

2022（令和4）年度 修士学位論文

# CFRP の微小熱ひずみ測定用 EFPI センサの開発

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

2023 年 3 月 3 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
航空宇宙工学コース

1250026 板谷覚子

指導教員 高坂達郎

## 内容

第 1 章	緒言	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	従来の研究	1
1.3.	研究目的	2
第 2 章	本研究の基礎知識	3
2.1.	光ファイバセンサ	3
2.2.	EFPI 光ファイバセンサ	3
2.3.	EFPI 光ファイバセンサによるひずみ測定	6
2.4.	EFPI 光ファイバセンサの温度依存性	6
2.4.1.	拘束フリー	6
2.4.2.	埋め込まれた場合(ゼロひずみ)	7
2.5.	EFPI 光ファイバセンサの測定系	7
2.5.1.	単色光による干渉測定	7
2.5.2.	広帯域光による干渉スペクトル測定	8
2.5.3.	広帯域光による干渉周期測定(ピーク位置からの周期測定)	11
2.5.4.	広帯域光による干渉周期測定(FFT)	12
2.6.	ひずみ測定アプリケーションの開発	14
2.7.	ひずみ測定精度解析	20
第 3 章	実験方法	22
3.1.	EFPI 光ファイバセンサの製作	22
3.2.	EFPI 光ファイバセンサによるひずみ測定システム	24
3.3.	EFPI 光ファイバセンサの製作手順	25
3.4.	スペクトルに生じるノイズの原因	29
3.4.1.	ファイバ端面の違いがノイズに与える影響	29
3.4.2.	コネクタ部の接続状態がノイズに与える影響	29
3.5.	細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験	30
3.5.1.	細径光ファイバが与えるセンサ特性への影響	30
3.5.2.	細径キャピラリを使用に伴う光ファイバ直径がセンサ特性に与える影響	32
3.5.3.	測定精度評価試験	32
3.6.	埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験	32
3.6.1.	CFRP 試験片製造方法	32
3.6.2.	測定精度評価試験	37
3.7.	埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験	39
3.7.1.	CFRP 試験片製造方法(2 種類)	39
3.7.2.	測定精度評価試験(細径)	40
第 4 章	実験結果	41
4.1.	スペクトルに生じるノイズの原因	41
4.1.1.	ファイバ端面の違いがノイズに与える影響	41

4. 1. 2	コネクタ部の接続状態がノイズに与える影響	45
4. 2.	細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験	46
4. 2. 1	細径光ファイバが与えるセンサ特性への影響	46
4. 2. 2	細径キャピラリの使用に伴う光ファイバ直径がセンサ特性に与える影響	47
4. 2. 3	測定精度評価試験	48
4. 3.	埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験	61
4. 3. 1	埋め込みによるスペクトル及びギャップ長への影響	61
4. 3. 2	測定精度評価試験	63
4. 4.	埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験の実験結果及び考察	65
4. 4. 1	埋め込みによるスペクトル形状への影響	65
4. 4. 2	測定精度評価試験	69
第 5 章	結言	73
	参考文献	74
	謝辞	75

## 第1章 緒言

### 1.1. 研究背景

近年、複合材料が注目されており、私たちの生活の身の回りのものには数多く利用されるようになった。複合材料とは二種類以上の異なる材料を組み合わせることでそれぞれの特性を生かした材料のことである。複合材料の歴史は古いが、近年注目されるようになったことの要因として、軽量かつ高剛性の特徴を持つ繊維強化プラスチック(FRP: Fiber Reinforced Plastics)が誕生したことが挙げられる。この複合材料の1つに炭素繊維強化プラスチック(CFRP: carbon fiber reinforced plastic)というものがある。CFRPは炭素繊維と樹脂を組み合わせたもので、軽量かつ高剛性、高強度、低熱膨張などの特徴がある。特に炭素繊維は縦の熱膨張係数がマイナスであるため、一方向CFRPの縦方向の熱膨張率はマイナスになる一方で、繊維の横方向と樹脂の熱膨張率はプラスであることから、一方向CFRPの横方向の熱膨張率はプラスとなる。これらの特徴を応用し積層構成を工夫することによりゼロ熱膨張の積層板を作製することができる(ゼロ熱膨張CFRP積層板)[参考文献(06)]。この低熱膨張という特性に着目し、半導体製造装置のテーブルアームや、人工衛星の光学ベンチ・アンテナなどをはじめとする熱膨張を抑えたい機械や部品では、数多く応用がなされている[参考文献(06)(07)]。

熱膨張率の測定法には、熱分析によるPVT測定[参考文献(08)(09)]や、変位計を用いた変位測定[参考文献(10)]、そしてひずみセンサを用いた手法[参考文献(11)]など様々なものが提案されている。PVTによる熱変形測定は、変形の大きい樹脂の熱膨張測定によく利用されるが、熱膨張率の小さいCFRPの測定にも用いられる[参考文献(07)]。しかしこの手法は小さな試験片には適用できるが、大型の部品には利用できないという課題がある。変位計を用いた変位測定は大型の製品にも利用できるものの、ピンポイントでの変位測定精度はあまり高くなく、そのため微小な熱ひずみ測定への応用としては全体の平均的な変形を求めることになる。これらの測定方法に対して、ひずみセンサを用いた手法では、ピンポイントで高いひずみ測定精度を確保することが可能である。ひずみの測定方法は伝統的な電気抵抗式ひずみゲージによる測定が一般的であるが、温度依存性が高く、またドリフトが避けられないため長期安定性が低くなり、さらにひずみ分解能もそれほど高くはない。

近年では、ひずみ測定による熱膨張測定法として光ファイバセンサを用いた測定法が提案されている。光ファイバセンサは繊維状で柔軟性があり耐熱性も高いため母材への埋め込みを容易に行うことができる。また、軽量でありながら高強度であり、耐食性も高いため、材料に埋め込みを行っても、その材料の機械特性をほとんど変えることなく使用することができるという特徴がある[参考文献(13)]。さらに光ファイバセンサはひずみ測定精度が高く、ドリフトを起こさないため長期安定性に優れている。これらの利点から、CFRP積層板の熱膨張測定において、センサを埋め込んだ微小な熱ひずみ測定に適していると言える。特に長期安定性に優れていることから、製造後の運用状態でも製品の熱変形のモニタリングに使用することが可能で、異常状態の検出やより精密な位置決め精度の維持などが可能になると考えられる。

### 1.2. 従来の研究

光ファイバセンサを用いた高精度なひずみ測定には、FBG(Fiber Bragg Grating)センサとEFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)センサが使われている[参考文献(14)(15)(16)]。FBGセンサは周期的な屈折率変化がグレーティング(回折格子)として働き、これの満たす波長のみを反射させる仕組みである。光ファイバのガラスの屈折率は温度で変化するため、FBGセンサは温度変化に対しても感度が高いといえ

る。FBG センサの典型的なひずみ分解能は  $1\mu\epsilon$ 、温度分解能は  $0.1^{\circ}\text{C}$  (ひずみ  $1\mu\epsilon$  に相当) である。よって、熱膨張測定には温度の正確な測定が必須となる。また、光ファイバのガラスの屈折率は埋め込んだ時の残留応力にも影響されることから、特に CFRP 積層板への埋め込みで生じる非軸対称の横方向応力は反射 FBG スペクトルのピークが分かれるほどの大きな影響を与えることがあり、ひずみ測定精度にも大きく影響する。一方で FBG センサは直径が光ファイバと同等の  $125\mu\text{m}$  (通信用規格) であり、CFRP 積層板の埋め込みには適しているという利点もある[参考文献(15)]。

EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)センサは、ガラス製のキャピラリチューブと光ファイバで構成される干渉計型のひずみセンサである[参考文献(15)(16)]。FBG センサと比較すると、キャピラリチューブの直径が光ファイバより大きいため、埋め込み性に劣るという欠点がある。しかし、微小な熱ひずみ測定という観点からは、非常に大きな利点をいくつか持つ。まず、EFPI センサは埋め込みの影響を本質的に受けない。これは光ファイバをチューブ内で突き合わせる構造なので測定部が応力フリーとなり、測定値が残留応力の影響を受けないためである。さらにセンサの温度依存性はキャピラリチューブと光ファイバの温度依存性の差の影響を受けるため、温度依存性が非常に低い。ただし CFRP に埋め込んだ場合はキャピラリチューブの変形が母材の変形に一致するので、温度依存性は光ファイバ、つまり熔融石英の温度依存性 ( $0.5\mu\epsilon$ ) が影響することになる。また、EFPI センサの最も重要な利点としては、ゲージ長を長くすることで容易に高精度化が可能という点である。FBG センサのひずみ分解能を  $1\mu\epsilon$  から向上させるのは難しいが、EFPI センサのひずみ分解能は容易に  $0.1\mu\epsilon$  よりも小さい値を達成できる。よって、CFRP の微小な熱ひずみのリアルタイムモニタリングには EFPI が適していると言える。しかしながら、市販の EFPI センサのひずみ分解能は、最も用途の広い  $1\mu\epsilon$  程度に設定されており、EFPI センサを埋め込んだ場合による CFRP の微小熱ひずみ測定に関する研究は見られなかった。

先行研究として、CFRP の微小熱ひずみが可能な埋め込み EFPI センサを開発するという観点から、実際に EFPI センサを作製し、その測定システムを構築して実際に測定精度の評価を行った。構築した測定システムを用いて、EFPI センサの特性評価が可能であることが示された。また室温における微小な熱ひずみの測定においては  $\pm 0.0182\mu$  の高い測定精度をもつ EFPI センサの作製を達成した。また、作製した EFPI センサを CFRP 積層板に埋め込んだ場合においては  $\pm 0.0527\mu$  精度となり、埋め込みを行っていない場合と比較して大きく精度が悪化する結果となった。これは積層板の大きさや厚さにより加熱時にオープン内に生じる対流の影響など、外乱の影響をうけることで精度が悪化していることが考えられ、これに関して対策をとる必要があることが分かっている。

### 1.3. 研究目的

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に優れた EFPI 光ファイバセンサの開発を目的とした。目的達成のアプローチとして、まずこれまで先行研究にて使用してきた EFPI センサよりも、より細径な寸法を持つ光ファイバとキャピラリを検討し、新たなセンサ設計を試みた。これに伴い、細径 EFPI センサについて特性評価を行い、実際に室温における微小なひずみ測定や CFRP に埋め込みを行った場合について測定精度の観点から検証を行った。

## 第2章 本研究の基礎知識

### 2.1. 光ファイバセンサ

光ファイバは、内側から光を伝搬するためのコア、クラッド、ファイバを保護し強度の向上をはかるための1次皮膜、2次皮膜と同心円状に作製されている。コアの部分の屈折率をクラッドの部分の屈折率よりもわずかに高くすることで光をコア内に閉じ込め、全反射させて伝搬させている。光ファイバ中を伝搬する光の位相、光量などは外的要因により変化する。これを利用することで光ファイバはセンサとして機能する。短距離だけでなく長距離伝送が可能なため大型の構造物にも適しており、干渉計センサやFBGセンサ、分布型センサなど用途に応じた様々なセンサの研究が進められている。

光ファイバ中の光の伝搬角度には幾通りかあり、これをモードという。複数のモードを通す光ファイバをマルチモード光ファイバという。マルチモードのコア径は約0.05mmから最大で0.2mmになる。コア径を小さくしていくと、1つのモードのみが存在するようになり、これをシングルモード光ファイバという。コア径は約0.008mmである。マルチモードは光の入りやすさ(NA)が大きいため便利であるが、複数のモードが存在するためファイバ末端で信号が歪んでしまうモード分散があるため数km程度の短距離用途で利用されている。一方でシングルモードはモードが1つのみでモード分散が起きないので、遠距離用途で利用されている。

### 2.2. EFPI 光ファイバセンサ

EFPIセンサの基本的な形状を図2.2-1に示す。図2.2-1に示すように、EFPIセンサはガラス成分のキャピラリ内で入射用と反射用の2本の光ファイバを、空隙(ギャップ長:d)を挟んで突き合わせるように配置し、端部を接着剤等で固定して製作されている。接着部間の距離をゲージ長と呼び、ギャップ長の長さとは無関係に任意に設定することができる。

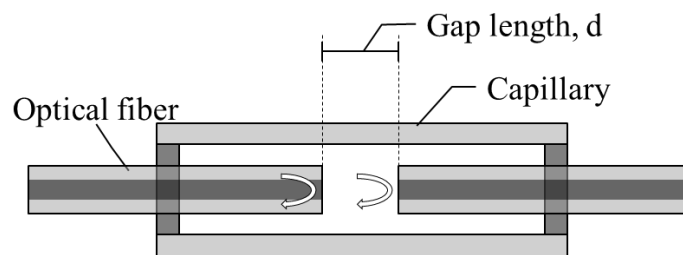


Fig.2.2-1 EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)sensor

EFPI光ファイバセンサは実際には多光波干渉であり図2.2-2のようになる。センサに入射した光は、入射用と反射用の光ファイバの端面でそれぞれ反射するが、このとき空気界面での透過・反射により位相回転 $\phi$ が生じている。また、入射光の後進波を $v_0$ 、端面での振幅の反射率と透過率をそれぞれ $r, t$ 、角周波数を $\omega$ とすると、光波は

$$v_{r1} = r_1 v_0 e^{i\phi} \quad (1)$$

$$v_{r2} = r_2 t_1 v_0 e^{i(\omega\tau + \phi')} \quad (2)$$

と書ける。ここで $\tau$ はギャップを往復することで生じる時間遅れである。

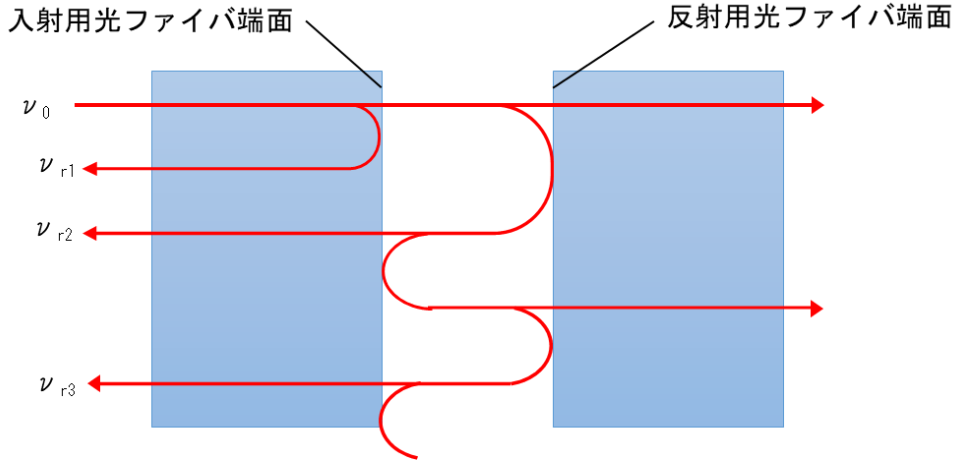


Fig.2.2-2 Reflection and transmission in a Fabry-Perot interferometer

ミラーがガラス/空気界面である場合は反射率が小さく、3次以上の反射波は無視できる。なお、これを低フィネスと呼ぶ。このとき反射波は2光波干渉で考えることが出来て、

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{r1} + \mathbf{v}_{r2} = \mathbf{v}_0(r_1 e^{i\phi} + r_2 t_1 e^{i(\omega\tau + \phi')}) \quad (3)$$

となるので、測定される光量は、入力光パワースペクトルを $P_0$ 、 $T, R$ はそれぞれの端面でのエネルギー反射率と透過率とすると

$$I = \langle \mathbf{v}_r \mathbf{v}_r^* \rangle = P_0(R_1 + R_2 T_1 + 2\sqrt{T_1 R_1 R_2} \cos(\omega\tau + 2\phi)) \quad (4)$$

となる。ここで、 $*$ は複素共役、 $\langle \rangle$ は時間に関するアンサンブル平均であり、

$$P_0 = \langle \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_0^* \rangle \quad (5)$$

実際には反射用光ファイバ端面からの反射光強度は、ギャップ長に応じて空気散乱と回折により減衰するので、二次反射波は

$$\mathbf{v}_{r2} = r_2 t_1 e^{-\eta d} \mathbf{v}_0 e^{i(\omega\tau + 3\phi)} \quad (6)$$

となる。ここで $\eta$ は減衰率である。これを考慮すると、

$$I = P_0(R_1 + R_2 T_1 + 2\sqrt{T_1 R_1 R_2} e^{-\eta d} \cos(\omega\tau + 2\phi)) \quad (7)$$

となる。

本研究では、ミラーはガラス/空気界面であり、光ファイバ（シリカガラス）の標準的な屈折率を1.45とすると[参考文献(16)]

$$R = R_1 = R_2 = \frac{(1 - 1.45)^2}{(1 + 1.45)^2} = 0.0337 \quad (8)$$

$$T = T_1 = T_2 = 0.9663 \sim 1 \quad (9)$$

であるから、反射光強度は

$$I = 2P_0R(1 + e^{-\eta d} \cos(\omega\tau + \Delta\phi)) \quad (10)$$

となる。

干渉信号の位相項は、ギャップ長 $d$ を用いて表すことが出来る。真空光速を $c_0$ とすると、

$$\omega = 2\pi k c_0 = \frac{2\pi}{\lambda} c_0 \quad (11)$$

である。ここで $k$ 、 $\lambda$ はそれぞれ真空中の光の波数と波長である。ギャップ長を往復する際に生じる時間遅れは、

$$\tau = \frac{2d}{c_0} \quad (12)$$

となる。また、位相回転を時間遅れに直すと

$$\tau_\phi = \frac{\phi}{\omega} = \frac{d_\phi}{c_0} \quad (13)$$

と書ける。ここで $d_\phi$ は、位相回転を伝搬距離で表したものである。

以上から、

$$\omega\tau + 2\phi = \omega(\tau + 2\tau_\phi) = \frac{4\pi}{\lambda}(d + d_\phi) \quad (14)$$

また、位相項は

$$\omega\tau + 2\phi = 2\pi k(d + d_\phi) \quad (15)$$

と表すこともできる。

以上から、干渉信号の位相から $d$ を求めることが出来ることが分かる。



### 2.3. EFPI 光ファイバセンサによるひずみ測定

ゲージ長 $L$ のキャピラリがひずみ $\varepsilon$ を受ける際、キャピラリ内の光ファイバは変形しない。このためキャピラリの変形量はギャップ長 $d$ の変化量 $\Delta d$ と同じになる。これをゲージ長で割ることでひずみを求めることができる。

$$L\varepsilon = \Delta d \quad (16)$$

よって

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{L} \quad (17)$$

本研究では、ギャップ長は位相回転を含んで

$$d + d_\phi \quad (18)$$

として測定される。初期のギャップ長を $d_0$ とすると、ギャップ長の変化は

$$(d_0 + \Delta d + d_\phi) - (d_0 + d_\phi) = \Delta d \quad (19)$$

となるため、 $\Delta d$ は位相回転の影響は受けない。ただし、計測中にミラー面に膜が付着するなどによって位相回転量が変化した場合は、その影響を受けることを注意しておく。

### 2.4. EFPI 光ファイバセンサの温度依存性

#### 2.4.1. 拘束フリー

キャピラリチューブと光ファイバの熱膨張をそれぞれ $\alpha_{cap}$ 、 $\alpha_{op}$ とすると、温度変化 $1^\circ\text{C}$ によるひずみの変化は

$$\varepsilon_T = \frac{L\alpha_{cap} - (L-d)\alpha_{op}}{L} = \alpha_{cap} - \alpha_{op} + \frac{d\alpha_{op}}{L} \quad (20)$$

よって、キャピラリチューブの熱膨張率が光ファイバとほぼ等しい場合は、

$$\varepsilon_T \sim \frac{d\alpha_{op}}{L} \quad (21)$$

となる。例えば $d = 0.1\text{mm}$ ,  $L = 30\text{mm}$ ならば $\varepsilon_T = 0.0033\alpha_{op}$ となり、温度依存性はほとんど無くなる。

## 2.4.2. 埋め込まれた場合(ゼロひずみ)

EFPI が埋め込まれてキャピラリチューブがゼロひずみに拘束されている場合、温度変化1°Cによる測定ひずみの変化は

$$\varepsilon_T = \frac{0 - (L - d)\alpha_{Op}}{L} = \left(1 - \frac{d}{L}\right)\alpha_{Op} \sim \alpha_{Op} \quad (22)$$

となる。よって、埋め込み時の微小ひずみ測定では光ファイバの熱膨張率が温度依存性になる。

## 2.5. EFPI 光ファイバセンサの測定系

### 2.5.1. 単色光による干渉測定

干渉計測で最もよく用いられるのが、図に示すような単色光源を用いた干渉計測である。

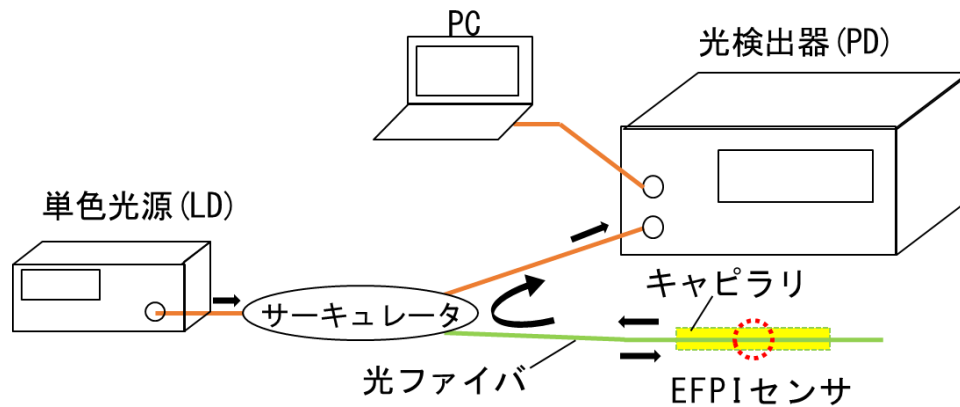


Fig2.5-1 Measurement system of EFPI sensor

この場合、光出力は

$$I = I_0(1 + e^{-\eta d} \cos(2\pi k(d + d_\phi))) \quad (23)$$

となる。ここで  $I_0$  は、初期ギャップ長で位相が  $2n\pi$  となる時の強度である。これをグラフで示すと図 2.5-2 となり、ギャップ長の変化と共に干渉信号が現れる。単色光による測定では、山と谷、または山から山への変化を  $d$  の変化として検出することが多い。これは、光強度を測定するために経路での減衰の影響を受けやすく、山から谷への中間の位相を正確に求めることが、事実上難しいためである。このとき、山から谷へ変化した時のギャップ長の測定精度は

$$2\pi k(d + \Delta d + d_\phi) - 2\pi k(d + d_\phi) = \pi \quad (24)$$

$$\Delta d = \frac{1}{k} = \lambda \quad (25)$$

となり，使用した波長が分解能になる．よってひずみ分解能は

$$\Delta \varepsilon = \frac{\lambda}{L} \quad (26)$$

例えばゲージ長が  $L=30\text{mm}$ ，単色波長が  $600\text{nm}$  のとき，ひずみ分解能は  $20\mu\varepsilon$  となる．大変形など，この精度で十分な測定もあるが， $0.1\mu$  以下を目指す我々の目的には適さない．

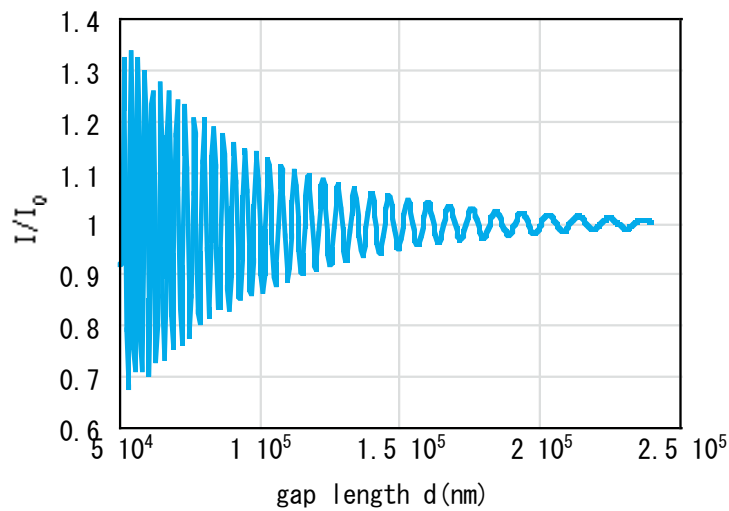


Fig.2.5-2

ただし，中心付近の線形的な変化の区間だけ（典型的には波長の $\pm 5\%$ 程度）を用いる場合は，ひずみ測定範囲は $\pm 20 \times 0.05 = 1\mu\varepsilon$ となり，微小な変化を測定できる．この測定は静的には不安定であるので，音響センサ（ハイドロフォン）などの振動測定に用いられている．[参考文献(17)]

### 2.5.2. 広帯域光による干渉スペクトル測定

高精度でひずみを測定するには，位相を正確に求める必要がある．そのためには，広帯域光を用いて位相情報を得る手法が望ましい．広帯域光による EFPI センサの光学系を図 2.2-3 に示す．

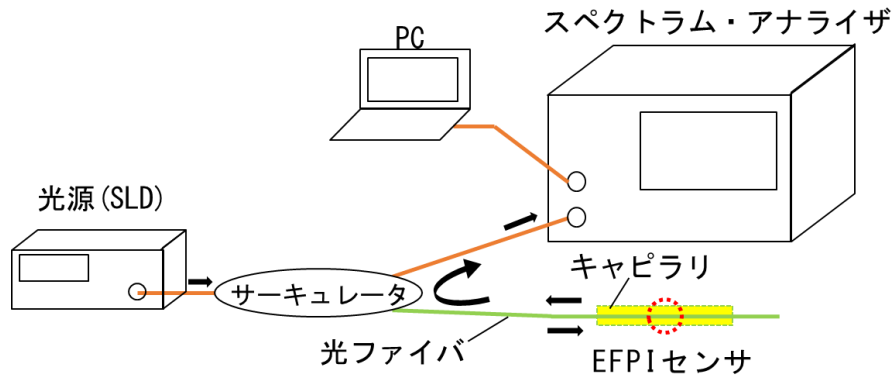


Fig.2.5-3 Monochromatic light source

光源に広帯域光(SLD)を利用した場合は, SLD の出力するスペクトルは図 2.5-4 のようにガウシアン状で以下の式のように表される.

$$P_0(\lambda) = \exp \left[ - \left( \frac{k - k_0}{k_w} \right)^2 \right] \quad (26)$$

例えば干渉光スペクトルは図 2.5-5 のようになる.

EFPI の伝達関数は

$$T(\lambda) = 1 + e^{-\eta d} \cos \left( \frac{4\pi d}{\lambda} + 2\phi \right) \quad (27)$$

であるから, EFPI のスペクトルは以下の式で表される.

$$2P_0(\lambda)T(\lambda) = 2R \left[ - \left( \frac{k - k_0}{k_w} \right)^2 \right] (1 + e^{-\eta d}) \cos \left( \frac{4\pi d}{\lambda} + 2\phi \right) \quad (28)$$

例えば,  $\phi=0$ ,  $d=100\mu\text{m}$  とすると, 伝達関数は図 2.5-5 のようになる.

よって, EFPI から得られるスペクトルは図 2.5-6 のようになる.

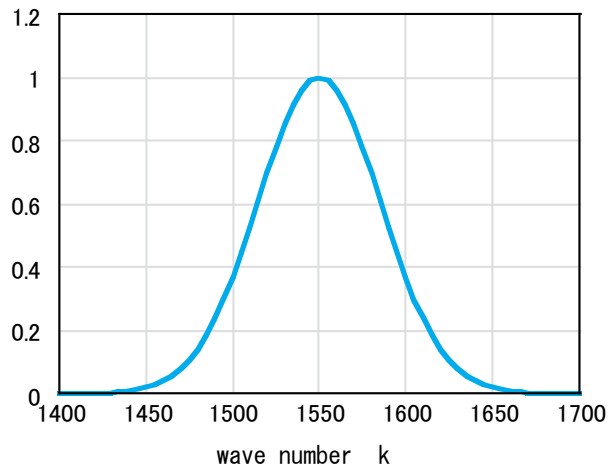


Fig.2.5-4 Spectrum of SLD light source ( $\lambda_0 = 1550nm, \lambda_w = 50nm$ )

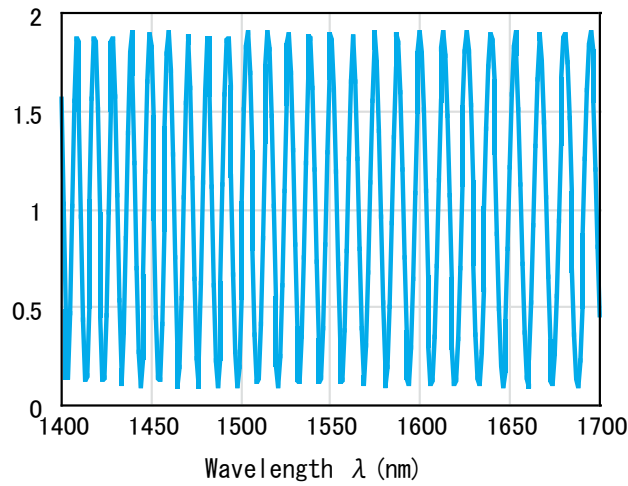


Fig.2.5-5 Interference transfer function of EFPI Fiber Optic Sensor  
( $d = 100[\mu m], \eta = 1000[1/\mu m]$ )

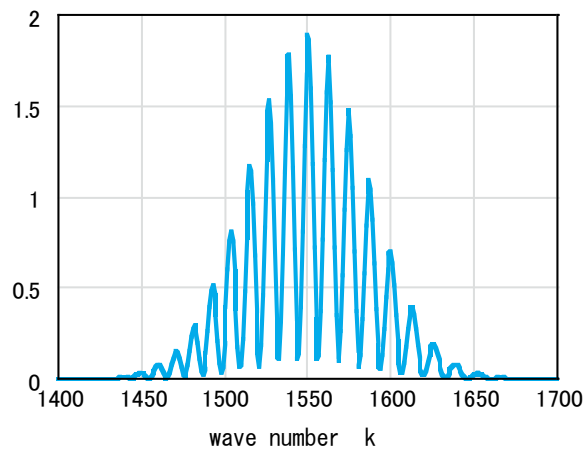


Fig2.5-6 SLD light source + EFPI optical fiber sensor spectral diagram  
( $d = 100[\mu m], \eta = 1000[1/\mu m]$ )

### 2.5.3. 広帯域光による干渉周期測定(ピーク位置からの周期測定)

スペクトルの干渉周期からギャップ長の変化を得ることができる．図 2.5-7 のようなスペクトルの場合， $n$  個の山を含む部分の端部ピーク波長を  $\lambda_1, \lambda_2$  とする．このとき，この区間における位相変化は  $2(n-1)\pi$  であるので，

$$\frac{2\pi(2d+2d_\phi)}{\lambda_1} = \frac{2\pi(2d+2d_\phi)}{\lambda_2} + 2(n-1)\pi \quad (29)$$

$$d+d_\phi = \frac{(n-1)}{2} \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} \quad (10)$$

となる．これより，ギャップ長を得ることが出来る．この手法の推定誤差  $d_e$  は，ピーク位置の誤差  $\Delta\lambda$  を用いて

$$\Delta d = \frac{(n-1)}{2} \frac{(\lambda_1 + \Delta\lambda)(\lambda_2 + \Delta\lambda)}{\lambda_2 + \Delta\lambda - (\lambda_1 + \Delta\lambda)} - \frac{(n-1)}{2} \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \sim \frac{(n-1)}{2} \frac{(\lambda_2 + \lambda_1)\Delta\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (31)$$

と書ける．例えば，ゲージ長 30mm,  $n=11$  個の幅を  $\lambda_1 = 1450\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1650\text{nm}$ ,  $\Delta\lambda = 0.1\text{nm}$  とすると

$$\Delta d = \frac{(11-1)}{2} \frac{1650+1450}{1650-1450} \times 0.1 = 7.75 \quad (32)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{7.75 \times 10^{-9}}{30 \times 10^{-3}} = 2.58 \times 10^{-7} = 0.258[\mu\varepsilon] \quad (33)$$

よって，ピーク位置をより精度よく求めることが出来れば，この手法は有望である．しかし実際には，ピークカウントによってピーク位置を精度よく（例の場合， $\Delta\lambda = 0.01\text{nm}$  より小さくする）求めるのはなかなか難しく，本研究では検討はしたもののこの手法は取らなかった． $\lambda_1$

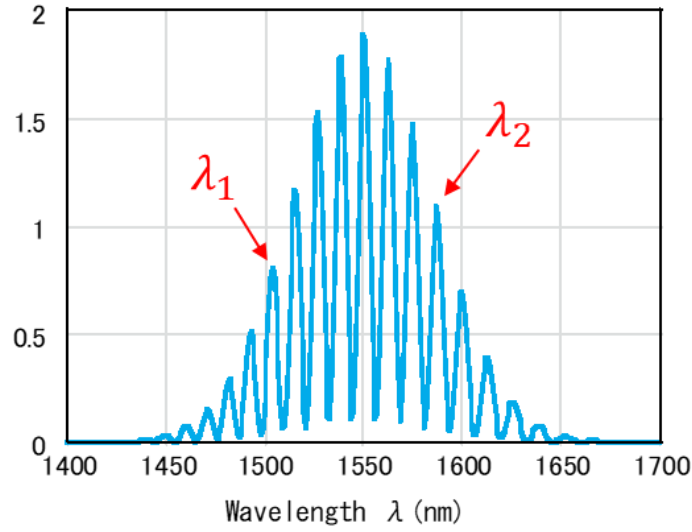


Fig.2.5-7

#### 2.5.4. 広帯域光による干渉周期測定(FFT)

フーリエ変換では理論的に積分計算が行われるため、波長測定誤差は平均化されて小さくなる。そこで本研究では、FFTを用いたギャップ長の検出手法を採用した。

EFPIのスペクトル $P(\lambda)$ は以下の式で表される。

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \left( 1 + e^{-\eta d} \cos\left(\frac{4\pi \tilde{d}}{\lambda}\right) \right) \quad (34)$$

$$\tilde{d} = d + d_\phi$$

よって、以下で定義される波数を用いると

$$\tilde{k} = \frac{2}{\lambda} \quad (35)$$

ギャップ長が $\tilde{d}_0$ のときのスペクトルは以下のように書ける。(図 2.5-8)

$$P(\tilde{k}) = P_0(\tilde{k}) (1 + e^{-\eta \tilde{d}_0} \cos(2\pi \tilde{k} \tilde{d}_0)) \quad (36)$$

よって

$$T(\tilde{k}) = \frac{P(\tilde{k})}{P_0(\tilde{k})} = (1 + e^{-\eta \tilde{d}_0} \cos(2\pi \tilde{k} \tilde{d}_0)) \quad (37)$$

これをフーリエ変換すると

$$F[T(\tilde{k})] = \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\eta \tilde{d}_0} \delta(\tilde{d} - \tilde{d}_0) \quad (38)$$

となる. ここで $\delta$ はディラックのデルタであり,  $\tilde{d} - \tilde{d}_0$ の時に鋭いピークを持つことが分かる. (図 2.5-9)

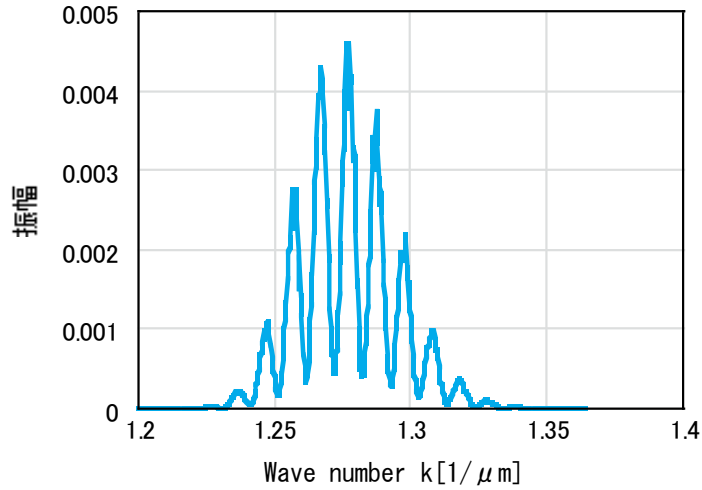


Fig.2.5-8

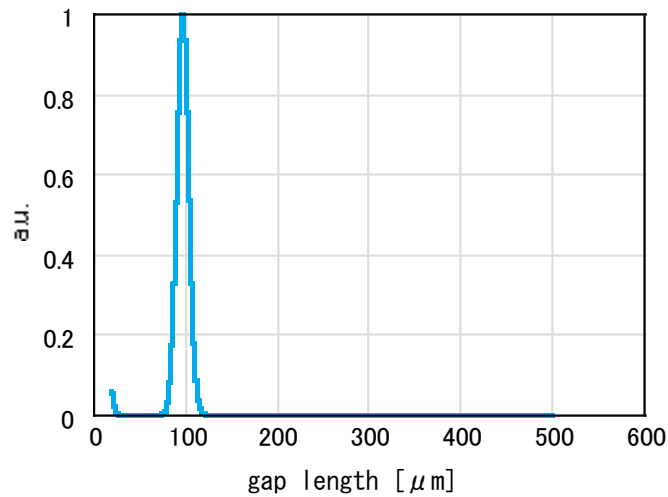


Fig.2.5-9

この手法を用いる上で, 以下の問題点が挙げられる.

- (1) 光スペクトラム・アナライザで得られるデータは波長の等間隔データであり, 波数の等間隔データではない
- (2) 光スペクトラム・アナライザで得られるデータ数は標準で 501, 最大でも 2001 点であり, FFT によるギャップ長の解像度には不十分である.



(1)については、波長等間隔データを線形補間により再サンプリングによって波数 $\tilde{k}$ の等間隔データに変換した。

(2)については、データ数を  $10^6$  に増やして、測定データ以外をゼロパッドして、スペクトル解像度を向上させた。

元のデータ数を  $N$ ，波長刻みを  $\Delta\lambda$  とするとき

$$\begin{aligned}\tilde{k}_0 &= \frac{2}{\lambda_{N-1}}, & \tilde{k}_{N-1} &= \frac{2}{\lambda_0}, & \lambda_i &= \lambda_0 + i\Delta\lambda \\ \Delta\tilde{k} &= \frac{\tilde{k}_{N-1} - \tilde{k}_0}{N-1} = \frac{2}{N-1} \frac{\lambda_{N-1} - \lambda_0}{\lambda_0\lambda_{N-1}}\end{aligned}\quad (39)$$

となる。サイズ拡張したデータ数を  $N_{FFT}$  (2 の乗数) とすると

$$\Delta\tilde{d} = \frac{1}{\Delta\tilde{k}(N_{FFT} - 1)} = 2 \frac{N-1}{N_{FFT} - 1} \frac{\lambda_0\lambda_{N-1}}{\lambda_{N-1} - \lambda_0}\quad (40)$$

例えば、ゲージ長 30mm， $\lambda_1 = 1450nm$ ， $\lambda_2 = 1650nm$ ， $\Delta\lambda = 0.1nm$  とすると

$$\Delta\tilde{d} = 2 \frac{N-1}{N_{FFT} - 1} \frac{1650 * 1450}{1650 - 1450} = \frac{N-1}{N_{FFT} - 1} \times 23.9[\mu m]\quad (41)$$

となる。ゲージ長 30mm で  $0.01\mu\epsilon$  を得るには、 $\Delta\tilde{d} = 0.3nm$  の解像度が必要になる。この条件では

$$\frac{N-1}{N_{FFT} - 1} \leq \frac{0.3}{23.9 \times 10^3} = 1.26 \times 10^{-5}\quad (42)$$

つまりサンプリング 501 点の場合は

$$N_{FFT} - 1 \geq \frac{501}{1.26 \times 10^{-5}} = 3.98 \times 10^7\quad (43)$$

となり、一千万点以上のデータ点数の拡張が必要になる。しかし、ピークが鋭いならば、ピーク位置はスペクトルの横軸の解像度以上の精度で求めることが出来るため、本研究では実験用の PC でも計算が 1s 以内ですむ 100 万点を採用した。

## 2.6. ひずみ測定アプリケーションの開発

本研究では、本節で説明した理論に基づき、LabView を用いて測定スペクトルからギャップ長、そしてひずみを測定するアプリケーションの開発を行った。

典型的な EFPI の出力スペクトルを図 2.6-1 に、その解析ウインドウを図 2.6-2 にそれぞれ示す。 EFPI の出力スペクトルは等間隔波長スペクトルなので、これを等間隔波数スペクトルに変換する。変換されたスペクトルにウインドウを掛けたデータが図 2.6-2 の下のグラフである。これに FFT を用いてパワースペクトルを求める。求められたパワースペクトルが図 2.6-2 の上のグラフである。最後に、ピークカウントによって、ピーク位置として  $d$  の値を求める。

詳細な手順は後述する。

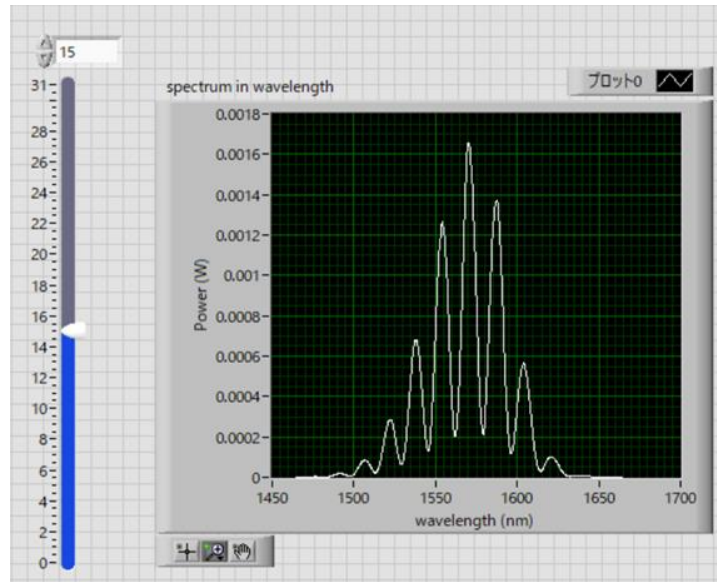


Fig2.6-1 EFPI spectrum example

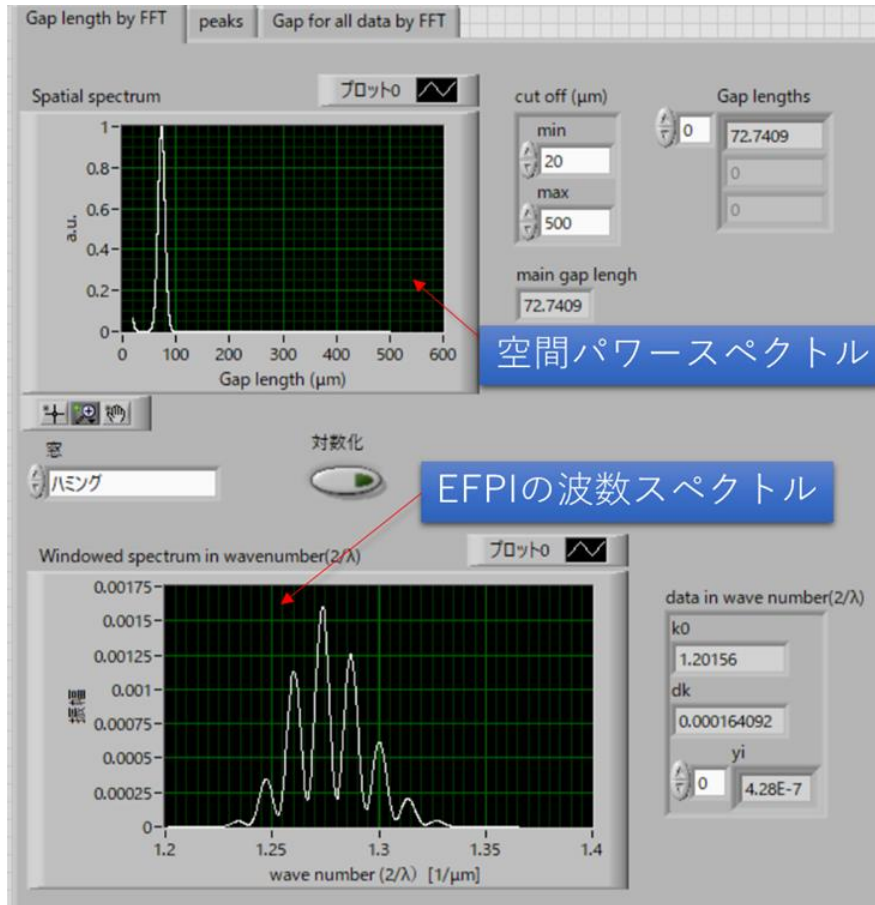


Fig.2.6-2 Analysis window of EFPI Spectrum

ギャップ長の解析手順を以下に示す.

- (1) スペクトルのデータを読み込み, データ配列 $y_i$ , 開始波長 $\lambda_0$ , 波長刻み $\Delta\lambda$ の情報を得る.
- (2) 元が対数 (dBm) ならばそのまま, または必要ならば (対数化), 対数に変換する. 対数化は以下の式に従う (図 2.6-3).

$$y_i = 10 \text{Log}_{10} y_i \quad (44)$$

- (3) 波数空間 ( $2/\lambda$ ) に直し, 再サンプリングにより波数の等間隔データとする (図 2.6-4).
- (2-1) 波長データ配列を作る.

$$\lambda_i = \lambda_0 + i \times \Delta\lambda \quad (45)$$

- (2-2) 波数データ配列 (非等間隔) を作る.

$$k_i = \frac{2000}{\lambda_i} \quad (46)$$

ここで 2000 にしているのは, 波長の nm から  $\mu\text{m}$  への単位変換を含む.

- (2-3) 波数とスペクトルのデータ配列をリバースする.

(2-4) 最小・最大波数と波数間隔を求め、等間隔波数データを得る。データ数を  $N$  とすると

$$\Delta k = \frac{k_{max} - k_{min}}{N - 1} \quad (47)$$

(2-5) 等間隔の波数データ配列を作成

$$k_i = k_{min} + i \times \Delta k \quad (48)$$

(2-6) 等間隔波数配列に対応するスペクトル値を、線形補間で求める。

(4) 対数データの場合は、2.7 節と同様にしてバックグラウンド  $y_{Bi}$  を差し引く (図 2.6-5)。

$$y_i = y_i - y_{Bi} \quad (49)$$

- (5) ウィンドウ処理を行う。アプリケーションではウィンドウの種類は選択できるが、本研究ではハミングウィンドウを用いた。(図 2.6-6)
- (6) 1,000,000 のゼロデータを追加して、FFT 用のデータとする。(図 2.6-6)
- (7) FFT によりパワースペクトル密度 (PSD) を求める (図 2.6-6)
- (8) PSD はゼロ付近に最大ピークがあるので、指定区間長さ  $[d_{min}, d_{max}]$  のデータだけを取り出し、その区間の最大値で正規化する (図 2.6-6)
- (9) しきい値 0.8 でピークカウントを行い、ギャップ長  $d$  を求める (図 2.6-7)

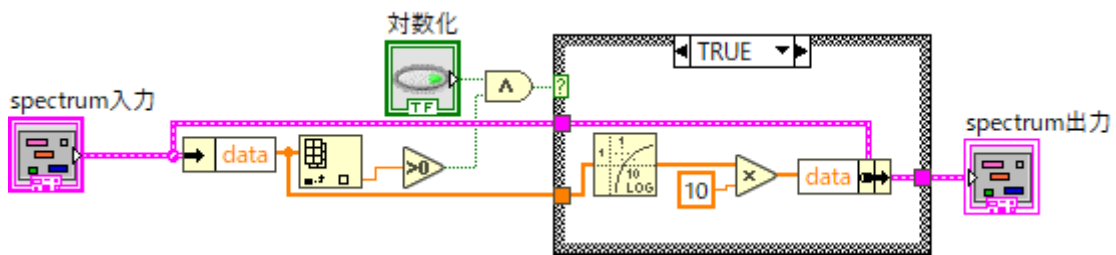


Fig.2.6-3

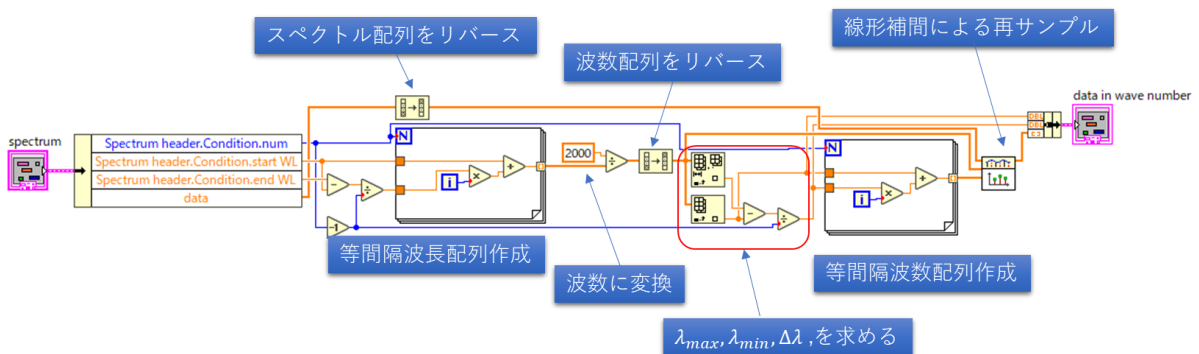


Fig.2.6-4

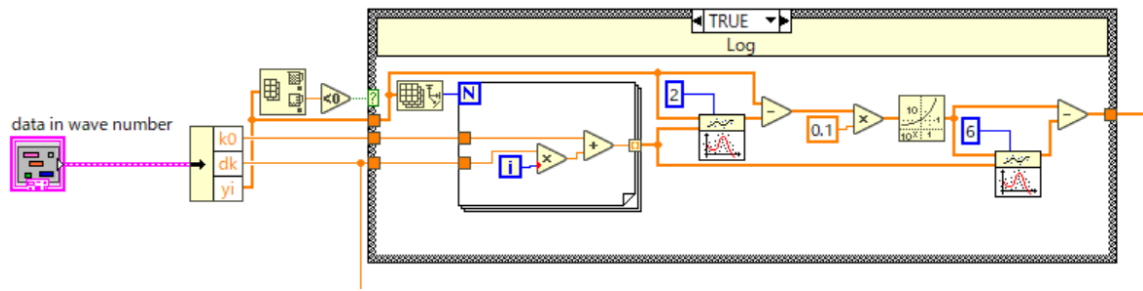


Fig.2.6-5

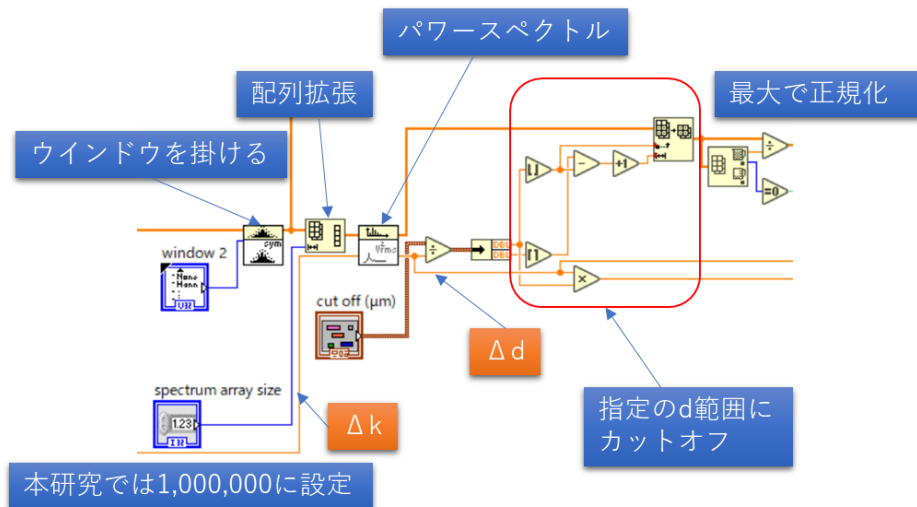


Fig.2.6-6

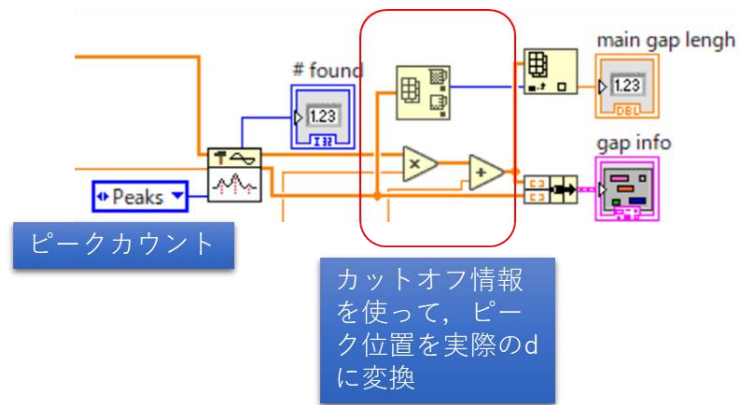






Fig.2.6-7

解析に用いた主な LabView 関数のリスト

- 1D 補間 
- 対称窓(DBL) 

- オートパワースペクトル  An icon showing a power spectrum plot with a peak labeled  $\sqrt{f_{rms}}$ .

- ピーク検出  An icon showing a waveform with a peak detected by a red vertical line.

## 2.7. ひずみ測定精度解析

本研究では、ランダムノイズ振幅を最小二乗平均 RMS によって求めて、測定精度を評価した。温度変化はゆっくりと起きるので、早い変動であるノイズ成分をゆっくりした変動から求める。測定したひずみ変動から $n$ 次の多項式近似(図 2.2-7)をもとめると

$$y = a_0x^n + a_1x^{n-1} + a_2x^{n-2} + \dots + a_nx^0 \quad (50)$$

となる。この近似式を用いて近似値 $y$ を求める。(図 2.2-8)。ひずみと近似値の差分をとり、これをノイズ $e$ とした。(図 2.2-9)

$$e = \varepsilon - y \quad (51)$$

このノイズ $e$ の二乗の平均をとって RMS を求めた。データ数が  $N$  個とした場合、RMS は

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2} \quad (52)$$

となる。

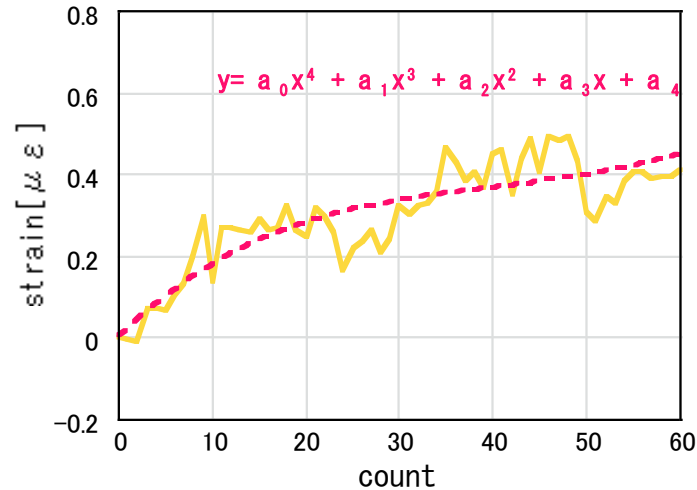


Fig.2.2-7 Polynomial approximation (n=4)

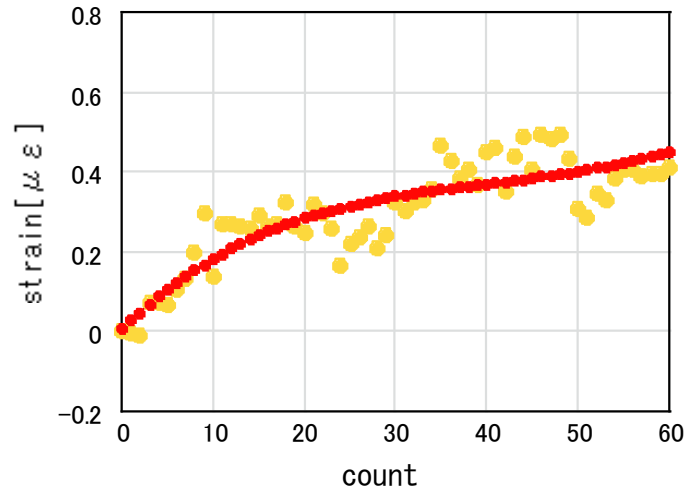
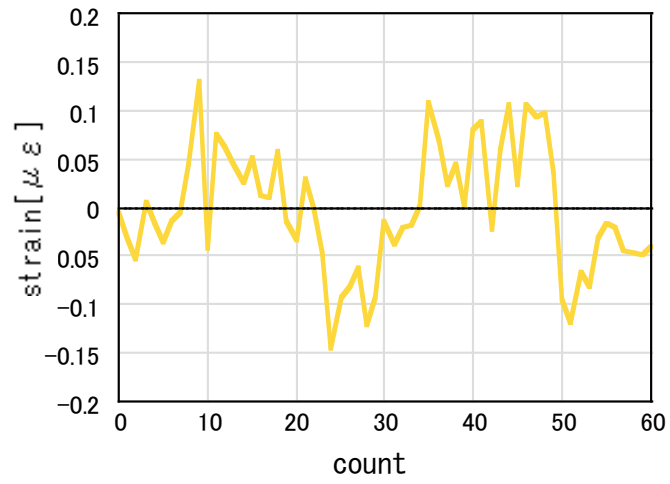


Fig.2.2-8 Approximation,  $y$



☒ 2.2-9 Noise,  $e$



### 第3章 実験方法

#### 3.1. EFPI 光ファイバセンサの製作

本研究では、CFRP 積層板への埋め込みかつひずみ測定が可能な EFPI センサを 2 種類製作した。図 3.1-1、図 3.1-2 に EFPI 光ファイバセンサの寸法を、図 3.1-3、図 3.1-4 に外観写真を示す。センサ部は、ガラス製の筒状のキャピラリと光ファイバを使用した。キャピラリには長さ 30mm、外径 0.570mm、内径 0.140mm のこれまでと同様の寸法をもつものと、長さ 30mm、外径 0.200mm、内径 0.140mm の細径キャピラリを用いた。光ファイバには直径 0.125mm または直径 0.080mm の被覆を除いた 2 本を使用した。なお、入力側に細径光ファイバを使用する場合、反射側には直径 0.125mm の光ファイバを使用した。光ファイバはキャピラリの端部で接着され、接着剤は内部にほとんど浸透しないと想定し、本センサのゲージ長はほぼ 30mm と仮定した (図 3.1-5)。

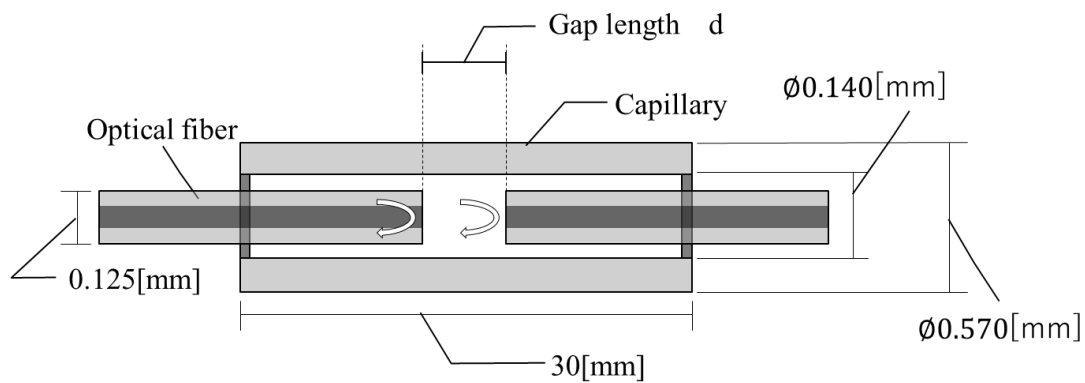


Fig. 3.1-1 Dimensions of EFPI sensor with standard fiber

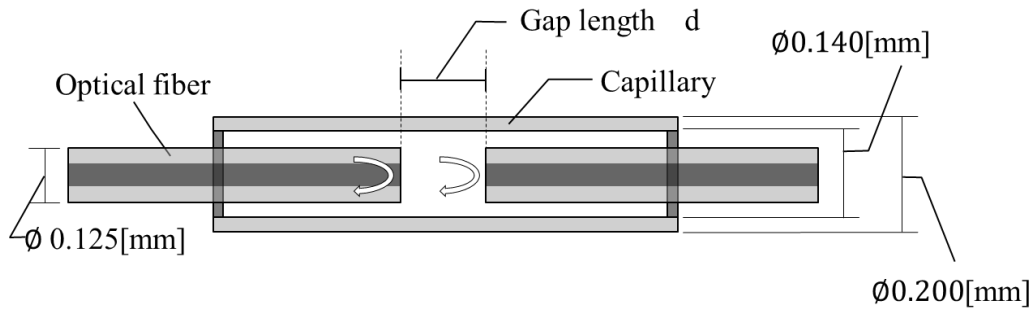


Fig.3.1-2 Dimensions of small diameter of EFPI sensors

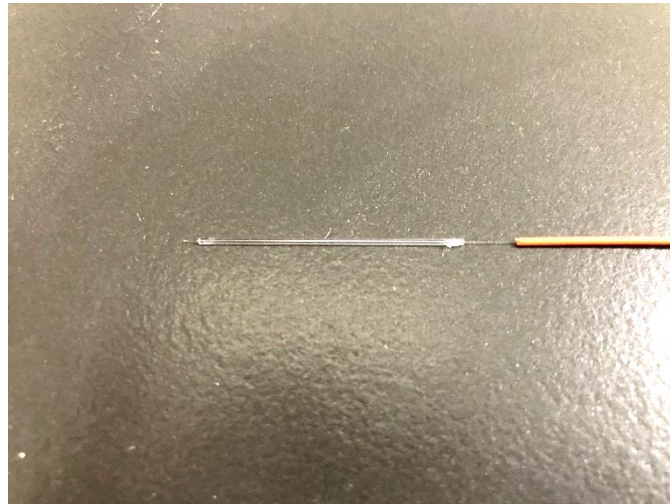


Fig.3.1-3 Exterior photo of EFPI sensor



Fig.3.1-4 Exterior photo of a small diameter EFPI sensor

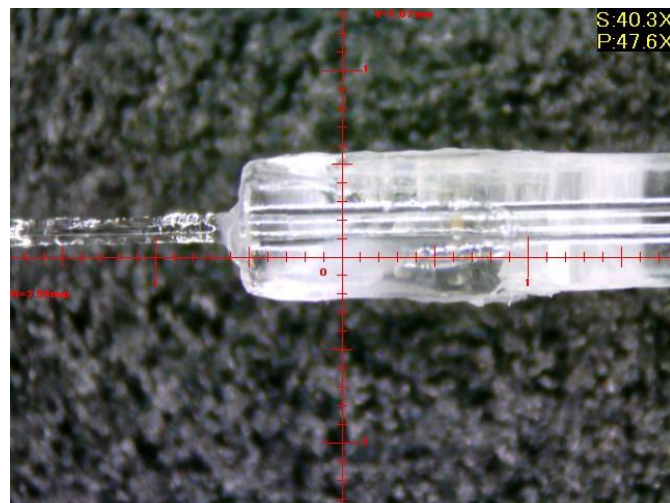


Fig.3.1-5 Adhesive end

### 3.2. EFPI 光ファイバセンサによるひずみ測定システム

図 2.2-3 で示した光学系を, SLD (中心波長 1550nm, S5FC1005P, TMORLABS) ,光サーキュレータ, 光スペクトラム・アナライザ (MS9710C-R, Anritsu) で構成した. また, 測定したスペクトルは GPIB を通じて PC で記録した. 測定システムの全体図を図 3.2-1 に示す.

本研究では, SLD の出力は 600mA とした. センサを接続した後, オートメジャーによってゲインを自動調整し, 中心波長を 1570nm, スパンを 200nm にセットする. その後, PC の自作測定ソフト (LabView によるプログラミング) を起動しスペクトルを記録する. 測定のタイミングは PC から制御される. ただし, センサの製造工程などでは記録しない.

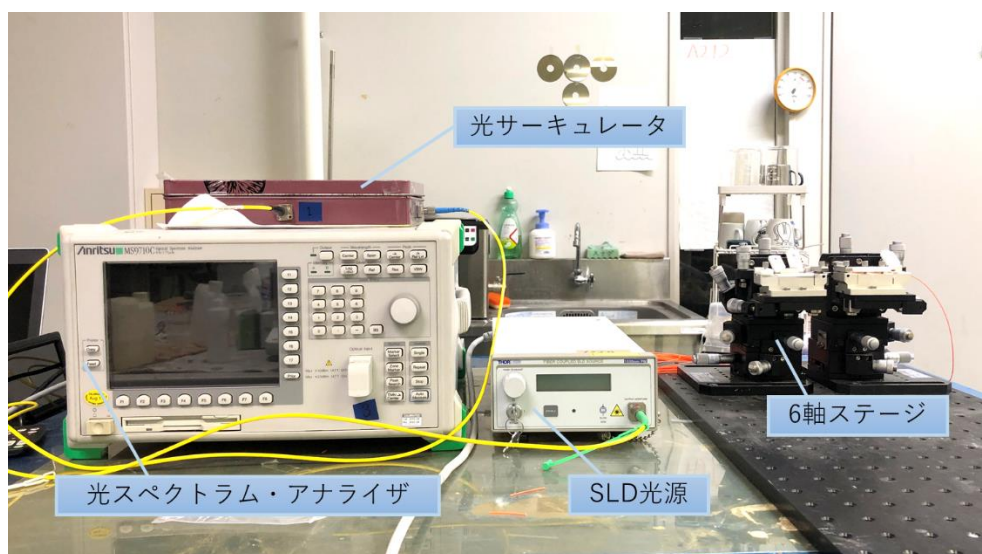


Fig.3.2-1 Measurement system

### 3.3. EFPI 光ファイバセンサの製作手順

製作手順について以下に記述する。反射スペクトルを観測して反射面の状態を確認しながら製作を行った。製造に用いた装置の外観を図 3.3-1。軸合わせには光ファイバ調芯用 6 軸ステージ（図 3.3-2, E220B, 駿河精機）を用いた。

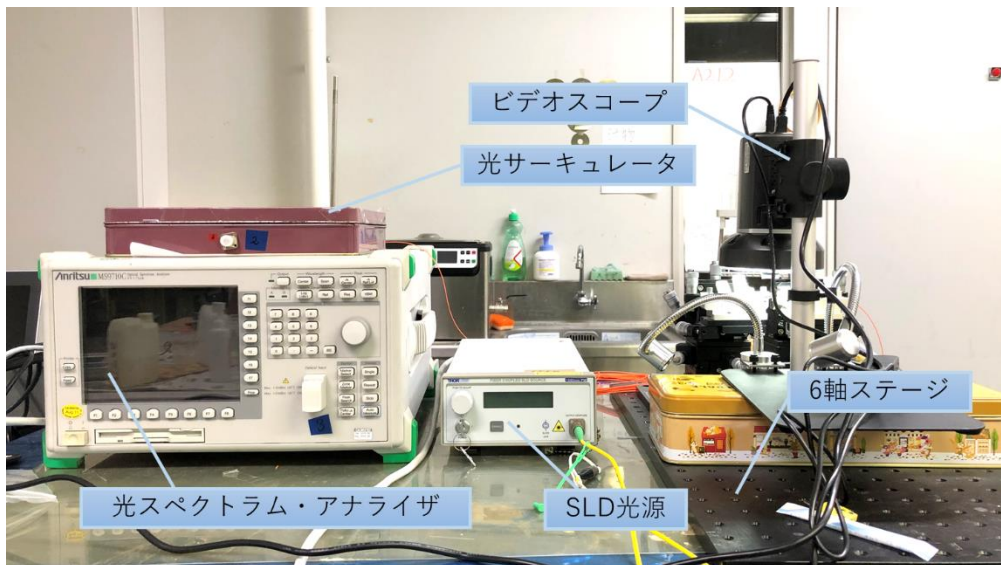


Fig.3.3-1 Manufacturing Equipment



Fig.3.3-2 fiber optic alignment 6-axis stage

- ① 光ファイバの被覆を除いた後、変性エタノールで表面を拭いて、光ファイバカッター（図 3.3-3、図 3.3-4）で端面を平面切断する（図 3.3-5）。
- ② 6 軸ステージに、入射用光ファイバとキャピラリをセットし、入射用光ファイバがキャピラリの壁面で反射するように、ビデオスコープと目視で調整する。（図 3.3-6）。なお、このステップでは、多重反射が起きないガラス平面であれば、キャピラリでなくても構わない。
- ③ ギャップ長を調整しながらスペクトルを測定し、干渉が綺麗に表れるかどうかを確認する。この時、ノイズが大きい場合や干渉が正弦状にならないことがある。ノイズが大きい場合は接続をコネクタにゴミが付着している可能性があるため接続端をクリーナーで拭き取るなどしてチェックする。それでも改善しなかった場合は、①に戻って端部を切り直す。
- ④ 切断面を確認した後、光ファイバの軸がキャピラリの中心に合うようにステージを調整して、光ファイバをキャピラリ中央付近まで挿入する。（図 3.3-7）
- ⑤ 瞬間接着剤を端部に付け、光ファイバとキャピラリの隙間に浸透させる。（図 3.3-8）
- ⑥ 固定後、センサをステージから取り外して、光ファイバが挿入されていない側を内側にして再びステージにセットする。そして①～④のステップを繰り返す。
- ⑦ ギャップ長をスペクトルから測定しながら、規定のギャップ長となるように調整する。
- ⑧ ⑤と同様にして未接着の端部を接着固定する。（図 3.3-8）
- ⑨ 反射用光ファイバを適当な長さで、ハサミ等でカットする。これは、（図 3.3-9）切断部からの反射光量を小さくするためである。カットによってスペクトルに異常が現れる場合は、切断面を粗すか、または斜めになるように研磨する。



Fig.3.3-3 Optical fiber cutter (for optical fiber with a diameter of 0.125)



Fig.3.3-4 Optical fiber cutter (for optical fibers with an optical fiber diameter of 0.08)

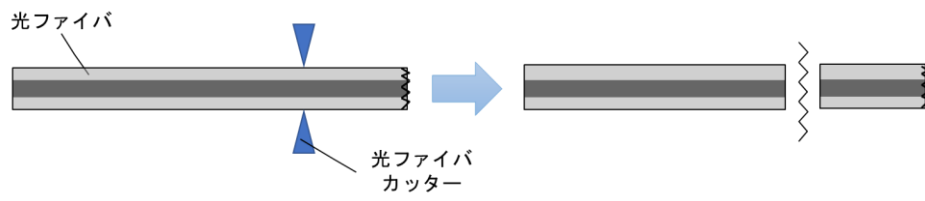


Fig.3.3-5 Planar cutting of end faces

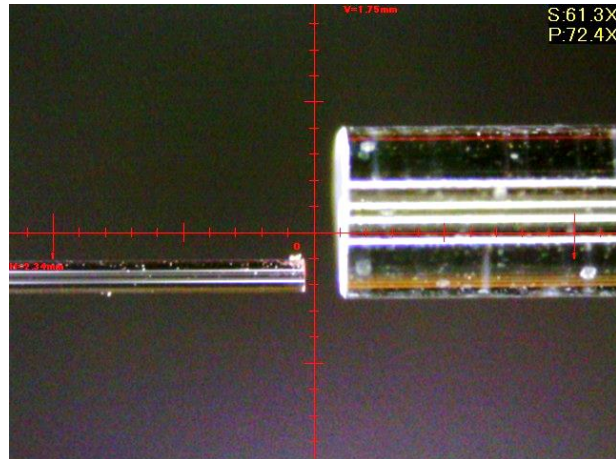


Fig.3.3-6 Wall reflection

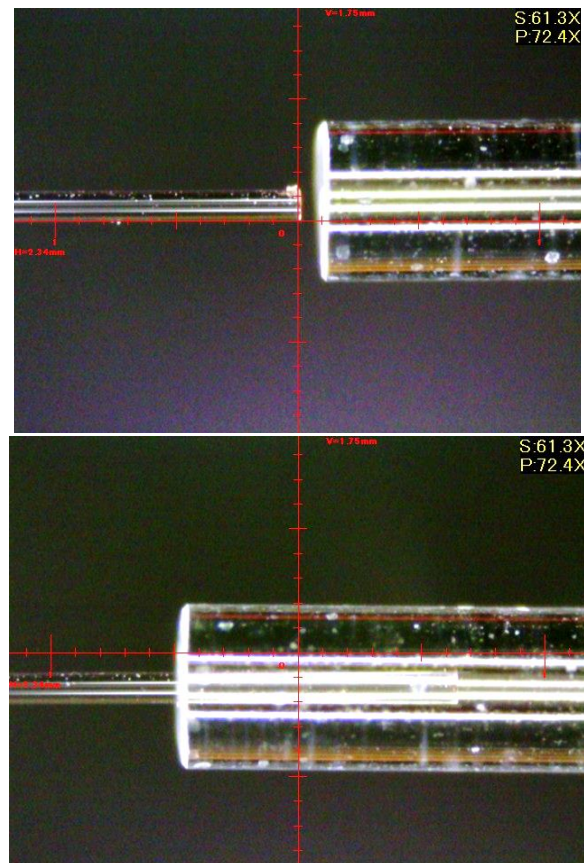


Fig.3.3-7 Insertion of optical fiber

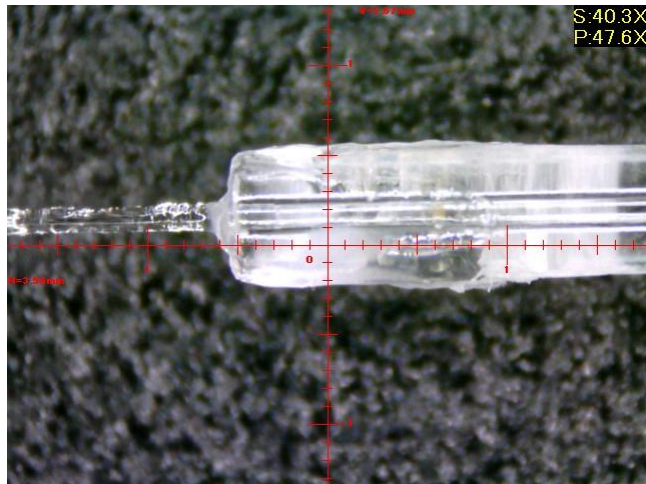


Fig3.3-8 adhesion

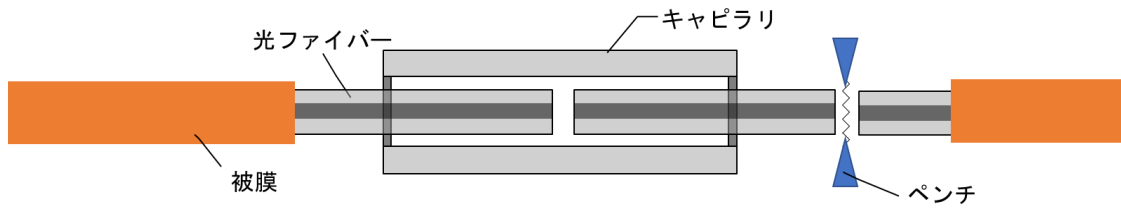


Fig.3.3-9 Step ⑨

### 3.4. スペクトルに生じるノイズの原因

#### 3.4.1 ファイバ端面の違いがノイズに与える影響

実験概略図を図 3.4-1 として以下に示す. センサ作製において, 端面及びギャップ長の違いが与えるノイズへの影響について検証した. キャピラリに挿入した2本のファイバのうち, ミラーとして片側は瞬間接着剤で固定し, もう片側はフリーとした. フリーの光ファイバを入射用とした. 端面を3回カットし3種類の端面(端面 a, 端面 b, 端面 c)を設定した. それぞれの端面につき  $d=$ 約  $50\mu$ , 約  $100\mu$ , 約  $150\mu$ , 約  $200\mu$ , 約  $300\mu\text{m}$  のギャップ長でそれぞれ室温でのひずみを1秒間隔で約60点, 計3回測定を行った. 測定幅は  $200\text{nm}$ , 測定点数は  $501\text{Pt}$  とした.

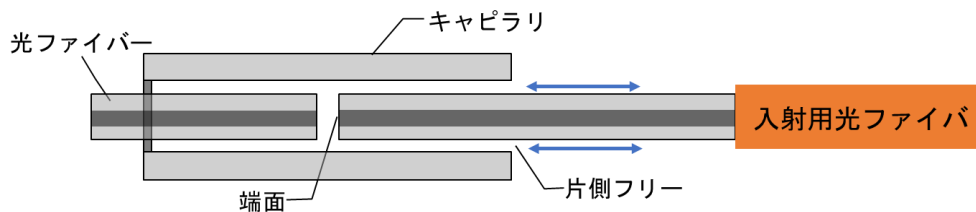


Fig 3.4-1 Experimental model

#### 3.4.2 コネクタ部の接続状態がノイズに与える影響

実験概略図を図 3.4.2 に示す. まず, センサの付け外しの伴うコネクタ表面の状態変化が与えるノイズへの影響を検証した. キャピラリに挿入した2本のファイバのうち, ミラーとして片側は瞬間接着剤で固定し, もう片側はフリーとした. フリーの光ファイバを入射用とした. 端面 c の場合について, 実験 3.4.1 の後, 一度コネクタ部を取り外し, クリーナーを用いたあと, 再度装着後, 室温でのひずみを行った. これを処理 A とする. 次に, コネクタ間にマッチングオイルを使用することによるノイズへの影響について検証した. 端面 c 及び端面 d のそれぞれについて光ファイバ及びサーキュレータ間のコネクタ部にマッチングオイルを少量塗布し, 室温でのひずみ測定を行った. 双方の実験状況において, ギャップ長は  $d=$ 約  $50$ , 約  $100$ , 約  $150$ , 約  $200$ , 約  $300\mu\text{m}$  とし, 1秒間隔で約60点, 計3回測定を行い, 測定幅は  $200\text{nm}$ , 測定点数は  $501\text{Pt}$  とした.

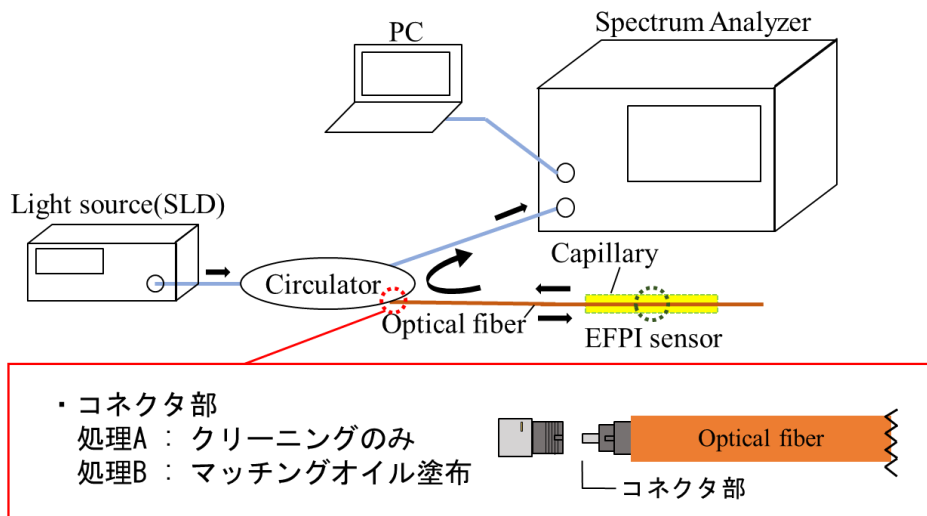


Fig 3.4-2 Experimental model



### 3.5. 細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

#### 3.5.1 細径光ファイバが与えるセンサ特性への影響

実際に作製したセンサを部材に埋め込むことで微小ひずみを測定する場合、埋め込み性の向上のためにはセンサ径は細径である必要がある。そこで、本実験ではキャピラリはこれまでと同様の外径  $0.570\text{mm}$  のものを用いたうえで、細径光ファイバを使用した場合の細径 EFPI センサ(図 3.5-1)の特性についてこれまでの直径  $0.125$  の光ファイバを使用した場合の EFPI センサと比較を行った。ギャップ長が約  $0.05$ ,  $0.1$ ,  $0.2$ ,  $0.3\text{mm}$  のセンサを作製し、それぞれを  $20 \times 150\text{mm}$ 、厚さが  $2\text{mm}$  のアルミ板にひずみゲージ(図 3.5.2, KYOWA, KFG-3-120-C1-23L1M2R)とともに瞬間接着剤で張り付けた。試験片寸法を図 3.5-3 に示す。実験モデルを図 3.5-4 に示す。まず、試験片をつかみしろ  $30\text{mm}$  で引張試験機(SHIMADZU(図 3.5-5))にセットし、 $0.02\text{mm}/1\text{min}$  の速度で引張りを行った。次に、ひずみゲージによる測定ひずみが  $1000\mu$  を達成したところで試験を終了とし、その間のひずみを作製したセンサにて  $1\text{s}$  間隔で測定した。測定幅は  $200\text{nm}$ 、スペクトル測定点数は  $501$  点とした。

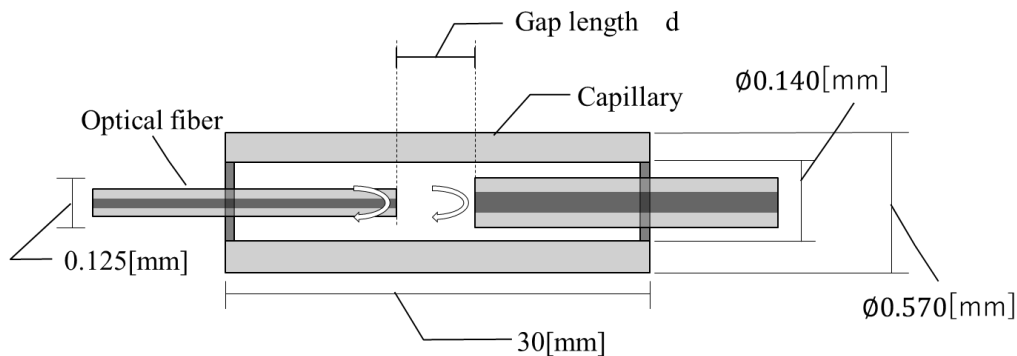


Fig 3.5-1 Sensor dimensions using a thin optical fiber

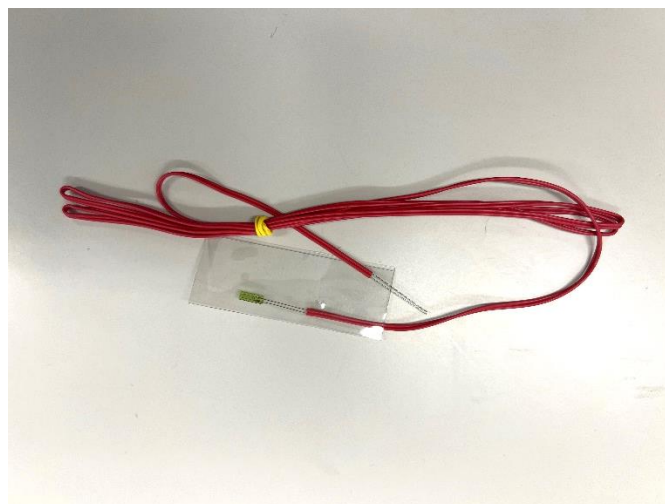


Fig 3.5-2 Strain gauge

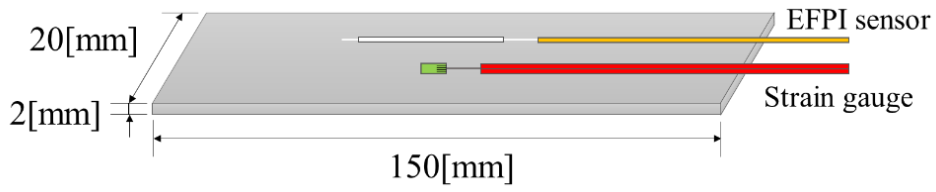


Fig 3.5-3 Dimensions of specimen

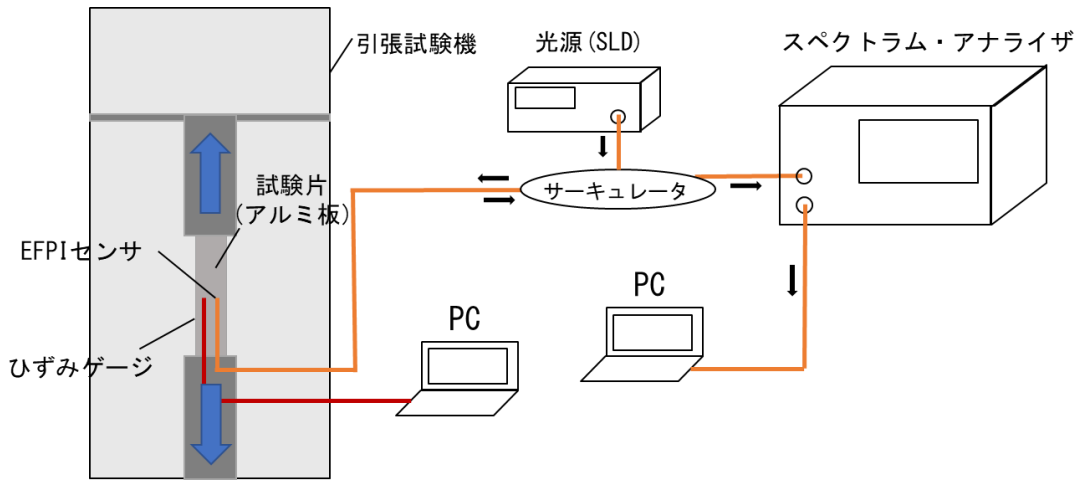


Fig 3.5-4 Experimental set-up for measuring tensile strain



Fig 3.5-5 Tensile testing machine

### 3.5.2 細径キャピラリを使用に伴う光ファイバ直径がセンサ特性に与える影響

本実験では外径 0.2mm, 内径 0.14mm の細径キャピラリと直径 0.08mm の細径光ファイバを入射用として用いて作製した細径 EFPI 光ファイバセンサで実験 3.5.1 と同様の実験を行った。ギャップ長が約 0.1mm, 0.2mm のセンサを使用した。

### 3.5.3 測定精度評価試験

使用した 細径 EFPI 光ファイバセンサは, キャピラリ長が 30[mm], ギャップ長がそれぞれ約 0.05[mm], 0.1 [mm], 0.15[mm], 0.2[mm]のセンサである。それぞれのギャップ長につき, 2 本ずつ作製した。図 3.5-2 のように設置して, 室温でのひずみ測定をスペクトル測定点数 501pt, 測定幅 200nm, 1 秒間隔で計 60 点測定を行った。また 1 本の センサにつき 3 回のひずみの測定実験を行い, 平均精度を算出した。

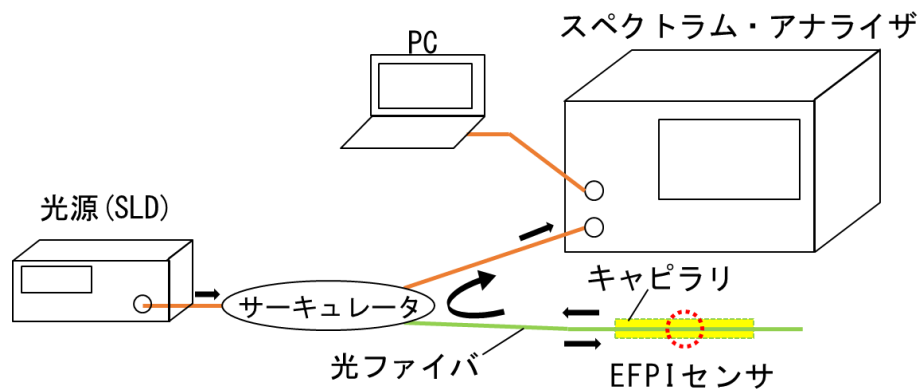


Fig 3.5-6 Optical system for EFPI sensor

## 3.6. 埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

### 3.6.1. CFRP 試験片製造方法

本研究では CFRP プリプレグ ((有) CAST CF/PPG/24tUD/149G 30 × 70[mm] 厚み 1.75[mm]) にゲージ長が 30 mm, ギャップ長が 0.055 mm の EFPI センサを埋め込んで, 試験片を作製した。試験片寸法と成形後の試験片写真を図 3.6-1, 図 3.6-2 にそれぞれ示す。

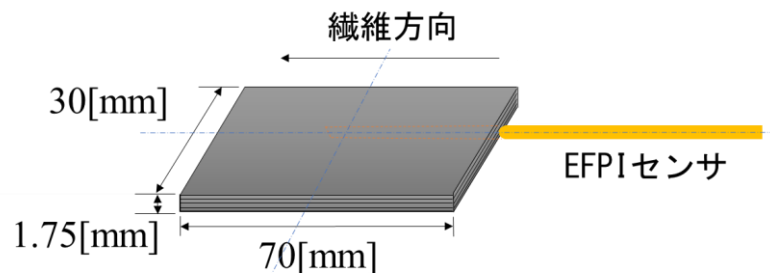


Fig.3.6-1 Dimensions of Embedded EFPI fiber optic sensor

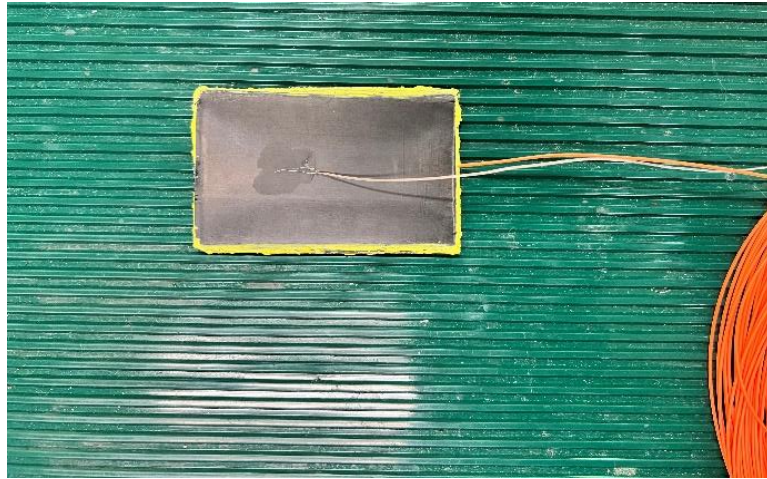


Fig3.6-2 CFRP prepreg

試験片の製造では、始めに光ファイバセンサを埋め込んでプリプレグを積層し、次にホットプレス成形機を用いて硬化させた。

CFRP プリプレグ積層手順を記述する。

- ① 30×70mm の大きさに切った CFRP プリプレグ 20 枚用意した。内 10 枚に 15×5mm の位置に切れ込みを入れた(図 3.6-3)。
- ② 切れ込みを入れた 10 枚の CFRP プリプレグの切れ込みにセンサを当てはめ、両端から切れ込みを入れていない CFRP プリプレグを各側 5 枚ずつで挟むようにして積層した。繊維方向はすべて同じとした。(図 3.6-1)

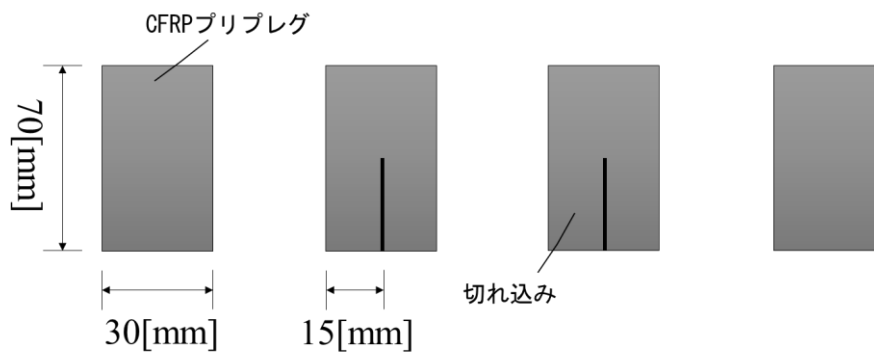


Fig 3.6-3 CFRP prepregs for manufacturing

次に加圧成型について記述する。図に 3.6-4～図 3.6-8 に加圧成型に使用した器具を示す。

- ① 床板のくぼみに合わせて吸引口の下部を接着剤で固定した。(図 3.6-4)
- ② 床板にテフロンシートを敷いて、その上に積層した EFPI センサを設置し、周囲に細く切ったシーラントテープを張り付けた。このとき、角はわずかに隙間が空くようにした。(図 3.6-5)
- ③ 上から再度テフロンシートを重ねて、さらにガラスクロス、天板、ブリーザーの順で重ねた。(図 3.6-6)
- ④ 床板の全辺に沿うようにシーラントテープを貼り付け、吸引口付近にわずかに穴をあけた真空フィルムで全体を覆うように重ねた。(図 3.6-7)
- ⑤ 開けて置いた穴に吸引口上部を差し込んだ。
- ⑥ 吸引口とホースをつなげ、ホットプレス機(図 3.6-8)の台座に配置して吸引口にホースを取り付けた。
- ⑦ ホットプレス機を 1 時間かけて 130°C まで昇温させ、その後 2 時間 130°C のまま温度を保つよう設定した。
- ⑧ ホットプレス機の温度が 100°C になったときに圧力を 0.5MPa になるように設定した。
- ⑨ ホットプレス機が常温に戻るまで成形をおこない、その後取り出した。

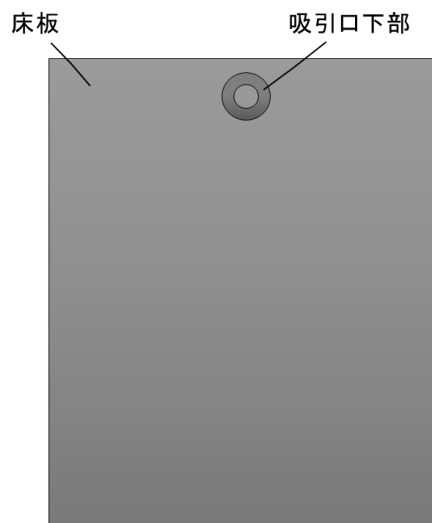


Fig 3.6-4 Step①

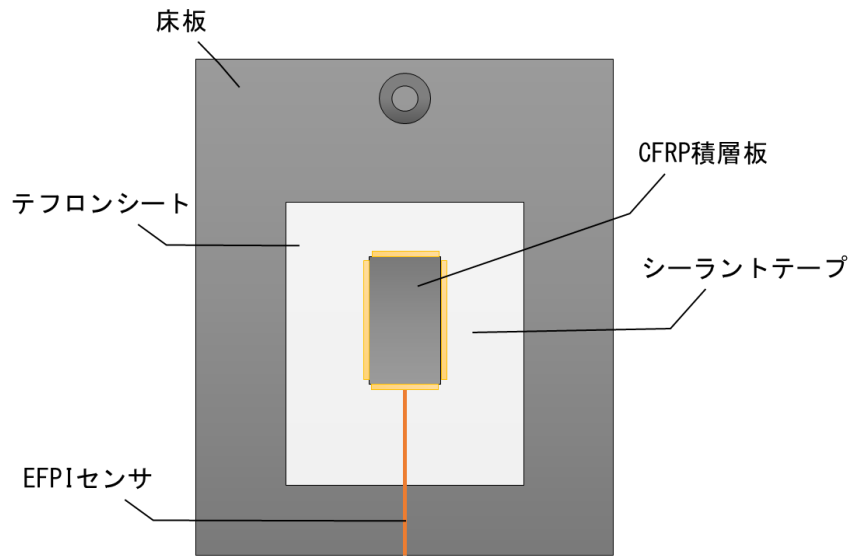


Fig 3.6-5 Step②

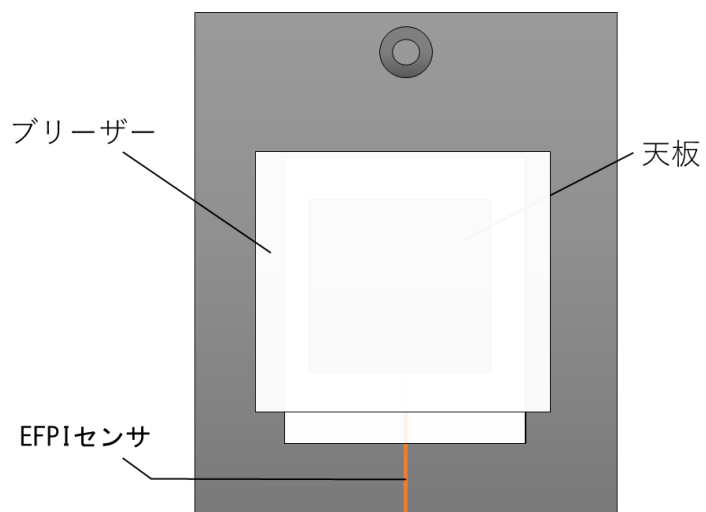
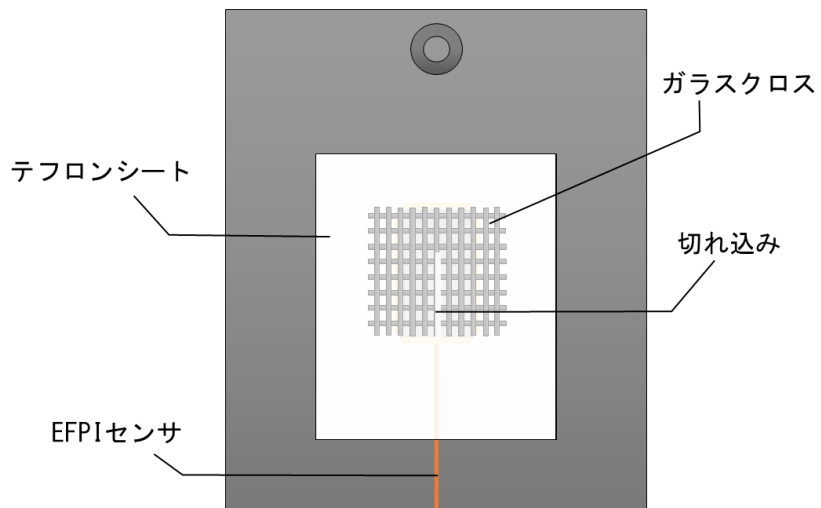


Fig 3.6-6 Step③

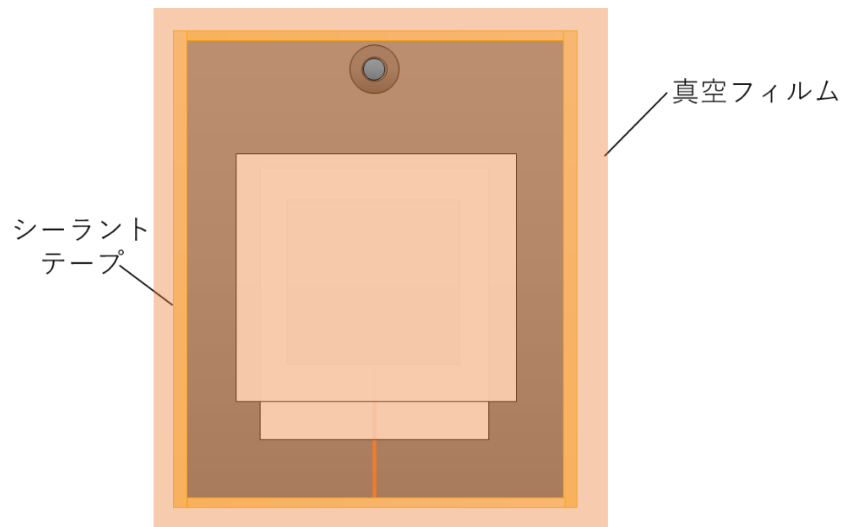


Fig 3.6-7 Step④



Fig 3.6-8 Hot press machine ,TESTER-SANGYO

### 3.6.2. 測定精度評価試験

CFRP 積層板埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験では、まず、図 3.6-9 のように、作製した埋め込み EFPI 光ファイバセンサを埋め込んだ CFRP 積層板をクリップで止めて、マルチオーブン(図 3.6-10)につるした状態でセットした。この時、温度をひずみ測定と同時に測定するために、CFRP 積層板に熱電対を取り付けた。熱電対を温度ロガー (図 3.6-11) に接続して、PC でデータを取り込んだ。

次にマルチオーブン内の温度を室温から約 80°Cまで約 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。測定幅は 200nm,スペクトル測定点数は 501 点とした。

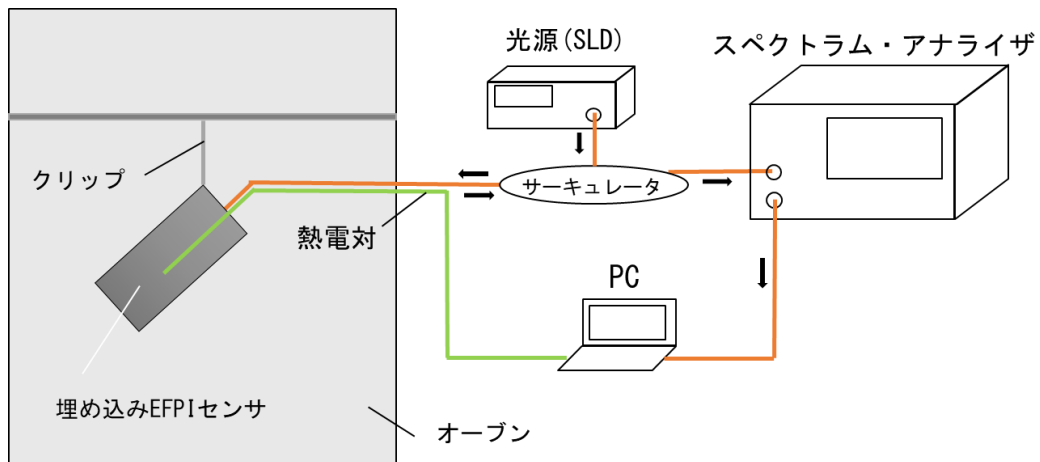


Fig 3.6-9 Experimental model



Fig 3.6-10 Multi Oven





Fig 3.6-11 Thermocouple logger

### 3.7. 埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

#### 3.7.1 CFRP 試験片製造方法(2種類)

本実験では CFRP プリプレグ ((有) CAST CF/PPG/24tUD/149G 30×70[mm] 厚み約 0.806[mm]) 積層板にキャピラリ長が 30 mm, 用いた光ファイバ直径とギャップ長が異なる 2 種類の EFPI センサを埋め込んで, 2 種類の試験片を作製した. それぞれを試験片 A, B とする. 試験片 A に使用したセンサはギャップ長が約 0.160mm, 試験片 B に用いたセンサはギャップ長が約 0.100mm のものであった. また, どちらのセンサも細径キャピラリを使用して作製したが, 入射用光ファイバには試験片 A は直径 0.125, 試験片 B は直径 0.08 のものを使用した. それぞれの試験片に使用したセンサ寸法をそれぞれ図 3.7-1, 図 3.7-2 に示す. また, 完成した試験片をそれぞれ図 3.7-3, 3.7-4 に示す.

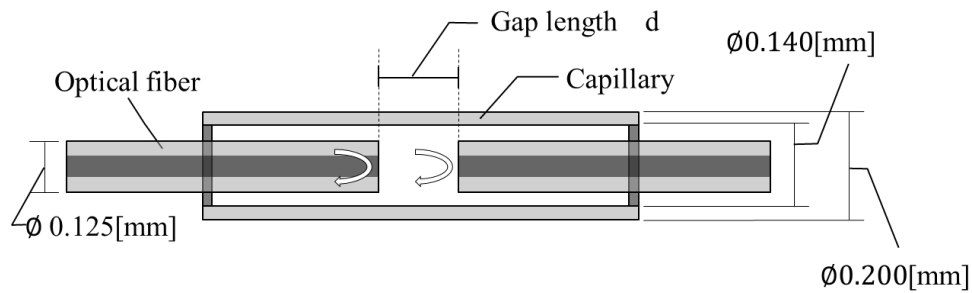


Fig 3.7-1 Dimensions of the sensor used for specimen A

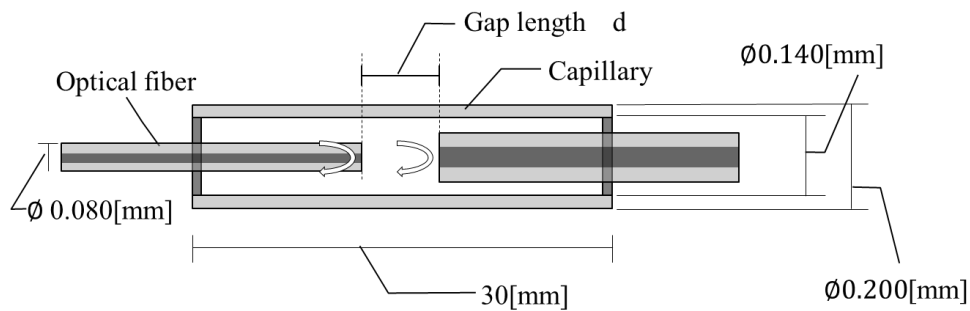


Fig 3.7-2 Dimensions of the sensor used for specimen B



Fig 3.7-3 Specimen A



Fig 3.7-4 Specimen B

試験片の製造では、始めに光ファイバセンサを埋め込んでプリプレグを積層し、次にホットプレス成形機を用いて硬化させた。

CFRP プリプレグ積層手順を記述する。

- ① 30×70 mmの大きさに切った CFRP プリプレグ 10 枚用意した。内 4 枚に 15×50 mm位置に切れ込みを入れた(図 3.7-5)。
- ② 切れ込みを入れた 4 枚の CFRP プリプレグの切れ込みにセンサを当てはめ、両端から切れ込みを入れていない CFRP プリプレグを各側 3 枚ずつで挟むようにして積層した。繊維方向はすべて同じとした。(図 3.7-5)
- ③

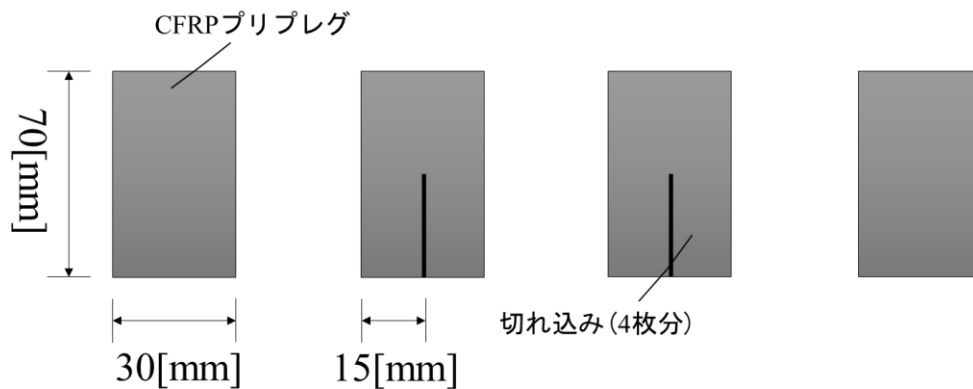


Fig 3.7-5 CFRP Prepreg

加圧成形については実験 3.6.1 と同様であるため省略する。

### 3.7.2 測定精度評価試験(細径)

CFRP 積層板埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験は、実験 3.7.2 と同様の手順で実施した。マルチオープン内の温度は室温から約 60°Cまで約 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。測定幅は 200nm, スペクトル測定点数は 501 点とした。

## 第4章 実験結果

### 4.1. スペクトルに生じるノイズの原因

#### 4.1.1 ファイバ端面の違いがノイズに与える影響

本研究でギャップ長の測定に使用する出力スペクトルには振幅にノイズが載っていた。この原因を明らかにするために、切断を繰り返した場合のスペクトルを測定した。本研究では同じファイバで3回カットし、それぞれを面 a,b,c, 異なるファイバをカットした試験結果を面 d と呼ぶ。また、ギャップ長はステージで片側の光ファイバを移動させて調整した。

図 4.1-1 に、ギャップ長 0.05mm のときの測定した面 a,b,c,d の反射光スペクトルを示す。互いに比較すると、乗っているノイズが異なるように見えるが、どのように異なるかが分かりにくい。そこで、空間スペクトルを調べた。空間スペクトルの解析手法はギャップ長を測定した場合と同様であるが、ギャップ長の測定では 500 $\mu\text{m}$  の範囲のみに着目したが、本節では 1500 $\mu\text{m}$  の範囲まで調べた。図 4.1-2 に、ギャップ長 0.05mm のときの測定した面 a,b,c,d の空間スペクトルを示す。図より、Face a,b,c の空間スペクトルはよく似ているが、Face d は大きく異なっていることが分かる。これは光ファイバが異なるとノイズ特性が異なる可能性を示唆している。光ファイバの特性自体は変わらないので、光ファイバの違いは接続コネクタの端面状態の違いによるものであり、それが反射スペクトルに影響を与えている可能性を示している。

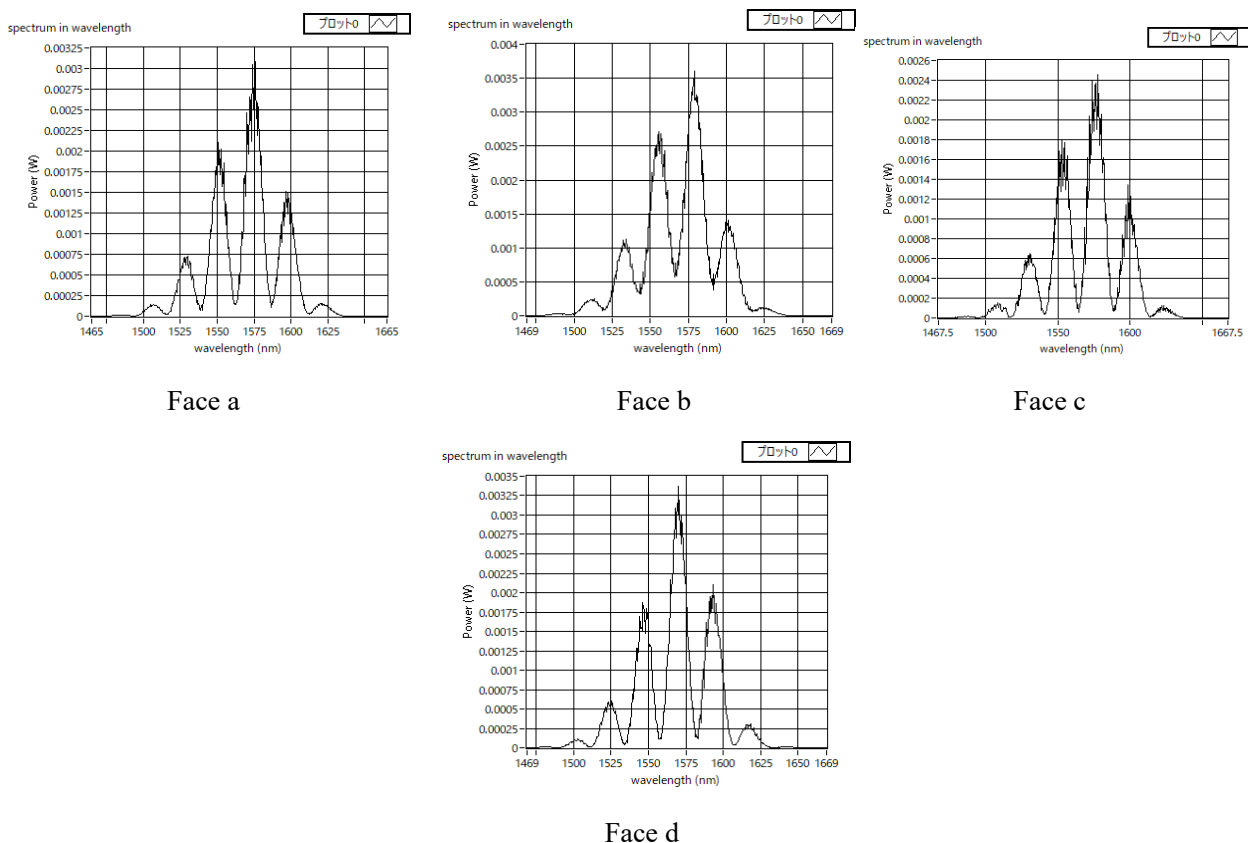


Fig.4.1-1 Optical spectrum of EFPI (d=0.05)

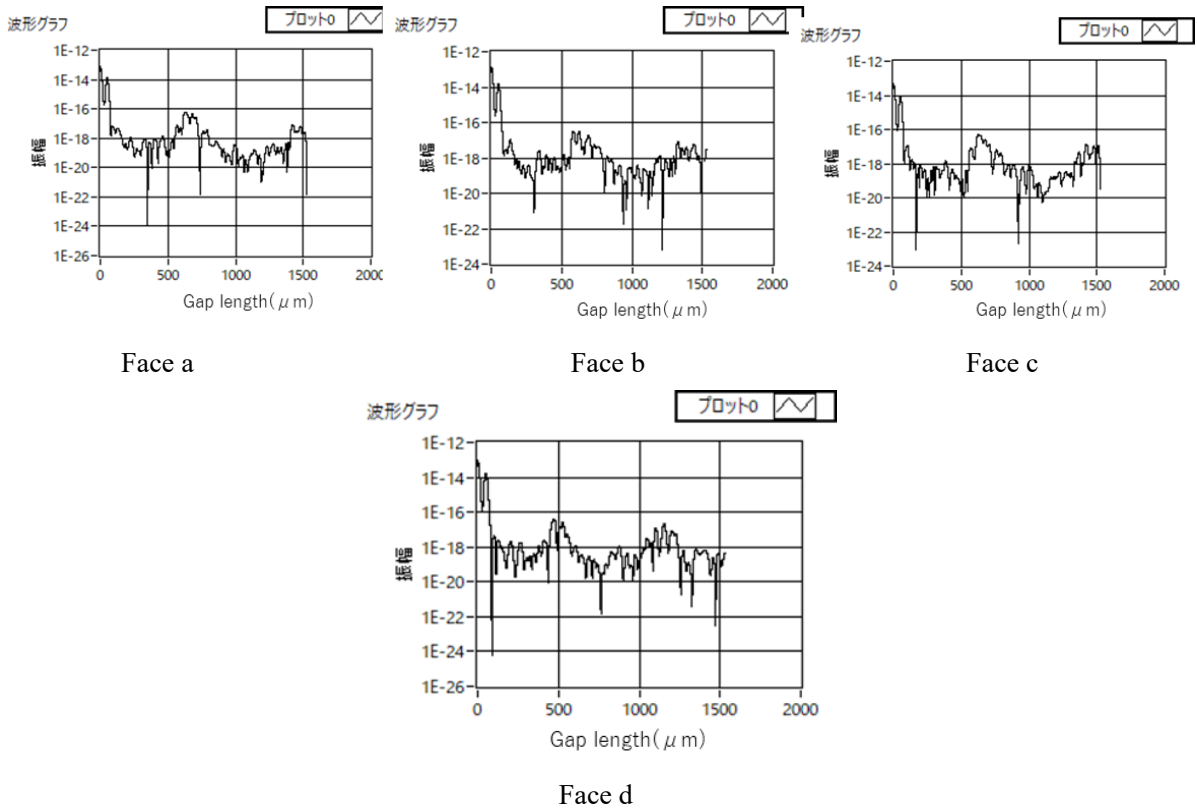


Fig.4.1-2 Spatial spectrum of EFPI (d=0.05)

図 4.1-3 に、ギャップ長 0.05mm のときに 3 回時刻を変えて測定した面 a の空間スペクトルを示す。図より、同ギャップ長かつ同端面であれば、実験時刻によってノイズの違いはみられないことが分かった。よってノイズは時間経過による影響は受けていないといえる。

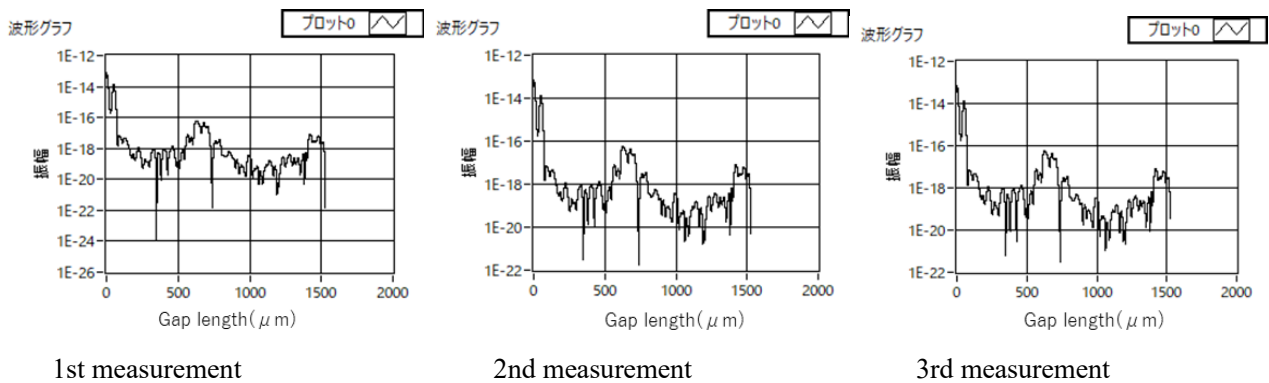


Fig.4.1-3 Spatical spectrum of EFPI (d=0.05mm, face a)

図 4.1-4 に、ギャップ長 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3mm の面 a の空間スペクトルを示す。図より、センサのギャップ長位置におけるピークは当然ながらギャップ長の変化とともに移動するが、他のピークはほとんど変化しないことが分かった。特にギャップ長 0.05~0.2mm までは、500~1500 $\mu\text{m}$  までの空間スペクトルはほぼ同じ形となることが分かった。これは、ギャップ長の変化が空間スペクトルにほとんど影響を与えないことを示している。ただし、ギャップ長 0.3mm の空間スペクトルには他と比べてやや違いが見られたが、これは反射光スペクトルの周期が短くなり、ノイズの影響を受けやすくなるためだと思われる。これらの結果は、面 b, dc でも同様のものとなった。

図 4.1-5 に、異なるファイバを切断した場合の結果として、ギャップ長 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3mm の面 d の空間スペクトルを示す。この場合も面 a と同様の結果に、ギャップ長 0.05~0.2mm までは 500~1500 $\mu\text{m}$  までの空間スペクトルはほぼ同じ形となり、再現性のある結果であることが分かった。

以上のことから、反射光スペクトルにのったノイズは外乱的なものではなく測定系（反射面状態またはコネクタの接続状態）固有のものであることが分かった。よって、反射光スペクトルに現れるノイズは測定中のギャップ長変化の測定には影響を与えないといえる。

ただし、これは入射用及び反射用に用いた光ファイバの端面が光ファイバカッターを使用した際にあらかじめ平坦にカットされていた上で、出力スペクトルに明らかに大きなノイズがのっていない場合のみではないかと思われる。センサを複数作製する場合、ひとつの光ファイバにて大きなノイズが出力スペクトルに現れた際は、光ファイバ端面のカットを再度やり直すが、これにより改善することが多いためである。よって、センサ作製には、丁寧な光ファイバ端面のカットの工程がある程度は必要であると考えられる。

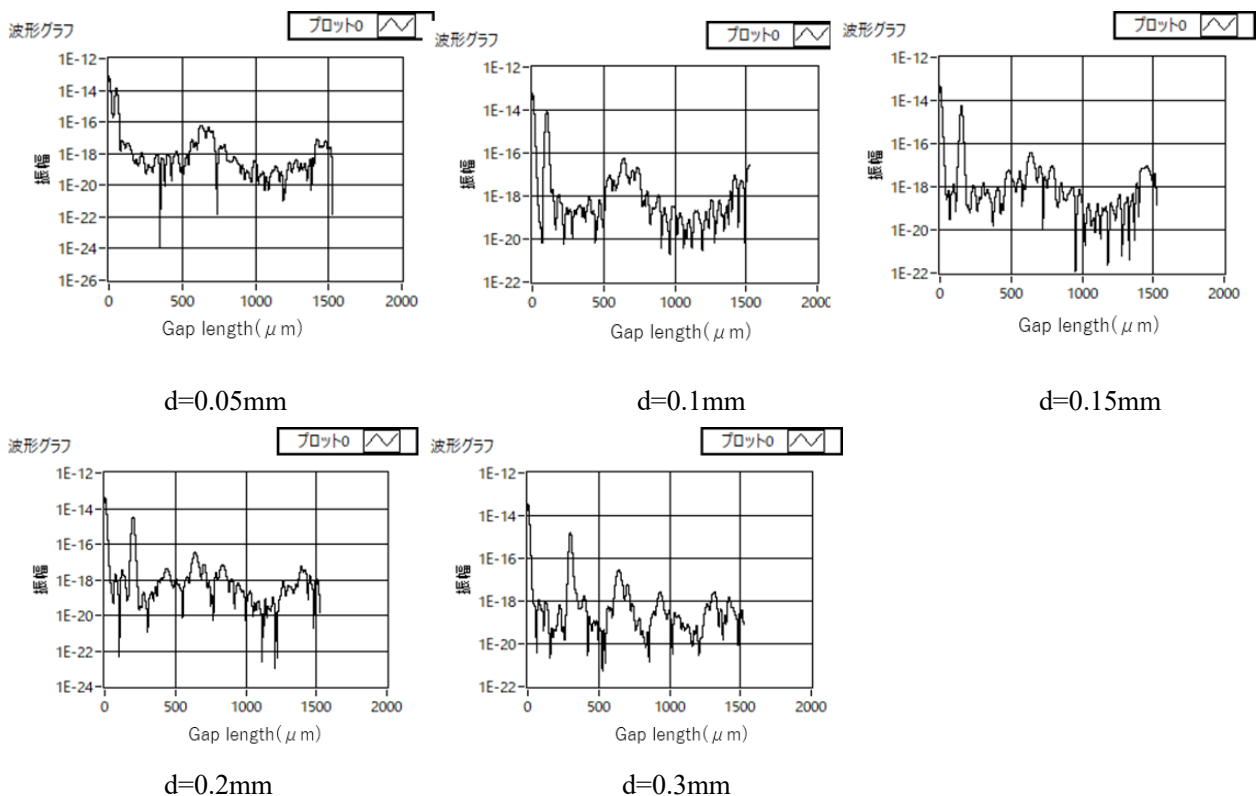
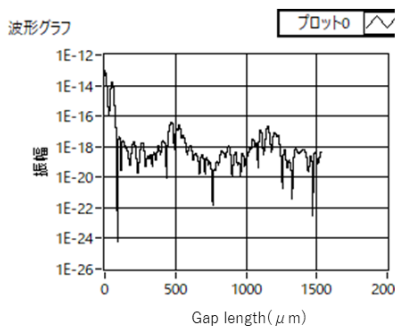
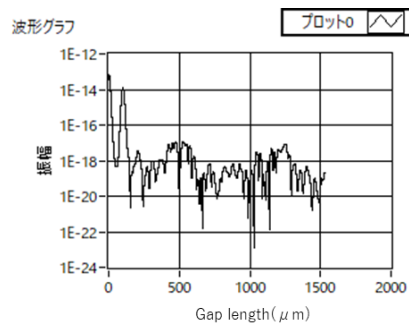


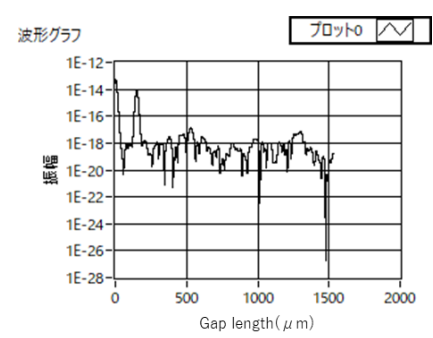
Fig.4.1-4 Spatical spectrum of EFPI (face a)



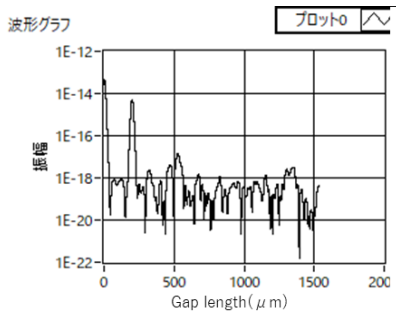
d=0.05mm



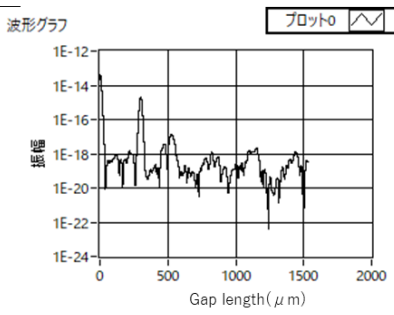
d=0.1mm



d=0.15mm



d=0.2mm



d=0.3mm

Fig.4.1-5 Spatical spectrum of EFPI (face d)

#### 4.1.2 コネクタ部の接続状態がノイズに与える影響

反射光スペクトルに現れるノイズが測定系に固有のものであることが分かったが、切断面の状態がよければ、ノイズがコネクタ接続状態に影響されることが示唆された。これは、接続するたびにノイズ状態が変化する可能性を意味する。そこで、コネクタの再接続がノイズに与える影響を調べるために、面 c, d のセンサについてコネクタ部を取り外して接続端面処理をして再接続して、スペクトル測定を行った。その際、再接続の前にクリーナーを用いて清掃を行った場合と、マッチングオイルを用いた場合の2つの端面処理を行った。

図 4.1-6 に、ギャップ長 0.05mm の面 c の空間スペクトルを、接続部無処理、清掃後再接続、マッチングオイルを塗布して再接続の3つの場合について示す。図より、どの空間スペクトルも同等のものとなることが分かった。すなわち、コネクタ部でごみや空隙のない状態で正しく接続されていれば、反射光スペクトルに与える影響がほとんどないことが分かった。よって、同じ光ファイバを使用した場合のコネクタ部の取り外しに伴うノイズへの影響は考慮する必要はないと考えられる。

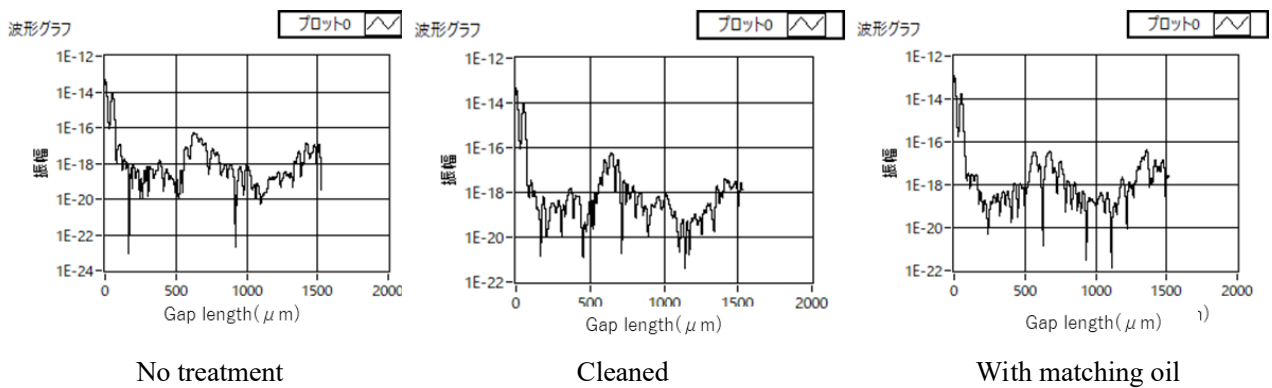


Fig.4.1-6 Spatical spectrum of EFPI (d=0.05mm, face c)



## 4.2. 細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

### 4.2.1 細径光ファイバが与えるセンサ特性への影響

図 4.2-1 にこれまでと同様の寸法を持つ EFPI 光ファイバセンサ, 図 4.2-2 に細径 EFPI 光ファイバセンサとひずみゲージによる測定ひずみを示す. すべてのセンサにおいて近似は線形となっていることが分かる. それぞれの結果から近似式を求めた. 本実験では, キャピラリ外径が 0.57 であり, 内径が 0.14mm であるのに対して, 入射用光ファイバとして直径 0.125 のものと 0.08 のものをそれぞれ使用したセンサを作製していることから, キャピラリと光ファイバ間の空隙が異なるため, 瞬間接着剤の浸透具合が変化すると考えた. 図 4.2-1 よりこれまでと同様の寸法をもつ EFPI 光ファイバセンサの傾きの平均は 0.618, 図 4.2-2 より細径 EFPI 光ファイバセンサの傾きの平均は 0.540 であり, 傾きに大きな違いがないことがわかった. これは本研究で作製した EFPI 光ファイバセンサのゲージ長はファイバ径にほとんど依存しないことを示す. しかし, 使用する光ファイバの直径に関わらず, 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も, 4~5 割減少していることが分かる. この原因のひとつとしてセンサ作製時のゲージ長の変化が考えられる. 本実験ではセンサ作製において, 光ファイバ固定時に粘度が低い瞬間接着剤を使用している. このことから, 瞬間接着剤がキャピラリと光ファイバ間の空隙に浸透することでゲージ長の長さが短くなった可能性が考えられる. また, センサ作製時に使用するキャピラリ外径が大きいことによりひずみ伝達率が影響している場合も考えられる. 実際にはキャピラリ外径が今よりも細径な細径キャピラリを用いた細径 EFPI 光ファイバセンサの使用を目指しているため, 細径キャピラリを使用した場合の細径 EFPI 光ファイバセンサとひずみゲージによる測定ひずみについても検討する必要がある.

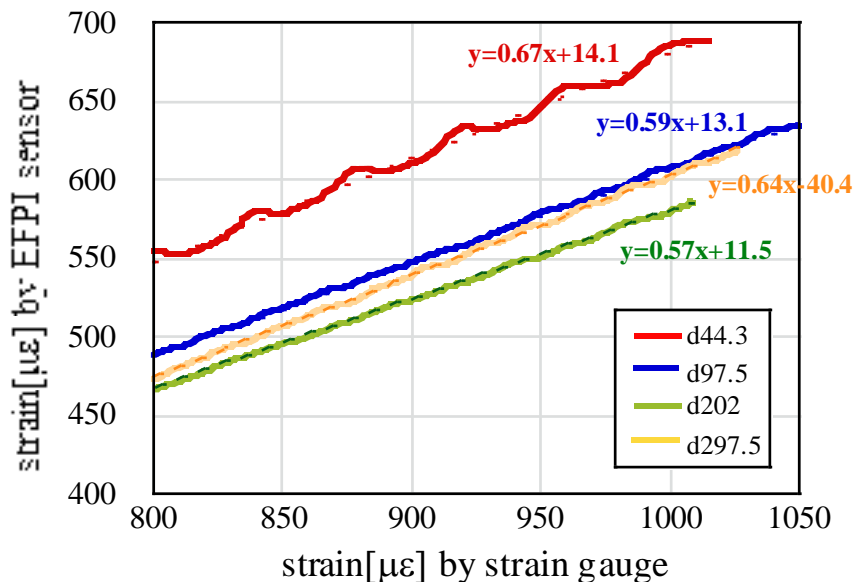


Fig 4.2-1 Measured strain by strain gauges and EFPI sensor (for optical fiber with a diameter of 0.125)

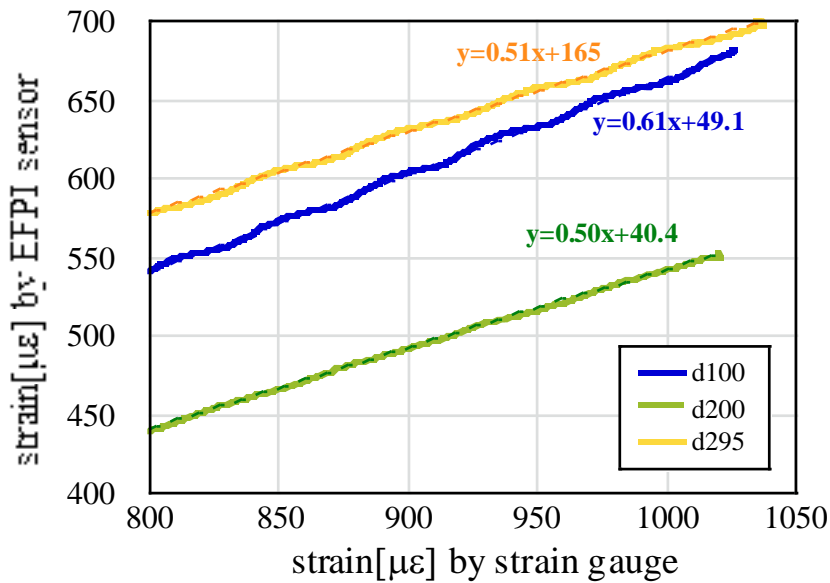


Fig 4.2-2 Measured strain by strain gauges and EFPI sensor (for optical fiber with a diameter of 0.08)

#### 4.2.2 細径キャピラリの使用に伴う光ファイバ直径がセンサ特性に与える影響

図 4.2-3 に細径キャピラリ及び細径光ファイバを使用した細径 EFPI 光ファイバセンサによる測定ひずみとひずみゲージによる測定ひずみを示す. 2 本のセンサは線形の形をとっており, 近似式を求めた. 傾きの平均は 0.593 であり, この値は図 4.2-1 及び図 4.2-2 とほぼ同等であることがわかった. 今回は前述の実験で使用したキャピラリよりも細径な寸法を持つ細径キャピラリを使用してセンサを作製したため, 近似式の傾きの違いがひずみ伝達率に影響を与えている場合は本実験においてこれが改善すると考えられた. しかし実際には, 同等の傾きをもっていることからひずみ伝達率の影響はほとんど受けていないと考えられる. よって, ひずみゲージによる測定ひずみに対してセンサの測定ひずみが減少しているのはひずみ伝達率の悪化によるものではなく, センサ作製時のゲージ長の変化によるものと分かった. これにより使用するキャピラリ内径が 0.14 の場合は, センサのゲージ長は約 4 割落ちであり入射用光ファイバ直径に依存しないが, 厳密なゲージ長が必要な場合はあらかじめ測定が必要であると考えられる. 実用化に向けては, センサ本体をそのまま FRP に埋め込むことによりひずみ測定に用いることは運用上難しい. そこであらかじめポリマーなどでセンサをラミネート加工することを検討している. この際にゲージ長の測定は可能であると考えられる.

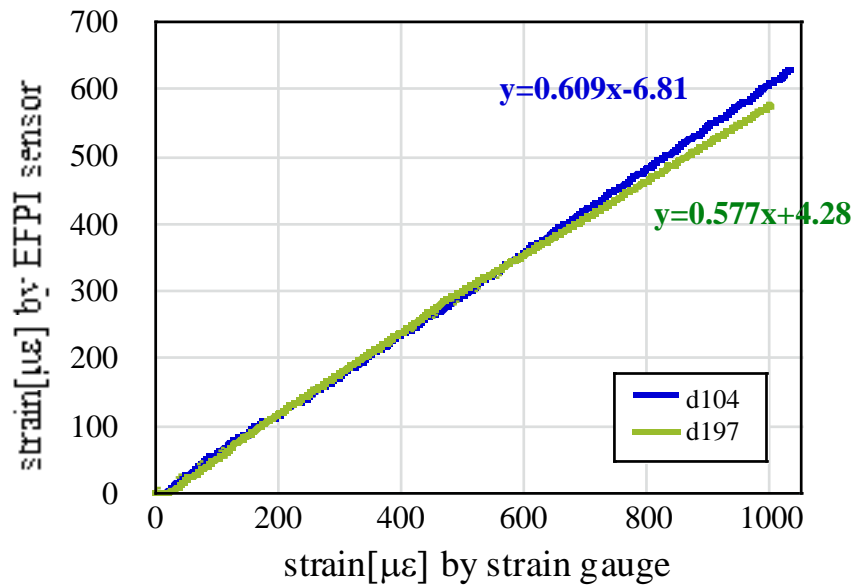


Fig 4.2-3 Measured strain by strain gauges and a thin EFPI sensor

#### 4.2.3 測定精度評価試験

まず、ギャップ長が約 0.05, 0.1, 0.15, 0.2[mm] のセンサ各 2 本ずつについて、測定したスペクトル（測定点数 501）と FFT 解析による空間スペクトル、そして得られたギャップ長を図 4.2-3～4.2-10 にそれぞれ示す。図より、全てのセンサの測定スペクトルについて、明確な周期性を見ることが出来る。また、FFT 解析による空間スペクトルも鋭い単一のピークを示しており、2 光波以外の干渉が無いことが分かる。

ギャップ長ごとにスペクトルを比較すると、スペクトルの干渉による最大振幅が同じギャップ長でもセンサごとに異なりがあることがわかる。例えばギャップ長 0.05 のセンサのスペクトルを比較すると、1 本目の干渉による最大振幅は 2 本目より 1/4 程度減少している。これは入射側に使用している細径光ファイバと、反射側に使用している光ファイバの端面の状況、及び挿入した際の入射用光ファイバの位置のずれによるものと考えられる。後者に関しては図 4.2-7 のギャップ長 0.15mm のギャップ長画像が、細径光ファイバの位置に対して直径 0.125 の光ファイバが相対しておらず、分かりやすい。これらの要因による干渉スペクトルのずれは、光ファイバ端面の状況やファイバ位置の改善が必要となると考えられる。しかし、反射端面の状況を入射用光ファイバの端面に合わせた微小な範囲で調整を行うことは現実的に困難である。先行研究では、内径が 0.14mm のキャピラリ内に直径 0.125mm のこれまでと同様の光ファイバを挿入したところ、ギャップ長拡大による干渉スペクトルの最大振幅の減少は見られても、センサの個体差による減少はみられていない。このことから使用する細径光ファイバの径に合わせた内径を持つ細径キャピラリを提案することで、センサ個体差による干渉スペクトルの最大振幅の減少の改善が期待でき、同時に反射側における細径光ファイバの使用が可能になると考えられる。

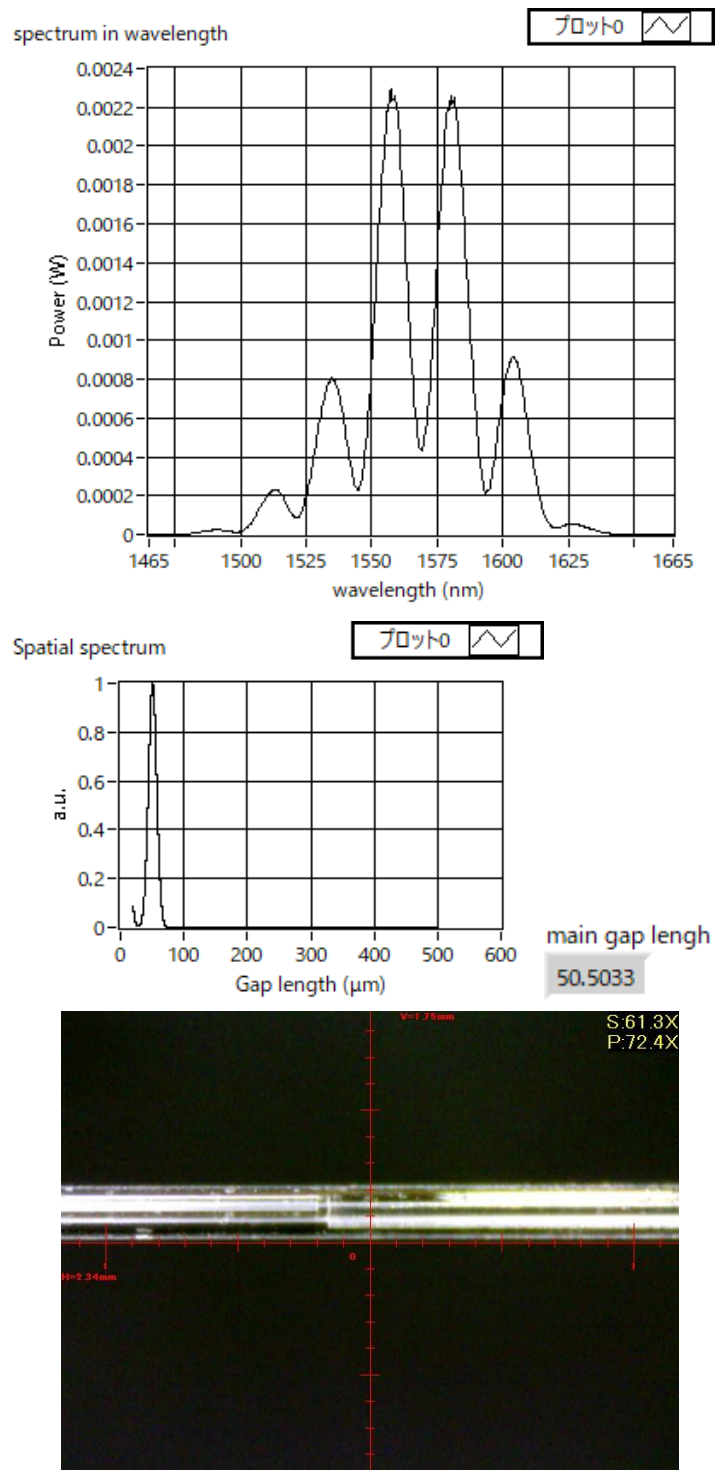


Fig 4.2-3 Gap length of 0.05mm, First

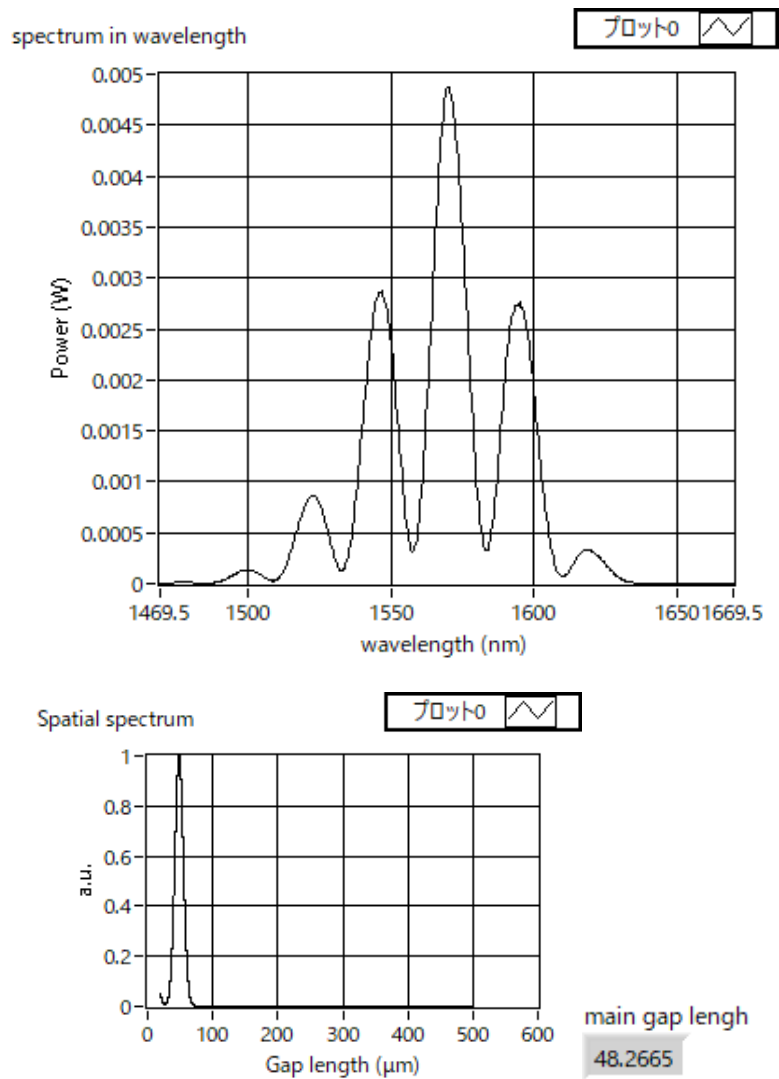


Fig 4.2-4 Gap length of 0.05mm, second

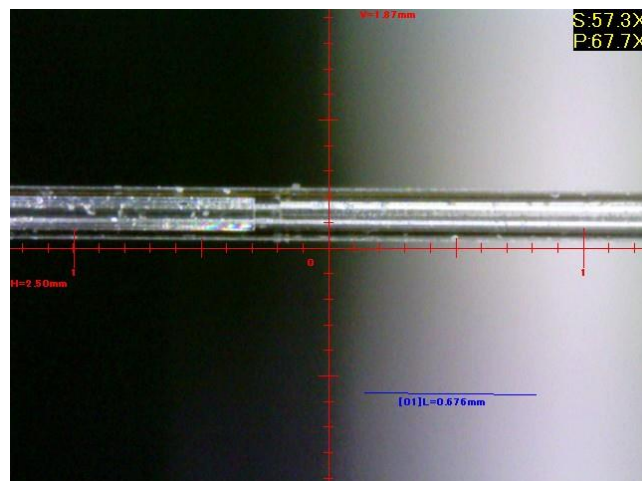
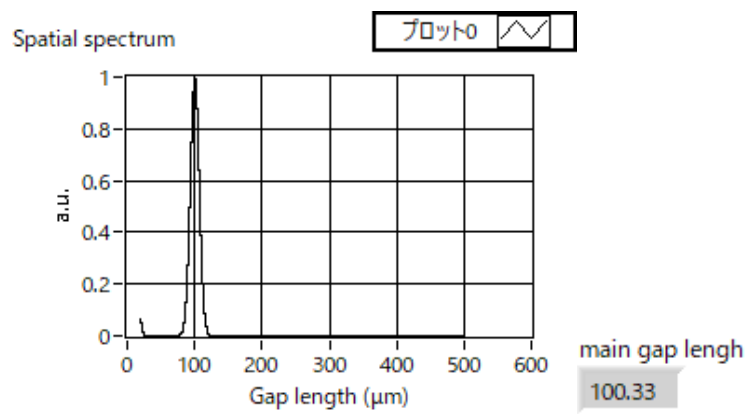
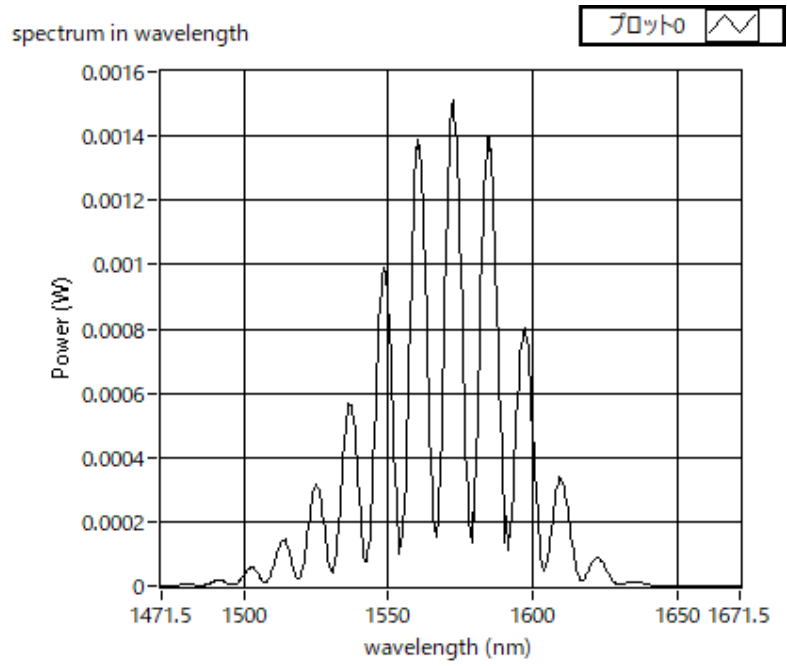


Fig 4.2-5 Gap length of 0.1mm, First

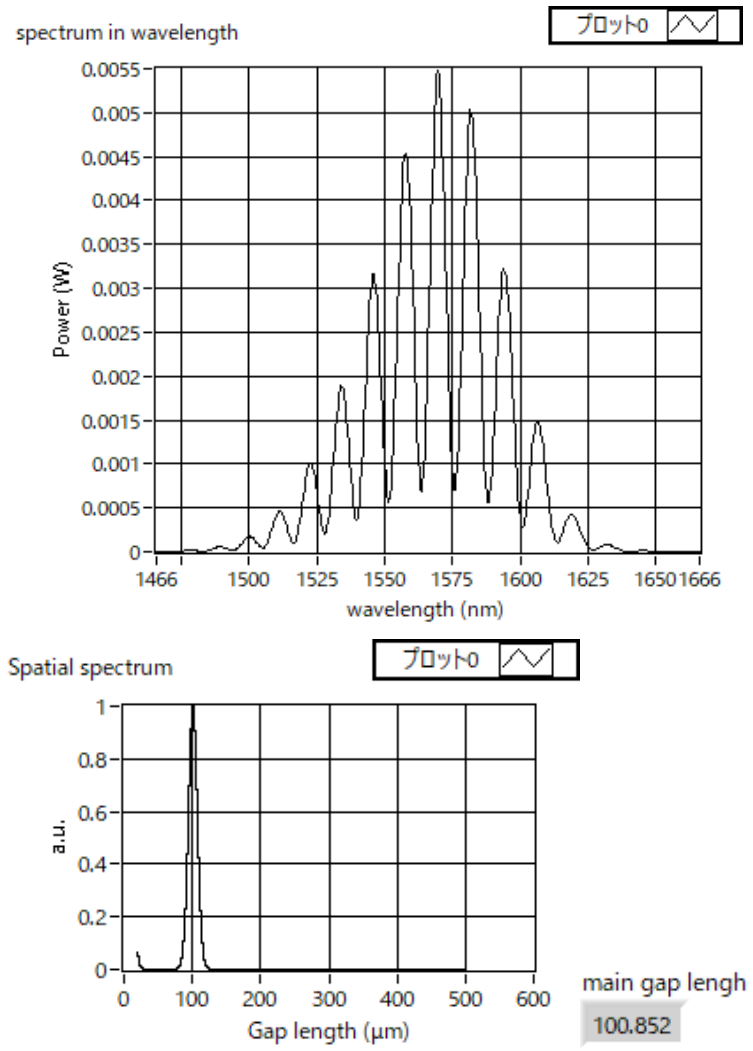


Fig 4.2-6 Gap length of 0.1mm, second

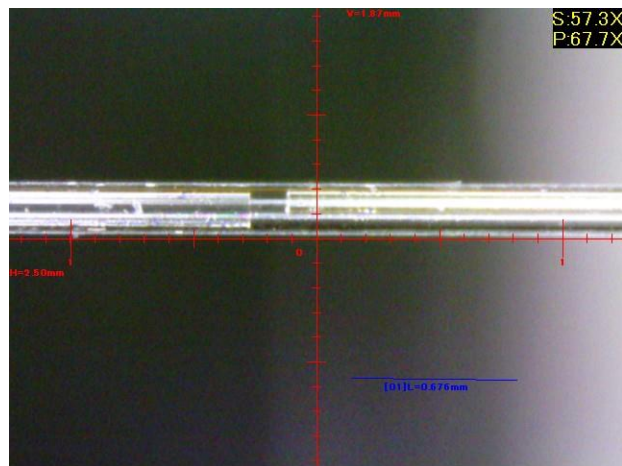
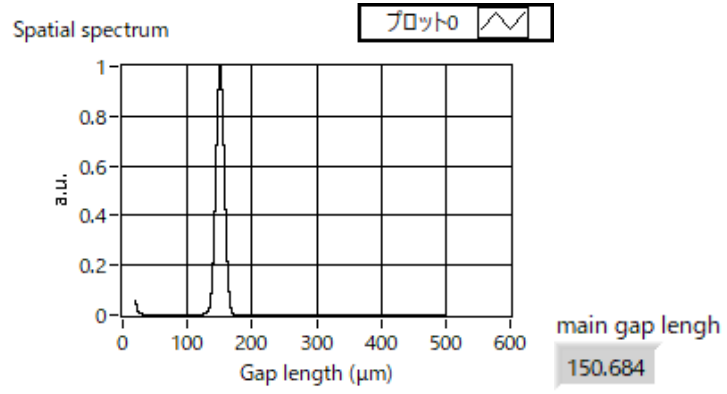
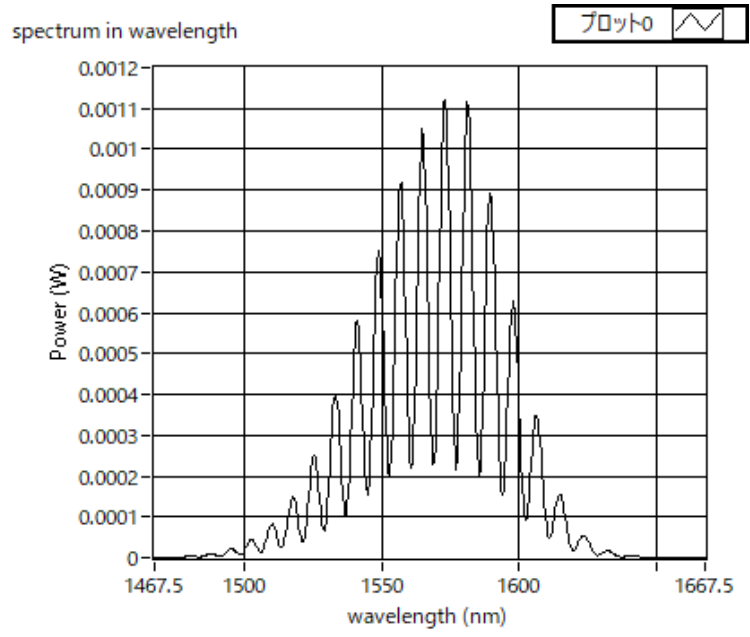


Fig 4.2-7 Gap length of 0.15mm, first



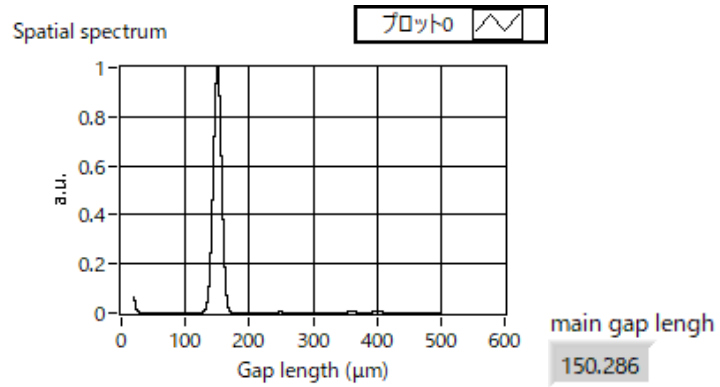
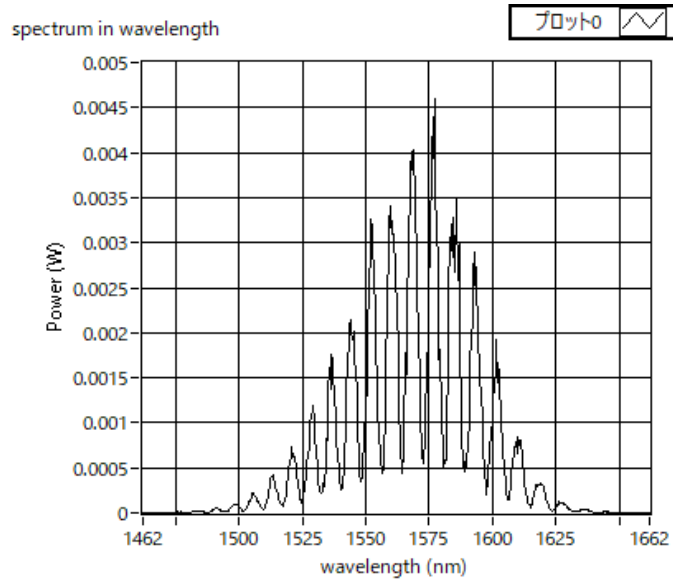


Fig 4.2-8 Gap length of 0.15mm, second

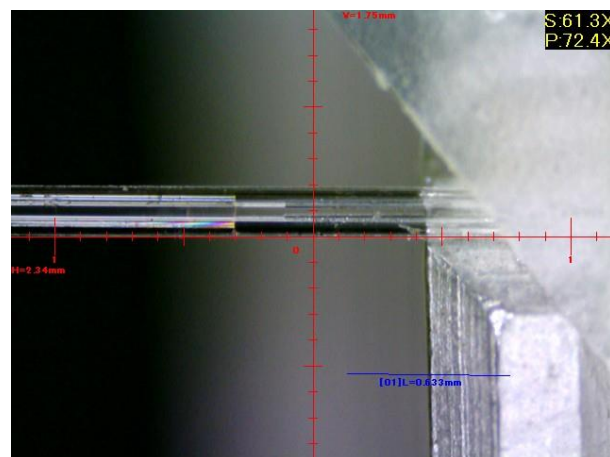
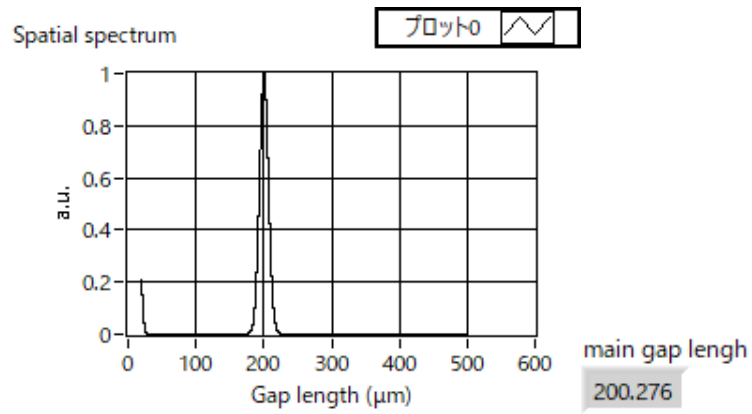
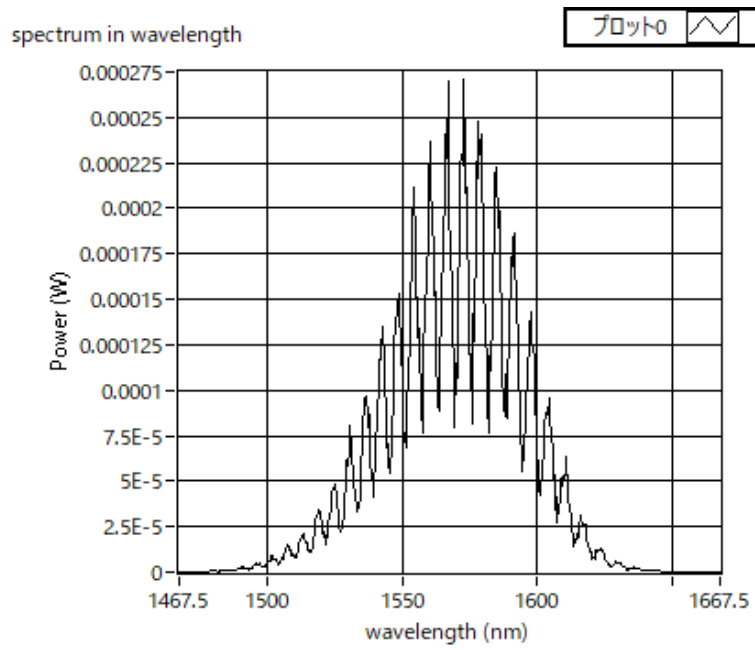


Fig 4.2-9 Gap length of 0.2mm, first

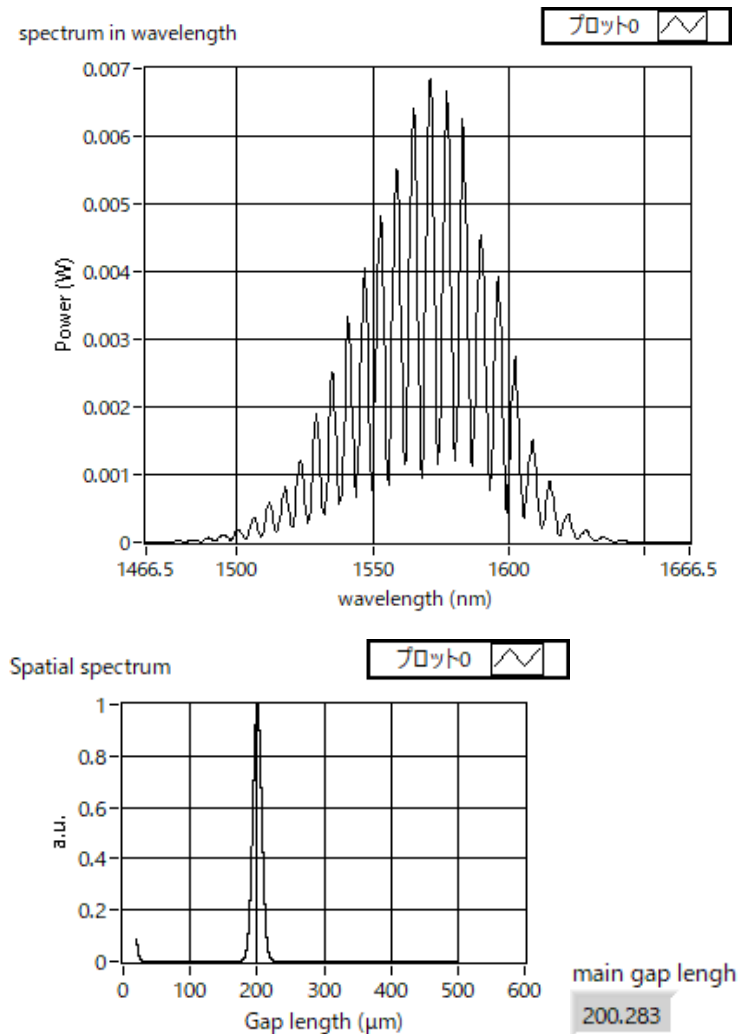


Fig 4.2-10 Gap length of 0.2mm, second

図 4.2-11-図 4.2-14 にギャップ長約 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm それぞれのひずみ変動(グラフ左)と取り出したノイズ成分(グラフ右)をセンサごとに示す. ひずみ変動のグラフより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, ゆっくり変動する成分があることが分かる. ノイズ成分は, 早い周期で変動している成分のみをノイズと考えて取り出した. これらの結果を定量的に評価するために, ノイズ成分から最小二乗平均 RMS 値を求め, これを精度として評価した(片振幅). 表 4.2-1, 図 4.2-15 に作製したセンサそれぞれのギャップ長に対する測定精度を示す.

表より, ほぼすべてのセンサにおいて $\pm 0.05\mu$ 以下の高精度を達成していることが分かる. 最も高精度であったのは, ギャップ長 0.05 の 2 本目のセンサであり,  $\pm 0.0251\mu$  精度であった. 先行研究における室温での最高測定精度はギャップ長 0.1 の時に $\pm 0.0182\mu$ であったことから, 大きな差はないものの, 全体を通して $\pm 0.02\mu$ 以下の精度を達成しているセンサはなく, わずかに悪化したといえる. 図より, ギャップ長約 0.1 のセンサは 1 本目と 2 本目で測定ひずみが安定しておらずノイズ成分の振幅が大きく異なることが分かる. ひずみの測定精度は 2 本目が $\pm 0.0298\mu$ であるのに対して 1 本目が $\pm 0.197\mu$ であり, 5 倍以上精度が悪い. これはセンサの製造に起因するセンサ本体の個体差によるものではないかと考えられる. 本研究ではセンサの作製において光ファイバカッターを使用しているが, 光ファイバ端面を完全にフラットな状態で切断することは難しいのが現状である. また, 使用するキャピラリ内径が 0.14 である

ことから、直径 0.125 の反射用光ファイバはキャピラリ間との空隙が小さいが、入射用光ファイバの直径 0.08 であるためキャピラリへの挿入角度による端面反射の影響を容易に受ける。ファイバ端面の切断状態を制御することは現実的に困難であり、仮に完全にフラットな状態で切断された光ファイバを使用することが可能であっても、キャピラリと光ファイバ間の微小な空隙を制御することも難しい。これらを改善するには、使用するキャピラリ内径をより細径にすることが望ましいと考える。

また、表及び図より 2 本目のギャップ長約 0.1, 0.2 のセンサの測定精度は 3 回測定したうちの 1 回のみひずみの測定が不安定になっていることがわかる。実験全体を通して悪化しているわけではないことから、センサ本体の個体差によるものとは考えにくい。室温における微小なひずみの測定を行っていることから、微小な温度変化やセンサを置くことにより生じるひずみなど実験環境による影響を受けているのではないかと考えられるが明確な原因は不明である。しかし、すべてのセンサにおいて生じているわけではないことや、平均測定精度が大きく悪化していないことから、測定精度に与える影響は大きくないといえる。

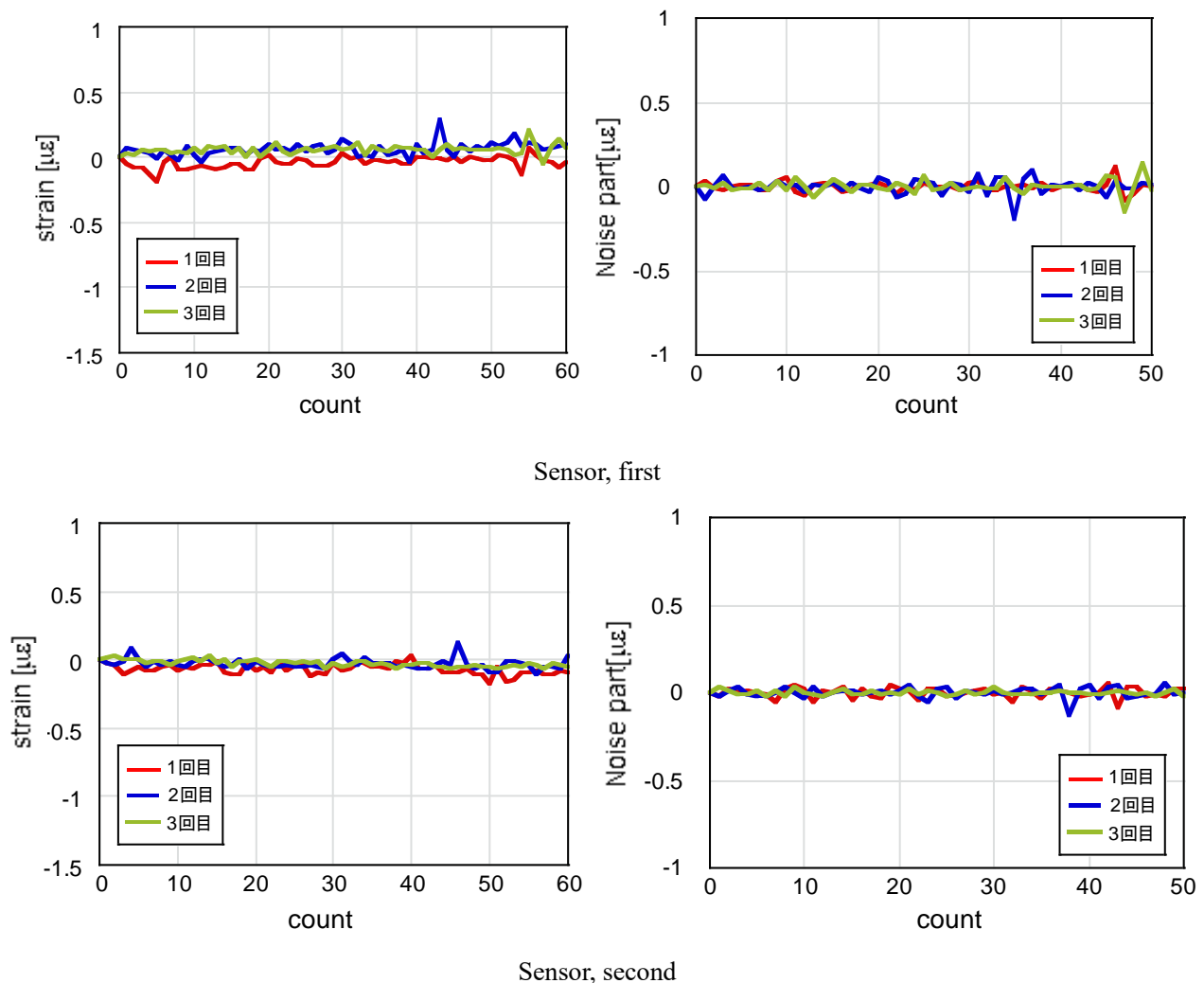
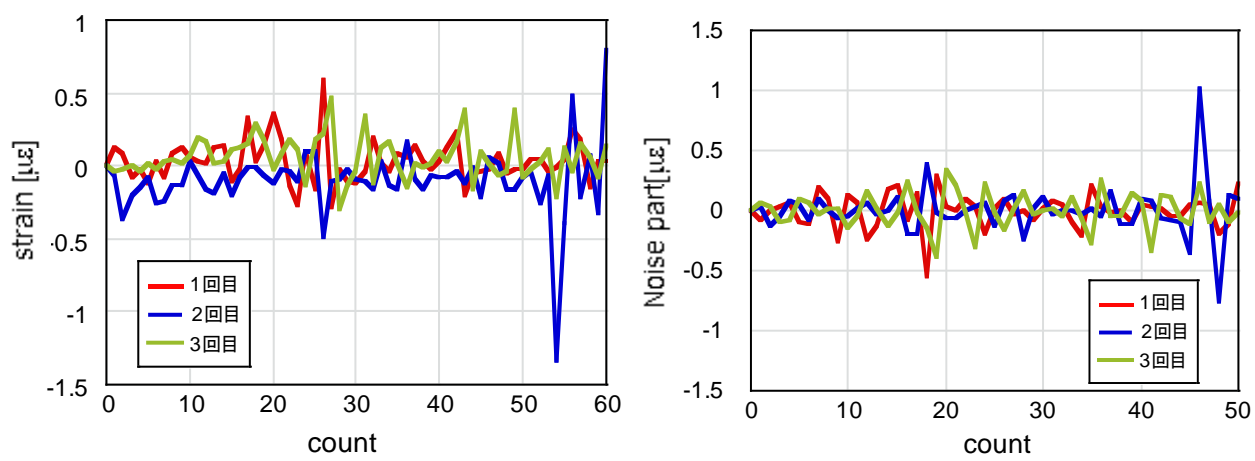
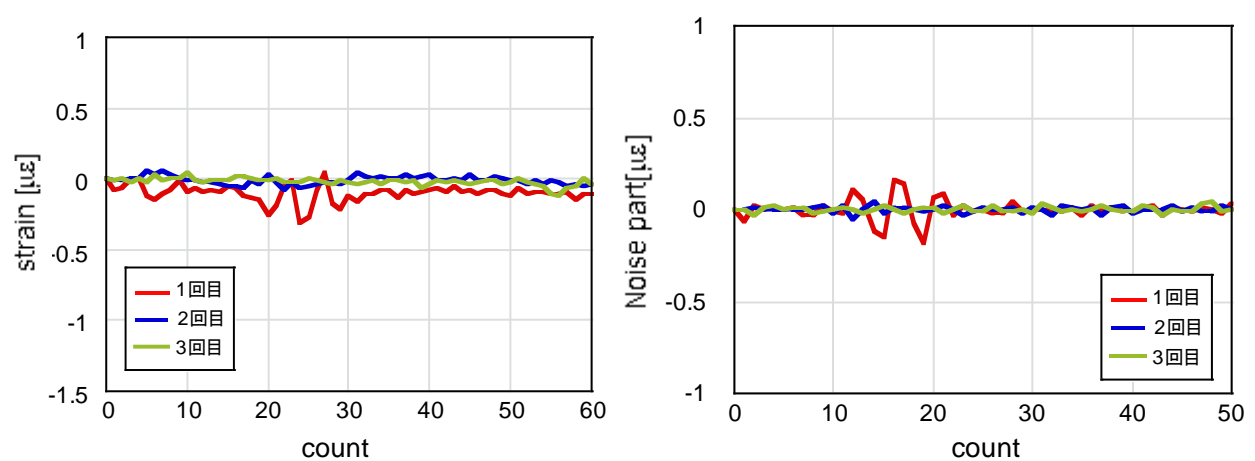


Fig 4.2-11 Strain variation and noise at room temperature with a gap length of about 0.05

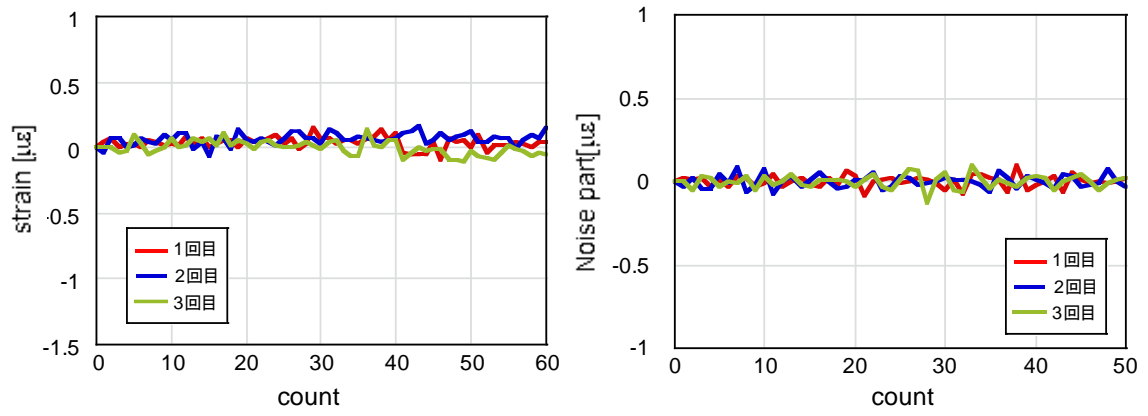


Sensor, first

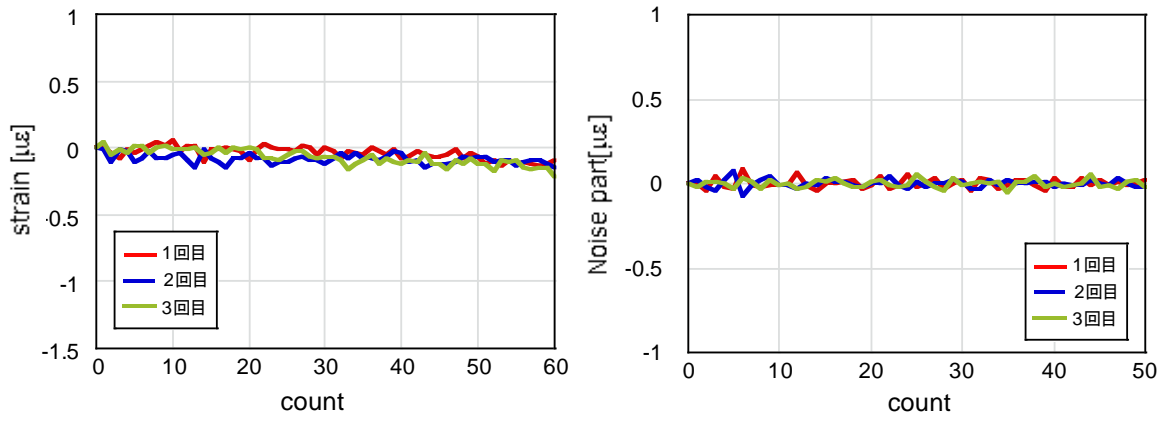


Sensor, second

Fig 4.2-12 Strain variation and noise at room temperature with a gap length of about 0.1



Sensor, first



Sensor, second

Fig 4.2-13 Strain variation and noise at room temperature with a gap length of about 0.15

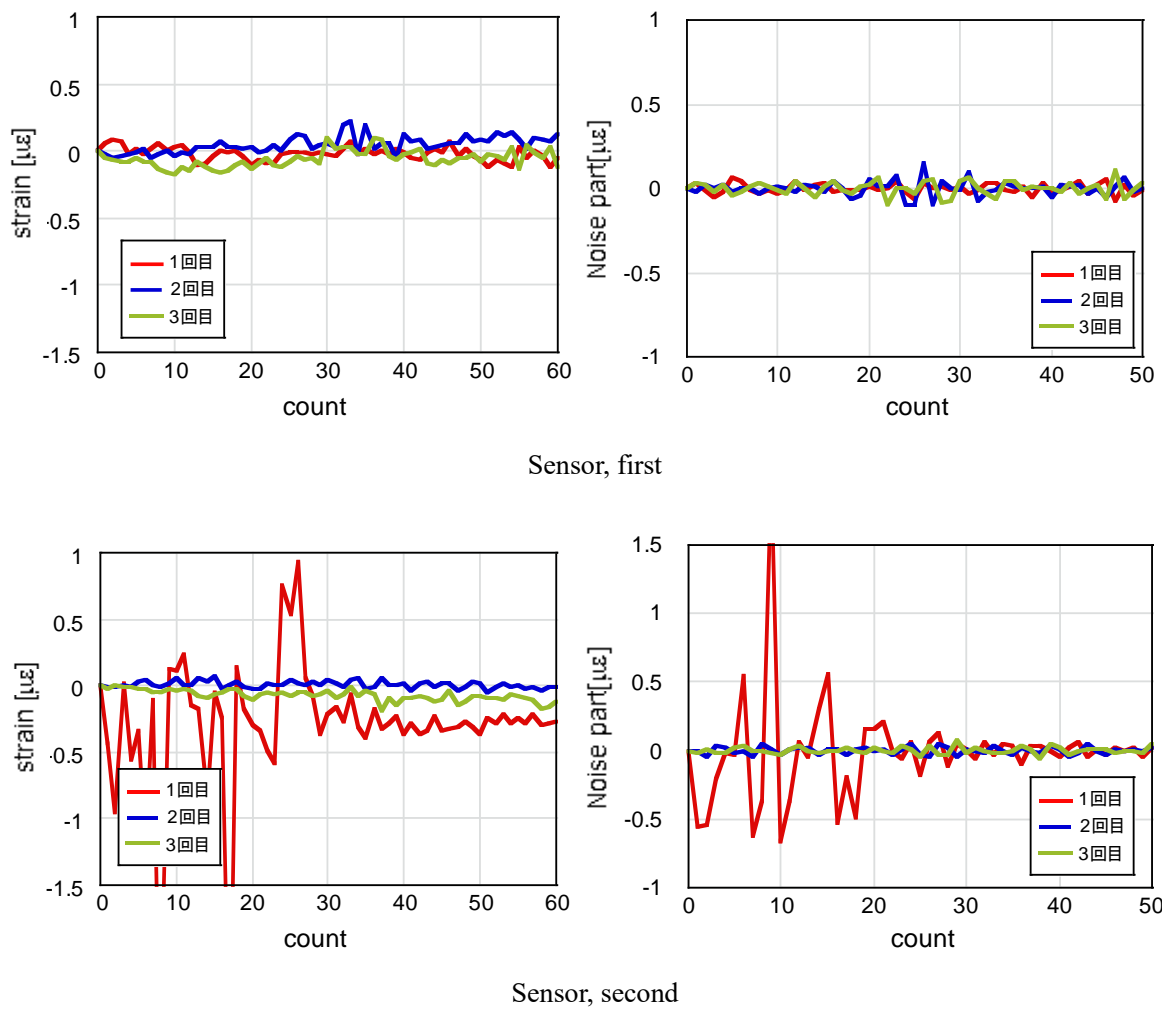


Fig 4.2-14 Strain variation and noise at room temperature with a gap length of about 0.2

Table 4.2-1 Accuracy of each sensor

ギャップ長 [mm]	測定精度 (1本目のセンサ)	測定精度 (2本目のセンサ)
0.05	$\pm 0.0389\mu$	$\pm 0.0251\mu$
0.1	$\pm 0.197\mu$	$\pm 0.0298\mu$
0.15	$\pm 0.0386\mu$	$\pm 0.0262\mu$
0.2	$\pm 0.0410\mu$	$\pm 0.126\mu$

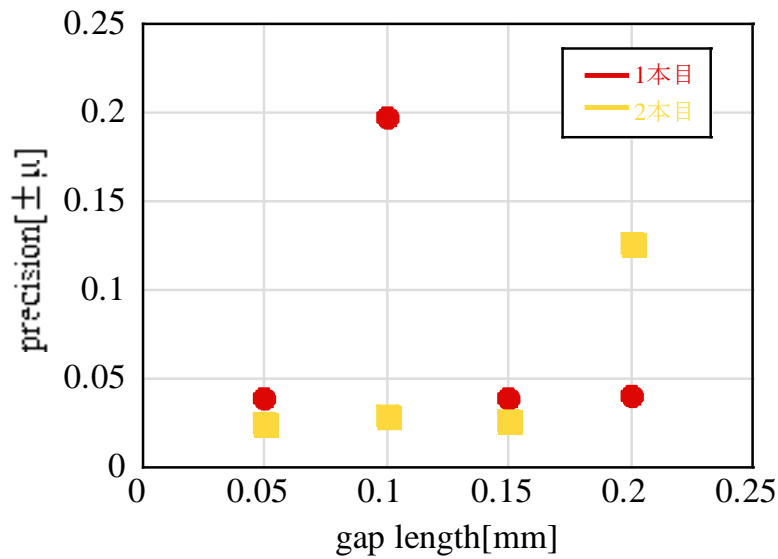


Fig 4.2-15 Accuracy of each sensor

#### 4.3. 埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験

##### 4.3.1 埋め込みによるスペクトル及びギャップ長への影響

埋め込み前の作製した EFPI 光ファイバセンサのスペクトルとギャップ長を図 4.3-1, 埋め込み後のスペクトルとギャップ長を図 4.3-2 に示す. 作製した EFPI 光ファイバセンサのギャップ長は 0.591mm であった. 先行研究より, 埋め込みを行っていない場合の EFPI 光ファイバセンサでは, ギャップ長 0.1mm 及び 0.2mm において高精度を達成していることから, 埋め込み後のギャップ長を 0.1 に設定するのが理想的である. 本実験では, 以前の実験において埋め込み後のギャップ長が, 加圧成形によりセンサが押し広げられ, 埋め込み前と比較して 0.025mm ほど広がったことから, あらかじめ成形後に約 0.1mm になることを見込んでギャップ長を短く設定し, センサの作製を行った. しかし埋め込み後のギャップ長は 0.557mm であり, 約 0.04mm 短くなった. ギャップ長が短くなったのは CFRP は熱膨張係数がマイナスであり, 成形時にセンサが収縮したためと考えられる. このことからギャップ長の微小な長さの調整は困難であるといえる. しかし, 精度が大きく悪化するのはギャップ長が 0.3mm の場合であることが先行研究から分かっているため, そこまで厳密になる必要はないと考えられる.

作製したセンサの埋め込み前のスペクトルと埋め込み後のスペクトルを比較すると, スペクトル形状は埋め込み後の方が安定して反射光量が戻ってきており, むしろノイズも減少したといえる. スペクトルの変化については, 成形時のセンサ内における光ファイバの収縮や微小なズレに伴い, 反射端面が入射用光ファイバの端面とうまく向き合ったためと考えられる. FFT で求めた空間 スペクトルについても, 埋め込み後も鋭いピークを示しており, 埋め込みによるスペクトル形状への影響は皆無であるといえる.



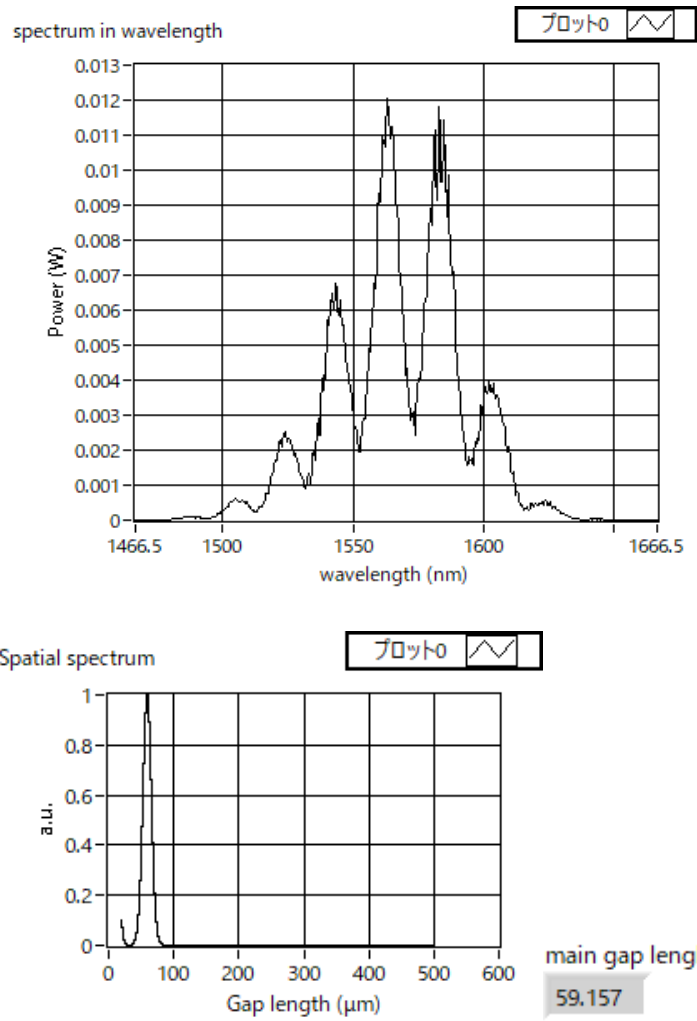


Fig 4.3-1 Spectrum and gap length of EFPI sensor before embedding

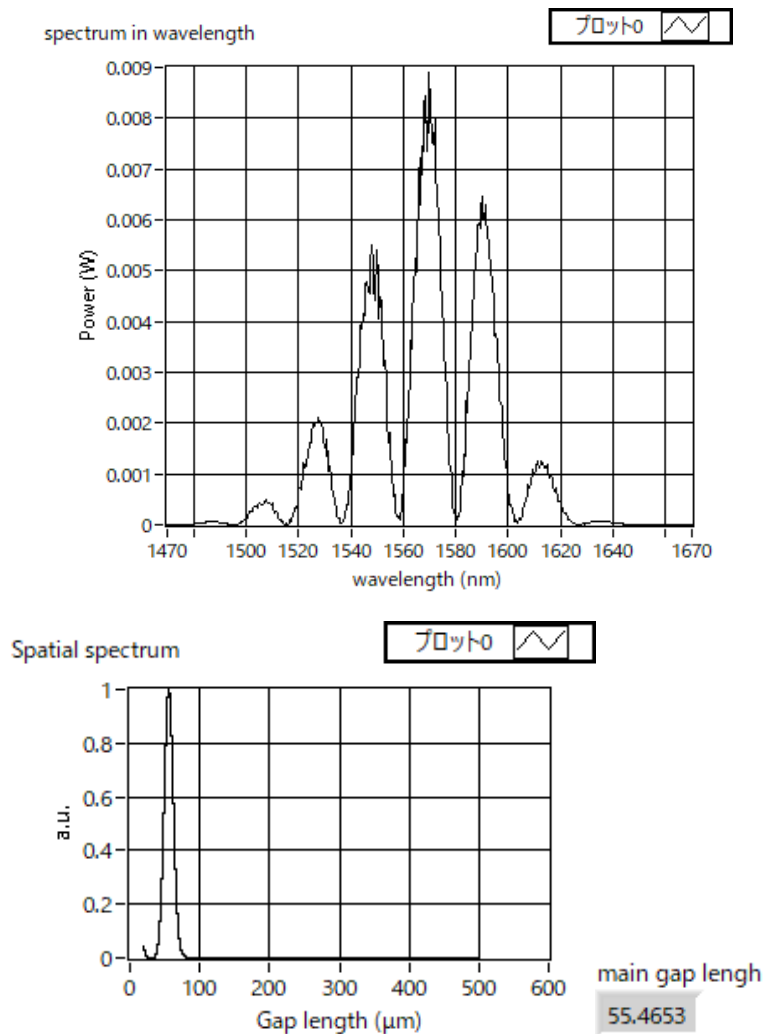


Fig 4.3-2 Spectrum and gap length of EFPI sensor after embedding

#### 4.3.2 測定精度評価試験

図 4.3-3 に埋め込み EFPI 光ファイバセンサにてひずみを測定した際の温度とひずみの関係を示す。図は、同じ試験片に対して 4 回加熱を行った結果を示している。図 4.3-3 より、約 35°C から 80°C までのひずみ変動は約  $8\mu\epsilon$  と非常に小さく、短期安定性も安定しており、加熱による CFRP の小さなひずみ変動を高精度でとらえることができていることが分かる。

1 回目から 4 回目を通して、50°C あたりまでひずみにばらつきがあるものの、50°C 付近からひずみが減少していることが分かる。これはマルチオープンの昇温により 50°C 付近から温度が安定し、また CFRP 積層板が収縮したことで熱ひずみが測定されたことを示しているといえる。次に測定精度に着目する。ノイズ成分のみを取り出したものを図 4.3-4 に示す。また、図 4.3-5 に実験を行った計 4 回の測定精度を示す。測定精度は表より、平均して  $\pm 0.0206\mu$  となった。先行研究における埋め込み EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験では、積層板成形に伴うギャップ長の拡大や、積層板の反り、昇温時にオープン内で生じる対流の影響などが原因としてひずみに攪乱が生じ、測定精度は  $\pm 0.0527\mu$  であった。埋め込みを行っていない場合の測定精度は  $\pm 0.0182\mu$  であったことから、2 倍以上精度が悪化していた。本実験では前実験よりも大幅に精度が改善し、埋め込みを行っていない場合の測定精度とほぼ同等の高い精度を達成していることが分かる。本実験では埋め込みに使用する積層板の枚数を先行研究の 4 枚から 20

枚に変更することで厚みを増やし、サイズをより小さく切り出した。これにより、積層板の反りやオーブン内に生じる対流の影響を受けにくくなり精度の改善につながったと考えられる。

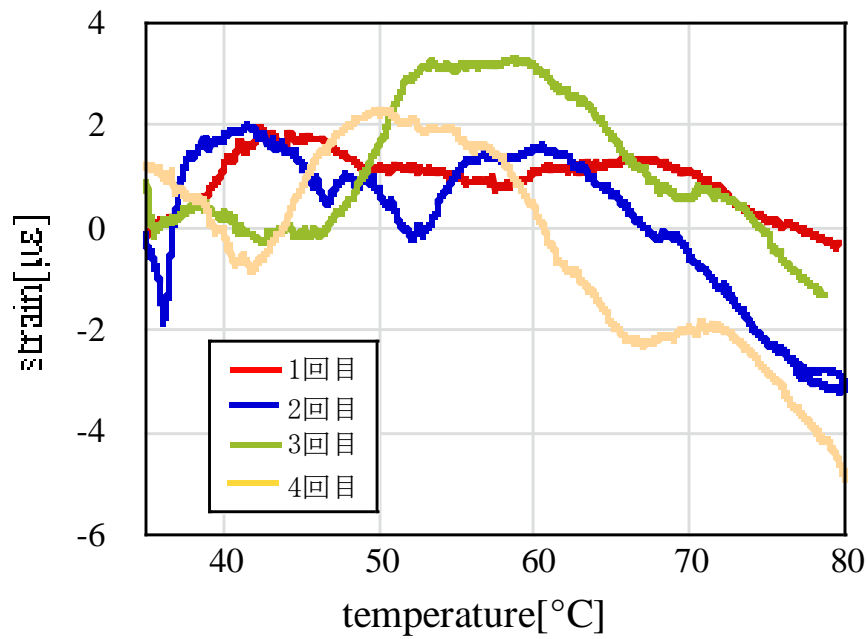


Fig 4.3-3 Measured strain by embedded EFPI sensor

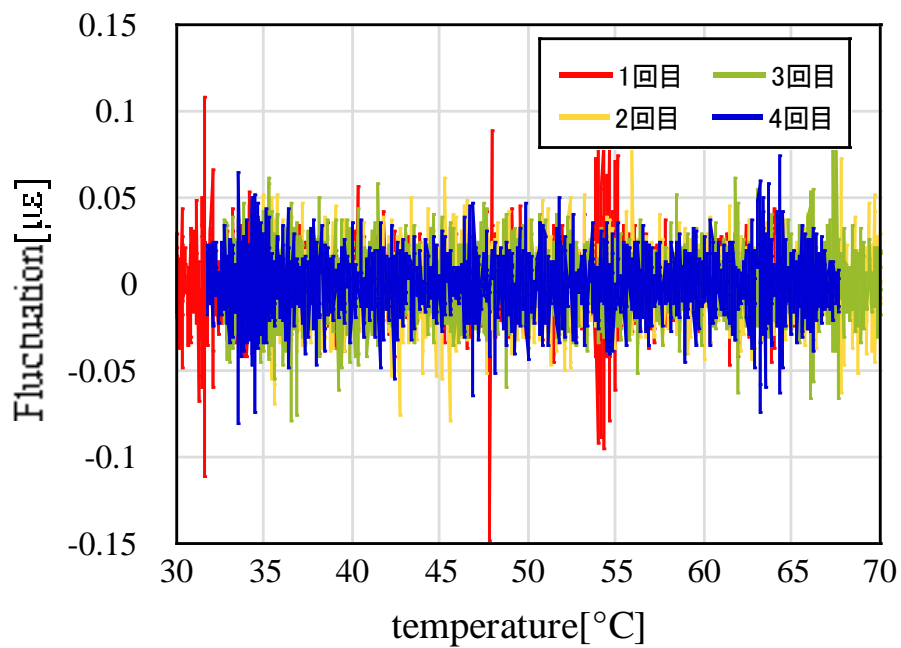


Fig 4.3-4 Noise

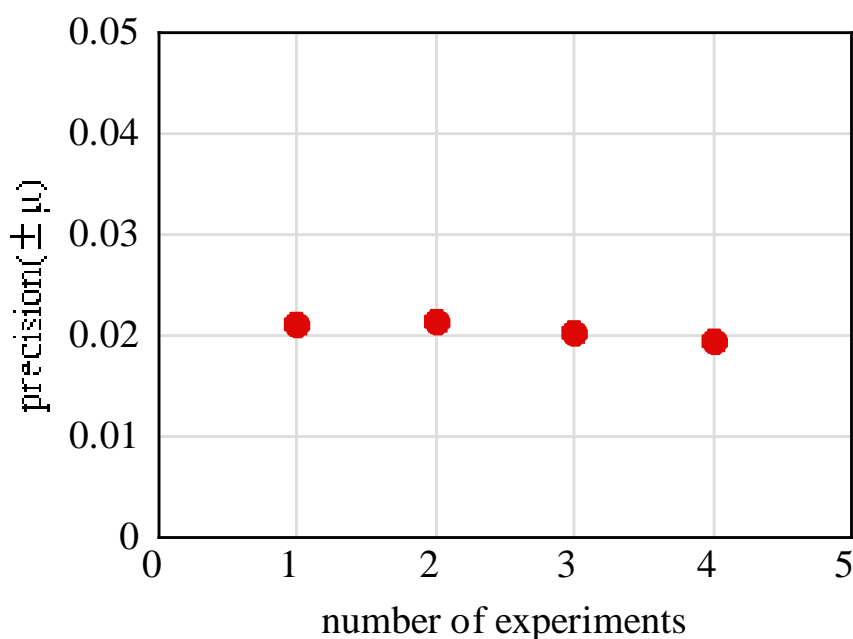


Fig 4.3-5 Precision

Table 4.3-1 Precision

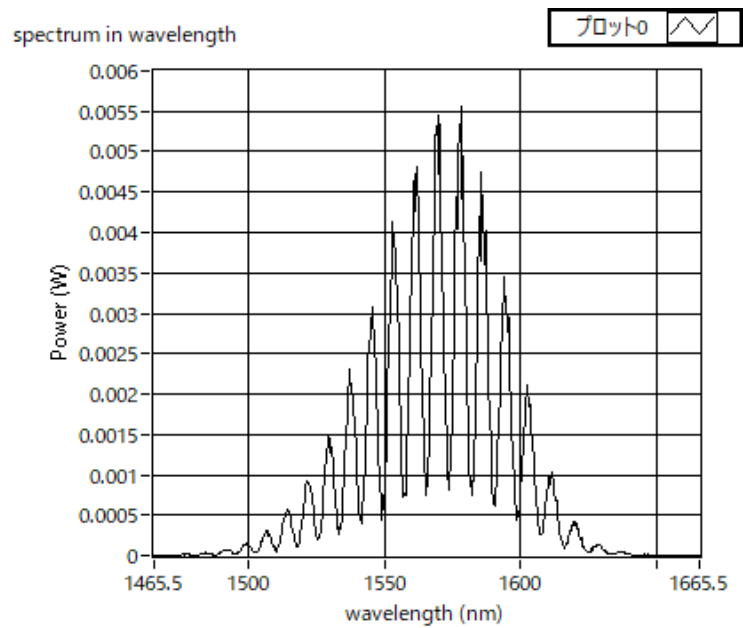
	精度
1 回目	±0.0210μ
2 回目	±0.0214μ
3 回目	±0.0203μ
4 回目	±0.0195μ

#### 4.4. 埋め込み細径 EFPI 光ファイバセンサの測定精度評価試験の実験結果及び考察

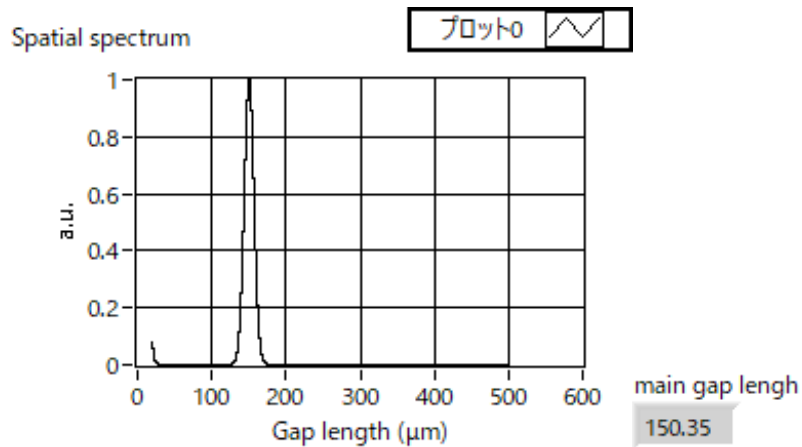
##### 4.4.1 埋め込みによるスペクトル形状への影響

埋め込み前の作成した EFPI 光ファイバセンサのスペクトルとギャップ長を図 4.4-1 及び図 4.4-3, 埋め込み後のスペクトルとギャップ長を図 4.4-2 及び図 4.4-4 に, それぞれ試験片ごとに示す. 作製した埋め込み EFPI 光ファイバセンサのギャップ長は試験片 A が 0.162[mm], 試験片 B が 0.101[mm]であった. 図 4.4-2 より試験片 A は埋め込み前よりもギャップ長が 0.012 ほど広がっていることが分かる. これは成形時にかかる加圧により, CFRP プリプレグが押し広げられ, その際にギャップ長も広がったためと考えられる. 一方で, 図 4.3-3 及び図 4.3-4 より, 試験片 B は埋め込みの前でギャップ長はほとんど変化していないことが分かる. これは, CFRP は繊維方向の熱膨張係数がマイナスのため成形時に収縮しセンサのギャップ長も短くなってしまふ可能性があるが, この収縮量と, 成形時の加圧による膨張量が同等となったためと考えられる. 埋め込み後のセンサのギャップ長をあらかじめ予測し, 制御することは難しいが, ギャップ長 0.1 から 0.2 程度をもつセンサの測定精度は高精度を達成しており, 先行研究より測定点数を調整することで精度の向上ができることが分かっているため, そこまで厳密になる必要はないと考えられる.

埋め込み前のスペクトルと埋め込み後のスペクトルを比較すると、スペクトル形状はほとんど変わらず、むしろ埋め込み後のスペクトルはノイズが減少した。また試験片 B においては埋め込み後のスペクトルは最大振幅が埋め込み前よりも大きくなっており、成形時に入射用の細径光ファイバ端面と反射用の光ファイバ端面の突き合わせの位置がずれたと考えられる。FFT で求めた空間スペクトルについても、試験片 A, B に関わらず、埋め込み後も鋭いピークを示しており、埋め込みによるスペクトル形状への影響は皆無であると言える。

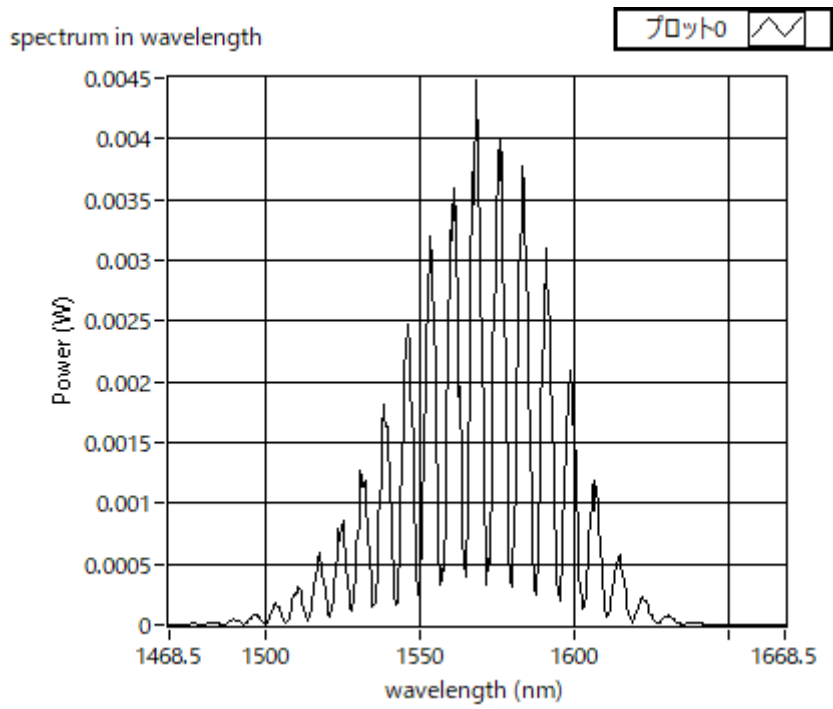


(a) Measurement spectrum

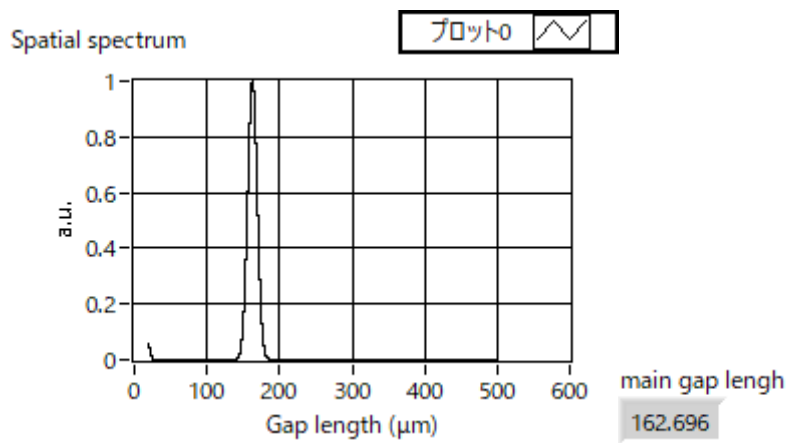


(b) Spatial spectrum by FFT

Fig 4.4-1 Spectrum and gap length of EFPI sensor before embedded of specimen A

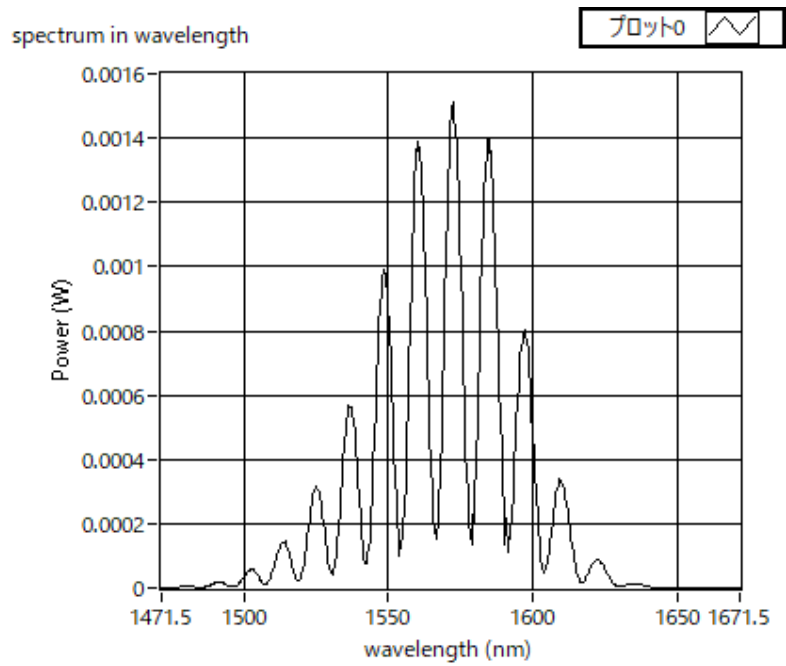


(a) Measurement spectrum

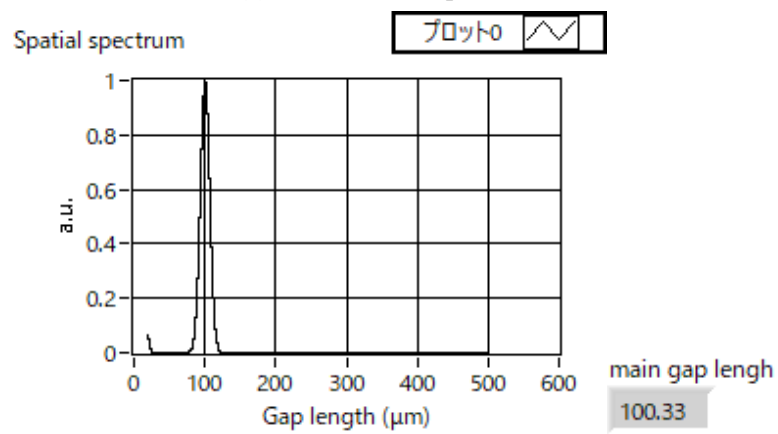


(b) Spatial spectrum by FFT

Fig 4.4-2 Spectrum and gap length of EFPI sensor after embedded of specimen A



(a) Measurement spectrum



(b) Spatial spectrum by FFT

Fig 4.4-3 Spectrum and gap length of EFPI sensor before embedded of specimen B

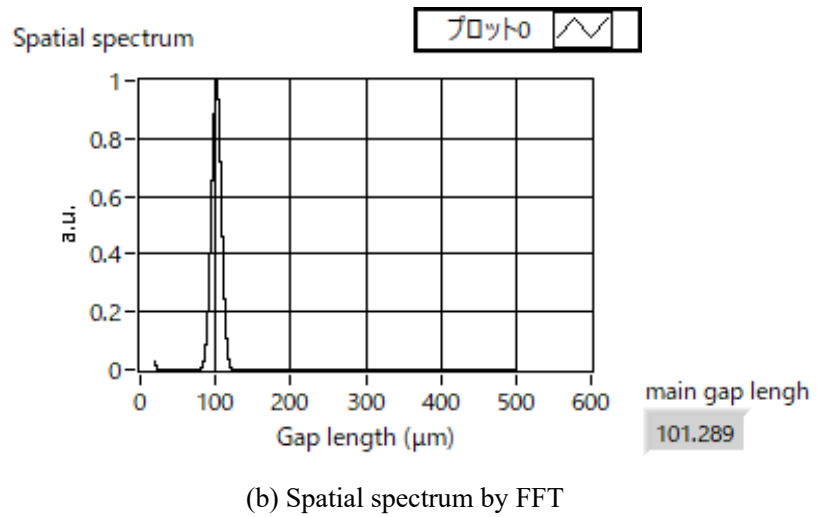
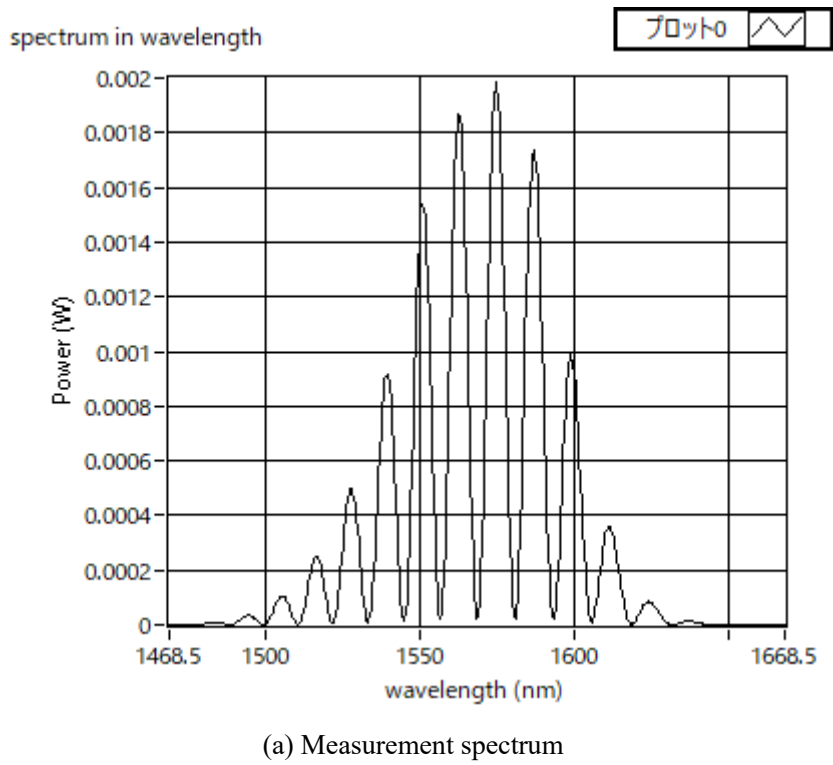


Fig 4.4-4 Spectrum and gap length of EFPI sensor after embedded of specimen B

4.4.2 測定精度評価試験

図 4.4-5, 図 4.4-6 に, 試験片 A 及び B を用いてひずみを測定した際の温度とひずみの関係を示す. 図は, 同じ試験片に対して 4 回加熱を行った結果を示している. 試験片 A は 図 4.4-5 より, 約 25°C から 60°C までのひずみ変動は 約 15 $\mu\epsilon$  であり, そのひずみ範囲で生じるノイズも約 0.05 $\mu$  と小さく, 加熱による CFRP 積層板の小さなひずみ変動を精度よく捉えていることが分かる. 1 回目から 4 回目まで 35°C 付近までは不安定であるが, 40°C 付近から測定されるひずみが減少していることが分かる. これは, 作製した EFPI センサを積層板に繊維方向に埋め込みを行っていることから, 使用しているオープン内の昇温に伴い CFRP が収縮したことを示している. 一方で試験片 B は図 4.4-6 より, ひずみ測定の短期安定性が大きく悪化しており, ひずみの測定が出来ていないことがわかる. これは試験片 A と異なり, 入射用に細径光ファイバを使用したことが原因と考えられる. 外径 0.2, 内径 0.14 のキャピラリと直径



0.08の光ファイバ間に生じる空隙は、直径0.125の光ファイバを使用した試験片Aよりも拡大している。これにより、キャピラリ内における光ファイバの片持ち振動の影響をセンサ本体が大きく受けてしまったと考えられる。これはセンサの作製に使用するキャピラリの内径を、入射用光ファイバの直径に合わせてより細径にすることで改善が期待できる。

次に、測定精度に注目する。熱ひずみの測定がされていた試験片Aのノイズ成分のみを取り出したものを図4.4-7に示す。図より、3回目の測定のノイズが他に比べてやや大きめであるが、ノイズ振幅はほぼ同程度であることが分かる。4.3節と同様にして、ノイズ変動から求めた埋め込み細径EFPI光ファイバセンサの測定精度を表4.4-1に示す。また、図4.4-8に実験回数の計4回の測定精度を示す。表より、測定精度は平均して $\pm 0.0262\mu$ であったことが分かる。4.3.2節の埋め込みEFPIセンサの測定精度は $\pm 0.0206\mu$ 精度であることから、細径キャピラリを用いた今回のEFPIセンサにおいても同等の高い測定精度を達成することができたといえる。このことから、センサ径を細径にすることによるひずみの測定精度への影響は最小限であり、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、作製した埋め込み細径EFPI光ファイバセンサにおいても高精度なひずみ測定が可能になると考えられる。

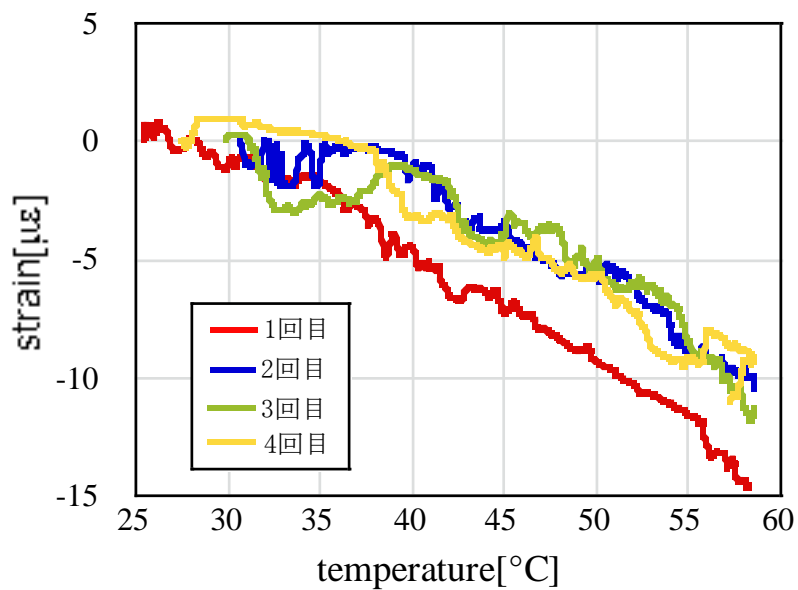


Fig 4.4-5 Relationship between strain and temperature of specimen A

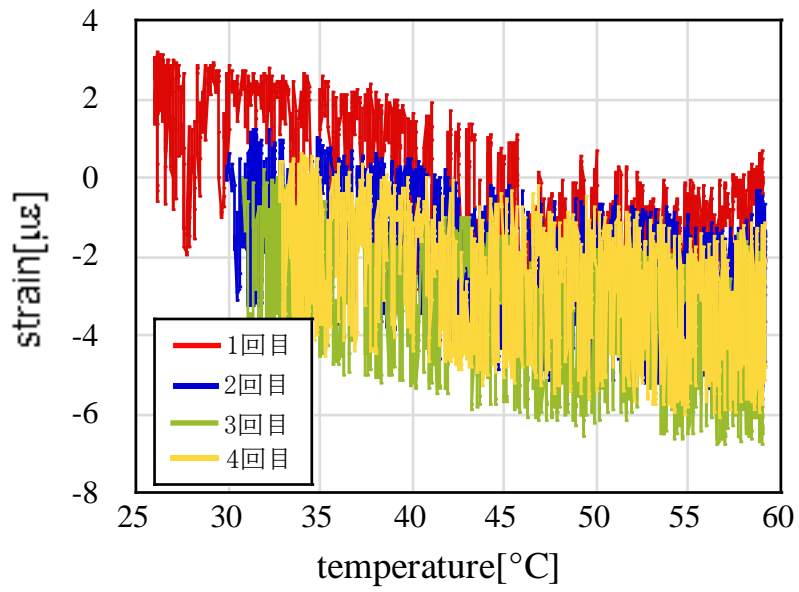


Fig 4.4-6 Relationship between strain and temperature of specimen B

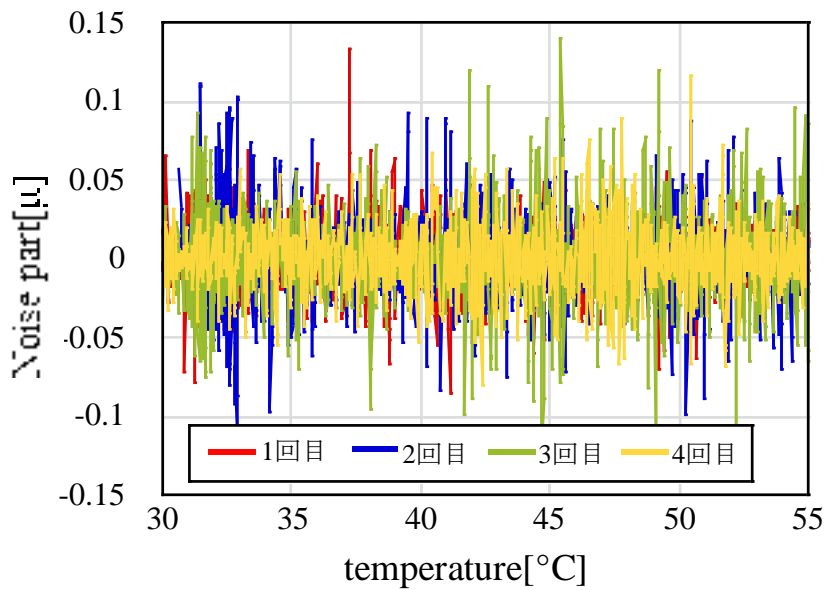


Fig 4.4-7 Noise of specimen A

Table 4.4-1 Precision of specimen A

	1回目	2回目	3回目	4回目	平均
測定精度	±0.0225μ	±0.0291μ	±0.0312μ	±0.0220μ	±0.0262μ

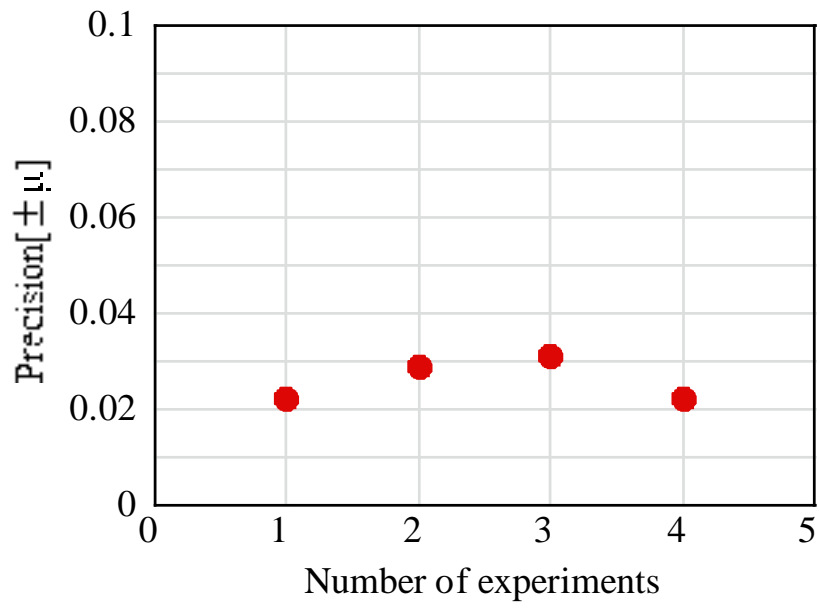


Fig 4.4-8 Precision of specimen A

## 第5章 結言

本研究では、CFRPの微小熱ひずみの測定が可能なEFPI光ファイバセンサを作製し、またより埋め込みに優れた細径EFPI光ファイバセンサを検討した。そのためにセンサ作製に伴うセンサの特性評価や測定精度の評価を行い以下の結果を得た。

- (1) 出力されるスペクトルに見られるノイズは、異なる光ファイバを用いた場合に形状に違いがみられたことから、光ファイバ固有の特性、つまりコネクタ端面に起因する可能性が高いと考えられるが、丁寧な光ファイバ端面のカットの工程を施したうえで、正しく接続されていれば、反射光スペクトルに与える影響がほとんどないことが分かった。
- (2) 作製したEFPI光ファイバセンサのゲージ長は光ファイバ直径に依存しないが、センサ作製時の瞬間接着剤の使用に伴い、変化していると考えられる。厳密なゲージ長が必要な場合はあらかじめ、ゲージ長の測定が必要となるが、実用化としては事前にラミネート加工を施すことを検討しており、この際に可能である。
- (3) EFPI光ファイバセンサを埋め込んだ場合の測定精度は、 $\pm 0.0206\mu$ 精度を達成しており、積層板の大きさや厚さを工夫することで高精度を達成できることが分かった。
- (4) 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 $\pm 0.0251\mu$ の高精度を達成した。
- (5) 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0.125の光ファイバを用いた場合で $\pm 0.0262\mu$ の高い測定精度を達成し、センサ径を細径にした場合においても高精度なひずみの測定は可能であることがわかった。
- (6) 細径キャピラリを及び細径光ファイバを用いて作製したセンサの埋め込みを行った場合、ひずみ測定が不可能であった。これはキャピラリと光ファイバ間の空隙の拡大に伴う振動の影響が原因と考えられ、キャピラリ内径を細径にすることで改善できると考えられる。

## 参考文献

- (1) 高坂達郎, “複合材料成型技術の最前線 3.近年の FRP 成型モニタリング技術とその応用”, 日本材料学会, Vol.67,No.8(2018).pp819-825
- (2) 板谷覚子, “高知工科大学 2021 年度卒業論文”, 2021,
- (3) 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, p p 35
- (4) 左貝潤一, “光学の基礎”, コロナ社, 2009, pp176-177
- (5) 國分泰雄, “光波光学”, 井立出版株式会社, 1999, pp96
- (6) 石川隆司, 福永久雄, 小野幸一, “広い温度範囲で一主軸方向の熱膨張係数を零近傍に制御した積層複合材”, 日本航空宇宙学会, 第 36 巻, 第 48 号
- (7) 村山英樹, “高弾性ピッチ系炭素繊維複合材料の特徴と用途”, 三菱樹脂(株)先端素材事業部, 2011, pp695-698
- (8) 神谷友裕, 宇都宮真, 清水隆三, “熱変形精密評価のための高精度測定系の構築”, 宇宙航空研究開発機構, 2014
- (9) Erik Kappel, “On thermal-expansion properties of more-orthotropic prepreg laminates with and without interleaf layers”, Vol.3(2020),
- (10) 三谷和民, 古山昌利, 福多健二, “PVT 測定装置の開発とエポキシ樹脂への応用”, 成形加工 Vol.7, No.2(1995),
- (11) M.Kanerva, P.Antunes, E.Sarlin, O.Orell, J.Jokinen, M.Wallin, T.Brandner, J.Vuorinen, “Direct measurement of residual strains in CFRP-tungsten hybrids using embedded strain gauges”, Materials & Design, 127(2017), pp352-363
- (12) 扇澤敏明, “高分子の PVT の基礎”, 高圧力の科学と技術, Vol.5, No.4(1996)
- (13) 福田博, 邊吾一, 末益博志, “新版 複合材料・技術総覧”, 株式会社 産業技術サービスセンター, pp752, 2011,
- (14) Kenji Ogi, Mitsuyoshi Tsutsumi, Baso Nasrullah, Yoneta Tanaka, Yoshimitsu Watanabe, “Quasi-isotropic fiber metal laminate with high specific modulus and near-zero coefficient of thermal expansion”, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 4 (2021) 27-36,
- (15) Jinsong Leng, Anand Asundi, “Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors”, Vol.103(2003), pp330-340
- (16) Jinsong Leng, Anand Asundi, “Real-time cure monitoring of smart composite materials using extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensors”, Vol.11(2002),
- (17) 飯野顕, 大久保勝彦, “光ファイバとその応用—IV 光ファイバ材料・製造方法・信頼性(1)”, 古河電気工業(株)光技術研究所, 1989
- (18) Paul Morris, “A Fabry-Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure”, the Journal of the Acoustical Society of America 125, 3611 (2009),

## 謝辞

本研究を行うにあたって、1年間多くのご指導をいただいた担当指導教員の高坂達郎教授と楠川量啓教授及び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いたします。また多くの助言をしてくださった先端機械・航空材料工学研究室，材料強度学研究室の皆様に感謝いたします。