# 構造物損傷・環境モニタリング用 ヘテロコア型光ファイバセンサの実用化に関する研究 Studies of Hetero-core spliced optical fiber sensor for structural damage and environment monitoring systems

02D5101 佐々木博幸 指導教員 渡辺一弘 教授

# SYNOPSIS

A multi-purpose environmental monitoring system has been developed on a commercial base standard using hetero-core spliced fiber optic sensor technology, aiming at preserving natural environment and large scaled structures. A developed displacement sensor module is designed to be sensitive to a relatively large displacement in the range 0-5 mm, for which a simple displacement-macrobending conversion mechanism in the module produces as the change in the sensor transmission loss ranging from 0 to a few dB. The sensor module showed the sufficient reproducibility for its sensing operation with the accuracy less then 0.1 % to the full span displacement of 5 mm. Discussions are also given on OTDR-based tandem-connection use and on required conditions associated with the averaging time, pulse width, and cursors settings from the practical point of view. The monitoring system has been tested and evaluated in an actual environmental condition on the premise of the full scaled usage. The measurement error typically obtained as +/- 10  $\mu$ m has been found to be influenced by the temperature change at the optical connectors. The use of splicing instead of connectors reduced the error down to +/- 2  $\mu$ m. The experiment of pseudo-cracking was successfully made with showing given correct crack situations based on geometrical calculation by using the measurement results of displacement sensor modules. Additionally, the whole system provides us with various options of sensor modules intended for monitoring physical values such as displacement, distortion, pressure, binary states, and liquid existence. The attractive features of various monitoring with a single system are described from the viewpoint of practical use. **Keywords:** Hetero-Core, Fiber Optic Sensor, OTDR, Sensing Accuracy, environmental monitoring system

## 1. 序論

建築物や構造物などの経年疲労による崩壊や崩落、または 大規模な地震や大雨などによる土砂崩れなどの前兆をいかに 早期に検知し発見するかという環境モニタリングは、われわ れの生活保全の重要問題として取りざたされている.しかし, 電気式センサが期間限定的に建設現場周辺などの環境モニタ リング使われているものの、数年または数十年にわたる長期 間となると金属腐食等による寿命や電力消費のために積極的 な利用はされていない.いうまでもなく光ファイバは電線に 比べて耐電磁誘導性、耐腐食性に優れ、軽量かつ信号劣化が 小さく、漏電等による発火の心配もないなどの利点がある. また光ファイバ線路自体がセンサ網として機能すれば、遠隔 かつ多点・分布計測が可能であり、センサへの電源が必要な いためケーブル数の節約や省電力への貢献も考えられる.こ のように環境モニタリングのような広範囲にわたるセンシン グ網には、電気的センサの欠点を大きく改善できる事から光 ファイバセンサへの置き換えが望まれている 1),2).

光ファイバセンサとして,BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)<sup>3)</sup>やFBG(Fiber Bragg Grating),マイクロベンド<sup>4)-6)</sup>,光干渉型センサ<sup>6)</sup>,ラマン式温度分布センサ<sup>7),8)</sup>などが研究されている.いずれの方式も光ファイバセンサ自体の実環境下での信頼性,頑健性,計測システムとしての総合的コストおよび総合的性能などの観点から環境モニタリングのための将来技術として確たる解答となりえないでいる.

こういった中,本論文では本研究室で発明したヘテロコア 型光ファイバセンサ<sup>9-11)</sup>単独のヘテロコア部挿入長の感度へ の依存性,精度,再現性,ヒステリシス評価,タンデム接続 環境下の精度評価の検討を行い<sup>12)</sup>,更に各種環境情報を1シ ステムでモニタリングする光ネットワーク型マルチ環境モニ タリングシステムの製品モデルを開発し,実環境下での使用 を前提に総合的性能を評価した.

本論文は、5章から構成されている.第1章は序論であり、 第2章と第4章は本論であり、第5章は結論である.第1章 では、研究の背景及び従来の光ファイバセンサついて述べて いる.第2章はヘテロコア型光ファイバセンサの原理と現状 等について述べている.第3章では、変位をヘテロコア部の 曲げへ変換する比較的簡便な変位曲率変換機構を有する標準

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 シスの評価をおこない、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.また,OTDR 計測の特徴で あるタンデム接続環境下における精度について明らかにして いる. 第4章では、実用的なマルチ環境モニタリングシステ ムを構築し、一般的な使用条件下において精度、施工条件、 価格、計測範囲などの評価をおこない、環境モニタリングに 十分な計測システムであることを示した.また、マルチ環境 モニタリングシステムのための歪センサモジュール、圧力セ ンサモジュール、液体検知センサモジュールの試作と評価を おこなった. 第5章は結論であり、本研究の知見からヘテロ コア型光ファイバセンサを使ったマルチ環境モニタリングシ ステムは、総合的コストや総合的性能の観点から環境モニタ リングシステムの技術として確たる解答の一つであることが 示された.

#### 2. ヘテロコア型光ファイバセンサ

Fig.1 にヘテロコア型光ファイバセンサの構造を示す. 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.このヘテロコア部では伝播してきた 光の一部がクラッドヘリークするため損失が生じるが,その 損失量はヘテロコア部のマクロな曲げによって鋭敏に変化す



Fig.1 A structure of hetero-core sensor



Fig.2 A structure of displacement sensor module

る. 伝送路にコア径 9µm の SMF と, ヘテロコア部にコア径 5µm, 挿入長 1~2mm 程度の SMF を使う 9-5-9 型ヘテロコア センサの場合, シングルモード伝播はあまり崩される事はな く,後段の光伝送路に伝播していく.

ヘテロコア型光ファイバセンサを使った液体検知は、ヘテ ロコア部に金属薄膜を蒸着させることによってクラッド内へ のリーク光と外界を作用させる表面プラズモン共鳴 SPR(Surface Plasmon Resonance)の原理を利用し、ヘテロコア 部に付着する液体の屈折率を計測することができる.このセ ンサは、コア径 50µmの MMF を伝送路とし、ヘテロコア部 にコア径 3µmの SMFを使う 50-3-50型ヘテロコアセンサで、 白色光源とスペクトルアナライザを使った実験では高精度な 屈折率の検知を実現している<sup>13)-15</sup>.本研究では、液体の付着 で生じる光損失を波長 850nm の OTDR を使い計測すること によって、液体検知機能を実現している.

# 3. 標準変位センサモジュールの試作と精度評価

#### 3.1 標準変位センサモジュール

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標準変位センサモジュールの概観 を Fig.2 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<sub>0</sub>とする. 一方の ファイバクランパに直線的な変位量Ad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Arが加えられる. この変 換機構では、初期間隔 d<sub>0</sub>と変位量Ad を適当に選ぶことによ り、変化させるべき曲率半径Ar をある程度任意に調整するこ とができる. 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.標準変位センサモジュールは、長さ140mm、幅40mm、



Fig.3 Variations of insertion loss as a function of displacement for 1.1, 1.3, 1,5, 1.7 mm of hetero-core length

厚さ10mm,重さ130gのアルミニウム製容器で,内部に光フ アイバクランパ,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.試作した標準変位センサ モジュールは,計測許容範囲は 0~5mm,0mm のときの標準 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.

## 3.2 ヘテロコア部挿入長に対する単独センサ特性

Fig.3 はヘテロコア部の挿入長が 1.1mm, 1.3mm, 1.5mm, 1.7mm の場合における変位量と損失の関係を示している. 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,製作したセン サ部の損失のみを示している. 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,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 長くなるに従い,この最大損失量は増加して挿入長 1.7mm で は、約 4.2dB に達した. これは,挿入長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. 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込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,ファイバクランパの初期間隔 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.

### 3.3 標準変位センサモジュールの精度

損失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、標準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 $\sigma$ を導き出した.計測する変位量を 0mm から 5mm への増加時と、5mm から 0mm への減少時と、それぞれ別データとした場合の標準偏差( $\sigma_{woh}$ )は 0.003dB 近傍であり、合わせた標準偏差( $\sigma_{woh}$ )は 0.01dB 近傍であった. $\sigma_{woh}$ は用いた OTDR の計測最小精度(0.001dB)近傍に達している.また、 $\sigma_{wh}$ は標準変位センサモジュールに変位を与える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った.各変位量の $\sigma_{woh}$ の平均を全体の標準偏差 $\sigma_{al}$ として定義する.また、最大変位量に対する標準変位センサモジュールの測定誤差%FS を次のように定義した.

$$\%FS = \sigma_{all} / (l_{\text{max}} - l_{\text{min}}) \cdot 100$$

このとき,  $I_{max}$ は最大変位量における損失の平均値で,  $I_{min}$ は 変位量 0mm における損失の平均値である.実験を行った各 ヘテロコア部の挿入長における標準偏差 $\sigma_{all}$ と測定誤差%FS を Table.1 に示す.標準偏差 $\sigma_{all}$ は,ヘテロコア部の挿入長に 関わらず,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 の時には 0.1%未満と なった.これは変位量にして 5µm 未満に相当する.

## 3.4 タンデム接続特性

OTDR ではレイリー散乱という非常に微弱な信号を検出す

Table.1  $\sigma_{all}$  and %FS in each insertion length

挿入長(mm)	標準偏差(o <sub>all</sub> )	測定誤差(%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



Fig.4 Variation of measurement accuracy as a function of interval of a measuring point

るため,加算平均数,パルス幅,カーソル測定点間隔という パラメータは測定精度に影響する. 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デム接続された場合、 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った.光ファイバ1ライン上の前段に複 数のセンサモジュールが接続されている事を模擬し、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の標準 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、後段の標準変位センサモジュール の測定誤差を%FS として計測した. Fig.4 は, OTDR のカー ソル測定点間隔と標準変位センサモジュールの測定誤差 (%FS)を示している. 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.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. 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.他の

計測パラメータの加算平均数、パルス幅についても検討を行

## 4. マルチ環境モニタリングシステム

い,システム構成時の計測精度の指標を得た.

## 4.1 システムの構成と概要



500m 500m 500m 500m Mouse SMF Keyboard Sensor (S1) Sensor (S2) Sensor (S3) GPIB PC Sensor (S5) Sensor (S6) Sensor (S4) Displacement sensor modules Optical 1.31µm OTDR switch Sensor Sensor Sensor Pressure sensor Distortion sensor modules module For additional sensor modules Display 850nm MMF Power Sensor OTDR supply Liquid detection module System console

(a) System console

(b) Schematic drawing of monitoring system

Fig.5 General view of the developed multi environmental monitoring system

Fig.5 に本研究で開発したマルチ環境モニタリングシステ ムを構成を示す. Fig.5(a)にシステムの全体写真を示す. シス テムコンソールの寸法は,長さ 570mm,幅 650mm,高さ 750mm で重量約 50kg となっている. Fig5(b)に示すように, このシステムはOTDR, 光スイッチ, PC によるシステムコン ソールと、各種センサモジュールを配置したモニタリングネ ットワークから構成されている. OTDR の計測データは, GPIB を通じて PC で取得する. このシステム構成では、すべ てのチャンネルに光ファイバ1ライン当たり3つのセンサモ ジュールを接続した場合,最大で24箇所の多点計測が可能と なる. モニタリングのための計測ソフトウェアとしては, GPIB制御を含めたデータ取得にNI製の"LabVIEW"を用い, 表示には融通性の高いモニタリング結果の表示を行えるよう に Borland 製の "C++Bulder"を用いた. また, 計測された各 センサモジュールの損失量から求める変位量を導くために, 計測ソフトウェアには損失-変位特性曲線の補間演算が予め プログラムされている. 1.31µm のラインには標準変位センサ モジュールの他、後に述べる高性能歪センサモジュール、圧 カセンサモジュール,バイナリ・スイッチモジュールなどの を使い直並列に接続し計測することもできる.

## 4.2 室外計測における動作特性

本研究では多点の標準変位センサモジュール(S1~S6)を擬 似亀裂発生器に敷設して,実験室外の実環境下において 10 日間のモニタリングを行い,主に温度変化の影響を明らかに した.ここでは,亀裂を与えない状態の擬似亀裂発生器を室 外テラスに,またシステムコンソールは室内に設置して,温 度変動によるシステムの安定性を測定した.

Fig.6 は、計測期間 2004 年 11 月 20 日から 12 月 1 日の 10 日間における OTDR およびベース板の温度変化とセンサ S1, S2 および S4 の測定値変動を示している. OTDR の温度変化 は、光源ユニットの光出力ファイバコネクタ部を測定した. 各標準変位センサモジュールには、予め任意の適当なオフセット変位量が与えられている.また、ファイバコネクタの温度変化の影響を明確にするため、センサ S4 はファイバラインと融着接続し、その他のセンサモジュールは SC コネクタによって接続した. 屋外の昼夜温度変化によりベース板の温度は 10~20℃で繰り返し変化している.この温度変動に対して、融着により接続したセンサ S4 の計測誤差は故意に与えたオフセット変位を中心に±2µm 程度となった.一方、SC



Fig.6 Variations of displacement and temperature of OTDR and base board as a function of the date

コネクタで接続したセンサ S1 および S2 は±10µm の計測誤 差で変動し,標準変位センサモジュールを 0~5mm の計測レ ンジとした場合のフルスケール誤差%FS にすると約 0.4%に 相当する結果となった.このことは,ヘテロコア型光ファイ バセンサは原理上温度依存がほとんどなく,計測された変動 は周囲温度変動の影響によるファイバコネクタの接続損失変 動が支配的であることを示していると考えられる.OTDRの 計測誤差から換算されるセンサモジュールの計測誤差はおよ そ±1µm なので,屋外においても融着によりセンサを接続す ることにより,使用する OTDR の計測誤差限界近くまで測定 できることが示されている.

#### 4.3 多点計測による擬似亀裂検出実験

擬似亀裂発生器に敷設した各センサモジュールの計測結 果を用いて,幾何学的計算から亀裂状況の検出を行った.本 システムの場合,光スイッチの挿入損失と上流2つの標準変 位センサモジュールのコネクタ損失を含む最大変位時の損失 の合計が約7dB程度となるから,最後段センサ(S3,S6)の計測 誤差は最大の場合で約0.5%程度,変位量の誤差で約±12.5µm となる.Fig.7は擬似亀裂検出の表示結果の一例を示している. この表示は亀裂状況を誇張し20倍に拡大表示してあり,環境 モニタリングとして想定している亀裂発生状態を目視で把握 しやすくしている.これらの計測値は、センサモジュール固 定におけるネジのあそびなどの施工上生じる誤差なども含め たものであるが,各計測値から2枚のベース板の相対位置関 係は求められ,亀裂が検出されていることがわかる.

#### 4.4 マルチ環境モニタリング用センサモジュールの仕様

開発したマルチ環境モニタリングシステムには標準変位 センサモジュールに加えて、構造物の歪や変位監視、河川の 水位監視、トンネルの外壁や工場などの水漏れ監視などのモ ニタリングのためのセンサモジュールとして、高性能歪セン サモジュール、圧力センサモジュール、バイナリ・スイッチ モジュール、水・油漏洩検知モジュールを用意している.高 性能歪センサモジュールは、主要部品に温度膨張係数の小さ い材料を使用することによって、計測誤差への温度変化によ る影響を考慮している.また、構造的に防塵、防水構造が可 能となっている. 圧力センサモジュールは、圧力をベローズ の変化として捉え、変位曲率変換機構でヘテロコア部の損失 に変換する.計測精度は、フルスケール 100kPa に対して 0.3%FS と比較的高い精度を示した.バイナリ・スイッチモジ ュールは、小型、小部品点数、低価格で構成され、ドアなど の開閉によってヘテロコア部の曲率が変わる簡便な構造を有



Fig.7 Enhanced display for crocking experiment using the 2-plate experiment

するセンサモジュールである. ON 時と OFF 時の損失差が約 0.716dB で,標準偏差が約 0.021dB 以下となった. 液体検知 モジュールは, 50-3-50 型へテロコア光ファイバセンサを使っ た SPR センサで構成されたセンサモジュールで,水や油とい った液体の付着を検知するのに比較的十分な結果が得られた.

#### 5. 結論

ヘテロコア型光ファイバセンサ単独のヘテロコア部挿入 長の感度への依存性、精度、再現性、ヒステリシス評価、タ ンデム接続環境下の精度評価の検討を行った.更に各種環境 情報を1システムでモニタリングする光ネットワーク型マル チ環境モニタリングシステムの製品モデルを開発し、実環境 下での使用を前提に総合的性能を評価した. ヘテロコア部の 挿入長が 1.3mm 以上であれば,標準変位センサモジュールと して 0.1%FS 以下の精度となった. また OTDR の計測パラメ ータの加算平均数,パルス幅,カーソル測定点間隔が計測精 度に与える影響について検討を行い、システム構成時の計測 精度の指標を得た.更に、製品モデルによる実環境下の計測 では,融着接続したセンサの計測誤差は±2µm 程度,光コネ クタ接続のセンサの計測誤差は±10μm 程度であった. 擬似 亀裂検出実験では,各標準変位センサモジュールの計測結果 を用いて、2 枚のベース板の相対位置関係から生じる擬似亀 裂状況を幾何学的計算から算出し, PC にモニタリング結果と して表示させた.本研究のマルチ環境モニタリングシステム は製品モデルのプロトタイプであり、今後、環境保全、安全 確保のための環境モニタリングの現場の要求に応じた更なる フィールド試験を行うことで、本格的なオール光ネットワー クシステムとして力を発揮する事ができるであろう.

## 参考文献

- 1) 高橋: 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 他: OPTRONICS, No.6 119/127 (1998)
- 4) 小島 他: Proc of 3<sup>rd</sup> Meeting on LST, LST 3-23, 157/162 (1989)
- 5) 根元 他:日本特許庁,特開平 11-287626
- 6) 重松: 測量, Vol.53, No.6, 25/28 (2003)
- 7) 小川 他: Proc of 3<sup>rd</sup> Meeting on LST, LST 3-21, 141/147 (1989)
- 8) 坂東 他: Proc of 3<sup>rd</sup> Meeting on LST, LST 3-22, 149/155 (1989)
- 9) 特許:特許第3180959号(1997)
- 10) 渡辺他:計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.1, 32/37 (1999)
- 11) K. WATANABE, et al : IEICE trans, Vol.E83-C, No.3 (2000)
- 12) 佐々木 他:計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.10, 981/987 (2004)
- 13) M. IGA, et al : Sensors and Actuators B 96 234/238 (2003)
- 14) M. IGA, et al : Sensors and Actuators B 101 368/372 (2004)
- 15) M. IGA, et al : Sensors and Actuators B 106 363/368 (2005)