



# 光ファイバ ブラッグ グレーティング (FBG) を利用した各種の防災用センサ

齋藤 健一

光ファイバは通信用伝送路として、また最近では家庭のインターネット回線など極めて身近なインフラになってきた。一方、光ファイバは通信用以外に、ライトガイド、レーザーメスのエネルギー伝送、あるいはファイバ周囲の物理・化学情報を検知する光センサの機能を持ち、近年それらの実用化が革新的に進められた。本稿では、光ファイバセンサ技術を解説すると共に、その中で高精度な計測に適したFBG (Fiber Bragg Grating:ファイバ ブラッグ グレーティング) を利用した各種の防災用センサを紹介する。

キーワード：光ファイバ、光ファイバセンサ、防災、FBG、河川、道路、砂防、ダム

## 1. はじめに

光ファイバセンサは、光ファイバの開発初期から盛んに研究され、その歴史は長いですが、実用設備としての適用は最近である。

光ファイバセンサの種類は、測定範囲が連続かポイントかで2種類に分類される。布設された光ファイバの長さ方向に連続的なセンシングを行う光ファイバセンサを「分布型センサ」という。分布型センサは光ファイバの形状および光学的な特徴を利用したものである。分布型センサにはレーリ、ラマンおよびブリルアンの散乱現象を利用したものがある。

一方、光ファイバの先端や中間にセンサ部を設けたものを「ポイント型センサ」という。ポイント型センサには、光ファイバの形状および光学的な特徴を利用したものや、光ファイバ以外の要素技術を組み合わせたものなど各種提案されている。ポイント型センサには、本稿で紹介するFBGの他、パッシブ型センサ等がある。

これらの原理を用いて計測できる物理・化学項目は多岐にわたるが、代表的には下記が挙げられる。

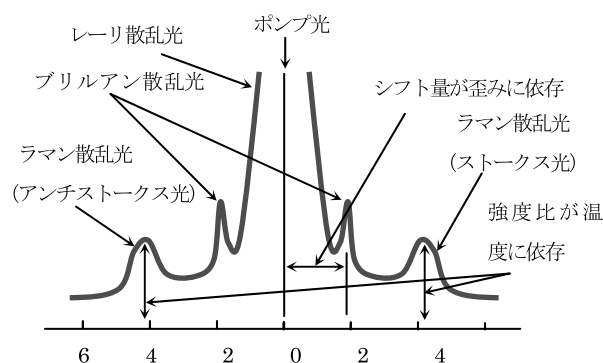
- ・温度
- ・圧力
- ・歪み電界 (電圧)
- ・磁界 (電流)
- ・速度
- ・振動
- ・角速度
- ・ガス
- ・水分
- ・塩分
- ・放射線
- ・接点 (ON-OFF)

## 2. 光ファイバセンサの計測原理

光ファイバセンサの計測原理の概要を述べる。

図—1は、分布型センサに用いられる各種散乱現象を模式的に表したもので、横軸は散乱光の波長を、縦軸は強度を現している。

ポンプ光とは光源から送出する光で、レーリ散乱では散乱光の波長は変化せず、ラマン散乱とブリルアン散乱は、ポンプ光の前後にシフトした散乱光が発生する。



図—1 各散乱光の波長シフト図

### (1) レーリ散乱

光ファイバは、製造過程で僅かな密度や寸法変動が発生、ここを光が通過すると屈折・散乱され、一部が入射端に戻る。これをレーリ散乱という。

レーリ散乱を応用するセンサは、外力により光ファイバに強制的な曲がりや破断を発生させ、それに伴う散乱光を計測する。光を送出し、戻るまで時間軸で散乱光量を順次計測することで、光ファイバ長さ方向任意位置での外力発生を検知できる。

## (2) ラマン散乱

光がガラスの分子振動で発生するエネルギーを受け、入力端に戻る光を後方ラマン散乱光という。光は分子振動で短波長（ストークス光）と長波長（アンチストークス光）にずれ、その強度比は温度の違いによる分子振動に依存する。

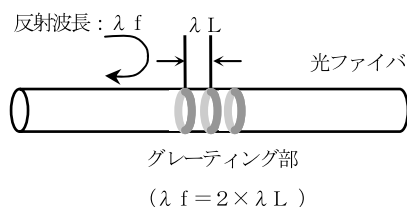
光を送出、戻るまで時間軸で散乱光を順次計測することで、光ファイバの長さ方向に連続した光ファイバの現在温度が計測できる。

## (3) ブリルアン散乱

光通過で光ファイバ内部に電界変動が発生、高電界部では光ファイバの密度（体積）が増加する。光ファイバが長さ方向で体積変動し、縦振動となり、この振動エネルギー授受で、短波長及び長波長側に周波数がシフトした散乱光が発生する。これをブリルアン散乱光という。光ファイバが歪みを受ける部分では、歪みによる拘束力で体積変化量が異なり、縦振動も変化し、散乱光の周波数シフト量が異なる。このシフト量の計測で、光ファイバが受ける歪み量が長さ方向に連続して求められる。

## (4) FBG

図一2のように、光ファイバの断面方向に一定間隔でガラスの屈折率が異なる部分（グレーティング部）を設ける。このグレーティング部は、入射パルス光のうち、グレーティング間隔の2倍の波長成分のみを共振反射させる特性がある。この反射光の波長は、グレーティング部の伸び歪み量に比例してシフトするので、反射光の波長シフト量を測定することで、温度変化や伸び歪み量などの計測が可能となる。

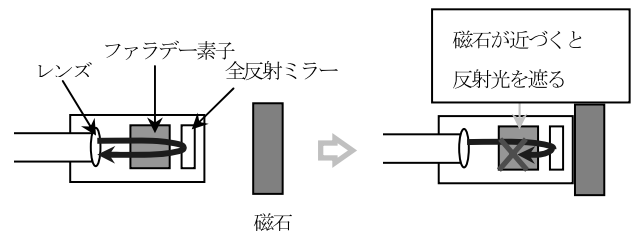


図一2 FBGの原理

## (5) パッシブ型センサ

光ファイバにパルス光を入射し、光ファイバの先端に設けた全反射ミラーによる反射光の有無を測定する。センサ内には、図一3のような反射光を遮断する機構があり、遮断機構の動作によるON/OFF状態を計測する。センサは光カプラなどで分岐し、1台の測定装置で複数センサの接続が可能であり、多地点

のON/OFF状態の計測ができる。



図一3 パッシブ型センサの原理

## 3. 光ファイバセンサの特徴

光ファイバセンサの特徴には次の点が挙げられる。

- ①長距離（分布）計測が可能である。
- ②無電源で計測でき、遠隔監視が可能である。
- ③化学的に安定した材料で長期の使用に耐えられる。
- ④誘導がない（雷に強い）。

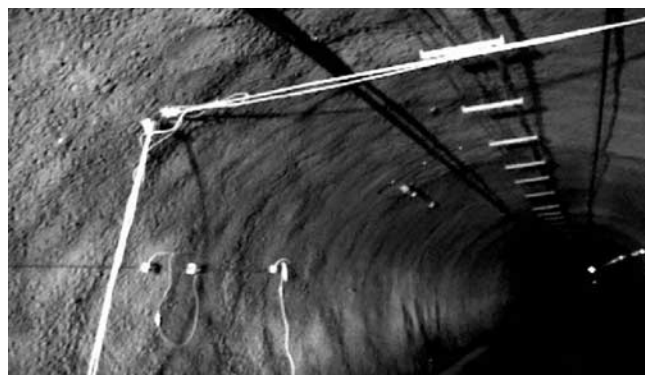
## 4. FBG 光ファイバセンサの施工事例と特徴

光センサで最も高感度な計測ができるFBGセンサシステムを、河川、道路あるいは砂防分野における遠隔広域監視の設置例を中心に紹介する。

### (1) トンネル歪み計測

写真一1, 2に青函トンネル作業坑の計測状況を示す。本坑に平行する作業坑の断面に対して水平、垂直方向および距離方向に、ステンレスパイプにFBGを内蔵したセンサを設置している。列車や潮の干満、地震時の発生歪を連続モニタリングするシステムである。構造物の連続モニタリングで、設備劣化の早期把握、地震等の異状をリアルタイムに監視ができ、設備の維持・監視の高度化、管理コストの縮減につながるものである。

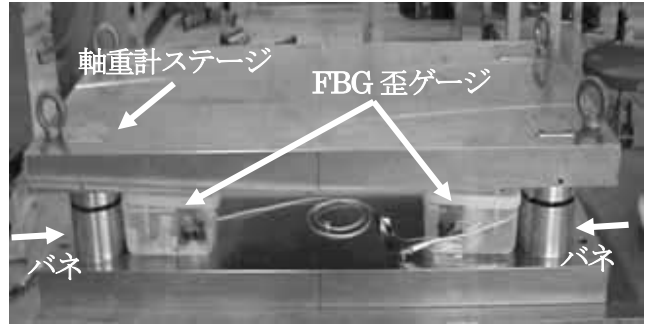
写真一3は、監視画面の例である。断面の3軸計



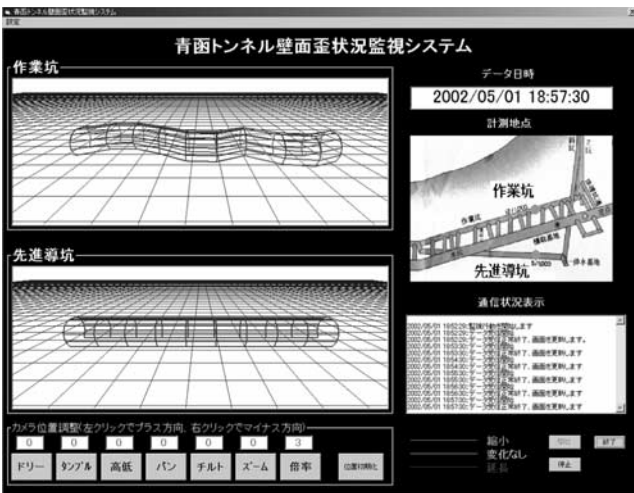
写真一1 水平・垂直方向センサの設置状況



写真一 距離方向センサの設置状況



写真五 車両軸重センサの構造



写真三 3D表示画像



写真六 車両通過状況とセンサ設置状況

測で、3D 画像による視覚的な観察を可能にした。

### (2) 橋梁歪み計測

道路橋や鉄道橋は長期間の繰り返しの振動、車両重量による歪みで、クラックなど疲労劣化が発生する。これが起因となる事故は被害甚大であるため、劣化進行の定期的な監視と管理が重要である。特に鉄道橋は、電車線の誘導障害で電気方式の測定は難しく、電磁誘導の無い光ファイバセンサが極めて有効な手段となる。

写真一 4 は監視中の道路橋とセンサの設置状況、



写真四 クラック監視中の道路橋

並びにセンサの外観である。FBG はステンレスパイプ内に收容されている。

### (3) 車両軸重計測

道路の舗装設計や維持管理方法の研究のため、路面への接地圧力を3次元で解析する装置である。圧力計測部を道路に埋設、センサ信号をリアルタイムで処理、荷重の時間変化と時間推移から、通過車輪の軸重、前後輪の軸間隔から車両の大きさ、走行速度、走行位置、前後車両との間隔、更にはそれらを総合し通行車両の大きさや通行台数の計測など、トラフィックカウンターを高度機能化する用途にも応用できる。

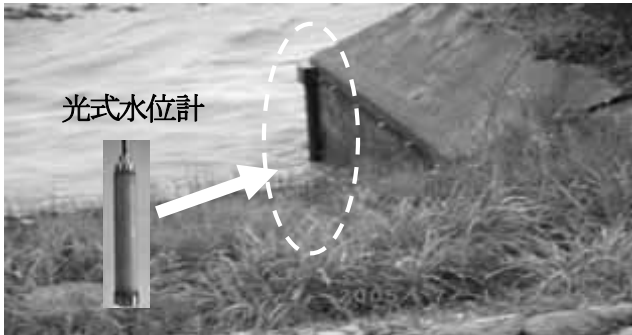
写真一 5 に車両軸重センサの構造を、写真一 6 に設置状況と車両通過状況を示す。

### (4) 河川水位計測

河川水位は重要な監視項目だが、従来設備は規模が大きいものや、事務所にデータを伝送する設備に費用を要するため、1～2箇所の基準点観測所で、出水の予想や現場対応を行っている。一方、近年河川管理高度化を目的に、河川光ファイバケーブル整備が急速に進み現在1級河川では概ね片岸へ設置された。また、FBG 光式水位計の実用化が進み、光ファイバケーブルに接続するだけで遠隔から無電源、リアルタイムの計測ができるようになった。さらには、従来コスト的に困難であった200m～1kmピッチなど縦断方向に連続して水位を計測できる環境も整った。

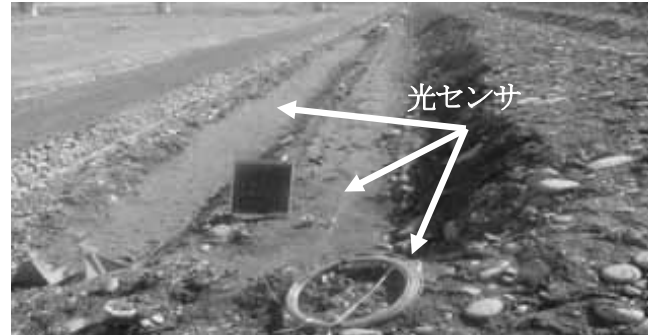
写真一七に光式水位計の外観と設置例を示す。

光式水位計は1台の光計測機器を多数の水位計が共用でき、水位計数の多い大規模システムでは従来の電気式に比べかなりのコスト縮減が実現する。



写真一七 光式水位センサ外観と施工状況

程度とやや時間を必要とするが、レーリ散乱は光測定機器とセンサ部分が比較的安価であるため、河川の縦断方向を長距離に検知を行うシステムに適した方式と考えられる。



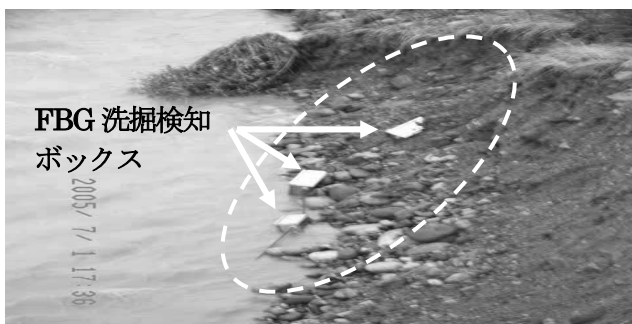
写真一九 堤体侵食検知センサ（埋設中）

#### (5) 堤防侵食位置計測

河川災害で最も警戒が必要な項目に、堤防本体の侵食や、その前兆現象として多く発生する高水敷の洗掘現象がある。その発生は出水時の濁流下、時として夜間など悪条件が重なる場合が多い。この現象は土中での発生が端緒となるが、電気式設備の埋設は困難で効果的な検知手段は皆無であるため、従来の対応は、職員が現場に急行、危険の中、目視で確認を行っていた。これに対し、光ファイバセンサは無電源で計測できることから、これを高水敷や堤体に埋設し、濁流下の土砂の動きをリアルタイムに検知する方式が開発された。本方式は複数の河川で堤防本体の侵食や高水敷洗掘検知に採用され始めている。写真一八は高水敷洗掘検知センサが洗掘を捉えた状況である。

この洗掘検知センサは、従来の電気方式では実現が困難であった領域で、正に光ファイバセンサの特徴を生かしたシステムといえる。

また、類似システムとして、写真一九にレーリ散乱を用いた施工例を示す。FBGの検知時間は数秒以内とリアルタイムであるのに対し、レーリ散乱は数分



写真一八 高水敷洗掘検知センサ（検知状況）

#### (6) 砂防ダム堆砂量計測

砂防ダム堤体内への土石流による土砂の堆積はダム機能を大きく損う。従って、いち早く堆砂状態を把握することが重要である。しかし、災害発生が予測される悪条件の中、特に山奥の砂防ダム状況のリアルタイムの把握は現実的に困難な状況にあった。また、それらの地域では電源確保や無線通信もできない場合が多く、危険を伴い、また時間をかける人的対応の手段しか無い状況にあった。

その解決策として、遠隔から無電源で状況把握のできる光方式の砂防ダム堆砂センサを用い管理機能を高度化させるシステム構築がなされ始めている。

写真一十に光堆砂センサの設置状況、また写真一十一に検知したときの堆砂状況を示す。



写真一十 堆砂センサ設置状況



写真一十一 同検知状況

## 4. おわりに

光ファイバをセンサとして利用する研究開発は古くから試みられてきたが、最近、屋外の光ファイバケーブルというインフラの整備が進んだことや、125ミクロンという髪の毛ほどの細さで扱いに注意を要する光ファイバをセンサとして利用する加工技術が進歩し、更には測定機器をはじめ周辺技術の向上と価格の低減などが相まって、光ファイバセンサは漸く普及の段階に入ってきたと考えられる。

光ファイバセンサは、無電源で使用でき、雷に強く、遠隔から計測できるなどの優れた特徴を持っており、

今後も各方面のニーズやシーズを発掘しながら、我々の安全・安心な生活に欠かせない管理・監視手段に成長して行くものと期待されている。本稿への皆様のご意見を下記アドレスにお寄せ頂ければ幸いです。

(saitoh@advanced-technology.co.jp)

JCMA

### 【筆者紹介】

齋藤 健一 (さいとう けんいち)  
株式会社 アドヴァンストテクノロジー  
東京支店長



## 建設機械施工安全技術指針 指針本文とその解説(改訂版)

### ◆「指針本文とその解説」目次

#### 第I編 総論

- 第1章：目的
- 第2章：適用範囲
- 第3章：安全対策の基本事項
- 第4章：安全関係法令

#### 第II編 共通事項

- 第5章：現地調査
- 第6章：施工計画
- 第7章：現場管理
- 第8章：建設機械の一般管理
- 第9章：建設機械の搬送
- 第10章：賃貸機械等の使用

#### 第III編 各種作業

- 第11章：掘削工，積込工
- 第12章：運搬工
- 第13章：締固工
- 第14章：仮締切工，土留・支保工
- 第15章：基礎工，地盤改良工
- 第16章：クレーン工，リフト工等

第17章：コンクリート工

第18章：構造物取壊し工

第19章：舗装工

第20章：トンネル工

第21章：シールド掘進工，推進工

第22章：道路維持修繕工

第23章：橋梁工

● A5版 / 330頁

● 定 価

非会員：3,360円（本体3,200円）

会 員：2,800円（本体2,667円）

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 450円

沖縄県 1,050円

※なお送料について、複数又は他の発刊本と同  
時申込みの場合は別途とさせていただきます。

● 発刊 平成18年2月

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>