

# 卒業論文要旨

## 細径光ファイバを用いた FRP の硬化度測定 Degree-of-cure measurement of FRP by Fresnel based small-diameter optical fiber sensor

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1200077 高野 義之

### 1. 緒 言

ガラス繊維やカーボン繊維などの繊維と、樹脂を組み合わせた複合材料である FRP(Fiber Reinforced Plastics, 繊維強化プラスチック)は強度が非常に高く軽量であるため、自動車のボディや航空機の翼など様々な先進の製品に使用されている。しかしながら、これらの大型で複雑な形状の FRP 製品においては、その成形過程で不均一な熱分布による樹脂硬化度の不均一化および、不均一な硬化度の分布によって引き起こされる残留応力が発生する<sup>1,2)</sup>。残留応力はひずみや残留変形の原因となり、これらは製品の品質を低下させてしまう<sup>3)</sup>。これを防ぐためには最適な成形条件を求める必要があり、従来から試行錯誤法を用いることにより求められてきたが、この試行錯誤が FRP 製品の高コスト化につながってしまう。そこで、製造中の FRP の物性をリアルタイムでモニタリングし、最適な成形条件を得るその場プロセスモニタリング技術が注目されている。これまで、数多くのその場プロセスモニタリング技術が開発されてきた。

筆者らは、その中でもフレネル型光ファイバセンサを用いて FRP の詳細な硬化度を得る方法に注目し、研究を行っている。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。しかし、厳しい曲げを伴う埋め込みでは、測定精度が低下する可能性があるという欠点を持つ。そのため、曲げによって光ファイバに生じる詳細な光損失特性を調べる必要がある。昨年度までの研究では、直径が 125 $\mu\text{m}$  の標準(一般的な通信用光ファイバ)および高屈曲(近年開発された光学的に曲げに強い光ファイバ)光ファイバの光損失特性を求め、光損失が硬化度測定精度へ与える影響を明らかにしてきた<sup>1)</sup>。その結果、高屈曲光ファイバの採用により、複雑形状 FRP の安定した硬化度測定が可能となることが分かった。しかし、125 $\mu\text{m}$  の光ファイバでは、曲げ半径 2mm 未満の曲げを加えた場合、光ファイバが破断してしまうケースが確認された。そこで、今後の更なる FRP への適用範囲の拡大を考慮すると、より厳しい埋め込み条件で、硬化度測定手法の適用を目指す必要がある。よって、本研究では、直径がより細い 80 $\mu\text{m}$  の細径光ファイバについて、光損失特性を明らかにし、硬化度測定への適用が可能であるか調査することを目的として実験を行った。細径光ファイバでは、最小曲げ半径を小さくすると同時にひずみエネルギーを小さくすることが出来るため、光ファイバの破断を防止するだけでなく、光ファイバが曲げられた際、元に戻ろうとする力も減少し、FRP に埋め込まれた光ファイバの計測安定性が向上することも期待される。

### 2. 局所曲げによる光損失特性

#### 2.1 目的

昨年度の研究により、125 $\mu\text{m}$  の標準および高屈曲光ファイバの光損失特性が明らかにされたが、細径光ファイバの光損失特性はまだ明らかにされていない。そこで、細径光ファイバの光損失特性を明らかにすると同時に、曲げ半径が 2mm 以下でも光量損失を測定できるか調査を行うことを目的とした。また、80 $\mu\text{m}$  光ファイバと 125 $\mu\text{m}$  の標準および高屈曲光ファイバの光損失特性を比較し、有用性を検討した。

### 2.2 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 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 [mm] の棒状治具に 80 $\mu\text{m}$  の光ファイバを巻き付けて測定した。光損失は曲げを加える前と曲げ後の光強度を比較して取得した。このとき、光ファイバは 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、平均値をとっている。

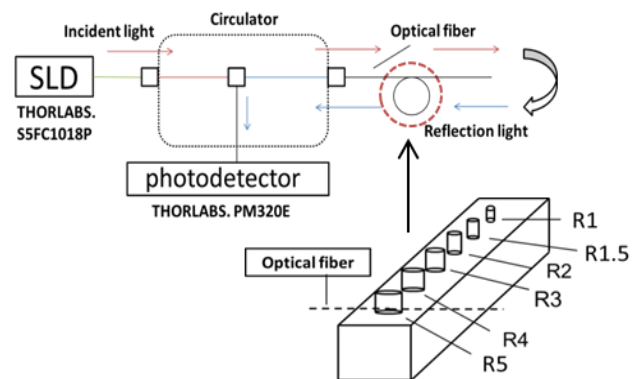


Fig.1 Schematic view of experimental method for measuring optical loss by bending

### 2.3 光損失特性の測定結果および考察

図 2 に 80 $\mu\text{m}$  の光ファイバと、125 $\mu\text{m}$  の標準および高屈曲光ファイバの光損失特性を示す。なお 125 $\mu\text{m}$  の光ファイバは破断を防ぐため 2mm までの曲げ半径で測定している。

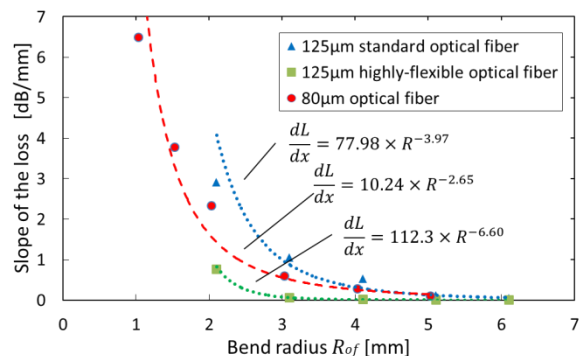


Fig.2 Relationship between the radius and the slope of generated

曲げ半径と mm 当たりの光損失(光損失率[dB/mm])の関係を示す。曲げ半径と mm 当たりの光損失(光損失率[dB/mm])の関係を近似線でプロットすると指数関数状の曲線となった。以下

(1)~(3)に 80 $\mu\text{m}$ の光ファイバと 125 $\mu\text{m}$ の標準および高屈曲光ファイバの光損失特性を示す。

$$\frac{dL}{dx} = 10.24 \times R^{-2.65} \quad (80\mu\text{m optical fiber}) \quad (1)$$

$$\frac{dL}{dx} = 77.98 \times R^{-3.97} \quad (125\mu\text{m standard optical fiber}) \quad (2)$$

$$\frac{dL}{dx} = 112.3 \times R^{-6.60} \quad (125\mu\text{m highly - flexible optical fiber}) \quad (3)$$

測定の結果、80 $\mu\text{m}$ 光ファイバは 2mm 未満の曲げ半径でも問題なく光量損失を測定できることが確認できた。

図 2 より、80 $\mu\text{m}$ の光ファイバは 125 $\mu\text{m}$ の標準光ファイバと比較して光損失率が小さいことが分かる。しかし、高屈曲光ファイバと比較すると光損失率は大きいため、曲げ半径が 2mm 以上の時は高屈曲光ファイバを、2mm 未満の時は 80 $\mu\text{m}$ の光ファイバを使用するといった使い分けをすることで、局所曲げを伴う埋め込みにおいても光ファイバが破断することなく、精度よく硬化度を測定できると考えられる。

また、昨年度の研究により、光量損失の大きさは硬化度の測定精度に影響を与えないが、埋め込み最中の曲げの緩み等による光量損失の変化は硬化度測定に影響を及ぼすことが明らかになったため、曲げてももとに戻りにくい 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバの方が硬化度測定に適していると考えられる。

### 3. エポキシ樹脂の硬化度測定

#### 3.1 目的

125 $\mu\text{m}$ 光ファイバセンサによる硬化度測定に使用したパラメータが、80 $\mu\text{m}$ 光ファイバにおいても適用できるか調査を行うと同時に、125 $\mu\text{m}$ 光ファイバを用いた硬化度測定結果と比較することで、測定精度の調査を行うことを目的とした。

#### 3.2 実験方法

図 3 に 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバセンサを用いた硬化度測定の概要図を示す。硬化度測定はシリコンの型に台形の形状に穴を開け(型の内壁からの反射光の干渉を防止するため)、熱電対と局所曲げを与えていない光ファイバを型へ埋め込み、エポキシ樹脂を流し込んだ後、炉で加熱して行った。硬化度測定に使用しているエポキシ樹脂は、主剤の ARALDITE LY5052Y と硬化剤の ARADUR 5052CH を混合比 100:38 で混合したものである。また、樹脂混合時に生じる気泡を除去するために真空引きによる脱泡処理を行っている。測定は加熱条件のみを変更して 2 回行い、1 回目は 60 分で室温(25 $^{\circ}\text{C}$ )から 140 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温した後 60 分保持、2 回目は 90 分で室温(25 $^{\circ}\text{C}$ )から 90 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温した後 90 分保持とした。

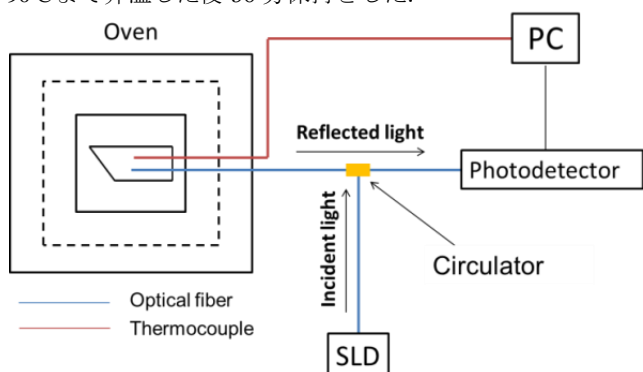


Fig.3 Schematic view of measurement of degree of cure

#### 3.3 実験結果および考察

図 4 に 2 つの加熱条件による、80 $\mu\text{m}$ 光ファイバと 125 $\mu\text{m}$ の標準および高屈曲光ファイバを用いたエポキシ樹脂の硬化度曲線を示す。なお、125 $\mu\text{m}$ の両光ファイバの硬化度測定

の加熱条件は本実験の 1 回目と同様である。また硬化度の値は 0 が未硬化領域、1 が硬化領域である。

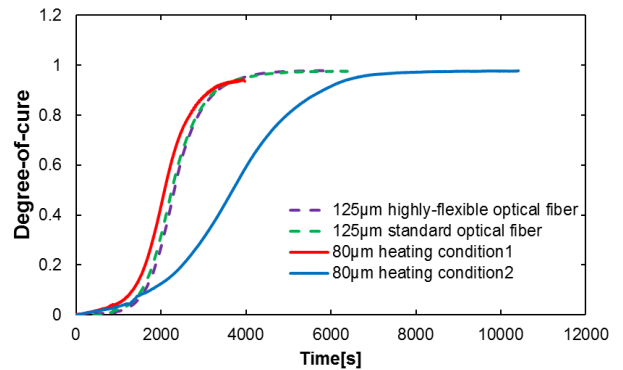


Fig.4 Degree-of-cure curves of epoxy resin

昨年度の研究データである 125 $\mu\text{m}$ の標準および高屈曲光ファイバにおける硬化度曲線より、硬化度が 1 に収束しているのは硬化度が正常に測定出来ていることを示している。したがって、本実験の 2 つの加熱条件において、どちらも正常に硬化度を測定できていることが確認できた。

また、1 回目の加熱条件で測定した 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバおよび 125 $\mu\text{m}$ の両光ファイバの硬化度測定結果より、硬化度曲線がほとんど一致していることから、同様の測定精度を持っていることが分かった。

### 4. 結 言

本研究では、80 $\mu\text{m}$ 光ファイバに局所曲げを加えて光損失特性を明らかにした後、エポキシ樹脂の硬化度測定を行った。

80 $\mu\text{m}$ 光ファイバの光損失特性の取得では、125 $\mu\text{m}$ の標準および高屈曲光ファイバと比較することで、有用性の検討を行った。その結果、基本的に高屈曲光ファイバの方が曲げによる光損失が小さいため埋め込みに適しているが、厳しい曲げ半径の埋め込みに対しては 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバの使用が望ましいことが分かった。また、光損失特性を明らかにしたことで、任意形状の FRP に 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバを埋め込んだ際に生じる光損失を予測することが可能になった。

エポキシ樹脂の硬化度測定では、直径の異なる光ファイバを用いて、同じパラメータ、同じ加熱条件で測定した硬化度曲線がほとんど一致していることから、同様の測定精度を持つことが分かった。また、加熱条件を変えても硬化度が 1 に収束していることから、125 $\mu\text{m}$ 光ファイバの硬化度測定に用いたパラメータが 80 $\mu\text{m}$ 光ファイバにも適用できることが明らかになった。

### 謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの助言やご指導をして下さった高坂達郎准教授に深く感謝致します。また、藤岡玄紘氏をはじめとする先端機械航空材料工学研究室の皆様にも深く感謝いたします。本当に有難うございました。

### 参考文献

- (1) 藤岡玄紘, “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”. 平成 30 年度. 高知工科大学大学院修士学位論文
- (2) T. Kosaka, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.67, No.8, pp. 819-825(2018).
- (3) M.R. Winsom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell and K.D. Potter, Composites Part A, 37, (2006), 522-529.