

広範囲なリサイクル炭素繊維不織布の配向度を評価する新たな解析手法の開発

前田, 洋志 / MAEDA, Hiroshi

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030642>

広範囲なリサイクル炭素繊維不織布の配向度を評価する新たな解析手法の開発

DEVELOPMENT OF A NEW ANALYSIS METHOD TO EVALUATE THE ORIENTATION OF A WIDE RANGE OF RECYCLED CARBON FIBER NONWOVEN FABRICS

前田洋志

Hiroshi MAEDA

指導教員 東出真澄

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

The purpose of this study was to develop a quantitative fiber orientation analysis method for a wide range of samples. For this purpose, analysis samples with different characteristics such as resolution and image size were analyzed. The degree of orientation was defined as the ratio of the number of pixels containing fibers that contribute to the mechanical properties to the total number of pixels containing fibers. To validate the fiber orientation analysis method, the tensile modulus was estimated from the analysis results and compared with experimental values. The tensile modulus was predicted by the elastic modulus prediction method proposed by Maekawa et al. Although some samples had errors, the image subtraction method I proposed reproduced the predicted values close to the experimental values.

Key Words : *Recycled Carbon Fiber Nonwoven, Fiber Orientation Analysis, Tensile Elastic Modulus*

1. 緒論

近年、軽量である点や比強度の高さから炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が航空機材料をはじめ幅広い分野で注目され、その使用量は年々増加している。株式会社矢野経済研究所によると、2019年の日本とドイツ・イギリス・イタリアの欧州4か国の廃CFRPの処分量と埋め立て量は合計で1万tも処分されていた。更に、その処分方法のほとんどが埋め立てのよる処理となっている¹⁾。これらの事象に対し、EUでは埋立地に送られる全てのCFRP廃棄物の量を減らすことを目指し、ボーイング社では引退した飛行機の材料の90%のリサイクルを目指しているが、行政や政策目標とは対照的にCFRP廃棄物の大部分は回収されていない²⁾。故に環境負荷軽減やコスト削減の面からもCFRPのリサイクル法の確立が必要である。

リサイクル法には様々な手法があるが、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と日本毛織 (ニッケ) が提案する手法では、常圧溶解法によって取り出した繊維長さ80mmのリサイクル炭素繊維 (r-CF) をカード機で梳くことで一方に配向性の高い不織布に加工した。その不織布を基材とし、エポキシ樹脂を含浸させ、オートクレーブ成形することで作製したリサイクルCFRP (r-CFRP) は航空機構造部材にも使用されるA2024-T3の0.2%耐力である345MPaを超える391MPaの引張強度を有するr-CFRPの製造に

成功した³⁾。この手法によって作られるr-CFRP内の繊維の配向性が高いため、世界的に見ても高強度を誇るが、元来より不織布の繊維配向分布が分かっていた。ここで主な配向解析手法の例を示す。

前川らは、ベータ関数及び確率密度関数を用いた簡便な関数形より繊維配向分布を表現する手法を開発した⁴⁾。

影山らは、タルボ・ロー干渉計を用いてX線が物質を透過する際の位相シフトによる屈折を画像化した。試験片を0°、45°、90°回転させ撮影し、得られた3つの散乱像から試験片の繊維配向分布及び異方性分布を取得した⁵⁾。

森脇らは、不織布の薄さを利用し、広範囲の不織布画像から繊維配向度を求める手法を開発した³⁾。だが、この手法は解析対象をデジタルマイクロスコープ (KEYENCE VHX-5000) で撮影した40mm角の画像に限り、且つ1枚毎の解析しかできなかった。

そこで本研究では広範囲を対象にした定量的な繊維配向解析手法を開発することを目的とし、森脇らの手法³⁾を改良し、解析画像を低解像度化させ繊維配向解析範囲を拡張した。更に、画像サイズや解析サンプル内における繊維の密度など特徴の異なる解析試料を同様に解析し、繊維配向分布を作成した。また、繊維配向分布から弾性率を予測し、r-CFRPの引張試験結果³⁾と比較することで、繊維配向解析手法の妥当性を検証した。

2. 繊維配向度と弾性率予測

(1) 配向度

本研究における配向度 $d(\varphi)$ は、繊維を含む画素総数 P_{total} に対する力学特性に寄与する繊維を含む画素数 $P_{eff}(\varphi)$ の比と定義した。図1に配向度の簡易的な説明図を示す。

$$d(\varphi) = \frac{P_{eff}(\varphi)}{P_{total}} \quad (1)$$

(2) 重み関数

繊維長が短い場合繊維と樹脂が接する表面積が狭いため、引張荷重が増えると繊維が樹脂から引き抜かれてしまう。本研究では、繊維が樹脂から引き抜かれにくい最も短い繊維長を臨海繊維長 (lc) とし、繊維破断強度 (σ_f) と界面せん断強度 (τ) のつりあいより導出した。

$$\sigma_f = \frac{F}{\pi \cdot \left(\frac{D_{fiber}}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{F}{lc \cdot \pi \cdot D_{fiber}} \quad (3)$$

$$lc = \frac{D_{fiber} \times \sigma_f}{4 \times \tau} \quad (4)$$

ここで D_{fiber} は繊維直径、 F は引張荷重である。また、繊維はうねりや傾き角を持ちカーブする。故に、ある一定の繊維長を所持すると検出された繊維が本当にその繊維長を所持しているか分からない。よって本研究では $\theta = 1^\circ$ まで繊維の傾きを許容し、 lc から繊維の傾き角が 1° になるまでの長さ ($d/\sin\theta$) を持つ繊維に重み関数で存在確率を与えた。図2に $d/\sin\theta$ の説明図を³⁾、図3に重み関数を示す⁶⁾。重み関数にはシグモイド関数を使用し、 d は繊維直径であり、 $x = lc$ の時 $y = 10^{-4}$ 、 $x = d/\sin\theta$ の時 $y = 1$ 、 $x = (lc + d/\sin\theta)/2$ の時 $y = 0.5$ を満たす。

$$\text{Weighing Function } (y) = \frac{1}{1 + e^{-ax+b}} \quad (5)$$

$$a = \frac{2 \ln(10^{-4})}{(lc - d/\sin\theta)}$$

$$b = \frac{a(lc - d/\sin\theta)}{2}$$

(3) 繊維配向分布

本解析法では解析サンプルを 10° 毎に回転させ計 9 枚の解析画像で評価する。故に $2^\circ, 4^\circ$ といった解析角度の配向分布は分からない。よって解析結果を線形補完することで配向分布を完成させた。なお $\theta = 1^\circ$ までの傾きを許容するため 2° 毎に線形補完した。更に不織布内の繊維は形状が U 字になるため解析方向 0° を軸に左右対称になると仮定し、平均化した⁷⁾。図4に繊維配向分布を示す。

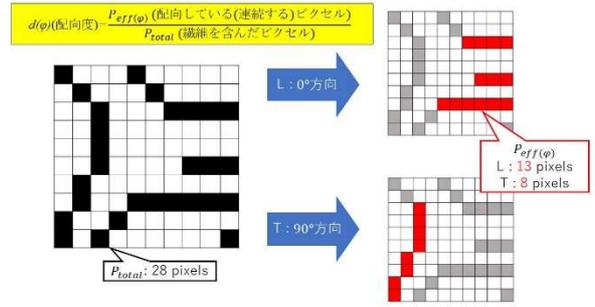


図1 配向度の考え方

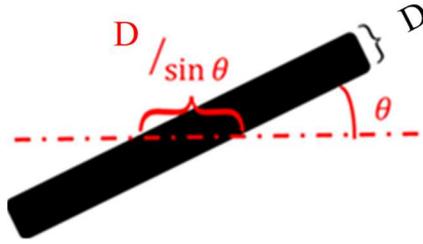


図2 $d/\sin\theta$ の説明図

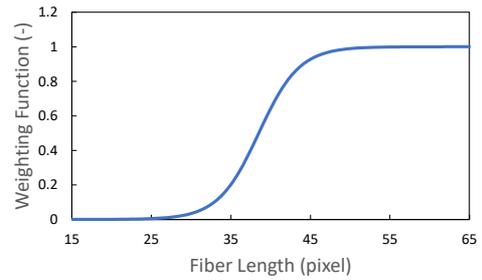


図3 シグモイド関数

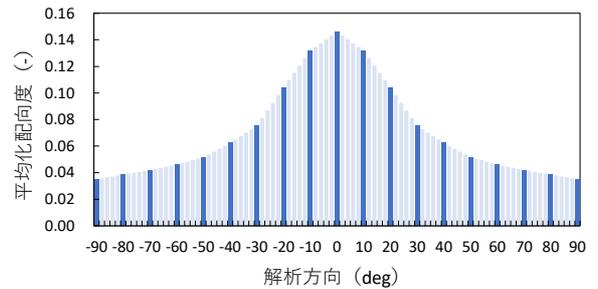


図4 繊維配向分布

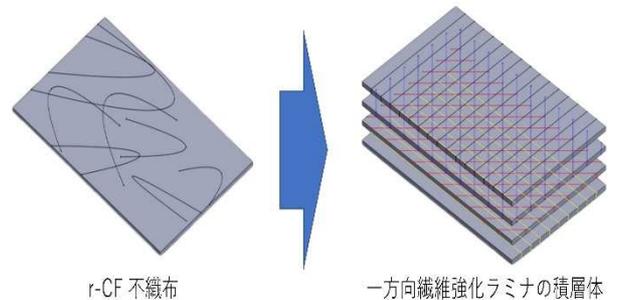


図5 Laminate Analogy

(4) Laminate Analogy

前川らは繊維配向分布を持つ繊維強化複合材料の変形挙動を解析するため、試験片を一方向に強化したラミナの積層体だと仮定した⁸⁾。本研究ではこの理論を **Laminate Analogy** と呼び、r-CF 不織布を解析方向に強化したラミナの積層体とみなすことで **Laminate Analogy** を適用した。各ラミナの引張方向に寄与する弾性率の総和が解析サンプルの弾性率になると仮定し、取得した配向分布を配向度の総和で割り正規化し、各ラミナの枚数とした。図5に **Laminate Analogy** の考え方を示す。

(5) 弾性率予測

Laminate Analogy に対して直交異方性弾性論を適用し、剛性マトリックスより弾性率予測を行った。ここで表1に森脇が行った r-CFRP の平均引張試験結果³⁾を示し、本論文の弾性率予測値と比較する。

表1 r-CFRP の平均引張試験結果

引張方向	0°	15°	45°	90°
弾性率 (GPa)	19.2	18.5	13.3	8.3

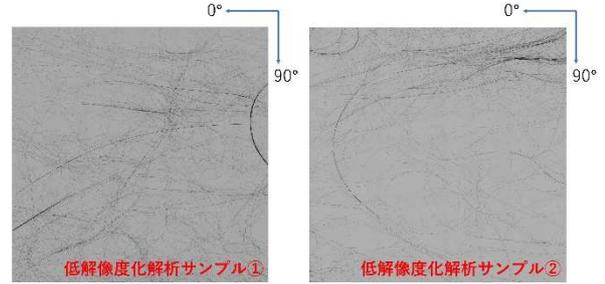


図6 低解像度化使用した解析サンプル

$$\{Q'\} = [B_{kl}]\{Q\} \quad (k = 1, \dots, 6 \quad l = 1, \dots, 4) \quad (6)$$

$$[B_{kl}] = \begin{bmatrix} m^4 & n^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ n^4 & m^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & m^4 + n^4 & -4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & -2m^2n^2 & (m^2 - n^2)^2 \\ m^3n & -m^3n & mn^2 - m^2n & 2(mn^2 - m^2n) \\ nm^3 & -nm^3 & m^2n - mn^2 & 2(m^2n - mn^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{Q\} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{(1 - \nu_x \nu_y)} & \frac{\nu_x E_y}{(1 - \nu_x \nu_y)} & 0 \\ \frac{\nu_y E_x}{(1 - \nu_x \nu_y)} & \frac{E_y}{(1 - \nu_x \nu_y)} & 0 \\ 0 & 0 & E_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_{kl} = \int_{\theta_a}^{\theta_b} g(\theta) B_{kl} d\theta \quad (9)$$

$$\{\bar{Q}\} = [A_{kl}]\{Q\} \quad (10)$$

ここで $\{Q'\}$ と $\{Q\}$ はそれぞれ一方向ラミナの軸外剛性マトリックスと剛性マトリックスである。また $m = \cos \theta$ 、 $n = \sin \theta$ であり E_x 、 E_y は x, y 方向の縦弾性係数、 E_s は $x-y$ 平面の横弾性係数、 ν_x 、 ν_y は平面のポアソン比であり、 $\frac{\nu_x}{E_x} = \frac{\nu_y}{E_y}$ を満たす。 $g(\theta)$ は、配向度であり、 $\theta_a \sim \theta_b$ は配向解析方向を示し、 $\{\bar{Q}\}$ は弾性率である。

3. 低解像度化

(1) 解析画像の準備

a) 不織布サンプル

解析サンプルを図6に示す。サンプル作製には東レ T800S 繊維を 80 mm にカットしたものを実際のリサイクル法と同様に常圧溶解法、カード機によるカーディング、乾式成形により乾式炭素繊維不織布とし、その不織布作製過程で約 40 mm 角の範囲を取り出し製作した。

b) 観察装置

不織布サンプルの画像化には、顕微鏡とス

表2 シグモイド関数の適用範囲

画像化方法	顕微鏡	スキャナ
下限値(l_c)	15 [pixel]	13 [pixel]
上限値	62 [pixel]	57 [pixel]
($d / \sin \theta$)		

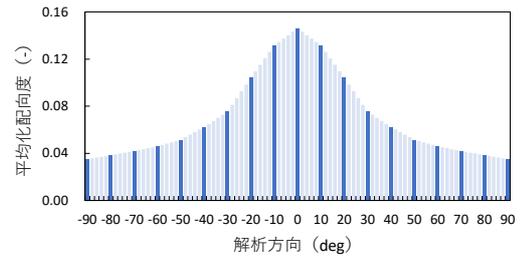


図7 顕微鏡画像 (4.55μm/pixel) の配向分布

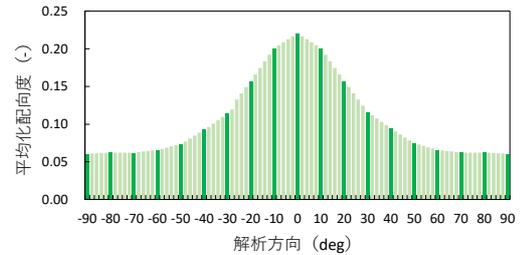


図8 低解像度化画像 (21μm/pixel) の配向分布

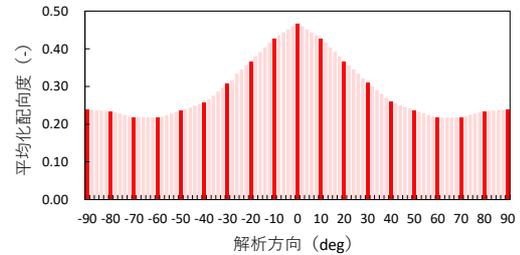


図9 スキャナ画像 (約21μm/pixel) の配向分布

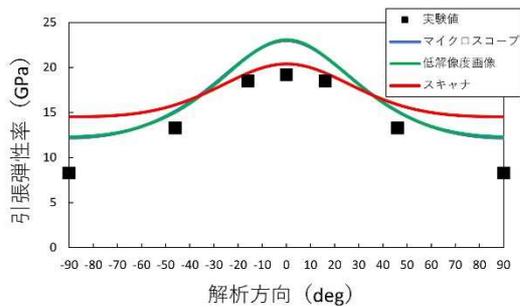


図 10 弾性率予測値の比較

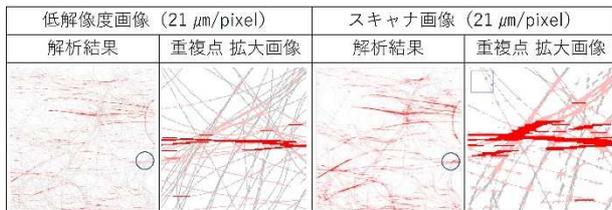


図 11 繊維の重複点の違い

スキャナの 2 手法を用いた³⁾。なお、使用したマイクروسコープとスキャナはそれぞれ KEYENCE 製デジタルマイクروسコープ VHX-5000 と EPSON 製フラッドヘッドスキャナ GT-980 である。解像度はそれぞれ 4.55 μm/pixel と約 21 μm/pixel だった。撮影時にはマイクروسコープはバックライトを当て、撮影範囲を 40 mm 角とし、拡大倍率 50 倍として撮影した。同様にスキャナも撮影範囲を 40 mm 角とし、反射板を取り除いて撮影した。

c) 解析画像

解析画像は画像処理ソフト ImageJ(Ver.1.53f)の Threshold 機能を用いて解析画像のサイズ調整及び画像の二値化を行った。二値化に用いた閾値は各サンプル画像内の繊維の重複点を除く任意の箇所における繊維と背景の境界の画素値を 1 つの解析画像につき 2 点、合計 18 点の平均より導出した。

また画像の低解像度化には、マイクروسコープで撮影した解析画像(解像度: 4.55 μm/pixel)を ImageJ の Resize 機能で、スキャナで撮影した解析画像(解像度: 約 21 μm/pixel)と同等の解像度に揃えた。

(2) 解析条件

マイクروسコープとスキャナの解像度の違いより、シグモイド関数の適用範囲がマイクروسコープとスキャナで異なる。表 2 にシグモイド関数の適用範囲を示す。

(3) 解析結果

Sample1,2 の解析結果を平均した。図 7~10 にマイクروسコープで撮影した解析画像(解像度: 4.55 μm/pixel)及びスキャナで撮影した画像(解像度: 約 21 μm/pixel)、低解像度化したマイクروسコープ画像(解像度: 21 μm/pixel)の平均化繊維配向分布及び弾性率予測の比較を示す。

繊維配向分布を見ると、スキャナ画像の配向度がマイクروسコープで画像化した 2 つよりも 0°方向で約 2 倍、

90°方向で約 4 倍多く過剰検出されたことが分かる。ここで、図 11 に低解像度化画像とスキャナ画像の行方向解析結果と画像内同箇所における繊維の重複点の拡大図を示す。なお赤色に染色した地点は重み関数適用範囲の繊維長よりも長く解析方向に対して完全に配向している繊維を、ピンク色は重み関数適用範囲内の繊維長を、灰色は力学特性に寄与しない繊維を示している。

図 11 より繊維と繊維の重複点が団子状になっていることが分かる。また重複点の他に繊維と繊維の隙間が識別できなくなり、本来繊維ではない箇所も繊維が存在していると認識されていた。故にスキャナ画像の配向度が高くなってしまった。

一方で、マイクروسコープ画像と低解像度画像の配向分布を比較すると低解像度画像が全体的に約 1.5 倍多く検出された。だがスキャナ画像のような 90°方向付近の異常な配向度の上昇は見られなかった。これは図 11 のような画像の低解像度化に伴う繊維の重複点の発生が少なかったためだと考える。

弾性率予測を見ると全ての予測値が実験値を上回っている。更にスキャナ画像の予測値では解析方向の変動に伴う弾性率の減少が緩やかだった。この現象にも重複点の影響は大きく、90°方向付近における配向度の上昇が配向度の総和を上昇させ、0°方向における正規化結果を減少させたため 0°方向の弾性率予測値が低く予測された。

故に繊維の重複点を減らし、配向度の過剰検出を抑えることで繊維配向解析範囲を拡張し、広範囲画像を対象にした繊維配向解析も可能だと考えられる。

4. 広範囲画像への適用

(1) 解析画像

解析サンプルと二値化後の解析画像を図 12 に示す。この解析サンプルは 3 章と同様の乾式炭素繊維不織布より約 150 mm 角の範囲を取り出し、3 章と同じ解像度のスキャナで画像化した。だが広範囲を低解像度で撮影した影響もあり、3 章で示した手法による二値化の閾値設定が困難だった。よって Threshold で確認できる画像内の各画素値の存在確率を示したヒストグラム(繊維ヒストグラム)から閾値を設定した。ここで解析サンプルの繊維ヒストグラム及び閾値地点を図 13 に示す。横軸は輝度値で、0 が図 12 における黒、255 が白をそれぞれ表している。サンプル内全ての繊維を解析対象とするために、背景色のピークより下の輝度値を閾値とした。

(2) 解析結果

広範囲画像の行方向解析結果、繊維配向分布、弾性率予測分布を図 14~16 に示す。弾性率の比較対象は実験値と低解像度画像の弾性率予測値とし、目安値とする。図 14 より繊維の大半が赤く染色していた。更に繊維と繊維の隙間が完全に消滅し 1 つの塊(繊維塊)となって検出され、繊維の過剰検出が確認できた。図 15,16 は 90°方向に

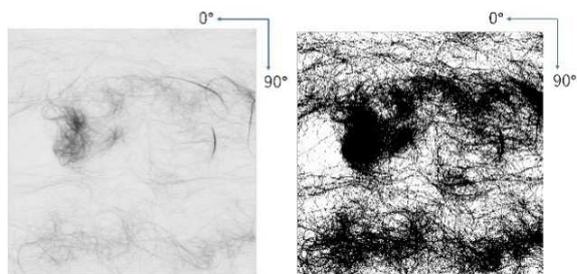


図 12 広範囲画像の解析サンプル及び解析用画像



図 13 解析用画像の繊維ヒストグラムと閾値

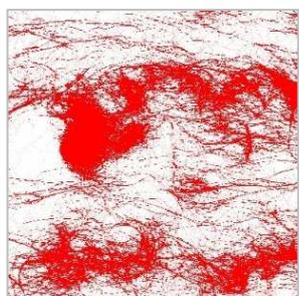


図 14 行方向解析結果

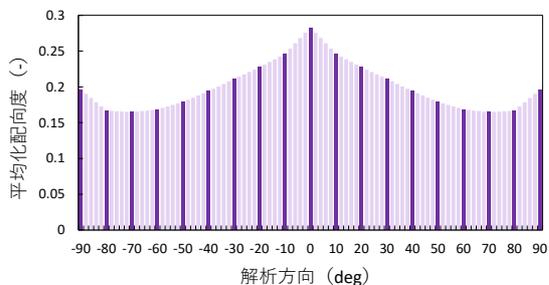


図 15 繊維配向分布

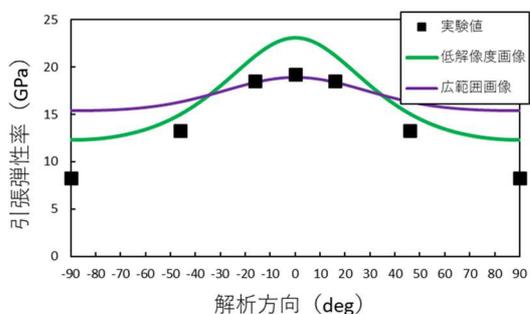


図 16 弾性率予測値の比較

除去レベル	4	3	2	1	0
除去後の繊維面積	714755	942193	1659476	1730984	2184102
除去対象の塊除去レベル0は"塊除去法"全体で除去する部分					
塊除去後の解析画像					

図 17 塊除去画像

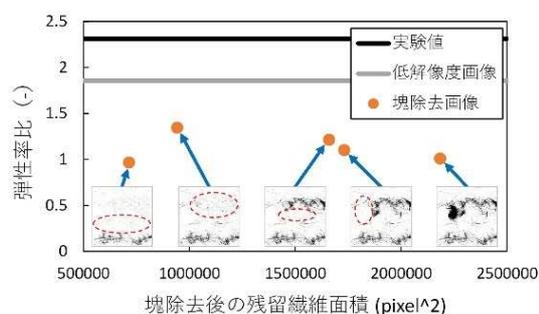


図 18 弾性率比の比較

ピークが表れてしまい、これは 3 章と同様に繊維の過剰検出によるものと考えられる。

図 16 より広範囲画像では実験値の 0°方向弾性率と同等の予測値が得られた。しかし、低解像度画像では実験値と似た弾性率の減少傾向が表現できているが、広範囲画像では再現できていない。ラミナは連続繊維であるため弾性率は高く予測されるはずである。故に広範囲画像の弾性率予測結果は正確でないと考えられる。これは 90°方向の配向度を多く検出されたことで、配向分布が全体的になだらかになり、それに伴い弾性率予測値もなだらかになり実験値の減少傾向が再現できなかったと考えられる。この広範囲画像において繊維塊が配向度と弾性率予測の両方に影響を及ぼしていることが分かった。

(3) 塊の影響

図 14 の上部や中央下部の塊以外の箇所は繊維の一本一本を解析することができていた。そこで、塊を除去して繊維一本一本に着目することで実験値に近づく予想した。

広範囲画像の繊維一本一本を解析する為に ImageJ の Image Calculator 機能で画像同士の引き算をして塊の除去をする (塊除去法)。また除去対象とする塊は Analyze Particle 機能で抜き出した。Analyze Particle は指定した面積 (pixel²) を持つ塊が画像内に存在する場合その塊のみを抜き出す。故に図 12 のように画像内の全ての繊維が 1 つの塊になっていると除去対象の塊を抜き出すことができない。よって閾値を図 13 のヒストグラムの山部分の開始地点に変更し、除去対象の塊の抽出を可能にした。そして本研究では除去対象の塊を 4 段階に分けて除去し、除去面積毎の弾性率比を比較した。ここで図 17 に塊除去法で作成した解析画像 (塊除去画像) を示し、図 18 に塊除去画像の弾性率比を示し、実験値と低解像度画像の弾性

率比と比較した。

図 18 より繊維塊を除去していくにつれて弾性率比が実験値に近づいていた。しかし最も繊維を取り除いた除去レベル 4 の弾性率比は低下し、除去レベル 0 の元画像の弾性率比よりも低くなった。また除去レベル 4 では繊維塊に加え、付近の繊維も除去していた。よって本繊維配向解析手法において大きく悪影響を及ぼすのは繊維塊の部分であり、繊維塊以外に着目することでより実験値に近い弾性率予測ができると考えた。

5. 低解像度画像を用いた配向解析手法の開発

(1) 解析画像

本章では全 24 種の解析サンプルを扱った。図 19 に解析サンプルの全 24 種のうち、大きな繊維塊を持つ例(画像 No.1)、0°方向に繊維長が長い繊維を多く持つ例(画像 No.5)、繊維配向方向に特徴がある例(画像 No.16)、繊維と繊維の重複点が多い例(画像 No.22)の 4 つを示す。これらも 3 章、4 章と同様に乾式炭素繊維不織布から取り出し、サンプルの大きさは 40 mm 角で、同じスキャナで画像化した。

なお繊維塊を持つ画像かどうかは解析画像全体の面積における画像内の繊維全体の面積比で判断する。図 20 に全サンプルの繊維面積比を示す。40 %以上の面積を持つ解析サンプルを、繊維塊を持つサンプルとした。

画像の二値化は 4 章と同様に ImageJ で繊維ヒストグラムから行った。図 21 に画像 No.1 の繊維ヒストグラムを示す。背景色のピークより下の輝度値(図 21 の赤線)に加え、繊維が多く含まれる部分だけに着目し、ヒストグラムの山部分の開始地点(図 21 の青線)でも二値化を行った。赤線を閾値とした二値化結果例を図 22(a)、青線を閾値とした結果を図 22(b)に示し、それぞれを全体画像と繊維束画像とする。

また、前章より繊維塊の除去が弾性率予測結果の精度向上に繋がるのが分かった。しかし、いきなり塊除去法を適用すると、画像内全ての繊維を 1 つの塊として除去してしまう。よってまず全体画像から繊維束画像を除去し、繊維塊の輪郭を明確にしてから塊除去法を適用した。全体画像から繊維束画像を除去した結果例を図 22(c)に示す。図 22(c)に塊除去法を適用した結果例を図 22(d)に示し、それぞれ引き算画像、塊除去画像とした。

(2) 解析結果

解析結果は 4 つのグループに分けられた。図 23~26 に各グループ 1 個ずつ解析結果から求めた弾性率比を実験値、低解像度画像(目安値)と比較して示す。

第 1 のグループは図 23 に示すように、塊除去法によって弾性率予測値が実験値もしくは目安値に近づく特徴を有し、全体の 割りがこれに該当した。第 2 グループは図 24 に示すように、引き算画像及び塊除去画像の弾性率比が実験値よりも 10 %以上高く予測される特徴を有す。第 3 グループは図 25 に示すように、引き算画像及び塊除

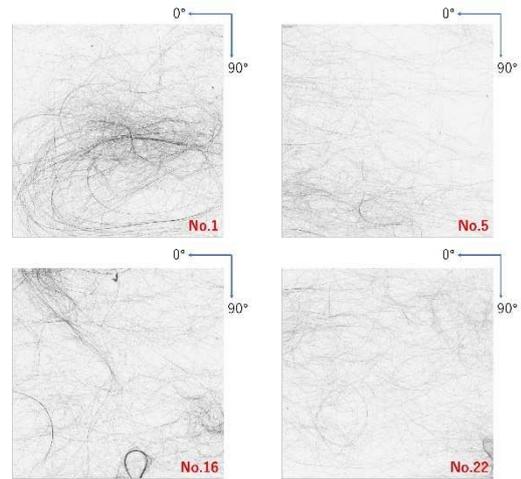


図 19 解析サンプル

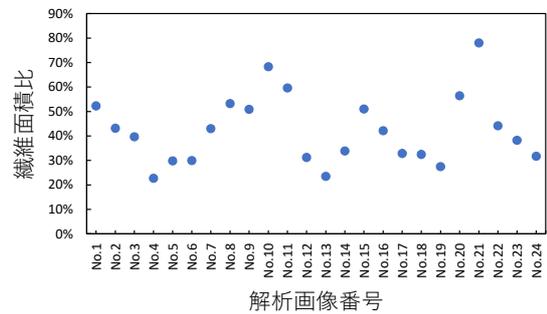


図 20 画像全体に対する繊維全体の面積割合

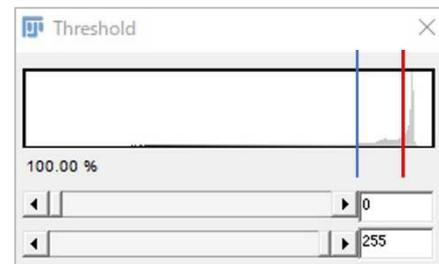
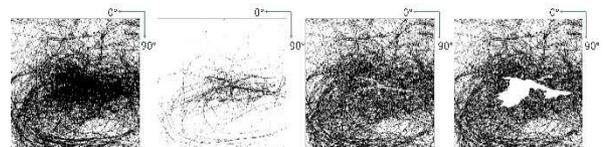


図 21 一般的な繊維ヒストグラム



(a)全体画像(b)繊維束画像(c)引き算画像(d)塊除去画像

図 22 画像 No.1 の解析画像

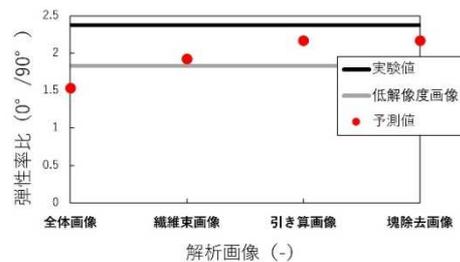


図 23 第 1 グループの弾性率比 (画像 No.22)

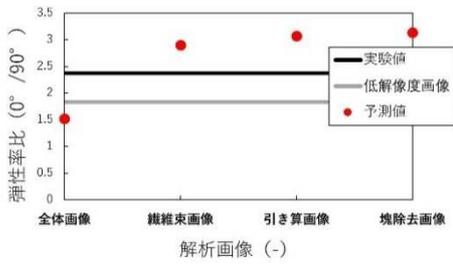


図 24 第 2 グループの弾性率比 (画像 No.5)

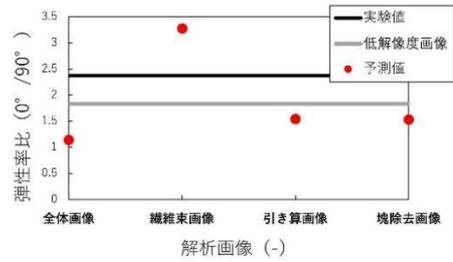


図 25 第 3 グループの弾性率比 (画像 No.1)

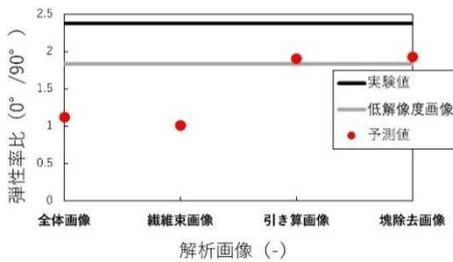


図 26 第 4 グループの弾性率比 (画像 No.16)

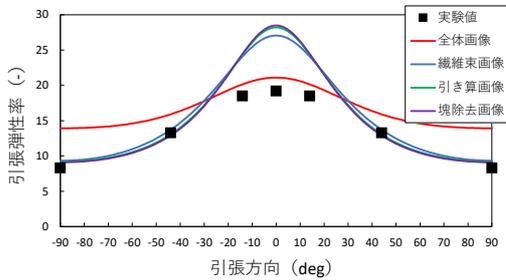


図 27 画像 No.5 の弾性率予測分布

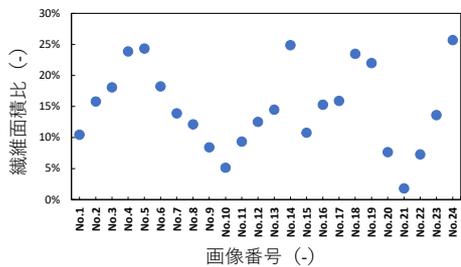
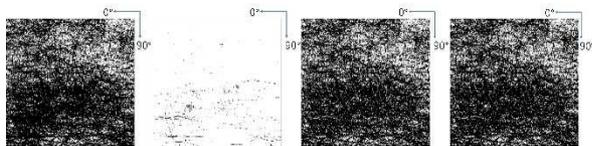


図 28 全体画像に対する繊維束画像の画素の割合



(a)全体画像(b)繊維束画像(c)引き算画像(d)塊除去画像

図 29 画像 No.21 の解析画像

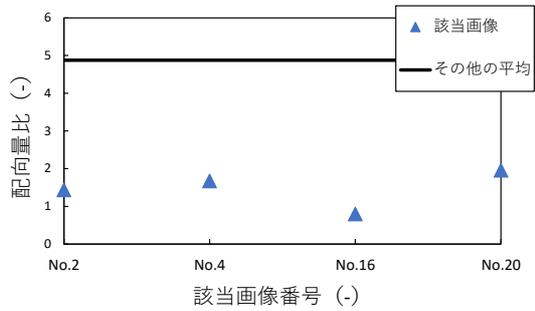


図 30 第 4 グループに該当するサンプルの配向量比

去画像の弾性率比が目安値よりも 10%以上低く予測される特徴を有す. 第 4 グループは図 26 に示すように, 全体画像と繊維束画像の弾性率比が低いにもかかわらず引き算画像及び目安値に近い値で予測される特徴を有す.

第 2 グループに該当するサンプルは 0°方向に配向する繊維長の長い繊維を多く含んでいた. ここで, 画像 No.5 の弾性率分布予測分布を図 27 に示す. 図 27 より 0°方向に対して弾性率予測値が多く検出されていた. また図 20 より画像 No.5 が塊を持たないサンプルだったことから塊除去法によって, より 0°方向へ配向する繊維の影響を受け実験値よりも 10%以上高く予測されたと考えられる.

第 3 グループに該当するサンプルは, 解析画像の全体に大きな塊を持つ. 該当した No.1,10,21 の繊維面積比はそれぞれ 52%と 68%と 78%であった. 前章より繊維塊が存在すると 90°方向に繊維が過剰に検出され, 繊維配向分布及び弾性率予測分布の減少傾向が緩やかになっていた. ここで図 28 に全体画像に含まれる画素に対する繊維束画像に含まれる画素の割合を示す. 画像 No.21 のみ他の画像とは異なり, 繊維束画像に含まれる画素が全体画像の 2%と極めて少なかった. 更に図 29(a),(b),(c),(d)に画像 No.21 の全体画像, 繊維束画像, 引き算画像, 塊除去画像を示す. 画像 No.21 では繊維束画像で扱う繊維量が極めて少ないため, 引き算画像及び塊除去画像が全体画像とほとんど変化が表れなかった. よって引き算画像及び塊除去画像の弾性率比が目安値よりも 10%以上低く予測されたと考えられる.

第 4 グループに該当するサンプルは 90°方向に配向する繊維が顕著に多かった. 図 30 に第 4 グループに該当した画像 No.2,4,16,20 の 0°方向と 90°方向の配向量の比 (0°/90°) とその他のサンプルの平均を示す. 図 30 より該当する画像は配向方向が 90°方向の繊維が多いことが分かる. 前章より 90°方向付近に配向する繊維が多いと弾性率比は低くなる. したがって全体画像と繊維束画像の弾性率比が目安値より 10%異教低くなったと考えられる. 繊維束画像にも 90°方向付近に配向する繊維があったため, 繊維束を除去することで繊維塊を効果的に除去することができた. よって引き算画像及び塊除去画像の弾性率比が目安値に近い値で予測できたと考えられる.

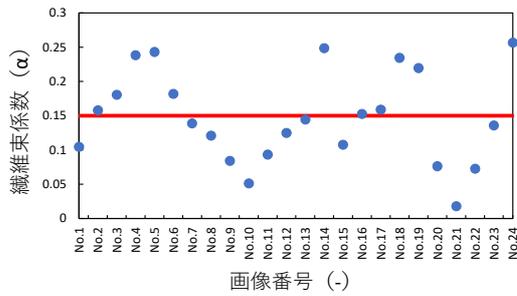


図 31 繊維束係数 (α)

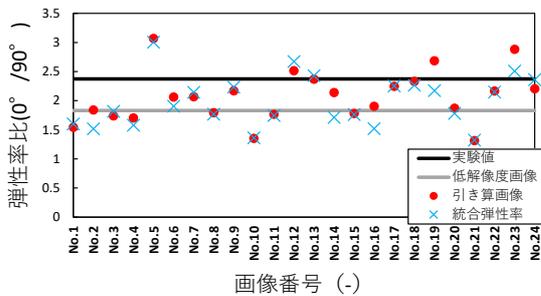


図 32 統合弾性率 $E_{int}(\theta)$

(3) 弾性率予測値の平均化

引き算画像と塊除去画像では、含まれるすべての繊維を評価できていない。解析画像全体を評価したとみなすために、除去した繊維束画像の解析結果を使用して重みづけすることを考えた。式(11)に示すように、繊維束係数 (α) を用いて、繊維束画像から得られた弾性率 $E_b(\theta)$ と引き算画像の弾性率 $E_c(\theta)$ を足し合わせ、統合弾性率 $E_{int}(\theta)$ を求めた。なお、塊除去画像の予測値は引き算画像との誤差が 10 %以下だったため引き算画像の予測値に近似した。

$$E_{int}(\theta) = (E_b(\theta) \times \alpha) + (E_c(\theta) \times (1 - \alpha)) \quad (11)$$

繊維束係数 (α) を求めるために、繊維束画像と引き算画像に含まれる画素の割合を求めた。図 31 に各解析画像の繊維束画像の画素数を引き算画像の画素数で除した値を示す。図 31 に示すように平均が約 0.15 になったため、 α を 0.15 と仮定した。

統合弾性率の算出結果を図 32 に示す。引き算画像の弾性率予測と比較すると画像 No.2,14,16,19,23 では 10 %以上の誤差が生じてしまった。だが実験値及び目安値と比較すると、全体的にばらつきの少ない弾性率予測値が得られた。また目安値よりも 10 %以上低く予測されたのは画像 No.1,2,4,10,16,21 であり、これは弾性率予測結果の第 3,4 グループに該当する。故に配向分布及び弾性率予測に悪影響を及ぼす繊維塊と繊維配向方向の影響を識別した。

(4) 開発した解析手法

本論文で開発した繊維配向解析手法は解析サンプルを画像化し、解析画像内の繊維を含んだ連続する画素から配向分布を取得し、弾性率予測を行い実験値と比較して妥当性を検証するものである。解析画像は ImageJ で繊維

ヒストグラムから全体画像と繊維束画像の 2 種を作製し、塊除去法を適用して引き算画像を作製した。弾性率予測は Laminate Analogy と剛性マトリックスから算出し、繊維束係数 (α) を用いて統合弾性率 $E_{int}(\theta)$ とした。また画像化時の解像度が及ぼす繊維の過剰検出を考慮し、平均化弾性率比が実験値及び低解像度画像の 10 %以上の誤差を持つサンプルは妥当性が欠けるものとして扱う。

6. 結論

本研究では広範囲を対象にした繊維配向解析手法を開発することを目的として、解析画像の解像度・画像サイズ・画像内の繊維含有率や配向方向を変更し、繊維配向解析より繊維配向分布を取得した。取得した繊維配向分布から弾性率予測をし、実験値と比較することで本手法の妥当性を検証した。

画像の低解像度化より低解像度化に伴い解像度の影響で繊維の重複点が発生することが分かった。また繊維の重複点での配向度の過剰検出が起こり、繊維配向分布及び弾性率予測に悪影響を及ぼすことが分かった。

広範囲画像への適用からは繊維塊の存在が重複点と同様に繊維配向分布及び弾性率予測に悪影響を与えることを確認した。そこで塊除去法を用いたところ、弾性率予測が低解像度画像の値に近づいた。故に繊維塊を除去することで妥当性の高い弾性率予測が可能だと分かった。

繊維塊や配向方向など特徴のあるサンプルへの適用では塊除去法及び弾性率の統合化により実験値に近い弾性率予測値が得られた。更に配向分布及び弾性率予測に悪影響を及ぼす繊維塊と繊維配向方向の影響を識別した。以上より実験値と誤差 10 %程度の妥当性の高い繊維配向解析手法を確立した。

謝辞: 本研究で使用した不織布は日本毛織 (株) よりご提供いただきました。本研究を進めるにあたり、ご指導いただきました本学教員の東出真澄専任講師、JAXA 杉本直様、石田雄一様、佐藤光桜様に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 株式会社矢野経済研究所, リサイクル炭素繊維の利用・評価法等に関する国際動向調査, 2021 年
- 2) F. Meng. et al., Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol,100, pp. 206-214, 2017
- 3) 森脇嵩大, 2019 年度法政大学修士論文, 2020.
- 4) 前川善一郎, 繊維強化複合材料における繊維配向分布の表示法, 1990.
- 5) M. Kageyama et al., NDT and E International, 105 (2019), pp. 19-24
- 6) 前田洋志, 2021 年度法政大学卒業論文, 2022.
- 7) 張振也, 2017 年度法政大学卒業論文, 2018.
- 8) 前川善一郎, 繊維配向分布を考慮した繊維強化複合材料の剛性と変形の推定, 1990.