

1. 緒言

大型で複雑な FRP 複合材を成形する際、温度分布が不均一になるため、硬化度も不均一になるという恐れがある。効率的な最適成形条件の探索手法として、熱化学反応モデルと有限要素法を用いたシミュレーション手法があるが、シミュレーションのみでは信頼性が不足する。そこで、光ファイバセンサによる硬化度モニタリング手法と組み合わせることで、信頼性の高い成形条件の最適化手法を構築することが出来るのではないかと考えた。本研究では、熱分析と光ファイバ屈折率測定により硬化度曲線を求め、得られた結果を比較検証した。

2. 実験方法

本研究では、厚さ $120\ \mu\text{m}$ の GFRP プリプレグ (GE35 2 G135SB, 三菱レイヨン) を使用した。また、 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$, $1^\circ\text{C}/\text{min}$, $2^\circ\text{C}/\text{min}$, $3^\circ\text{C}/\text{min}$, $5^\circ\text{C}/\text{min}$ の 5 種類の昇温速度パターンを用意した。DSC 測定では、昇温速度毎の実験データから硬化度曲線を求めた。また、得られたデータより、Kamal モデルを用いた熱硬化反応の熱化学モデルを作成した。光ファイバを用いた屈折率測定では、積層したプリプレグの間に、光ファイバセンサ、及び熱電対を繊維方向に埋め込み、真空引きをして、硬化モニタリングを行った。

3. 実験結果及び考察

図 1 に、熱分析による昇温速度毎の硬化度曲線を、得られた熱化学モデルによるシミュレーションの結果と共に示す。昇温速度が速くなると、硬化開始温度と硬化終了温度が共に増加していることが分かる。計算結果は実験結果とよく一致しており、作成したモデルが妥当であることがわかる。しかし、昇温速度 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ の時は、モデルによる推定精度が悪くなっており、あらゆる硬化速度に対応するモデルではなく、より精度を高めるためには、温度一定条件での硬化度曲線が必要だろう。

図 2 に光ファイバ屈折率測定法によって得られた昇温速度毎の硬化度曲線を示す。図 1 と同様、昇温速度が速くなると硬化開始温度と硬化終了温度が共に増加しており、両者は定性的に一致していることが分かる。しかし硬化開始前後では、ボイドによる散乱光の影響で、挙動が不安定になっている。

図 3 に、横軸に光ファイバ屈折率測定法により求めた硬化度を、縦軸に熱分析により求めた硬化度を取った曲線を、昇温速度毎に示す。図に示す 5 つの曲線がほぼ一致すれば、昇温速度に依らず精度の高い硬化モニタリングが行える。図より、互いの誤差は大きいものの、1 つの関係式で表すことができると思われる。しかし、 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ や $1^\circ\text{C}/\text{min}$ では他のデータと比べると誤差が大きいことがわかる。差が生じる原因として考えられるのは、DSC との測定方法の違いであると思われる。熱分析は少量の試料で測定するため、温度が均等に伝わるが、光ファイバ屈折率測定ではホットプレス機で FRP を成形するため、温度分布が不均一になる可能性がある。また、DSC 測定では無拘束でプリプレグを硬化させているが、光ファイバ屈折率測定では、プレスによる拘束と、真空バッグによる拘束があるため、その拘束が誤差に影響を与えている可能性も考えられる。

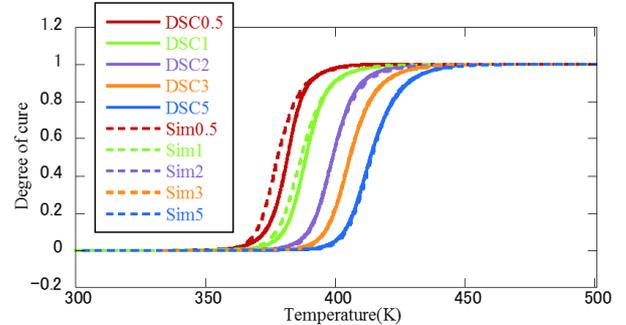


図 1 熱分析による GFRP プリプレグの実験およびシミュレーションの硬化度曲線

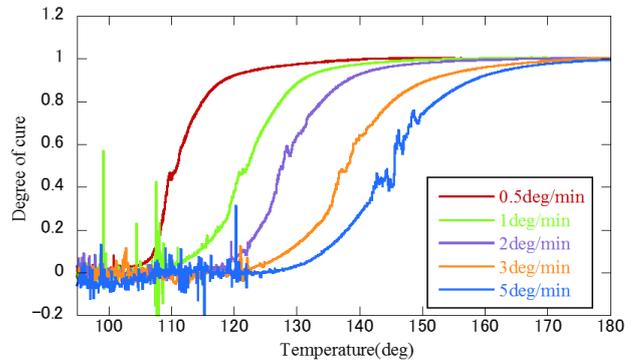


図 2 光ファイバ屈折率測定による GFRP プリプレグの硬化度曲線

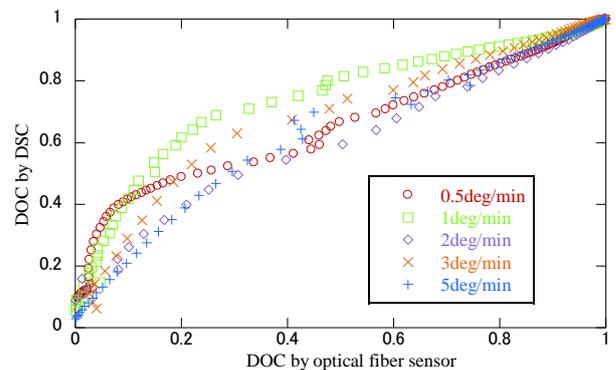


図 3 熱分析および光ファイバセンサによる硬化度測定の比較

4. 結論

本研究では、DSC 測定により求めた硬化度と、光ファイバ屈折率測定により求めた硬化度の比較検証を行った。熱分析結果より、精度の良い熱化学モデルを得ることができ、屈折率センサを用いた測定結果より、熱分析による硬化度を推定できる可能性が示唆された。今後の目標としては、光ファイバセンサを用いた硬化度測定の精度を向上させ、熱化学モデルを用いたシミュレーションと組み合わせた手法を開発していきたい。