

卒業論文要旨

FRP プリプレグの光ファイバ硬化度測定における雑音の原因に関する研究

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1200092 津田 直季

1. 緒言

航空機の胴体や翼などの大型 FRP 成形品は、一般にプリプレグと呼ばれる成形中間材料を用いて製造される。大型、複雑な FRP 成形では硬化度にムラが生じやすく、それが品質を低下させる。そのため、最適な成形条件を求めなくてはならない。従来これは試行錯誤によって行われ、開発コストが高くなるという欠点があった。そのため、最適な成形条件の探索を効率化する手法として、リアルタイム硬化モニタリング技術が注目されている。

この手法の中でもフレネル反射型光ファイバセンサは埋め込みが容易で FRP 内部の硬化度をリアルタイムかつ高精度で得ることが出来る。しかし、このセンサをプリプレグ成形に適用する場合、測定値に雑音が生じて測定精度が悪くなる場合があることが確認されている。

本研究では、FRP プリプレグの硬化度測定で生じる雑音の原因を明らかにすることを目的として、実験を行った。

2. フレネル反射型光ファイバセンサを用いた硬化度測定

図 1 に、本研究で用いた硬化度測定法の概略を示す。広帯域光源からの光は、サーキュレータを介して測定用光ファイバへと入射し、その反射光を光検出器および光スペクトラムアナライザで測定する。仮にボイドなどの散乱体がセンサ先端付近に存在する場合、散乱光が光ファイバに再入射してフレネル反射光に加わり、ノイズの原因になることが考えられる。また、散乱光はスペクトル形状に大きな影響を与えるため、スペクトルから散乱の程度を知ることが出来る。受光器で測定された光量から光の屈折率を求め、屈折率変化を硬化度に換算する。¹⁾

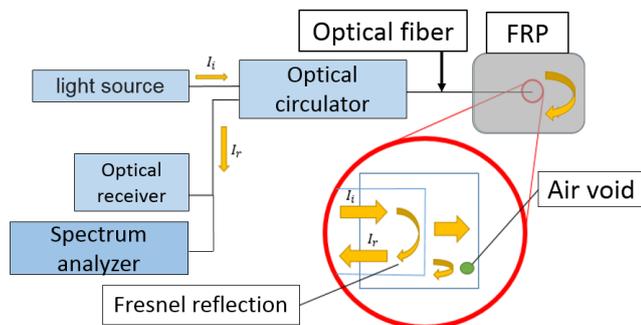


Fig1. Schematic view of refractive index measurement by Fresnel-based optical fiber sensor.

3. CFRP プリプレグの硬化度測定

本研究では、CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル(株))を用いて一方向積層板のホットプレス成形を行い、硬化度を測定した。まず、10 枚積層の中間にセンサを埋め込み、計測を 3 回行った。積層後に真空バッグ処理を行い、220℃まで 3.0℃/min、105℃で 0.5MPa の条件で加熱・加圧成形を行った。

図 2 に成形時の硬化度と温度の関係を示す。図中の曲線 A を見ると、110℃付近から硬化反応が始まり、125℃を超えると反応が加速し、140℃付近から反応が緩やかになったことが分かる。これは典型的な硬化進展の振る舞いである。

一方で、曲線 B と C を見ると 165℃で硬化が完了せず、曲線 A とは約 15%の誤差が生じていることが分かる。また、硬化度 0.5~0.7 付近で硬化度曲線にノイズが見られており、

このノイズが測定精度を低下させていると予想できる。この発生原因としては、光損失量の変化や、反射光とボイドからの散乱光との干渉が考えられる。

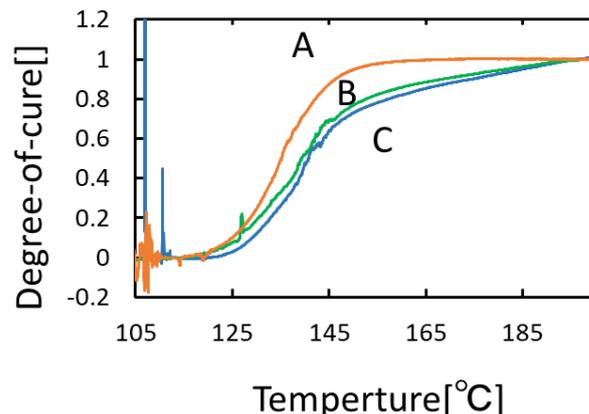


Fig2. Degree-of-cure of CFRP v.s. molding temperature

4. 実験方法

硬化度測定時に生じるノイズの原因を探るために、成形時の光量損失の変化と、反射光と散乱光との干渉の度合いを調べた。

4.1. 加圧に起因するファイバの光量損失測定

加圧によって試験片に埋め込まれたファイバの変形によって光量損失が変化するかどうかを調べるため、以下の実験を行った。

図 3 のように光ファイバの先端がプリプレグの外になるように中間層に埋め込み、成形中の真空からの反射光量を測定して、光損失の変化を求めた。

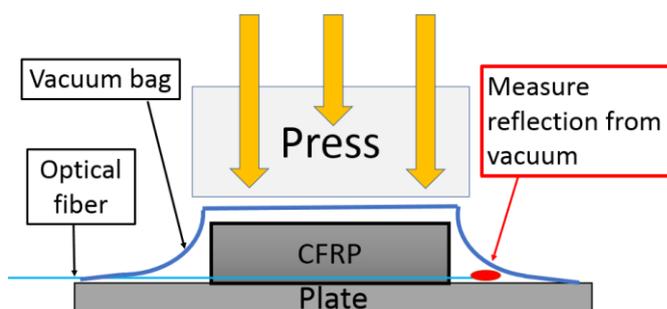


Fig3. Experimental set-up for measuring optical loss of embedded optical fiber in CFRP during hot-press molding.

4.2. 反射光と散乱光との干渉度合いの測定

プリプレグ内部の樹脂が溶融した時にプリプレグ内のボイドが樹脂間を移動、ファイバ端面に付着することで散乱光が発生し、ノイズの原因となっている可能性がある。よって、この影響を明らかにするために反射スペクトル測定を行った。

また、ファイバ先端付近にボイドが発生する原因として、光ファイバの皮膜内部から外気が流入する可能性が考えられる。そこで、図 4 に示すように、ファイバの皮膜ごと埋め込む場合 (図 4(a)) と、皮膜を剥がした部分を埋め込む場合

(図 4(b)) の 2 通りの構成を用意した。さらに温度条件として、等速昇温 (Lamp) に加えて 2 段階昇温 (2 step; Lamp) の途中、110°C で 1 時間保持) の温度パターンを用意した。

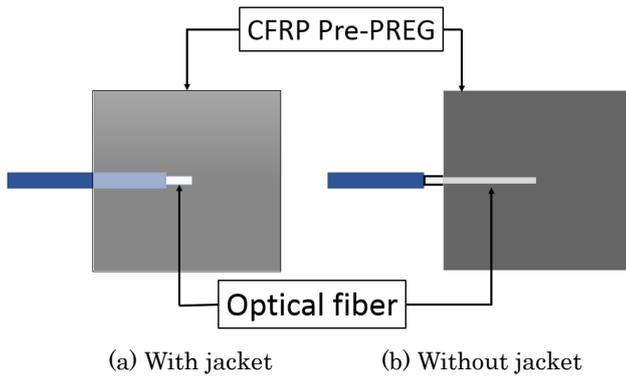


Fig4. Two configurations of embedding optical fibers.

5. 実験結果および考察

5.1. 加圧による光量損失

図 5 に、成形中の光量損失と成形温度の関係を示す。また、図中に加圧および減圧を行った温度を矢印で示す。図より、加圧によって損失が生じ、減圧によって損失が戻ることが分かった。しかしその値は約 0.5% と非常に小さく、光量測定に対し、ノイズを発生させるほどの影響を与えるものではないことが分かる。なお、光損失が温度に対して線形的に変化しているのは、測定の温度依存性のためである。以上より、加圧によるファイバの光量損失は硬化度測定には影響しないことがわかった。

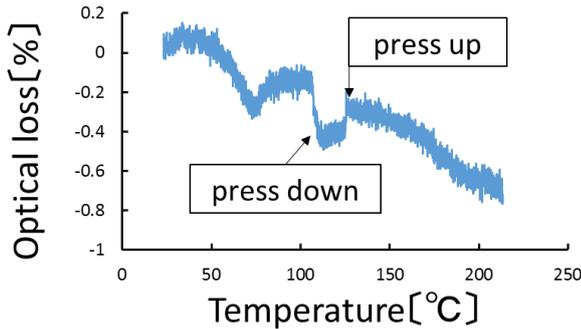


Fig5. Relationship between optical loss of embedded sensor and temperature in CFRP prepreg during cure process.

5.2. 反射光と散乱光との干渉度合い

図 6 に 2 回の測定より得られた硬化度曲線と、温度 130°C での反射光スペクトルをそれぞれ示す。図 6(A) は硬化度測定が正しく行えた場合であり、一方で図 6(B) は測定に大きなエラーが生じている。スペクトルを見ると、どちらのスペクトルにも正弦波状の変動が見られ、どちらの場合も光ファイバ先端付近に散乱体が存在していることがわかる。しかし図 6(A) のスペクトルの変動振幅は図 6(B) のそれよりも小さい。よってスペクトルの変動振幅が小さい場合には、その変動が積分により消滅し、硬化度測定に与える影響が小さくなることが分かる。

図 7 に、温度条件 Lamp (被覆あり)、2-step (被覆あり、無し) の 3 種類の条件で測定した、硬化度 0.6 における CFRP の反射光スペクトルを示す。まず、被覆ありで温度条件 Lamp と 2-step の結果を比較すると、温度条件 2-step のスペクトルに生じている変動が明らかに小さいことが分かる。これは、110°C で温度を保持すると硬化進展が遅くなり、樹脂の液化状態が長く続くことでボイドが移動しやすくなり、その結果ファイバ先端付近に大きなボイドが生じなかったことを意味している。以上より、センサ先端に大きなボイドが無い場合にもいづれか散乱光との干渉は生じているものの、測定に影響を与えない程度になることが分かった。すな

わち、光の干渉を防ぐためにはファイバ先端付近に大きなボイドを生じさせないことが重要となる。

また、図 7 の温度条件 2-step (被覆あり、無し) の 2 つのスペクトルを比較すると、干渉の程度はほぼ同じであることが分かる。つまり、この結果からは、被覆を剥いて埋め込んだ場合には、ファイバ先端付近に大きなボイドが発生していないと言える。しかし、被覆がボイドの発生経路の 1 つであるかどうかを確定するためには、より多くの試験を行う必要がある。

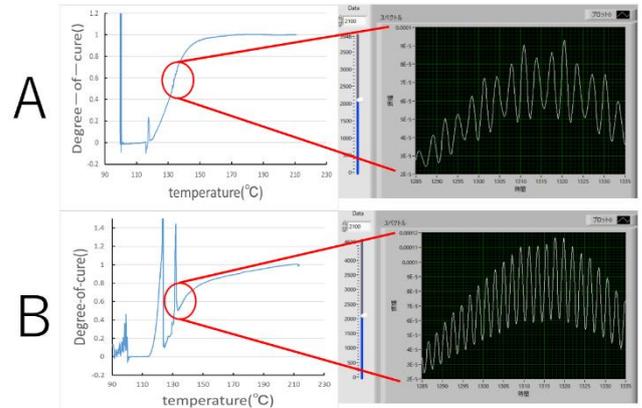


Fig6. Degree-of-cure curves of CFRP prepreps and reflected spectra at 130°C

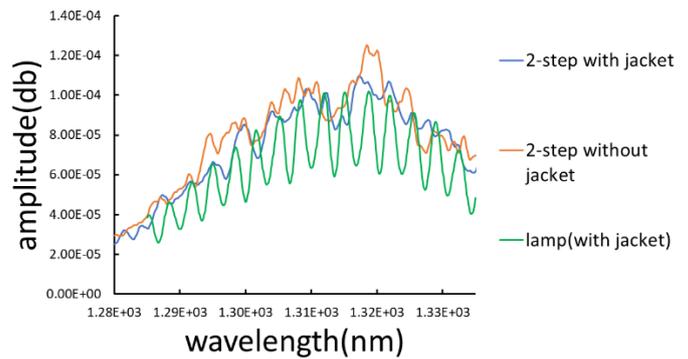


Fig7. Reflected spectra measured by Fresnel sensors of CFRP prepreg during cure process.

6. 結言

本研究では、CFRP 硬化度モニタリングで発生するノイズについて、その発生原因を調査するために複数の実験を行った。その結果、加圧によるファイバの光量損失は無視できること、硬化度曲線のノイズは反射光に生じる干渉の度合いが大きいと発生し、測定精度に影響を及ぼすことが分かった。また、スペクトルに生じる干渉振幅が小さいときは、精度に与える影響も無視できるほど小さいことも分かった。この干渉はファイバ先端に大きなボイドが生じる場合に現れると考えられる。また、光ファイバ被膜を除いて埋め込むことで、ボイドの発生を抑制できる可能性が示唆された。

引用文献

- (1) T.Kosaka, Journal of the society of Materials science, Japan, vol67, No.8, pp.819-825 (2018)
- (2) T.Kosaka, K.Osaka and Y.Sawada, Journal of the society of Materials science, Japan, vol59, No.5, pp.391-397 (2010)