閾値を低くしすぎると、複数の GF 領域にまたがった誤抽出が多くなる傾向

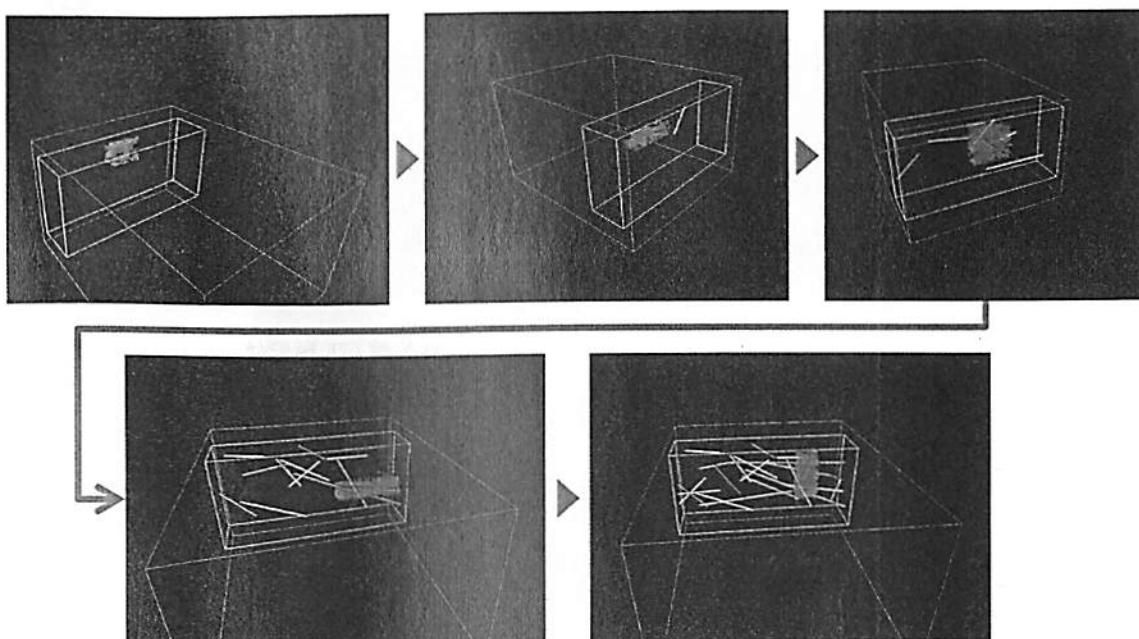


Fig. 13 Some snapshots while extracting GFs

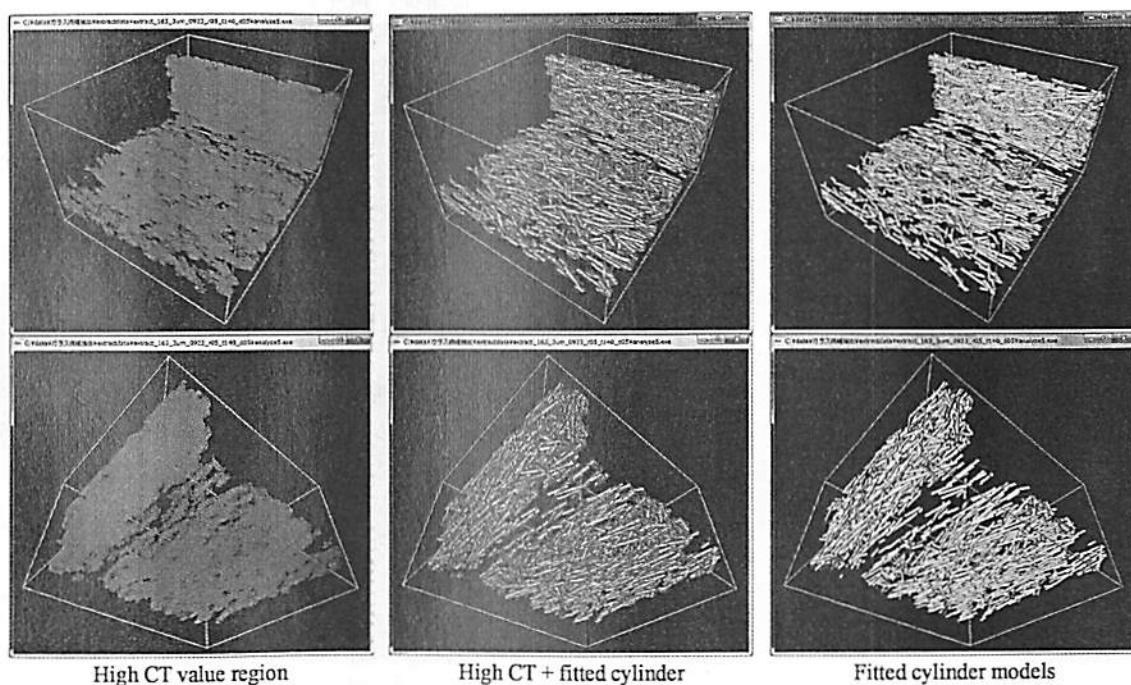


Fig. 14 Result of GF extraction by cylinder model fitting

があった。結局、今回は樹脂であることが確実なCT値とGFであることが確実なCT値の中間の値として閾値を決定したが、この方法では樹脂/GFとするCT値を決める際に人間の主観に頼っている。画像処理技術として、画像の輝度値のヒストグラムから自動で2値化の閾値を決定する方法がいくつか提案されているので^{9),10)}、今後それらの方法を活用することも検討する。

GFの繊維径とCTデータのボクセルサイズの関係にも注意が必要である。ボクセルサイズが繊維径に比べて大きく、例えば、同程度であった場合、1つのボクセル内にGFのX線吸収率と樹脂のX線吸収率の両方が混ざるため (partial volume effect)、コントラストが低下し、抽出が困難になると考えられる。本研究でのデータは、推定10

μm の繊維径に対して、ボクセルサイズ $3\mu\text{m}$ のCT画像なので、比率は約1/3となる。本アルゴリズムでも、やはりそのくらいのCT画像の解像度 (細かさ) が必要ということになるが、その限界の調査についても今後の課題である。

今回のデータでは確認されていないが、GFRPの中には、長く湾曲したGFを含むものも多く、本アルゴリズムではそれらは複数の円柱に折られて抽出されてしまう。現在、抽出モデルを真っ直ぐな円柱モデルからスプライン曲線による曲がったパイプ状のモデルに変更した抽出アルゴリズム/ツールを開発中である。また、このツールで抽出アルゴリズムの改良も行っている。これらについては、次報で報告したい。

最近、構造生物学の分野で、ナノレベルの電子線トモグ

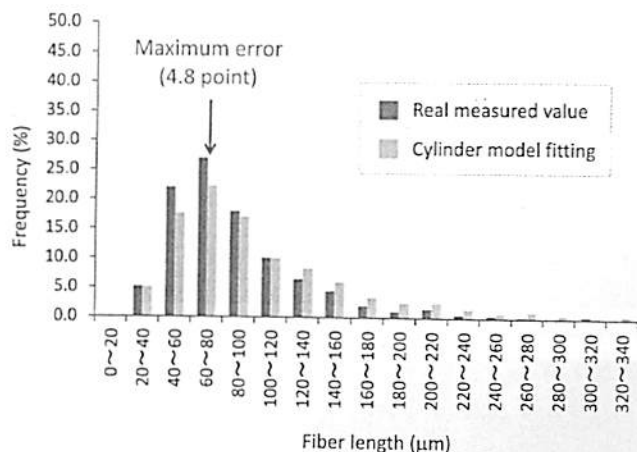


Fig. 15 A comparison of the fiber length distribution between real measurement and our fitting method

ラフィーのデータから、円柱モデルとのテンプレートマッチングにより、細胞内の繊維状の構造物（アクチン繊維、微小管）を抽出する研究が行われており^{11), 12)}、その抽出アルゴリズムは、FEI社の画像解析ソフトAVIZO®/AMIRA®で使用可能になっている。この抽出アルゴリズムでは、あらかじめ、3次元画像データの全てのボクセルにおいて、テンプレートとなる一定サイズの円柱モデルとの相互相関（＝モデルとの一致の程度を評価する指標、我々の“適合度”とは評価方法が異なる）を、円柱モデルをあらゆる方向に向けながら計算し、最も相関の高い方向とその時の相関値とをボクセルごとに記録しておく。その後、3次元画像データ内でその相関値の高いボクセルのみをトレースすることで繊維構造を抽出している。我々のGF抽出アルゴリズムは、画像データ内のGF領域に円柱モデルの長さ方向を最適化しながら一本一本フィッティングさせて抽出するものであり、彼らの方法（あらかじめボクセルごとに画像の特徴量を計算しておき、高い特徴量を持つボクセルのみをトレースする）とは異なっている。彼らの方法については今後より詳細に調べて、その考え方・手法を、我々のGF抽出アルゴリズムを改良する際の参考にしたいと考えている。

5. 結 言

本研究では、GF強化されたLCP薄肉射出成形品をX線CTで撮影したデータから、画像処理および最適化により、成形品内のGFを抽出するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、GFを円柱で近似し、その円柱のパラメータの正しさをCT画像から評価し、その評価が最大になるようにパラメータを修正する最適化問題を解いた。実測データと比較した結果、比較的よく繊維長分布が再現された。（ただし、若干長めへのシフトが見られた。）本研究のアルゴリズムにより得られたGFの長さ・配向特性から、成形品の熱・機械的特性を十分に推定することができ、

構造解析等により、そり変形や剛性を予測する精度が飛躍的に向上することが期待される。今回我々が開発したGFの抽出アルゴリズム／ツールは、既存の解析手法（細線化、ラベリング、フーリエ変換）では不可能な、GF一本一本の抽出を初めて試みたものである。現状ではGF密集時の抽出精度に問題があるが、今後さらにアルゴリズムの改良を続けて、抽出精度・抽出時間を改善させる予定である。

謝 辞

本報告のX線CT撮影は、京都工芸繊維大学の西川幸宏先生に実施していただいた。また、金沢工業大学の郭清蓮准教授・渡辺弥壽夫教授・中沢実教授およびその学生には、画像処理技術についてアドバイスを頂いた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 松岡孝明, 高島淳一, 小岩井明彦, 井上良徳, 高橋秀郎, 上垣外修己: 射出成形品の繊維配向解析, 粉体および粉末冶金, 36(2), 195(1989)
- 2) 村田泰彦, 横井秀俊: 射出成形における金型内繊維配向過程の実験解析法, 生産研究, 46(12), 619(1994)
- 3) 田中雅夫: 射出成形品における繊維の流動配向, 三重県工業技術センター研究報告, No. 19, (1995)
- 4) 森澤諭, 齋藤猛, 田中雅夫: 炭素繊維強化熱可塑性樹脂射出成形品の引張強度と耐候性の評価, 三重県工業研究所研究報告, No. 37, (2013)
- 5) 杉田寿夫, 瀬戸雅宏, 山部昌: 成形加工, 22(9), 512(2010)
- 6) 中野亮, 塩田忠弘, 開本亮, 滝克彦, 高塩創, 千容星: 成形加工, 20(4), 237(2008)
- 7) 多比良恵, 横井秀俊, 滝克彦: X線CTによるメタリック射出成形品の配向挙動解析 I, 成形加工 12 (年次大会抄録), 127(2012)
- 8) 西川幸宏: X線CTによるコンポジット材料中のファイラーの配向解析, 高分子加工技術研究会第71回例会, (2009)
- 9) Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), 62(1979)
- 10) Sezgin, M. and Sankur, B.: Journal of Electronic Imaging, 13(1), 146(2004)
- 11) Rigort, A., Gunther, D., Hegerl, R., Baum, D., Weber, B., Prohaska, S., Medalia, O., Baumeister, W. and Hege, H. C.: Journal of Structural Biology, 177(1), 135(2012)
- 12) Weber, B., Greenan, G., Prohaska, S., Baum, D., Hege, H. C., Müller-Reichert, T., Hyman, A. A. and Verbavatz, J. M.: Journal of Structural Biology, 178(2), 129(2012)