Optical Coherence Straingraphy を用いた 平織り繊維強化ゴムにおけるマイクロメカニクスの断層可視化*

坂田 義太朗^{*1}, 佐伯 壮 一^{*1}
齊 藤 俊^{*1}, 大木 順 司^{*1}

Tomographic Visualization on Micro Mechanics of Plain-Woven Fiber-Reinforced Rubber Using Optical Coherence Straingraphy

Yoshitaro SAKATA, Souichi SAEKI^{*2},
Takashi SAITO and Junji OHGI

^{*2} Applied Medical Engineering Science, Graduate School of Medicine, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

It is well-known that woven fabric composite materials have high performance. It is, however, very difficult to access their mechanical behaviours due to their complexity of microstructural morphological geometry. Authors proposed Optical Coherence Straingraphy (OCS), which could visualize micro mechanical information tomographically and nondestructively from speckle deformation between synthetic images obtained by Optical Coherence Tomography. This is basically constructed by recursive cross-correlation technique and weighted moving least square method, which can offer cross-sectional strain distribution at the resolution of micrometer scale. In this study, applying OCS to plain-woven fiber-reinforced rubbers, the micro mechanical behaviour under uniaxial tensile load was visualized as an experimental strain distribution, which was verified by the numerical results based on image-based simulation. Consequently, tomographic strain distributions calculated by OCS agreed qualitatively with the simulated ones at the resolution of micro scale. It was, therefore, concluded that OCS could provide an experimentally powerful concept for the microstructural design of composite materials, as a nondestructive visualizing tool.

Key Words: Optical Coherence Straingraphy, Strain, Micro Mechanics, Composite Material, Plain-Woven Fiber-Reinforced Rubber, Optical Coherence Tomography, Nondestructive Imaging

1. 緒 論

繊維複合材料は、強化材として繊維を織り構造の形態で利用するため、従来の積層型一方向強化複合材料に比べ変形能や引裂強度に優れることから、航空宇宙機器を始め広範な分野で使用が進んでいる⁽¹⁾。しかし、幾何学的に複雑なマイクロ織り構造を有するため、面内単軸負荷に対しても面外変形や多軸応力がマイクロスケールにて発生するため、力学的評価が困難となる問題点を抱えている。このため、数値解析に基づく力学特性評価が一般に行われており、微視的な解析モデルとして不均質体モデル⁽²⁾⁽³⁾や均質化法⁽⁴⁾などが導入され、弾性特性の評価や初期損傷の予測などが報告されている。しかし、実験的なマイクロメカニクスの非破壊計測に関しては、著者らの知る限り報告例が無く、

数値解析結果の検証も不十分と考えられる。特に、強化材と母材との界面近傍における微視的な力学挙動は、強度向上を目的としたマイクロ構造設計において不可欠な検討課題であり⁽⁵⁾、数値解析による予測に加えて実験的なアプローチが強く望まれている。

一方、医療診断機器の発達に伴い、計測対象のマイクロ断層像を非破壊取得する手法である、光コヒーレンス断層画像法 (Optical Coherence Tomography; OCT)⁽⁶⁾が開発された。OCT は近赤外広帯域光の低コヒーレンス干渉を利用し、1~10 μ m の高空間分解能にて計測対象内部からの散乱断層画像を得ることができる計測法である。著者ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は、計測対象内部のマイクロスケール力学場検出法としてひずみ断層分布計測法 (Optical Coherence Straingraphy; OCS) を提案している。これは変形前後の OCT 断層画像にデジタル相互相関処理を適用し、ひずみ分布を断層可視化する手法である。本研究では、自動車用タイヤなどに用いられる繊維強化複合材料の一種である平織り繊維強化ゴム

* 原稿受付 2009 年 12 月 21 日。

^{*1} 正員, 山口大学大学院医学系研究科応用医工学系専攻
(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。

E-mail: s-saeki@yamaguchi-u.ac.jp

Fig. 1 Proposed OCS algorithm

に OCS 法を適用し、繊維と母材の界面近傍におけるマイクロメカニクスの断層可視化を行った。有限要素法による数値解析結果を用いて OCS 実験結果の検証を実施し、複合材料に対する非破壊検査法としての有効性について報告を行う。

2. Optical Coherence Straingraphy

光コヒーレンス断層画像法 (OCT)⁽⁶⁾ は、広帯域光の低干渉性を利用した白色干渉法の一つである。一般に、医療用途のため光ファイバーにより構築されたマイケルソン干渉計やマッハ・ツェンダー干渉計が用いられている。参照鏡の光軸方向走査と照射ビームの光軸垂直方向走査により、計測対象の奥行き断層像を後方散乱光の干渉光強度分布として取得する。照射光光源には、Super Luminescent Diode (SLD) などの近赤外広帯域光源を用い、コヒーレンス長によって奥行き方向の空間分解能⁽⁶⁾が決定される。一方、光軸垂直方向の分解能⁽⁶⁾はビーム走査のため、対物レンズの N.A. に依存したビームスポット径から決定される。これらをマイクロスケールに設定することにより、被写界深度内における試料内部の形態情報を $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度の高空間分解能にて取得可能となる。奥行きダイナミックレンジは入射光に対応する各材料の光学特性により決定する。天然ゴムの場合、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 程度となる。著者らは、OCT 断層画像から力学特性分布を抽出する OCS 法を提案している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。図 1 にそのアルゴリズムを示す。OCS 法はデジタル相互相関法を基本としており、計測対象変形前後の OCT 断層画像に適用し、得られた移動ベクトル分布からひずみ分布を断層検出する手法である。局所的なスペックル・パターンの類似度を相関値 $R_{i,j}$ を用いて評価し、最大相関値を与える変位量を変形前後の移動ベクトル $\vec{U}_{i,j}$ として決定される。本手法では、検査領域を縮小しながら相互相関処理を

繰り返し、空間解像度 (stage) を高める再帰的相互相関法^{(7)~(9)}を採用している。更に、スペックルノイズの影響を受けたランダム性の強い相関値分布から正確な最大相関値を決定するため、隣接相互相関乗法 (Adjacent Cross-correlation Multiplication; ACM)⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾を導入している。なお、最大相関値周りに 2 次元 2 次多項式近似を施し、移動ベクトル量をサブピクセル精度で算出している。ひずみ分布の算出には、重み付き移動最小 2 乗法 (Weighted Moving Least Square Method; WMLSM)⁽¹¹⁾を採用している。これは、移動ベクトル分布の各成分に対し移動最小 2 乗法を用いて空間的に平滑化すると共に、微係数の安定算出を可能とする手法である。局所的な検出精度を高めるため、ガウス関数⁽¹¹⁾による重み付け処理を行っている。本実験では近似関数に 2 次元 2 次多項式を適用し、最小 2 乗法に基づいて移動ベクトル量の近似関数を決定すると共に、その微係数をひずみテンソル各成分 ε_{xx} , ε_{zz} , γ_{xz} として算出している。なお、検出移動ベクトル分布のベクトル数密度はひずみ算出精度に影響するため、再帰的相互相関法の各 stage において最大相関値を閾値として抽出したマルチスケールの移動ベクトル分布 $\vec{U}_m(x_k, z_k)$ を用意した。解析における設定などの詳細は、3.3 節及び前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾を参照して頂きたい。

3. 実験

3.1 実験装置 OCT システムと引張試験機により構成された OCS 実験装置を図 2 に示す。本システムは、高時間分解能と高位置検出精度を有する、波長走査型 OCT システム (Swept-Source OCT; SS-OCT)⁽¹³⁾を採用している。SS-OCT は、光源波長を高速走査して広帯域光源を擬似的に実現すると共に、取得される干渉スペクトル信号の逆 FFT 処理により、物体内部の奥行き情報を取得するフーリエ領域型 OCT システムである。光源に用いた波長走査型レーザ (HSL-2000, Santec) の中心波長と波長掃引範囲は、それぞれ $\lambda_c = 1330 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 110 \text{ nm}$ であり、光軸 z 方向分解能は約 $6.9 \mu\text{m}$ となる。対物レンズにはグラデュウムレンズ ($f = 60.0 \text{ mm}$) を用いており、光軸垂直 x 方向及び y 方向の分解能は約 $18 \mu\text{m}$ となる。一方、高精度引張試験機⁽¹⁴⁾を用い、計測試料の固定及び変位付加を行った。これは高精度リニアガイド・アクチュエータにより構成される試験機で、引張距離の分解能と繰り返し位置決め精度はそれぞれ $1.0 \mu\text{m}$, $\pm 1.0 \mu\text{m}$ である。また、荷重計測にはひずみゲージ式ロードセル (LVS-500GA, KYOWA, 定格容量 5.0 N) を用い、動ひずみ測定器 (DPM-712B, KYOWA) にて増幅取得している。なお、分解能と精度

Fig. 2 Experimental OCS system; AD: A/D converter, PD: Auto-balanced photo detector, RM: Reference mirror, BP: Beam scanning probe

はそれぞれ 2.5mN, ± 1.95 mN である。計測試料の材料定数に関しては小型卓上引張試験機 (リトルセンサー, JT トーシ, 定格容量 1000N) を用いて計測した。

3.2 計測試料 本研究で用いた試験片を図 3(a) に示す。図 3(b) に示すナイロン 66 平織り繊維 (レオナ LF940, 旭化成せんい, 縦 40 本/inch, 横 40 本/inch) を強化繊維として用いており, 図 3(c) のような 3 次元構造を有していることが確認できる。母材としてイソプレンゴム (NIPOL-IR2200, 日本ゼオン) を用いたが, OCT 断層計測への適用のため架橋材 (パーヘキサ 25B-40, 日本油脂) のみを使用し, 光透過性の制御を行った。また, 強化繊維と母材との接着を強化するため, ゴム系接着剤を使用し加圧加熱製造により一層の繊維強化ゴム (中国ゴム) を作成した。なお, この複合材料の弾性係数は $E_{FRR} = 58.11$ MPa であり, 20×5 mm の大きさに切り出して実験に使用した。複合材料内部の構造を把握するため, 図 3(d)(e) に示す顕微鏡画像によって試料断面を観察した。繊維束と母材はそれぞれ白色と灰色で撮影されており, 上下の顕微鏡画像は図 3(c) における断面 A (繊維束交差断面) と断面 B (繊維束非交差断面) にそれぞれ対応している。図 3(d) に示す繊維束交差断面では, 繊維束 (経糸) が試料長手方向に約 $1200\mu\text{m}$ の周期で蛇行しながら配向し, その凹部に繊維束 (緯糸) が画像面外方向に配向していることがわかる。一方, 図 3(e) に示す繊維束非交差断面では, 繊維束 (緯糸) が画像面外方向に約 $600\mu\text{m}$ の間隔で配向していることが確認できる。なお, 図 3(d)(e) の両図より接着剤が繊維束を覆うように硬化し, 繊維と母材界面近傍に約 $50\mu\text{m}$ の接着層が存在していることがわかる。界面近傍から母材にむけて黒色に変化し

Fig. 3 Test material images of Fiber-reinforced Rubber; (a) Top view, (b) Plain-woven Fabric Nylon, (c) 3-dimensional model of Plain-woven Fabric Nylon, (d) Cross-section A at the intersection between warp and weft fiber bundles, (e) Cross-section B at the non-intersection

ていることから, 接着剤が母材に $50 \sim 100\mu\text{m}$ 程度拡散していることも確認できる。

3.3 実験方法 自作したアルミ製把持用ジグを用いて計測試料を引張試験機に固定した。マイクロメータを用いて $10\mu\text{m}$ 毎に引っ張りと緩和を繰り返す, 荷重応力が線形変化する位置を伸長ゼロ点位置とした。OCT 断層画像の撮影は, ガルバノミラーを用いて光軸垂直 x 方向及び y 方向に 13.24 mm, $18\mu\text{m}$ の連続 2 次元ビーム走査を行い, y 方向 $0.6\mu\text{m}$ 毎に 30 枚連続撮影した。この断層画像に対し 3 枚毎にアンサンブル平均を施し, 10 枚の xz 断面の OCT 断層画像 (1695×384 pixel) を作成した。なお, 光軸 z 方向分解能を考慮して両実験とも画素サイズは $7.81 \times 7.81\mu\text{m}/\text{pixel}$ と設定している。 $10\mu\text{m}$ の引張変形前後の OCT 断層画像を撮影し, OCS 法を適用した。初期検査領域を 65×65 pixel と設定し, 最高解像度 (stage) が $15.6\mu\text{m}$ となるまで再帰的相互相関処理を行った。各解像度に対する相関値の閾値⁽¹²⁾を経験的に $\kappa = 0.58, 0.60, 0.67, 0.89$ と設定し, ひずみ分布算出に必要なマルチスケールの移動ベクトル分布 $\vec{U}_m(x_k, z_k)$ を作成した。これを 10 セットの OCT 断層画像から求め, 同一ベクトル場にプロットし WMLSM を適用してひずみ分布を検出した。また, 計測試料表面や繊維束と母材の境界近傍などにおける

Fig. 4 2-dimensional image of Cross-section A; (a) OCT image, (b) Illustration of warp and weft fiber bundles,

Fig. 5 2-dimensional image of Cross-section B; (a) OCT image, (b) Illustration of warp fiber bundles,

数値不安定を避けるため OCT 断層画像から試料境界を抽出し、算出移動ベクトルを境界外に折り返す処理を施した。

4. 実験結果

4.1 2次元形態断層分布 図 3(c) に示す繊維束交差断面 (断面 A) と繊維束非交差断面 (断面 B) に対する OCT 断層画像を、図 4(a) と図 5(a) に示す。OCT ビームは画像上方から照射され、 $z = 1900\mu\text{m}$ の位置における高輝度な直線は試料表面を表し、それ以下のランダムスペックルパターン ($z = 1250 \sim 1900\mu\text{m}$) は、母材 (イソプレンゴム) の散乱強度分布を表している。母材下部の波状の形態は繊維束との界面を表していると考えられ、繊維強化材を分離した母材のみを OCT 断層撮影したところ、ランダムスペックルパターンの

Fig. 6 2-dimensional strain distribution of ε_{xx} obtained by OCS ($\Delta x, \Delta z = 15.6\mu\text{m}$); (a) Cross-section A at the intersection between warp and weft fiber bundles, (b) Cross-section B at the non-intersection

領域が変化しないことを確認している。つまり、本試料に用いたゴム系接着剤の光吸収特性と繊維束の散乱減衰の影響のため、繊維束は断層画像化できなかったと考えられる。断面 A 及び断面 B における繊維束配向の様子を図 4(b) と図 5(b) に示す。図 4(b) では試料長手方向に蛇行するように経糸が配向し、緯糸が経糸凹部に接触するように画像面外方向に配向しているのに対し、図 5(b) では画像面外方向に緯糸のみが配向している。これは、両断面の OCT 断層画像 (図 4(a), 図 5(a)) における下部波状曲線の形態と対応していることが確認できる。このように、OCT 断層画像によって繊維束の形態的特徴を非破壊検出可能である。

4.2 2次元ひずみ断層分布 図 3(c) に示す断面 A と断面 B に対する OCT 断層画像に OCS 法を適用し、算出された単軸引張 x 方向ひずみ断層分布 ($\Delta x = 31.25\mu\text{m}$, $\Delta z = 30\mu\text{m}$) を図 6(a) と (b) に示す。なお、OCT 画像において母材界面を表す高輝度曲線を、ひずみ断層分布の表示限界として設定している。図 6(a) に示す繊維束交差断面から明らかなように、経糸と緯糸との接触点近傍において $+0.0003 \sim +0.0014[-]$ 程度の正のひずみの集中が検出された。引張荷重により、蛇行した繊維束 (経糸) が直線化するように変形したため、それに引き摺られるように母材も変形し、ひずみの集中が発生したと考えられる。一方、図 6(b) に

Table 1 Material parameters for isoprene rubber and fiber bundle used in numerical simulation

Parameter	Nylon fiber bundle	Isoprene rubber
E_1	4.7[GPa]	1.22[MPa]
E_2, E_3	6.12[MPa]	1.22[MPa]
G	4.89[MPa]	0.42[MPa]
ν_{12}, ν_{13}	0.36	0.47
ν_{23}	0.00047	0.47

Fig. 7 2-dimensional strain distribution of ϵ_{xx} obtained by FEM, (a) Cross-section A at the intersection between warp and weft fiber bundles, (b) Cross-section B at the non-intersection

示す繊維束非交差断面では隣接する繊維束交差断面の影響を受け、緯糸間の母材にも $+0.0001 \sim +0.0007[-]$ 程度の正のひずみが検出されている。このように、繊維束交差断面の方が非交差断面よりも2倍程度ひずみが大きく検出されていることがわかる。以上の結果から、繊維束接触点近傍における応力集中の発生予測が、非破壊的に断層検出可能であると考えられる。

5. 考 察

5.1 数値計算 OCS 法によって検出されたひずみ断層分布の妥当性を検証するために、有限要素法による数値計算を実施し、各断面に発生するひずみ分布の定性的な一致について考察を行った。図3に示す試料断面画像を参考に3次元数値計算モデルを作成した。本モデルは Uetsuji ら⁽¹⁵⁾と同様に強化繊維束 (fiber bundle) と母材 (rubber) の2種類の材料から構成される複合材料とし、簡略化のため接着層は無視している。図3に示すように平織り繊維束は約 $1200\mu\text{m}$ の周期で蛇行していることから、1周期分を数値計算モデルとした。なお、繊維束断面形状は図3(d)(e)を参考に、長軸 $303\mu\text{m}$ 、短軸 $160\mu\text{m}$ の楕円とした。上記の平織り繊維束を包含するように長さ $1200\mu\text{m}$ 、幅 $1200\mu\text{m}$ 、高さ $1460\mu\text{m}$ の領域に母材を設定した。繊維束(ナイ

ロン繊維束)を直交異方性材料、母材(イソプレンゴム)を等方性材料とそれぞれ定義し、表1に示す材料定数を使用した。ナイロン繊維束 E_1 方向弾性係数は製造元の提供値を利用し、 E_2, E_3 方向弾性係数は式(1)を用いて算出した。

$$\frac{1}{E_i} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m}, i=2,3 \quad (1)$$

E_m, E_f, V_f は、母材の弾性係数、繊維束 E_1 方向弾性係数、繊維束繊維体積含有率を表している。なお、繊維体積含有率 V_f の算出のため、図3(d)(e)に示す顕微鏡断面画像から繊維束内の任意領域を抽出し、2値化処理を施して繊維領域面積を決定した。これを複数領域にて算出し、その平均値から V_f を求めた。せん断弾性係数 G は経験的に E_2 方向弾性係数の80%と設定した。一方、母材の弾性係数は単軸引張試験による実測値を用いた。

上記の材料定数に従い、汎用数値解析ソフト (ANSYS 12.0, ANSYS Inc.) を用いて有限要素解析を行った。本実験では計測試料 10mm に対して $3\mu\text{m}$ の変形量、つまり 0.03% 程度のひずみが付加されたことから、本計算モデル ($1200\mu\text{m}$) に対して $0.36\mu\text{m}$ の変位を片端に付加し、他端を完全固定として境界条件を設定した。要素形状は3次元5節点ソリッド要素を用い、メモリの制約より要素サイズを $100\mu\text{m}$ と設定した。ここで、マクロな弾性係数を用いて本数値計算モデルの妥当性を検討した。本モデルの弾性係数を数値計算したところ 64.87MPa となり、実験結果と 10% 程度異なることがわかった。本実験試料には接着剤が使用されており、界面近傍において接着層の形成や母材への拡散も確認された。このため界面近傍においては弾性係数の分布が発生していると考えられる。これに対し、本数値計算では接着層を無視したモデルを採用することに加え、繊維束の蛇行に伴う繊維束内部の弾性係数の分布も簡略化している。しかしながら本数値計算では、OCS 法によって算出されるひずみ断層分布との定性的な一致の検討を目的とするため、本モデルを用いた考察は可能であると考えられる。

5.2 検証結果 図7に示した数値計算結果は、図3に示す繊維束交差断面(断面A)と繊維束非交差断面(断面B)における単軸引張 x 方向ひずみ分布である。なお、網掛け部は OCT 断面画像では撮影できなかった領域を示している。図7(a)から明らかなように、繊維束接触点近傍 ($x = 500\mu\text{m}$, $z = 1250\mu\text{m}$ 付近)において、局所的に $+0.001[-]$ 程度の正のひずみの集中が計算されている。Yoshino ら⁽²⁾による数値計算結果に

においても、繊維束接触点近傍においてひずみの集中が報告されていることから、本数値計算によっても同様な結果が得られたと考える。一方、図 7(b) に示す繊維束非交差断面では、隣接する交差断面の変形に影響され緯糸間に $+0.0006[-]$ 程度の正のひずみが計算され、その大きさは交差断面の半分程度であった。ここで、図 6 に示す OCS 実験結果と数値計算結果を比較検証する。前述したように両者共に、繊維束交差断面では繊維束接触点近傍において正の高ひずみが算出され、繊維束非交差断面では交差断面の約半分のひずみが検出されていることから、定性的な一致が確認できる。なお、繊維束近傍のひずみ量の定量値について、数値計算結果の方が 1.2 倍程度大きく算出されているが、これは上記した計算モデルと実験試料との整合性の問題に加え、OCS 法が 2 次元ひずみを検出していることが影響していると考えられる。これらの検証結果より、ひずみパターンが定性的に一致することに加え、各断面において異なるひずみ断層分布が検出されることについても数値計算結果に追従する見解が得られたことから、繊維束と母材界面近傍でのマイクロメカニクスを実験的かつ非破壊的に断層可視化可能であると考える。

5.3 3 次元断層表示 複合材料内部の 3 次元的な変形を観察するために、2 次元ひずみ断層分布を積層化して 3 次元表示を行った。ガルパノミラーを用い光軸垂直 x 方向及び y 方向それぞれに 2.1mm の連続 2 次元ビーム走査を行い、 y 方向 $10\mu\text{m}$ 毎に 210 枚の OCT 断層画像 ($269 \times 384\text{pixel}$) を連続撮影した。これを 5 回繰り返し撮影し、3 次元断層画像データを構築した。3.3 節に記した設定と同様に、引張変形前後に撮影した 3 次元 OCT 断層画像データに対して OCS 法を適用し、検出された 2 次元ひずみ断層分布を積層化して擬似的に 3 次元可視化表示した。図 8(a)(b) に 3 次元的な平織り構造と 3 次元 OCT 計測から得られた平織り繊維束の表面形状を示す。両図からわかるように、 $x = 450, 1050, 1650\mu\text{m}$ の位置において y 方向に緯糸が蛇行しながら配向しており、それらに交差するように $y = 0, 600, 1200, 1800\mu\text{m}$ の位置に経糸も蛇行しながら配向している。また、 $y = 300, 900, 1500\mu\text{m}$ の位置に繊維束非交差断面は存在している。図 8(c) に x 方向ひずみ分布の 3 次元断層表示結果を示す。引張荷荷に伴い、繊維束交差点近傍においてひずみが生じていることが確認できる。図 8 に示す OCS 実験結果と数値計算結果の両者において、 $z = 1230\mu\text{m}$ における x 方向ひずみ断層分布 ($\Delta x = 15.6\mu\text{m}$, $\Delta y = 20\mu\text{m}$) を図 9 に示す。図中の網掛けは繊維束の平織り構造を示しており、

Fig. 8 3-dimensional images of FRR; (a) 3-dimensional model of fiber bundles, (b) Surface configuration of fiber bundles obtained by OCT, (c) Strain distribution of ϵ_{xx} obtained by OCS

灰色部は繊維束領域を表している。図 9(a) からわかるように、繊維束接触点近傍 ($x = 650\mu\text{m}$, $y = 600\mu\text{m}$ 付近及び $x = 750\mu\text{m}$, $y = 1200\mu\text{m}$ 付近) に正の高ひずみ領域が OCS 法によって検出されていることが確認できる。一方、数値計算結果においても繊維束接触点近傍 ($x = 500\mu\text{m}$, $y = 300\mu\text{m}$ 付近及び $x = 700\mu\text{m}$, $x = 900\mu\text{m}$ 付近) に正の高ひずみ領域が計算されている。以上の結果より、 y 軸方向の計測分解能が低いためひずみ分布にばらつきが観察されるものの、数値計算結果と定性的に一致していることが理解できる。このように、提案手法の 3 次元表示は 2 次元ひずみを積層化した擬似的な 3 次元可視化法であるが、複合材料

Fig. 9 Tomographic strain distribution of xy cross-section at $z = 1230\mu\text{m}$; (a) OCS result ($\Delta x = 15.6\mu\text{m}$, $\Delta y = 20\mu\text{m}$), (b) Simulated result

内部のマイクロメカニクスを3次的に断層可視化可能であることから、その有効性を示唆できる。

複合材料では複雑な内部構造を有するため、マイクロスケールにて局所的な力学場が特徴を持ち、これがマイクロスケールに影響を与える。そのため、マイクロコピックな領域で議論することが不可欠である。実際に複合材料内部におけるマイクロメカニクスの重要性が数値計算⁽²⁾⁽³⁾だけでなく、表面ひずみ画像計測⁽⁴⁾によっても報告されている。材料内部の力学場を実験的に検出する本手法は、異種材料の界面近傍における力学状態を断層可視化可能であり、非破壊検査手法としての有用性が明示された。プラスチックを母材とした複合材料においても、使用光波長帯と母材材料との光学特性を考慮することによって、良好な OCT 断層画像が撮影可能と考えられるため、本手法の応用可能性も示唆できる。さらに、ナノテクノロジーの台頭に伴う新素材開発に向けて、本手法によるマイクロメカニクスの実験的解明は大きく貢献できると考える。

6. 結 言

平織り繊維強化ゴムに OCS 法を適用し、繊維強化材と母材との界面近傍におけるマイクロメカニクスの実験的断層可視化を行った。検出された断層ひずみ分布を数値計算結果と比較し、非破壊検査法としての有効性について評価した。その結果、繊維束交差点近傍に高ひずみ領域が両結果から検出され、ひずみ断層分布は定性的に一致していることが確認された。以上の結果から、OCS 法により複合材料内部における微小ひずみ断層分布をマイクロスケール空間分解能にて、非破壊的に断層計測可能であることが示され、複合材料の非破壊検査法として有効な実験可視化ツールとなることが示唆された。

本研究を行うに当たり、山口大学大学院理工学研究科の合田公一教授、野田淳二助教より助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) A. P. Mouritz, et al., *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.30, No.12 (1999), pp.1445-1461.
- (2) T. Yoshino, et al., *Trans of Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.59, No.566 (1993), pp.2297-2302.
- (3) T. Yoshino, et al., *Trans of Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.60, No.573 (1994), pp.1260-1265.
- (4) N. Takano, et al., *Trans of Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.61, No.585 (1995), pp.1038-1043.
- (5) N. Takeda, et al., *Journal of Society of Materials Science, Japan*, Vol.49, No.4 (2000), pp.468-473.
- (6) J. M. Schmitt, *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.5, No.4, 1999, pp.1205-1215.
- (7) S. Saeki, et al., *Trans of Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.720 (2006), pp.159-164.
- (8) S. Saeki, et al., *Trans of Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.73, No.735 (2007), pp.94-101.
- (9) D. P. Hart, *Journal of Visualization*, Vol.10 (1999), pp.1-10.
- (10) D. P. Hart, *Experiments in Fluids*, Vol.29 (2000), pp.13-22.
- (11) T. Belytschko, et al., *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.37 (1994), pp.229-256.
- (12) S. Devasenathipathy, et al., *Experiments in Fluids*, Vol.34 (2003), pp.504-514.
- (13) Y. Yasuno, et al., *Optics Express*, Vol.13, No.26 (2005), pp.10652-10664.
- (14) K. Ichihara, et al., *Journal of Neurosurgery: Spine*, Vol.99 (2003), pp.278-285.
- (15) Y. Uetsuji, et al., *Journal of Society of Materials Science, Japan*, Vol.48, No.9 (1999), pp.1029-1034.