

研究論文

樹脂複合材料における X 線 CT3 次元像の 二値化閾値設定方法の考案

吉田陽子*1、中西裕紀*2、福岡修*3、杉本貴紀*1、村瀬晴紀*4

Method of Threshold Setting for X-Ray CT 3D Image of Resin Composite Material

Yoko YOSHIDA*1, Yuki NAKANISHI*2, Osamu FUKUOKA*3
Takanori SUGIMOTO*1 and Haruki MURASE*4

Research Support Department*1~4

樹脂複合材料の X 線 CT3 次元像において、輝度値のヒストグラムが構成成分ごとに分離されず、二値化の閾値設定が困難な場合に、他の観察画像から算出した各構成成分の面積割合を用いて X 線 CT3 次元像の閾値を設定する方法を考案し、その妥当性について検討した。試料に、X 線 CT3 次元像で閾値を容易に決められるガラス繊維強化樹脂(GFRP)を用いて、走査電子顕微鏡(SEM)像から算出した閾値と比較した結果、両者の閾値がほぼ一致した。従って、考案した閾値設定方法は妥当性が高いと確認できた。

1. はじめに

樹脂複合材料は、母材の樹脂に強化材となる材料を組み合わせ、樹脂に優れた物性を付与した材料である。代表的な樹脂複合材料として、繊維強化樹脂である炭素繊維強化樹脂(CFRP)や GFRP が挙げられる。樹脂に含まれる繊維の分布・配向といった内部構造が強度などの物性に影響を与えることが知られており、その評価方法に、X 線を透過させて内部を調べる X 線 CT が使用されることが多い。通常の X 線 CT 画像解析の流れを **図 1** に示す。X 線 CT 測定は、試料を回転させ、透過像の連続撮影データを得る。そして透過像から再構成を行い、X 線 CT3 次元像を構築する。X 線 CT3 次元像では、材料の組成ごとに異なる X 線の透過度が画像の輝度値(例 256 階調;8bit)に表れる。その輝度値の分布を表すヒストグラムで閾値を決めて二値化処理(画像内で 2 成分を白・

黒に分ける手法)を行うと、画像内で複合材料を構成する成分ごとに分けることができる。輝度値のヒストグラムの縦軸は、3 次元像のボクセル数であるため、二値化を行えば樹脂複合材料の構成成分の体積割合が分かり、そこから繊維の分布・配向などの構造情報を得ることが可能となる。ところが CFRP などの母材と強化材の組成が近い樹脂複合材料においては、X 線 CT3 次元像のコントラストが弱く、輝度値のヒストグラムでは明瞭に樹脂と強化材が 2 つに分離されない。そのために、閾値の少しの変化で二値化画像が大きく異なり、二値化の閾値を客観的に設定することが難しいという課題がある。

本研究では、このような課題を解決するために、明瞭なコントラストが得られる他の観察画像を用いて構成成分の面積割合を算出し、それを用いて X 線 CT3 次元像の二値化閾値を設定する方法を考案した。また、その方

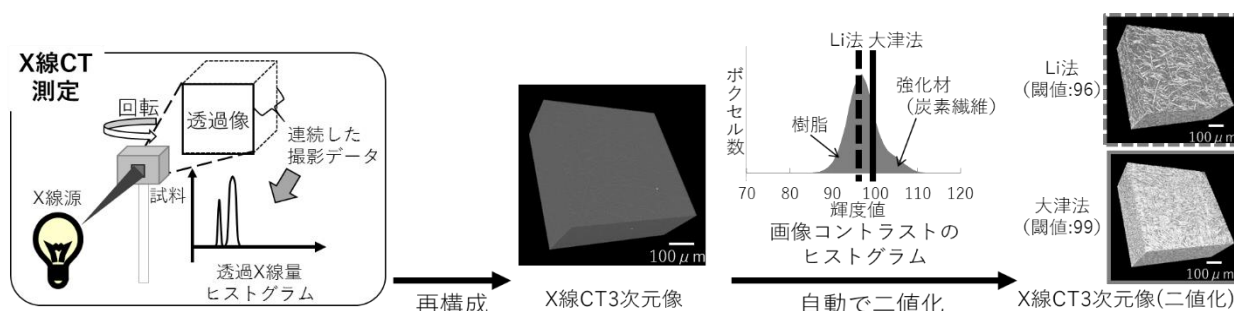


図 1 通常の X 線 CT 画像解析の流れ(材料:CFRP)

*1 共同研究支援部 計測分析室 *2 共同研究支援部 計測分析室(現あいちシンクロトロン光センター) *3 共同研究支援部 シンクロトロン光活用推進室(現あいちシンクロトロン光センター) *4 共同研究支援部 シンクロトロン光活用推進室

法が適当であるか検討を行った。

2. 実験方法

2.1 考案した二値化閾値設定方法

明瞭なコントラストが得られる分析装置を活用し、樹脂複合材料の強化材の割合を算出して X 線 CT3 次元像の閾値設定方法を考案した(図 2)。ここでは、CFRP(CF:炭素繊維)を例に、考案した方法の流れを説明する。

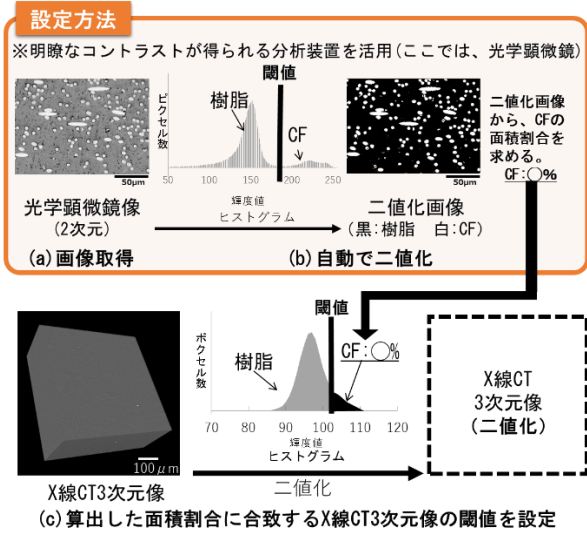


図 2 考案した閾値設定方法のフロー

まず、明瞭なコントラストが得られる装置より、CFRP の 2 次元観察画像を取得する(図 2(a))。そして、得られた画像について、画像処理ソフト(ImageJ¹⁾)を用いて、自動で閾値を設定し、樹脂を黒、CF を白とする二値化を行う(図 2(b))。閾値設定のプログラムは、一般的なアルゴリズムを使用する。その後、二値化画像から、CF を示す白色部分の面積割合を算出する。面積割合と体積割合は同一と仮定して、最後に、分析装置より算出した面積割合に合致する値を X 線 CT3 次元像の輝度値のヒストグラムの閾値とする(図 2(c))。

2.2 考案した方法の検討

2.2.1 測定試料

考案した閾値設定方法が適当であるか検討するため、樹脂複合材料の中でも、X 線 CT3 次元像で輝度値のヒストグラムが明瞭に分離され、閾値を容易に決められる GFRP 射出成形品【母材：ポリプロピレン(PP)、強化材：ガラス繊維(GF)】を測定試料として用いた。

2.2.2 SEM による断面観察

今回用いた GFRP に対して、明瞭なコントラストの 2 次元画像が得られる装置として、SEM【(株)日立ハイテクノロジーズ製 SU-70】を用いた。測定試料は射出成形品であるため、GF が射出方向に配向すると想定された。そこで、繊維配向が、閾値設定で利用する繊維の面

積割合の結果に影響を与えるのか検討を行うために、測定試料を x,y,z の 3 方向に切り出し、3 方向からの観察試料を用意した(図 3)。観察試料を型において常温硬化埋込樹脂に埋め込み、耐水研磨紙【#400→#800→#1500→#2000→ダイヤモンドスラリー(砥粒サイズ:3→1→0.5 μ m)】にて、研磨を行った。また、SEM 観察の前に、イオンスパッタ装置【(株)日立ハイテクノロジーズ製 E-1045】にて、観察面に白金コーティングを行った。

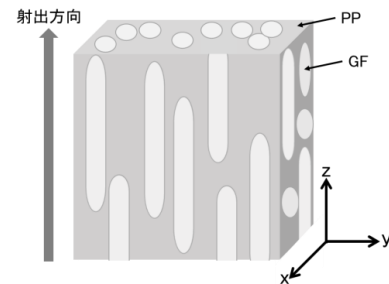


図 3 測定試料の模式図

次に、SEM の観察条件を表 1 に示す。画像取得は、明瞭なコントラストが得られる反射電子像モードで行った。また、一度に多くの GF を撮影し、かつ、GF の画像処理による解析が十分できる画質となるように、視野サイズと画素サイズの条件を決定した。断面出した観察試料のなかで、可能な限り多くの画像を取得した結果、視野数は各方向 35 枚とした。取得した画像について、画像処理ソフト(ImageJ)を用いて、大津法²⁾による二値化処理を行い、GF の面積割合を算出した。

表 1 SEM 観察条件

項目	条件
加速電圧	15kV
倍率	60倍
検出信号	反射電子
視野サイズ(1視野あたり)	1.3mm × 2.1mm
画素サイズ	0.83 μ m/pixel
取得した視野数	x,y,zの各方向35枚ずつ

2.2.3 X 線 CT による 3 次元内部構造の観察

試料の 3 次元内部構造観察装置として、高分解能 3 次元 X 線顕微鏡【X 線 CT:(株)リガク製 nano3DX】を用いた。GFRP における X 線 CT 測定の最適条件を検討し、表 2 に示す条件に決定した。

表 2 X 線 CT 測定条件

項目	条件
管電圧	50kV
管電流	24mA
ターゲット	Mo
画素サイズ	0.54 μ m/pixel
露光時間	10sec
視野サイズ	0.9 × 0.7mm
ダイナミックレンジ	16bit

試料を 180° 回転させて 1200 枚の透過像を取得後、

より高コントラストの X 線 CT3 次元像を得るため、透過 X 線量ヒストグラムのうち測定試料由来の透過 X 線のみ選択し、8bit で再構成を行った。

そして、SEM 像より算出した面積割合から決めた閾値と、X 線 CT3 次元像について画像処理ソフト (ImageJ) で得られた大津法による二値化閾値を比較し、適当であるか検討を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 考案した方法の閾値設定における繊維配向の影響

各方向からの SEM 像と、二値化した画像を **図 4** に示す。SEM 像から、x 方向は繊維の縦断面が多く存在し、z 方向は横断面が多く存在するなど、繊維の配向のために、観察方向によって見え方が異なることが確認された。

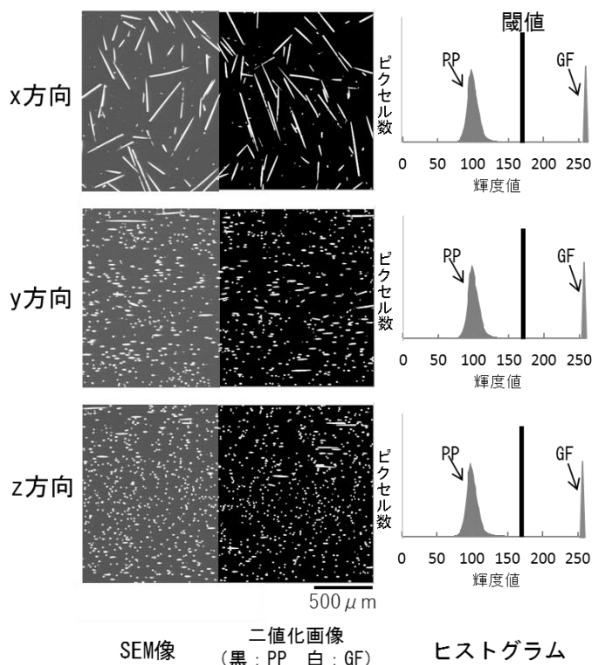


図 4 GFRP 射出成形品の SEM 像と二値化画像

SEM 像の視野サイズから評価領域の面積を換算し、SEM の評価領域と GF の面積割合の関係を表したグラフを **図 5** に示す。図 5 では、各方向の SEM 像 5 枚、10 枚、15 枚ごとに面積割合の平均値を求め、評価領域の大きさが GF の面積割合のばらつきに与える影響を示している。

図 5 より、同じ評価領域の面積で GF の面積割合を比較すると、繊維の縦断面が多く存在する x 方向は、面積割合のばらつきが大きく、横断面が多く存在する z 方向はばらつきが小さいことが分かった。この結果から、縦断面が多く存在する x 方向に対し、z 方向のように繊維の横断面が多く存在する観察面においては、同じ評価領域でも評価本数が多いためにばらつきが抑えられたと考

えられる。一般的に、射出方向に対して繊維が平行に存在することが多いため、射出方向に垂直な面が評価に向いていると想定できる。図 5 から、z 方向の視野数 10 枚では面積割合のばらつきは 0.1% 程度であることから、今回の試料で射出方向に垂直な面で評価する際は、視野数 10 枚の評価領域:27.5mm² と同程度の領域で評価を行えば、面積割合の算出に大きな誤差は生じないと考えられる。なお、GF 含有量によって、1 視野に含まれる評価本数が変わるため、最適な評価領域はその都度検討する必要がある。

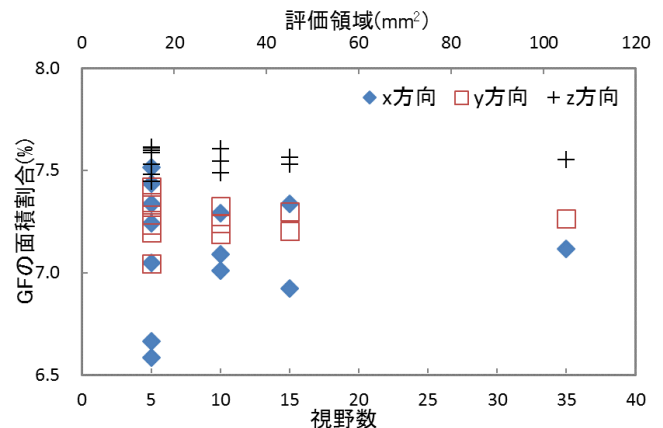


図 5 SEM 像の評価領域の大きさ と GF の面積割合の関係

3.2 X 線 CT3 次元像の二値化閾値の検討

再構成した X 線 CT3 次元像の輝度値のヒストグラムについて、SEM 像より算出した GF の面積割合から決めた閾値と、X 線 CT3 次元像のヒストグラムで大津法にて自動で設定した閾値を比較した (**図 6**)。

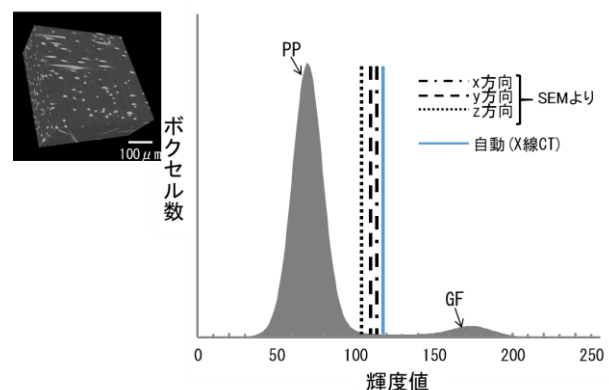
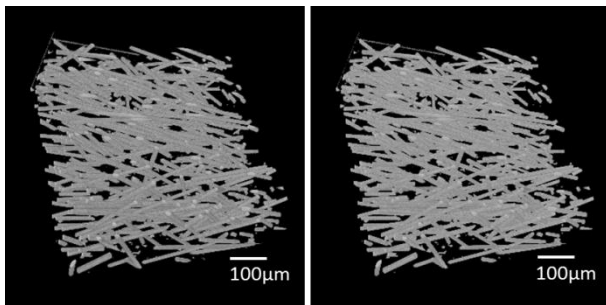


図 6 X 線 CT3 次元像と二値化閾値を設定した輝度値のヒストグラム

その結果、面積割合から決めた閾値は、x 方向 113、y 方向 110、z 方向 105 となり、自動で設定した閾値 119 に近い値となった。100~150 の輝度値に含まれるボクセルはとて少なく、1 階調毎の面積割合の違いは 0.1% 未満であるため、x,y,z いずれの方向で評価しても、二値化された GF3 次元像には、観察方向による差はないと考えられる。なお、CFRP など輝度値のヒストグラ

ムで構成成分ごとに分離されない試料については、観察方向の違いで面積割合に微小な差が生じた場合でも、その差は X 線 CT3 次元像の輝度値において、1 階調の中に収まると想定できる。

また、面積割合で決めた閾値で二値化した画像と自動で閾値設定した二値化画像を図 7 に示す。ここでは、観察方向の中で自動設定の閾値から最も遠い z 方向の面積割合で決めた閾値による画像を示す。



z方向の面積割合平均値 (閾値:105) で閾値設定 自動(閾値:119)で閾値設定

図 7 二値化した GF の 3 次元像

両者の二値化した GF の 3 次元像を比較すると、ほぼ同様の GF の 3 次元構造を得ることができた。したがって、考案した閾値設定方法(図 2)は、適当であると考えられる。

4. 結び

樹脂複合材料の X 線 CT3 次元像において、輝度値の

ヒストグラムが構成成分ごとに分離されず、二値化の閾値設定が困難な場合がある。そこで本研究では、明瞭なヒストグラムが得られる他の観察画像から算出した各構成成分の面積割合を用いて、X 線 CT3 次元像の閾値を設定する方法を考案し、その方法が適当であるか検討を行った。その結果、閾値設定のための 2 次元観察画像(本研究で使用した観察画像は、SEM 像)で必要な評価領域は、繊維配向に影響されることが分かった。また、閾値を容易に決められる GFRP を測定試料として、SEM 像から算出した閾値と比較した結果、両者の閾値がほぼ一致した。従って、考案した閾値設定方法は妥当性が高いと確認できた。

本研究で考案した二値化閾値設定方法は、CFRP など、X 線 CT3 次元像の輝度値のヒストグラムを成分ごとに分離し難い試料に有効であると考えている。今後は CFRP について、考案した方法を用いて X 線 CT3 次元像の構造解析に取り組む。

文献

- 1) Rasband, W.S.: ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.(2020/03/31)
- 2) N Otsu: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-9**(No.1), 62-66(1979)