

# レイリー散乱型分布センサを用いた FRP の成形および健全性モニタリング

## Molding and health monitoring of FRP using Rayleigh scattering-based distribution sensors

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1205055 半田 裕樹

### 1. 緒言

近年、軽量で高強度という特徴をもつ FRP は様々分野で需要が増加している。しかし、衝撃や疲労によって CFRP に生じる内部の損傷は表面からは見えないために、成形および運用中の FRP の状態を正確に把握する手法が必要とされている。現在、航空分野では超音波や X 線による検査技術が内部損傷の検査に用いられているが、機体の運用を停止する必要があるため、運用中の FRP の状態を埋め込み式の光ファイバセンサを用いてその場測定する手法が提案されている。

埋め込み式の光ファイバセンサの中でも注目を集めているのが、レイリー散乱型光ファイバひずみ分布センサである。この光ファイバセンサは、ファイバ全長でひずみの分布が測定可能なため、大型、複雑化する FRP 構造物に対しても適応可能である<sup>(1)</sup>。しかし、レイリー散乱型光ファイバセンサを用いた FRP の損傷モニタリング技術に関する研究は、まだほとんど行われていない。さらに成形中に埋め込まれた光ファイバセンサを用いることで、成形中の状態のモニタリングに代用できる可能性がある。

以上より本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布ひずみセンサを用いて FRP 成形および健全性モニタリングを行う技術の構築を織物 GFRP に光ファイバセンサを埋め込み、VaRTM 成形のひずみ測定を行った。また、損傷の生じた FRP の 3 点曲げによる表面のひずみ測定を行い、損傷同定の可能性を検討した。

### 2. 分布型光ファイバセンサによるひずみ分布測定

#### 2.1 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ<sup>(1)</sup>

光ファイバに光を入射すると、光ファイバの微小な密度ムラにより光の照射側に光が反射する。これをレイリー散乱光といい、これを、高感度の光センサにより測定している。得られた散乱光分布の空間分解能は最小で約  $1\mu\text{m}$  である。これにゲージ長の幅のウィンドウをかけて部分データを取り出し、FFT をかけて空間スペクトルを得る。そして、無負荷状態のスペクトルとの周波数のずれを、各ウィンドウデータについて調べると、周波数シフトの空間分布を得る。周波数シフトは光ファイバの長さ方向のひずみと比例関係にあるので、変換を行うことでひずみの空間分布を得ることが出来る。本研究で使用する光ファイバひずみ分布センサの測定範囲は  $1\text{m}$  から  $50\text{m}$ 、ひずみ分解能  $10\mu$ 、ひずみ測定範囲  $\pm 10000\mu$ 、最小測定ピッチ  $1\text{mm}$  でゲージ長は最小で  $1\text{mm}$  に設定可能である

#### 2.2 ひずみ集中分布の測定

用いたセンサの空間分解能は  $1\text{mm}$  であるが、ゲージ長の範囲に大きなひずみ変化がある場合は、算出されるひずみはその変動の影響を受ける。そこで、円孔板の引張試験を行い、測定可能なひずみ集中のサイズと集中ひずみの間隔を調査した。図 2.1 に単孔および試験片の寸法を示す。円孔に接するように光ファイバセンサを設置し、引張荷重を負荷してひずみ分布測定を行った。

図 2.2 に図 2.1 の円孔直径  $10$  または  $1\text{mm}$  の試験片でのべースひずみ量が  $500\mu$  の時の分布型センサで測定したひずみ分布を、FEM によるひずみ解析結果と共に示す。図 2.2(a) より、円孔直径が  $10\text{mm}$  の場合は測定した集中ひずみ分布は、FEM 解析結果とよく一致していることが明らかになった。一方で、図 2.2(b) より、円孔直径  $1\text{mm}$  の場合は、測定値が解析値から大きく下がる結果が得られた。応力集中分布のピークが鋭くなるに従って解析値と実験値の差が大きくなる理由は、 $1\text{mm}$  のゲージ長の範囲でひずみ量が平均化されるためである。しかしながらピークから外れた位置のひずみ分布については測定値と解析値は一致しており、 $1\text{mm}$  の場合でも円孔のサイズと位置の同定は可能であることが示唆された。

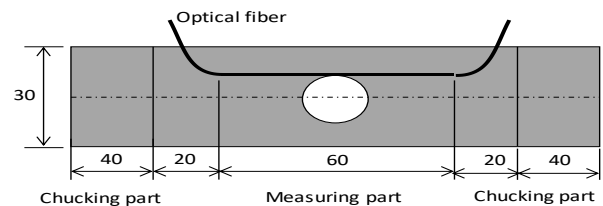


Fig.2.1 Open-hole specimen for measuring strain distribution

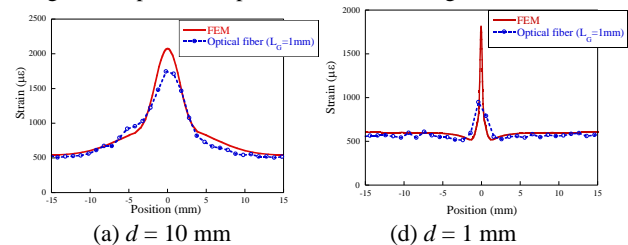


Fig.2.2 Measured and analytical strain distribution of open-hole specimens (Gauge length is  $1\text{mm}$ )

### 3. FRP 成形プロセス中のひずみ分布測定

#### 3.1 実験方法

本実験では VaRTM 法により GFRP 積層板を成形し、レイリー散乱型光ファイバセンサを埋めこんで成形中のひずみ分布測定を行った。実験には、樹脂にエポキシ樹脂を、強化繊維にガラスクロスを使用した。10 枚のガラス織物 ( $10 \times 30\text{cm}$ ) を積層し、織物の 5 枚目と 6 枚目の間の中央に光ファイバセンサを樹脂の流動方向と平行に埋め込んだ。内部の温度測定も行うため光ファイバの長さ方向  $x=1.95, 2.05, 2.13\text{m}$  の位置に、細径の熱電対を埋め込んだ。まず、樹脂の主剤と硬化剤を混合し、VaRTM 法によって繊維に樹脂を含浸させる。含浸工程の直前からひずみ分布と温度の測定を開始し、30 秒ごとに測定を行った。含浸工程終了後に、真空バッグの上に設置したヒーターによって硬化工程を行った。測定開始から 44 分後に加熱を開始し、シリコンラバー・ヒーターの温度を 60 分で  $110^\circ\text{C}$  まで昇温後に  $110^\circ\text{C}$  のまま 2 時間半温度を保持して、その後自然冷却を行った。また、低温部を作る

ために、光ファイバセンサの長さ位置 1.9~2.0m の範囲には真空バッグとヒーターの間に 5mm の厚さのシリコンシートを設置した。よって、1.9~2.0m が低音部、2.08~2.18 が高温部となる。測定終了後、ゲージ長および空間分解能を 1mm とした、測定されたレイリー散乱分布からひずみ分布の計算を行った。

### 3.2 実験結果および考察

図 3.1 に、 $x=1.95, 2.05, 2.13\text{m}$  の位置での、測定したひずみの時間履歴を示す。図 3.1 より、樹脂含浸開始から約 40 分までに圧縮ひずみが生じ、それぞれの位置で異なる極小値を示すことが明らかとなった。ヒーターによる昇温を開始していないため、樹脂の含浸プロセスにおけるひずみの変化は熱ひずみではなく、光ファイバに圧縮変形が生じたことを示している。表 3.1 に、目視観察によって得られた位置  $x=1.95, 2.03, 2.13\text{m}$  での樹脂流動表面の到達時間と、光ファイバセンサによるひずみ測定でひずみが極小値をとる時間を示す。これらの結果より、 $x=2.03\text{m}$  においてはやや精度が低いものの、極小値をとる時間から樹脂含浸時のフローフロント到達を連続的に捉えられることが明らかとなった。

それぞれの位置における昇温開始時のひずみを 0 として、さらに熱電対によって測定された温度を用いて光ファイバセンサの測定値から温度依存性の影響を除去することにより、機械ひずみを算出した。その結果を図 3.2 に示す。なお、 $x=2.05$  の中間温度における温度測定結果にはエラーが生じたため、グラフにはのせていない。グラフより硬化によってセンサおよび強化繊維が樹脂に拘束されてからの成形温度に達した後に微小な硬化収縮ひずみが見られたものの、分布センサの精度では定量的に評価は困難であることが分かる。最終的に室温冷却後に生じる成形後のひずみ値は、高温部、低温部ともに同程度となることが明らかになった。

硬化によって繊維が拘束されることで、ファイバに生じるひずみ分布の揺らぎは小さくなると予想される。そこで、任意の区間長さでの温度補正を行っていないひずみ分布形状の時間による変化を評価するため、任意時間の直前から 4 つ過去のデータまでの相互相関係数を計算し、それらの平均値を求めた。図 3.3 に、区間  $1.92\sim 1.99\text{m}$  および  $2.09\sim 2.13\text{m}$  におけるひずみ分布の相互相関係数を、時間に対してプロットする。図より、硬化開始後から相互相関係数が減少しはじめ、70 分後は 80 分付近で最小値を取り、その後、相互相関係数が一定値に近づくことが分かった。これにより、硬化進展によってひずみ分布の揺らぎが小さくなることが示唆された。しかしながら、一定値に達した時間がどちらの区間でも 120 分程度となっており、高温区間と低温区間での優位な差が見られなかった。以上より、本手法によって硬化進展の定性的な評価には使用できるものの、硬化度の算出は難しいことが分かった。この原因は、測定データにフィルタリングを行っていないため、ノイズの影響に加えて、波長の長いひずみ分布が相関係数に反映されたためであると考えられる。定量化のためにはより適切なデータ処理手法を検討していく。

## 4. GFRP 積層板の層間剥離同定

### 4.1 実験方法

本研究では、ひずみ分布測定による GFRP 積層板の層間剥離同定手法の確立を目指す。最初に、本手法の可能性を探るために、層間剥離が GFRP 積層板のひずみ分布に与える影響を調べることを目的として、FEM 解析を行った。図 4.1 に試験片の FEM モデルを示す。試験片は厚さ 0.1mm、長さ 50mm の 11 枚の GFRP プリプレグを、 $[0/90/\dots/90/0]$  と交互積層した対称積層板である。負荷条件は 3 点曲げとし、スパン幅はモデル長と同じ 50mm、負荷は 10N とした。また、二次の平

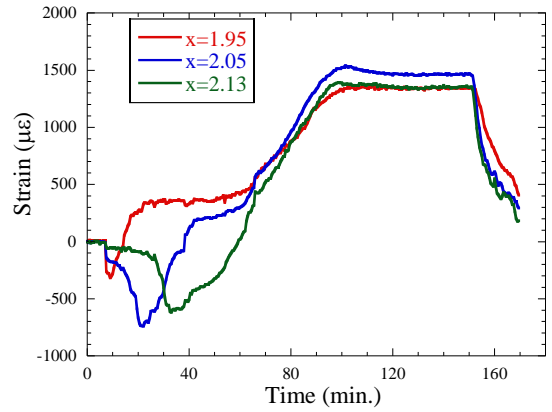


Fig.3.1 Time profile of strain at positions of  $x=1.95, 2.05$  and  $2.13$  meters measured by Rayleigh scattering-based sensor in textile GFRP during VaRTM process.

Table 3.1. Flow front of resin during impregnation process.

Position $x$ (m)	Arrival time (sec)	
	Observation	Optical fiber Sensor
1.95	480	540
2.03	1080	1320
2.13	1980	1980

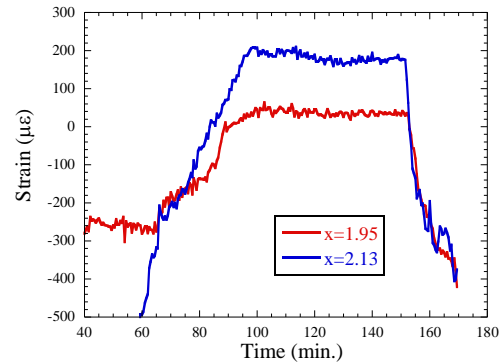


Fig.3.2 Strain histories from when degree-of-cure became 0.6 at  $x=1.95$  and  $2.13\text{m}$  with temperature compensation.

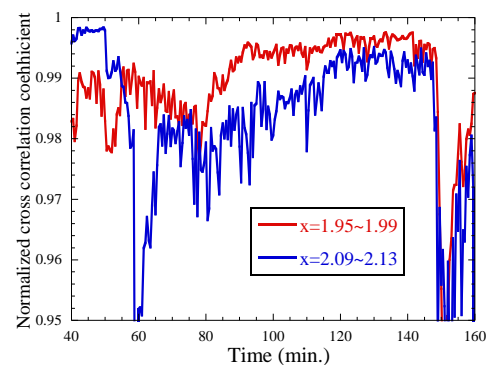


Fig.3.3 Relationship between processing time and cross-correlation coefficient of strain distribution at from  $x=1.95\sim 1.99\text{m}$  and at  $x=2.09\sim 2.13\text{m}$

面応力要素を用いてメッシュ分割を行った。表 1 に用いた GFRP のプリプレグの材料特性を示す。長さ 1cm 層間剥離を、上から 5 層目と 6 層目の層間中央位置に導入したモデル、10/11 層間に導入したモデルと、層間剥離を持たないモデルの計 3 種類のモデルを作成した。解析後、FEM モデルの下表面のひずみ分布を評価した。

その後、モデルと同様の試験片を作製し、三点曲げ試験時のひずみ分布測定を行う。ひずみ測定より得られた結果と解析結果の比較を行った。比較の際、作製した試験片と解析モデルの厚さが異なるためひずみに誤差が生じる。そのため、解析モデルの寸法が試験と同一になるように修正を行う。

#### 4.2 解析結果および考察

図 4.2 に、層間剥離を 5/6 層目中央にもつ試験片、10/11 層目に持つ試験片の下面におけるひずみ分布測定と解析結果の比較を示す。なお、層間剥離が生じていない場合との比較もおこなうため、それぞれの試験片で層間剥離を持たない場合の解析結果も図に載せている。図より、解析結果では層間剥離がない場合は一般的なはりの三点曲げによるひずみ分布になるが、層間剥離が生じると分布が大きく変化することが分かる。5 層目と 6 層目の間に層間剥離がある場合は、剥離端部においてひずみがいったん減少し、中央部では損傷がない場合よりもひずみが大きくなった。これに対して、10 層目と 11 層目に層間剥離がある場合は、剥離端部においてひずみが急激に増加し、剥離部の範囲ではほぼ一定となることが示された。すなわち、層間剥離が生じると剥離端部の位置で、表面でも大きなひずみ変化が生じ、さらに剥離部の範囲におけるひずみ分布は、層間剥離の位置によっても大きく異なることが分かる。また測定および解析結果を比較すると、ひずみに多少の誤差はあるものの、5/6 層目に層間剥離を持つ試験片では剥離端部のひずみ減少を確認することは困難であるが、解析結果とほぼ同一の結果が得られた。10/11 層目に層間剥離を持つ試験片では剥離部以外の範囲でひずみ分布が一致することが分かったが剥離部でひずみが一定にならなかった。これによって表面に接着する場合、接着の精度がひずみ分布測定に大きな影響を与えることが分かった。

図 4.3 に、図 4.2 の 5/6 層間および 10/11 層目に層間剥離を持つ試験片およびモデルのひずみ分布から層間剥離をもたないモデルのひずみ分布を差し引いた結果を示す。図より、層間剥離を持たないモデルのひずみ分布を差し引いた場合、測定したひずみ分布では確認が困難であった 5/6 層目に層間剥離が存在する場合に剥離部中央でひずみが急激に上昇するのが確認できた。一方、10/11 層目に層間剥離が存在する場合は、剥離端部でひずみが上昇し、剥離中央部でひずみが減少するのは確認が困難なもの、剥離端部でひずみが上昇することが明らかになった。これらの結果は、剥離発生によって剥離部での変位分布が大きく変動することを意味している。そこで、実際の構造物に適用する際は、損傷が存在しない状態でベースとなるひずみ分布を取得し、常にひずみ分布をモニタリングすることによって、層間剥離の発生、サイズと位置、そして負荷による剥離の進展を同定できると予想される。

以上により、分布センサを FRP に埋めずに表面に貼り付けた場合であっても、ひずみ分布から層間剥離の大きさと面内・面外における位置を同定できる可能性を見出すことができた。

#### 5. 結 言

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布ひずみセンサを用いて FRP 成形および健全性モニタリングを行う技術の構築を目指しレイリー散乱型光ファイバ分布ひずみセンサ

を用いて成形および三点曲げ荷重負荷中のひずみ測定を行った。樹脂含浸プロセスにおいて、樹脂のフローフロントを捉えられる可能性が示唆され、成形によって生じるひずみ分布から、成形時の熱成形と、微小ながらも硬化収縮を測定することができた。また、相互相関係数を評価することにより、硬化進展によってひずみ分布の揺らぎが小さくなることが示唆された。

三点曲げ荷重負荷中のひずみ測定において、層間剥離が存在する位置によって表面で測定されるひずみ分布が異なることが分かった。すなわち、ひずみ分布をモニタリングすることによって、層間剥離の発生、サイズと位置、そして負荷による剥離の進展を同定できると予想される。

#### 文献

- (1) 大越孝敬, “光ファイバセンサ” (1986), PP196-201, オーム社

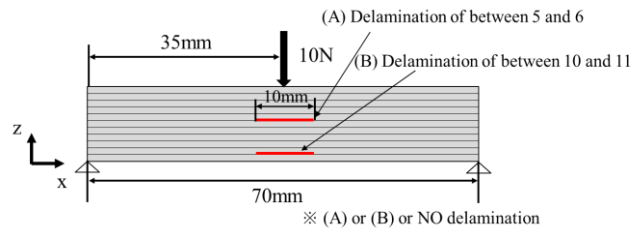


Fig.4.1 FEM model of GFRP specimen for 3-points bending test.

Table 4.1 Physical property values of GFRP prepreg.

$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$G_{xy}$ (GPa)	$G_{yz}$ (GPa)
41.6	12.9	0.33	15.6	3

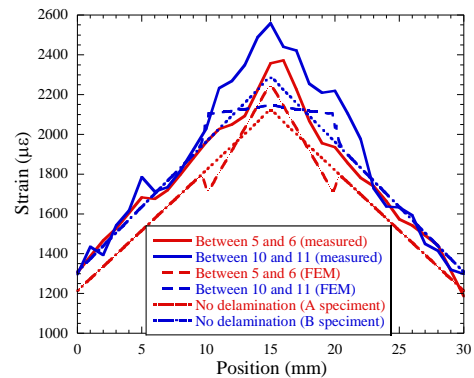


Fig.4.2 Relationship of Measured and analytical strain distribution of GFRP laminates with delamination under three point bending load.

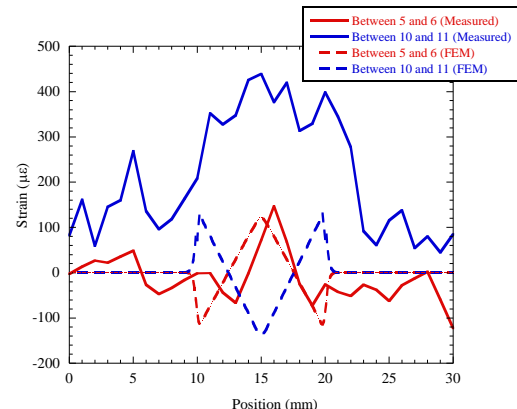


Fig4.3 Strain variation by initiation of delamination