

# 光ファイバセンシング—FBG 歪センシングと応用

光防災センシング振興協会 佐々木一正  
(北海道工業大学)

## 1. はじめに

光ファイバを利用した歪センシングではさまざまな方式が提案されているが、最近ではFBG(Fiber Bragg Grating)を利用した方法<sup>1)</sup>、BOTDRを利用した方法<sup>2)</sup>の実用化が盛んである。本稿はそのうち、FBGを応用した歪計測について述べるのが目的である。ここでは、FBGを使おうとする読者の役に立つような内容を心がけるつもりである。

FBGは、**図表—1**に示すように、直径125 $\mu$ mの単一モード光ファイバのコアに回折格子を書き込んだものである。FBGは回折格子の間隔で決まる波長の光を反射する性質があるため、光信号のフィルタとして開発が進められた。この場合、外部応力により格子間隔が変動することが問題であったが、そのことを逆に積極的に利用すれば、FBGはストレインゲージのような歪センサとなる<sup>3)-4)</sup>。

光ファイバ自体が絶縁物であるため、とくに屋外で使う場合に、悪天候時、雨水による漏電や、雷による電磁雑音の影響を受けない利点がある。

そこで、この利点を生かして防災センサへ応用しようとする研究が活発である<sup>5)-7)</sup>が、防災センサも歪センサ実用形態の1つであろう。

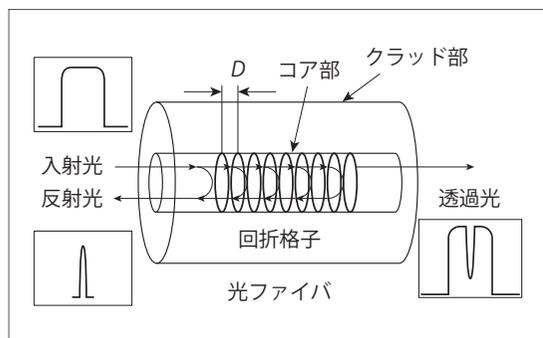
光ファイバはこれまでは通信媒体としての役割が主要であったため、歪センサや防災センサでの分野でも通信用の1.55 $\mu$ m帯域のものが流用されることが多い。歪みセンサ独自の波長を志向する向きもあるが、通信用に敷設された1.55 $\mu$ m帯光ファイバネットワークをFBGセンサネットとしても利用可能であるという点で、都合がよい面もある。

## 2. FBG 歪センサの特性

FBG歪センサの特徴を列挙すると、

- ① 高感度・高精度(波長を物差しにしている)
- ② 絶縁性(絶縁不良、漏電などがない)
- ③ 耐候性・耐電磁雑音(雷放電雑音に影響を受けにくい)
- ④ 化学的に安定(錆びない)
- ⑤ 小型軽量
- ⑥ 波長多重可能(1本の光ファイバに複数のセンサの接続が可能)
- ⑦ 防爆性
- ⑧ 信号伝送媒体(光ファイバ)との融和性が高いなど多くの利点があるが、反面、
- ① 素材が石英ガラスであるため、破断しやすい
- ② ファイバ同士の接続に融着装置や専用の接続コネクタが必要
- ③ 光信号の分岐・結合には専用のカプラが必要など、従来の電氣的センサに比較して煩わしい面もある。実用にあたっては、利点・欠点の両面

図表—1 FBGの構造と機能



を踏まえた検討が必要である。

FBG 計測では、従来のストレインゲージと同様、センサを被測定物に固定する必要がある。しかし、異なることは、従来のように直接接着して使うこともできるが、FBG を書き込んだ光ファイバの長さ  $L$  の部分の両端を固定して用いることも可能であり、従来の歪測定法と比較して計測のバリエーションが広いという特長がある。このような使い方も含めて、FBG 歪センサの特性を図表—2 にまとめ、その後で詳細を説明する。

FBG の歪率検出感度は通常  $\varepsilon = 10^{-5}$  程度と考えられているが、これは従来のストレインゲージが  $\varepsilon = 10^{-6}$  の感度を有していることと比較して優位とは言えないように見える。しかし、最近では  $\Delta\lambda = 1\text{pm}$  の分解能を持った測定機も現れており、これを用いて、 $\varepsilon = 0.6 \times 10^{-6}$  も達成されている。また、FBG の固定方法を工夫することで、 $10^{-7}$  の測定も報告されている。

光ファイバは石英ガラスであるため、大きな歪の測定には限界がある。光ファイバの許容延伸率は 3% 定格であるので、それ以上の歪は FBG に回復不能なダメージを与える可能性があり、注意を要する。さらに、FBG に常時張力を付与していると、わずかな機械的的刺激で破断することがある。常時付与する張力の大きさはできるだけ小さい方がいいが、著者の経験では約 0.1% 程度であれば、10 年程度の FBG の寿命があるようだ。

応用目的によっては歪センサのサイズが問題となることがある。FBG は光ファイバの内部に書き込まれるため、それ自体は小さくとも、光ファイバの大きさで制限を受けることはやむを得ない。市販の FBG では光ファイバの 5mm 程度の領域に回折格子が書き込まれている。特注では、小さいものは 1mm、大きいものは数 10mm、さらに、格子間隔が除々に変化するタイプ(チャープ型)もある。

上述したように、従来のように直接接着して使うこともできるが、FBG を書き込んだ領域を含む任意の光ファイバの長さ  $L$  の両端を固定して用いることも可能である。そのため、測定する領域という観点では、センサを接着した部分のポイント

図表—2 一般的 FBG の特性

• 歪率検出感度 $\varepsilon = 10^{-5} \sim 10^{-7} (*)$
• 最大歪 3% max
• 常時付与可能張力 $\sim 0.1\%$ (寿命 10 年)
• サイズ
• 長さ 1mm $\sim$ 10cm 通常 5mm
• 直径 石英ガラス部 125 $\mu\text{m}$ $\phi$ (規格)
• 被覆を含む 250 $\mu\text{m}$ $\phi$ (標準)
• 測定可能領域 FBG の長さ $\sim$ 10m 程度
• 接続可能数 10 $\sim$ 20 個(波長変動幅による)
• 被覆材 UV 硬化樹脂、ポリイミド等
• 使用波長 1.53 $\mu\text{m}$ $\sim$ 1.57 $\mu\text{m}$ (標準)
• 反射率 各種(10% $\sim$ 99%)
• 反射スペクトル半値幅(FWHM) 0.25nm $\sim$
• 最大許容光パワー 50mW 以下
• 最小要求光パワー 1nW
• 最小波長変化 1pm

歪を測定することもできるが、光ファイバ長  $L$  間の平均歪を測定することも可能である。これは被測定物体の規模が大きく、歪が分布している場合、ポイント測定では全体の歪を評価することが困難である場合に有効な測定方法である。この場合も、光ファイバの重量と、光ファイバに付与できる張力の関係から、 $L$  は 10m 程度が妥当である。

また、FBG は反射波長が異なれば、1本の光ファイバに複数の FBG を従属接続することが可能である。許容個数は 10  $\sim$  20 個であるが、現実の接続可能数は 1 個あたりセンサが占有する波長変化の幅に依存する。

被覆材の選択も重要である。UV 被覆は比較的容易に除去できるため、直接接着する場合の作業性に優れているが、はがれやすい欠点もある。ポリイミドは丈夫な材料で、除去には溶剤を使う。

現在市販されている FBG の多くは、1.55 $\mu\text{m}$  帯のものである。この波長帯は石英ガラス光ファイバの伝搬損失が最小となる波長であり、長距離光通信帯である。この波長帯が踏襲されている。

FBG の反射率は用途により選択可能であるとともに、長期間には劣化するものもあるので、注意を要する。高精度・高感度な測定では、できるだけ反射スペクトル幅の狭いものが必要とされる。

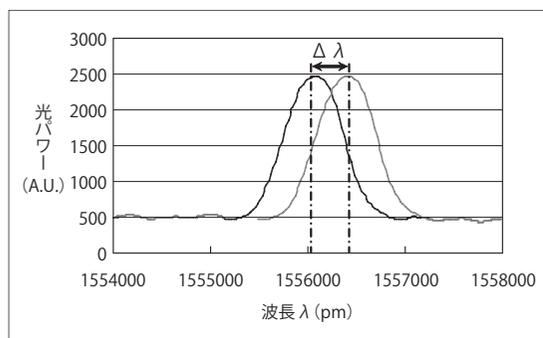
反射スペクトル幅の表示には半値幅(FWHM)が使われる。通常は、0.25nm 程度のものが使われている。

FBG の反射波長は後で述べるように、コアの屈折率の値が重要なパラメータであるが、屈折率の値はそこを通過する光のパワーによる自己変調により影響を受ける。そのため、大パワーの光を使うことはあまり好ましくない。50mW 以下で使う

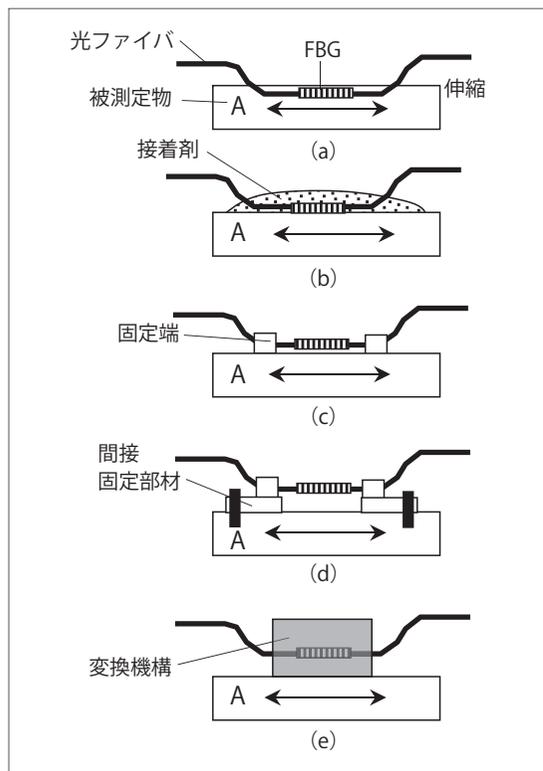
ことが望ましい。

しかし、一方、過小であればスペクトルの SN 比が十分とれないことも懸念される。反射光強度として最低 1nW は確保したい。また、最小の波長変化は感度を意味するが、1pm が今のところ通常使える測定器の分解能であるので、それ以上の波長変化となるような歪の大きさが計測可能領域と言えよう。

図表—3 FBG の反射スペクトルと波長変化



図表—4 被測定物体への FBG 固定法



### 3. FBG 計測技術

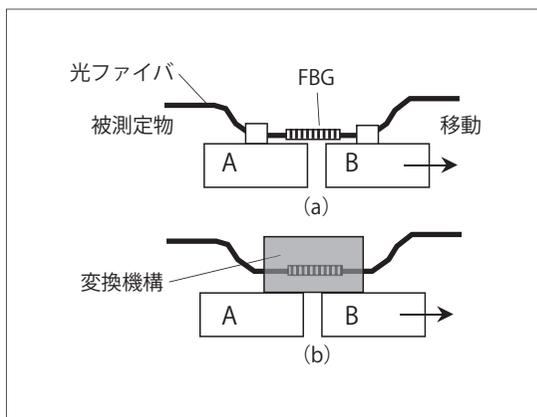
図表—3 に FBG の反射スペクトルと波長変化の様子を示す。反射波長としては、反射スペクトルのピークトップ、もしくはスペクトルの中心波長を利用する。

### 4. FBG の固定方法

FBG を歪センサとして使う計測では、被測定物に FBG を取り付ける必要がある。図表—4 は、その方法が各種あることを示しており、測定目的に合わせて選択する。(a)埋込み法、(b)接着法、(c)2 端固定法、(d)間接固定法、(e)変換機構法である。

また、わずかな移動量を計測する場合は、図表—5 のような方法がある。いずれの場合も歪量 (もしくは移動量)  $\Delta D$  を検知すると、図表—3 のように反射スペクトルがシフトする。このシフト

図表—5 FBG による移動量検知法



量を  $\Delta \lambda$  とすると  $\Delta \lambda$  と  $\Delta D$  の関係は、

$$\Delta D = \Delta \lambda / 2n \quad (n \text{ は一定}) \quad (1)$$

で与えられるから、 $\Delta \lambda$  の計測により、 $\Delta D$  を知ることができる。ここで  $n$  は屈折率で一定としている。しかし、現実には石英ガラスの屈折率は温度によって変化することが知られており、この計測には温度補償が必要であることがわかる。市販されている FBG エLEMENT の中には熱膨張係数が逆の値をもつ材料と組み合わせて温度の影響をキャンセルしているものもある。式は変化率での表現に書き直すと

$$\varepsilon = \Delta D / D = \Delta \lambda / \lambda - \Delta n / n \quad (2)$$

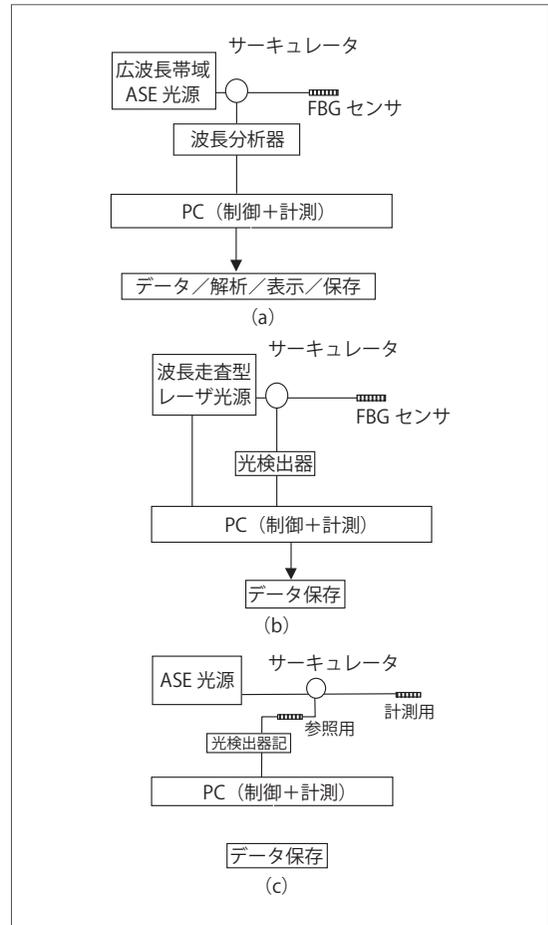
と書くこともできる。 $\varepsilon$  は歪率である。この式を用いると、波長の変化率から直接歪率が求められることから、キャリブレーションや計算などの必要がないため、利便性が高い。ここでは光ファイバの伸び率と FBG の伸び率 ( $\Delta D / D$ ) は一致すると仮定しているが、現実にはわずかに一致しないこともあり、実際の使用にあたっては注意が必要である。

## 5. FBG の駆動法

FBG を駆動する光学系を図表—6(a)、(b)、(c) に示す。(a) は ASE (Amplified Stimulated Emission) 光源と波長分析器 (Spectrum Analyzer) を用いる方式で、ASE 光源は通常  $1.53 \mu\text{m} \sim 1.57 \mu\text{m}$  の波長全域の波長を持った広帯域光源で、FBG の反射スペクトル領域を十分にカバーする。FBG からの反射光はサーキュレータにより分岐されて波長分析され、反射スペクトラムを出力する。これらの情報から波長のシフトを計量する。

この方式では受信光パワーが多少変動しても波長情報が失われない、つまり、雑音に耐久性があるという利点がある。一方、(b) では、FBG の反射スペクトル領域を十分にカバーする波長帯を走

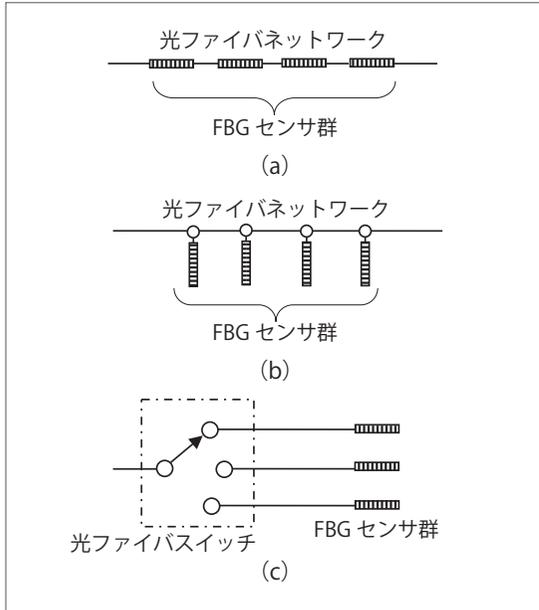
図表—6 測定システム (光学系) の構成



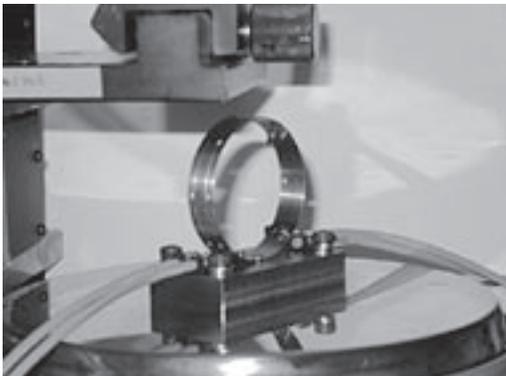
査する波長走査光源が使われる。これは波長の値が既知の光を入射して反射量を計測するので、受信側に波長分析器の必要がない。さらに、(c)では、2つのFBGによる差動形の光学系を示している。この光学系では、光源としてASE光源を用いる点で(a)と類似しているが、検出側は(b)のタイプの光検出器でよく、波長分析器を必要としない点で経済的であるとともに、周波数応答性に優れているため、高速の振動検知に利用される。

また、図表—7には複数のFBGが描かれているが、(a)は複数のFBGを縦列に接続してネットワークを構成する方式、(b)は幹線から分岐して配線する方式を示している。これらは複合して用いることも可能である。この場合、反射波長が相互に一致していなければ、それぞれを独立に

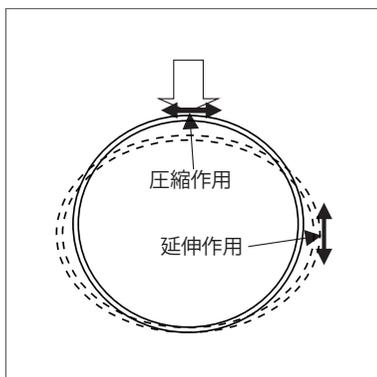
図表—7 複数のFBG センサの結合方式



図表—8 円筒歪センサ



図表—9 円筒歪センサの原理



扱うことができる。また、複数のFBGのうち1つを温度補償用として利用する場合も多い。

## 6. FBG 歪センサ応用

以上述べたFBG歪センシング技術の応用面は、きわめて広いものがあり、枚挙にいとまがないが、いくつか実施例を列挙してみると、

- ① プラント配管歪・振動計測<sup>8)</sup>
- ② 機械設備部材歪計測
- ③ 船舶・タンカー歪計測
- ④ 油槽円周歪計測
- ⑤ 建造物歪計測
- ⑥ コンクリート内部歪計測
- ⑦ 水力発電用ダム堤体歪計測
- ⑧ トンネル壁面歪計測
- ⑨ 橋梁歪計測
- ⑩ 航空機機体歪計測
- ⑪ 原子炉歪計測<sup>9)</sup>
- ⑫ 走行車両軸重による路面歪計測
- ⑬ 寒冷地での低温時路面歪計測
- ⑭ 斜面での土砂崩れ予兆歪計測
- ⑮ その他、1次センサとして歪センサを利用する各種の計測などで実績をあげている。

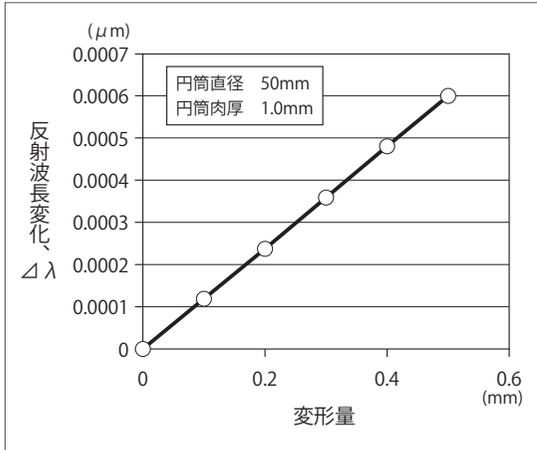
応用にあたっては、上で列挙したFBG計測のさまざまな特徴が有効に生かされており、従来の歪計測技術で対処が困難であった課題を解決する手段として採用されたが、今後も応用面では拡大していくものと期待できる。

図表—8は、著者が提案している円筒形の歪計である。円筒や配管に負荷される外力や内圧での歪を鋭敏に感じとる。図表—9にその動作原理を説明する。

円筒(配管)が外力により歪む場合を考える。外力が作用すると管の表面には、圧縮される部分と延伸される部分が生じる。この両者の位置の外面にFBGを取り付ける。もし、管の内圧が変化して管の全周が延伸すれば、2つのFBGは同相で反射波長は長波長側にシフトする。

一方、管に外圧が負荷されて歪んだときは、一

図表—10 管の変形量とFBG 反射波長変化の関係



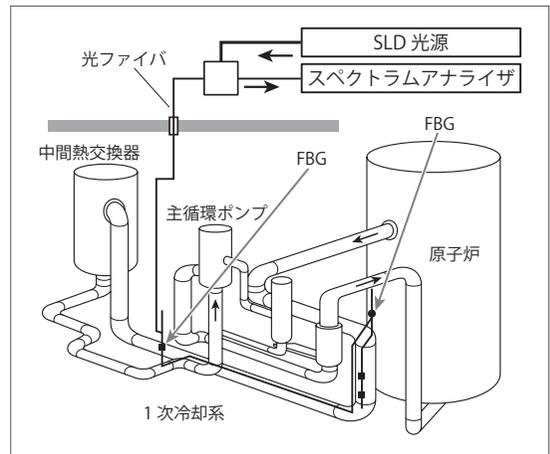
方は圧縮されるから短波長側へ、他方は延伸されるから長波長側へシフトすることから、管の歪状況は識別できる。

図表—10に、管が外力で歪んだ量(変形量)とFBGの反射波長変化の関係を示す。この図は外径5cm、1mm厚のステンレスを想定した理論解析による数値計算結果であるが、実験によってもほぼ同等であることが確認されている。このセンサにより円筒の直径の $0.8\mu\text{m}$ の変化を検知することができる。円周歪感度は $\varepsilon = 0.6\mu\text{ strain}$ である。

図表—11は、同じく著者が提案している両端固定型の歪センサであり、長さ制限がないが、30cmから1m長が実用的サイズである。感度は $\varepsilon = 1 \sim 0.1\mu\text{ strain}$ であり、比較的大型の面や梁に固定して歪の検知に利用する。著者は青函海底トンネル壁面歪計測、橋梁の桁歪み計測などに用いたが、プラントであっても同じような計測ニーズはあると思われる。たとえば重量のある装置やタンクを支える支柱、梁の変形監視に適している。

その他、計測を専門とする企業がFBGを使ったプラントメンテナンス用の計測機器、サービスの展開、あるいはプラント管理の実施例等が報告されている<sup>10)-13)</sup>。図表—12は原子炉の冷却プラントでの実施例である<sup>10)</sup>(資料は独立行政法人日本原子力研究開発機構の提供による)。配管の熱による振動、熱膨張などの検知を行い、配管

図表—11 両端固定型FBG歪センサの例

図表—12 原子カプラントへの設置例<sup>10)</sup>

保全、寿命管理に役立てている。原子炉の場合、放射線に被曝する区域に設置する光ファイバは放射線に耐久性のある特殊なものを使う必要がある。また、高温環境下では、高温用のFBGが必要である。

## 7. まとめ

以上、FBG歪センサに関して、特徴、測定技術の概要、さらに応用等について、FBG歪センサを利用しようと考えている読者に必要な知識を述べた。筆者は日頃より防災への活用を目指して、測定原理研究、フィールド実験による検証などを進めている。今後、読者の手により、プラントの安全管理などの面に活用の途が拓かれ、すぐれた歪センサによって社会全体の安全・安心が高まることが期待される。

## ■参考文献

- 1) 森田, 中村, 桑本, 岩野, 古川; “センシング用FBG”, 昭和電線レビュー, Vol.54, No.2, pp.18-22(2004).
- 2) 成瀬 央; “光ファイバひずみ計測システムの開発と実用化”, 日本機械学会誌, Vol.106, No. 1016, pp.47(2003).
- 3) 倉嶋, 佐藤; “光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測”, 土木学会誌, Vol.82, pp.18-20(1997-12).
- 4) S. T. Vohra, et. al.; “Fiber Bragg Grating Sensor System for Civil Structure Monitoring : Application and Field Tests”, Technical Digest of 13th International Conf. On Optical Fiber Sensors, pp.32-37(1999).
- 5) 小中, 佐々木; “FBGによる歪みセンシングとそれを応用した防災監視システムの開発”, 電子情報通信学会北海道支部シンポジウム, セッション 2-12(2001).
- 6) 平松, 木原, 嶋, 海野, 佐藤; “河川堤防監視用光ファイバセンサの開発及びフィールド実験”, 信学技報, OFT 2000-7, Vol.100, No.84, pp.41-46(2000).
- 7) 出雲, 松田; “FBGを利用した光水位計システム”, 信学技報, OFT2004-124, Vol.104, No.700, pp.43-46(2005).
- 8) Matsuba, K., Ito, C. et al., Development of Fast Reactor Structural Integrity Monitoring Technology Using Optical Fiber Sensors, Journal of Power and Energy Systems, vol.2, no.2, p.545-556(2008).
- 9) 渡辺長深, 瀧澤洋二, 大賀幸治, 大井忠; “原子力発電プラント・フレキシブルメンテナンスシステム(FMS)への取り組み”, 検査技術, Vol.10, No.10(2005).
- 10) “光ファイバで高温・高放射線下の機器の変位や振動を測定する—高速炉プラントの構造健全性監視技術の開発—” 未来を拓く原子力 2008, Vol.14, No.6, p.107(2008).
- 11) 株式会社東京測振のHP等 <http://www.to-soku.co.jp/Optical%20Fiber%20Senson.htm>
- 12) 飛島建設のHP等 <http://www.tobishima.co.jp/news/news071129.htm>
- 13) NTTInfranet のHP等 [http://www.nttinf.co.jp/service/keisoku\\_bousai\\_4.html](http://www.nttinf.co.jp/service/keisoku_bousai_4.html) [http://www.nttinf.co.jp/service/keisoku\\_bousai\\_4.html](http://www.nttinf.co.jp/service/keisoku_bousai_4.html)



**戦略的保全立案に必携!**

# メンテナンス 実態調査

**2008年度** 報告書 (CD-ROM版)

**—実費頒布開始—**

- ◆ 圧倒的ボリューム! 分析302ページ+詳細データ251ページ
- ◆ 3つの集計で、見やすい分析グラフ表示 [回答者全体] [「装置型産業」と「加工組立型産業」別] [人数規模別]
- ◆ 調査結果の要約では、「生産ラインのタイプ別分析」を導入

お申込みは ⇒ <http://www.jipm.or.jp/>