

高速波長掃引光源を使用した PNC-OFDR 方式分布型光ファイバ計測におけるひずみ範囲の評価

鹿島建設(株) 正会員 ○吉村雄一 青鹿弘行 今井道男 フェロー会員 川端淳一
島根大学 谷村大輝 小具亮太 張 超 伊藤文彦

1. はじめに

構造物内部や地盤に生じるひずみの変状を網羅的に把握可能な分布型光ファイバ計測について、施工品質と安全性の向上を目的とした施工管理（トンネル支保やケーソン沈設、鋼矢板変位計測等）への適用が進んでいる¹⁾。その計測手法の1つに、微小ひずみ（精度： $1\mu\epsilon$ ）を検知可能なレイリー計測が挙げられる。筆者らはレイリー計測のうち高速での計測が可能な OFDR 方式に着目して、ひずみ計測における長距離化を目的に波長掃引光源を使用した PNC-OFDR 方式ひずみ計測システムを製作し、静・動ひずみ計測技術の実用化開発と応用を実施してきた^{2,3)}。本稿では、本システムで計測可能なひずみ範囲の把握を目的に、波長掃引光源の性能（波長掃引幅）とひずみ範囲の関係を評価した内容を報告する。

2. 評価概要

2.1 PNC-OFDR 方式におけるひずみ分布の計測について

本方式におけるひずみ分布の出力方法を図-1に示す。ひずみ計測システムに接続した光ファイバセンサに周波数を掃引した連続光を入力し、光ファイバセンサから後方（システム方向）に散乱されるレイリー散乱光を検出する。ゲージ長に相当する光ファイバセンサ各区分で生じるレイリー散乱光のスペクトルを信号処理により算出し、スペクトル波形がひずみに比例してシフトする性質を利用して、参照用と測定用2つのスペクトルの類似度を示す指標である相互相関関数が最大を示すシフト周波数をひずみ（相対値）として算出する。本評価では、シフト周波数（ $\Delta\nu$ とする）からひずみ（ $\Delta\epsilon$ ）への換算に当り、 $\Delta\nu/\Delta\epsilon = -0.78 \times \nu_0 = -150.5 [\text{MHz}/\mu\epsilon]$ （ ν_0 : 入力光の周波数）を使用した⁴⁾。同様の手順を光ファイバセンサ各区分で実施することでひずみ分布が得られる。

2.2 ひずみ範囲の評価

スペクトルのシフト周波数からひずみを算出するため、ひずみの計測限界はスペクトルの周波数範囲に依存する。そのため、周波数範囲を決定する光源の波長掃引幅を 5,10,15nm に設定し、各掃引幅にて測定可能なひずみ範囲を評価した。評価に当たり光ファイバを2点固定して軸方向に引っ張る一軸引張試験を実施した（図-2）。システム出力端を距離 0m として 255m 位置に引張区間を設け、引張区間長を 40cm とした。なお、評価用ファイバには素線ファイバ（直径 250 μm ）を使用し、引張を段階的に加えてひずみ計測を行った。

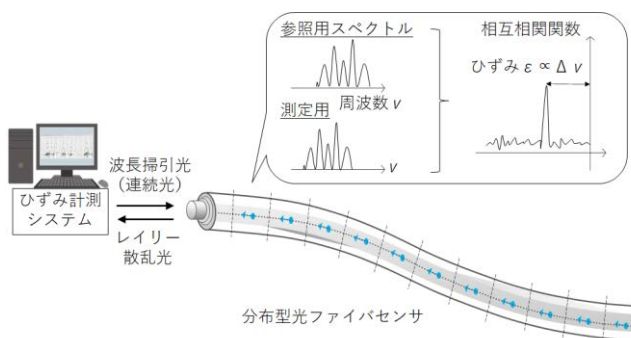


図-1 OFDR 方式におけるひずみの出力

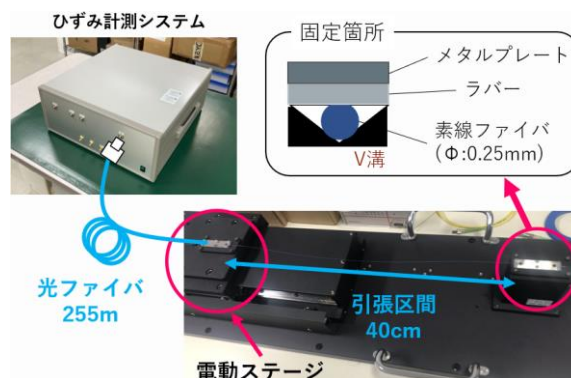


図-2 一軸引張試験によるひずみ計測

キーワード 光ファイバ, OFDR, ひずみ, 波長掃引光源, PNC

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

3. 評価結果

3.1 一軸引張におけるひずみと相互相関関数の分布

一区間に引張を与えた際のひずみと相互相関関数の分布を図-3に示す。横軸はシステム出力端からの距離を示しており、計測点間隔と空間分解能を100mmに設定してひずみと相互相関関数（1の場合スペクトルが完全一致、0の場合無相関を示す）の分布を出力している。引張区間（距離255.25～255.65m）を除いて、相互相関関数が0.7～1に分布しており、高い相関で無ひずみの状態を得られた。また、引張区間付近では、相互相関関数は0.1程度まで低下したが、妥当なひずみ分布が得られた。

3.2 波長掃引幅とひずみ範囲の関係

掃引幅15nmで実施した一軸引張試験にて得られたひずみ分布を図-4に示す。引張ひずみを500 $\mu\epsilon$ 毎に加えた結果、段階的に増加したひずみ分布が確認できる。引張ひずみが4000 $\mu\epsilon$ となったところで計測可能なひずみ範囲を超え、実際と異なる外れ値を示している。波長掃引幅と、台形状ひずみ分布の最大値を評価した結果、掃引幅15nmではひずみ最大3311 $\mu\epsilon$ 、10nmでは1165 $\mu\epsilon$ 、5nmでは573 $\mu\epsilon$ まで計測可能であった。各掃引幅におけるひずみと相互相関関数の関係（図-5）を出力したところ、波長掃引幅を広く設定することでひずみの増加につれて低下する相互相関関数の許容範囲が拡大している。相関（類似度）の低いスペクトルを利用する大ひずみ評価においてひずみの推定不良が生じにくい計測性能が得られていることが分かる。

4. まとめ

高速波長掃引光源を使用したPNC-OFDR方式ひずみ計測システムについてひずみ計測範囲を評価した結果、最大3311 $\mu\epsilon$ の計測を確認した。市販されている分布型光ファイバ計測器ではひずみ0～数1000 $\mu\epsilon$ の計測範囲が得られており、同等の計測性能を有する本システムも様々な計測対象に適用するものと考えられる。実用性向上を図ると共に現場への適用を幅広く進める。

参考文献

- 1) 今井ら：革新的光ファイバ計測による躯体や地盤の見える化，土木施工，pp.90-93，2022年5月号。
- 2) 吉村ら：PNC-OFDR方式を用いた分布型光ファイバセンサによる静・動ひずみ計測，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，CS9-41，2022。
- 3) 那須ら：分布型光ファイバ計測技術を用いた舗装構造の評価，第2回交通地盤工学に関する国内シンポジウム，2022年11月。
- 4) Alan D. Kersey, et al., J. Lightwave Technol. **18**(8), 1442-1463(1997)。

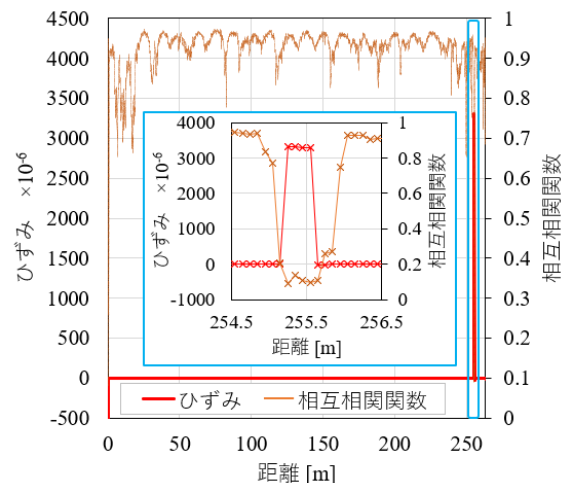


図-3 ひずみおよび相互相関関数の分布
(掃引幅:15nm, 外:全区間 内:引張区間付近)

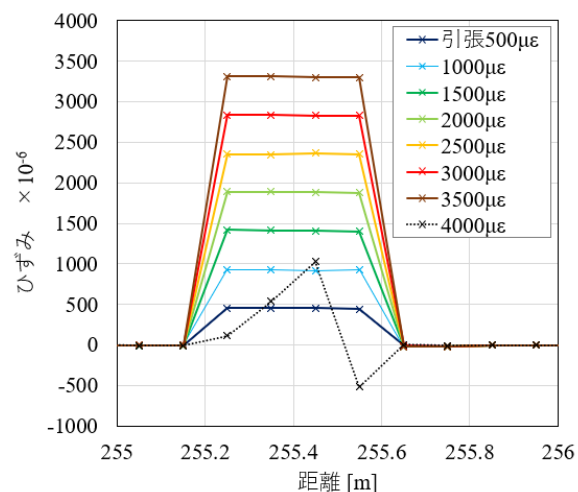


図-4 掃引幅15nmで実施した
ひずみ範囲の評価

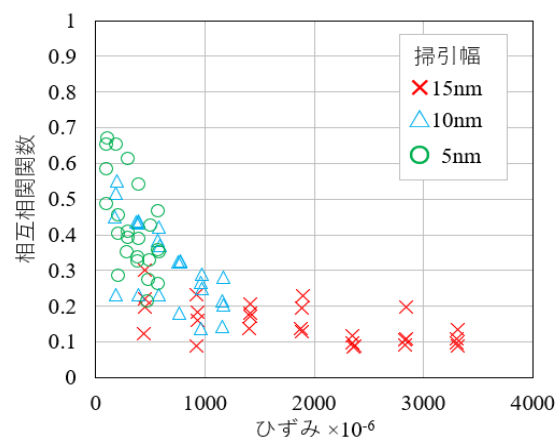


図-5 ひずみと相互相関関数の関係