

屈折率センサの埋め込み状態が FRP の硬化度測定に与える影響

1. 緒言

FRP(繊維強化プラスチック)はプラスチックを繊維で強化した複合材料であり、軽量で高強度、高剛性という特性を持っている。FRPは航空機や人工衛星などの航空宇宙分野からスポーツ用品まで幅広く運用されている。大型・複雑形状のFRP製品においては、樹脂硬化度の不均一化や樹脂特性のばらつきが生じやすい。また、樹脂の硬化プロセス中に生じる樹脂の形態変化や硬化収縮によって残留変形が生じることがある⁽¹⁾⁽²⁾。したがって、最終的な樹脂硬化度のみだけでなく、硬化プロセスをモニタリングすることも重要である。

これまで、フレネル型光ファイバセンサを用いて、三次元複雑形状に適用可能な硬化度モニタリングシステムの開発を行い、高精度で硬化度のリアルタイム測定が可能であることを示してきた⁽³⁾。しかし、VaRTM法に本測定手法を適用した場合、樹脂含浸によって光ファイバの曲げ半径や埋め込み状態が変化してしまうことで光損失が不安定になることが分かった。一方で、光ファイバに生じている損失が小さければ、変化量も小さくなるためその影響を無視することが出来ることも示された。

本研究では、VaRTM成形において埋め込み損失を低く抑えて安定した測定を実現するために、埋め込み状態が硬化度測定に与える影響を明らかにすることを目的とした。まず、初期の光損失量と、樹脂含浸中の光強度変化の関係を明らかにするための実験を行った。次に、安定性のある測定のために、埋め込み方法として光ファイバをプリフォームに編み込む手法を提案し、その効果を検証した。

2. フレネル反射型光ファイバセンサによる硬化度測定

フレネル反射型光ファイバセンサでは、測定された屈折率変化から硬化度を算出する。Fig.1に本センサによる屈折率測定の概略図を示す。光源から照射された光は、サーキュレータを通り光ファイバの端部に到達する。端部では、ガラスと樹脂の屈折率の違いによりフレネル反射が生じる。反射光は再びサーキュレータを通して受光器へと到達する。以下に示す式(1)および(2)を用いることで、測定光量から樹脂の屈折率変化 Δn が算出できる。⁽²⁾

$$\frac{\Delta n}{n_{eff} + n_s} = \frac{\eta_s(1 + \eta_s) + \eta_{air}^2 v \pm (1 + \eta_s)\sqrt{\eta_s^2 + \eta_{air}^2 v}}{1 - (\eta_s^2 + \eta_{air}^2 v)} \quad (1)$$

$$\eta_{air} = \sqrt{R_{air}} = \frac{n_{eff} - 1}{n_{eff} + 1}, \quad \eta_s = \sqrt{R_s} = \frac{n_{eff} - n_s}{n_{eff} + n_s} \quad (2)$$

$$v = \frac{\Delta I}{I_{air} - I_b} \approx \frac{\Delta I}{I_{air}}$$

ここで ΔI は反射光量の変化、 I_{air} は空気からの反射光量、 n_{eff}

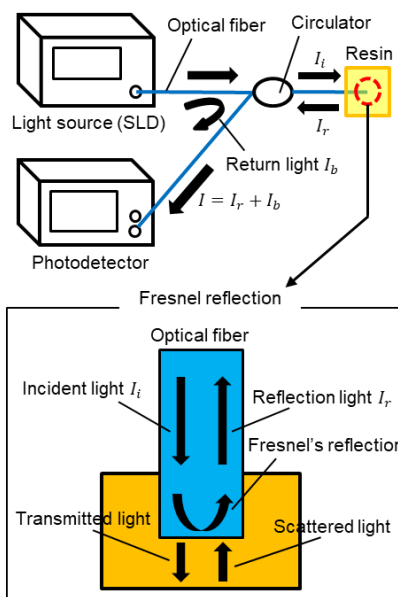


Fig.1 Schematic view of refractive index measurement by Fresnel-based optical fiber sensor

は光ファイバの有効屈折率、 n_s は基準条件（本研究では、基準温度 T_s 、硬化度0）での樹脂の屈折率を表している。硬化度は、式(1)および(2)より求められた屈折率変化曲線から、以下に示す式(3)を用いることで算出される。

$$\alpha = \frac{\Delta n(\alpha, T) - \frac{dn}{dT}(0)(T - T_s)}{\Delta n_s(1, T_0) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T - T_0)} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta n(\alpha, T)$ は硬化度 α 、温度 T の場合の屈折率変化、 $dn/dT(\alpha)$ は屈折率の温度依存を示す。

3. 初期損失が成形中の光強度安定性に与える影響

3.1 VaRTM成形における光強度変動の計算方法

これまでの研究結果から、VaRTM法の樹脂含浸工程ではFig.2の模式図に示すような光量の変化が明らかになっている。我々が提案している硬化度推定測定法で、損失に影響するのは式(2)の無次元光量 v のみである。損失量の変化が起きた場合、初期値として測定の最初に一度だけ取得している I_{air} が、使用されるべき安定した時点の値と比較して損失量の変化分 ΔI_{loss} だけ異なることになる。この光強度の変化量は、硬化度の測定誤差に大きな影響を与える。

ΔI_{loss} は、本来光ファイバのセンサ部があると想定される場

所に含浸液が到達したときの空気からの反射光量を P_A と、含浸プロセスが終了して光量が安定したときの空気からの反射光量を P_B とすると、以下の式(4)で表される。

$$\Delta I_{loss} = P_B - P_A \quad (4)$$

なお、 ΔI_{loss} が時系列測定データ明らかに認められる場合は、その変動を考慮することで変動の影響の補正が可能である。

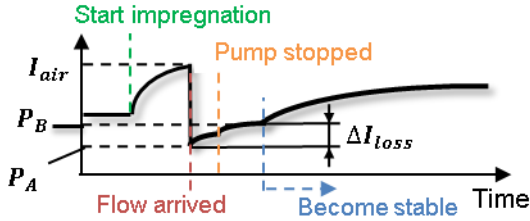


Fig.2 Schematic diagram of an optical power changing during the resin impregnation process in the VaRTM method.

3.2 実験方法

Fig.3 に示すような型と方法で、VaRTM 成形を行い樹脂含浸工程中に生じる損失量の変化率を取得した。長さ 250mm、幅 60mm の平織りガラスクロス (KS2750, 日東紡(株)、目付 100g/m²) を 10 枚積層し、光ファイバを任意の埋め込み経路で 5 枚目と 6 枚目の間に埋め込んだ。センサ部となる光ファイバの先端は含浸液が付着しないように真空パックの外に出されており、樹脂含浸プロセスが終了するまで継続して空気からの反射光量を測定している。含浸液としては、エポキシ樹脂の代替としてシリコンオイル(信越シリコン、KF-96-1000CS、粘度 1000mm²/s、信越化学工業(株))を使用した。

3.3 実験結果および考察

Fig.4 に、真空引き時の初期光損失量と樹脂含浸工程で生じる光量の変化率 $\Delta I_{loss}/P_A$ との関係を示す。また、初期光損失量は光ファイバをプリフォームに埋め込み真空引きを行った時点で生じている損失として定義している。なお、図中のエラーバーは最大値、最小値を示している。図から、初期損失が大きくなると含浸工程での光量変化も大きくなる傾向があることが分かった。初期の損失が 1dB であれば光依存変化率は 10%、2dB であれば 12% となった。また、初期損失 3dB 以上では、光強度変化率は非常に大きくなり、初期損失 5dB 以上では最大の変化率が 50% に達することがあった。

光強度変化率は式(2)における I_{air} の変化率であり、硬化度とは非線形な関係があるものの、硬化度の誤差と同程度になる。よって、初期損失が大きくなるほど硬化度測定の安定性が大きく低下することが明らかになった。これらの結果から実用の際には初期損失が 2dB 以下、精度が求められている測定においては 1dB 以下に光ファイバを埋め込むことが推奨される。

4. センサの編み込みによる樹脂含浸工程の光強度変化への影響

硬化度測定の安定性が低下する原因として考えられることは、プリフォーム間に埋め込んだ光ファイバセンサによる復元力や樹脂含浸によって光ファイバセンサの曲げ半径や埋め込みの状態が変化することによるものである。そこで、光ファイバセンサの埋め込みを行う際にセンサをガラスクロスのプリフォームに編み込むことで、樹脂含浸工程の光ファイバの埋め込み状態の変化が抑えられて、初期損失が大きい場合でも光強度変化の抑制が可能ではないかと考えた。

4.1 実験方法

長さ 250mm、幅 60mm の平織りガラスクロス (KS2750, 日東紡(株)、目付 100g/m²) を 10 枚積層し、光ファイバをプリフ

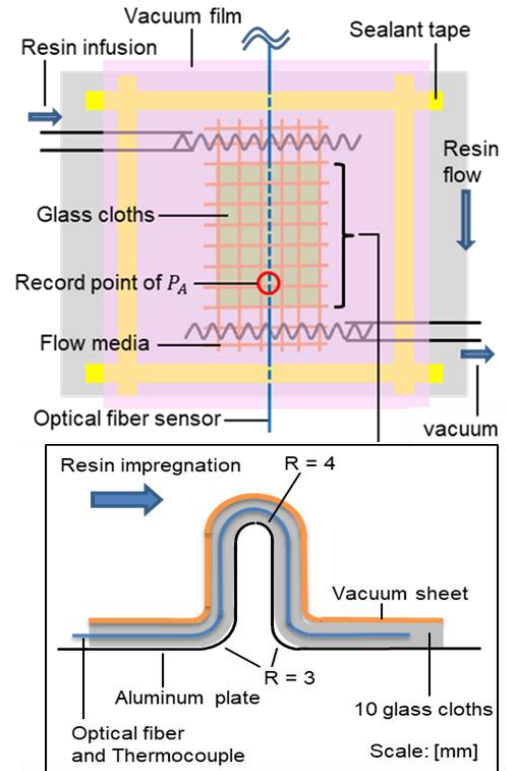


Fig.3 Schematic view of experimental set-up by VaRTM method for measuring optical bending loss change rate during resin impregnation process.

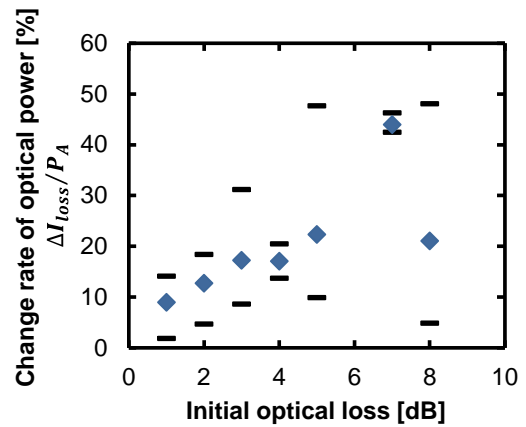


Fig.4 Relationship between the change rate of optical power during resin impregnation process and the initial optical loss.

フォーム 5 枚目にセンサを編み込んだ(編み込み間隔は 1 cm)。本実験で初期光損失の測定を行ったところ、7.04dB であった。なお、含浸工程の光測定方法は、3 節の実験と同様であった。

4.2 実験結果と考察

Fig.5 に、測定された含浸工程における光強度の時系列変化を示す。図中の緑色線はシリコンオイルがセンサ先端に到達したとき、橙色線はポンプ停止時を示す。図より、 $P_A=49.7\mu\text{W}$ 、 $P_{\text{pumpStop}}=46.5\mu\text{W}$ 、 $P_B=47.3\mu\text{W}$ となることが分かった。これより、含浸工程の光強度変化率は $P_A/P_B=5.07\%$ となった。3 節では、初期損失が 7dB の埋め込みでは誤差が 50% 近くあったが、それに比べると今回の光ファイバを編み込んだ場合は変化率が非常に小さくなることが分かった。これは、光ファ

イバを編み込んだことで、光ファイバの動きが拘束されたためであると考えられる。

また、図の 500s 付近からポンプ停止まで光量が低下していることが分かった。これは、樹脂含浸によって一度損失が小さくなるものの、真空引きによってプリフォームが型に押しえつけられて、結果として再び曲げ半径が小さくなるように変形したものと思われる。

以上から、光ファイバをプリフォームに編み込むことで 2 次元上の動きを制限することで、含浸工程の光量の変化量は安定することが分かった。

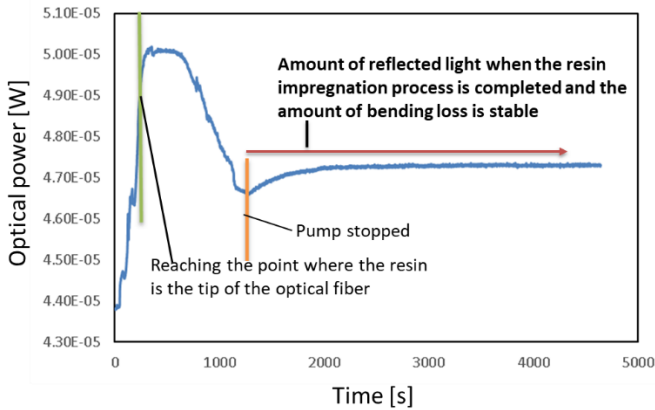


Fig.5 Changes in optical power during the resin impregnation process in VaRTM(initial optical loss: 7.04 dB, fiber optics woven into preform).

5. 結言

本研究では、VaRTM 成形時に生じる初期損失を低く抑えて安定した測定を実現するために、埋め込み状態が硬化度測定に与える影響について調査を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 安定した硬化度測定を行うためには初期損失が 2dB 以下に光ファイバセンサを埋め込むことが適している。また、高精度の硬化度測定を望む場合、1dB 以下に埋め込むことが推奨される。
- (2) センサをプリフォームに編み込むことで、センサの動きが拘束され、樹脂含浸工程中の光量の変化量がより安定することが明らかとなった。

参考文献

- (1) M.R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, and K.D. Potter, *Composites Part A*, **37**, pp.522-529, (2006).
- (2) L. Mezeix, A. Seman, M.N.M. Nasir, Y. Aminanda, A. Rivai, B. Castanié, P. Olivier, and K.M. Ali, *Composite Structures*, **124**, pp.196-205, (2015).
- (3) 藤岡玄紘, 高坂達郎, *日本複合材料学会誌*, **47**, pp.116-125, (2021).