

ファイバーグレーティングを用いた大型構造物のヘルスマニタリング

須崎 嘉文^{*1}・丸 浩 一^{*2}・山口 堅三^{*1}・江島 正毅^{*1}・
岩田 弘^{*3}・横内 孝史^{*4}・水谷 康男^{*5}・岡本 賢二^{*5}

Introduction of Structural Health Monitoring with Fiber Bragg Grating Optic Strain Sensor

Yoshifumi SUZAKI^{*1}, Kouichi MARU^{*2}, Kenzo YAMAGUCHI^{*1}, Seiki EJIMA^{*1}, Hiromu IWATA^{*3}, Takashi YOKOUCHI^{*4}, Yasuo MIZUTANI^{*5} and Kenji OKAMOTO^{*5}

The collapse of large buildings caused by unexpected disturbances or aging is increasing. In order to predict the occurrence of serious accidents, interest has turned to Structural Health Monitoring (SHM) using an optical sensing system. For example, in the Tokyo Gate Bridge and D runway at Haneda International Airport, SHM systems using Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have been introduced. Optical sensing is advantageous for large buildings because it is not affected by electromagnetic noise. In this paper, SHM of large structures using optical fiber FBG sensors is introduced.

Key words: structural health monitoring, fiber Bragg grating, sensor

1996年以降、新幹線の高架橋の老朽化に伴う支柱表面の剥離や鉄筋の露出が問題となり、さらに1998年以降は、トンネル内壁の崩落が何件も起こっている。特に、2012年12月2日午前起きた、山梨県の中央自動車道上下線・笹子トンネルの天井板崩落事故では、重さ1トンの天井板が110mにわたって崩落し、走行中だった車3台が巻き込まれ9人が死亡する大惨事となってしまった。このような事故は比較的新しい構造物でも起きている。例えば2007年1月10日、青森県東通村岩屋の風力発電施設において、25基ある発電用風車のうち1基が鉄塔の根元から倒壊していたのが発見された。鉄塔の高さは68m、プロペラ部分(1枚30m)を含めると約100mとなる、比較的新しい大型構造物である。それにしても、これら大きな事故が起こる前に、その予兆は発見できなかったのか。

一般的には、定期的に外観を観察することにより小さな亀裂を発見するか、あるいは、打音検査によって内部の様

子を予測し、その変化を発見しようとする。しかしながらこれらの方法では、人間の入れない場所、行けない場所の検査を行うことは困難である。また、何かの異常変化が起きた後でないと発見できない。では、大型構造物の内部がどれだけ疲労しているのかを測定し、亀裂や崩壊を事前に予測察知することはできないのだろうか。もちろん、超音波を用いた非破壊検査や打音診断などで保守管理が行われているが、その限界は明らかである。そこで考え出されたのが、大型構造物に加わる外力やひずみを常時測定することによって、内部に蓄積される疲労を予測し、大型構造物の健全性を常時監視することで、危険予測などを行う「ヘルスマニタリング」という考え方である¹⁾。

羽田空港D滑走路では、路面のひずみや脚部の曲げを常時測定するために、また、東京ゲートブリッジでは、橋梁桁の移動等を常時測定するために、光ファイバー、および、ファイバーグレーティング(fiber Bragg grating; FBG)

^{*1} 香川大学工学部材料創造工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20) E-mail: suzaki@eng.kagawa-u.ac.jp

^{*2} 香川大学工学部電子・情報工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

^{*3} 香川高等専門学校機械工学科 (〒761-8058 高松市勅使町 355)

^{*4} 香川高等専門学校通信ネットワーク工学科 (〒769-1192 三豊市詫間町香田 551)

^{*5} 伸興電線(株)光デバイス開発部 (〒769-2101 さぬき市志度 1298-12)

を用いた光センシングシステムを導入し、ヘルスマonitoringを行っている。また、鉄道軌道のヘルスマonitoringを目的として、軌道の変位を測定するためのセンサーシステムも開発されている。本解説では、このFBGを用いた光センシング技術、および、大型構造物のヘルスマonitoringへの応用について紹介する。

1. 構造物のヘルスマonitoring

本来、ヘルスマonitoringとは人間の健康を対象とした医療関係の用語であるが、近年、大型構造物の健全性の監視を表す用語としても用いられるようになってきた。これは構造ヘルスマonitoring (structural health monitoring; SHM) とよばれ、土木、航空、船舶、機械、自動車、原子力、建物、電子、計測などのさまざまな分野の横断的な分野として大きく成長している²⁾。SHMの基本的な考え方は、大型構造物の健全性を自動的にセンシングし、そのデータを蓄積し、解析することである。従来の大型構造物の保守管理手法とは、定期的な点検、あるいは、何か問題があったときに検査診断を実施するというやり方であった。そのために、目視観察や打音診断のほかにも各種測定手法や非破壊検査技術がさかんに開発されてはいるものの、従来の保守管理手法の限界は明らかとなっている。したがって、大型構造物の健全性を常時測定監視するSHMへの変更が求められている。しかしながら、電気的なひずみセンサーを用いた構造物のひずみの測定や、アコースティックエミッション (acoustic emission; AE) 法を用いた構造物の損傷診断などの非破壊検査技術をそのままSHMへ応用しようとする、常時測定のための膨大な数のセンサーが必要であり、また、その耐久性、信頼性、維持管理費用の問題があり、そう簡単にはできない。そこで、光ファイバーによる光センシングを用いたSHMへの関心が高まった。

2. 光ファイバーセンシング

SHMシステムを構築するには、各種目的に応じたセンサーを構造物の各所に配置し、それらにより検出される電気信号を1か所に集約する必要がある。光ファイバーは直径が約0.1 mmと細く、単純な構造のセンサーを作製できる特徴をもつため、有利である。また、①センサー部に光を入射し、反射光あるいは透過光を検波するので、センサー部に電力を供給する必要がない、②線状の測定、さらに、網状 (面的) の測定をすることが可能である、③自然界の雷などの害、あるいは、都市部における電磁ノイズの影響を受けないため、電磁ノイズや防爆に関する対策

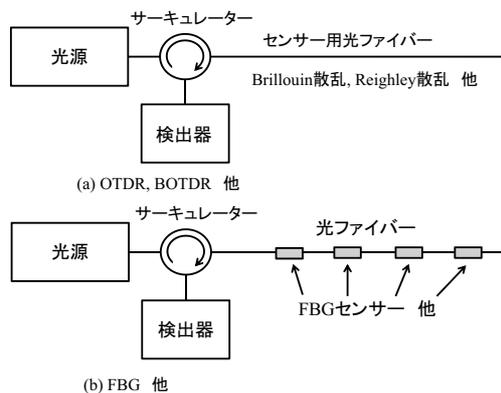


図1 光ファイバーセンシングシステムの概略。
(a) 分布型センサー、(b) 多点型センサー。

を必要としない、④耐久性があり、長期にわたる安定した測定が可能である、⑤光ファイバーを接続して、センサーを追加したり、光チャンネルセレクターを増設することにより、容易にシステムを拡張し、多様化でき、複数の構造物を監視することができる、⑥センサー信号の長距離伝送が容易である、などの優位性から、光ファイバーセンシングは大型構造物のMonitoringに有効な手段として、近年脚光を浴びている。

光ファイバーを用いたセンシング方法は、分布型と多点型センサーに大別できる。図1に、両者の光ファイバーセンシングシステムの概略を示す。図1(a)に示した分布型センサーには、OTDR (optical time domain reflectometer) 方式やBOTDR (Brillouin optical time domain reflectometry) 方式などがある。これらの方法は、光パルスを用い、レイリー散乱やブリュアン散乱の性質を利用したもので、1本のファイバーに沿って連続的な測定が可能である。一方、図1(b)に示した多点型センサーにはFBG方式がある。これは、1本のファイバーの数か所にFBG素子 (長さ数mm～数cm) を配置したもので、数 μ ストレイン程度の計測精度で測定でき、分布型よりも計測精度が高い。また、分布型の測定時間が数分程度であるのに対して、FBG方式は測定時間が1000分の1秒と短く、ほぼリアルタイムにひずみの変化を測定できる特徴がある。大型構造物のヘルスマonitoringを行うには、これら両方式を組み合わせ、それぞれの特徴を生かした測定が必要である。

3. FBG ひずみセンサー

FBGは非常に鋭い狭帯域反射スペクトルを有することから、光通信システムの光フィルター、および、ファイバーレーザーキャビティーなどに利用されるほか、ファイバーセンサーとしても利用される光ファイバーデバイスである。図2にFBGの原理を示す。FBGは、光ファイバー

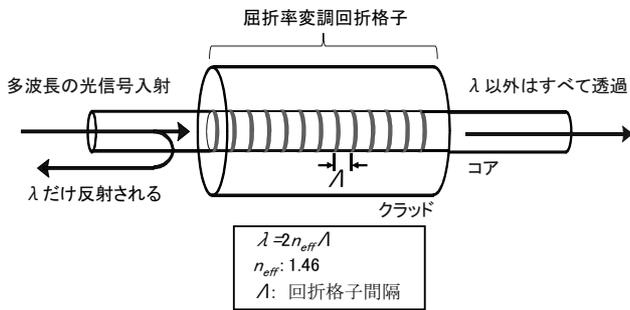


図2 FBGの原理.

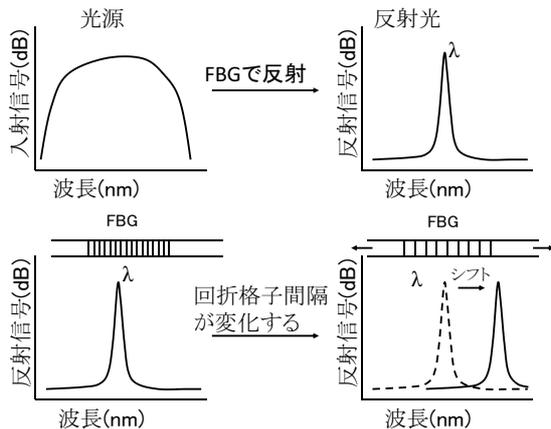


図3 FBGのひずみ測定原理.

コアの長手方向に屈折率変調（周期構造）をもたせたものである。この周期構造が入射光に対して回折格子として働くため、周期長 Λ に合致した波長 λ の光のみが反射される。反射光の波長 λ は次式で表される。

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

ここで、 n_{eff} は光ファイバーコアの有効屈折率である。図3にFBGを用いたひずみ測定原理を示す。FBGに光源から

の連続光を入射するとほとんどの光は透過するが、特定の波長 λ の光のみが反射される。このとき、光ファイバーにテンションをかけるとひずみが生じ、周期長 Λ が増加するため、FBGの反射光波長が長波長側にシフトする。したがって、この反射光の波長を測定することによって、光ファイバーにかけたテンションを知ることができる。すなわち、このFBGを被測定物に貼り付けることで、その点のひずみを測定するシンプルなセンサーとして応用することができる。さらに、1本の光ファイバーに、反射光波長の異なるFBGを数個連結すると、反射光スペクトルにはFBGの個数に応じたピークが得られるので、多点測定が可能となる。電気式のひずみセンサーを用いる場合、多数のセンサーを設置すると、それらの数に応じた多くの信号線が必要となるわけだから、1本の光ファイバーで多点測定できるというこの利点はかなり大きい。

4. 二光束干渉法を用いたFBGの作製

FBGは、光ファイバーコア内部に屈折率の周期構造を有している。この周期構造は一般的に、Geドープの光ファイバーに紫外線レーザー光を照射することによる光誘起屈折率変化を用いることで作製する。屈折率はわずか0.3%程度の上昇である。この際、周期長が $0.5 \mu\text{m}$ 程度と非常に短いため、位相マスクを通して得られる干渉光を用いて作製する。一般に用いられる位相マスク法は光学系が非常にシンプルであるが、1つの波長について1つの位相マスクを必要とするため、コストが大きくなる。われわれの共同研究グループは、この問題を解決するために二光束干渉法を用いた製造方法を確立した³⁾。

図4に位相マスク法、および、二光束干渉法を用いた

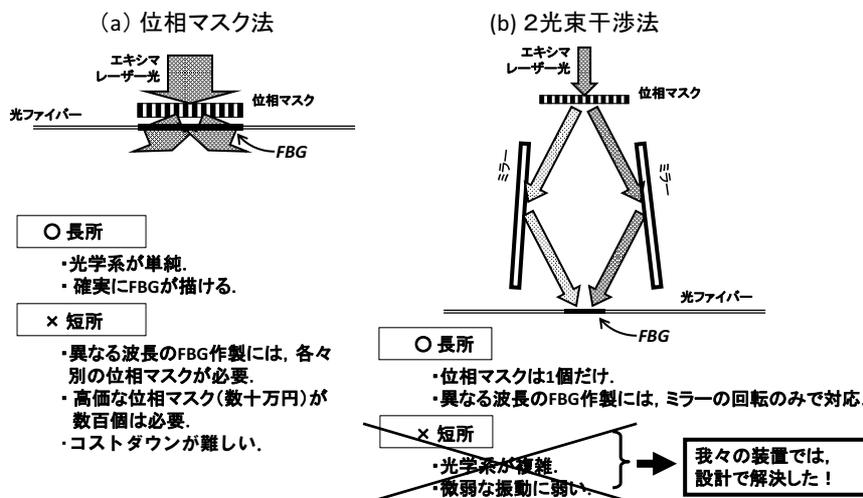


図4 従来のFBG作製方法とわれわれの二光束干渉法の比較.

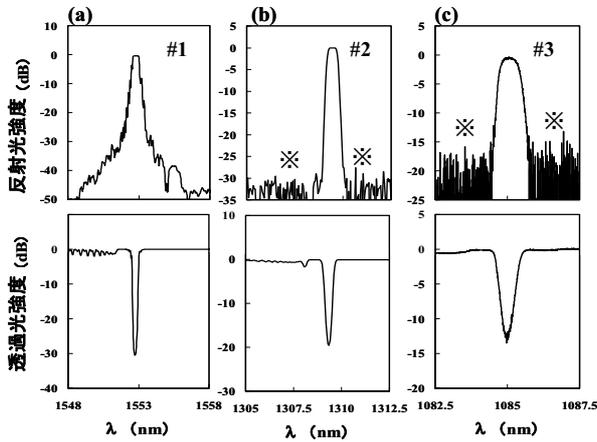


図5 典型的なFBGからの反射光, および, 透過光スペクトル⁴⁾. (a) 位相マスク法によってアポダイゼーションなしで作製したFBG. (b), (c) 二光束干渉法によってアポダイゼーションありで作製したFBG. 図中※で示した部分の信号強度が十分低くサイドローブがないことがわかる.

FBG 作製方法の比較を示す. 位相マスク法では, 光ファイバーを位相マスクの直下に配置し, 位相マスクを通して紫外線レーザー光を照射する. このとき, 2方向に分かれた±1次の回折光がその直下の光ファイバー上に照射され, 干渉縞ができることでFBGを作製する. 一方, 二光束干渉法においては, 位相マスクを通して2方向に分かれた±1次の回折光が左右対称に配置したミラーで反射され, 光ファイバー上で再度重なり, 干渉縞を作り出すことでFBGを作製する. この場合, 左右のミラーの反射角度を調整することによって干渉縞の間隔を自由に変えることができ, さまざまな波長のFBGを1つの位相マスクから低コストで作製することができる.

さらに, 二光束干渉法で作製したFBGには大きな特徴がある. 図5 (a)~(c)に, 典型的なFBGの反射光, および, 透過光スペクトルの比較を示す⁴⁾. 図5 (a)は位相マスク法によって作製したFBGの結果である. 反射光スペクトルにおいて, 一番高いピークの両側にサイドローブがみられる. これは, 位相マスク法によって作製されたFBG内の屈折率変調の形状が矩形になるためである. このサイドローブの強度を抑えるためには, 屈折率変調にアポダイゼーションをつければよいことが一般に知られているが, これを実現するには, 照射する紫外光について場所による強度分布をつけるなど, 作製上の工夫を凝らす必要がある. 一方, 図5 (b), (c)は, 二光束干渉法で作製したFBGの結果であり, いずれもサイドローブが抑えられている (図中※で示した部分). これは, FBGの作製に比較的小さいコヒーレンス長の短いKrFエキシマレーザーの紫外光を用い, また, 反射ミラーを回転することによってでき

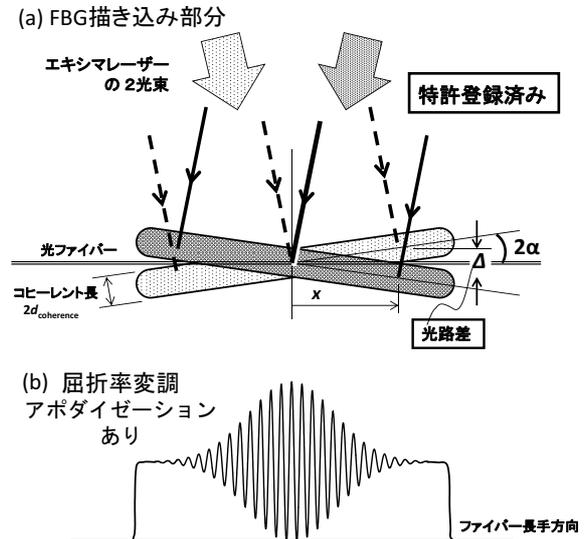


図6 二光束干渉法における自動アポダイゼーションの原理⁵⁾.

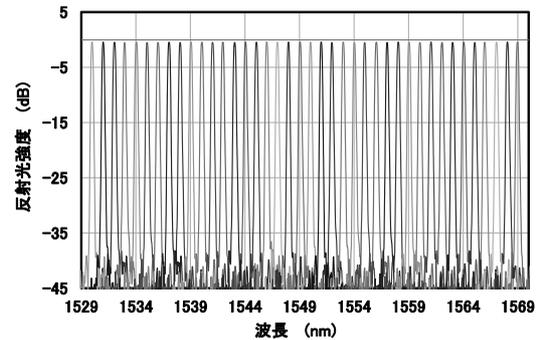


図7 多波長FBGの反射光スペクトル (40チャンネル).

る, 非常に効果的な自動アポダイゼーション⁵⁾を利用したためである. 図6に二光束干渉法における自動アポダイゼーションの原理を示す. 図6 (a)にFBG書き込み部分の概略を示す. 二光束干渉法によって光ファイバー上に干渉縞を作り出す場合, 位相マスクを通して生じた回折光は左右のミラーで反射して光ファイバーの位置で斜めに交差する. その中央部では左右から来る光の光路長が等しいので, 干渉による屈折率変調の振幅は大きくなる. 一方, 中央から離れた部分においては, 左右から来る光の光路長が少し異なるため干渉が弱くなり, 屈折率変調の振幅が小さくなる. 結果的に, FBGにおける屈折率変調は図6 (b)のようにアポダイゼーションありの形状になり, 得られたFBGの反射スペクトルは図5 (b), (c)に示したようなサイドローブが小さくなる特徴が生まれる. われわれの作製した, 少しずつ反射波長の異なる40チャンネルのFBGの典型的な反射スペクトルを図7に示す. 1 nm間隔で反射波長を変えたFBGを作製したが, サイドローブが小さいため, 反射波長のピークが明確に区別できる. もしここでサ

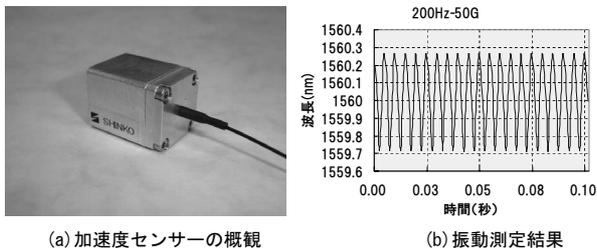


図8 FBG を利用した加速度センサー (伸興電線(株) 製) の概観および振動測定結果. 電源の供給は要らない. 入出力は光ファイバー 1 本のみ.

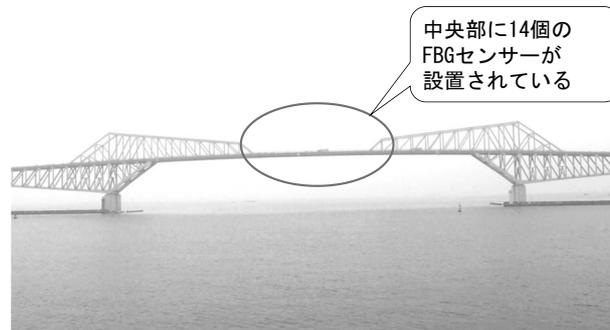


図9 FBG センサーを設置した東京ゲートブリッジの概観.

イドロブが高いと、隣同士のこの反射波長が区別できなくなるのは明らかである。

5. FBG のセンサー応用

FBG は、基本的にひずみを測定することのできる素子であり、各種センサーに応用することができる。図8 (a) に加速度センサーの概観を示す。このセンサー内部には、先端に錘を取り付けた板ばね振り子があり、この板ばねの表面に FBG を貼り付けている。このセンサーを板ばね表面に垂直な方向へ単振動させると、図8 (b) のような信号が得られる。この結果は、200 Hz で振幅 50 G の振動を与えた場合のもので、反射光波長の測定にはひずみセンシング測定器 (マイクロンオプティクス社製, sm130) を用いた。波長の測定間隔は 1000 分の 1 秒であり、加速度センサーの振動を精密に測定できたことがわかる。その他の応用として、水位センサー、圧力センサー、電流センサー⁶⁾ などが考案されている。

6. FBG を利用した構造ヘルスマニタリングの例

大型構造物の SHM の必要性が高まる中、いろいろな種類のセンサーを組み合わせた常時モニタリングシステムが作製されている。FBG についてもその特徴を生かした利用が始まっている。以下に、その利用例を示す。

6.1 羽田空港 D 滑走路

羽田空港の D 滑走路は、従来の空港の沖合に埋め立て工法と栈橋工法を組み合わせで建設され、2010 年より運用が開始された。これは国内初の海上空港であり、滑走路の途中で栈橋部と埋め立て部が接続する異種構造物である。埋め立て部は地盤改良等により沈下量を最小限に抑える設計となつてはいるが、埋め立て部と栈橋部の構造の違いのため、接続部の段差は避けられない。したがって、今後の地盤沈下による滑走路の段差を適宜補修していく必要がある。一方、離着陸時の高速走行 (大型機では時速約 300 km に達する) でも機体の揺れが抑えられるように、滑走

路表面の凹凸をきわめて少なくする必要がある。このような状況を踏まえ、FBG ひずみセンサーと BOTDR センサーを組み合わせた、光計測による SHM システムが導入された。

6.2 東京ゲートブリッジ

東京ゲートブリッジは 2012 年 2 月 12 日に開通した。図9 にその概観を示す。この橋の主橋梁はトラス構造 (最大支間長 440 m) の長大橋である。この橋は国の事業として、設計思想のひとつ「共用年数 100 年以上の実現」を目標に技術的な検討が行われた。設計法、新素材について最新の知見を用いたのはもちろん、世界最大の機能分離型免震支承を採用しており、この支承が設計のとおり挙動することを監視するため、SHM の導入が必要であると考えられた。モニタリングは多岐にわたり、雨量計、風向風速計、変位計、加速度計、地震計、FBG 式変位計、FBG 式加速度計、そして、FBG ひずみセンサーによる常時モニタリングである。また、モニタリング位置は、大規模地震時の損傷過程のシミュレーションを行うことによって割り出した必要箇所にセンサーを配置した⁷⁾。

本橋は鋼床板構造であり、たわみが大きくなる中央径間に FBG ひずみセンサーを設置し、常時 24 時間、光を用いて伸縮・ひずみの測定、および、記録 (SHM) を行う。このデータの蓄積によって、橋の疲労の度合いを監視することができ、いつ修復する必要があるか、また、橋の寿命はどうかを推測することができる。また、地震・津波などの災害時にも、自動記録されている計測データを利用することによって、橋のどの部分がどれくらいの影響を受けたかを把握し、橋の閉鎖の要・不要の判断、また、補修工事の必要性などをただちに判断できる。従来の技術では、災害の後、橋の各所の点検に長い時間が無駄にかかってしまい、橋が使えるか否かの判断が遅くなり、その後の復旧活動が大きく遅れてしまう。

さらに、FBG ひずみセンサーは交通荷重を測定する方法としても用いられている。車両が橋梁上を通過した時に

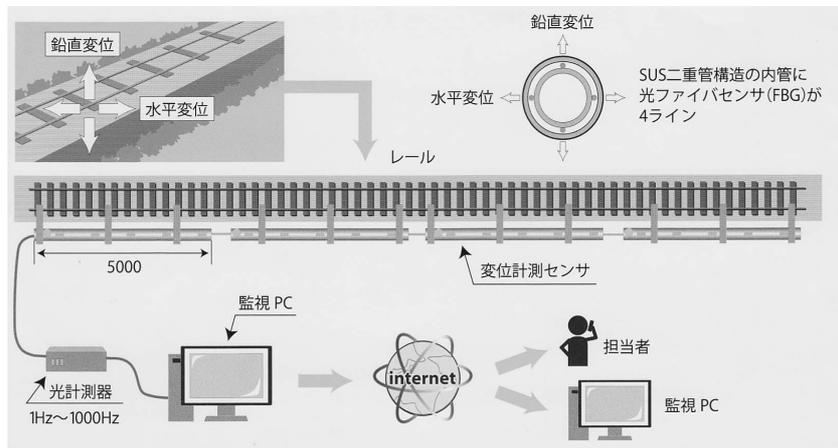


図10 長体構造物（鉄道，橋梁，トンネルなど）の鉛直・垂直変位，および，振動を同時に測定できるシステム，DIMRO（displacement measurement of rail / road trucks using optical fiber sensing technology）の概要。NTT インフラネット（株），東鉄工業（株），および名工建設（株）が共同開発し，センサー部分は伸興電線（株）が委託製造する。DIMRO カタログ（2013）より。

生じる橋梁部材のひずみから逆解析によって車両重量を算出する，weigh-in-motion（WIM）とよばれる手法である。WIMは1970年代に Moses⁸⁾によって提案されたもので，車両が走行している状態でその荷重を測定することができるため，交通流を乱すことがないという利点がある。本橋においては，車重に応じた大型車台数を算出することができ，20トンから10トン刻みで70トン以上まで判別することが可能である。施設管理者はこの交通量を監視することで，曜日，時間帯などにおける超重量車両の交通特性を把握できるため，通行規制や取り締まりの強化などの方策が立案可能となった⁹⁾。

東京ゲートブリッジは，最新のモニタリングシステムを必要最小限の初期投資コストで設置し，供用を開始しているところであり，全国の橋梁で生じている諸課題や更新時

期を迎える橋梁への参考となる部分が大いいと期待されている。

6.3 長体構造物の変位・振動計測システム

鉄道の軌道について，アンダーパスなどの工事で列車を通しながら軌道下を掘削する場合，軌道の変位をリアルタイムでモニタリングすることにより，変位が一定の値を越えた場合に列車を止めるなど，施工時の軌道の変位をモニタリングする技術は安全管理に大変重要である。図10に，長体構造物（鉄道，橋梁，トンネルなど）の鉛直・垂直変位，および，振動を同時に測定できるシステム，DIMRO（displacement measurement of rail / road trucks using optical fiber sensing technology）の概要を示す。DIMROはステンレス製二重管構造で，1本5mのものを10本1ユニットとして構築する。内管の4方向にFBGを貼り付け

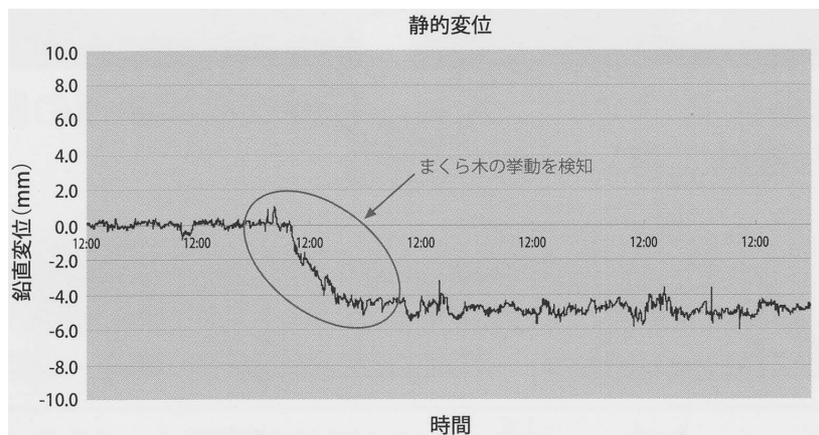


図11 軌道の変位（鉛直方向）のモニタリング結果。まくら木の沈下とその時刻が測定できている。DIMRO カタログ（2013）より。

ることで、鉛直・水平変位を測定できる。外管により FBG を保護する構造となっていて、センサーの寿命の向上、および、測定の安定性を高めている。このセンサーを軌道取り付けることによって、軌道の変位の常時モニタリング（静的計測）を行うことができる。図 11 に測定例を示す。上述したように、軌道の変位をモニタリングしながら各種工事・施工を行うことは、安全管理に大変有用である。通常の FBG 単体では貼り付けが困難であるような箇所へ、この棒状の構造を有効に利用して設置することによって、応用範囲の広がりが期待できる。

近年、要求の高まっている SHM について紹介し、光ファイバーセンシングの有効性について述べた。また、われわれの開発した二光束干渉法を用いた FBG 作製方法、および、FBG の特徴について解説し、大型構造物のヘルスマニタリングについて実施例を紹介した。

最後に今後の課題であるが、光ファイバーセンサーのもつべき特性としては、測定したい物性を光ファイバーに的確に伝える構造が最重要であることはもちろん、センサーとしての働きを阻害しない保護構造が重要である。そして、被測定物への FBG の貼り付けはノウハウをもって確実に行うことが重要であるが、被測定物によっては貼り付けが容易ではない場合もある。最後に紹介した DIMRO のような、ハンドリングが比較的容易で施工がしやすく、耐

久性に配慮したセンサー構造の開発も、今後重要となってくるであろう。

本解説執筆にあたり、DIMRO カタログ資料をご提供いただいた NTT インフラネット(株) に感謝します。

文 献

- 1) 呉 智深, 許 斌, 原田隆郎: “都市インフラに関する構造ヘルスマニタリングの現状と展望—展望論文—”, 応用力学論文集, **6** (2003) 1043-1054.
- 2) C. Boller, F. K. Chang and Y. Fujino: *Encyclopedia of Health Monitoring*, Vols. 1-5 (Wiley, Hoboken, 2009).
- 3) 江島正毅, 須崎嘉文, 水谷康男, 木村 進, 山内 誠, 木村雅則, 岩田 弘: 特許登録 4543128, 平 22.7.9.
- 4) Y. Suzaki, H. Iwata, K. Nakayama, Y. Mizutani, M. Yamauchi, E. Izumikawa, T. Yokouchi and S. Ejima: “Apodization method owing to the finite length of UV laser coherence in fabricating fiber Bragg grating,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 9100-9102.
- 5) 岩田 弘, 安藤真紀, 中山恵介, 溝淵博紀, 泉川栄二, 水谷康男, 横内孝史, 須崎嘉文, 江島正毅: “二光束干渉計を用いて作製したファイバーブラッググレーティングの反射特性におけるアポダイゼーション”, *光学*, **37** (2008) 186-193.
- 6) 柴田顕次, 今岡 功, 須崎嘉文, 中川 清, 岩田 弘, 横内孝史: 特公 2011-169125.
- 7) 鈴木啓悟, 三木千壽, 田辺篤史: “長大橋の総合モニタリング構築へ向けた異常時モニタリング手法”, 土木学会第 61 回年次学術講演会論文集 (2006) 1215-1216.
- 8) F. Moses: “Weigh-in-motion system using instrumented bridges,” *Am. Soc. Civil Eng.*, **105** (1979) 233-249.
- 9) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: “リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング”, 土木学会論文集, **773** (2004) 99-111.

(2013 年 9 月 9 日受理)