

# X線タルボ・ロー干渉画像装置による繊維強化複合樹脂部材の革新的解析手法の提案 —既存手法との比較—

Innovative Analysis Method for Fiber Reinforced Composite Material by Using X-ray Talbot-Lau Interferometry

— Comparison of Accuracy to Conventional Analysis Methods —

今田 昌宏\* 萩原 清志\*  
Masahiro IMADA Kiyoshi HAGIWARA

前田 景子\* 大竹 雅子\*  
Keiko MAEDA Masako OOTAKE

## 要旨

近年、低炭素社会実現のために自動車の低燃費化、電動化が推進されている。そのため自動車の軽量化を実現する革新素材として炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が期待されている。しかしながら、自動車用として検討されている生産性に優れた方法で作製したCFRPでは、繊維の量や配向状態のばらつきが大きくなった場合、力学特性が不均一になり強度が不足するという課題があり、内部の繊維の量や配向状態の分布を大面積で可視化できる検査方法が望まれている。

これまで開発してきたX線タルボ・ロー干渉画像装置は、X線の干渉を利用することでX線の微小な屈折や散乱を可視化できる非破壊検査装置であり、コニカミノルタでは本装置による非破壊検査ソリューションの提供を開始した。

CFRPを使った製品開発の様々な場面に適用した場合、繊維の量や配向状態の可視化を起点に、これらの定量値の解析による現象の理解や強度の予測、更には製品の設計や製造条件の最適化などが期待される。そこでCFRPを本装置と、マイクロフォーカスCTや光学顕微鏡など従来のミクロ観察技術で測定し、その比較より本装置で得られる繊維の量や配向状態の結果の妥当性について検証を行った。

その結果、ウェルドライン周辺部のような複雑な樹脂流動が生じる部分でも繊維の量、配向状態を本装置によって可視化できていることを確認した。これは、本装置が測定時間の短縮・測定視野の大面積化により従来に比べ1000倍以上効率的にCFRP内部の繊維の量・配向状態を可視化できる非破壊検査技術であることを示しており、今後、CFRPにかかわるサプライチェーン全体におけるモノづくりプロセスの革新に貢献できると期待している。

## Abstract

In recent years, fuel economy and electric vehicles have been promoted for the realization of a low-carbon society. Therefore, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is expected to be an innovative material for automotive light weighting. However, when using CFRP, which is being researched for automotive applications for low cost production, the issue of uneven mechanical properties and insufficient strength arises when the variation in fiber quantity and orientation state increases. Then, an inspection instrument that can visualize the internal distribution of fibers over a large area is desired.

X-ray Talbot-Lau Interferometry is a nondestructive inspection system that can visualize the X-ray refraction and scattering at very small angles by using X-ray interference. We have started to provide nondestructive inspection solutions using this instrument.

By visualizing the amount and orientation of fibers in CFRP across large field-of-view with this instrument, quantitative analysis of product performance will be possible. The results of those analyses are expected to optimize the conditions of design and manufacturing of products using CFRP. In this report, the distributions of fibers inside CFRP were measured with our instrument and conventional system. Those results were compared and validated.

As a result, we found that the amount and orientation of the fibers could be visualized by our instrument around the weld line, where complex resin flow occurs. Furthermore, we have shown that our instrument can be over 1000 times more efficient than conventional analysis methods by reducing the measurement time and increasing the area of the measurement field of view. In the future, we expect to contribute to the innovation of manufacturing processes in the entire supply chain related to CFRP.

\* 開発統括本部 要素技術開発センター システム技術開発室

## 1 はじめに

近年世界的に低炭素化が喫緊の課題となっており、その対策の1つとして自動車の低燃費化、あるいは電動化が政策として推進されている。自動車の燃費は車両重量と相関することが知られており<sup>1)</sup>、自動車の軽量化により燃費の改善、つまりCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能である。自動車の軽量化のための有力な革新素材として期待されているのが、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)である。従来の金属からCFRPに変えることで、強度を維持したまま車体を軽量化することが可能となる。この優れた特性から、ボーイング787では構造重量の約50%がCFRPであり、長航続距離化、CO<sub>2</sub>削減が実現されている。しかし航空機で採用されているオートクレーブ法による熱硬化性CFRPは品質が高い一方で生産性、リサイクル性が低いため、大量生産が求められる自動車には適さないという課題があった。近年、生産性、リサイクル性に優れたCFRPとして、非連続繊維と熱可塑性樹脂を用いたCFRPが注目されている。しかしながら、繊維の量や配向状態で場所ごとのばらつきが大きくなった場合、力学特性が不均一になり強度が不足するという課題があり、非連続繊維を用いたCFRPを開発するためには、非破壊で部品全体の繊維の量・配向状態などを可視化できる検査方法が望まれている<sup>2)</sup>。現在炭素繊維の評価方法として用いられているマイクロフォーカスCT(以下 $\mu$ F-CT)では視野が数mmと狭く、大面積の可視化が困難なため、力学特性の分布の原因の把握やCAEの精度向上に必要な情報を得られないという課題があった。

コニカミノルタでは、医療および産業用非破壊検査応用を目的としてX線タルボ・ロー干渉画像装置を開発している<sup>3), 4)</sup>。この装置は、X線の干渉を利用することで、従来のX線装置では可視化できない、X線の微小な散乱や屈折を画像化<sup>5)</sup>できる新しい検査装置である。これまでにCFRP内部の繊維の量や配向状態を100mm角の大面積かつ短時間で可視化できることを示した<sup>4)</sup>。

コニカミノルタでは、このX線タルボ・ロー干渉画像装置による非破壊検査ソリューションの提供を開始しており、従来見えなかった対象の可視化、すなわち「見える化(Visualization)」、これを起点にその定量値から、対象の機能に関わる指標を抽出し現象を理解する「わかる化(Understanding)」、更には、製品の設計や製造条件を最適化する「できる化(Enablement)」の実現を目指している。Fig. 1に示すように、CFRPのサプライチェーンに適用した場合、以下のようなプロセスを想定している。材料メーカーにおいては、繊維の「見える化」を起点として、繊維の量や配向状態の定量値から強度に関わる指標が抽出され、これに基づき強度の予測を可能とする「わかる化」が達成される。この指標が完成品メーカーに提示されるとともに、この指標に基づいて材料や製造条件などを最適化する「できる化」を実現する。次に、完成品メーカーにおいては、製品で求められる強度を担保す

るため、同指標に基づいて製品設計/仕様が最適化され、要求仕様として成形メーカーに提示される。成形メーカーにおいては要求を満たすように成形の諸条件が最適化される(「できる化」)。このように、一連のサプライチェーンを共通の指標で繋ぐことで、最終製品の強度担保を最短で実現し、サプライチェーン全体の革新への貢献が期待される。また、各メーカーにおいては、試作回数の削減については試作レスが実現され、想定していた強度が得られないなどの不具合発生時の現象やその原因の解明(「わかる化」)が行われるといった貢献も期待される。

本報告では、CFRP試料をX線タルボ・ロー干渉画像装置と、 $\mu$ F-CTや光学顕微鏡といった従来のマイクロ観察技術で測定し、それらの比較より本装置で得られる繊維の量や配向状態の結果の妥当性について検証を行ったので報告する。

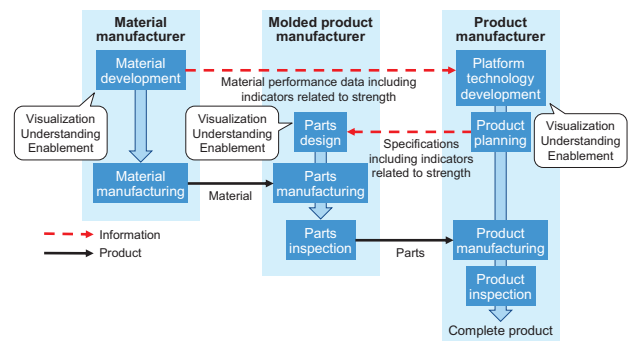


Fig. 1 Conceptual diagram of the process of “visualization”, “understanding”, and “enablement” in the innovative CFRP supply chain.

The entire supply chain can be revolutionized by new outcomes such as “visualization” of fibers inside CFRP using our instrument, “understanding” through the analysis of amount and orientation of fibers and strength prediction, and “enablement” which means optimization of manufacturing and molding conditions.

## 2 X線タルボ・ロー干渉画像装置で得られる画像

Fig. 2にX線タルボ・ロー干渉画像装置の構成図を示す。本装置はX線管球と画像検出器(FPD: Flat Panel Detector)の間に、G0, G1, G2と呼ばれる3枚のX線格子を配置したものである。通常のX線検査で使用されるX線管球を使用することができ、シンクロトロンなどの特殊なX線源は不要である。試料はG1格子の直上に配置され、1回の撮影で、試料を通過したことによるX線の減衰、散乱、屈折を画像化した、吸収画像、小角散乱画像、微分位相画像、と呼ばれる3画像を同時に得ることができる。吸収画像はX線の吸収量を画像化したものであり、従来のX線画像と同じものである。小角散乱画像は、試料中の微細な散乱体の集合による散乱の強さを画像化したもので、数 $\mu$ mの微細構造に対して最も感度を有する。そのため、画像検出器の画素サイズより小さい数 $\mu$ mの微細な散乱体の分布を画像化することができる。微分位相画像は試料による屈折角を画像化したものであり、屈折率が異なる物質の境界をとらえることができる。

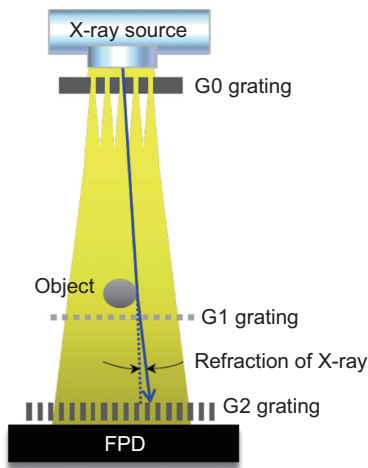


Fig. 2 Schematic diagram of X-ray Talbot-Lau interferometer.  
Three X-ray gratings, called G0, G1, and G2, are placed between the X-ray tube and the flat panel detector.

非連続繊維と熱可塑性樹脂を使った厚さ2mmのCFRPを撮影した例を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) に示す吸収画像 (Absorption Image) では試料内部の繊維やボイドは可視化できていないのに対して、Fig. 3(b) の小角散乱画像 (Small Angle Scattering Image) では試料内部の繊維の分布や向きを、Fig. 3(c) の微分位相画像 (Differential Phase Contrast Image) では、試料内部のボイドの存在を可視化できている。また小角散乱画像はG0～G2格子の向きと散乱体の向きの相対角度によって信号値が変化するため、相対角度を変えて複数の画像を撮影し、画素ごとに信号が強くなる角度と、その時の信号値を計算してマッピングすることで、画素ごとの繊維の配向角度、配向度、散乱強度 (=繊維量に対応) を画像化できる。

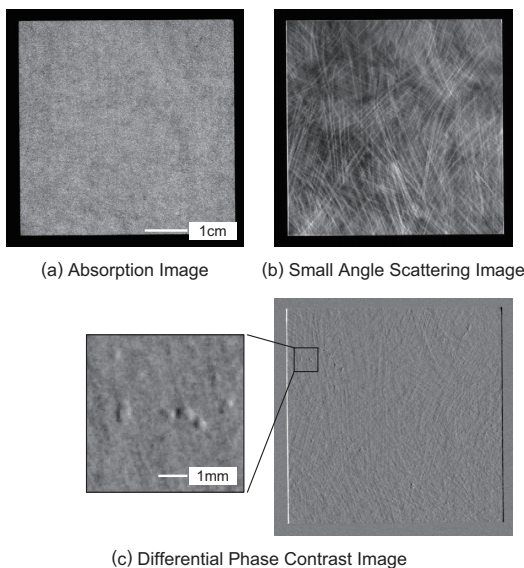


Fig. 3 Observation results of CFRP.

While the Absorption Image does not visualize the fibers and voids inside the sample, the Small Angle Scattering Image visualizes the distribution and orientation of the fibers inside the sample, and the Differential Phase Contrast Image visualizes the existence of voids inside the sample. For a better understanding, a part of the Differential Phase Contrast Image is shown enlarged.

Fig. 4 に解析結果の一例を示す。Fig. 4(a) に示す散乱強度画像 (Scattering Intensity Image) は画像内の散乱強度分布を画像化したものであり、明るい場合は繊維量が多い、暗い場合は繊維量が少ないことに対応し、画像内の相対的な繊維量の分布を示している。Fig. 4(b) の配向度画像 (Degree of Orientation Image) は複数角度撮影した時の信号変化の振幅の大きさを画像化したものであり、配向度を示している。明るい場合は振幅が大きく特定の方向に強く配向しており、暗い場合は振幅が小さく等方的な配向、すなわちランダムに配向していることを表している。Fig. 4(c) の配向角度画像 (Orientation Angle Image) は配向角度の面内分布を示したものであり、付図に示すように画面Y方向の配向を赤色、X方向の配向を水色といったようにカラー表示している。この図より、試料の左側では全体的に緑色～青色で表示されており主にX方向に配向しているのに対して、試料の右上部分では赤色で表示された領域が存在している。この領域はY方向に配向しており、試料の面内で場所ごとに配向角度が異なっている様子が画像化されていることがわかる。

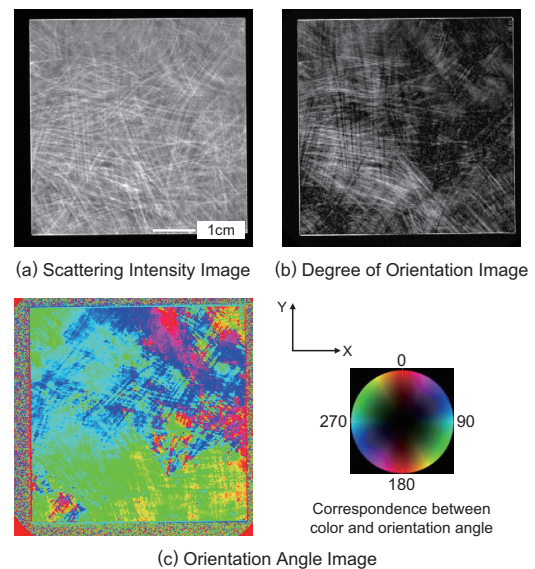


Fig. 4 Evaluation results of fiber orientation in CFRP.

The Scattering Intensity Image shows the amount of fibers, and the areas with more fibers are shown brighter. Degree of Orientation Image indicates the degree of orientation, where bright indicates a strong orientation in one direction and dark indicates isotropic orientation. Orientation Angle Image shows the in-plane distribution of orientation angle by color.

### 3 タルボ・ローおよび従来の測定装置による評価

#### 3.1 評価試料の概要とタルボ・ローによる撮影結果

評価した試料の外観写真を Fig. 5 に示す。試料はポリカーボネート (PC) 樹脂中に炭素繊維 ( $\Phi 7 \mu\text{m}$ , 長さ 6 mm) を 28 wt% 添加して混練したうえで射出成形した CFRP 試料であり、写真中央のスプールから樹脂が注入され、左側の短冊部分の上部と下部のゲートから樹脂が流入し中央部にウェルドラインが形成される。

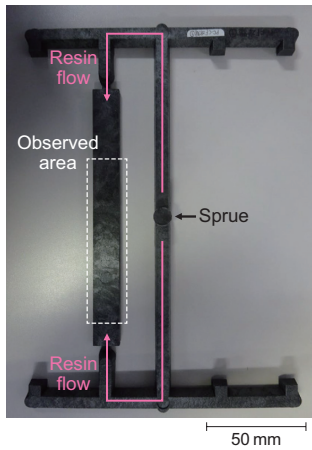


Fig. 5 Appearance of evaluated CFRP sample.

この試料をタルボ・ロー干渉画像装置で撮影した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) に示す試料の外観写真や、Fig. 6(b) の吸収画像ではウェルドラインが認められないのに対して、Fig. 6(c) の散乱強度画像、Fig. 6(d) の配向度画像、Fig. 6(e) の配向角度画像では中央部に複雑な形状の信号値変化としてウェルドラインが可視化できていることがわかる。この中央部分のウェルドライン周辺部と、上部および下部の非ウェルドライン部について、タルボ・ロー干渉画像撮影装置と従来の方法で評価・比較した結果について、次節以降で述べる。

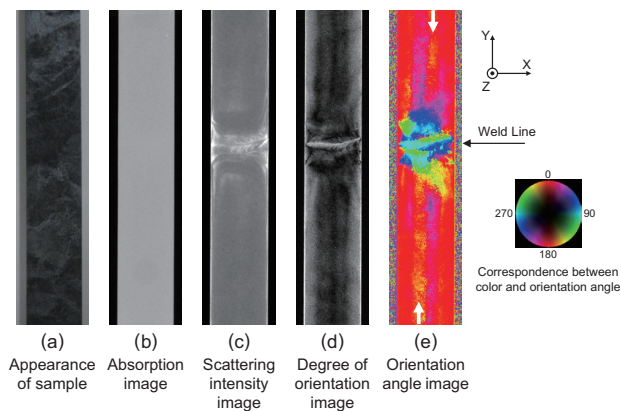


Fig. 6 Results of CFRP orientation analysis.

In the absorption image shown in Fig. 6(b), the weld line is not visible. In the Scattering Intensity Image (Fig. 6(c)), the Degree of Orientation Image (Fig. 6(d)), and the Orientation Angle Image (Fig. 6(e)), the weld line can be visualized as a signal value change with a complicated shape in the center.

### 3.2 非ウェルドライン部の繊維配向の評価結果

タルボ・ロー干渉画像装置で得られた画像のウェルドラインから離れた部分 (Fig. 6 各画像の上部および下部) を見ると、Fig. 6(d) の配向度画像において左右端部が明るく Y 方向に強く配向した配向度が高い状態であるのに対して、中央部が暗くなっておりランダムな配向であることがわかる。また Fig. 6(e) の配向角度画像において全体が赤色に表示されており、樹脂の流動方向 (Y 方向) に繊維が配向している一方で、中央部では黄色に表示さ

れた領域もわずかに存在しており (例えば白色矢印で示した部分)、斜め方向に配向する領域も存在することがわかる。相対的な繊維量を表す Fig. 6(c) の散乱強度画像では面内で明るさはほぼ均一であり繊維量がほぼ均一であることがわかる。

実際の繊維の状態を確認するために、ウェルドラインから離れた部分を切断・研磨し、光学顕微鏡で評価した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) は切断・研磨して断面観察した部分の配向度画像を Fig. 6(d) より抜き出したものであり、Fig. 7(b)~(d) はその部分を切断・研磨して XZ 断面を光学顕微鏡で観察した画像である。Fig. 7(b) より配向度画像で暗い部分と同程度の幅で、中央部に明るい領域が見られることがわかる。この試料を拡大観察すると、Fig. 7(c) に示す通り外側の暗く見えている部分はほぼ全ての繊維の断面が小さい円形に見えており、観察面に対して奥行き方向 (Y 方向) に繊維が配向しているのに対して、Fig. 7(d) に示す通り中央部の明るい部分は、断面が横長に見える繊維が多数存在しており、観察面に対して水平方向 (X 方向) に配向した繊維が多数存在していることがわかった。

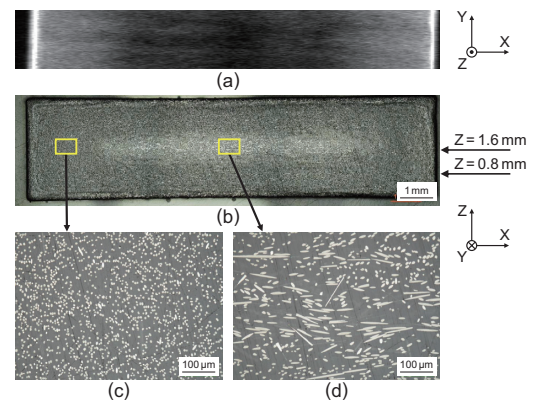


Fig. 7 Results of optical microscopy observations.

(a) Degree of Orientation Image obtained by Talbot-Lau interferometer, (b)~(d) Corresponding cross-section image observed by optical microscope.

このような分布になるのは、射出成形における樹脂流動に由来すると考えられる。また、Fig. 7(b) と直交する方向の XY 断面について、試料を研磨して Z=1.6 mm (厚さ方向のほぼ中央) と Z=0.8 mm (表面の近く) の繊維の様子を観察した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) および (f) は全体の光学顕微鏡画像であり、Fig. 8(b)(c) および (g)(h) は黄色い枠の領域を拡大観察した顕微鏡画像を示す。また Fig. 8(d)(e) および (i)(j) は、拡大観察した顕微鏡画像より得られた各領域の繊維の配向角度のヒストグラムを表示している。Fig. 7(b) の厚さ方向 (Z 方向) ではほぼ中央の Z=1.6 mm の位置の XY 断面を観察した Fig. 8(a)~(e) では Fig. 7(b) の結果と同様、端部では Y 方向 (0 度) に強く配向しているのに対して、中央部分は X 方向 (90 度) に配向している繊維も多数存在することがわかる。一方、より表面に近い Z=0.8 mm の位置の XY 断面を観察した

Fig. 8(f)~(j)では端部、中央部ともにY方向（0度）に配向した繊維が多いことがわかる。Fig. 7(b)の端部を見ると、厚さ方向全体が同一の明るさで表示されていること、またFig. 8(d)(i)よりいずれの領域においても繊維がY方向（0度方向）に配向していることから、この領域では厚さ方向全体で繊維がY方向に配向していると考えられる。一方、Fig. 7(b)のX方向の中央部を見ると厚さ方向（Z方向）の中央1/3程度の領域において周囲に比べて明るい領域が存在しており、この領域ではFig. 8(e)の結果より、繊維がXY面内の様々な方向を向いていることがわかる。一方で、暗く見える厚さ方向（Z方向）2/3程度の領域ではFig. 8(j)の結果より繊維が主にY方向に配向しており、厚さ方向の位置によって繊維配向の様子が異なっていることがわかる。このようなX方向の端部と中央部で厚さ方向の繊維配向分布が異なることを反映して、Fig. 6(d)に示した配向度画像においてX方向中央部の配向度が低下したと考えられる。

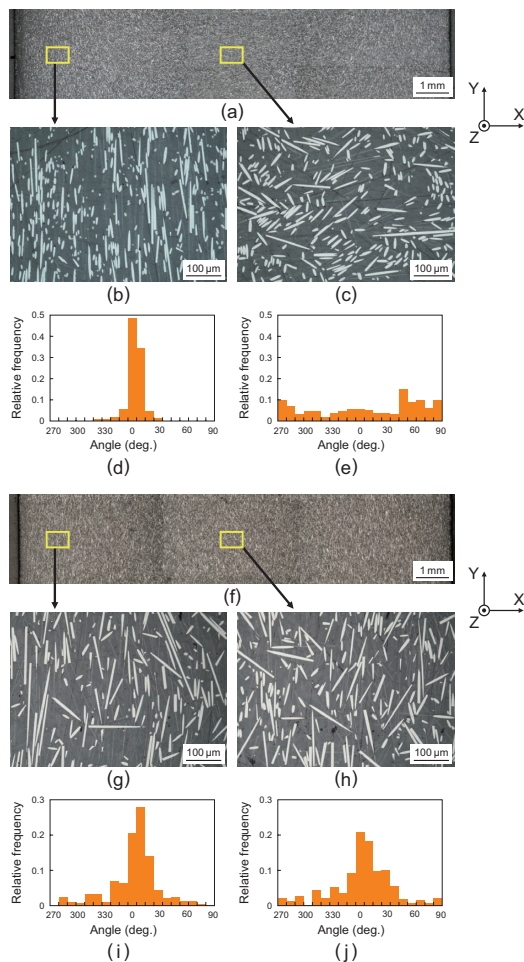


Fig. 8 Observation results of fiber state at (a)~(e)Z=1.6mm, (f)~(j)Z=0.8mm. At the edge of the fig. 8(a) (center of depthwise direction), strong orientation of fibers is observed along Y-axis as shown in (b)(d). However, in the center, orientations of fibers distribute in various directions as shown in (c)(e). On the other hand, in fig. 8(f), which is close to the surface, most of the fibers are oriented to Y-axis in both edge and center region as shown in (g)~(j). Orientations are different in the location, such as, edge/center or surface/core of the sample.

またFig. 6(e)の配向角度画像において、端部ではほぼY方向（0度方向）に配向しているのに対して、中央部では、Y方向に配向した繊維とX方向に配向した繊維が厚さ方向に重なっているため、結果的に配向角度にやや斜め方向の黄色で示される成分が含まれる結果が得られたと考えられる。

繊維量の分布についてはFig. 7(c)(d)の繊維の面積比率を比較した結果、端部では約19.3%、中央部では約20.6%とほぼ同じであり、Fig. 6(c)の散乱強度画像で面内分布が見られていない結果と対応していることが確認できた。これらの結果より、配向度、配向角度、繊維量の分布のいずれにおいても、タルボ・ロー干渉画像装置で得られた結果と、実際に試料を研磨して繊維の分布を光学顕微鏡で評価した結果が一致しており、本装置によってCFRPの繊維の分布を非破壊・大面積で可視化できることを確認できた。

### 3.3 ウェルドライン周辺部の繊維配向の評価結果

前節の結果より、ウェルドラインから離れた、繊維量や繊維状態の分布が比較的単純な領域において、タルボ・ロー干渉画像装置で得られる配向度画像、配向角度画像、散乱強度画像が、実際の繊維の配向度、配向角度、繊維量の相対的な分布を表していることが確認された。次に、Fig. 6(c)~(e)の上下方向中央部に見られる、繊維の分布がより複雑なウェルドライン周辺部について検討を行った。ウェルドライン周辺部のような複雑な繊維配向をしている部分では、光学顕微鏡による評価は困難なため、 $\mu$ F-CTを使用した。ブルカー社製の $\mu$ F-CTであるSKYSCAN1272で測定を行い、タルボ・ロー干渉画像装置で得られた画像との比較を行った。なお $\Phi 7\mu\text{m}$ の繊維を個別に可視化するためにボクセルサイズは $3\mu\text{m}$ で評価を行った。 $\mu$ F-CTでは、試料サイズに制限があり、幅13mm、厚さ3mmの試料全体を一度に撮影できないため、幅約4mm厚さ3mmの3試料に切断して個別に測定を行った。さらに得られたボリュームデータをVOLUME GRAPHICS社製VGSTUDIO MAXの繊維配向解析モジュールで処理し、繊維の配向角度と配向度の解析を行った。このソフトでは、繊維の画像より解析領域ごとの配向テンソルを算出できる。Fig. 9に配向テンソルの模式図を示す。

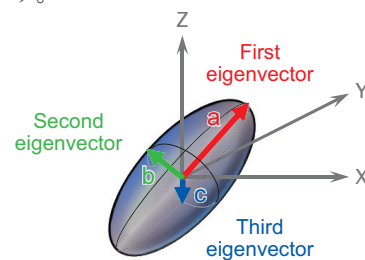


Fig. 9 Schematic diagram of fiber orientation analyzed with a three-dimensional tensor.

By using an analysis module which can calculate orientation tensor in each region from the fiber image by  $\mu$ F-CT, orientation angle and level were analyzed.

配向テンソルは、配向方向とその方向の繊維の割合を3次元のラグビーボール型の楕円形状で表したものであり、その軸の長い方向から順番に第一固有ベクトル、第二固有ベクトル、第三固有ベクトルと定義され、各ベクトルは直交している。各ベクトルの長さの比である第一固有値a、第二固有値b、第三固有値cの間には下式の関係が成り立つ。

$$a \geq b \geq c, a + b + c = 1$$

つまりaが1に近い場合は、解析領域内部の繊維がほぼすべて第一固有ベクトルの方向に配向しており、かつ配向度が高いことに対応する。一方で繊維が全方向に等方的に配向している場合は、配向テンソルが球状となり、 $a=b=c=0.33$ となる。今回タルボ・ロー干渉画像装置で得られる2D画像と比較するために、配向角度は第一固有ベクトルをXY面に投影した角度、配向度の指標としては第一固有値の値を採用した。

Fig. 10(a) にタルボ・ロー干渉画像装置で得られた配向角度画像を、Fig. 10(b)~(d) に $\mu$ F-CTで得られた配向角度画像を示す。

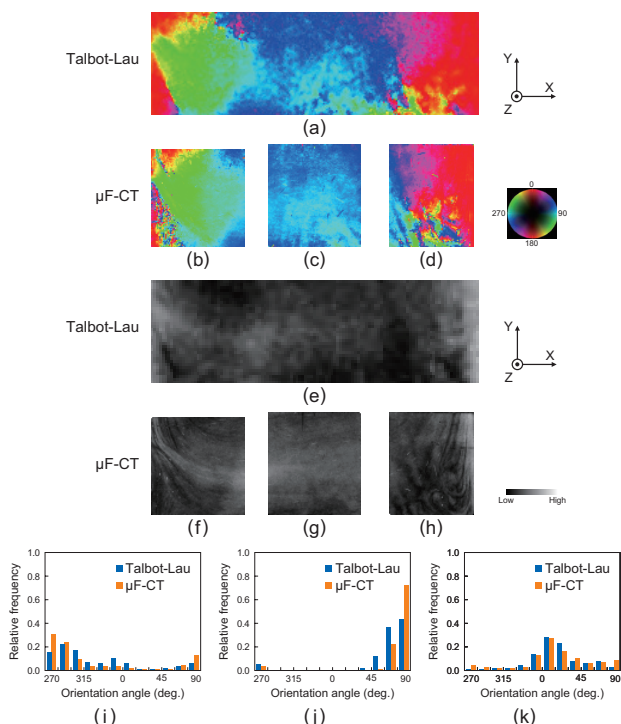


Fig. 10 Comparison of fiber orientation angles measured by our instrument and  $\mu$ F-CT. (a)~(d) Distribution of orientation angles, (e)~(h) distribution of degrees of orientation, (i)~(k) histogram of orientation angles of the three regions.

In the three compared regions, the results of Talbot-Lau interferometer well correspond to  $\mu$ F-CT results in terms of orientation angle, its variation and its histogram, quantitatively.

この図を見ると、タルボ・ロー干渉画像装置で得られた配向角度と $\mu$ F-CTの配向角度が、全体として左右対称ではなく、(a)の左側と(b)において緑色(約300度方向)

の領域が中央に広がっている様子や、(a)の中央部と(c)において水平(90度方向)に配向した水色の領域が広がっている様子、(a)の右側と(d)ではおおよそ縦方向(0度方向)に配向した赤色の領域が多く、その中に一部桃色の領域(約30度方向)が混在している様子など、全体の配向角度の分布がよく一致しており、タルボ・ロー干渉画像装置で $\mu$ F-CTと同じ配向角度画像が大面積で得られていることがわかる。Fig. 10(e)は本装置で得られた配向度画像を、Fig. 10(f)~(h)は $\mu$ F-CTで得られた配向度画像を示しており、配向角度と同様、左右非対称な様子や、(e)の左側と(f)では左に行くほど配向度が高い領域が+Y方向にシフトする様子や、(e)の右側と(h)では配向度が高い領域が右上を中心に分布する様子など、全体の傾向がよく一致していることがわかる。またFig. 10(i)~(k)は配向角度分布のヒストグラムを(b)~(d)の各領域ごとに両者で比較した結果であり、タルボ・ロー干渉画像装置の結果と $\mu$ F-CTの結果でヒストグラムの分布がおおよそ一致しており、定量的にも対応していることがわかった。以上の結果より、繊維の配向状態が複雑なウェルドライン周辺部においても、タルボ・ロー干渉画像装置で実際の繊維の状態を可視化できることが確認できた。

タルボ・ロー干渉画像装置の場合は、10分以下と短時間の撮影・配向解析で $\Phi$ 100mmの大面積で上述の結果が得られるのに対して、 $\mu$ F-CTでは撮影と繊維配向解析で1視野(約4mm角)当たり1.5時間近くの時間を要しており、面積で約500倍、撮影・解析に要する時間で約10倍、両者を総合すると1,000倍以上効率的に、繊維の量や配向状態の分布を短時間・大面積で可視化できることがわかった。

### 3.4 繊維の絶対量の評価

次に試料内部の繊維量について評価を行った。絶対繊維量を評価する方法として、加熱をして樹脂を分解させながらその重量を精密に測定することで、樹脂の分解温度やガラス転移温度、繊維の量などを定量的に評価できる熱重量示差熱分析装置(TG-DTA)、および光学顕微鏡の画像において繊維の占める面積比を算出し、そこから繊維量を算出する方法の2つについて検討を行い、それらの結果とタルボ・ロー干渉画像装置の画像の散乱強度画像の信号値との比較を行った。なお評価はFig. 7と同じ領域で行い、試料としては、これまで評価を行ってきた繊維量28wt%の試料に加えて、別途作製した繊維量5wt%の試料の2種類を評価した。

評価結果をFig. 11に示す。縦軸は本装置で得られた信号値であり、横軸はそれぞれTG-DTAおよび光学顕微鏡画像から得られた繊維量を表す。Fig. 11(a)に示す通りTG-DTAで得られた絶対繊維量と、本装置の画像の信号値の間で原点を通るほぼ線形の関係を得ることができた。また、光学顕微鏡を使って評価したFig. 11(b)でも同様に原点を通る直線を得ることができた。先述の通り、タ

ルボ・ロー干渉画像装置で得られる散乱強度画像は同一画像内の相対的な繊維量を画像化しており、これら手法と組み合わせることで絶対繊維量も短時間に大面積で評価可能なことがわかった。

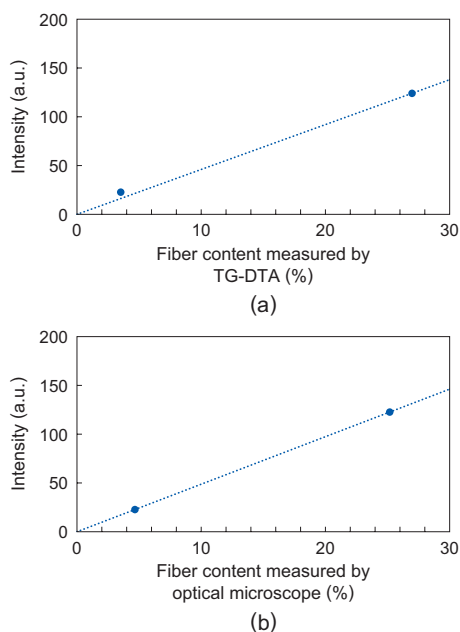


Fig. 11 Relationship between measured fiber content and signal intensity of Scattering Intensity Image of Talbot-Lau interferometer. Fiber content is measured by (a) TG-DTA and (b) Optical microscope.

Amount of fibers is measured by (a) TG-DTA and (b) optical microscope. Scattering Intensity Image visualizes the relative distribution of fibers in a measured area. Therefore, distribution of absolute amount of fibers can be calculated by using this image in a short time.

## 4 まとめ

同一のCFRP試料をタルボ・ロー干渉画像装置と、従来のマイクロ観察技術で測定し、その結果を比較した。その結果、タルボ・ロー干渉画像装置で得られた繊維の配向角度や配向度の分布は従来の光学顕微鏡や $\mu$ F-CTで観察された結果とよく一致すること、また繊維量についてもTG-DTAや光学顕微鏡画像から観察された結果と対応していることが確認でき、従来の $\mu$ F-CTに比べて1,000倍以上の効率で繊維の量や配向状態を可視化できることがわかった。これらの結果は、タルボ・ロー干渉画像装置がCFRPの繊維の量・繊維の配向状態を、従来の評価技術に比べて短時間・大面積で定量評価できることを示す結果である。本装置による非破壊検査を、CFRPを使った製品開発の様々な場面に適用していくことで、CFRP内部の繊維の状態を可視化する「見える化」、これに基づいた定量的な指標によって強度に関わる現象を理解する「わかる化」、製品の設計や製造条件を最適化する「できる化」が可能となり、材料メーカー、成形メーカー、完成品メーカーといったCFRPのサプライチェーン全体でのプロセスの革新に貢献できるものと考えている。

## ●参考文献

- 1) 寺田幸平, 精密工学会誌, vol.81, pp.485-488 (2015).
- 2) 磯貝大成 他, 第11回日本複合材料会議 (JCCM-11), 1D-10 (2020).
- 3) H. Yoshioka et al., Scientific Reports, vol.10, 6561 (2020).
- 4) 卷瀨千穂, 北村光晴, 萩原清志, “X線タルボ・ロー干渉計による非破壊検査”, Konica Minolta Tech. Rep., vol.16, pp.121-126 (2019).
- 5) A. Momose et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, pp.L866-868 (2003).