

1. 緒言

本研究では、FRP 硬化度測定システムの測定精度の改良を最終的な目的とし、硬化度を算出するプロセスを確立するためにいくつかの実験を行った。まず、エポキシ樹脂の初期屈折率測定法を確立するための実験を行った。次に、測定時の曲げ損失の小さい高屈曲光ファイバを用いたGFRPプリプレグの硬化度測定手法を提案し、その有効性を確認するための実験を行った。

2. 光ファイバ屈折率測定手法

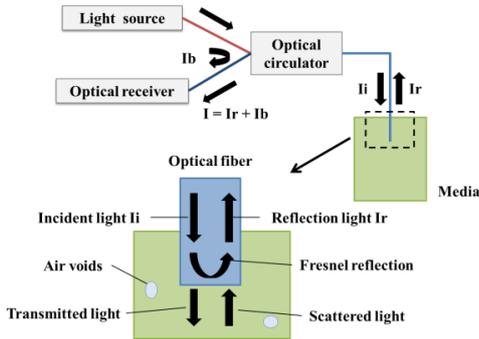


図 1. 光ファイバ屈折率測定手法

図 1 に光ファイバ屈折率測定手法の概略を示す。光源から出た光はサーキュレーターを介して樹脂に入射する。光ファイバ端部において、ガラスと樹脂の屈折率の違いによりフレネル反射を起こす。反射光は受光器に送られ、光量を計測する。計測された光量より、式(1)を用いて樹脂の屈折率変化  $\Delta n$  を、式(2)を用いて硬化度  $\alpha$  を算出する。

$$\Delta n = \frac{b_1 (a_1^2 b_2 (b_1 + b_2) + a_2^2 b_1^2 v \pm a_1 (b_1 + b_2) \sqrt{a_1^2 b_2^2 + a_2^2 b_1^2 v})}{a_1^2 (b_1^2 - b_2^2) - a_2^2 b_1^2 v} \quad (1)$$

$$n_{eff} + n_{ref} = a_1, \quad n_{eff} - n_{ref} = a_2, \quad n_{eff} + n_s = b_1$$

$$n_{eff} - n_s = b_2, \quad v \approx \frac{\Delta I}{I_{air}}$$

$$\alpha = \frac{\Delta n(\alpha, T) - \frac{dn}{dT}(0)(T - T_s)}{\Delta n(1, T_0) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T - T_0)} \quad (2)$$

ここで、 $n_{eff}$  は光ファイバの有効屈折率、 $n_{ref}$  は参照メディアの屈折率、 $n_s$  は基準条件（本研究では、基準温度  $T_s$ 、硬化度 0）での樹脂屈折率、 $\Delta I$  は反射光量変化、 $I_{air}$  は空気からの反射光量を示す。 $\Delta n(\alpha, T)$  は硬化度  $\alpha$ 、温度  $T$  における屈折率変化、 $dn/dT(\alpha)$  は屈折率の温度依存性、 $T_0$  は各パラメータを実験結果から求めた時の参照温度である。

3. エポキシ樹脂の初期屈折率測定

以前の研究では、エポキシ樹脂の  $n_s$  導出に使用する初期屈折率  $n_0$  を 1.49 としてきた。しかし、樹脂の屈折率は温度や使用波長によって異なるために、この値は正確ではない。そこで、空気に加えてエタノールを参照メディアとすることにより、反射率の関係から樹脂の屈折率を求める手法を提案し

た。

室温 25°C における主剤のみ、主剤+硬化剤の硬化前の屈折率をそれぞれ求めた。表 1 にその結果を示す。表より、測定された屈折率の差がほとんどないことがわかる。これより、本手法によって正確な屈折率  $n_0$  を得ることができていることが分かった。

表 1. エポキシ樹脂の初期屈折率

エポキシ樹脂	初期屈折率
主剤のみ	1.5075
主剤+硬化剤(試験 A)	1.5059
主剤+硬化剤(試験 B)	1.5076

4. 高屈曲光ファイバを用いた硬化度測定の比較実験

本研究では、GFRPプリプレグを10枚積層し、初期温度約 20°C から 200°C まで 2°C/min または 3°C/min の昇温速度で成形した。また、繊維方向に光ファイバセンサ、および熱電対を埋め込んだ。標準光ファイバと高屈曲光ファイバそれぞれの光ファイバを用いて硬化度測定実験を行い、得られた硬化度曲線を比較する。

図 2 に昇温速度 2°C/min、3°C/min における標準光ファイバ (STD) と高屈曲光ファイバ (BI) の測定で得た硬化度曲線の比較を示す。図より、硬化度を測定するという点において、標準の光ファイバと同様に高屈曲光ファイバを使用可能であることが明らかになった。

5. 結言

本研究では、以下の知見を得た。

- (1) 空気とエタノールの参照により、エポキシ樹脂の初期屈折率を実験により導出できた。
- (2) 高屈曲光ファイバを FRP 硬化度測定に、標準的な通信用光ファイバと同様に使用可能であることが確認できた。また未硬化領域におけるノイズを大幅に軽減されることがわかった。今後は、曲率の大きい曲面を有する FRP 成形での硬化度測定を行っていきたい。

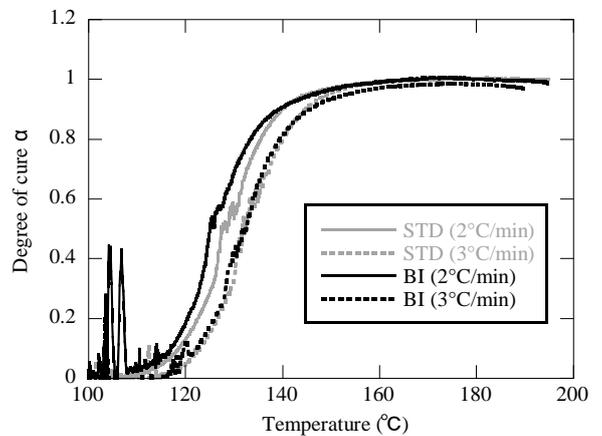


図 2. GFRP 積層板の硬化度曲線（標準および高屈曲光ファイバ）