

分布型センサによる FRP 成形の樹脂含浸プロセスモニタリング

Resin Impregnation Process Monitoring of FRP Molding by Distributed Sensor

システム工学群

機能性材料工学研究室 1190003 秋澤秀夫

1. 緒言

軽量で高強度、高剛性という特徴を持つ FRP 製品は、その応用分野の広がりとともに大型、複雑形状化し、成形工程の開発コストの上昇が問題となっている。それを解決する手法として、成形中の FRP 内部状態のその場モニタリング手法が注目されている⁽¹⁾。

FRP の成形モニタリングは樹脂含浸、硬化、冷却のそれぞれの工程でモニタリングする研究が進められている。光ファイバセンサは主として成形時の硬化ひずみ、熱ひずみを測定できることから硬化および冷却工程で使用されている。一方、含浸工程ではフローフロント検出に主として誘電測定が利用されている。光ファイバ屈折率センサもフローフロント検出に利用可能であるが、多数のセンサを要するという欠点があり、利用例は少ない。光ファイバセンサの中でも分布型センサはひずみと温度の分布情報を得ることが出来るため、含浸工程のモニタリングに応用できる可能性がある。しかし、従来の反射型分布センサは空間分解能が低く、FRP の含浸工程のモニタリングには適していなかった。

しかし近年、1mm という高い空間分解能を持つレイリー散乱型光ファイバ分布センサが開発され、これを用いることで得られたプリフォームの変形分布情報から含浸工程のフローフロント検出が可能ではないかと考えた。さらにレイリー散乱型センサは成形時の硬化ひずみ、熱ひずみを測定でき、成形後も健全性モニタリングに使用できるため、含浸工程から運用まで全てのライフサイクルのモニタリングが可能となることが期待できる。

よって本研究では、レイリー散乱型光ファイバセンサを用いた樹脂含浸工程のモニタリング手法の構築を目的として、含浸中のプリフォーム変形分布挙動を測定し、得られた分布を用いてフローフロントの検出を試みた。

2. 実験方法

2.1 レイリー散乱型分布ひずみセンサ

本研究で使用したセンサは、レイリー散乱型光ファイバ分布ひずみセンサである。この光ファイバは、光が閉じ込められるコア、それを同心円状に囲むクラッド、ポリアミド被膜から構成されており、ガラス部の直径は 0.125mm である。クラッドの屈折率をコアの屈折率よりわずかに低くすることによって、コア内部で光を全反射させ光を伝搬している⁽²⁾。コアとクラッドの不整合により、わずかに光の照射側に反射してくる光が存在し、この光をレイリー散乱光という。一ヶ所のレイリー散乱光のみでは温度およびひずみの情報を得ることができない。しかし、レイリー散乱光強度分布が持つ空間周波数スペクトルの周波数シフトから温度やひずみを得ることができる⁽³⁾。

2.2 実験方法

本研究では強化繊維にガラスクロス(平織, 目付 200g/m²)を、樹脂の代わりにシリコンオイル (KF96-500CS, 信越シリコン, 動粘度 500 mm²/s) を使用し、含浸挙動の異なる 2 種類の含浸実験を行った。ガラスクロスは 8 枚積層し、光ファイバを 4 枚目と 5 枚目の間に設置した。光ファイバをテープ

で金型の複数ヶ所に固定し、またクロスの縁では接着または縫い込みで固定した。なお、光ファイバを金型に固定した理由は、ファイバが緩まないようにするためである。その後、真空引きを行い、このときのひずみを 0 とした。シリコンオイルの含浸が完了するまで測定を行い、また含浸の様子を撮影して、得られた画像からフローフロントの位置を求めた。同様の測定を 4 回繰り返した。また光ファイバセンサのゲージ長を 1cm, 空間分解能を 1mm に設定し、2 秒間隔で測定した。

図 1 と図 2 にタイプ A とタイプ B の含浸試験の模式図を示す。なお、図中の x は光センサの長さに沿った測定位置である。タイプ A ではフローフロントが斜めになるように含浸させ、また一本の光ファイバが平行になるように取り付けられている。光ファイバは、ガラスクロスに瞬間接着剤を用いて接着した。タイプ B では、2 か所から含浸が開始するように流路を設置し、1 つの測定ラインを用意した。また、この試験では光ファイバをクロスに縫い込んだ。

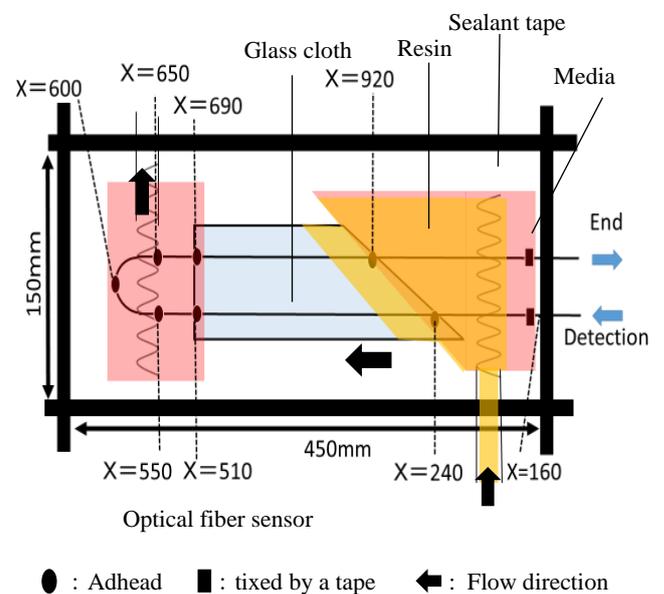


Fig.1 Experimental equipment of typeA(x:position in optical fibre sensor[mm])

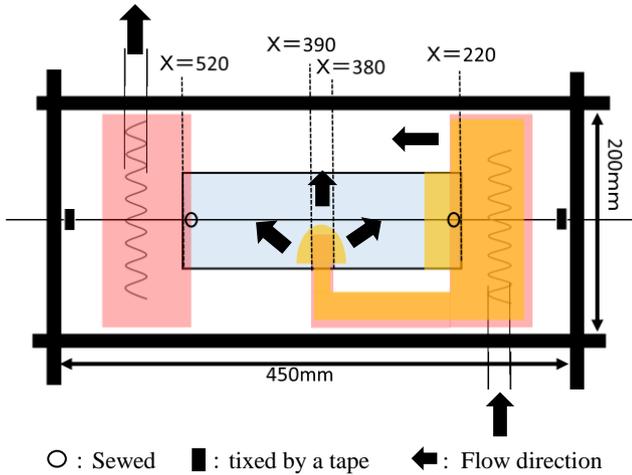


Fig.2 Experimental equipment of type B(x:position in optical fibre sensor[mm])

3. 結果および考察

3.1 プリフォーム変形挙動 (Type A)

図3にフローフロントが $x=350$ に達した時のひずみ分布を、4回の試験結果について示す。図3より、 $x=240, 920$ で大きなひずみが生じているが、これは固定部での局所変形によりひずみが乱れたためである。4回の試験は全てほぼ同等のひずみ分布を示しており、再現性が高いことが分かる。得られた分布から、フローフロントの含浸側では引張から圧縮に変化して圧縮最大値を示し、未含浸側では圧縮が急激に減少して、端部 ($x=510$) では0となることが分かる。 $x=690\sim 920$ の範囲でも、流れに対するファイバの向きが逆になるために $x=240\sim 510$ の分布と対称的な分布になるが、同様の分布が見られることが分かる。以上の結果より、フローフロント位置で急激にひずみが変わることから、ひずみ分布傾斜からフローフロント位置が得られるのではないかと考えた。

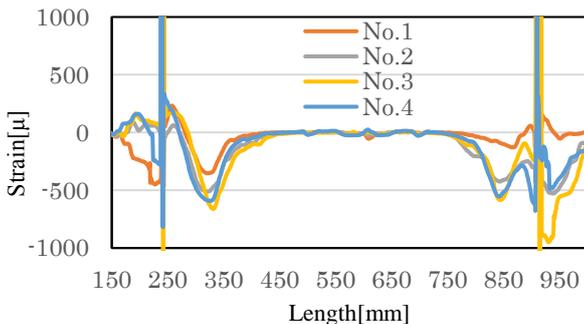


Fig.3 Strain distribution when flow-front of resin impregnated on optical fiber showing 240 mm to 510 mm was 350mm

3.2 フローフロント検出 (Type A)

図4に、測定開始から30s, 120s, 240sのひずみ分布から得た中央差分の分布を示す。240mmと920mmに現れる大きなピークは固定部の乱れによるものなので、無視する。また、エッジから1つ目のピークは固定部とフローフロント間に現れたものであり、それとは符号が逆になる2つ目のピークが注目すべきピークである。2つ目のピークは含浸が進むとともにクロス材の長さ方向に移動していることが分かる。よって、これがフローフロント位置を示していると考えられる。また、光ファイバの向きと流れ方向が同じとき、フローフロントを示すピークは正であり、逆の場合は負となることが分

かった。

図5に目視によるフローフロント位置と、検出ピーク位置の関係を示す。 $x=300\sim 450, x=850\sim 750$ では、両者の値が非常によく一致していることが分かった。しかしクロス材の端に近い $x=270, 500, 900, 700$ では誤差が比較的大きくなった。この理由は、接着によって局所的に剛性が上がり、それがひずみ分布にノイズとなって現れるためと考えられる。以上の結果より、本センサによってフローフロント検出が可能であることが分かった。

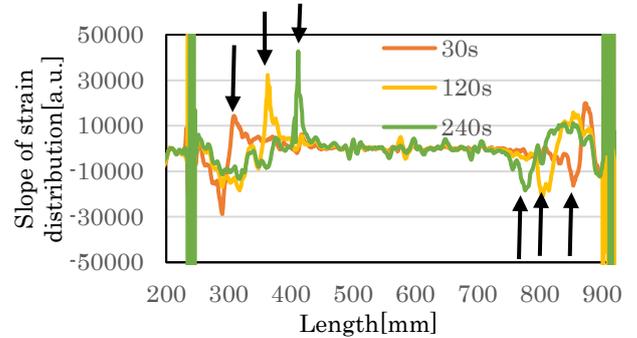


Fig.4 A graph showing the rate of change from the distortion at 30,120,180 seconds of type A

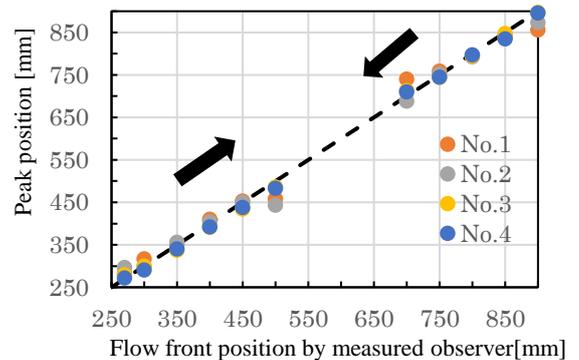


Fig.5 Detection of flow front of type A

3.3 プリフォーム変形挙動 (Type B)

図6にType B試験での時間変化における含浸挙動を示す。これより、2か所から樹脂が流入し (flow 1, flow 2)、測定位置では、120s, 180sでは含浸区間と未含浸区間がそれぞれ2つ出来る場合があることが分かる。

図7に代表的に測定開始から180sのひずみ分布を示す。図6より180s経過時にフローフロントが315mm付近、350mm付近、420mm付近の3ヶ所にあることが分かる。図より、3ヶ所のフローフロント位置それぞれでひずみが急激に変化する変化が見られ、タイプAと同様の手法でのフローフロント検出を期待できる。

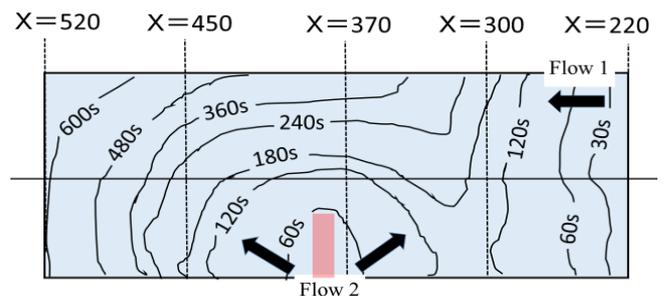


Fig.6 Impregnation behavior of type B(x:position in optical fibre sensor[mm])

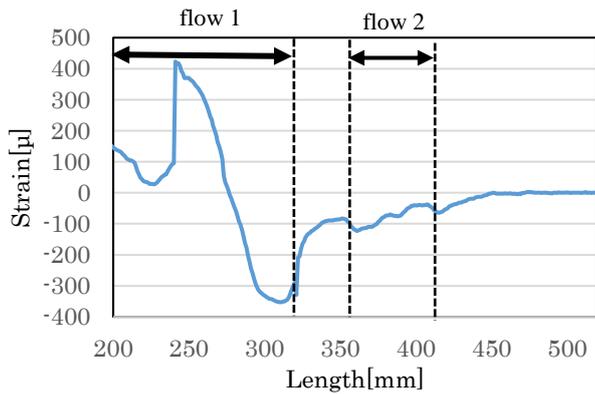


Fig.7 Distortion distribution of 180 s

3.4 フローフロントの検出 (Type B)

図 8 に得られたひずみ分布から得た中心差分の分布を示す。図より、flow 1 のフローフロント位置には正の検出ピークが、flow 2 の手前側のフローフロント位置には負の検出ピークが現れていることが分かる。flow 2 の奥行側のフローフロント位置には正の比較的小さい検出ピークが現れているが、flow 2 の含浸区間の中に複数のピークが見られることから、この分布から flow 2 の奥行側のフローフロント位置を判別することは難しいことが分かる。flow 2 のフローフロント位置でのひずみ変化が flow 1 と比べて小さくなった理由は、フローの向きがファイバに垂直に近いためと、flow 1, 2 の含浸区間の間の未含浸区間が小さいためであると思われる。flow 1, 2 が合流した後は、検出ピークが 1 つだけになる。

図 9 に flow 1 の目視によるフローフロント位置とピーク位置の関係を示す。図より、固定部付近を除いて目視観測結果と検出結果はよく一致し、フローフロント位置が flow 1, 2 の合流によって $x=330$ から $x=440$ にジャンプする様子を見ることが出来る。図 10 に、flow 2 の目視によるフローフロント位置とピーク位置の関係を示す。図から、flow 1 との合流まで、flow 1 に比べると誤差はやや大きいものの、手前側のフローフロント位置を検出できていることが分かる。

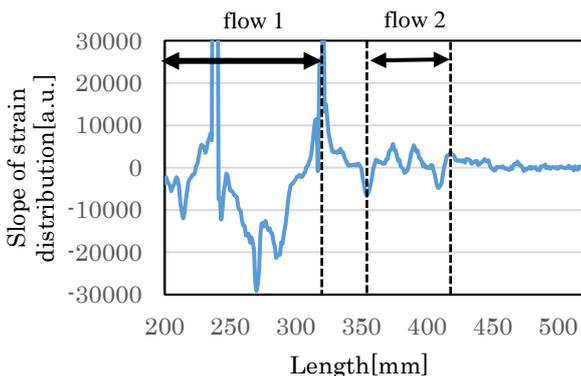


Fig.8 A graph showing the rate of change from the distortion at 180 seconds of type B

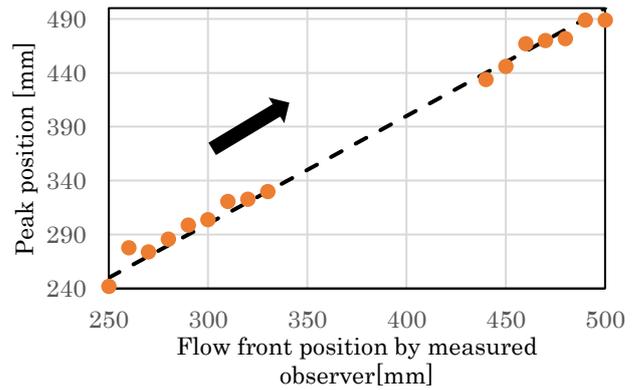


Fig.9 Detection of flow front of type B (Flow front impregnated from the end)

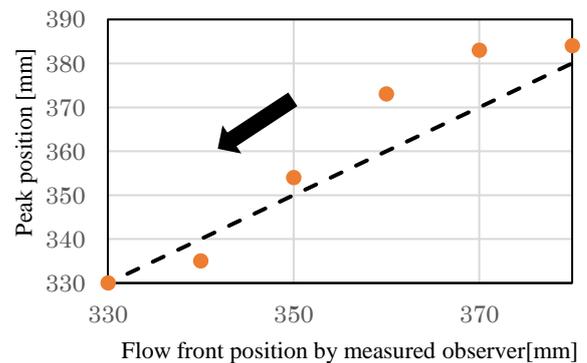


Fig.10 Detection of flow front of type B (Flow front impregnated from the center to the inlet)

4. 結言

本研究では、レイリー散乱型光ファイバセンサを用いて樹脂含浸中のプリフォーム変形挙動の測定し、その結果からフローフロントを検出する手法の構築を目的とした実験を行った。

- (1) 含浸部では膨張による引張ひずみが、フローフロント付近ではそれをキャンセルするように圧縮ひずみが現れることが分かった
- (2) フローフロント位置では、大きなひずみ変化が生じることが分かった
- (3) ひずみ分布の中央差分分布のピーク位置から、フローフロント位置の検出が可能であることが分かった。
- (4) 光ファイバを適切に配置することで、二次元流れのフローフロント位置の検出が可能である

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議 (CSTI)、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「革新的構造材料」の助成を受けたものである。

文献

- (1) 高坂達郎, ” 複合材料成形技術の最前線 3. 近年の FRP 成形モニタリング技術とその応用 ”, 日本材料学会, Vol.67, No.8 (2018), pp.819-825
- (2) 大越孝敬, ” 光ファイバセンサ ”, オーム社, 東京, 1986, pp.196-201
- (3) 保立和夫, 村上英昌, ” 光ファイバセンサ入門 ”, 光防災センシング振興協会, 2013, pp.52