

## 論文の内容の要旨

論文題目 OFDR 式光ファイバ分布センシング技術の構造モニタリング適用性の向上

氏名 和田大地

### 背景

光ファイバセンサの優れた特徴の一つに分布測定がある。光ファイバの任意位置で測定が出来るため、ひずみセンサの場合なら、センサが存在する領域の構造物のひずみ分布を取得できる。構造物に生じる損傷は周囲のひずみ分布を乱すため、精度良くひずみ分布をセンシングすることで損傷検知に貢献出来る。小さな損傷を検知するため、あるいは乱れたひずみ分布の形状を正確に把握することで損傷の大きさや形状、位置を特定するためには精度に並んでいかに細かく分布を取得できるかも大切である。これを空間分解能という。当研究室の先行研究では構造物をモニタリングするための高精度・高空感分解能を有する分布センシングシステムを開発した。このシステムは OFDR(optical frequency domain reflectometry)の構成に基づき、FBG(fiber Bragg grating)と呼ばれる光ファイバセンサ素子内部に生じるひずみや温度の分布を測定する。

これまでの OFDR センシングシステムは、他の多くの光ファイバセンサと同様、実験室環境での測定に留まっていた。そこではひずみ計測のための理想的な温度調節がなされ、光ファイバには長手方向のみのひずみが理想的に負荷されるよう実験が組まれていた。本研究では OFDR センシングシステムが実験室外の実戦的な環境でも適用性を示せるように、以下のような研究目的を掲げた。

### 研究目的

複合材のモニタリングを行う場合には FBG はしばしば材料内へ埋め込まれる。このときに FBG に負荷されると想定される多軸ひずみの影響を、継ぎ手モニタリングの例を通して検証する。(多軸ひずみ場での計測)

ひずみと温度の両方が変化する場での計測手法を開発する。(ひずみと温度の計測)

OFDR の測定性能、特に衝撃試験や疲労試験への応用を展望して、測定速度を向上させるために、効率の良い OFDR の信号処理手法を提案し、その妥当性・性能を検証する。(OFDR 信号処理の効率化)

上述したような検証・開発において、測定システムの理論的なパフォーマンスを解析するためのシミュレーション手法を提案し、そのための光学シミュレーションモデルを構築する。(シームレスシミュレーション解析モデル)

### 研究成果 (シームレスシミュレーション解析モデル)

伝達関数による piece-wise uniform アプローチを二偏波モードの表現に拡張し、OFDR 測定系の光学シミ

ュレーションモデルを構築した。FEM や光弾性解析と連結させることで分布センシングプロセスをシームレスにシミュレーション解析できるようになった。この解析手法により光ファイバ分布センシング技術の理論的なパフォーマンスをシミュレーションできるようになった。

#### 研究成果（多軸ひずみ場での計測）

多軸ひずみの影響を検証するために、まず FBG の一区間に側圧を負荷し、OFDR により分布的にモニタリングする系をシミュレーション及び実験により検証した。複屈折によるブラッグスペクトルのスプリットは側圧が負荷された区間のみで観測され、スプリット量から側圧が評価出来ることがわかった。また側圧が小さい場合は明瞭なスプリットが現れない代わりに周期的な強度変調が観測された。この周期と複屈折の関係を理論的に説明し、周期から側圧が評価出来ることが示せた。

次に FBG を、熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維プラスチック（CFRTS）に埋め込み、シングルラップ接着継ぎ手を作製し、引張荷重下のひずみ分布モニタリングを検証した。シミュレーションにより FBG 断面内に負荷される応力は検知可能なほど大きな複屈折を生じさせないことがわかった。シミュレーション・実験の双方において、ファイバ長手方向のひずみが急峻に変化する区間で FBG のスペクトルに複数のピークが観測される場合があったが、これは複屈折ではなく、信号処理により生じるものであり、空間分解能を良くすることでピークは一つにまとまることが示された。OFDR により計測されるファイバ長手方向ひずみ分布はシミュレーションにより算出されるひずみ分布と精度良く一致していたが、接合端部の片方でフィレットによるスペクトル乱れの影響がみられた（Fig.1）。

FBG を、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維プラスチック（CFRTP）に埋め込み、シングルラップ超音波溶着継ぎ手を作製し、引張荷重下のひずみ分布モニタリングを検証した。シミュレーションにより、上述した CFRTS 接着継ぎ手の場合と同様、複屈折による影響はみられないことがわかった。シミュレーションにより算出した FBG 埋め込み部のファイバ長手方向のひずみ分布は実験結果と精度良く一致していたが、接合部については違いがみられた。実験結果が示す接合部のひずみ分布の特徴に注目し、継手の応力分布を算出する際に弾性解析から Hill の異方性弾塑性解析に切り替えることで、シミュレーション結果が実験結果に近づくよう修正できた（Fig. 2）。実験とシミュレーションによるひずみ分布の違いが大きいものほど継ぎ手強度が低い傾向が見られたため、ひずみ分布を観察することで継ぎ手強度を評価できる可能性が示された。

#### 研究成果（ひずみと温度の計測）

PANDA ファイバと呼ばれる偏波保持（PM）ファイバに FBG を書き込むことでひずみと温度を同時に計測できる原理があり、これは OFDR による分布測定に応用可能である。この PANDA-FBG を用いたひずみ・温度同時分布測定手法は、測定精度が不十分であるという課題があった。

同時測定精度は PANDA ファイバの複屈折と関係があると理論的に説明した。同時測定精度と複屈折の定量的関係を評価するためにモンテカルロ法を用いた誤差解析を行い、複屈折が大きくなるほど同時測定精度が向上することを示せた（Fig. 3）。構造モニタリング用途を踏まえて妥当な同時測定精度を設定し、目

標とする複屈折の大きさを定めた。

複屈折を大きくさせるために、PANDA ファイバの幾何形状を同時センサ用途に最適設計することを提案した。FEM を用いて応力付与部の位置・大きさを調整し、ファイバ線引き後にコアに残留する断面内主応力差を算出し、光弾性効果から生じる複屈折を計算した。PANDA ファイバに加えて Bow-tie 型、IEC 型と呼ばれる PM ファイバにも同様の最適化を行い、それぞれ二倍弱の複屈折の増大がみられた。

PM ファイバの材料特性の最適化も行った。応力付与部の線膨張係数はボロンドープ量により調整でき、応力付与部の線膨張係数を大きくすることでコアの残留主応力差を大きくすることが出来る。線膨張係数を数倍にすることで目標の複屈折が達成出来ることが示された。

#### 研究成果（OFDR 信号処理の効率化）

これまでの OFDR 信号処理手法は短時間周波数解析（STFT）に基づいたものだったが、新たに群遅延計算に基づく信号処理手法を提案した。群遅延を求めるためには位相を直接微分する方法がある。この場合だと位相のアンラッピングが必要となってしまうので、手間と不確実性が生じてしまう。また微分作業は CPU 高負荷になりやすい。そこで Z 変換を用いて巧みに位相のアンラッピングと微分を避ける方法がある。位相微分を用いる方法と Z 変換を用いる方法の両方についてその性能を検証した。

シミュレーションによる検証の結果、信号処理速度は STFT に比べて群遅延計算の方が数十倍向上することが示された。位相微分を用いる方法よりも Z 変換を用いる方法の方が速度は速かった。また空間分解能についても STFT に比べて群遅延計算の方が 50 - 150 倍ほど向上することがわかった。これは位相微分を用いる方法も Z 変換を用いる方法も同様だった。精度については STFT とほぼ変わらなかった。

しかし群遅延計算による信号処理手法を実験結果に応用した場合、0.2 nm 幅で誤差のばらつきがみられた (Fig. 4)。

以上のように、埋め込み FBG の信号解釈方法が説明されたこと、格段に測定性能が向上する信号処理手法が実装されたことで OFDR 測定システムの適用性は向上した。さらに成果で示された、ひずみと温度を精度よく同時計測するためのアプローチを追及し、信号処理手法の精度を向上していくことでさらなる適用性の向上が見込める。

#### 課題と展望

OFDR 測定系の光学シミュレーションモデルでは光源やカプラ、全反射端や受光器の特性については定義していなかった。特に光源についてはその偏光面の角度が大きく各偏波モードの信号強度に影響してくる。また偏波状態を調整するために偏波コントローラを適所に導入する場合もあると思うが、それについても本シミュレーションモデルは考慮していない。これらは今後の課題となる。

埋め込み FBG を用いた継手モニタリングでは信号処理の最適化が課題となるだろう。急峻なひずみ変化のある場所で観測されたスペクトルの複数のピークは空間分解能を向上させることで解消されたが、現

実的に起こりうるひずみ変化を鑑みて、空間分解能を上げて信号処理を行わなくてはならない。この点において群遅延計算による信号処理手法の確立に期待がかかる。また継手強度をひずみ分布からどのように決定するかも考えたい。本研究のような手法ではファイバ断面内の応力は測定できないため、やはりCFRTP 超音波溶着で示したような、長手方向ひずみ分布から継手強度が同定できることが望ましい。あるいはセンサ配置方向を変えることも一つの手段である。

ひずみ・温度同時測定用の偏波保持ファイバを製造していく場合、近接する応力付与部による光強度損失、ボロンドープによる応力付与部の融点低下を考えていかななくてはならない。特に後者は製造の可否に極めて大きく影響する。

群遅延計算による信号処理手法では、実験結果にのみ生じる誤差の原因究明と低減がやはり必要だろう。

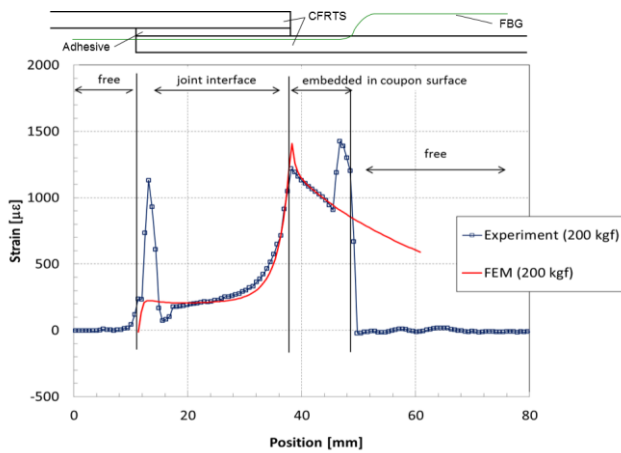


Fig. 1 CFRTS 接着継手のひずみ分布

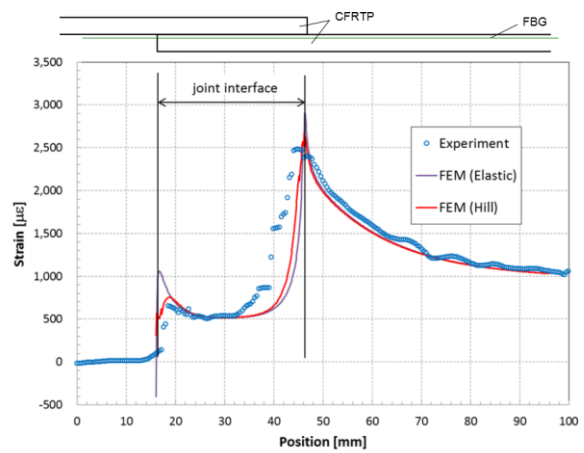


Fig.2 CFRTP 超音波継手のひずみ分布

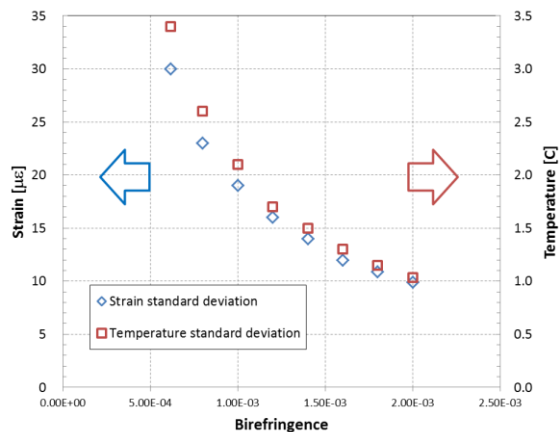


Fig. 3 ひずみ・温度測定誤差と複屈折の関係

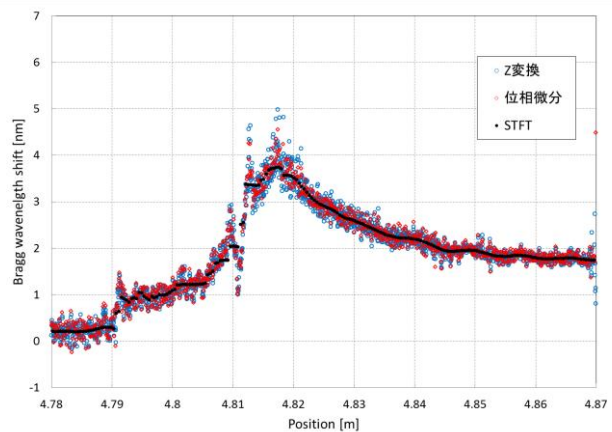


Fig. 4 異なる信号処理手法によるブラッグ波長分布