

分布型光ファイバーセンシングによる構造物の健全性監視システム

山内 良昭^{*,**}・李 哲賢^{*}・岸田 欣増^{*}・王 勇^{**}

Structural Health Monitoring System Using PPP-BOTDA Optical Fiber Distributed Sensing Technology

Yoshiaki YAMAUCHI^{*,**}, Che-Hsien LI^{*}, Kinzo KISHIDA^{*} and Isamu OH^{**}

The health monitoring of structures using optical fibers as sensors is recently vigorously investigated and researched, due to its numerous advantages over traditional measurement techniques. The PPP-BOTDA distributed sensing technology, developed by Neubrex Co., Ltd., achieves spatial resolution as high as 0.1 m, that is, 10 times higher than available before. The technique employs a stepwise pump laser pulse in the optical fiber. The Brillouin shift of frequency at each sampling point along the fiber installed on the structure is used to measure the strain and temperature at that point. The large amount of accurate data collected by proposed sensing technique, allows one also to quantitatively estimate the state of structure via inverse analysis.

Key words: optical fiber, Brillouin scattering, distributed sensing, health monitoring, inverse problem

近年、構造物に光ファイバー網を張り巡らせ、ひずみあるいは温度を計測することにより、離れた安全な場所から構造物の状態を集中監視する健全性監視技術が注目を浴びている。この技術により、保守作業の効率化、設備の信頼性向上、状態の遠隔監視などが提供されるため、実用化に向けてさまざまな形の研究・開発が活発に行われている。

ここでは、ニューブレクス社が開発したパルス・プリポンプ方式を用いたひずみ/温度分布計測技術 (PPP-BOTDA: pulse-prepump Brillouin optical fiber time domain analysis) について解説するとともに、この計測技術と逆解析技術とを組み合わせることにより実現される産業プラントの健全性監視システムについて述べる。

1. ニューブレクス社の設立経緯

誘導ブリュアン散乱に基づくひずみ/温度の計測技術は日本発の技術で、1990年に提案されて¹⁾以来、世界の関心を集めてきた。この基礎的な発明から10数年が経過し、計測技術の高度化、すなわち測定精度および空間分解能の

向上といった技術の世代交代が可能となってきた。ニューブレクス社は2002年にこの技術の発展・実用化を目的として世界で初めて設立された会社である。光ファイバー上の任意位置のひずみおよび温度を感知できるセンサーは、動物の神経によく似ている。そこで、NeuralとFibreという2つの英単語から社名をNeubrex (ニューブレクス)と定めた。

大阪大学の多くのスタッフに創業株主として会社設立にかかわっていただいたため、会社設立当初から、大阪大学と緊密に連携して研究開発を進めてきた。2004年10月に「パルス・プリポンプ方法を用いた高分解能ブリュアン計測の理論検討²⁾」を発表し、2005年8月に「PPP-BOTDA測定技術を用いた10cm分解能ブリュアン分布計測の実現³⁾」を発表した。2005年11月にひずみ分布型計測装置“NEUBRESCOPE NBX-6000”の販売を開始し、2006年には電力、石油、航空、土木などの分野で受注実績をあげている。2007年1月には「光ファイバーセンシングによる構造物の健全性監視システム」が完成する予定で、以後

* ニューブレクス(株) (〒650-0023 神戸市中央区栄町通1-1-24 阪神栄町ビル403A) E-mail: yamauchi@neubrex.jp

** 大阪大学大学院工学研究科附属フロンティア研究センター (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

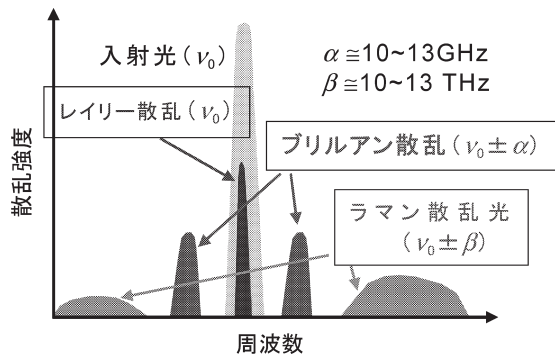


図1 後方散乱光のスペクトラム。

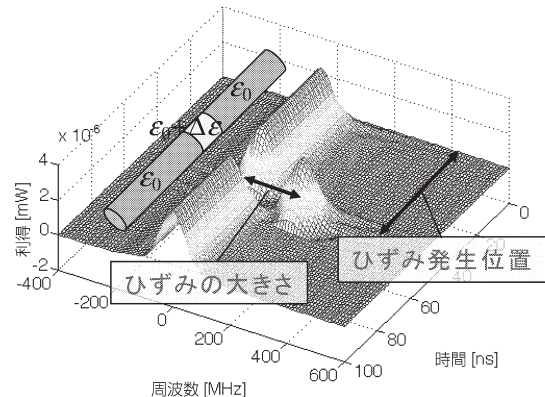


図3 ひずみ負荷によるブリュアン周波数シフト。

も積極的に研究開発を推し進めていきたいと考えている。

2. PPP-BOTDA 技術

2.1 BOTDA の基本原理

分布型光ファイバーセンシングは、光通信で用いられるシリカ系 SM (single mode) 光ファイバーに光を入射させたときに、後方に散乱される光の性質を用いた技術である。図1に、後方散乱光のスペクトラムを示した。BOTDAでは、これらの散乱光のうち、ブリュアン散乱光(光子とフォノンの相互作用)の周波数が光ファイバーに生じるひずみおよび温度に依存してシフトする性質を利用する。ひずみ/温度の基準値 ϵ_0 , T_0 からの変化量 $\Delta\epsilon$, ΔT とブリュアン散乱光の周波数シフト量 $\Delta\nu$ との間には次の線形関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta\nu(\epsilon_0, T_0) &= \nu(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, T_0 + \Delta T) - \nu(\epsilon_0, T_0) \\ &\cong \frac{\partial\nu}{\partial\epsilon} \Big|_{\epsilon_0} \Delta\epsilon + \frac{\partial\nu}{\partial T} \Big|_{T_0} \Delta T = C_{11}\Delta\epsilon + C_{12}\Delta T \end{aligned} \quad (1)$$

C_{11} , C_{12} は光ファイバーの材質によって決まる定数である。

図2には、BOTDAを用いたひずみ/温度の分布計測装置の概要を示した。光ファイバーの片端(図の左端)からパルス状のポンプ光を入射させ、ファイバー内の散乱により戻ってくる光の周波数を検出回路で検出する。このとき、もう一方のファイバー端からプローブ光とよばれる

CW光を対向入射させると、パルス光とCW光の相互作用で散乱光が増強される。これを誘導ブリュアン散乱(SBS: stimulated Brillouin scattering)とよぶ。このプローブ光の対向入射により散乱光強度が高くなり、S/N比が向上するため、直接検波が可能となる。

図3には、ひずみを与えられたファイバーからのSBS強度を周波数-時間平面に表した。これは、対向入射させるプローブ光の周波数を掃引しながら、SBS信号を集めることで得られる。ポンプ光をファイバーに入射してから散乱光が戻ってくるまでの時間 t は、次式によりポンプ光入射端からの距離 Z に変換される。すなわち時間軸はファイバーの位置情報に相当する。

$$Z = \frac{v_g t}{2} = \frac{Ct}{2n} \quad (2)$$

ここで、 C は真空中の光速、 v_g は光ファイバー中の光速、 n は光ファイバーの屈折率である。この図を周波数軸に沿って切断し、ある時間 (= 位置) におけるSBS信号と周波数の関係(BGS: Brillouin gain spectrum)を求める。このBGSから、関数フィッティング等を用いて、ピーク周波数を求めれば、式(1)によりひずみを計算できる。

2.2 PPP-BOTDA

PPP-BOTDAはセンチメートルオーダーの高空間分解能ブリュアン分布計測を実現するために開発された手法である²⁻⁴⁾。その特徴を以下に示す。

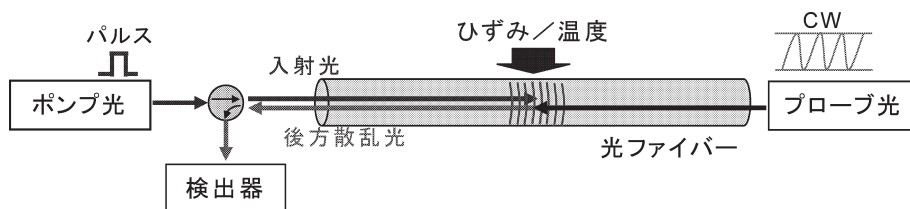


図2 BOTDA方式によるひずみ/温度分布計測装置。

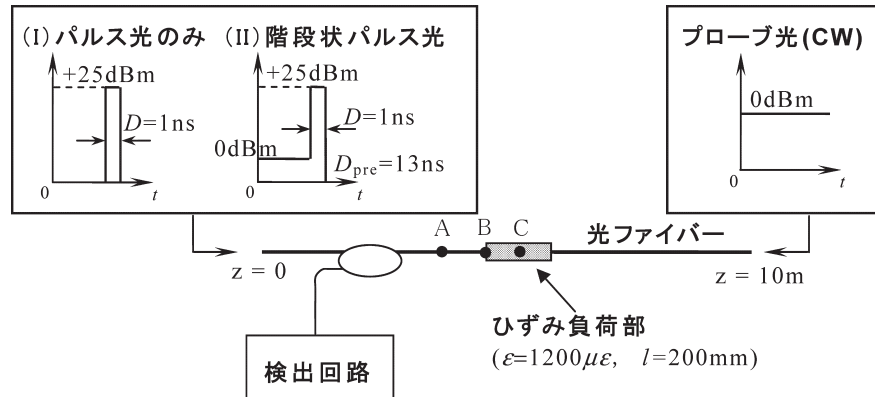


図4 PPP-BOTDA の基本原理を検証するための試験系。

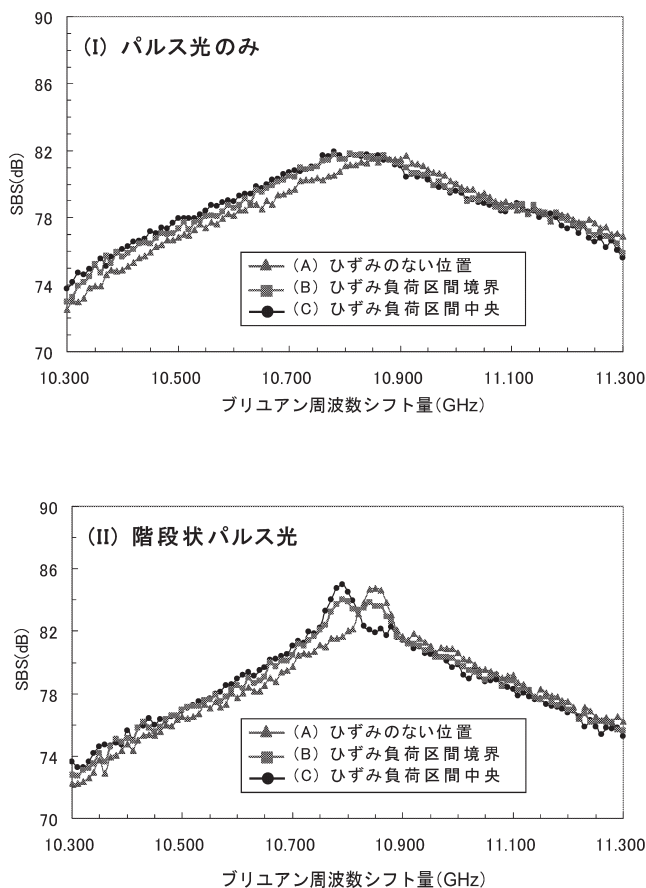


図5 PPP-BOTDA の検証試験の測定結果。

(1) システムの基本構成は BOTDA と同じである。したがって、ブリュアン周波数帯域幅が検出器の受信帯域に影響されない、ファイバー構成がループでなければならない、ダイナミックレンジが測定距離に応じて悪くなる、といった BOTDA の長短所をそのまま引き継いでいる。

(2) フォノンを十分に励起させるために、パルス状のポンプ光に先行して、適当な幅のプリポンプ光をファイ

バーに入射させる。これにより、ひずみ測定精度に大きく影響する BGS の線幅の広がりを抑えることができる。

(3) ポンプ光とプリポンプ光とのパワー比を適当に設定することにより、ポンプ光以外の不要な出力を抑えることができる。その結果、パルス状のポンプ光内部だけのひずみ情報を取り出すことができる。すなわち、高空間分解能 0.1 m が実現できる。

図4に示す試験系を用いて、PPP-BOTDA の原理の検証を行った。ポンプ光として、(I) $D=1$ ns の短いパルスのみ、(II) パルス・プリポンプ光とよばれる $D_{pre}=13$ ns の長いパルスと (I) と同じ $D=1$ ns の短いパルスをつないで階段状としたパルスを用いた。(II) のポンプ光が PPP-BOTDA に用いられるものである。

検証試験は、図4中の位置 A, B, C で BGS を測定することで行った。位置 A はその近傍も含めてひずみのない位置であり、位置 B と C は幅 200 mm のひずみ負荷区間のそれぞれ境界と中央の位置に当たる。

図5 (I) は、ポンプ光として短いパルスを用いた場合の BGS を位置 A, B, C で測定した結果である。この場合はフォノンが完全に立ち上がっていないために BGS の帯域幅が 500 MHz 以上に広がってしまう。そのため、ブリュアン周波数のシフト量を精度よく読み取ることは難しい。

一方、(II) の階段状のパルス光を用いた場合は、短いパルスが到着する前に、パルス・プリポンプ光の通過によってフォノンが十分に励起されるため、狭い線幅の BGS が得られる。その線幅はおよそ 80 MHz であるから、容易にブリュアン周波数のシフト量を読み取ることができる。すなわち、高ひずみ測定精度が実現される。なお、位置 B において、BGS に 2 つのピークが現れている。これは、この位置の両側の異なるひずみ量に対応している。

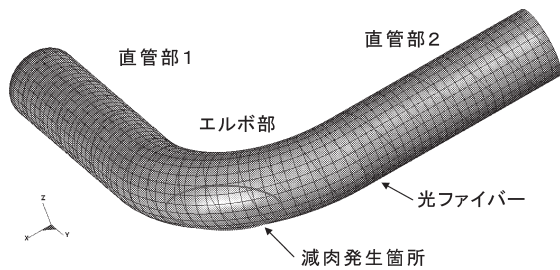


図6 二重らせん状にファイバーを敷設したエルボ配管の解析モデル。

3. 産業プラントの健全性監視

従来のBOTDAの計測技術では、空間分解能が1m程度であるため、その適用が土木分野などの大型構造物に限られてきた。また、この技術がもともと通信分野から発展した技術であるため、計測されるひずみの定量的な評価には十分な注意が払われてこなかった。

これに対し、ニュープレクス社はPPP-BOTDA技術により、空間分解能を10分の1の0.1mにまで高めることに成功するとともに、PPP-BOTDAにより計測されるひずみがファイバーに沿った方向のひずみ成分を移動平均したものであることを明らかにした⁵⁾。これらにより、電力、石油、化学などの産業プラントの健全性監視への道が開かれた。

2004年8月に生じた美浜原発事故では、点検工事中の配管が突然破裂し、噴出した高温の水蒸気により、多くの尊い人命が失われた。破裂した配管の内面には腐食・磨耗により、いわゆる減肉現象が発生し、10mmの配管肉厚は1mm以下まで減少していたといわれている。ニュープレクス社では、配管に光ファイバーを張り巡らし、そのひずみを監視することにより、このような悲惨な事故を事前に防ぐことを目指している。

図6に、発電所配管を模擬したエルボ（屈曲）部をもつ配管に光ファイバーを二重らせん状に敷設した解析モデルを示す。肉厚が減少した箇所には大きなひずみが発生するから、図のように光ファイバーを巻きつけることにより、その場所と大きさから減肉の大きさおよび深さを推定することができる。

実際の産業プラントで用いられている配管では、エルボ背部内面に減肉現象が発生することが知られている。そこで、この位置に配管直径と同程度の大きさの減肉を設けたときに、光ファイバーで計測されるひずみ分布を図6のモデルを用いて計算した。このモデルでは、1本目のファイバーを配管直径と同じピッチ d でらせん状に敷設した後、直管部2の端面で折り返して、同じピッチ d で2本

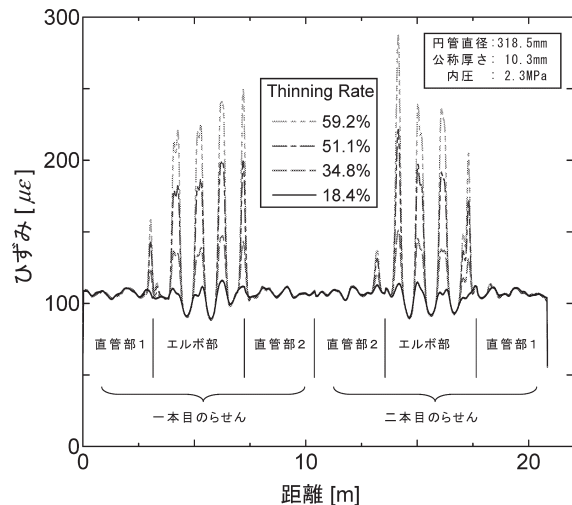


図7 減肉が発生したエルボ配管で計測されるひずみ分布(数値解析による予測値)。

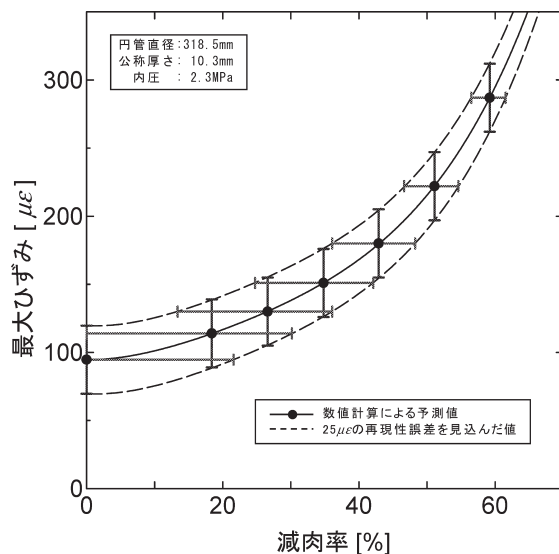


図8 減肉率と計測される最大ひずみとの関係(数値解析による予測値)。

目のファイバーを敷設している。2本のらせん間隔は $d/2$ である。その解析結果を図7に示す。この図より、減肉が存在するエルボ部において、大きなひずみが発生することが確認できる。次に、減肉の深さ（減肉率）と計測される最大ひずみとの関係を図8に示した。図中の点線は測定装置の再現性誤差 $\pm 25 \mu\epsilon$ を見込んだときの結果を示している。この結果から、配管減肉が進めば進むほど、減肉に起因する異常なひずみは急激に増大することがわかる。計測装置の測定再現性を考慮しても、減肉がもとの肉厚の30%程度まで進めば、確実に光ファイバーにより減肉の有無をとらえることができる。

実際の構造物では、異常が発生する場所をあらかじめ知

ることはできない。上記の配管の例では、敷設されたファイバーの近傍で減肉が発生した場合、あるいは減肉の大きさがファイバーの敷設間隔より大きい場合は、減肉を検出することができるが、面積が小さく深い減肉がファイバー間に生じた場合には、これを過小評価してしまう危険性がある。そこで、ニューブレス社では、「計測されたひずみ分布から構造物全体の形状を探る」という逆問題に取り組んでいる。PPP-BOTDA技術によれば数百から数千点のひずみ情報が得られるから、構造物の形状（あるいは、減肉の位置と大きさ）を数個のパラメーターで表現することにより、比較的容易に適切な解を導き出すことが可能である。

ニューブレス社は新しい光ファイバーの応用技術を開発しているベンチャー企業で、世界で初めて、センチメートルオーダーの空間分解能をもつひずみ分布型計測装置“NEUBRESCOPE”の商品化に成功した。すでに電力、石油、航空、土木などの分野で、ひずみ分布計測において実績を上げている。また、この計測技術と逆解析手法とを組み合わせることにより、産業プラントの健全性を監視するシステムの開発にも積極的に取り組んでいる。しかし、

構造物に「人工神経」を与えるという夢を実現するためには、まだ多くの課題が残されている。短期的な成功に満足するのではなく、今後数十年のスパンで技術開発を推し進める必要がある。

文 献

- 1) H. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda: "A technique to measure distributed strain in optical fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **2** (1990) 352-354.
- 2) 岸田欣増, 李 哲賢, 林 縄績, 西口憲一: "パルス・プリポンプ方法を用いた高分解能ブリュアン計測の理論検討", *電子情報通信学会技術研究報告*, **104**, No. 341 (2004) 15-20.
- 3) 李 哲賢, 津田 勉, 岸田欣増: "PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10 cm 分解能ブリュアン分布計測の実現", *電子情報通信学会技術研究報告*, **105**, No. 242 (2004) 1-6.
- 4) 西口憲一, 岸田欣増: "光ファイバにおける漏れ光を考慮した誘導ブリュアン散乱の摂動解析", *電子情報通信学会技術研究報告*, **104**, No. 341 (2004) 9-14.
- 5) K. Kishida, H. Zhang, C.-H. Li, A. Guzik, H. Suzuki and Z. Wu: "Diagnostic of corrosion based thinning in steam pipelines by means of neubrescope high precision optical fiber sensing system," *Structural Health Monitoring 2005, Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, ed. F.-K. Chang (DEStech Publications, Lancaster, 2005) pp. 1363-1370.

(2006年8月21日受理)