

FRP プリプレグ用硬化度測定システムの開発

論文要旨

機能性材料工学研究室 出口 洸二

1. 緒言

FRP 複合材料の最適な成形条件の探索には多くの試行回数を必要とする。そこで、より効率的な最適成形条件の探索手法が求められている。我々はこれまで、埋め込み光ファイバセンサを用いて熱硬化 FRP プリプレグのその場硬化モニタリング手法に関して研究を行ってきた。その結果、材料内部の硬化度曲線を得られることが示されている。しかしながら、プリプレグの樹脂が熔融するまでに生じる大きなノイズの影響によって、リアルタイムでの硬化度測定は行えていなかった。本研究では、ノイズの影響をフィルタリング処理によって取り除くことにより、硬化度のリアルタイム測定システムの構築を試みた。

2. リアルタイム硬化度測定システムの構築

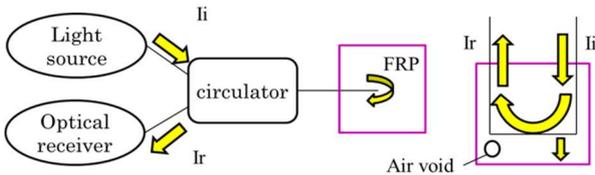


Fig.1 Refractive index measurement using optical fibers

図 1 に光ファイバ屈折率測定法の概略を示す。光源から出た光は光ファイバを介して樹脂中に入射され、フレネル反射光量より、光量を計測する。計測された光量より、屈折率変化 Δn を算出し、式(1)を用いて硬化度 α を算出する。

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

ここで、 $\Delta n(\alpha, T)$ は屈折率 α 、温度 T における屈折率、 $dn/dT(\alpha)$ は硬化度 α の樹脂屈折率の温度依存性、 T_s は基準温度、 T_0 は各パラメータを求めた時の参照温度を示す。

硬化開始前の大きなノイズは、測定精度に大きな影響を与える。よって、リアルタイム測定を行うためにはこのノイズを除去しなくてはならない。図 2 に、本研究で提案するシステムのブロック図を示す。まず、光出力 I からカットオフ周波数 f_c のベッセルフィルタ (LPF) を使用してノイズを除去した。実験より、低域カットオフ周波数 f_c は 0.01Hz、時間幅は $dt=2/f_c$ とした。時刻 $t=0$ における光量から I_{air} を、 T_s における光量から I_s をそれぞれ求めておく。成形温度が基準温度に達した後、式(1)を用いて硬化度を算出する。 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 T_s での屈折率を示す。

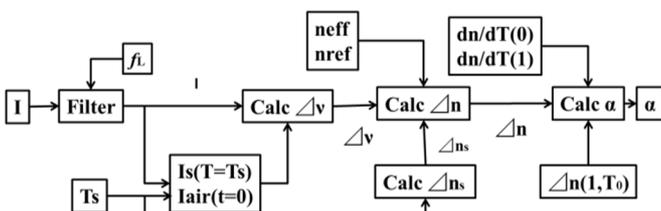


Fig.2 System diagram for calculating degree of cure in real-time

3. 結果および考察

本研究では、GFRP プリプレグを一方向に 10 枚積層し、加熱加圧プレス成形を行って試験片を作成した。5°C/min, 3°C/min, 2°C/min, 1°C/min, 0.5°C/min の温度パターンを用意し、初期温度から 200°C まで昇温させ、その後完全硬化させるために 1 時間の温度保持を行った。また、光ファイバセンサおよび熱電対を繊維方向に埋め込んだ。得られたデータに対して、リアルタイム硬化度測定プログラムを適用する。

図 3 にノイズフィルタを通さずに求めた硬化度曲線を、図 4 にリアルタイム測定プログラムを適用した硬化度曲線を成形温度に対して示す。図 3, 図 4 共に 90°C を T_s として硬化度を算出している。本研究で開発したリアルタイム硬化度測定プログラムにより基準温度でのノイズが除去されたため、硬化度にはノイズの影響は現れず硬化度の算出が行えた。

図 4 の結果を見ると、昇温速度 3°C/min では、基準温度付近でフィルタでも除去できない大きな変動が生じていることが分かる。基準温度付近で大きな変動が生じれば、それが精度に大きな影響を与える。よって、ノイズフィルタではカットが困難な大きな変動をカットできる手法が必要である。

最終的な硬化度の値は 0.95-1.05 となっており、温度条件によっては 1 となっていないものがある。これについては、反射光量の測定手法の精度に依存するため、測定手法を工夫することによって、より精度を向上させていきたい。

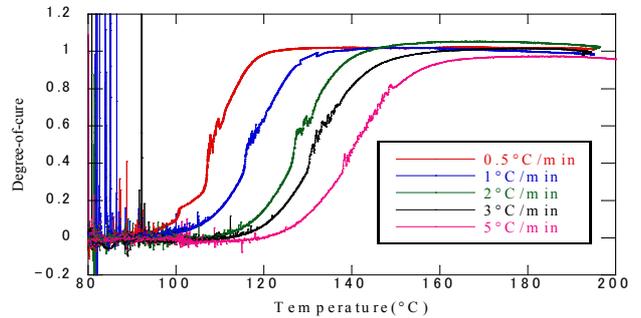


Fig.3 Original degree-of-cure curves of GFRP laminates

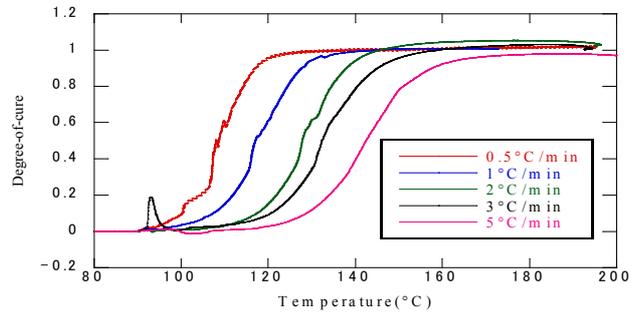


Fig.4 Filtered degree-of-cure curves of GFRP laminates

4. 結言

本研究では、計測された光量にノイズカットを施すことによって T_s の値を定め、リアルタイムで硬化度を算出するプログラムを構築した。その結果、リアルタイム硬化度測定プログラムを用いることにより、リアルタイムで硬化度を算出できることがわかった。

今後の改善点として、基準温度付近に生じた、フィルタでも除去できないノイズを除去する手法を導入したい。