光ファイバによる診断技術

中村 一則

古河電気工業（株）横浜研究所（〒220-0073 神奈川県横浜市西区岡野 2-4-3）

Diagnostic Technologies Using Optical Fibers

Kazunori NAKAMURA

Yokohama R&D Laboratories, Furukawa Electric Co., 2-4-3 Okano, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa 220-0073

(Received June 25, 1998)

This article describes diagnostic technologies using optical fibers for large scale constructions and life-lines in the civil engineering field. Because of their low transmission loss, fiber sensing technologies are highly effective for monitoring a series of long objective, such as gas and oil pipe lines or power and communication cable lines. In addition, the Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) method and the newly developed fiber devices of Fiber Bragg Grating and Fiber Fabry-Perot interferometer provide us many applications for diagnostic requirements.

Key Words: Optical fiber, Fiber device, Distributed sensing, Life line, Construction monitoring

1. はじめに

光ファイバは優れた光導波路であるが、その中を伝搬する光の位相や偏波状態あるいは発生する散乱光などは光ファイバ周囲の影響を受け絶えず変化している。したがって、光ファイバを単に光導波路として利用する以外に、このような伝搬光の現象を捉えることにより様々な計測が可能であり、センサとしての用途が生まれる。実際今までに干渉や偏波変動、損失変化を利用した種々の光ファイバセンサが開発され製品化されている。この中で特に光ファイバによる計測技術の有効性を高めたのは、レーリ散乱の後方反射成分を検知するOTDR (Optical Time Domain Reflectometry) と呼ばれる技術であり¹⁾、これにより光ファイバの長手方向に沿った損失分布が計測でき、Fig.1のような簡単な構成で様々な分布型センサが実現されてきた。また最近では後述のような各種の光ファイバ型デバイスが開発されて計測分野に大きな影響を与えており、光ファイバを用いた計測技術は一層の多様化を示している。

さて、本稿は光ファイバを用いた「診断」に関する事例のまとめを試みる。「診断」は「計測」の一部を成す技術であるが特に対象の不具合や異常の有無を検出する手段と考えられる。具体的には、光ファイバを用いて構造物の強度劣化の診断や種々のライフラインの異常診断を行う技術を紹介したい。

2. 構造物の劣化診断に適用可能な技術

近年ますます巨大化しているビルや橋梁には、安全性の観点から様々なセンシング技術を取り入れた診断機能が付加されている。この中で光ファイバを用いた診断技術は低損失性や耐腐食性の観点から注目されている。特に最近注目を集めている技術が、ファイバグレーティングを利用した歪み検知技術である。

ファイバグレーティングとは光ファイバのコアの中に軸方向に沿って周期的な屈折率の変動を持たせた光ファイバ型デバイスである²⁾。変調させられた屈折率の周期と伝搬モードの実効屈折率に対応した波長の光が、ブラッグ回折により光ファイバの後方へ反射する性質を持っている (Fig.2)。このためファイバ・ブラッグ・グレーティング (以下、FBG) と呼ばれる。FBGの反射率は屈折率変調層の層の数と屈折率変調振幅によって決まり通常60~95%の

Fig.1 Distributed sensing system using Optical Time Domain Reflectometry (OTDR).

Fig.2 Schematic structure of Fiber Bragg Grating (FBG).

Fig.3 Relationship between wavelength shift of reflected light and loaded strain to FBG.³⁾

反射率が得られる。また格子を形成する部分は4~7mm程度の長さで、おおよそ500nm程度の空間屈折率変調周期を持たせている²⁾。

FBGが軸方向の歪みを受けると格子部の屈折率変動の周期が変化し、反射光の波長が変化する。Fig.3にFBGへ加わる歪み量とブラッグ反射光の波長シフト量との関係を計測した例を示した³⁾。この図のように歪み量とブラッグ反射光の波長シフト量とはほぼ直線的な関係を持っている。したがって、FBGからの反射光の波長をモニターすることにより光ファイバに加わった歪みが検知される。計測される歪みの分解能は波長の測定分解能で決まり、現在10~20 $\mu\epsilon$ の歪み分解能が得られている。

このFBGを被計測部分に固定して構造物の強度劣化を診断する。FBGは波長多重の技術を利用した多点化が可能で、1本の光ファイバのシリーズに複数の波長帯の異なる

Fig.4 Conceptual representation of the strain multi-point measurement base on FBG array with and TDM methods.⁴⁾

FBGを接続して多点システムが構成できる。さらにパルス光源を用いて時分割多重技術を組み合わせたFig.4に示すような多点化も可能であり⁴⁾、高層ビルや橋梁などの巨大な構造物や長距離にわたる多点監視や面分布の計測診断も可能である。実際、カナダ、カルガリー市の橋脚などの構造物の歪み状態監視分析に使用されている⁵⁾。これらの検討例は構造物の挙動の分析の目的に用いられているが、今後は多点計測による構造物の劣化を診断し、タイムリーなメンテナンスのための情報を提供するシステムへと転換されることが予想される。

ファイバファブリペローインターフェロメータ(以下FFPI)と呼ばれるファイバ型デバイスも歪みを検知することができる。Fig.5に示すように細径のキャピラリーの中に両側から光ファイバを挿入し数 μm 程度のギャップをファイバ端面の間に設けた構造の光ファイバ型デバイスで、光ファイバから出射した光はこのギャップ間でファブリペロー干渉を起こす⁶⁾。

FFPIに軸方向の歪み加わるとギャップの間隔が変化し、反射光および透過光の強度が変化する。FBGと同様に被計測部分に固定して用いる。このデバイスを用いコンクリート内の補強材に加わる歪みをモニタしている事例をFig.6に示す⁷⁾。このセンサデバイスの出力応答特性はローレンツ型となり(Fig.7)、一般にFBGに比べ感度が1桁程度良く、波長を検知する必要がないため早い応答速度が得られる。Fig.7にFFPIに印加された歪み量($\mu\epsilon$)と反射信号の応答特性を示した。

FBGもFFPIも歪みだけでなく温度に対しても応答する。このため、構築物の歪み変化を正確に計測診断するためには温度補償を行う。温度補償の方法は多数あるが、対

Fig.5 Schematic structure of Fiber Fabry Pèrot Interferometer (FFPI).⁷⁾

Fig.6 Strain monitoring of reinforced concrete wall by FFPI.⁷⁾

Fig.7 Output signal response from FFPI applied strain.⁷⁾

象の近傍にあり歪みが発生しない場所を選びそこに同種のデバイスを固定し温度補償を行う方法が良く用いられる。FBGの場合にはこのような方法以外に様々な工夫が可能である。たとえば、周期の異なる回折格子を光ファイバの同じ場所に形成し(スーパインポーズ)2つの反射波から歪みと温度を同時に計測するような方法、あるいは2つの偏波モードのブラッグ反射光を利用した温度と歪みの分離方式などが報じられている^{8,9)}。

FBGやFFPIはポイントの計測であるが、これに対して連続的な計測をする方式としてはブリルアン散乱光を検知する方法が知られている。光ファイバ中には伝搬光によって、非弾性散乱の一種であるブリルアン散乱光が発生している。このブリルアン散乱光の光周波数は光ファイバ中の歪み量に依存してシフトし、1 $\mu\epsilon$ あたり58kHzのほぼリニアな変化を示す。この現象を利用し、Fig.8に示すように、光ファイバの両端から周波数の異なるパルス光と連続光を入射して誘導ブリルアン散乱光を発生させ、受信光量が最大となる光周波数差から光ファイバに沿った歪み量を検知することができる¹⁰⁾。空間分解能として1m、歪み分解能では20 $\mu\epsilon$ が実現されている。この方式により長手方向の歪み分布が計測できるため管路や通信ケーブルの異常を検知する技術として期待される。

Fig.8 Configuration of Brillouin OTDR (using optical frequency translation ring circuit method).¹⁰⁾

この他にも、構造物の検知診断技術としては、低コヒーレント干渉技術や、光ファイバへのマイクロベンドロスを利用した方法などが検討されている^{11,12)}。

3. ライフラインの診断

ガス、上下水道、送配電線および通信ネットワークなどのライフラインの状態を診断し事故等を未然に防止する技術は今後も重要性を増すものと考えられる。光ファイバの長尺性、低損失性はこのような長い線状の対象に対する計測診断に適しており、様々な光ファイバセンシング技術が利用されている。以下にそれらの事例を紹介する。

3.1 光ファイバネットワークの監視診断

主として通信の基幹部分を支えている光ファイバ通信網には極めて高いレベルの信頼性が期待されており、そのための保守診断技術も精力的に検討されてきている。通信媒体である光ファイバそれ自体がセンサとしての機能を持つという特徴を生かし、線路網自身による長距離にわたる診断技術が構築されている。

中でも1章で述べたOTDR法は有効である。この方式では光パルスが光ファイバ中を伝搬する際に発生する微量のレーリ散乱光の後方散乱成分を、光入射端で検知する。検知された戻り散乱光の強度とその時間変化から長手方向に沿った光ファイバの損失分布を計測することができるため、光ネットワーク診断の基本的な技術となっている。

OTDR技術と光分岐器、光ファイバ心線の選択装置などと組み合わせて回線状況を常時チェックし、心線の切断等の異常が生じた際には他の回線に切り替えるシステムが開発され実際に活用されている¹³⁾。さらに、非ガス化された光ケーブルのメンテナンスのために接続箇所において水に浸されると膨張し光ファイバに曲げ損失を発生させる機構を設けた浸水検知センサも実用化されている¹³⁾。このセンサ素子で生じさせた損失を前述のOTDRで検知し浸水の有無を診断することができる。

また、2章で紹介したブリルアン散乱の手法は線路の布設に伴う残留歪み劣化の診断に利用されている。

3.2 送電線の監視

火力・水力発電から原子力発電への依存が高まった結果として高電圧で長距離の送電ラインが布設されるようになり、送電線にはより高い信頼性が求められている。また、送電線は山間部を通るため風や積雪の影響を受けやすく、それを支える鉄塔は人が容易には近づけない場所に設置されている例が多く、一般に監視やメンテナンスの作業が困難である。したがって、光ファイバを用いた長距離・遠隔監視診断が求められている。

主要な送電線にはグラウンドワイヤーの内部に光ファイバが複合化されていて(OPGWと呼ばれる)この光ファイバ線路を用いていろいろな監視・診断システムが構築できる。よく行われているのは画像監視で、鉄塔上に監視カメラを設置し画像信号を光に変換してOPGWを通して監視

Fig.9 Load monitoring system of electric power lines by FBG.¹⁴⁾ (a) System configuration. (b) Optical load sensor including FBG.

センタまで送られる。風向風速計などからの信号も同様にして送られる。しかしこの場合は光ファイバは単に伝送路としての役割しか果たしていない。

Fig.9 (a)に示す荷重監視システムは光ファイバ自体のセンシング機能を利用したものである¹⁴⁾。付着した雪氷あるいは強風による送電線の荷重・張力変化を計測し鉄塔倒壊などを未然に防ぐことを目的としている。ここでのキー技術は前述のFBGである。送電線と鉄塔とをつなぐ金具部にFig.9 (b)のようなFBGを取り付けた構造により送電線にかかる歪みを検知することができる。FBGからの反射光はOPGWを通して30~40km遠方の監視センタへ送られ、波長の変化量から歪みを計測しその変化量から荷重変動をモニタする。最大10ton程度までの荷重を100kgの精度で検知し、反射波長が1520nmから1580nmまでのFBGと波長分波デバイスを用い10個所以上の地点での荷重を1本の光ファイバで計測することができる。この場合もFBGは温度と歪みの両方に応答する。温度補償は金具内の歪みがかからない部位に別のFBGを取り付けて温度(気温)を検知し、補正を行うことができる。しかし、気温の変化は一般に緩やかなため、荷重の相対変化を知りたい場合には温度補償を省略することもできる。また応用として送電線の弛度なども検知できる可能性がある。

3.3 漏油およびガス漏れ監視

石油備蓄タンクや火力発電設備の周囲には原油・重油の送油管が張られている。送油管からの漏油は火災事故の危険性をはらみ、経済性を損ねるだけでなく、環境に対しても影響を与える恐れがある。また、ガス漏れによる事故は大きな災害に繋がる可能性があり、そのメンテナンスは重要である。光ファイバを用いた漏油監視およびガス漏れ監視技術は比較的古くから検討されてきた。その大きな理由は防爆性にあると考えられる。電気に因らない

Fig.10 Eccentric core fiber (ECF) and Oil sensing.

光ファイバセンシングはスパークの問題が無く、完全防爆性の機器と判断される。安全性が何より重視されるこの領域においては光ファイバの防爆性は極めて重要な要素となっている。

漏油の検知方法は光ファイバ上への油の付着による吸収損失、放射損失およびマイクロベンドによる損失の発生を検知する方法などが検討されている。損失が発生すればOTDR技術により場所の関数として、漏油の発生場所を検知することができる。吸収損失もしくは散乱損失を効率的に発生させるためには光ファイバやケーブル構造に工夫をする必要がある。

我々はFig.10のような光ファイバのコア部がクラッド部の周囲に偏心した構造の光ファイバを用い、油の付着による放射損失の発生を強調させている¹⁵⁾。コアを偏心させることにより伝搬光のクラッド外部へ漏れ出すエバネッセント成分を増大させることができる。通常の125 μ mのクラッド直径の単一モードファイバにおいて直径約9 μ mのコアの中心位置をFig.10のようにほぼクラッドの外周に近接させた場合には漏れ出すエバネッセント成分は10¹³程度増大する。これにより高感度の漏油検知特性が得られる。このファイバをOTDR技術と組み合わせ、Fig.1の構成で長距離漏油監視システムが実現できる。Table 1にその性能仕様を示している。長尺である光ファイバの特徴を生かし、オイルタンクの周囲に張り巡らしたり、送油管の沿って布設し、漏油箇所のリアルタイムな診断を行うことが可能である。

一方、ガスの検知方式は基本的にガスによる光の吸収に基づいている。たとえば、メタンガスの場合、光ファイバ

Table 1 Oil sensing specifications of ECF-OTDR system.¹⁵⁾

Signal wavelength	1310 nm	1550 nm	1650 nm
Spatial resolution*	12 m	12 m	12 m
OTDR dynamic range*	18 dB	16 dB	15 dB
Propagation loss	0.3 ~ 0.6 dB/km	0.5 ~ 5.0 dB/km	1.0 ~ 12 dB/km
Detectable length	8.0 ~ 17 km	0.6 ~ 6.0 km	0.2 ~ 2.0 km
Min. respondent length	0.1 ~ 12 m	0.01 ~ 0.6 m	0.01 ~ 0.3 m

*OTDR pulse width = 100 nsec

Fig.11 Sensing characteristics of methane gas by ECF and ordinary single-mode fiber.¹⁶⁾

の透過波長帯の属する吸収スペクトルはC-H結合 ν_3 振動モードの2次高調成分である $1.65\mu\text{m}$ にある。またCOガスでは $1.567\mu\text{m}$ が知られている。しかし、通常の光ファイバでは伝搬光との相互作用は極めて僅かであり十分な感度を持つガス検出は一般に難しく様々な感度向上に向けた検討が成されている。

漏油検知の場合と同様の偏心コアファイバを用いて検知対象との相互作用を増大させたメタンガス検知結果をFig.11に示す¹⁶⁾。偏心コアファイバと通常の単一モードファイバを、ガス濃度を一定に保ったチャンバ中に保持し、ガス濃度に対する透過光の損失を測定した結果で、高濃度領域ではあるが、通常の単一モードファイバではほとんど検出されない場合でも偏心コアファイバでは検知が可能である。

この他にも感度向上のために、ガスと反応して吸収波長帯を変化させる色素により増感を図る方式やファイバレーザー共振系の中でガス検知を行い感度を上げる技術などが検討されている^{17,18)}。

4. まとめ

光ファイバの特長は何と言っても、低損失性に基づく長距離伝搬が可能なことであり、これにより広域にわたる計測診断が可能となる。ライフラインの計測診断はこの特

長を最もよく利用した方式である。一方、光ファイバに様々な加工を施し機能化を図ったファイバ型デバイスが開発されこれらを利用した構造物診断も近年活発に検討されている。敷設方法、取り付け部の信頼性、感度の向上、他の物理量との分離などそれぞれのアプリケーションで様々な課題が残されているが、着実に実用化へと進んでおり、今後の進展が期待される分野である。

参考文献

- 1) M. K. Barnoski, M. D. Bourke, S. M. Jensen, and R. T. Melville: Appl. Opt. **16** (1977) 2375.
- 2) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert: Appl. Phys. Lett. **62** (1993) 1035.
- 3) Y. Ogawa, J. Iwasaki, and K. Nakamura: Technical Digest of 12th Int'l Conf. on Optical Fiber Sensors, Williamsburg (1997) p.468.
- 4) M. A. Davis, D. G. Bellemore, and A. D. Kersey: Technical Digest of 2nd. European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow, (1994) p.342.
- 5) R. M. Measures, T. Alavie, R. Maaskant, S. Huang, and M. LeBlanc: Technical Digest of 2nd. European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow (1994) p.162.
- 6) K. A. Murphy: Technical Digest of 8th OFS, Monterey p.193.
- 7) W. R. Habel and D. Hofmann: Technical Digest of 2nd. European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow (1994) p.180.
- 8) M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin: Electron. Lett. **12** (1994) 2153.
- 9) E. Udd, D. V. Nelson, and C. M. Lawrence: Proc. SPIE **2718** (1997) p.104.
- 10) K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada, and T. Kurashima: J. Lightwave Technol. **12** (1994) 730.
- 11) D. Inaudi, A. Elamari, and S. Vurpillot: Technical Digest of 2nd. European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow (1994) p.216.
- 12) W. C. Michie, I. McKenzie, B. Culshaw, P. Gardiner, and A. McGown: Technical Digest of 2nd. European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow (1994) p.186.
- 13) 富田 信夫, 佐藤 公紀, 中村 育夫: NTT技術ジャーナル **2** (1990) 10.
- 14) 岩崎 准一, 小川 裕子, 中村 一則: 平成10年電気学会全国大会 1640.
- 15) K. Nakamura, N. Uchino, Y. Matsuda, and T. Yoshino: IEICE Trans. on Communications **E80-B** (1997) p.525-534.
- 16) 松田 美一: レーザー研究 **22** (1994) 284.
- 17) T. Yagi, N. Kuboki, Y. Suzuki, N. Uchino, and K. Nakamura: Technical Digest of 11th Int'l Conf. on Optical Fiber Sensors, Sapporo, (1996) Th3-1.
- 18) 麦野 明, 近藤 和宏, 久世 宏明, 竹内 延夫: 第18回光波センシング技術研究会 LST18-6 (1996).

レーザーワード

ファイバ型デバイス (fiber device)

光ファイバに何らかの加工を施して作製された光デバイスの総称。光ファイバ型合分波器や分岐・合流器などはすでに広く用いられている。この他に、細径のフェルル中に2本のファイバを挿入し、十数ミクロンの間隙を介して対向させ、微小なファブリペロー干渉系を形成したデバイスが開発されている。ファイバ・ファブリ・ペローと呼ばれ、フィルタや歪みセンサ、波長掃引器などに利用されている。また、光ファイバに強力な紫外線(エキシマー

レーザー光などを利用)を照射した際、コア内に屈折率変化が発生することが知られているが、この効果を利用し、コアの軸方向に沿って周期的な屈折率変動を生成し、伝搬光の特定波長成分のみを反射させるファイバグレーティングと呼ばれるデバイスも開発された。このデバイスもフィルタや各種センサに用いられ、さらに光伝送系における分散補償器としても期待されている。(中村 一則)