

原稿種類： 研究論文

題目： X線 CT画像を用いた CFRP 積層板の繊維方向測定

Measurement of Fiber Orientation in CFRP laminates by using X-ray computed tomography.

氏名： 吉村 彰記^{1,*}, 細谷 亮平², 小柳 潤^{3,*}, 小笠原 俊夫^{4,*} (* 正会員)

勤務先および職名：

¹ 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 航空本部 複合材技術研究センター・研究員
〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1

Researcher, Advanced Composite Research Center, Institute of Aeronautical Technology, Japan
Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, JAPAN

² 東京理科大学 大学院 基礎工学系研究科・大学院生

〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

Graduate student, Graduate School of Industrial Science and Technology, Tokyo University of
Science, 6-3-1 Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, JAPAN

³ 東京理科大学 基礎工学部 材料工学科・講師

〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

Junior Associate Professor, Department of Materials Science and Technology, Tokyo University
of Science, 6-3-1 Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, JAPAN

⁴ 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 航空本部 複合材技術研究センター・主幹研究員

〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1

Senior Researcher, Advanced Composite Research Center, Institute of Aeronautical Technology,
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015,
JAPAN

連絡先：

吉村彰記

〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1

宇宙航空研究開発機構調布航空宇宙センター飛行場分室

TEL : 050-3362-7349

FAX : 0422-40-3548

E-mail : yoshimura.akinori@jaxa.jp

使用ワープロソフト： Microsoft Word 2013

使用機種： Windows 7

別刷り希望部数： 50 部

邦文要旨

本研究では炭素繊維強化プラスチック(CFRP)中の繊維方向をX線CT画像から直接取得する方法を提案する。提案手法はX線CT画像の異なる断面間でデジタル画像相関法(DIC)を適用し、繊維と樹脂からなるパターンを追跡することで繊維方向を計算する。本研究では、擬似等方CFRP積層板を用いて提案手法の検証を行った。積層板をCTで撮影し、提案手法を用いて繊維方向を計算するとともに、同一試験片を樹脂埋めの上研磨し、顕微鏡写真を用いて繊維方向を実験的に取得した。提案手法によって取得した繊維方向と顕微鏡写真によって得られた繊維方向は非常によく合い、本手法によりCT画像から繊維方向を取得できることが示された。また、本研究では織物CFRP積層板を用いた検証も併せて実施し、断層画像に対し平行に近い繊維が存在する場合、およびCT画像の外周部では提案手法は正しい繊維方向を与えない可能性があることが分かった。

英文アブストラクト

In this paper a new method which measures fiber orientation in CFRP laminates from X-ray CT images is proposed. In the proposed method, fiber orientation is analyzed by applying digital image correlation method (DIC) to the acquired tomographic images. By using DIC, brightness pattern, which results from radiodensity difference between fiber and resin, is compared between two different planes in thickness direction. Then three dimensional displacement of brightness pattern, which indicates fiber orientation, can be measured. In this study, we applied the proposed method to a quasi-isotropic CFRP laminate. After X-ray CT imaging, the sample was sectioned and polished. Fiber orientation was then experimentally measured by using a microscope. Fiber orientation calculated by the proposed method agrees very well with experimentally measured one, and the validity of the proposed method was demonstrated. Additionally, we applied the proposed method to a plane-woven CFRP laminate. The result revealed that the invalid fiber orientation may be calculated for the fiber orientation is parallel to the plane of CT image, or for the fiber orientation is calculated using the pattern around the outer edge of CT images.

英文 Key words: CFRP, Fiber orientation, X-ray CT, Digital Image Correlation

1. 緒言

炭素繊維複合材料(CFPP)内部には、繊維のよれ、樹脂中のボイド、樹脂の未含浸領域等の微視的な欠陥が存在する。これらは製造時の熱残留応力¹⁾や樹脂含浸不良等、様々な要因によって引き起こされる。近年、真空樹脂含浸法(VaRTM)や、Out-of-Autoclave(OoA)プリプレグを用いたオープン成型等の低コスト成形法を、航空宇宙構造をはじめとした高品質が要求される部材へも適用する動きが進んでいる。これらの低コスト成形法では微小欠陥が既存のオートクレーブ成形法より生じやすい。このため、これら微小欠陥を観察し、またそのミクロな欠陥が材料のマクロな力学特性に及ぼす影響を正確に評価する方法が重要である。微小欠陥が材料特性に及ぼす影響を解析する方法の一つとして、X線CTを用いて実際に製作された部材の断層画像を撮影し、これらを積層して微小欠陥を反映した3次元有限要素モデルを作成・解析する方法が有効である。

CFRPには材料特性の著しい異方性があり、繊維の配向方向とその直交方向では材料特性が大きく異なる。このため、モデルを作成する際には繊維方向をX線CT像から取得し、モデルに反映することが不可欠である。これまで、GFRPについては、繊維方向を反映した3次元モデルの製作に成功した例がある²⁾。しかし、CFRPの場合、炭素繊維と樹脂のX線吸収特性が近いいため断層画像上でコントラストがつきにくく、画像上で繊維方向を判別することが難しい。このため、CFRPについては繊維方向を反映した3次元モデルの製作に成功した例はこれまでに無い。炭素繊維に造影剤を浸透させたり、炭素繊維にめっきを施すなど、炭素繊維と樹脂のコントラストを改善させ、繊維方向を取得した研究例は存在する³⁻⁶⁾。しかし、これらのコントラスト改善手法自体が繊維よれやボイドなどの微小欠陥の形成に影響を与えてしまう可能性があり、モデル作成には適しない。また、加速器による放射光を線源に用いた放射光CT(SRCT)による高解像度で鮮明な断面画像を取得し、ボイドの損傷への影響を評価した例が存在する⁷⁾。この手法によれば、炭

素繊維と樹脂を識別できる可能性があるが，加速器自体の入手，使用が容易ではないため，より簡便で実用的な手法が必要である．

そこで，本研究ではデジタル画像相関法(DIC)を用いてX線CT画像よりCFRP内の繊維方向を直接取得する手法を提案する．本論文は以下のように構成される．第2節では提案する新規手法の概要を述べる．第3節ではCFRP積層板を対象として，提案手法の妥当性を検証する．また，これと併せ，得られた繊維方向の分布について統計的評価を行う．さらに，第4節では織物CFRP積層板を対象として，本手法の問題点について述べる．最後に第5節で本論文の結論をまとめる．

2. 解析手法

先述のように炭素繊維と樹脂のX線吸収特性が近い
ため，CT画像上で十分なコントラストを得ることができ
ず，樹脂と繊維を二値化して識別することは困難である．
このため本研究では繊維と樹脂を明度によって識別する
のではなく，繊維と樹脂の配置によって発生するCT画

像上の明度のパターンを追跡する手法を取ることにした。
本手法の概略図を Fig.1 に示す。

本手法では CT 画像同士を異なる断面間で比較し、サブセット内の明度のパターンが共通する領域を探索する。つまり、2 断面の CT 画像を変形前後の材料表面と見立てて、画像相関法を適用し、平面内のサブセットの変位、この場合明度パターンの変位量を計算する。このときの画像上の平面方向の移動ベクトルを (a, c) 、断面間の距離を b とすれば、3 次元的な繊維の方向ベクトルを (a, b, c) と算出することができる。なお、本手法では CT 画像上の明度のパターンを追跡できれば良いため、炭素繊維と樹脂の間にある程度のコントラストがあればよく、現在市場で入手可能な X 線 CT 装置で十分に実現可能な手法である。また、本手法では異なる 2 断面を変形前後と見立てて DIC を適用するため、2 断面間で輝度値分布に DIC 法で追跡可能な程度の相関性が保たれている必要がある。このため比較する両断面間の距離は近くなければならないことに注意を要する。

3.手法の検証

3.1 実験方法

前節で提案した手法の検証のため，CFRP積層板を用いて繊維方向の測定を実施した．用意したCFRP積層板は東レ(株)製のT800S/#3900-2Bプリプレグを用いた，積層構成 $[45/0/-45/90]_{4s}$ の擬似等方積層板である．これを約 $2\text{mm}\times 2\text{mm}\times 6\text{mm}$ に切り出して供試体とした．供試体をX線CT装置にかけ，積層方向に垂直な断層画像を取得した．本研究で用いたX線CT装置はCarl Zeiss AG.製のXradia MicroXCT-200である．撮影条件は管電圧が 20kV ，管電流が $196\mu\text{A}$ で刻み角を 0.056° とし，一枚当たりの露光時間 5s で撮影を行った．さらに得られたCT画像をVolume Graphics GmbH.製VGStudio MAX 2.2を用いて再構成し，繊維方向に対して垂直な断面の画像を得た．このとき，得られた画像の解像度は1ピクセルあたり $2.91\mu\text{m}$ であった，得られた画像の一例をFig.2に示す．

異なる断面画像の明度の相関を画像相関法により計算し前節で述べた手法を用いて繊維方向を取得した．このとき，画像相関法の計算に用いたサブセットの大きさは $17\text{ピクセル}\times 17\text{ピクセル}$ であり，相関計算は各サブセットの中心を10ピクセルごとにステップさせつつ実施した．画像間の相関計算には米山ら⁸⁾の開発した画像相関法のプログラムを使用した．また，相関計算は再構成されたCT画像10枚おきにノミナルの繊維方向が 45° ， -45°

の層に対して実施した。

さらに，CT撮影後の供試体を樹脂埋めした後，研磨し，板厚方向に対して垂直な断面の光学顕微鏡写真を撮影した。この顕微鏡写真を用いて実験的に繊維方向を取得し，提案手法によって計算された繊維方向と比較することにより，手法の妥当性検証を行った。

3.2 結果および考察

繊維方向を顕微鏡写真と比較した断面は Fig.2 中に示す断面 a，断面 b とした。周辺の拡大図を Fig.3 に示す。この断面画像の 1 ピクセルあたりのサイズは $2.91\mu\text{m}$ ，Fig.2(a)，(b)の断面間距離は画像 10 枚おきに選定したものであるため $29.1\mu\text{m}$ であった。

断面 a，b について，計算により得られた 3 次元的な繊維方向を板厚方向に対し垂直な面に投影した図を Figs.4, 5 にそれぞれ示す。また，Figs.4, 5 には対応する平面の顕微鏡写真を合わせて示した。計算結果においてベクトルの存在しない点は繊維が非常に少ない，あるいは繊維断面からなるパターンが存在しないかランダム性がなく探索不可能な部分である。計算により得られた繊維方向ベクトルと光学顕微鏡像を重ね合わせたものを Figs.6, 7 に示す。Figs.6, 7 より，探索不可能な部分を除けば，計算した繊維方向ベクトルと繊維方向が一致していることから，繊維方向が定性的には正しく計算できて

いることがわかる。なお，CT画像と光学顕微鏡写真では試験片が同じ角度で写っておらず，回転しているため，重ね合わせる際には顕微鏡写真を断面 a で約 3° ，断面 b で約 2° 回転させた。

提案手法によって得られた繊維方向および顕微鏡写真から測定した繊維方向の平均値，標準偏差を Table 1 に示す。Table 1 から平均値に差があることがわかるが，この差は光学顕微鏡像とベクトル図を重ね合わせた際に回転させた角度とほぼ等しく，特に断面 b については標準偏差がほぼ一致する。これより，この平均値の差は CT 撮影時と光学顕微鏡写真撮影時の供試体の剛体回転とみなせる。以上のことから本実験では CT 画像のみから直接 CFRP 積層板の繊維方向が取得できたと言える。

3.3 繊維方向分布の統計的評価

前節で検証した断面 b において繊維方向分布の統計的な評価を行うために，測定点を約 2600 点とし，繊維方向を計算した。その分布を Fig. 8 に示す。Fig. 8 内の曲線は，計算により得られた平均値，標準偏差を用いた正規分布の確率密度関数である。ヒストグラムの形が正規分布に沿っているように見えるため，繊維方向の分布の検定を行った。

検定の手法にはノンパラメトリック手法である 1 標本のコルモゴロフ・スミルノフ検定を用いた。この検定手

法では累積相対度数の比較により，理論分布への適合度を検定することができる．帰無仮説を「繊維の角度の理論比が正規分布の理論比である」，対立仮説を「繊維の角度の理論比が正規分布の理論比とは異なる」とし有意水準 5%で両側検定を行った．

累積相対度数の結果を Table2 に示す．コルモゴロフ・スミルノフ検定では，累積相対度数の差の絶対値の最大値を検定統計量とするため，この場合検定統計量 $d_{max}=0.1814$ となる．有意水準 $\alpha=0.05$ の場合の棄却限界値の近似値は 0.0267 である．したがって，検定統計量 > 棄却限定値となるため，帰無仮説を棄却する．つまり，本手法を用いて測定された断面 b における繊維方向は正規分布していないという結果が得られた．

4.本手法の問題点

4.1.実験方法

第 3 節では，繊維方向に対し垂直な断面に対して画像相関法を適用することにより繊維方向を取得した．本節では断面に平行な繊維が存在する場合の繊維方向測定を試みる．用意した CFRP は東邦テナックス(株)製 IMS60/#133 の 3K 平織プリプレグを 12 層積層した織物 CFRP 積層板で，板厚は約 2mm である．これを約 5.0×5.0mm に切り出

し，供試体とした．X線CT装置を用いて，この供試体の板厚方向に垂直な断面画像を取得した．撮影条件は管電圧が40kV，管電流が200 μ Aで刻み角0.113 $^{\circ}$ とし，一枚当たりの露光時間15sで撮影を行った．このとき，得られた画像の解像度は1ピクセルあたり1.77 μ mであった．X線CTで得られた断面画像をFig.9(a)，(b)に示す．異なる断面画像の明度の相関を画像相関法により計算し繊維方向を取得した．画像相関法の計算に用いたサブセットの大きさは32ピクセル \times 32ピクセルであり，相関計算は各サブセットを50%ずつオーバーラップさせつつ実施した．画像間の相関計算にはLaVision GMBH.製のひずみ解析ソフトウェア，StrainMaster 8.1.2を用いた．

CT撮影後の供試体を樹脂埋めした後，研磨し，光学顕微鏡を用いて断面観察を行った．これにより計算を行った断面と同一断面の繊維方向を実験的に取得した．この測定結果と画像相関法による結果を比較した．

4.2 結果および考察

得られたCT画像であるFig.9(a)，(b)の断面間距離は1.77 μ mであった．Fig.10に繊維方向を計算し，平面に

投影したものを示す。さらに Fig.11 に計算した繊維方向と、光学顕微鏡で撮影した断面画像を重ね合わせたものを示す。この Fig.10 より、樹脂リッチ部はベクトルが小さく繊維とは分離できているが、繊維束内には繊維方向が正しく計算できていない部分があることがわかる。繊維方向が正しく計算できているのは CT 画像中において繊維の断面からなるパターンが見える部分である。しかし、断面に対して繊維が平行に近い部分や、外周部においては、計算結果は実際の繊維方向とは異なる結果となっている。良好な計算結果が得られない原因に明度パターンの追跡に用いたアルゴリズムが考えられる。画像相関法のアルゴリズムは本来、物体表面のランダムパターンの変位を追跡するものである。そのため、前提としてパターンが消滅することは考えられていない。本手法では繊維と樹脂の配置からなるパターンを物体表面のランダムパターンに見立て、異なる断面画像を変形前後の物体表面の画像に代えて用いることで繊維方向を計算している。このため、断面に対して平行な繊維が存在する場合、2枚の断面画像内に同一の繊維が存在していない場合がある。あるいは外周部では CT 画像の視野範囲外へパターンが移動する場合がある。以上のような場合に本手法は正しく繊維方向を得ることができないと考えられる。

したがって、本手法を用いる際には、断層画像の外周

部を計算に用いてはならないことがわかる。また，断層画像の方向は，繊維方向を取得したい繊維の断面が観察できるように選ぶ必要がある。なお，断層画像の方向については，同一の試験片に対して複数の方向からの断層画像を用いることができれば，どの方向の繊維が存在しても繊維方向を取得可能と考えられる。

5. 結言

本研究では画像相関法を用いて得られた断面画像からCFRP内の繊維方向を算出する方法を提案し，擬似等方積層板を用いてこれを検証した。本手法は異なる断面間での明度パターンを追跡する方法によっており，本手法を用いればX線CT画像のみからCFRPの繊維方向およびその分布を3次元的に取得可能である。また，織物積層板を用いた実験からは，本手法において，画像相関法の原理から断面に対し平行な繊維を含む部分や視野の外周部では正しい繊維方向を取得することができないことがわかった。これを避けるためには，CT画像の外周部を計算に用いないようにし，さらに測定したい方向の繊維の断面が観察できるように断層方向を選ばなければならない。断層方向については，同一試験片に対し複数の異なる角度からの断層画像を撮影し，繊維方向測定に用いられれば，積層板中のすべての繊維方向を取得可能と考えられる。

謝 辞

本研究で用いた画像相関法のプログラムは青山学院大学
理工学部 米山聡准教授にご提供いただいたものであり、
ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sorrentino, L., Polini, W., Bellini, C.: Adv Compos Mater, 23, (2014), 225-238
- 2) Schell, J.S.U., Renggli, M., van Lenthe, G.H., Müller, R., Ermanni, P : Compos Sci Technol,66,(2006),2016-2022
- 3) Djukic LP, Herszberg I, Walsh WR, Schoeppner GA, Prusty BG, Kelly DW : Compos Part A,40,(2009),553-565
- 4) Djukic LP, Herszberg I, Walsh WR, Schoeppner GA, Prusty BG, Kelly DW : Compos Part A 40,(2009),1870-1879
- 5) Djukic LP, Herszberg I, Walsh WR, Schoeppner GA, Prusty BG, Kelly DW : Appl Compos Mater 20,(2013),1215-1230
- 6) 飯田あずさ,岡本和明,伊藤清治,今祐介,島本太介,堀田裕司 : JCCM-5(2013)
- 7) A. E. Scott, I. Sinclair, S. M. Spearing, M.N. Mavrogordato, W. Hepples: Compos Sci Technol 90,(2014), 147-153
- 8) 米山聡 : 非破壊検査 59,7,(2010),306-310

図表の題名

Fig.1 Schematic of the concept of the proposed method.

Fig.2 X-ray CT images.

Fig.3 Magnified view.

Fig.4 Comparison of fiber orientations on section "a".

Fig.5 Comparison of fiber orientations on section "b".

Fig.6 Section superposed by fiber orientation in section "a".

Fig.7 Section superposed by fiber orientation in section "b".

Fig.8 Comparison between histogram of fiber orientation and normal distribution.

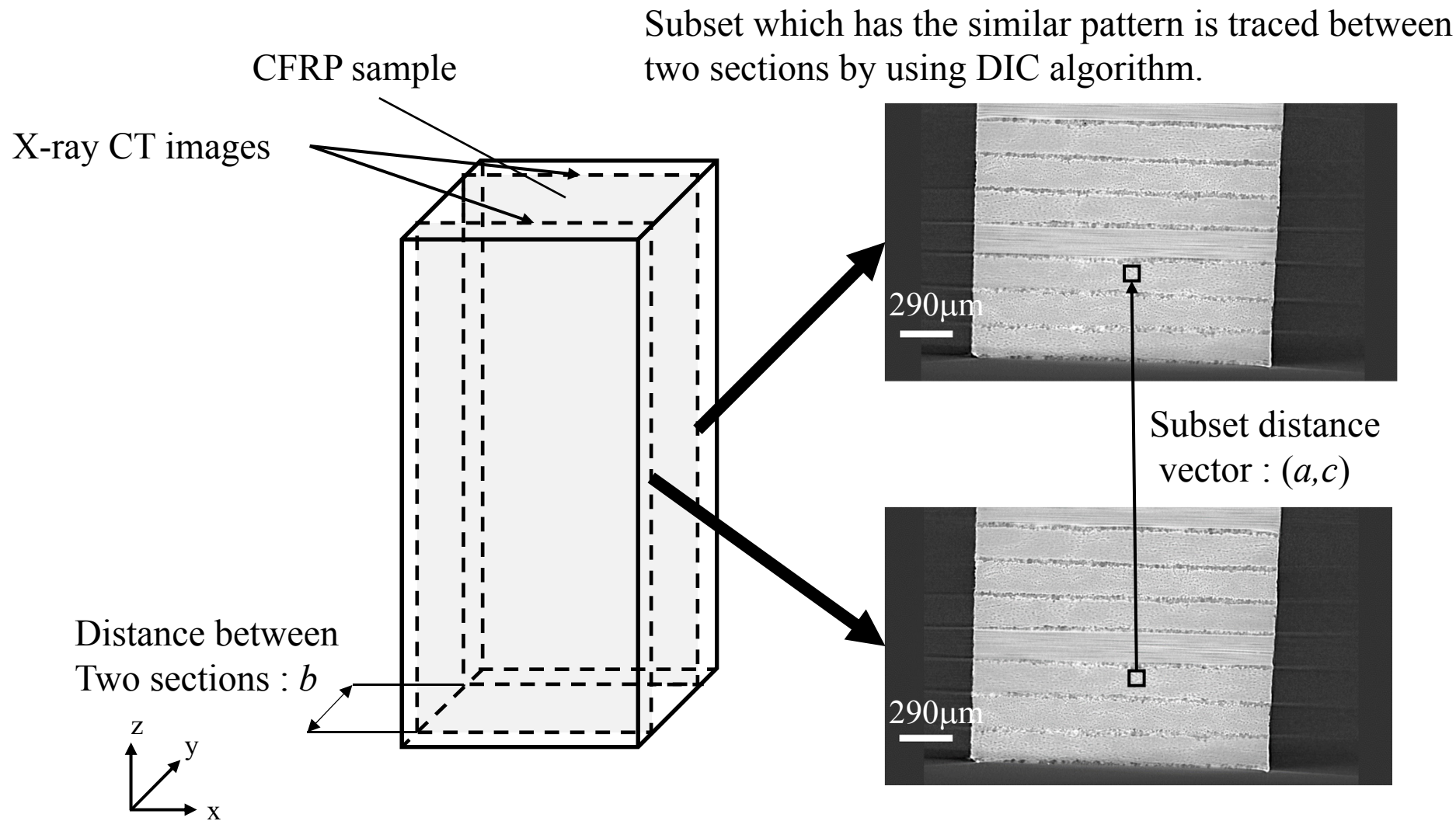
Fig.9 X-ray CT images of woven composites.

Fig.10 Fiber orientation vectors.

Fig.11 Section superposed by fiber orientation.

Table1 Average and Standard deviation of measured fiber orientations.

Table2 Cumulative relative frequency.



When subset distance vector is (a, c) , 3D fiber orientation vector of this subset is (a, b, c) .

Fig.1 Schematic of the concept of the proposed method.

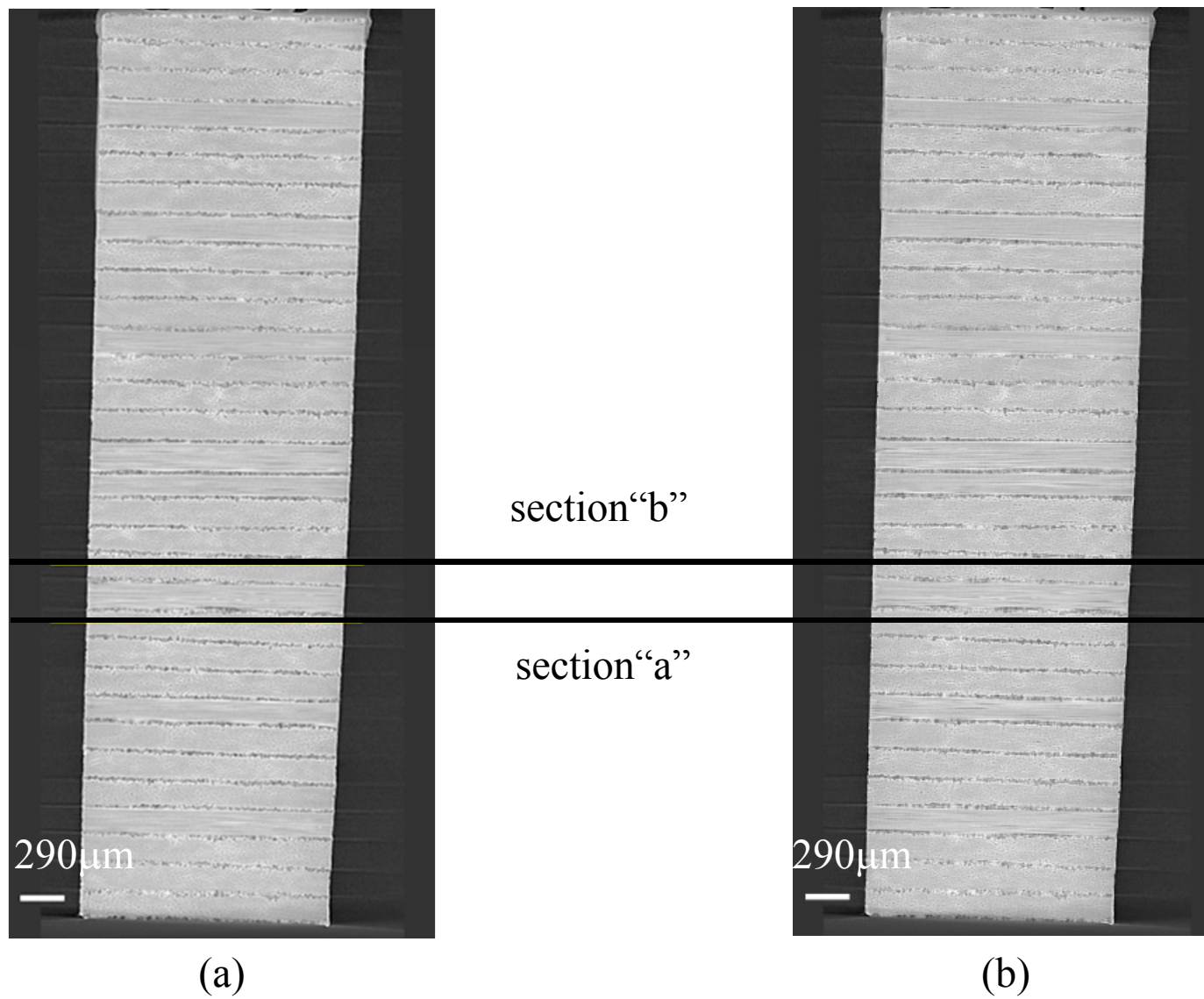


Fig.2 X-ray CT images.

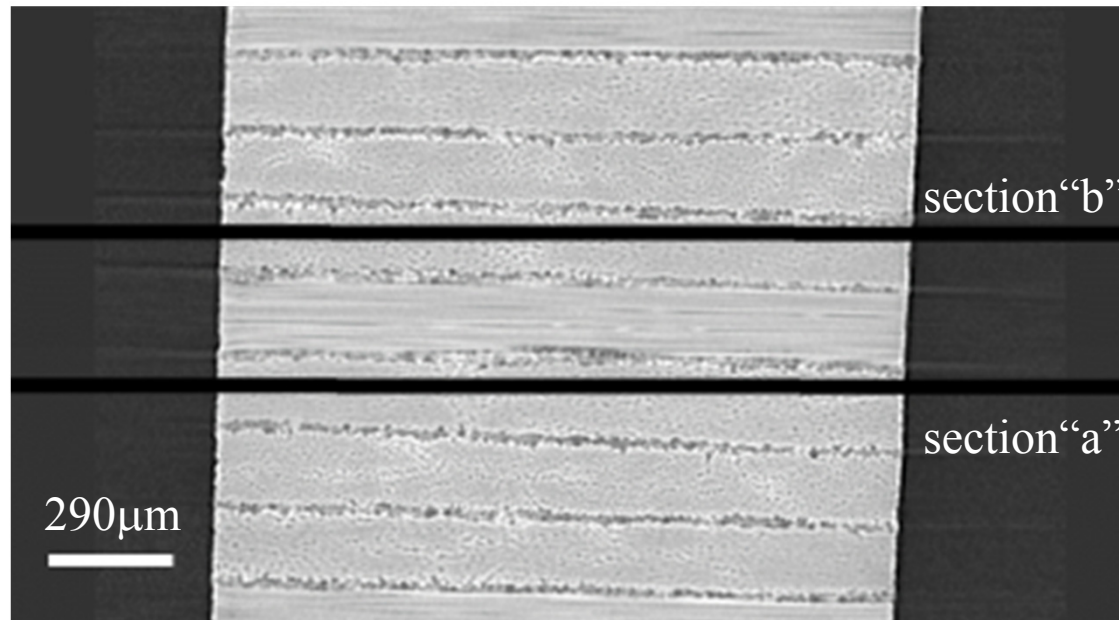
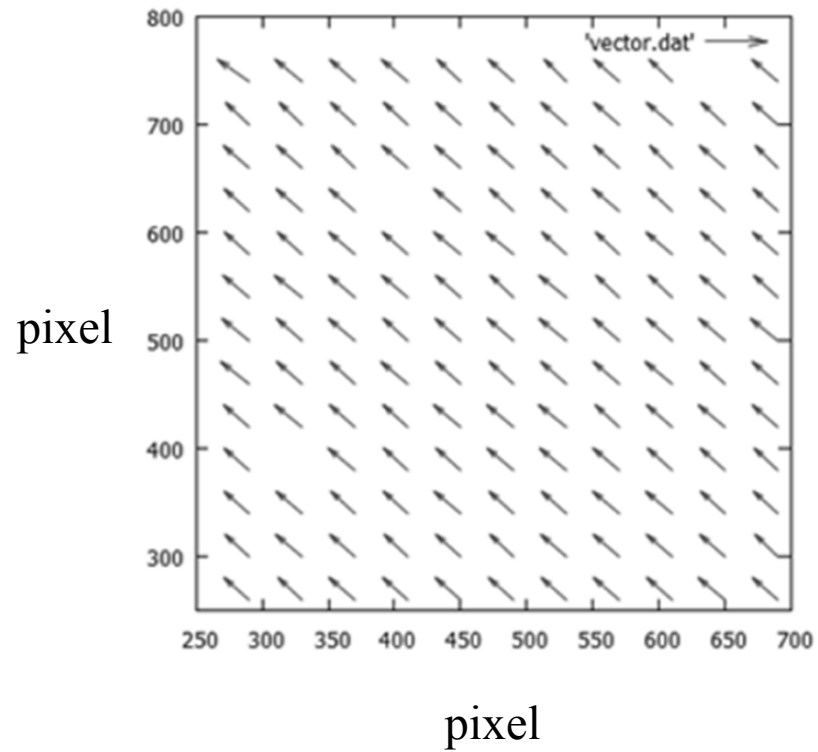
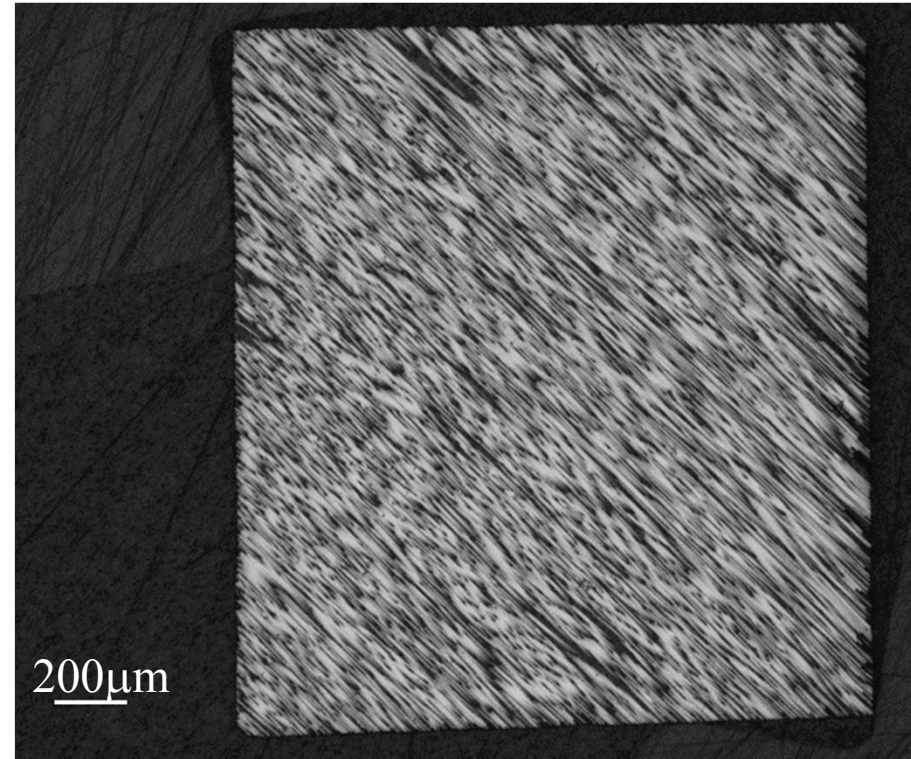


Fig.3 Magnified view.

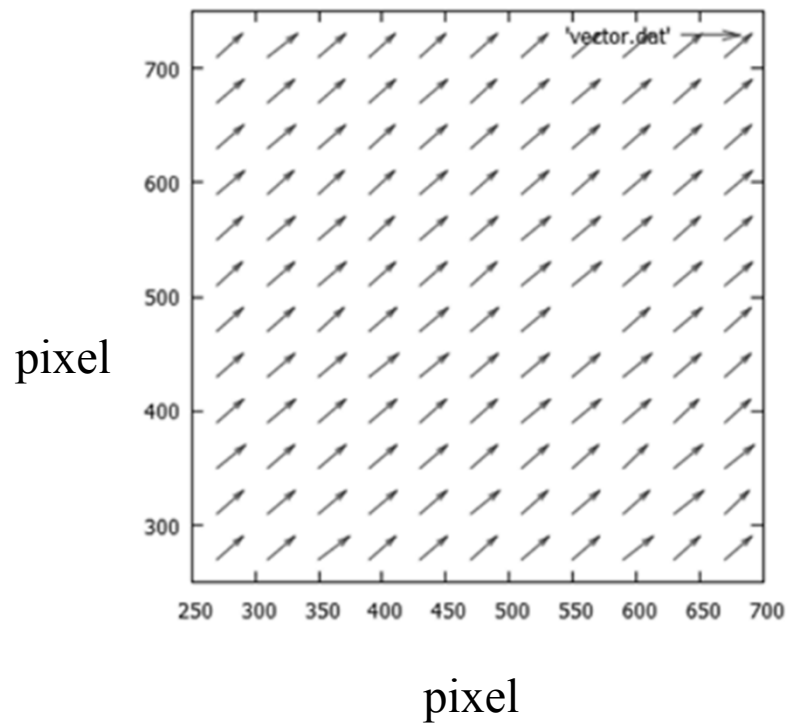


(a) Calculated fiber orientation vectors

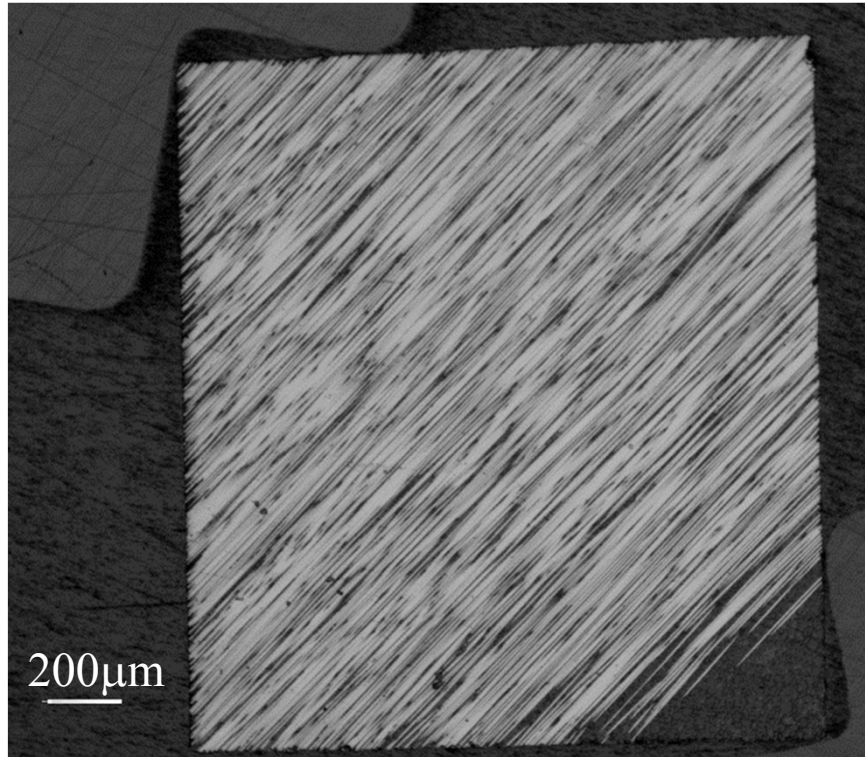


(b) Section micrograph

Fig.4 Comparison of fiber orientations on section “a”.



(a) Calculated fiber orientation vectors



(b) Section micrograph

Fig.5 Comparison of fiber orientations on section “b”.

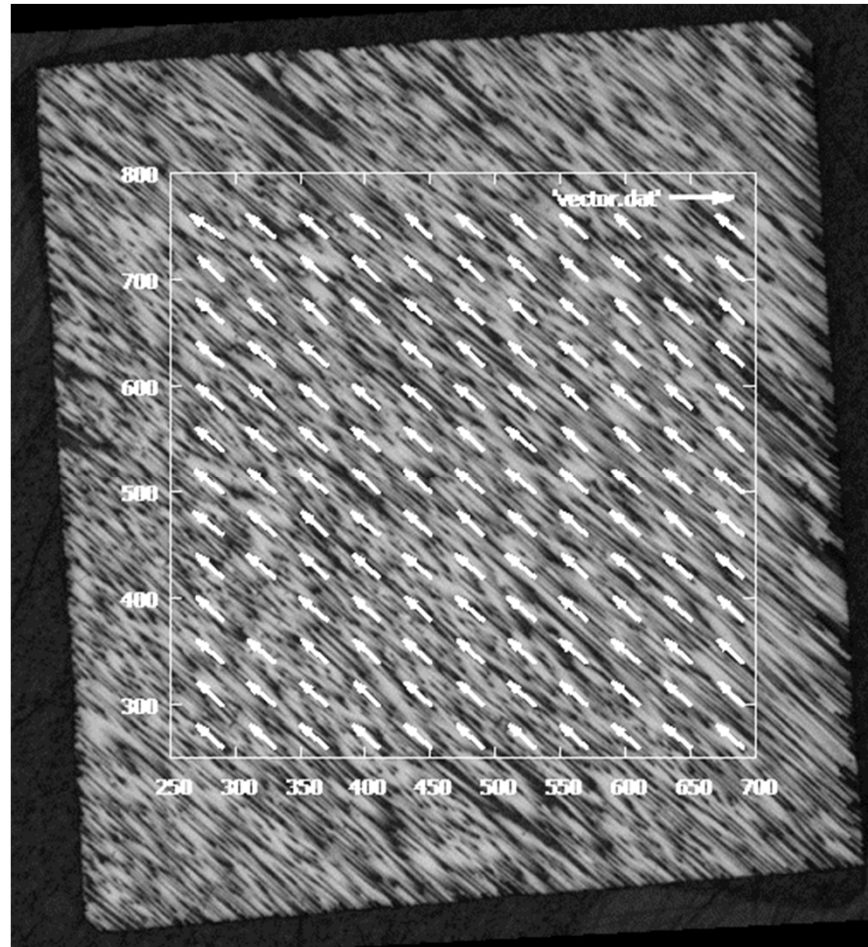


Fig.6 Section superposed by fiber orientation in section “a”.

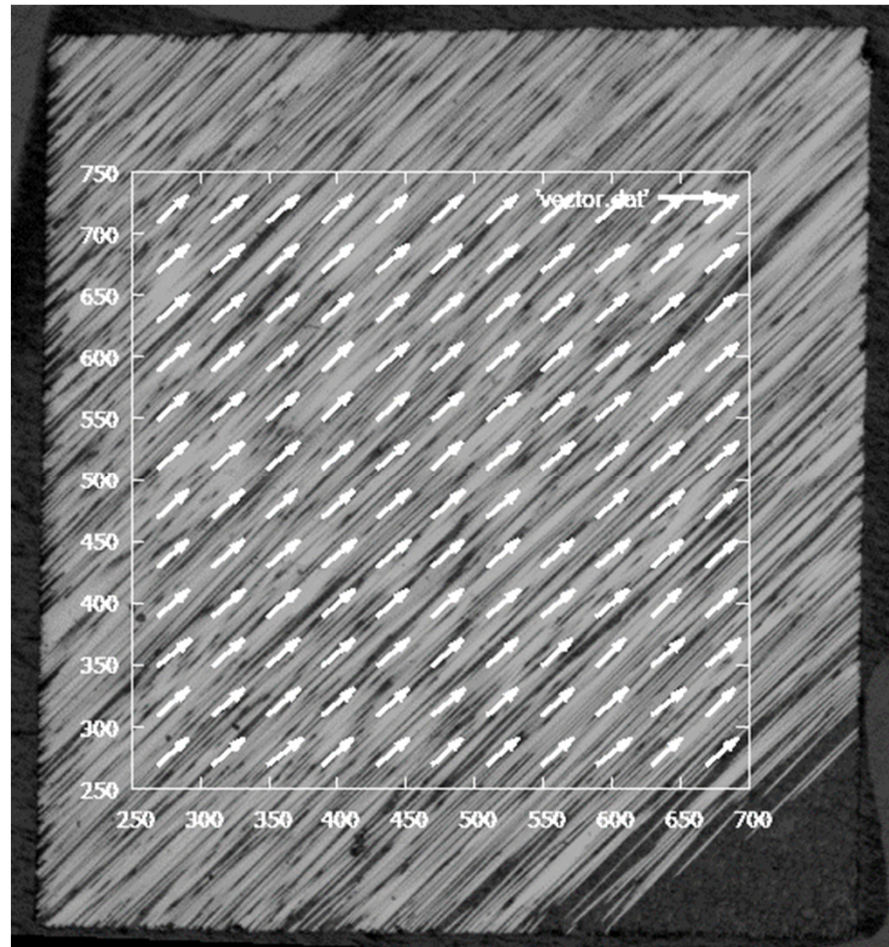


Fig.7 Section superposed by fiber orientation in section “b”.

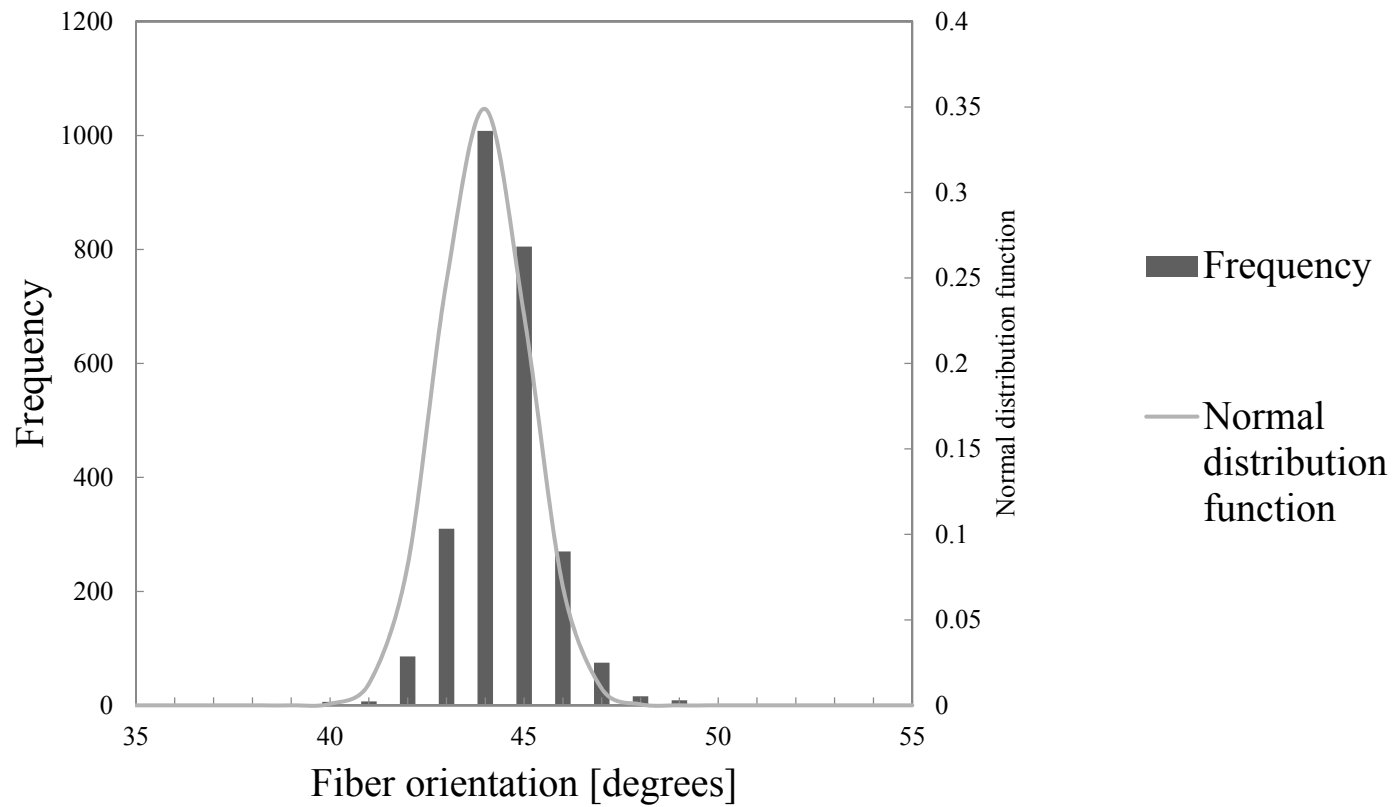
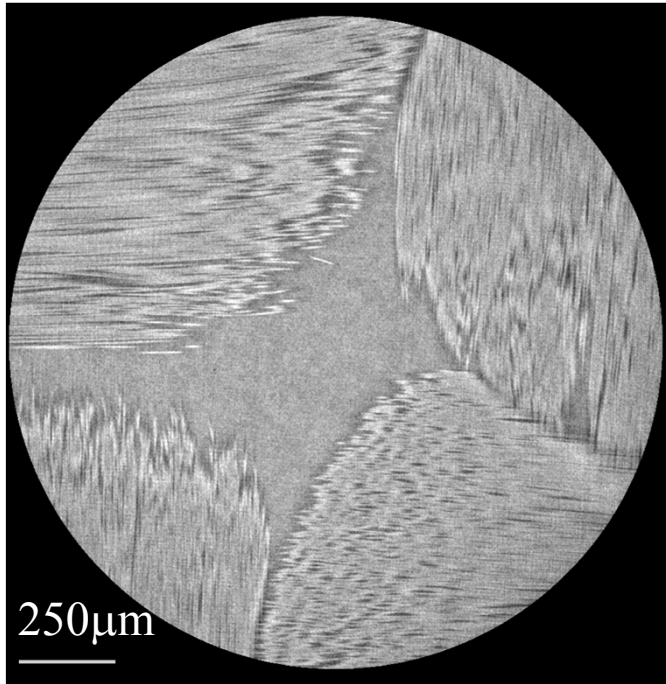
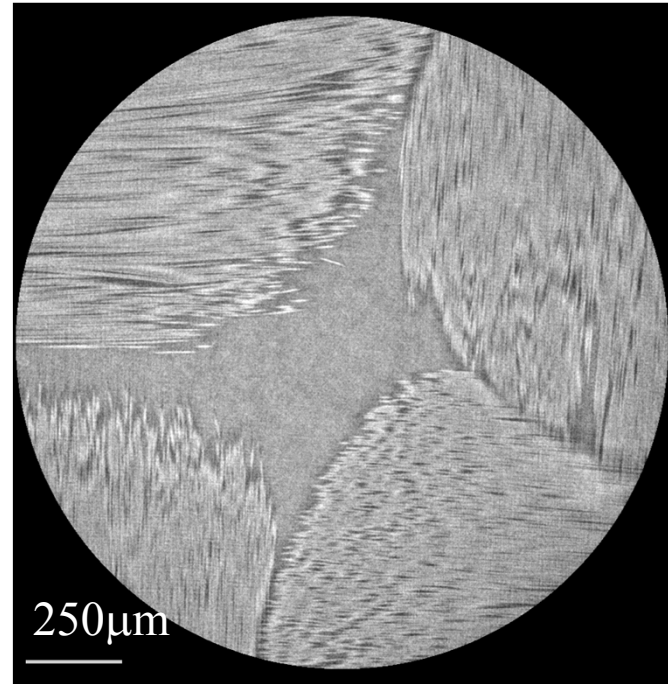


Fig.8 Comparison between histogram of fiber orientation and normal distribution.



(a)



(b)

Fig.9 X-ray CT images of woven composites.

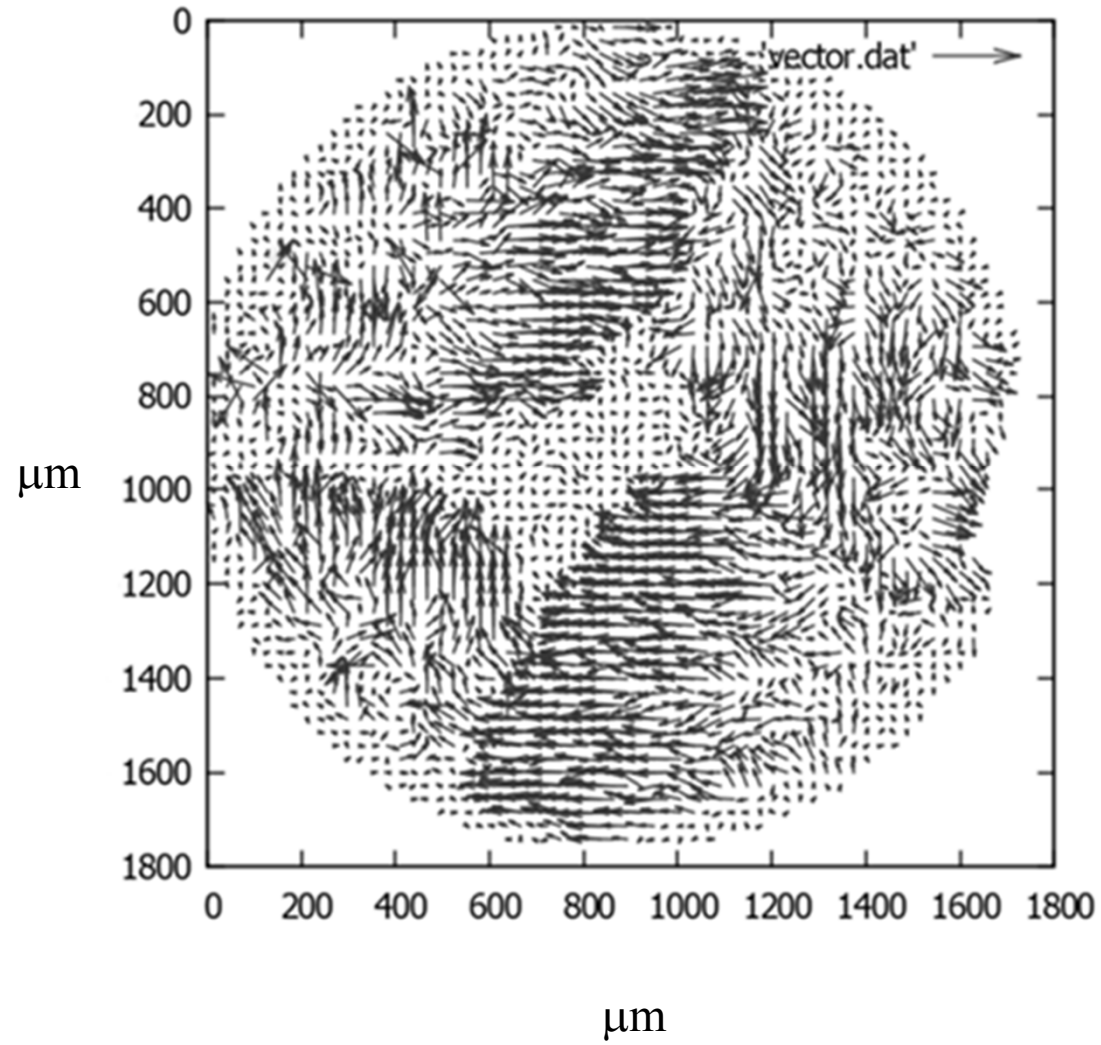


Fig.10 Fiber orientation vectors.

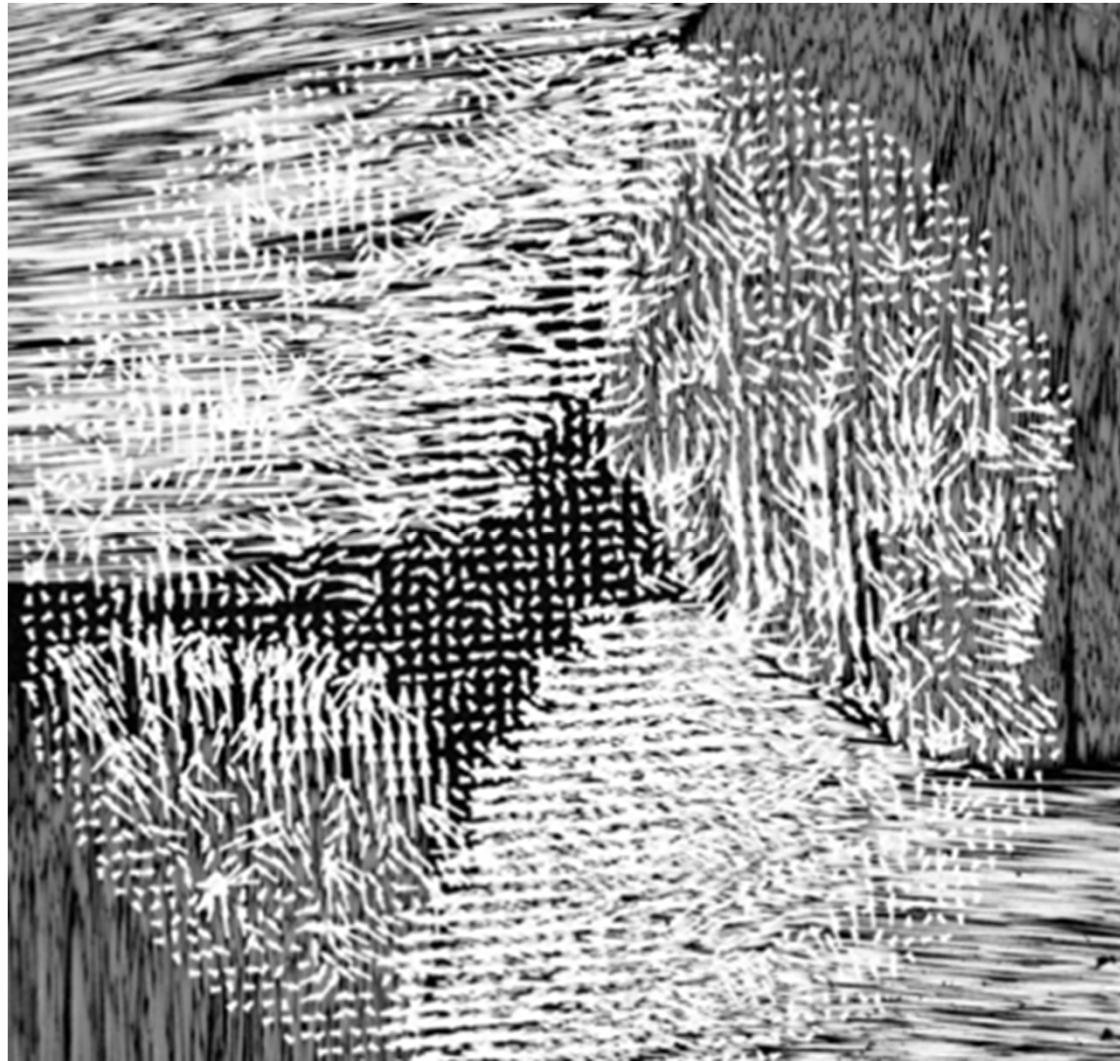


Fig.11 Section superposed by fiber orientation.

Table1 Average and Standard deviation of measured fiber orientations.

Section and method	Average θ [$^{\circ}$]	Standard deviation
Section a, DIC	42.83	1.520
Section a, Micrograph	45.69	1.349
Section b, DIC	43.95	1.142
Section b, Micrograph	46.01	1.150

Table2 Cumulative relative frequency.

Fiber orientations [$^{\circ}$]	Observed frequency		Relative frequency		Cumulative relative frequency		Difference
	Calculated value	Normal distribution	Calculated value	Normal distribution	Calculated value	Normal distribution	
39	1	0	0.0004	0.0000	0.0004	0.0000	0.0004
40	6	2	0.0023	0.0006	0.0027	0.0006	0.0021
41	7	27	0.0027	0.0103	0.0054	0.0109	0.0055
42	86	199	0.0332	0.0769	0.0386	0.0878	0.0492
43	310	653	0.1196	0.2517	0.1581	0.3395	0.1814
44	1008	937	0.3887	0.3615	0.5469	0.7010	0.1542
45	805	591	0.3105	0.2279	0.8573	0.9289	0.0716
46	270	163	0.1041	0.0630	0.9614	0.9919	0.0305
47	75	20	0.0289	0.0077	0.9904	0.9996	0.0092
48	16	1	0.0062	0.0004	0.9965	1.0000	0.0035
49	9	0	0.0035	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000