

フレネル型光ファイバセンサによる 3次元形状 FRP の硬化度測定システムの開発

Development of measurement system of Degree-of-cure of three dimensional shaped FRP with Fresnel type optical fiber sensor

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1215028 藤岡 玄紘

1. 緒言

FRP 製品の品質向上を達成するためには、最適な成形条件を求めることが必要であるが、従来は試行錯誤的に求めていたため高コストであった。そのため、FRP 製造のコスト削減は重要な課題であり、これを達成するため、その場でのプロセスモニタリングが有効であると考えられている。現在まで、FRP の製造プロセスを監視するため多くのその場モニタリング手法が開発されている¹⁾。その中でも、フレネル反射型光ファイバセンサを用いて硬化過程における FRP の内部情報を得る方法が、光ファイバセンサの小型化、高機能化、柔軟性の観点から注目されている。この方法では、切断した光ファイバの端面を樹脂に埋め込むことで、光ファイバと樹脂との界面における反射光の強度から硬化度を推定する^{2, 3)}。フレネル型光ファイバセンサによる硬化度測定は良好な測定精度を有することが知られている⁴⁾。

一方で近年、FRP 製品の大型・複雑形状化が進んでおり、厳しい曲げを伴う光ファイバの埋め込みにより大きな光損失を生じる場合が想定される。フレネル型光ファイバセンサは強度測定に基づいているため、大きな損失を伴う埋め込みが測定精度を低下させる可能性があるという欠点を有する。よって、大きな光損失が測定精度に与える影響を調査し、硬化度測定に与える影響の補正が可能なら測定方法の改良を行う必要がある。

そこで本研究では、3次元複雑形状の FRP 製品にフレネル型光ファイバを埋め込み硬化度を測定できるシステムの開発と改良を目的とした。そのためにまず、標準光ファイバに加えて高屈曲光ファイバの2種類を実験に使用し、局所曲げを与えてそれぞれの光ファイバの光損失特性を明らかにした。次に、標準および高屈曲光ファイバを使用して、それぞれの光ファイバに局所曲げが与えられた状態での硬化度測定を行うことにより、光ファイバに加えられる曲げ損失が硬化度測定に与える影響を明らかにした。最後に、3次元形状のコーナー曲率の大きい型を有する VaRTM の硬化度測定において、光損失の安定性が硬化度測定に与える影響を明らかにした。そして、光損失の不安定さが与える影響の補正法を検討した。

2. 局所曲げによる光損失特性

2.1 目的

我々は FRP の硬化度測定に近年開発された、光学的に曲げに対して高い耐性を持つ高屈曲光ファイバの使用を利便性の向上といった観点から検討した。現在、高屈曲光ファイバの詳細な光損失特性は明らかにされていない。そのため、標準および高屈曲光ファイバの詳細な光損失特性を明らかにすることを目的とした。

2.1 光損失特性の測定方法

図1に光ファイバに曲げを加えて光損失を測定するための実験システムの模式図を示す。SLD(Super Luminescence

Diode)から照射された光はファイバ内を飛行し、ファイバの端面に到達する。そして、光は空気とガラスの境界でフレネル反射を起こし、反射光はサーキュレータを介して受光器に伝えられる。光強度損失は、図1に示されるように半径が2, 3, 4, 5, 6 [mm]の棒状治具にファイバを巻き付けて生成された。測定された光強度を曲げが与えられていないときの反射光量と比較することによって損失を得た。このとき、標準および高屈曲光ファイバセンサは45° から360° まで45° 毎に巻き付け角度を増加させていった。測定は各角度について3回行い、平均をとっている。実験には標準および高屈曲光ファイバが用いられている。

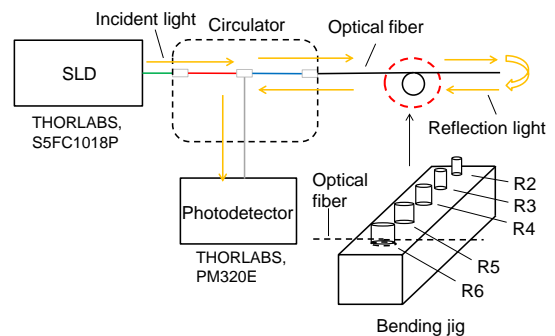


Fig. 1 Schematic of experimental method for measuring optical loss by bending.

2.3 光損失特性の測定結果および考察

図2に標準および高屈曲光ファイバの曲げ半径に対するmm当たりの光損失を示す。

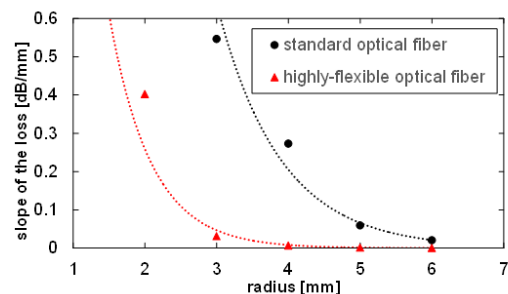


Fig. 2 Relationship between the radius and the slope of the loss generated.

図から、光損失率は曲げ半径と非線形の関係にあり、標準光ファイバの光損失率は高屈曲光ファイバよりはるかに大きいことが分かった。また、曲げ半径が小さくなると損失曲線の勾配が大きくなることも分かる。式(1)および(2)に、標準光ファイバと高屈曲光ファイバそれぞれの光損失特性を示す。

$$\frac{dL}{dx} = 1.44 \times 10^2 R^{-4.84} \quad (\text{standard}) \quad (1)$$

$$\frac{dL}{dx} = 3.35 \times 10^1 R^{-6.30} \quad (\text{highly-flexible}) \quad (2)$$

3. 局所曲げによる光損失が硬化度測定に与える影響

3.1 目的

フレネル型光ファイバセンサによる硬化度測定では大きな損失を伴う埋め込みが測定精度を低下させる可能性があるという欠点を有する。よって、局所曲げによる光損失が測定精度に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3.2 実験方法

光ファイバに局所曲げを与える実験システムは図1に示されるものと同じである。局所曲げが与えられた状態の光ファイバと熱電対を図3に示すシリコン製の型に埋め込んで硬化度測定を行った。本研究ではエポキシ樹脂(主剤はARALDITE LY5052, 硬化剤はARADUR 5052CH, 混合比は100:38)を使用している。成形温度条件は、室温(25°C)から140°Cまでを1時間で昇温し、その後140°Cを1時間保持であった。硬化度は測定された屈折率変化曲線より求められる。

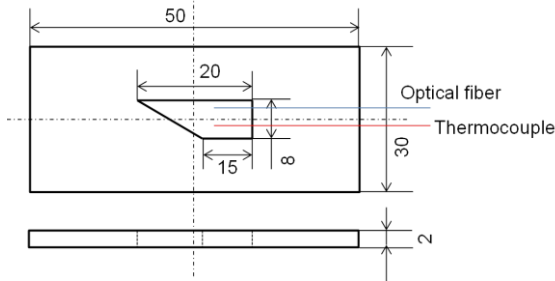


Fig. 3 Silicon mold for cure monitoring of epoxy resin.

3.3 実験結果および考察

図4に曲げ半径が5mmで、光損失が0, 20, 50, 80, 99%の標準光ファイバを用いて測定されたエポキシ樹脂の硬化度測定結果を示す。また、曲げ半径が4mmで、光損失が0, 20, 50, 80, 99%の高屈曲光ファイバによる硬化度の測定結果を図5に示す。これらの図から、標準および高屈曲光ファイバで測定されたすべての硬化度曲線が1.0に収束しており、硬化度測定の精度は両ファイバともに曲げによる光損失の影響を受けないことが分かった。高屈曲光ファイバに99%の損失を与えて測定された硬化度曲線が1000秒付近で他の曲線と誤差を生じているのは、巻き付けが実験の過程において緩み生じたものと考えられる。また、高屈曲光ファイバも標準光ファイバと同じように硬化度測定を行うことが可能であると実験結果から確認された。よって、実際に光ファイバを埋め込み硬化度測定を行う際には、より損失の少ない高屈曲光ファイバの使用が推奨される。

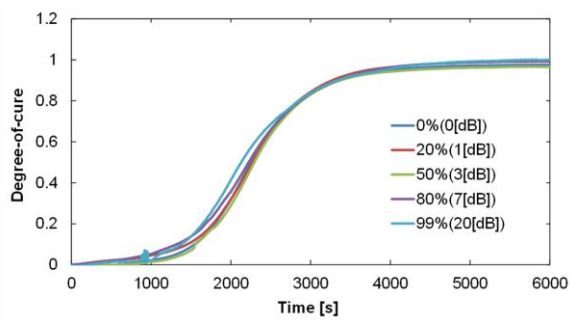


Fig. 4 Degree-of-cure curves of epoxy resin measured by standard optical fibers with bending loss (Bending radius: 5 [mm]).

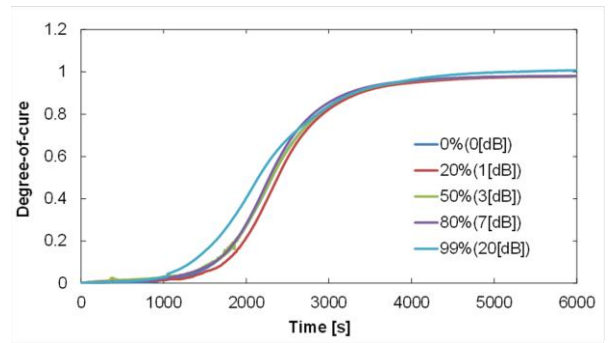


Fig. 5 Degree-of-cure curves of epoxy resin measured by highly-flexible optical fibers with bending loss

4. VaRTMによる湾曲形状 GFRP プレーットの硬化度測定

4.1 目的

これまでの結果から、光損失の量が硬化度測定に影響を与えないことが実験的に確認された。しかし、実際に3次元形状FRPに埋め込んでVaRTM成形中の硬化度測定を行った際、硬化度が不正確になることがあった。光損失の量が測定精度に影響を与えていないなら、損失の安定性が精度に大きく影響していると考えられる。そこで、光損失の安定性とそれが硬化度測定に与える影響を明らかにすることを目的とした。

4.2 実験方法

図6に実験装置の概略図を示す。湾曲した形状のGFRPプレートは、目付が100[g/m²]のガラスクロス幅40[mm]、長さ190[mm]に切断したものを10枚積層し、VaRTMによって作成した。硬化度の測定は、光ファイバと熱電対をガラスクロス5枚目と6枚目の間に埋め込むことにより行った。実験に用いた型はR3および4mmのコーナーを有しており、成形温度は室温であった。

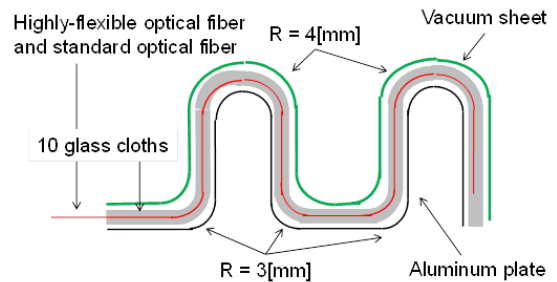


Fig. 6 Experimental set-ups for cure monitoring on curved GFRP plates during VaRTM.

4.3 光損失の安定性

VaRTMで光ファイバの先端に樹脂が付着しないようにして湾曲したガラスクロスに埋め込み、樹脂含浸開始から測定される光量が安定するまでの標準および高屈曲光ファイバで測定された反射光量の変化測定した。その結果を図7に示す。図7から標準および高屈曲ファイバ双方ともに、樹脂を流し始めると光量が回復していることが確認された。また、光ファイバの先端に樹脂が到達した後も光量の回復が起きていることが確認された。高屈曲光ファイバについてはこの間の光量変化はせいぜい2%程度であり、損失の影響はほとんどないと言える。しかし、標準光ファイバでは4μWから9μW以上と2倍以上変化することが分かった。これは、樹脂含浸工程において、埋め込まれた光ファイバが曲げ変形を解消するように動いて曲率が小さくなり、その結果損失が小さくなるためである。このように、曲げ損失がある時間まで不安定となり、それが測定精度に大きな影響を与えていると分かった。

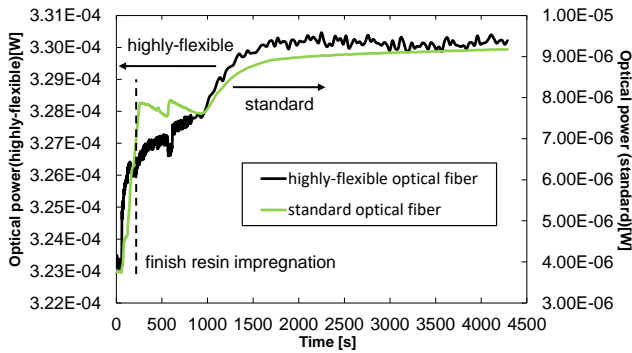


Fig. 7 Relationship between time and degree-of-cure measured by standard and highly-flexible optical fibers embedded in curved GFRP plate.

4.4 補正方法の検討

測定結果に誤差が生じている場合の補正方法として、曲げ損失量を測定値から推定し、補正を行う方法を検討した。

樹脂がセンサに達した後は空気からの反射光量は測定できないため、測定された光量から推定する必要がある。光量と屈折率の関係は以下の式(8)で表すことができる。

$$\frac{I_m - I_b}{I_{air} - I_b} = \frac{(n_{eff} - n_r)^2 (n_{eff} + 1)^2}{(n_{eff} + n_r)^2 (n_{eff} - 1)^2} = \beta \quad (8)$$

ここで、 I_m は測定光量、 I_b は途中経路からの反射および戻り光、 I_{air} は空気からの反射光量、 n_{eff} は光ファイバの有効屈折率、 n_r は常温 25°Cにおける樹脂の屈折率を表している。

図8に示されるように、光ファイバの先端に樹脂が付着し光量が落ちる直前の空気からの反射光量を I_{air}^{drop} 、光量が落ちた時の樹脂からの反射光量を I_m^{drop} とし、それらを基準とした光量の変化量 ΔI_{air} 、 ΔI_m について式(8)を用いると、硬化度と I_b は樹脂が着く前後でほぼ同じと仮定することで以下の式(9)が得られる。

$$\Delta I_{air} = \frac{\Delta I_m}{\beta} \quad (9)$$

よって、 I_{air} は以下に示す式(10)を用いて、樹脂からの反射光量 I_m より求めることができる。

$$I_{air}^{mod} = I_{air}^{drop} + \Delta I_{air} \quad (10)$$

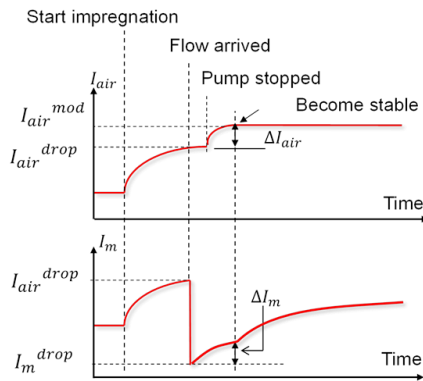


Fig. 8 Schematic diagram of optical power change from resin impregnation process until optical power become stable.

図9より、標準光ファイバの損失が安定する時間は、光量の傾きが変化する 6500 秒であることが分かったので、これを基準として標準光ファイバの I_{air} を求め、6500 秒の硬化度 0.161 から硬化度の計算を行った。図10に標準光ファイバで得た補正された硬化度曲線を比較用として従来と同じ方法で算出された硬化度曲線とともに示す。図より、高屈曲ファイバで測定された硬化度曲線と比較してやや誤差を生じて

いるものの、従来の手法と比較して誤差はかなり小さくなっていることが分かる。以上から、曲げ損失が安定したところから補正を行うことで、大きな曲げ損失が生じる場合でも補正が可能であることが分かった。

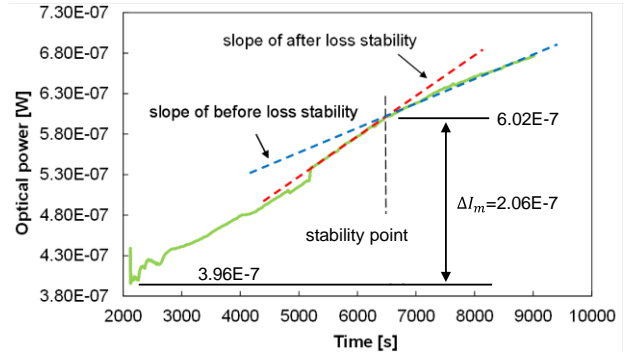


Fig. 9 Stability point of optical power measured by the standard optical fiber sensor.

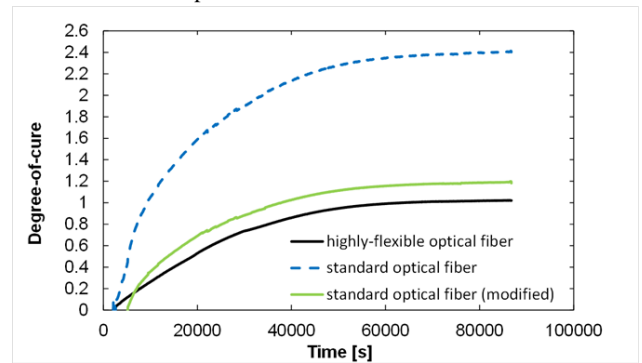


Fig.10 Relationship between Degree-of-cure and time by calculated with using I_{air}^{mod} .

5. 結 言

本研究では、フレネル型光ファイバセンサによる 3 次元形状 FRP の硬化度測定法の開発を目指し、光損失特性を取得し、曲げ損失が測定精度に与える影響を調べ、誤差が生じた場合の補正手法を検討した。その結果、光損失の量は測定精度に影響を与えないことが分かった。また、高屈曲光ファイバの有用性を確認することができた。一方、VaRTM 成形では曲げ損失がある時間まで不安定となり、それが測定精度に大きな影響を与えていると分かった。そこで、曲げ損失量を測定値から推定し、補正を行う方法を提案した。それを用いることで、曲げ損失の不安定性によって大きく低下した測定精度を大幅に改善することが出来ると分かった。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(資金提供期間:JST)の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) T. Kosaka, Journal of the Society of Materials Scienc, Japan, **Vol.67, No.8**, pp. 819-825 (2018).
- (2) M. A. Afromowitz and K. Y. Lam, Sensors and Actuators, **Vol.21-23**, pp. 1107-1110 (1990).
- (3) Y. M. Liu, C. Ganesh, J. P. H. Steele and J. E. Jones, Journal of Composite Materials, **Vol.31, No.1**, pp. 87-102 (1997).
- (4) T. Kosaka., K. Osaka. and Y. Sawada. , Journal of the Society of Materials Scienc, Japan, **Vol.59, No.5**, pp.391-397(2010)