

CFRP の微小熱ひずみ測定用 EFPI センサの開発

Development of EFPI sensors for measuring tiny thermal strain of CFRP

航空宇宙工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 1255026 板谷 寛子

1. 緒言

CFRP は熱膨張が極めて小さな積層構成が可能であり、この特徴を応用し熱ひずみを抑えたい機械部品に利用されている^(1,2)。また微小な熱ひずみの制御により、高精度な位置決めが可能であり、埋め込み可能かつ高精度な光ファイバセンサが注目されている^(2,3)。ひずみ測定のための光ファイバセンサのひとつに EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) センサがある。EFPI センサは、埋め込みが可能かつセンサの構造を変えることで、容易に高精度を実現でき、埋め込みの影響を本質的に受けない。我々は CFRP の微小な熱ひずみを高精度で測定可能な EFPI センサの開発を進めてきた。これまでの研究で、ひずみ測定のための測定システムを構築し、作製した EFPI センサの室温における最高測定精度は平均±0.0182 μ を達成した⁽⁴⁾。また CFRP 積層板に埋め込まれた EFPI センサの最高測定精度は平均±0.0206 μ であり、埋め込みを行っていないセンサとほぼ同等の高い測定精度を達成している。しかし埋め込み性の向上のためにはより細径な EFPI センサの作製が求められる。そこで細径キャピラリ及び細径光ファイバを用いた、高精度なひずみ精度を持つ細径 EFPI 光ファイバセンサの開発を行った。

2. 実験方法

2.1 EFPI 光ファイバセンサ

図 1 に EFPI センサの構造を示す。図のようにガラスキャピラリ内で入射用と反射用の光ファイバ 2 本を用いて、ギャップ長 d を挟むように固定した。これまでの研究では外径 0.570mm、内径 0.140mm のキャピラリと直径 0.125mm の光ファイバを組み合わせることでセンサの作製を行ってきた。本研究では主に外径 0.200mm、内径 0.140mm の細径キャピラリ及び直径 0.080mm の細径光ファイバを使用しセンサの作製を行った。EFPI センサの測定系を図 2 に示す。本研究では広帯域光源(SLD, 中心波長 1550nm)を用いた。センサ内に入射した光はセンサ内の入射用と反射用の 2 本の光ファイバ端面でそれぞれ反射し干渉光を形成する。この干渉光を光スペクトラム・アナライザで測定した。

光源のスペクトルを $P_0(\lambda)$ とすると、測定スペクトルは以下に示される。

$$P(\lambda) = KP_0(\lambda)(1 + e^{-2\eta d}) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} + 2\phi\right) \quad (1)$$

ここで K は端面でのエネルギー反射率、 η は回折による第二反射波の減衰効果、 ϕ は反射時の位相遅れを示す。式(1)から明らかなように、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ついて、FFTによりパワースペクトルを求め、ピーク位置として d を得た。

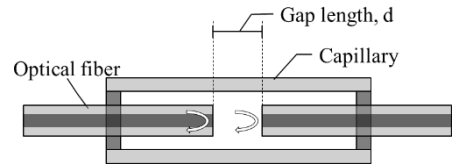


Fig.1 EFPI sensor

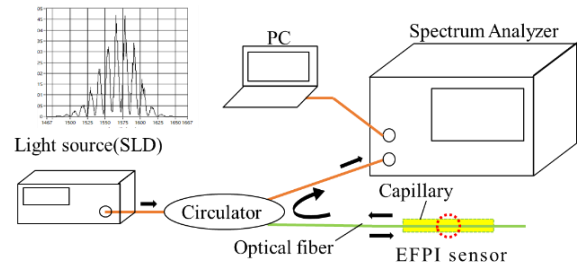


Fig.2 Measurement system of EFPI sensor

2.2 細径光ファイバを用いた EFPI センサの特性評価試験

本研究では引張試験を行うことにより、ファイバ径の違いがセンサ特性に与える影響について検証した。これまでと同様の寸法を持つ EFPI センサと入射用に細径光ファイバを使用した細径 EFPI センサを異なるギャップ長ごとに作製した。キャピラリはともに外径 0.570 のものを用いた。作製した EFPI センサを 20×150mm、厚さ 2mm のアルミ板にひずみゲージとともに貼り付けた。試験片を図 3 に示す。0.02mm/1min の速度でひずみゲージによる測定ひずみが 1000μ を達成するまで引張り、その間のひずみを 1s 間隔で測定した。

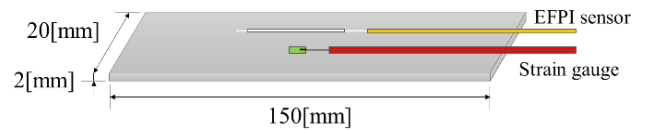


Fig.3 Dimensions of specimen.

2.3 細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

本研究では、ひずみ測定の瞬時安定性によってセンサの精度評価を試みた。細径 EFPI センサは細径キャピラリと細径光ファイバを使用することにより作製した。ギャップ長が約 0.05, 0.1, 0.15, 0.2mm の 4 種類の EFPI センサをそれぞれ 2 本ずつ作製し、室温でのひずみをスペクトル測定点数 501 点、測定幅 200nm で測定を行った。

2.4 CFRP 埋め込み細径 EFPI センサによる熱歪測定試験

2 種類の EFPI センサを作製し、それぞれ 30×70mm 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 積層板に繊維方向に埋め込みを行った。図 4 に試験片の寸法を示す。細径キャピラリと直径 0.125 の光

ファイバを用いたギャップ長約 0.16mm の EFPI センサを埋め込んだ試験片を試験片 A, 細径キャピラリと細径光ファイバを用いたギャップ長約 0.1mm の EFPI センサを埋め込んだ試験片を試験片 B とした. オープン内の温度を室温から 60 度まで昇温させ, その間の熱ひずみを 1.5 秒間隔で測定した.

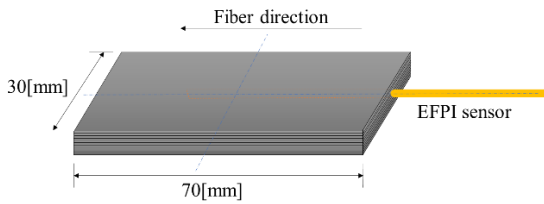


Fig.4 Dimensions of specimen.

3 実験結果及び考察

3.1 細径ファイバを用いた EFPI センサの特性評価

図 4 に光ファイバ直径 0.125 及び 0.080 の EFPI センサによる測定歪とひずみゲージによる測定ひずみの結果を示す. すべてのセンサにおいて傾きが同等であることから, 作製したセンサのゲージ長は光ファイバの直径に依存しないということがわかった. 一方 EFPI センサによる測定ひずみは, ひずみゲージの測定ひずみに対して減少しており, 傾きは 1 ではないことが分かる. この原因は使用したキャピラリ外径が 0.570 であり貼り付け用途としては大きく, これによるひずみ伝達率の悪化, またはセンサ作製時のゲージ長の変化が考えられる.

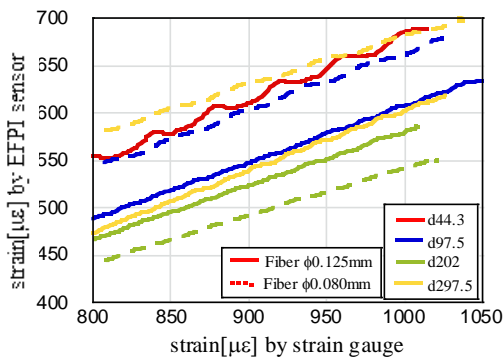


Fig.4 Measured strain by strain gauges and EFPI sensor

そこで外径 0.2 の細径キャピラリを使用した細径 EFPI センサ 2 本を用いて実験 2.2 と同様の引張試験を行い, センサとひずみゲージによる測定ひずみの比較を行った. その結果図 4 と同様の傾きを示したことから, ひずみ伝達率はキャピラリ外径の影響を受けないことがわかった. これより, EFPI センサによる測定ひずみが, ひずみゲージによる測定ひずみより減少している原因はひずみ伝達率の悪化ではなく, センサ作製時のゲージ長の変化によるものと分かった. 傾きが同等であることからゲージ長の見当は可能であるが厳密なゲージ長が必要な場合はあらかじめ測定する必要があると考えられる.

3.2 細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

本研究では早い周期で変動しているひずみ成分のみを取り出し, 変動の最小二乗平均 RMS 値を求め, これを測定精度として評価した. 表 1 に測定精度それぞれのギャップ長におけるひずみの平均測定精度の結果を示す. 1 本目に作製したセンサを A, 2 本目に作製したセンサを B とした. ギャップ長 0.05 のセンサ B において $\pm 0.0251\mu$ であり最も高精度となったが, これまでの研究における EFPI センサの最高測定

精度と比較するとわずかに悪化したことが分かる. しかし, ほぼすべてのセンサにおいて $\pm 0.05\mu$ 以下の高い測定精度を達成した. 一方でセンサ A のギャップ長 0.1 及びセンサ B のギャップ長 0.2 は大きく精度が悪化している. この原因は入射用光ファイバの端面状態やキャピラリ内への光ファイバの挿入角度などセンサの製造上に起因するセンサの個体差によるものと考えられる. これを微小な範囲で制御することは困難であり, 細径光ファイバ直径に合わせた内径をもつキャピラリを使用することで改善が見込める.

Table.1 Precision of each sensor

Gap length [mm]	Precision (Sensor A)	Precision (Sensor B)
0.05	$\pm 0.0389\mu$	$\pm 0.0251\mu$
0.100	$\pm 0.197\mu$	$\pm 0.0298\mu$
0.15	$\pm 0.0386\mu$	$\pm 0.0262\mu$
0.200	$\pm 0.0410\mu$	$\pm 0.126\mu$

3.3 CFRP 埋め込み細径 EFPI センサによる熱歪測定試験

図 5, 6 に試験片 A, B それぞれの熱ひずみの測定結果を示す. 試験片 A の埋め込み後の測定精度は平均 $\pm 0.0262\mu$ でこれまでの研究における外径 0.570 のキャピラリ及び直径 0.125 の光ファイバを用いた埋め込み EFPI センサの測定精度と同等の高い測定精度を達成した. しかし図 6 から試験片 B では短期安定性が大きく悪化しており, 熱ひずみ測定が出来ていないことが分かる. これは細径光ファイバを用いたことによるキャピラリとファイバ間の空隙の拡大や, 固有振動数の低下による振動の影響を受けたと考えられる. この結果からセンサの直径を細径にすることによる測定精度への影響はほとんどなく, 使用する光ファイバの直径に適した内径をもつキャピラリを使用することで, 埋め込み細径 EFPI センサにおいても高いひずみ測定精度が達成できると考えられる.

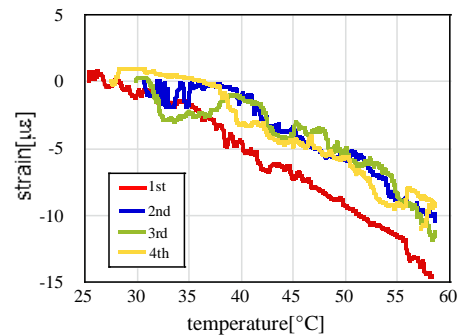


Fig.5 Relationship between strain and temperature of specimen A

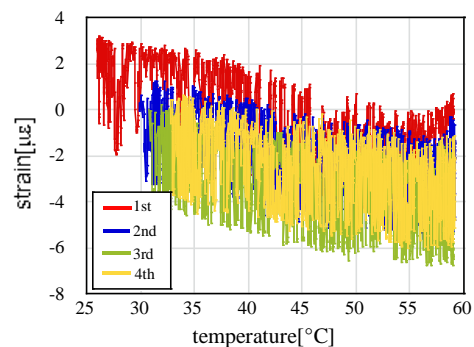


Fig.6 Relationship between strain and temperature of specimen B

4 結言

本研究では CFRP の微小熱ひずみの測定が可能な細径 EFPI センサを検討し、そのためにセンサの作製及び測定精度の評価を行い以下の結果を得た。

- (1) センサのゲージ長は光ファイバの直径に依存しないが、センサ作製時に変化していると考えられる。
- (2) 埋め込みを行っていない細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度は最も高精度なものでギャップ長 0.05 で $\pm 0.0251\mu$ 精度を達成した。
- (3) 細径キャピラリを用いた埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサでは直径 0.125mm の光ファイバを用いた場合で、 $\pm 0.0262\mu$ 精度を達成した。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた株式会社アドテックエンジニアリングの皆様に深く感謝申し上げます。

文献

- (1) E. Kappel, Compos. C, Vol.3 (2020), 100059.
- (2) K. Ogi, M. Tsutsumi, B. Nasrullah, Y. Tanaka, Y. Watanabe, Inter. J. Lightweight Mater. Manufact., 4 (2021), pp.27-36
- (3) 高坂達郎, Vol.67, No.8 (2018), pp819-825
- (4) 板谷覚子, “高知工科大学 2021 年度卒業論文”, 2021,