ヘテロコア光ファイバ変位センサの試作と精度評価[†]

佐々木 博 幸*・久保田 譲*・渡辺 一 弘*

A Hetero-Core Splice Fiber Optic Displacement Sensor and the Accuracy Evaluation[†]

Hiroyuki SASAKI*, Yuzuru KUBOTA* and Kazuhiro WATANABE*

A displacement sensor has been developed using a hetero-core spliced fiber optic element in a form of simple module structure and evaluated in terms of the accuracy, reproducibility, and sensitivity as a new displacement sensitive detector, for the purpose of the full-scale environmental monitoring. The developed sensor module is designed to be sensitive to a relatively large displacement in the range 0-5mm, for which a simple displacement-macro-bending conversion mechanism in the module produces as the change in the sensor transmission loss ranging from 0 to a few dB. The experiment promisingly showed the sufficient reproducibility for its sensing operation with the accuracy less than 0.1 % to the full span displacement of 5mm. Experiments have been made on the tandem connection of this sensors in a single fiber line, in which accuracy degradation has been elucidated in terms of the reduced S/N ratio for the OTDR measurement brought by tandemly connected sensors in the upstream of a sensor of interest. Discussions are also given on OTDR-based tandem-connection use and on required conditions associated with the averaging time, pulse width, and cursors setting from the practical point of view.

Key Words: hetero-core, fiber optic sensor, OTDR, sensing accuracy, network sensing.

1. はじめに

これまで近代社会では建築された構造物の経年疲労による崩落や、大雨や大規模な地震による崖崩れなどの災害が発生し、人的・精神的・経済的不安を社会にもたらしている。最近では、韓国のショッピングセンター崩落事故による多数の犠牲者が放映されたのは記憶に新しく、日本国内でも新幹線や高速道路のトンネル内のコンクリート崩落なども頻繁に発生している。急傾斜地の変化や大型構造物の損傷度合いを常時モニタリングし、できるだけ早期に危険を察知できることが安全の確保にとって重要な課題となってきた。また、安全確保のための構造物損傷モニタリングは、自然環境、高層ビル、高速道路、トンネル、高架橋などのみならず、大型航空機や大型船舶などにとっても重要であると考えられる。

この目的のためにこれまでに光ファイバ網を利用するいくつかの提案がなされている^{1),2)}。いうまでもなく一般に光ファイバは耐電磁誘導性に強く、センサへの電力供給を必要とせず、また軽量で耐腐食性に優れている。これを線路とした光ファイバ網がセンサとして機能し、光ファイバ線路上の多点もしくは分布情報を遠隔的に収集できれば、これま

での電気方式の問題点を大幅に改善できるからである。従来利用されてきた電氣的センサ群は、電力消費、金属腐食、ケーブル数の増大化などの問題があり、可能ならば光ファイバ網センサへの置き換えが望まれている。

光ファイバ自体がセンサ機能として働くセンサとしては、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)³⁾やFBG (Fiber Bragg Grating)、マイクロベンド⁴⁾、ラマン式温度分布センサ^{5),6)}などの研究がされている。いずれの方式も一長一短あり、精度、測定範囲、施工条件、価格などの実用的観点から電気方式の置き換えを喚起するまでにはいまだ少し時間がかかるといえる⁷⁾。たとえば BOTDR は高精度に線路に与えられた歪みを分布情報として計測するが、波長シフトを計測する必要から計測システムが高価になりがちである。また、ファイバ線路全体に歪みによる張力を伝えるために、ファイバ線路全体をいかにして被測定構造物に固着するかについても工夫を必要としている。また、FBG は微小変化に鋭敏に反応するが、大きな変位に対し破断の不安を内在している。さらに、両者は検出原理自体に温度依存を有し温度補正の必要性がある。ラマン散乱法は線路自体の温度分布情報をとれる唯一の方法であり一部実用化されているが、温度情報のみのセンサである。マイクロベンド方式⁸⁾は最も簡便であるが、極度にファイバを屈曲することが多く再現性と破断に困難さを残している。簡便であることからオン・オフ情報検知の光ファイバ式水門ゲート開閉センサシステムとして利用されている。

[†] SICE 2002 産業応用部門大会で発表 (2002・11)

* 創価大学工学部 東京都八王子市丹木町 1-236

* Faculty of Engineering, Soka University, 1-236, Tangi, Hachioji

(Received October 28, 2003)

(Revised June 8, 2004)

これらの研究に加えて、これまでに筆者らはヘテロコア型光ファイバセンサを開発してきた^{9)~11)}。ヘテロコア型光ファイバセンサでは、伸張・圧縮の変位をヘテロコア部の緩やかな曲げに変換させ、そのときに生じる変位の変化を測定する。緩やかな曲率で伝送損失が変化するため破断の心配は大きく軽減され、比較的大きな変位をカバーでき、レーリ散乱を測定しているため温度依存性はほとんど考えなくても良い。また、センサの損失範囲を適切に設計すれば、光ファイバ1ライン上にタンデムに複数配置が可能であり、従来の電気的センサの膨大な配線を軽減することができる。

実用的な光ファイバシステムとして応用するためには、光ファイバ1ライン上にタンデムに接続することが予想される。その際、センサ線路後段になるほど、前段センサの挿入損失、変位損失により OTDR 計測が光強度の低い範囲で行なわれるため、測定精度の低下が生じる。市販の OTDR の使用目的は必ずしも本研究の使用目的を想定したものではない。したがって、光強度の低いすなわち、S/N 比の低下した条件下でのデータの再現性・精度の設定パラメータに対する依存性に関しては定量的には明らかではない。本研究ではこれらを踏まえ、ヘテロコア部挿入長の感度特性への影響、単独センサとしての精度、再現性、ヒステリシス評価に加え、複数タンデム接続環境下における精度評価を初めて実験的に明らかにしている。OTDR の計測設定パラメータである、平均化回数、パルス幅、カーソル測定点の設定が測定精度に与える影響についても検討し、簡便な変位曲率変換機構で比較的高い精度と再現性を実現できることを明らかにした。

2. 実験および精度評価法

2.1 ヘテロコア部とマクロベンディング特性

ヘテロコア型光ファイバセンサの動作原理および変位計・液体検知への応用については、文献^{9)~11)}に報告されているが、ここでは実用化の観点から重要となるマクロベンディング特性の特徴について概要を述べる。Fig. 1 (A) はヘテロコア型光ファイバセンサ部の構造を示す。ヘテロコア型光ファイバセンサは、光を伝送する伝送部と、その途中に設けられたヘテロコア部から構成したもので、光伝送路である光ファイバ線路の任意の位置に、伝送路のコア径と異なったコア径の光ファイバを数 mm から数 cm 融着によって挿入したものである。本研究で用いたヘテロコア型光ファイバセンサは、コア径が $9\mu\text{m}$ の光伝送用シングルモードファイバに、コア径が $5\mu\text{m}$ のファイバを挿入融着したもの（以後 9-5-9 型と呼ぶ）である。 $9\mu\text{m}$ の伝送部を伝播する光が中心のヘテロコア部を通過すると僅かに損失を受けるが、ヘテロコア部の挿入長が数 mm 程度でかつ $5\mu\text{m}$ 程度のコア径である場合、シングルモード伝播はあまり崩されることはなく、後段の光伝送路に伝播していく。挿入長が長くなると曲げに対する損失変化が増加する。コア径が $3\mu\text{m}$ の場合はクラッドに漏れる光の量が大幅に増えるため、曲げに対する損失変化はかなり鋭敏になる⁹⁾。

Fig. 1 A structure of hetero-core sensor and a displacement sensor unit

これまでの研究^{9),10)}では、融着装置の機構上挿入長の限界が 5mm であったが、本研究では融着方式の改善によって最短の限界を 1mm 程度と短くすることが可能となり、製作可能な挿入長は約 1mm から数十 mm となった。光ファイバ切断用クリーバの精度のため、挿入融着する長さに歩留まりが多少あるため、正確なヘテロコア部の挿入長は作成後に測定誤差が 0.1mm の顕微鏡を使い測定している。ヘテロコア部の製作には放電加熱型融着接続機 (Fujikura FSM-40F) を使用している。この融着機ではファイバ融着時の位置合わせに必要な 2 つの軸の位置調整を、それぞれ別の CCD カメラを使って自動で行なっており、これにより、ヘテロコア部製作時の融着接続損失およびその歩留まりを低減することができた。また、曲げ付与時の損失変化を低減でき、タンデム接続を想定した場合の接続可能な接続センサ群個数を増やすことが可能となる。すなわち、これにより OTDR を用いたネットワークセンシングにおけるタンデム接続に適した性能を得ることが可能となった。さらに実用的観点からは、マクロな曲げによるヘテロコア部およびその近傍の光ファイバの変形と、その結果生じる損失の変化が直線的であり再現性があることが望まれる。これまでに行なった一連の実験では、光ファイバセンサ部を含む数 cm の区間の両端を固定し、かつ被測定対象の直線の変位を適度な曲げに変換する比較的小さい曲げ変換機構を用いれば、外的変位を鋭敏かつ再現性

Fig. 2 A schematic drawing of experiment setup

良く損失変化に反映できることが明らかになってきている。本研究のマクロベンディングとは、曲げ付与時でヘテロコア部近傍の近似的曲率半径にして約 15mm 程度の場合をいう。実験では、タンデム接続性を前提に挿入長を 1~2mm の範囲で用い、計測変位範囲を最大 5mm に設定して、精度、再現性、感度の実用的精度評価を行なうことを目的とした。

2.2 変位曲率変換機構

本研究で試作した、変位量を光ファイバの曲げに変換する変位曲率変換機構を有する変位センサモジュールを Fig. 1 (B) に示す。ヘテロコア部を含む光ファイバをファイバクランパで 2 箇所固定し、その初期間隔を d_0 とする。一方のファイバクランパに変位量 Δd を与えると、ヘテロコア部を含む光ファイバには曲率半径 Δr が加えられる。この変換機構では、初期間隔 d_0 と変位量 Δd を適当に選ぶことにより、変化させるべき曲率半径 Δr をある程度任意に調整することができる。たとえば d_0 を大きくすると同じ Δd に対して Δr の変化が少なくなる。この場合、変位量に対するヘテロコア部の損失変化は小さくなる。このような変換機構を設けて伸び、縮み、曲げなどをヘテロコア部における損失変化として計測することができる。

本研究で試作した変位センサモジュールは、長さ 140mm、幅 40mm、厚さ 10mm、重さ 130g のアルミニウム製容器で、内部に光ファイバクランパ、バネ機構からなる変位曲率変換機構を有した比較的簡単な構造となっている。試作した変位センサモジュールは、計測許容範囲：0~5mm、0mm のときのヘテロコア部のみの標準的挿入損失は 0.3dB、ファイバクランパの初期間隔は 35mm、最大変位 5mm のときの最大損失は約 2~4dB と設定した。挿入損失の歩留まりは ± 0.1 dB 程度であり、この程度の歩留まりであれば損失特性にはほとんど影響はない。

2.3 計測システムと計測法

9-5-9 型ヘテロコアセンサを用いた変位センサモジュールの精度を計測するための実験装置の概念図を Fig. 2 に示す。実験装置は、変位センサモジュールに変位量を与えるための可動ステージとステージコントローラ、OTDR (ANDO

AQ7250/AQ7254A)、計測用パーソナルコンピュータ (PC) から構成されている。可動ステージはステージコントローラによって、PC から GPIB を介して 0.5 μ m 間隔で駆動可能であるが、一方向からの繰返し位置決め精度は 2 μ m で、バックラッシュは無負荷時で 5 μ m である。可動ステージと固定台は台座に固定されており、変位センサモジュールは可動ステージと固定台に固定されている。可動ステージが固定ステージから遠ざかるように動くことによって、変位センサモジュールに直線的な変位が生じる。変位センサモジュールの前後には、500m ずつの光伝送路用シングルモードファイバを SC コネクタによって接続している。光伝送路用シングルモードファイバの一方は OTDR に接続し、他方は開放されている。さらに必要に応じて、ヘテロコア型光ファイバセンサをタンデムに接続した場合を想定し、可変光減衰器を OTDR と変位センサモジュールの間に設置した。本実験では、可動ステージを稼働させ、コネクタ損失を含む変位センサモジュールの損失量を測定した。使用した SC コネクタの接続損失は前後 2 つでおよそ 0.3dB である。したがって、ヘテロコア部の挿入損失と合わせて、無変位時でおよそ 0.6dB となる。

単一の変位センサモジュールの実験では、OTDR の光源波長は 1.31 μ m、パルス幅は 100ns、平均化回数は 2^{15} 回、カーソル計測点間隔は 400m として計測を行なった。また、タンデム接続の実験ではパルス幅、平均化回数、カーソル計測点間隔を変化させた。ヘテロコア部の損失を OTDR で計測すると、コネクタ部分でフレネル反射が生じるが、フレネル反射部前後をヘテロコア部前後の光伝送路の損失差として計測した。OTDR は、複数のカーソル測定点を使って損失量の計測を行なうため、本実験では 4 点による近似法 (4 つのカーソル測定点を設定し、センサ前後の最小二乗近似直線の差を損失量とする測定法) を用いて計測を行なった。4 点法による損失計測は、2 点間の差分を計測する 2 点法よりも測定精度は良く、高精度な測定を可能としている。

3. 実験結果と検討

3.1 ヘテロコア部挿入長に対する単独センサ特性

ヘテロコア部の挿入長が、センサの特性にどのように影響を及ぼすか明らかにするために、各挿入長において変位量と損失の関係を計測した。

Fig. 3 は、ヘテロコア部の各挿入長における、変位量に対する損失の変化を示している。ここでは、変位量 0mm の初期損失であるヘテロコア部の挿入損失と SC コネクタ (2 個) の接続損失を除いて、ヘテロコアセンサの曲げによる損失のみを示している。本実験で製作したヘテロコア部の挿入長は、実測で 1.1, 1.3, 1.5, 1.7mm の 4 種類である。いずれの挿入長においても損失量は変位に対してほぼ単調に増加している。特に、挿入長 1.1mm と 1.3mm の場合は、損失がより直線的に増加していることがわかる。最大変位量 5mm のとき、最大損失量約 2.5dB を示した。挿入長が長く

Fig. 3 Variations of insertion loss as a function of displacement for 1.1, 1.3, 1.5, 1.7mm of hetero-core length

Fig. 4 Variations of standard deviation σ as a function of displacement at a 1.3-mm insertion length

なるに従い、この最大損失量は増加して挿入長 1.7mm のセンサでは、約 4.2dB に達した。これは、ヘテロコア部の長さによってヘテロコア部における光の漏れの度合いが大きくなることを意味している。ヒステリシス、測定誤差などの実験データのバラツキは図中のプロットサイズ以下に収まっている。Fig. 3 の特性は必ずしも完全な直線性を示すものではないが、損失から変位を読みこむことは十分に可能といえ、ヘテロコア部両端のクランプ方式、ファイバクランプの初期間隔などの調整によりさらなる最適化が可能であると考えられる。

3.2 変位センサモジュールの精度

前述の特性がセンサとして生かされるために必要な要件として、特性曲線の繰り返しの再現性または精度がある。本実験では、変位センサモジュールを変位量 0mm から最大変位量の 5mm の間で代表計測点を 1mm 間隔で選び、変位損失を往復 5 回計測し、各変位量に対応する損失値の標準偏差 σ を導き出した。計測に際しては、可動ステージのヒステリシスおよび繰り返し位置決め精度に起因する若干のヒステリシス特性が生じた。計測する変位量を 0mm から 5mm への増加時と、5mm から 0mm への減少時、それぞれ別データとして標準偏差を導き出した。Fig. 4 に挿入長 1.3mm における増加時と減少時の別個の標準偏差 σ_1 , σ_2 および合わせた標準偏差 σ_3 を示している。行きと帰りの σ_1 と σ_2 の値は、0.003dB 近傍にあり、また σ_3 は 0.01dB 近傍にあ

Table 1 σ_{all} and %FS in each insertion length

Insertion length (mm)	standard deviation (%FS)	measurement error (%FS)
1.1	0.0031	0.17
1.3	0.0027	0.10
1.5	0.0028	0.08
1.7	0.0026	0.06

る。別個に見た σ_1 , σ_2 の値は用いた OTDR の計測最小精度 (0.001dB) 近傍に達している。また、 σ_3 は可動ステージのバックラッシュによるヒステリシスや位置決め精度程度にあることがわかる。ヘテロコア挿入長 1.3mm 以外の変位量に対する標準偏差依存もほとんど同様の傾向を示したので、各変位量における σ_1 と σ_2 の平均を、全体の標準偏差 σ_{all} として定義する。また、最大変位量に対する変位センサモジュールの測定誤差をつぎのように定義した。すなわち測定誤差 %FS は、

$$\%FS = \frac{\sigma_{all}}{l_{max} - l_{min}} \cdot 100 \quad [\%]$$

である。このとき、 l_{max} は最大変位量における損失の平均値で、 l_{min} は変位量 0mm における損失の平均値である。すなわち、ここではこの測定誤差 %FS をフルスケールに対する計測の再現性の指標としている。単位変位量に対する損失の増加量、すなわちセンサ感度は傾斜が大きく、最大変位量における損失値が大きいほど高くなるので、本実験ではヘテロコア部の挿入長が長いほど感度を高めることができる。この場合、それに従い最大損失量が大きいほど %FS の値は減少する。しかしながら後に述べるように、あまり最大損失量を高めて感度を高くすると、1つのラインにタンデムに敷設できるセンサの数は制限されることになる。

実験を行なった各ヘテロコア部の挿入長における標準偏差 (σ_{all}) と測定誤差 (%FS) を Table 1 に示す。標準偏差 σ_{all} は、ヘテロコア部の挿入長にかかわらず、ほぼ一定値の 0.003dB となっている。その上で精度として定義した測定誤差 (%FS) は挿入長が長くなるにつれて小さくなり、挿入長 1.5mm と 1.7mm のときには 0.1% 未満となった。すなわち、本研究で試作した変位センサモジュールの最大変位量 (ダイナミックレンジ) は 5mm であるため、変位にして 5 μ m 未満に相当する。

変位センサモジュールのファイバを固定している初期間隔 d_0 と変位量 Δd を適当に選ぶことによって、さまざまな変位量に対応できるセンサモジュールが可能であり、初期間隔を縮めることによって、さらなるセンサモジュールの高精度化も可能であると考えられる。

本実験では、測定時の周囲温度はほぼ 20°C 前後で、特に温度制御は行っていない。先に述べたように、ヘテロコア型光ファイバセンサではレーリ散乱を計測するので温度依存性はほとんどない。この点は FBG, BOTDR と異なり光ファイバ自体の温度依存を補正する必要がなく大きな利点であるが、変位曲率変換機構自体の温度変化がセンサ部に

与える影響は当然ありうる。試作した変位センサモジュールの場合クランプの初期間隔が35mmであるため、 1°C 当たり $0.8\mu\text{m}$ 程度の直線変位量への依存性が考えられるが、本実験の測定変位誤差に比べ十分に小さい値といえる。

4. タンDEM接続特性

ヘテロコア光ファイバセンサの複数タンDEM接続における計測精度について述べる。実用的観点から、OTDR を利用しているヘテロコア光ファイバセンサは、光ファイバ1ライン上にタンDEM接続することによって、計測システムの低コスト化、効率化が可能である。さらに、OTDR は1回の計測で1ラインすべてのセンサを同時に測定することから、計測にかかる時間も単独センサの場合とほとんど変わらない。OTDR ではレイリー散乱という非常に微弱な信号を検出するため、加算平均を取りS/Nを改善することによって測定精度を向上させている。したがって、平均化回数の増加は精度の向上につながるが、同時に計測時間も長くなる。また、パルス幅が長いほど後方散乱光総量が大きいのでS/Nは改善されるが、同時に距離分解能は低下する。フレネル反射部の測定不能部(デッドゾーン)は距離分解能で決まるため、デッドゾーンを回避し適切なカーソル設置をするためには変位センサモジュール後には適当な長さのファイバが必要となる。また、OTDR ではカーソル間にある全データの近似直線の傾きを利用しているためカーソル間隔を広くとることはデータ個数の増加につながり、等価的に近似直線算出の確度が高くなる。これらのパラメータは計測する光ファイバ線路長や計測時間の制限によって選択することになるが、ここではセンサがタンDEM接続された場合、これらの計測パラメータが後段センサの計測精度に与える影響について検討を行なった。

本実験では、光ファイバ1ライン上の前段に可変光減衰器、後段にヘテロコア部の挿入長が1.1mmの変位センサモジュールを接続し、前段の光減衰量を2~12dBまで2dB間隔で変化させ、後段の変位センサモジュールの測定誤差を%FSとして計測した。つまり前段で与えた減衰は、前段に複数のセンサモジュールが損失を伴ってタンDEMに接続されていることを想定している。実際にコネクタを用いたタンDEM接続によって減衰を与えた場合には、複数個のSCコネクタを含めることとなる。コネクタ接続の経時的変化、突発的機械振動などが測定の再現性・精度などに影響を及ぼす場合がありうる。この場合は融着接続が不可欠となるであろう。各計測パラメータにおける測定誤差の結果を示すFig.5~7のグラフでは、計測値をプロットし $y = a + e^{bx}$ の近似曲線で示した。

Fig.5は、パルス幅100ns、カーソル測定点間隔100mに設定し、OTDRの測定パラメータの平均化回数を 2^{14} 回、 2^{15} 回、 2^{16} 回とした場合の測定誤差(%FS)を示している。どの平均化回数の場合も前段の光減衰量が増加するにしたがい%FSが増加し、測定精度が低下していることが

Fig. 5 Variations of %FS as a function of attenuation level for averaging times of 2^{14} , 2^{15} , and 2^{16}

Fig. 6 Variations of %FS as a function of attenuation level for pulse widths of 100, 200, and 500ns

Fig. 7 Variations of %FS as a function of attenuation level for cursor intervals of 100, 200, 300, and 400m

わかる。また、グラフには示していないが 2^{17} 回の場合は 2^{15} 回の結果とほぼ同じプロット、近似式になった。すなわち、本実験では平均化回数が 2^{15} 程度であれば十分であり、これ以上の増加はただ単に計測時間の増大につながってしまうことを示している。計測時間は平均化回数にはほぼ比例し、 2^{15} における計測時間は約30秒であった。

つぎにOTDRの測定パルス幅を変えたときの変位センサモジュールの測定誤差(%FS)の変化をFig.6に示す。この場合、平均化回数を 2^{15} 回、カーソル測定点間隔を100mとした。本実験では、100nsと200nsおよび500nsのパルス幅で計測を行なった。光減衰量8dB以下ではどの場合でもそれほど大きな差はないが、10dB以上の光減衰量では、

パルス幅が増えることによってS/Nが向上することにより測定精度が向上していることがわかる。しかし、実用上からはパルス幅は測定距離の最小分解能にかかわるため、パルス幅 500ns では約 100m の分解能となり、センサ前後に少なくとも数百 m の伝送用光ファイバが必要となる。本実験で使用した OTDR はパルス幅 10ns と 20ns という設定も可能であるが、その場合数 dB の光減衰量においてでさえ測定精度が低下し、計測ができなかった。

Fig. 7 は、OTDR のカーソル測定点間隔と変位センサモジュールの測定誤差 (%FS) を示している。本実験で設定したカーソル測定点間隔は、100m, 200m, 300m, 400m である。実験結果からもわかるように、100m に比べて 200m 以上のカーソル測定点間隔では測定精度が向上し、光減衰量が 12dB のときでも、測定誤差は 2% 程度であった。また、200m 以上のカーソル測定点間隔ではほぼ同じ結果となり、大きな計測精度の改善は見られなかった。このように前段にタンデム接続されたセンサモジュールによる光減衰があったとしても、カーソル測定点間隔を広く取ることによって測定精度の低下をある程度抑制できることが明らかになった。このヘテロコア光ファイバセンサを 5 個タンデムに接続する場合を考える。ヘテロコア部の挿入長が 1.1mm のヘテロコア光ファイバセンサは、コネクタ接続損失や挿入損失を含み、最大変位時の損失が約 3dB となるので、1 から 4 番目のセンサによる合計損失は最大で 12dB となる。Fig. 7 中の % 数値はカーソル測定点間隔 200m の場合の測定誤差 %FS を示している。これらの数値は、3 段目のセンサでは 0.4%、5 段目のセンサでは 2.4% の測定誤差を与えることを示している。このように、OTDR 計測のタンデム接続では光強度の低下による S/N 比の問題から、後段のセンサの測定精度が低下するのは避けられないが、本研究が明らかにしたように、精度の低下を既知として用いれば、実用化する上では利用の仕方が考えられる。精度の高い測定を要求する場合は、光スイッチを併用して単独で設置するか、また、タンデムの初段、2 段の前段で用いることが必要とされる。

5. ま と め

これまで述べてきたように、9-5-9 型ヘテロコア光ファイバセンサを使った変位センサモジュールは、簡便な変位曲率変換機構で比較的高い精度と再現性を示し、比較的大きな変位量の環境モニタリングに十分な精度で計測できるセンサであることを示した。簡便な変位曲率変換機構を有する変位センサモジュールを試作し、ヘテロコア部挿入長の感度特性への影響、単独センサとしての精度、再現性、ヒステリシス評価を行なった。感度はヘテロコア部挿入長が 1mm~2mm の範囲では挿入長と比例し増える傾向にあった。また単独センサで繰り返し計測時の標準偏差には可動ステージのバックラッシュによる若干のヒステリシスがみられ、ヒステリシスを含まない場合の標準偏差は OTDR の計測最小精度近傍に達していることが明らかになった。その標準偏差は

ヘテロコア部の挿入長によらずほぼ一定であり、センサ感度が高くなれば測定誤差 (%FS) は小さくなることが示された。測定誤差は挿入長が 1.5mm, 1.7mm の場合、最大変位量 5mm に対して 0.1% 以下、すなわち変位量にして 5 μ m 以下であった。

また、タンデム接続環境下における精度評価を行なった。タンデム接続時には、後段のヘテロコア型光ファイバセンサの計測精度は、前段センサなどの光減衰によって低下する。OTDR の計測パラメータである平均化回数、パルス幅、カーソル測定点間隔が測定精度に与える影響について検討を行ない、平均化回数を 2¹⁵ 回、パルス幅を 100ns、カーソル測定点間隔を 200m とした場合、前段に 8dB の光減衰があった場合で測定誤差は 0.5% 程度、12dB の場合でも 2.4% 程度であった。この結果は、最大変位時に 3dB の最大損失のセンサモジュールを使用する場合、タンデムに 3 個のセンサを接続しすべてのセンサが約 1% 以内の精度で計測できることに相当する。システム全体の性能は、変位センサモジュール自体の性能と OTDR の性能を合わせたものと考えてよい。本研究で試作した変位センサモジュールの精度が高いため、結果的には OTDR の性能が支配的になっているとも考えられるが、設定パラメータの精度の対する定量的評価はモニタリングシステムの設計上有益な指針となると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、TAMA-TLO (株) 関係諸氏の協力を賜り、関東経済産業局平成 13 年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の一環として行なわれました。また、横河電子機器 (株) の山本眞人氏、上野光司氏、浅宮政則氏、創価大学大学院工学研究科の石田充氏には多大な協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高橋 淳: 光ファイバによる構造体の損傷モニタリング, OPTRONICS, No.12, 157/161 (1996)
- 2) 朝日新聞: 光ファイバ網で防災, 平成 9 年 10 月 5 日付け
- 3) 嶋倉, 成瀬, 増田: 光ファイバみずみ測定技術と構造物みずみ分布測定への応用, OPTRONICS, No.6, 119/127 (1998)
- 4) 小島, 杉政, 菅原: マクロベンド型光ファイバ監視網の特長, Proceedings of 3rd Meeting on Lightwave sensing Technology, LST 3-23, 157/162 (1989)
- 5) 小川, 小沢, 川神, 筒井, 山本: 光ファイバ分布型温度センサの開発, Proceedings of 3rd Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST 3-21, 141/147 (1989)
- 6) 坂東, 井川, 妹尾, 田辺: 光ファイバ中のラマン散乱による温度計測と分布型温度センサーシステム, Proceedings of 3rd Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST 3-22, 149/155 (1989)
- 7) 渡辺, 伊賀, 関: 環境保全検査における光ファイバセンサの実用性, 検査技術, 7-6, 9/16 (2002)
- 8) 根本, 岡本, 上杉, 藤岡: 光ファイバ式みずみゲージ及びみずみ測定システム, 日本特許庁, 特開平 11-287626
- 9) 渡辺, 松原, 久保田: OTDR を用いたヘテロコア型光ファイバセンサ, 計測自動制御学会論文集, 35-1, 32/37 (1999)
- 10) Kazuhiro WATANABE, Kaori TAJIMA and Yuzuru KUBOTA: Macrobending Characteristics of a Hetero-Core Splice Fiber Optic Sensor for Displacement and Liquid De-

tection, IEICE trans. Electron., **E83-C-3** (2000)

- 11) Mitsuhiro IGA, Atsushi SEKI, Yuzuru KUBOTA and Kazuhiro WATANABE: Acidity Measurements based on a Hetero-Core Structured Fiber Optic Sensor, Sensors and Actuators B Chemical (2003, in publication)

=====

[著者紹介]

佐々木 博 幸 (学生会員)

2000年創価大学工学部情報システム学科卒業。現在、同大学院工学研究科情報システム学専攻博士後期課程在学中。応用物理学会の会員。光ファイバセンサの研究に従事。

久保田 譲 (正会員)

1963年室蘭工業大学工学部機械工学科卒業。68年北大大学院工学研究科精密工学専攻博士課程単位取得退学、同年室蘭工業大学講師。現在、創価大学工学部情報システム工学科教授。制御、ロボット挙動などの研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。(工学博士)

渡 辺 一 弘 (正会員)

1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。81年同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、創価大学工学部教授、同学部情報システム工学科長。レーザの光情報装置への応用、光ファイバセンサ、自律移動ロボットの自己位置認識システムなどの研究に従事。電気学会、日本ロボット学会、応用物理学会、可視化情報学会などの会員。(工学博士)

=====