

曲げ損失が光ファイバ硬化度測定に及ぼす影響

Effect of bending loss on fiber-optic measurement of degree-of-cure

システム工学群

機能性材料工学研究室 1180091 高原 護

1. 緒言

成形中のFRPの硬化度を測定する方法として、埋め込み型光ファイバセンサを用いた硬化度測定が注目されている。この方法は光ファイバを樹脂内に埋め込み、その端面でガラスと樹脂の屈折率の違いから生じるフレネル反射を受光器によって測定する手法である。このフレネル型光ファイバセンサを用いた硬化度測定は樹脂内部の局所領域における硬化度を高速かつリアルタイムに測定できるため、FRPの成形過程における硬化度監視や制御への応用が期待されている。

近年、FRPは様々な分野への適用が進められ、中でも航空宇宙分野や自動車分野などでは、成形されるFRP製品が複雑かつ大型であることが多い。しかし、これまでの光ファイバセンサを用いた硬化度測定の適用範囲は樹脂、又は単純形状のFRPであった。そのため、光ファイバセンサを大型で複雑な形状のFRP製品における硬化度測定に適用することが期待されている。その際、光ファイバセンサは製品内を長い距離で埋め込まれることや、激しい曲げによって大きな光量損失が発生しやすくなる。しかし、光量損失が光ファイバセンサにおける硬化度測定にどのような影響を与えるのか定量的な評価はなされていない。よって、光ファイバセンサによる硬化度測定に光量損失が与える影響を定量的に評価する必要がある。

そこで、本研究では曲げによる光量損失に着目し、フレネル型光ファイバセンサの測定精度に局所曲げによる光量損失が与える影響を実験的に調査した。

2. 実験方法

図1に示すシリコン製の型に樹脂を流し込み硬化度測定を行い、曲げによる光量損失の影響を調査した。

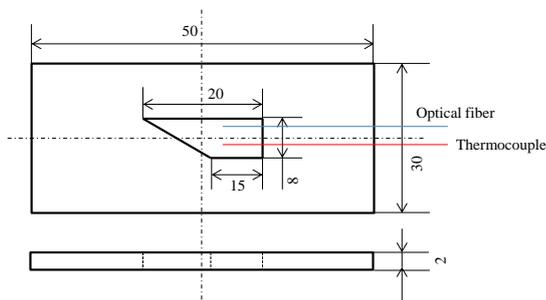


Fig.1 Silicon mold for cure monitoring of epoxy resin

光ファイバ端面と熱伝対を図1に示すように配置して樹脂を流し込み、硬化度測定を行った。硬化過程の加熱条件は室温から140℃まで1時間で昇温させた後に140℃で1時間保持とした。

図2に今回行った硬化度測定の模式図を示す。

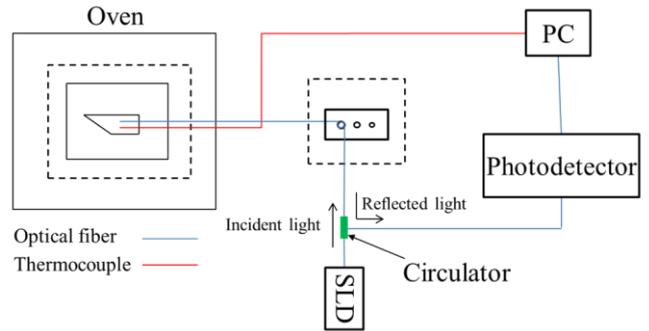


Fig.2 Schematic view of measurement of degree of cure

SLDから放射された光はファイバ内を飛行し、ファイバ端面まで到達する。そして光はファイバ端面と樹脂の境界で反射した後にサーキュレータを介して受光器に伝わる。

また、図中に示す治具にファイバを巻き付けることで光量損失を与えている。

硬化度曲線は測定された屈折率曲線から下記の式(1)を用いて算出した。

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

ここで、 $\Delta n(\alpha, T)$ は計測開始温度 T_s での屈折率変化を表し、 $dn/dT(\alpha)$ は硬化度 α における屈折率の温度依存性を表し $\alpha=1$ の時硬化領域、 $\alpha=0$ の時未硬化領域、 $\Delta \tilde{n}(1, T_0)$ は基準温度 T_0 における硬化領域の曲線と未硬化領域の曲線との間の屈折率の差を表している。図3に計算に用いられた各パラメータの位置を示す。

図3に示されるように、 $dn/dT(0)$ 、 $dn/dT(1)$ 、 $\Delta \tilde{n}(1, T_0)$ の3つのパラメータは樹脂固有のものである。

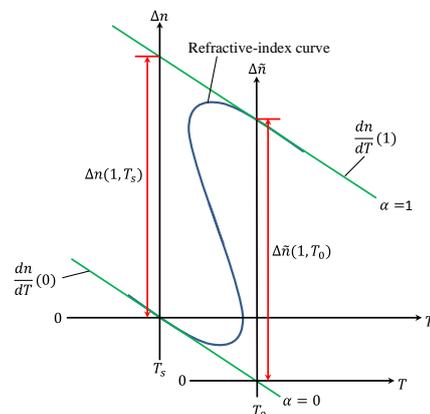


Fig.3 Refractive index variation and various parameters

3. 硬化度の測定 (硬化監視後の補償)

図4と図5に、光量損失を与えた標準光ファイバセンサおよび高屈曲光ファイバセンサでの硬化度測定の結果を示す。

図より、どちらのセンサについても硬化度曲線にほぼ差が無く、問題なく硬化度を測定できている。この結果から硬化度の測定精度に対する光量損失の影響は非常に小さいということがわかった。

また、高屈曲光ファイバセンサの光量損失は、標準光ファイバよりもはるかに小さいため、これらの結果は小径の多重曲げ、すなわち複雑形状のFRP製品の硬化度測定において高屈曲光ファイバセンサが有用であることを示している。

図6に、標準光ファイバに20%と99%の光量損失を与えた状態で測定された屈折率変化と温度の関係を示す。

図6から、標準光ファイバの光量損失が99%の場合硬化度を測定することは困難であることが分かった。

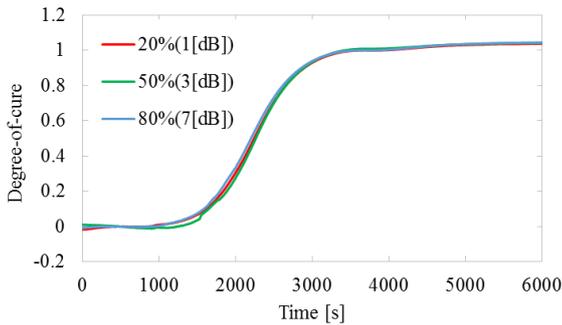


Fig.4 Degree-of-cure curves of epoxy resin measured by standard optical fibers with bending loss (Bending radius: 5 mm)

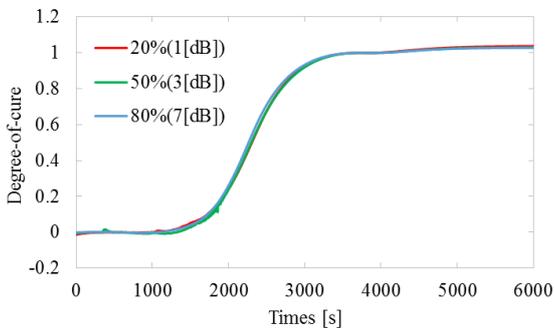


Fig.5 Degree-of-cure curves measured by highly-flexible optical fiber with light intensity loss (Bending radius was 4 mm)

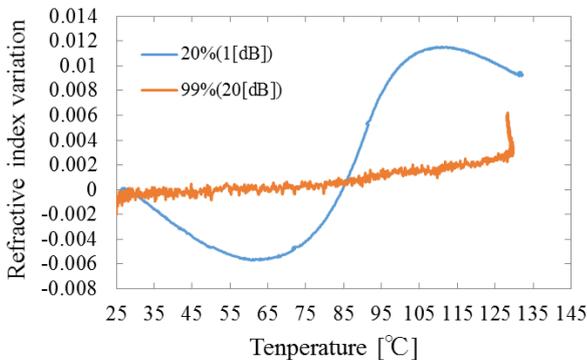


Fig.6 Relationship between refractive index variation and temperature measured by the standard optical fiber with 20% and 99% loss

4. リアルタイム硬化度測定

図7に光量損失が0, 20, 50, 80%の標準光ファイバで測定した屈折率変化と温度の関係を示す。この結果から、光量損失は、 $\Delta n(1)$ にのみ影響を与えることが確認された。

図8にリアルタイム硬化度測定で算出した硬化度曲線を示す。図8から、標準光ファイバに曲げによる光量損失が生じると、硬化が早く進んだかのようにグラフが移動するという影響が表れている。また、光量損失が大きいほど移動量は大きく、硬化完了後に硬化度が1.0を超える割合が多い。硬化完了時では、光量損失20, 50, 80%の場合約1%の誤差を生じている。この誤差は値としては大きいものではないが、硬化度の測定精度を低下させている。このことから、リアルタイムで硬化度を測定するには光量損失が低い必要がある。

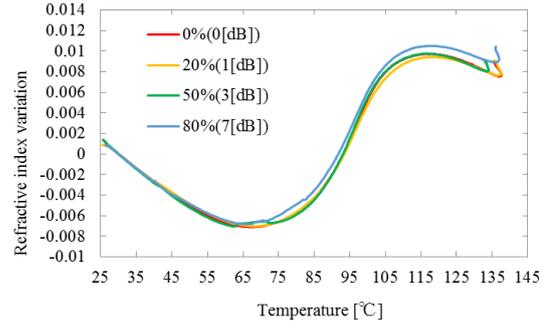


Fig.7 Relationship between refractive index variation and temperature measured by the standard optical fiber with optical loss of 0, 20, 50 and 80%

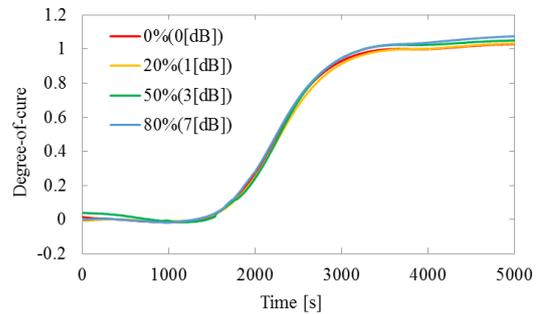


Fig.8 Relationship between degree-of-cure and temperature measured by the optical fiber with optical loss of 0, 20, 50 and 80%

5. 結言

本研究では、フレネル型光ファイバセンサによる硬化度測定に曲げ損失が及ぼす影響について検討した。

硬化度測定の実験結果から、曲げによる80%未満の光量損失が樹脂の硬化度測定に与える影響は小さいと考えられる。また、リアルタイム硬化度測定で精度を維持するには光量損失が低い必要がある。最後に、実際に製品を作る際は、曲げ以外にも硬化度の測定に影響を及ぼす要因があり、製品の硬化度について議論するには、今後これらの定量的評価を行っていく必要がある。

(参考文献省略)