

卒業論文要旨

EFPI センサの埋め込みによるセンサ特性への影響

Effect of embedding of built-in EFPI sensor on characteristics

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1230099 田中 宏樹

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic) は炭素繊維と樹脂で組織・構成されている複合材の一つで、スポーツ用品に始まり、自動車や航空機等の様々な工業分野で活用されるようになってきている。CFRP の特性には「軽量」、「高強度・高剛性」、「低熱膨張」がある。中でも「低熱膨張」は、炭素繊維の繊維方向における熱膨張率がマイナス、炭素繊維の径方向と樹脂の熱膨張率がプラスであるため、積層構成を工夫することで得られるものである。この特性により、熱膨張を抑えたい半導体製造装置や人工衛星の工学ベンチやアンテナにもよく利用されるが、長期間の運用中の熱膨張特性を保証するためには、リアルタイムでの微小熱ひずみの測定が必要である。

そこで我々は、埋め込み可能で微小熱ひずみを測定できる光ファイバセンサが注目した。光ファイバセンサには FBG (Fiber Bragg Grating) センサと EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) センサの2種類がある。FBG センサは埋め込み時に残留応力の影響を受けるため、埋め込みには向かない。一方、EFPI センサは残留応力の影響を本質的に受けず、また、センサの構造を変えることで FBG センサよりも容易に精度を向上させることができる。これらの要因から、本研究では埋め込み可能で微小熱ひずみを測定できる EFPI 光ファイバセンサを採用した。

本研究では CFRP の微小熱ひずみのその場測定が可能な埋め込み EFPI センサの開発を目指し、また、その過程で埋め込むことによるセンサへの影響を明らかにするよう試みた。

2. 実験方法

2.1 EFPI 光ファイバセンサ

EFPI センサとは、図1のようなガラス製のキャピラリー内で入射側と反射側の光ファイバ2本を突き合わせ、ギャップ長 d を構成するように作製したセンサである。光ファイバ直径が 0.125mm、キャピラリーの内径が 0.140mm、外径が 0.570mm である (以下、通常ファイバ、通常キャピラリーと呼ぶ)。また、細径光ファイバ直径は 0.080mm、細径キャピラリー内径・外径は 0.140mm、0.200mm である (以下、細径ファイバ、細径キャピラリーと呼ぶ)。

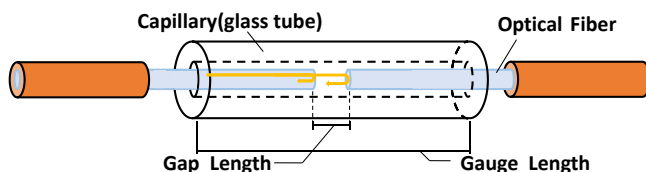


Fig. 1 Structure of an EFPI sensor

次に EFPI センサのひずみ測定に用いる測定系を図2に示

す。広帯域光源 (SLD, 中心波長 1550nm) からレーザーは、センサ内のファイバ 2 本の端面でそれぞれ反射して干渉光を形成。そのスペクトルはスペクトラム・アナライザで測定している。システム測定の理論は次のようになる。光源スペクトルを $P_0(\lambda)$ とすると、測定されるスペクトルは以下に示される。

$$P(\lambda) = K P_0(\lambda) (1 + e^{-2\eta d}) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} + 2\phi\right) \quad (1)$$

ここでのパラメータは、 K が端面でのエネルギー反射率、 η が回折による第二反射波の減衰効果、 ϕ が反射時の位相遅れである。式(1)より、波数 $2k = 2/\lambda$ の空間で d 空間にフーリエ変換をすると、ギャップ長の位置に明確なピークを持つスペクトルが得られる。そこで、波長空間で得られたデータを再サンプリングで波数空間 $2k$ に変換し、さらに百万点のゼロ点を付加したデータに対して FFT によるパワースペクトルを求め、ピーク位置として d を得た。

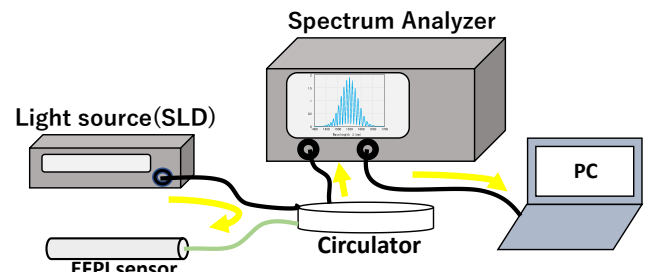


Fig. 2 Strain measurement optics for an EFPI sensor

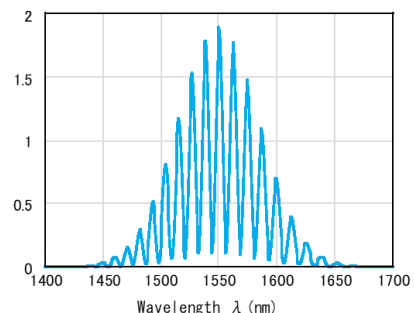


Fig. 3 Measurement spectrum

2.2 EFPI 光ファイバセンサの特性評価試験

図4に示すように寸法 20mm×150mm、厚さ 2mm のアルミ板上に EFPI センサとひずみゲージをアロン α で接着し、引張試験機を用いて特性評価を行った。EFPI センサは入射側光ファイバが通常ファイバ、細径ファイバ (それぞれギャ

ップ長の異なる 3 本) の 2 種類の計 6 本を用意した。引張速度 0.02mm/min, 測定間隔 1s でひずみゲージによる測定ひずみが 1000 μ m になるまでのひずみを測定した。

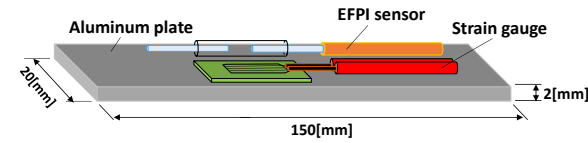


Fig4. Specimen for Characterization of an EFPI Sensor

2.3 EFPI 光ファイバセンサのひずみ伝達率の FEM 解析

FEM 解析ソフトウェア「Abaqus」を用いて、実験 2.2 を行った時のひずみ伝達率を解析した。試験片と比べて十分大きいベースに EFPI を接着したモデルを作成し、1/4 モデルとした。ベースに変位を与え、与えたひずみとセンサモデルで解析されたひずみを比較して、ひずみ伝達率を検証した。

2.4 埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

図 5 に示すように寸法 30mm×70mm の CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を 10 枚積層し、一方向積層板に繊維方向へ EFPI センサを埋め込んだ。本実験のセンサには細径キャピラリと反射側に通常ファイバを使用した。試験片は入射側の光ファイバ径とギャップ長が異なる 2 種類を用意し、試験片 A には通常ファイバでギャップ長 0.162mm のセンサ、試験片 B には細径ファイバでギャップ長 0.101mm のセンサを埋め込んだ。30 分間でオープン内を室温から 60℃ まで昇温させ、その間の熱ひずみを 1.5 秒間隔で測定した。

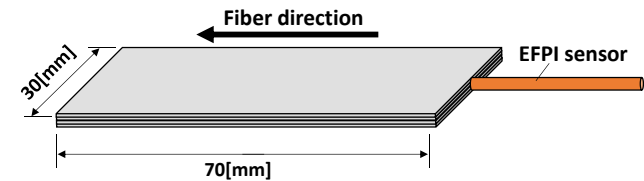


Fig5. Test piece of EFPI sensor embedded in CFRP laminate

3. 実験結果及び考察

3.1 EFPI 光ファイバセンサの引張試験及びひずみ伝達率の FEM 解析を交えた特性評価

キャピラリの内径と光ファイバ外径には隙間があるため、接着剤の浸透によりゲージ長が変化することが考えられる。そこで、キャピラリ端部のみ固定した場合の 30mm のゲージ長を用いて計算したひずみとひずみゲージによって測定したひずみを比較することで、実際のゲージ長の評価を試みた。図 5 に、通常キャピラリのセンサによる測定結果を示す。図より、通常ファイバと細径ファイバを用いたセンサの傾きはそれぞれ 0.602 と 0.544 であり、どのセンサにおいてもほぼ線形で同等の傾きとなった。また、表 1 に示す FEM 解析結果より、ひずみ伝達率は 96.3% と大きいことから、実際のゲージ長がキャピラリ長さ 30mm の約 5~6 割に減少することが分かった。また、作製後の EFPI のゲージ長は、使用ファイバの直径にあまりよらず、ほぼ一定となることが分かった。細径キャピラリのセンサでも傾きは 0.593 と、通常キャピラリの場合と同様の結果となることが分かった。

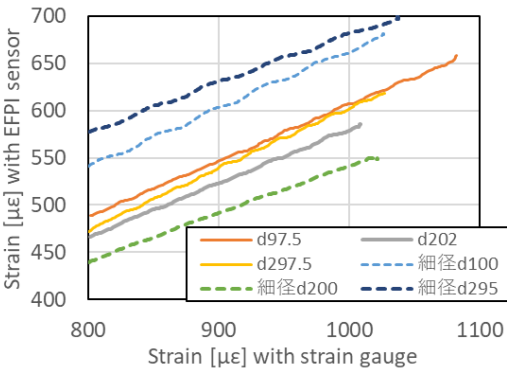


Fig.6 Relationship between strain measured by EFPI sensor and strain gauge

Table.1 Strain transfer rate of EFPI sensors

Adhered EFPI sensor		
Fiber diameter[mm]	Nomal capillary	Thin capillary
0.08	96.3%	100%
0.125	96.5%	101%

3.2 埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

図 6, 7 に試験片 A, B のそれぞれ測定した熱ひずみの結果を示す。試験片 A は、センサの埋め込み後の測定精度が平均±0.0262 μ となり、これまでのセンサの埋め込み後の測定精度と同等の高い精度を達成できた。試験片 B においては、ノイズが大きく、熱ひずみが上手く測定できていなかった。この原因は、入射側ファイバに細径ファイバを用いることでキャピラリ内径 (0.140mm) との間に大きな隙間ができ、振幅が大きくなることが考えられ、実験環境下の振動の影響を強く受けたことが分かる。これは、ファイバ内径を現在使用しているものより小さくし、ファイバ・キャピラリ間の隙間を極力小さくすることで改善できると考えられる。

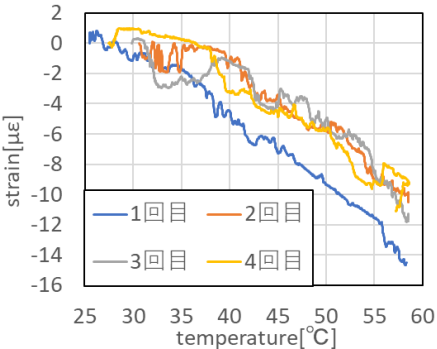


Fig.7 Measured thermal strain of specimen A

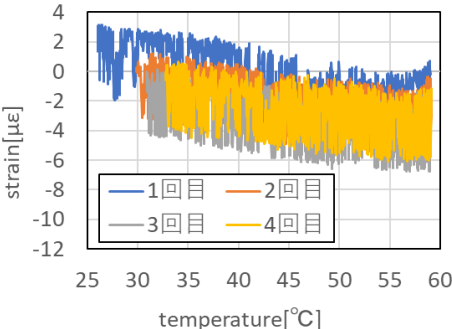


Fig.8 Measured thermal strain of specimen B

4. 結言

本研究では、CFRPの微小熱ひずみのその場測定が可能なEFPIセンサを作製する過程で生じるセンサ特性への影響について、以下の知見を得た。

- (1) センサのゲージ長はファイバ径にあまりよらないが、接着剤の浸透により想定の30mmより短くなる。
- (2) 通常キャピラリを用いて接着した場合でも約96%の高いひずみ伝達率を確保できる。
- (3) 入射側光ファイバに細径ファイバを使用して埋め込むと、振動の影響を強く受けるので、キャピラリ内径をファイバに合わせて小さくする必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたって、株式会社アドテックエンジニアリングの田中米太様をはじめとする皆様には資金や研究成果に関する議論など様々面からサポートいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- (1) E. Kappel. C, Vol.3(2020),100059
- (2) K, Ogi, M. Tsutsumi, B.Nasrullah, Y. Tanaka, Y. Watanabe, inter. J, Lightweight Mater. Manufacct, 4(2021), pp.27-36
- (3) 高坂達郎, Vol.67, No8(2018), pp.819-825
- (4) 板谷覚子, “2020 年度卒業論文”, 2020

