

# 卒業論文要旨

## CFRP の微小熱ひずみ測定のための埋め込み EFPI センサの開発

### Development of embedding EFPI sensors for measuring tiny thermal strain of CFRP

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1210016 板谷 寛子

#### 1. 緒言

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) は、熱膨張係数がマイナスである炭素繊維とプラスである樹脂の組み合わせにより熱膨張率をゼロにできる特性を持っており、この特性は半導体製造装置や人工衛星の光学ベンチのような熱膨張を抑えたい部品や機械に利用されている。しかし実製品の微小な熱ひずみの測定は難しく、使用中の熱膨張の保証は困難であった。そこで、埋め込みセンサによる微小ひずみ測定が可能な光ファイバひずみセンサが注目されている。

光ファイバひずみセンサの1つにFBG(Fiber Bragg Grating)センサがあるが、埋め込み時に残留応力を受ける。一方でEFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) センサは、埋め込みの影響を本質的に受けない。また、センサの構造を変えることでFBGより高い精度を容易に持たせることができる。そこで本研究では、CFRPの微小熱ひずみのその場測定が可能な埋め込みEFPIセンサの開発を試みた。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 EFPI 光ファイバセンサ

図1に示すように、EFPIセンサはガラス成分のキャピラリー内で入射用と反射用の2本の光ファイバを、ギャップ長  $d$  を挟んで突き合わせるように製作されている。光ファイバの直径は0.125mmでキャピラリーは外径0.570mm、内径0.140mmである。入射側ファイバ端面と反射用端面で反射した光による干渉光がセンサから戻る。干渉光からギャップ長の変化を計算し、それをゲージ長で割ることでひずみを求める。

EFPIセンサの光学系を図2に示す。広帯域光源(SLD)からサーキュレータを経由してセンサに入射し、干渉した反射光を光スペクトラムアナライザで測定する。測定されたスペクトルは図に示すように、波長  $\lambda$  に対して  $4\pi d/\lambda$  の周期を持っている。よってスペクトルにFFTをかけることで、 $d$  を求めることができる。

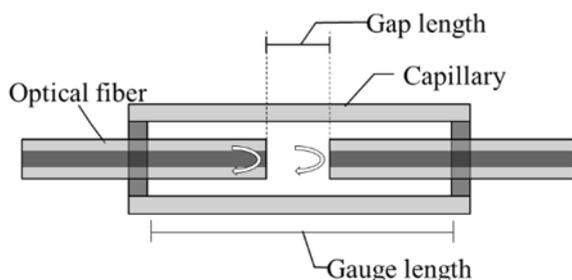


Fig.1 EFPI sensor

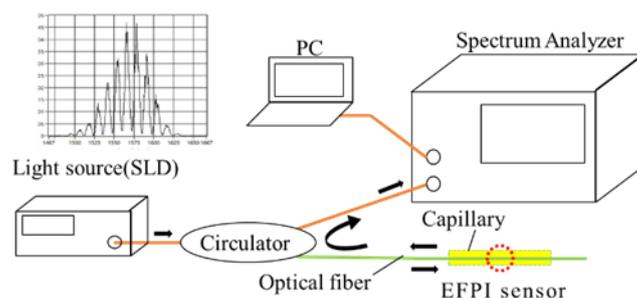


Fig.2 Mechanism of EFPI sensor

##### 2.2 測定システムの検証試験

キャピラリーに挿入することなく入射用と反射用の光ファイバを突き合わせた状態で設置した。ギャップ長は、スペクトル測定にてそれぞれ0.05mm, 0.1mm, 0.15mm, 0.2mmとした。同時にビデオスコープでギャップ長の撮影を行った。PowerPointにて光ファイバの直径と比率によりギャップ長計算した。

##### 2.3 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

ゲージ長が30mm、ギャップ長がそれぞれ0.05mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.3mmのEFPIセンサを用いて室温でのひずみ測定をスペクトル測定点数501点、測定幅200nm、1秒間隔で計60点測定を行った。

##### 2.4 埋め込みEFPI光ファイバセンサの測定精度評価試験

ゲージ長が30mm、ギャップ長0.1mmのEFPIセンサを、100×100mmに切り出したCFRPプリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル製)を積層した一方方向CFRP積層板の繊維方向に埋め込み、を作製した。試験片寸法を図に示す。室温から80度までを30分かけて昇温させ、その間の熱ひずみを1.5秒間隔で測定した。

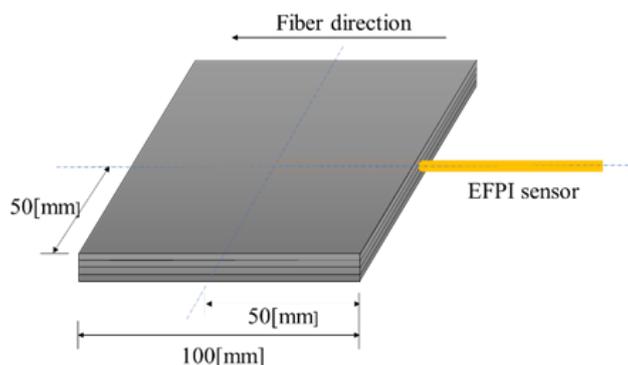


Fig.3 Dimensions of CFRP plate with embedded EFPI sensor

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 測定システムの検証試験

図4に、目視による計算結果とスペクトル測定によるギャップ長を示す。目視およびスペクトルからの解析値の関係は、近似直線の傾きがほぼ1.0であるが、1.0から約3%のずれが見られた。この原因は、目視による測定精度の問題ではないかと思われる。また、近似直線は $3.8\mu\text{m}$ の切片を持っており、ゼロ点を通過しない。この理由は、スペクトル測定では光の反射時に生じる位相回転が含まれるためと考えられる。よって、この位相回転によるズレはゼロには出来ない。しかし、本研究ではギャップ長の変化量をゲージ長で割ることによりひずみを求めている。位相回転が一定であることから、ひずみの算出には影響を与えないことがわかった。

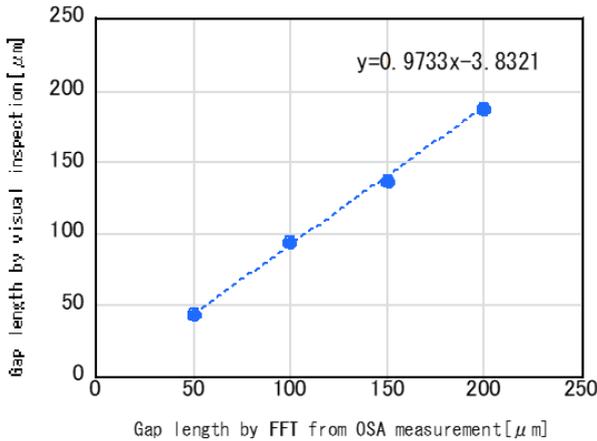


Fig.4 measurements of gap length

#### 3.2 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

図5にギャップ長0.05, 0.1, 0.2, 0.3それぞれのひずみ変動を示す。ひずみが時間により変動しており、早い周期で変動する成分と、ゆっくり変化する成分があることが分かる。早い周期で変動している成分をノイズと考え、ノイズ成分のみを取り出すと図6のようになる。この結果から最小二乗平均RMS値を求め、これを精度として評価した(片振幅)。

表1に、それぞれのギャップ長に対する精度を、1周期当たりの点数とともに示す。ギャップ長0.05, 0.2, 0.3は0.1のものと比較して精度が悪化している。また、ギャップ長が長いほど周期が短くなるため、スペクトル測定点数が同じ場合は一周期当たりの測定点数が少なくなった。

ギャップ長0.05で精度が悪化する理由は、ギャップ長が小さいと測定範囲では周期が6ほどしか見られず、FFTに十分な周期数が得られないため、ギャップ長の測定精度が落ち、これがひずみの精度に影響をあたえていると考えられる。一方でギャップ長が長くなる場合は、測定点数が少なくなることが精度悪化の原因として考えられる。

そこで、測定点数を調べるため、ギャップ長0.2, 0.3について、一周期当たりの測定点数を増やして実験を行った。その結果を表2に示す。表1と2を比較すると、ギャップ長0.2の精度が向上していることが分かる。一方でギャップ長0.3では精度が向上したものの十分ではなく、測定点数以外の要因も精度に影響を与えていることが分かった。これはギャップ長が長いために反射用の光ファイバの端面における反射光の減少や減衰振動等が影響していると考えられる。

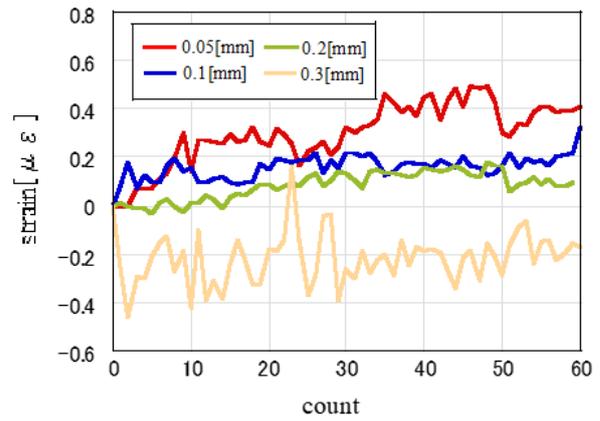


Fig.5 Strain of EFPI at room temperature.

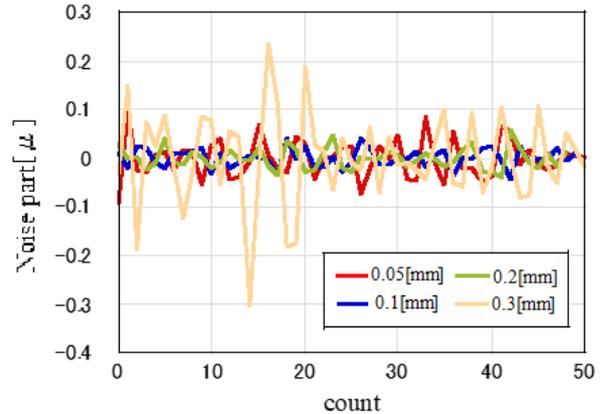


Fig.6 Noise part of measured strain

Table. 1 Precision of each sensor

ギャップ長[mm]	1周期あたりの点数	精度
0.05	56.91	$\pm 0.029\mu$
0.1	34.67	$\pm 0.019\mu$
0.2	18.71	$\pm 0.021\mu$
0.3	12.98	$\pm 0.095\mu$

Table. 2 Improved precision by increasing measurement points

ギャップ長[mm]	1周期あたりの点数	精度
0.2	37.42	$\pm 0.011\mu$
0.3	25.96	$\pm 0.053\mu$

#### 3.3 埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

図7に、3回測定した温度とひずみの関係を示す。またノイズ成分のみを取り出したものを図8に示す。

埋め込み後の精度は、3回を通して $\pm 0.04\mu$ 程度であった。埋め込み前と比較するとわずかに精度が悪化していることがわかる。これはEFPIセンサをCFRPに埋め込んだ際に成形時の加圧等で、センサのギャップ長が0.12から0.14mmに拡大してしまったことや、スペクトルにノイズが発生してしまったことが原因と考えられる。

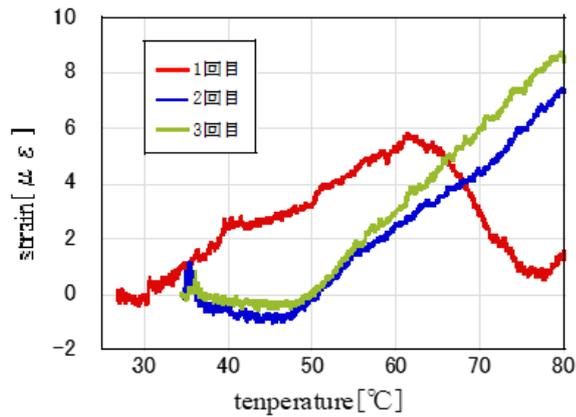


Fig.7 Relationship between strain and temperature of CFRP

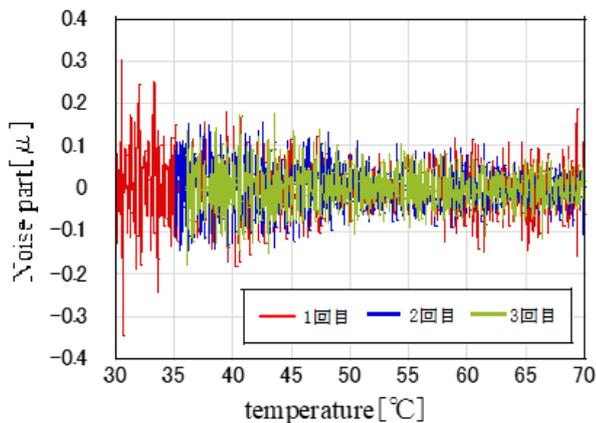


Fig.8 Noise part of measured strain of CFRP

#### 4. 結言

本研究では、CFRPの微小熱ひずみの測定が可能な埋め込みEFPIセンサを製作し、その測定精度の評価を行った。ひずみ精度はギャップ長の影響を受けるが、ギャップ長0.1mmで $\pm 0.019 \mu$ であった。

- (1) 高知鶴kした測定システムを用いて、EFPIのギャップ長を正確に求めることができた。
- (2) ひずみ精度はギャップ長の影響を受けるが、ギャップ長0.1mmで $\pm 0.019 \mu$ の測定精度となった。
- (3) 一周期当たり測定点数を最適にすることで測定精度を改善することが出来る。
- (4) CFRPに埋め込んだEFPIセンサは埋め込み前と比べると精度はわずかに悪化したが、ギャップ長0.14mmで $\pm 0.04 \mu$ の測定精度が得られた。

#### 謝辞

本研究を行うにあたって、ウシオ電機株式会社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な面からサポートいただきました。深く感謝いたします。

#### 文献

- (1) 保立和夫, 村山英晶, “光ファイバセンサ入門”, 光防災センシング振興協会, 2013, pp35
- (2) 高坂達郎, “複合材料成形技術の最前線 3.近年のFRP成形モニタリング技術とその応用”, 日本材料学会, Vol.67, No.8 (2018), pp.819-825