

ヘテロコア光ファイバーセンサー

佐々木博幸*・渡辺 一弘**

Hetero-Core Optical Fiber Sensor

Hiroyuki SASAKI* and Kazuhiro WATANABE**

Hetero-Core optical fiber sensors are becoming more popular because of their attractive features which demonstrate the sufficient accuracy and cost effective performances with the simple structure and no temperature dependence by means of only a simple light intensity measurement. The total system performance could possibly be comparative to conventional electrical systems. This article introduces the practical usages of this sensor system which are currently in various full-scale field tests in the forms of both physical and chemical sensing configurations. Prospective applications are described not only in the fields of civil engineering and construction, but also in our daily life scenes related with sports dynamics, medical services and possible security of old aged people, as a promising technique to develop “sensible materials” being incorporated with “optical nerves” functions.

Key words: hetero-core, fiber optic sensor, physical sensor, chemical sensor

光ファイバーセンサーを材料や構造体に埋め込んだ、いわゆる知的構造体の研究は、これまで数多くなされてきた。その体表的な研究としては、多点型としてFBG (fiber Bragg grating) を用いたもの、分布型としてはBOTDR (Brillouin optical-fiber time domain reflectometry) を用いた光神経網の研究が有名である。特に近年BOCDA (Brillouin optical correlation domain analysis) のものは、距離分解能が数 cm という高い精度が達成されている¹⁾。これらはいずれも光ファイバー線路自体にセンサー機能を有する代表的研究であり、本来的な光ファイバーセンサーといえる。当然ながらどのような技術にも長所短所があり、その特長を生かしつつどのような条件下でこれらの技術を使うかは、その応用の目的に負うところである。たとえばBOTDRでいえば、分布型であることから、その線路のどこを触っても感じるという最も光神経網に近い利点を有している。また、FBGは多波長を用いることによって、直列結合が容易にできるという利便性をもっている。この両者に共通する事項としては、温度の依存性の補償、または常に一定の張力を与えなくてはならない使用上の条件も付

随する。一方において、それを実現するためのシステムが用いる目的に見合ったコストパフォーマンスであるかが問われるものである。このような中、ここで紹介するヘテロコア光ファイバーセンサーは最も簡便なる構造を有し、システム全体もシンプルであるが、多点型であるがゆえにどこでも感じるというわけにもゆかず、また、直列結合時に多波長によるセンサー部の識別ができない。利点としては、センサー部の温度依存をもたないの、温度補正に神経を使うことがない、光強度測定のための計測であることである。このセンサーを考案した時代に最も留意したことは、光ファイバーセンサーとして電気式センサーと比較できる程度のシステム構成で、安定して働く、シンプルなものはないかということであった。ヘテロコア光ファイバーの特徴的な点は、コア径の異なるガラスファイバーを微小区間において融着して製作している点にある。それまでコア径の異なるファイバーを物理的に接触させて配置した例はあったが、融着することによってセンサーとしての機能を付与するという考えはなかったようである。融着することによってセンサーとしての再現性が確立された。それが

* (株)コアシステムジャパン (〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236 創価大学産学連携推進センター RD201) sasaki@core-system.jp

** 創価大学 (〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236)

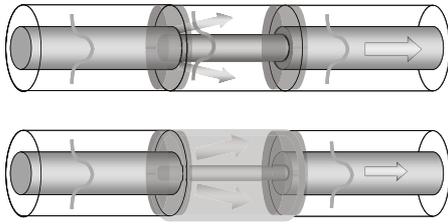


図1 ヘテロコア光ファイバーセンサーの構造。

可能となったのは、日本において高性能なガラスファイバー・クリーパー（切断器）と融着器が存在していたことによるところが大きい。融着することによって融着境界面でごくわずかな光の漏えいを得られ、その漏えいの度合いが外部から与えられた力によって適当な大きさで変化するという、当たり前の現象がこのセンサーの根本原理となっている。また、おまけにコア径を調節して漏えい光をやや多めにクラディングに光を導くことにより、クラッド層と外界との境界面における相互作用を用いた化学センサーも構成できる。このセンシングのメカニズムは、ガラスという素材の特性を十分に生かしているといえる。すなわち、ヘテロコア部の融着挿入による挿入損失を最小にしながら、適度な損失変化をセンサー信号として知ることができる。また、ガラスの可撓性（かとうせい 撓むことができる性質）は与えた変形をきわめて正確に伝搬する光に伝え、再現性あるセンシング信号を生成し得るということである。したがってこのセンサーのもっている性能はこういったシンプルな構造から得られる以上のものでもなく、また以下のものでもない。ヘテロコア構造の光ファイバーは、筆者らが1999年に初めて報告して以来^{2,3)}、筆者らの研究グループが多くの研究報告⁴⁻¹⁴⁾を行ってきたが、そればかりでなく海外の研究者によっても応用・引用・紹介が行われてきた¹⁵⁻²⁴⁾。これは、このセンサーが平易な構造でありながら利便性が高く、広範囲の実用・応用性に富んでいることを示唆している。最初の報告から十数年たつ現在、この光ファイバーセンサーは種々の用途に組み込まれつつあり、今後いろいろな商品へと発展しゆく可能性がある。ここでは、そういった実用例を紹介しつつ、光ファイバーセンサーの一形態であるヘテロコア光ファイバーセンサーについて解説したい。

1. ヘテロコア光ファイバーセンサーとは

ヘテロコア光ファイバーは、通常の通信等で使われるシングルモードファイバー（SMF）やマルチモードファイバー（MMF）通信路の任意の箇所に、コア径の小さい光ファイバーを挿入する構造となっている（図1）。光ファイ

バーの挿入は融着によって行われるが、融着は光ファイバーが通信用として普及し始めてから行われてきた一般的な作業であり、ヘテロコア光ファイバーは短時間の修練で比較的簡単に作る事ができる。

ヘテロコア部で生じる伝搬光のクラッド層への漏えい量は、伝送路とヘテロコア部のコア径の比率によってある程度決まり、外部から与えられる曲げという変形によって変化する。また、漏えい光がさらに光ファイバーの外周にまで達すると、外界とのインタラクションを生じさせることができる。この原理上ヘテロコア光ファイバーは、温度の影響をほとんど受けることはない。筆者らはこういったヘテロコア光ファイバーの基本的な特性から、コア径 $9\ \mu\text{m}$ の SMF にコア径 $5\ \mu\text{m}$ の SMF を挿入し挿入損失を少なくした 9-5-9 型と、コア径 $50\ \mu\text{m}$ の MMF にコア径 $3\ \mu\text{m}$ の SMF を挿入する 50-3-50 型の 2 種類を、おのおの光ファイバーの曲率変化を利用して変位などを検出する“物理センサー”と、伝送光と外界とのインタラクションさせる“化学センサー”として開発してきた。9-5-9 型ヘテロコア光ファイバーセンサーは、測定対象の物理量を光ファイバーの曲げ量に変換する機構を開発し⁶⁾、それをもとに現在では変位計や水位計などの応用製品として出荷段階になっている。また 50-3-50 型ヘテロコア光ファイバーセンサーは、センサー周囲に金属薄膜やゾル・ゲル等による色素膜を付着させることによって屈折率センサー等^{4,5)} のさまざまなセンサーとなりうる。本稿では、おもに 9-5-9 型ヘテロコア光ファイバーセンサーについて、基本的な特性から、製品として開発したセンサー類の紹介と試験状況の検証を行いつつ、開発中のセンサーについても言及する。50-3-50 型ヘテロコア光ファイバーセンサーについては、原理と現状について紹介する。

1.1 9-5-9 型ヘテロコア光ファイバーセンサー

9-5-9 型ヘテロコア光ファイバーセンサーの挿入損失やヘテロコア部の曲げに対する損失特性は使用する波長やその挿入長によって変わるが、波長 $1310\ \text{nm}$ で挿入長約 $1\ \text{mm}$ 程度の場合の挿入損失は $1\ \text{dB}$ 以下であり、曲げに対してはほぼリニアに損失が増加し、最大約 $3\ \text{dB}$ 程度となる⁶⁾。このときの曲げというのはヘテロコア部を含む $35\ \text{mm}$ 間隔を保持し、その間隔を $5\ \text{mm}$ 縮めるときに生じる曲げであり、物理量の基本的単位の直線的な変位をヘテロコア光ファイバー部への曲率へと変換する基本的機構とした⁶⁾。これは通常の SMF では損失が入らないほどの曲率半径である。また、その繰り返し再現性は 0.1% ($5\ \mu\text{m}$) 以下であり、計測器の最小分解能以下であることがわかっている^{6,7)}。このように、物理量としては最も基本的でか

つ比較的大きい直線的な変化を光ファイバーの曲率に変換することで、精度よくその変化をとらえることができる。

筆者らはこの9-5-9型ヘテロコア光ファイバーセンサーを使い、5 mm 変位計、20 mm 簡易薄型変位計、300 mm 変位計、投げ込み式水位計、傾斜計、P タイル薄型マットセンサー、スイッチ型センサー、膝の角度を測るサポーター型センサー、腰の動きをとらえるセンサー等の数多くのセンサーを開発してきた。

1.2 50-3-50 型ヘテロコア光ファイバーセンサー

50-3-50 型ヘテロコア光ファイバーセンサーは、多くの光を外界と作用させるために、10~20 mm 程度の挿入長を採用している。使用する波長は白色や単一波長を使用するが、使うセンサー方式や計測システムに対して選択することになる。例えば、SPR (surface plasmon resonance) を利用した屈折率センサーであれば、帯域の広い白色を使い損失の生じるピーク波長を計測することもあれば、単一波長の透過光強度変化によって計測することもできる。筆者らは、屈折率センサー^{4,5,14)}、pH センサー、湿度センサー¹³⁾、エタノールセンサー、各種ガスセンサー、抗原抗体反応を利用した菌センサーなどのさまざまなセンサーへの応用研究を進めている。

1.3 ヘテロコア光ファイバーの計測器

ヘテロコア光ファイバーセンサーを応用した各種センサーに対応する計測器は、50-3-50 型の一部を除いて単一波長の透過光量を正確に測ることができればよい。要するに通常の光ロスメーターと同等のものと考えてよいが、センサーごとの特性を内蔵させることによって透過光量の変化から計測単位への変換を行うヘテロコア光ファイバーセンサーに特化した計測器を開発した。開発した計測器の代表的なものを図2に示す。図2(a)は大きさがW100×D100×H50で重量が約270gで、消費電力は約1W程度であり、USBや電圧、接点等の各種入出力に対応した高機能タイプである。図2(b)は大きさがW45×D65×H25で、小容量の内蔵バッテリーによって約3時間程度駆動し、BluetoothでPCにデータ出力することができる小型のタイプである。光源は駆動回路が簡素で省電力なLEDを使用

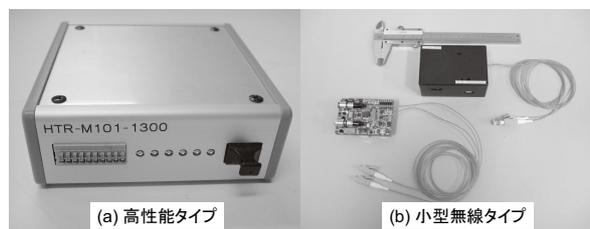


図2 開発した計測器。

し、受光部は一般的なPD (photo diode) で至って簡便な構成を採用している。PDで得た受光量は内蔵のプログラムがあらかじめ取得しておいたキャリブレーションデータを使って対象の計測単位に変換する。いずれの計測器であっても光ファイバーセンサーの計測器としては小型で省電力であり、使用するのに専門的な知識も必要ない。

2. ヘテロコア光ファイバーセンサーの実用例

2.1 建築土木分野への応用

光ファイバーセンサーの最大の特徴として、耐電磁誘導性、広範囲・長距離の計測が得意等があることは有名であるが、それらの特徴を生かす利用分野が建築土木分野である。例えば、電気式センサーでは落雷によって破損するような環境であっても、光ファイバーセンサーでは破損の心配はない。このような特徴から、建築土木分野では昔から光ファイバーセンサーを望む声が多かった。ヘテロコア光ファイバーセンサーにおいても、市場開拓当初は建築土木分野をターゲットとしてシステム開発スタートさせた。開発したものの一例を図3に示す。(a)最大スケール5mmの変位計、(b)300mmの変位計、そして(c)投げ込み式水位計である。

5mmの変位計は大型構造物などの振動や変形をとらえることができ、高速道路の橋脚の振動計測、構造物の変形の計測、国外の高速鉄道のトンネル内壁に取り付けることによるひび割れの検出等の導入事例がある。また300mm変位計は、土砂崩れなどの変動をとらえるために開発し、東京・東北・信越方面で試験運用されている。投げ込み式水位計は最大50~100m程度の水位を計測することがで

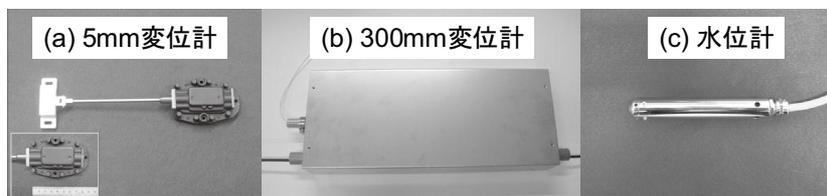


図3 土木建築分野のために開発したセンサーモジュール。

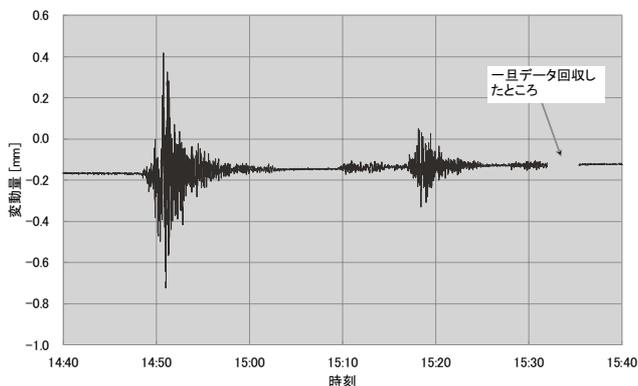


図4 5 mm 変位計でとらえた3月11日の地震.

き、東北・信越、そして神奈川で試験を行っている。

ここでは、5 mm 変位計を取り付けた構造物が昨年3月11日に発生した震災によって変形し、その様子をとらえたデータを図4に示す。これは、筆者らとともにヘテロコア光ファイバーセンサーの開発に協力してもらっている企業の大阪工場の建物とその外階段の間に取り付けたものであり、建物と階段が地震によって振動し、そして両者に振動周期の差異が生じ変位計によって検出されたものとなる。データのサンプリングレートは約 50 μ s であるが、1 秒間データを平均化して 1 Hz として出力している。地震の発生直後に最大の約 0.6 mm 振幅がみられ、その後約 10 分以上の時間を掛けて振動が徐々に収まっている様子がわかる。

このように建築土木分野への応用は実用段階として実証試験の最中であり、間もなく市場に出す準備を進めているところである。

2.2 介護医療・ヒューマンインターフェイス分野への応用

ヘテロコア光ファイバーセンサーは、光ファイバーの特徴である細く繊維的で柔軟ということをもそのまま利用した曲げセンサーとして考えることができる。普通の SMF では損失が生じないほどの曲げであっても損失が生じるの

で、曲げをとらえたい箇所をピンポイントで計測することができる。この特徴を生かし、ヘテロコア光ファイバーセンサーを人の衣類に縫いこむことによって、その衣服を着た人の動きをとらえることができる。主要な部位の動きをとらえることができれば、モーションキャプチャーとしても使用できる。そこで筆者らは、介護医療のリハビリやスポーツ等で利用するための人の関節の動きをとらえるウェア型のセンサーを開発した。代表例として膝の角度を調べるセンサー、腰の動きをとらえるセンサー、手指の動きを捉えるグローブ型センサー等がある。図5には膝の角度を調べるセンサーの概観と、わざと膝を大きく振り上げながら走ったときのデータを示す。市販の膝用のサポーターにヘテロコア光ファイバーセンサーを縫い込んである。データのサンプリングは 30 Hz で、膝が周期的に上下し、足が着地したときに膝の角度が若干ぶれていることもわかる。また、図6に示す腰の動きをとらえるセンサーは、樹脂製の 20 mm 簡易薄型変位計を2つ使い、腰の動きをとらえるものである。2つの変位計は腰よりも少し上部の背中側に背骨を線対称に配置してあり、Sensor-1 が左側、Sensor-2 が右側にある。例えば、前傾姿勢になった場合 (AN) は、両センサーの変位が増える。また右に傾いた場合 (RB) は、Sensor-1 は変位が減り、Sensor-2 は変位が増える。このように、2つの変位計の関係から腰の状態を把握することができる。図7はゴルフのスイング動作をしたときの出力を示している。この他にも曲げセンサーの発展として脈拍センサーも試作し、その動作の確認を行っている (図8)。

ヘテロコア光ファイバーセンサーは、ファイバーへの歪みで散乱波長が変化したり、反射・透過スペクトルが変化したりすることを利用したものでなく、いわば変位で透過光強度が変化するというたまたまことに単純な原理にもとづいている。光センサーは波長、位相、偏光面、干渉縞といっ

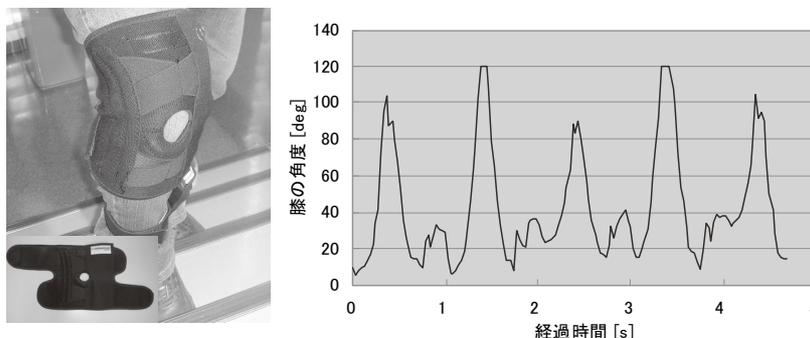


図5 膝の角度をとらえるセンサーの外観と走ったときの膝の動き.

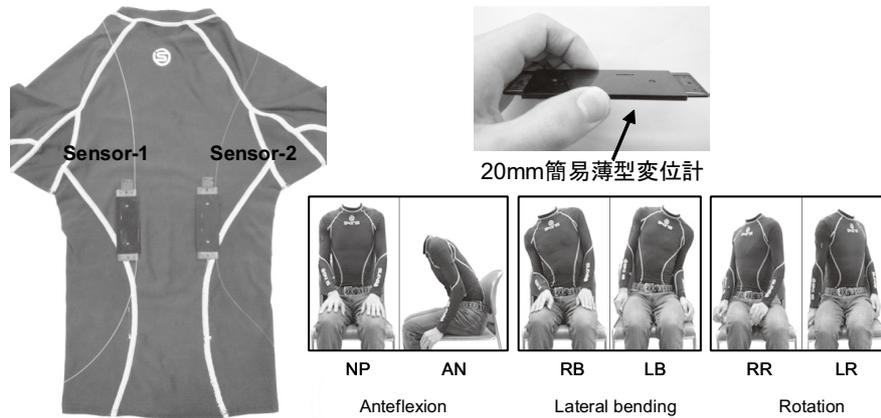


図6 薄型変位計を2つ使った腰の動きをとらえるセンサー。

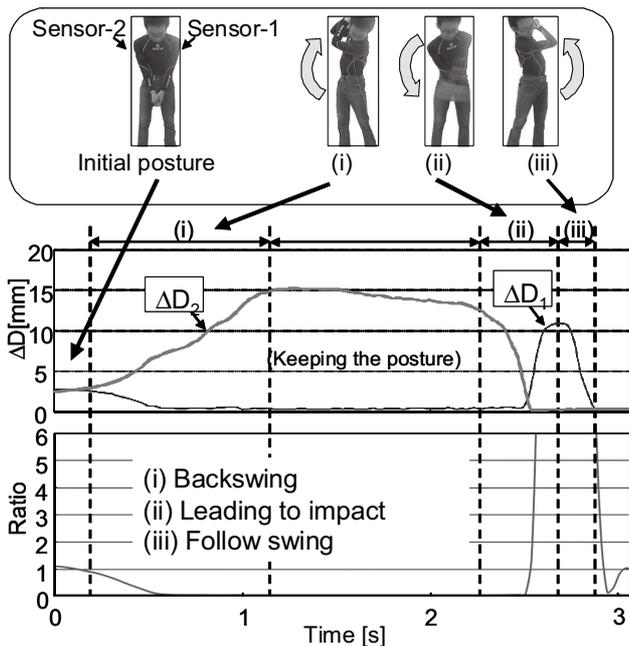


図7 ゴルフのスイング動作時の腰の動き。

た多くの物理量が原理として利用可能で、強度変化というのは単純すぎて一見あまり面白みがないようであるが、使ってみると便利である。光ファイバー線路自体にセンサー機能を付与しようとするれば、破壊限界内でファイバー線路を引っ張るか、強く曲げるか、クラッド層を除去するかして伝搬する光に変化を与えなくてはならない。ここで紹介したヘテロコア光ファイバーセンサーは緩やかに曲げる、軽く触るだけで適度に変化するという再現性のあるガラスの可撓性を生かしている。また、クラッド層を除去しなくても外界とのアクセスも可能で物質検知もできる。このように他の光ファイバーセンサーに比べ簡便な構造を有し、温度依存がなく、電気式センサーに匹敵するコストパフォーマンスが可能となる。

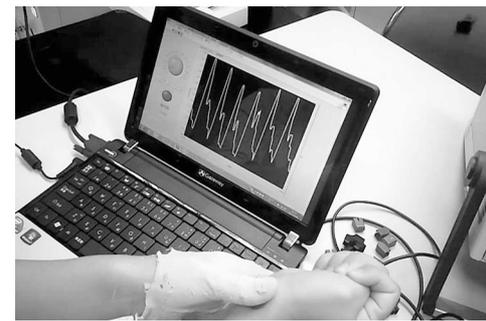


図8 脈拍センサーが脈をとらえているところ。

ヘテロコア構造をつくり込むには、切断と融着という造り込みが必要である。この作業は性能の高いクリーバーと融着装置があれば非常に単純で再現性も確保できるが、非接触でできればなお変化に富んだセンサー機能の付与ができることとなる。ガラスの光ファイバー線路内部に微細加工を施すことができるとすれば、フェムト秒パルスの超短パルスレーザーを用いた非断熱的加工が適しているであろう^{25,26)}。この方式を用いると、光ファイバー内部に非軸対称に変性領域を配置でき、その結果例えば光ファイバー線路に与えた曲げ方向の検出ができるようになる。シンプルな構造であるがゆえに動作が安定しており、今後光神経として環境、構造物、衣服、ロボットの人工皮膚など種々の対象に埋め込まれ、効果的な知的機能材料の開発にとって重要な技術となるものと期待している。

本研究の一部は、日本電線工業株式会社関係諸氏の協力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 保立和夫：“痛みの分かる材料・構造のための光ファイバ神経網技術”，計測と制御，**46** (2007) 591-598.
- 2) 渡辺一弘，松原茂明，久保田讓：“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**, No. 1 (1999) 32-37.
- 3) K. Watanabe, K. Tajima and Y. Kubota: “Macrobending characteristics of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection,” *IEICE Trans. Electron*, **E83-C** (2000) 309-314.
 - 4) M. Iga, A. Seki, Y. Kubota and K. Watanabe: “Acidity measurements based on a hetero-core structured fiber optic sensor,” *Sens. Actuators, B*, **96** (2003) 234-238.
 - 5) M. Iga, A. Seki and K. Watanabe: “Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film,” *Sens. Actuators, B*, **101** (2004) 368-372.
 - 6) 佐々木博幸, 久保田譲, 渡辺一弘: “ヘテロコア光ファイバ変位センサの試作と精度評価”, 計測自動制御学会論文集, **40** (2004) 981-987.
 - 7) 佐々木博幸, 久保田譲, 渡辺一弘: “ヘテロコア型光ファイバセンサを応用したマルチ環境モニタリングシステム”, 計測自動制御学会産業論文集, **4**, No. 4 (2005) 25-33.
 - 8) M. Nishiyama, H. Sasaki and K. Watanabe: “A deformation sensitive pad-structure embedded with hetero-core optical fiber sensors,” *Sens. Actuators, A*, **42** (2006) 205-211.
 - 9) M. Nishiyama, H. Sasaki and K. Watanabe: “Optical intensity-based measurement of multipoint hetero-core fiber sensors by the method of time-differentiation in optical loss,” *IEEE Sens. J.*, **18** (2007) 1055-1060.
 - 10) M. Nishiyama, H. Sasaki and K. Watanabe: “Performance characteristics of wearable embedded hetero-core fiber sensors for unconstrained motion analyses,” *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, **43** (2007) 1075-1081.
 - 11) 佐々木博幸, 西山道子, 近藤恵美子, 伊藤優子, 篠宮紀彦, 渡辺一弘: “ヘテロコア型光ファイバを用いたセンシングと情報通信との融合システム”, *電気学会論文誌*, **128-C** (2008) 1535-1542.
 - 12) M. Nishiyama, H. Sasaki, S. Nose, K. Takami and K. Watanabe: “Smart pressure sensing mats with embedded hetero-core fiber optic nerve sensors,” *Mater. Manuf. Processes*, **25** (2010) 264-267.
 - 13) S. Akita, H. Sasaki, A. Seki and K. Watanabe: “A humidity sensor based on a hetero-core optical fiber,” *Sens. Actuators, B*, **147** (2010) 385-391.
 - 14) K. Takagi, H. Sasaki, A. Seki and K. Watanabe: “Surface plasmon resonances of a curved hetero-core optical fiber sensor,” *Sens. Actuators, A*, **161** (2010) 1-5.
 - 15) X. Liu, D. Song, Q. Zhang, Y. Tian, L. Ding and H. Zhang: “Wave length-modulation surface plasmon resonance sensor,” *Trends Anal. Chem*, **24** (2005) 887-893.
 - 16) B. Wang, R. Guo, S. Yin and F. T. S. Yu: “Chemical sensing with hetero-core fiber specklegram,” *J. Hologr. Speckle*, **1** (2004) 53-57.
 - 17) B. Wang, Y. Fu, Y. Liu, R. Guo and F. T. S. Yu: “Displacement sensing with hetero-core fiber specklegram,” *Proc. SPIE*, **5560** (2004) 164-172.
 - 18) D. Monzon-Hernandez, J. Villatoro and G. Badenes: “Optical fiber hydrogen sensor based on core diameter mismatch and annealed Pd-Au thin film,” *Sens. Actuators, B*, **125** (2007) 67-71.
 - 19) Y. Jeong, S. Baek, B. Lee, S. Choi and K. Oh: “Macrobend sensor via the use of a hollow-core splice fiber: Theory and experiments,” *Opt. Eng.*, **41** (2002) 1815-1820.
 - 20) A. K. Sharma, R. Jha and B. D. Gupta: “Fiber-optic sensors based on the surface plasmon resonance: A comprehensive review,” *IEEE Sens. J.*, **7** (2007) 1118-1129.
 - 21) Y. Jung, S. Kim, D. S. Lee and K. Oh: “Compact three segmented multimode fiber modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement,” *Proc. SPIE*, **5585** (2005) 150-153.
 - 22) Y. Jung, S. Kim, D. S. Lee and K. Oh: “Compact three segmented multimode fiber modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement,” *Meas. Sci. Technol.*, **17** (2006) 1129-1133.
 - 23) J. Villatoro and D. Monzon-Hernandez: “Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch,” *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 1409-1412.
 - 24) 岡本隆之, 梶川浩太郎: プラズモニクス—基礎と応用— (講談社, 2010) 172.
 - 25) 合谷賢治, 時田大作, 渡辺一弘: “微小空泡による散乱損失を利用した屈曲ファイバセンサの試作”, *ケミカルエンジニアリング*, **57**, No. 10 (2012) 38-42.
 - 26) K. Gouya, D. Tokita and K. Watanabe: “Femto-second laser micro-processing for implanting sensor function into optical fibers,” *Proc. SPIE*, **7751** (2010) 77511Z.

(2012年2月10日受理)