

## F B G を利用した小型振動センサの研究

## Micro vibration sensor system using Fiber Bragg Grating

風間 宏樹\*・三田 彰\*\*

Hiroki KAZAMA and Akira MITA

\*慶應義塾大学大学院生, 理工学研究科開放環境科学専攻(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目)

\*\*Ph.D., 慶應義塾大学助教授, 理工学研究科開放環境科学専攻(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目)

A simple mechanism for a vibration sensor based on fiber Bragg grating (FBG) is proposed. The mechanism utilizes the gravity force to allow the maximum sensitivity of the sensor into vertical direction while the minimum sensitivity for other two transverse directions. The sensor consists of an FBG cable and several masses to form a vibration system. The cable is extended to introduce a certain tensile force and acts as a spring. The sensitivity of the sensor is more than  $1 \mu\text{strain/gal}$  for vertical direction. This simple sensor has been developed for damage detection of large structures. Several prototypes were fabricated. And extensive shake table tests were conducted to examine the performance. Because of the nonlinear behavior of the spring, it was found that the sharp peak will be elapsed beyond certain vibration level. This phenomenon is very useful to make the sensor as simple as possible without adding any damper element.

**Key Words :** FBG accelerometer, Vibration sensor, Smart infrastructure

## 1. はじめに

近年, 都市への人口, 文化, 経済の集中化にともなう, その地下空間の有効利用の重要性が高まっている<sup>1)</sup>. しかし, 地下空間を効率的に利用するには多くの問題がある. 例えば, 複雑に入り組んだ既存の地下構造物の存在である. 地上からは確認できないことがほとんどなので, 地下を掘削する時に既存の地下構造物を破壊してしまうという事故が多発する危険性がある. 特に, 巨大都市の大動脈であるインフラストラクチャーが一度破壊されてしまうとその損害は計り知れないものとなる.

そこで, 本論文ではそうした地下構造物の保護や健全性診断のために, 地下構造物自身の振動や地中を伝播する波動を検知する小型振動センサについて提案し, 解析および実験による検討結果を報告する. 地中に埋設することを想定し, ①電源を近くに必要としないこと, ②小型でシンプルなこと, ③多重化が可能なこと, ④落雷に強いこと, などの条件を満たすために, 検知部には光ファイバセンサの一種であるブラッグ格子型光ファイバ(Fiber Bragg Grating, FBG)を採用した.

## 2. テンション支持型 F B G 振動センサ

## 2. 1 F B G の原理

FBG とは, シングルモード光ファイバのコア部分に長手方向に連続した周期的屈折率変化を作ったものを

いう. FBG 部を光が透過するとき,  $n$  をコアの屈折率,  $d$  をブラッグ格子の間隔とすると, 式(1)によって決定される波長  $\lambda$  を中心とした特定の領域の光のみを反射するため, 反射波長を観測することで, F B G 部にかかる歪・温度等を測定することができる. その概念図を図-1 に示す.

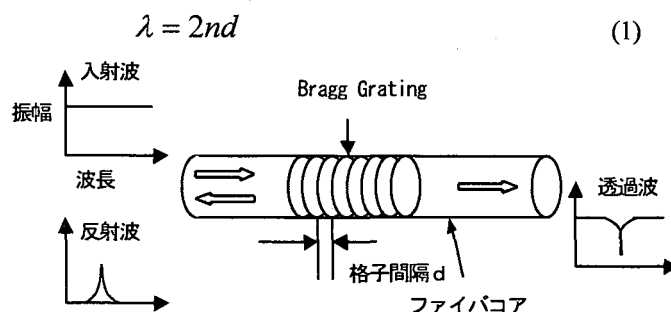


図-1 F B G の概念図

## 2. 2 F B G 振動センサの基本原理

従来の F B G 振動センサは, 共振振動数を高振動数に調整すること, クロストークの影響をできる限り抑えること等に主眼をおいて開発されてきたためシステムが複雑化<sup>2) 3) 4)</sup> したり, 多重化が困難<sup>5)</sup> になったりしていた. しかし, 神田, 三田らは図-2 に示すテンション支持型 FBG 振動センサ<sup>6)</sup> を提案し, センサの小型化・低コスト化・高感度化の可能性を示した. その特徴をまとめると,

- ・ フレームに光ファイバを張り、その中心にマスを設置するシンプルな機構である。
- ・ 重力によってプレテンションを働かせるため、鉛直方向に卓越的な感度を持ち、ほかの並進2方向には低感度である。
- ・ ソフト処理によって共振現象を利用した、高感度特性を持つ。

といったことが挙げられる。

しかしながら問題点として、

- ・ マスの端部において強いせん断力が生じるため光ファイバが切れやすい。
- ・ マスの重心のずれによって、好ましくないモードが励起される

といったことがある。本論文ではそれらの問題の改善策として、マスを分割し光ファイバ全体に分布させたテンション支持型FBG振動センサを提案する。その概念図を図-3に示す。これによって問題の解決だけでなく、最終的には樹脂等の連続体によって光ファイバを覆うだけといった実用的な形でのセンサの実現が可能である。

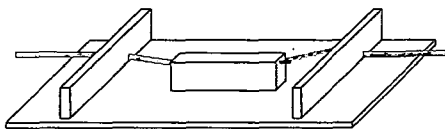


図-2 1質点テンション支持型FBG振動センサ

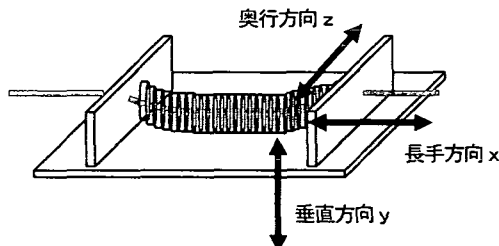


図-3 多質点テンション支持型FBG振動センサ

## 2. 3 多質点型のFBG振動センサの感度

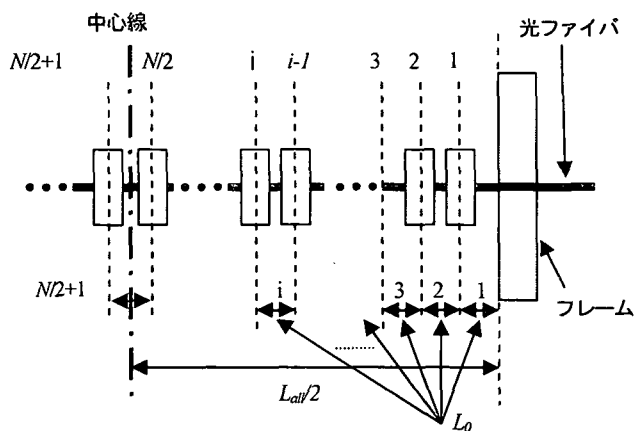


図-4 センサの初期状態

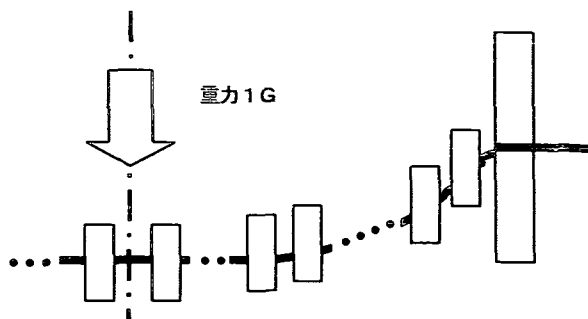


図-5 1G下でのセンサの状態

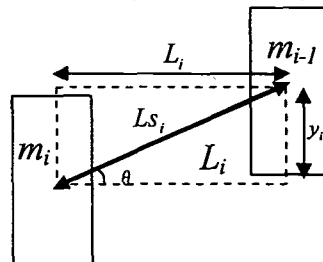


図-6 1G下でのi番目の光ファイバの状態

マスを分割することによって数々の利点があることは前述したとおりだが、欠点として1質点時に比べ感度(感度とは入力1galあたりのFBG歪量と定義する)が減少してしまうことが考えられる。そこで、質点分割数と感度の関係を静的な力の釣り合いから求め、どの程度感度が減少するかを確認する。

まず $N$ 質点系のセンサの中心から半分の初期状態を図-4に示す。ここで、 $m_k$ : 右から $k$ 番目のマスの質量、 $g$ : 重力加速度、 $E$ : 光ファイバのヤング率、 $A$ : 光ファイバの断面積、 $\varepsilon_i$ : 右から $i$ 番目の光ファイバ( $i$ 番目のマスと $i-1$ 番目のマスの間)の歪、とする。また各マスの間隔は一定で $L_0$ 、光ファイバ全体の長さは $L_{all}$ と置く。この状態で重力によって1Gの重力加速度が生じるとシステムは図-5のように歪む。そのときの $i$ 番目の光ファイバについて取り出したものを図-6に示す。このときの右から $i$ 番目の光ファイバの歪は、全体の水平成分力のみがかかる中心部の歪量の $\varepsilon_{N/2+1}$ を利用して

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + \left( \sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA} \right)^2} \quad (2)$$

と垂直・水平成分に分解して表すことができる。したがって、光ファイバの傾き $\theta$ は、

$$\sin \theta = \frac{\sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA}}{\sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + \left( \sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA} \right)^2}} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{\varepsilon_{N/2+1}}{\sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + \left( \sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA} \right)^2}}$$

と表すことができる。以上の結果を利用すると、図-6に示す1G下での光ファイバの水平方向の長さ $L_i$ は、

$$L_i = (1 + \sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + (\sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA})^2}) L_0 \cos \theta \quad (4)$$

と表すことができる。この $L_i$ を全体にわたって足し合わせたものが、引張力が生じる前の光ファイバ全体の長さ $L_{all}$ にプレテンション $\varepsilon_{pre}$ による伸びを考慮した長さとして一致しなければならないという条件から

$$L_{all}(1 + \varepsilon_{pre}) = 2 \sum_{i=1}^{N/2} ((1 + \sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + (\sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA})^2}) L_0 \cos \theta) + (1 + \varepsilon_{N/2+1}) L_0 \quad (5)$$

という式が導かれる。ここで用いたプレテンションとは、光ファイバをフレームにつける時にかける、装着前の光ファイバに生じているテンションの事を言う。この式の未知数は水平方向力による歪 $\varepsilon_{N/2+1}$ のみなのだが、非線形の複雑な式であるため、解析的に求めるのは不可能である。そこで式(5)から、(6)式のような評価関数を設定し、最小二乗法によって未知数 $\varepsilon_{N/2+1}$ を算出した。

$$J = (L_{all}(1 + \varepsilon_{pre}) - 2 \sum_{i=1}^{N/2} ((1 + \sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + (\sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA})^2}) L_0 \cos \theta) + (1 + \varepsilon_{N/2+1}) L_0)^2 \quad (6)$$

この結果から表-1のようなパラメタ時における分割質点数に対する中心部の静的感度（感度は1G近傍での入力1galあたりのFBG歪量と定義する）を求めたところ図-7のような結果となった。この結果から、ある程度質点の分割数を増やしていくと1質点時の約2/3程度まで低下したところで感度の減少は収束するということがわかる。このことから、あまり感度の低下は激しくなく、最終的には連続体によるセンサも多質点時と同程度の感度の低下で設計可能であることが確認された。

表-1 感度解析に用いたパラメタ

|          |      |                        |
|----------|------|------------------------|
| FBG光ファイバ | 直径   | 125 $\mu$ m            |
|          | 長さ   | 20mm                   |
|          | ヤング率 | 7455kg/mm <sup>2</sup> |
| マス       | 全体質量 | 20g                    |

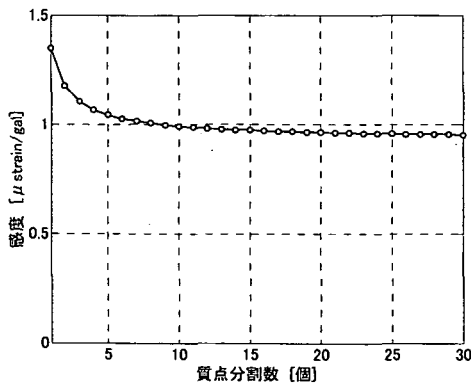


図-7 質点の分割数に対する静的感度変化

## 2. 4 歪分布のばらつき

多質点系とするとFBGに生じる歪が均一でなくなる可能性がある。なぜならば本センサの光ファイバにはFBG部を覆うようにマスがつくため生じる歪は端部

において最も強くなると考えられるためである。そのばらつき量は式(2)から導出することができる。具体的な数値として表-1のパラメタを用い、質点分割数を10として実際に求めてみる。このとき、中心部の1galあたりの歪 $\varepsilon_{N/2+1}$ は、図-7よりおよそ0.9 $\mu$ strainである。次に端部における1galあたりの歪量を求めると、

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \sqrt{\varepsilon_{10/2}^2 + (\sum_{k=1}^{10/2} \frac{m_k g}{EA})^2} \\ &= \sqrt{0.9^2 + (\sum_{k=1}^5 1.2 \times 10^{-2})^2} \\ &= 0.902 \quad (\mu\text{strain}) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。その差はおよそ0.1%程度であり、光ファイバ全体が加速度によって均一に歪むと考えて差し支えないことが確認できた。

## 3. 動特性の解析的検討

### 3. 1 状態方程式の導出

静的な1G下でのつりあい状態からの微小変位に対するシステムマトリクスを算出し、状態方程式を導出することによって本センサの動特性を確認する。

まず静的モデリング時と同様に右から*i*-1番目と*i*番目の間の光ファイバについて考える。式(4)で求めた $L_i$ と同様にして、図-6に示した垂直方向の長さ $y_i$ は、

$$y_i = (1 + \sqrt{\varepsilon_{N/2+1}^2 + (\sum_{k=i}^{N/2} \frac{m_k g}{EA})^2}) L_0 \sin \theta \quad (8)$$

と表すことができる。これにより、光ファイバの重力下での状態が記述できる。この形から垂直*y*方向についての変位とそのときの復元力の関係を表-1のパラメタで分割数10の場合の右端の光ファイバについて図-8に示す。この関係は非線形であるため、このままでは線形ばね定数を決めることができない。そこで、ここでは本センサの測定領域を微小振動と仮定することにより、線形化する。具体的には図-6のつりあい状態に微小変位 $dy$ を与えると、そのときの端点の各方向における力の増分は、それぞれ

$$df_{xy} = EA \frac{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2} - L_0}{L_0} \frac{L_i}{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2}} - EA \varepsilon_{N/2+1} \quad (9-1)$$

$$df_{yy} = EA \frac{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2} - L_0}{L_0} \frac{y_i + dy}{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2}} - \sum_{i=1}^{N/2} m_k g \quad (9-2)$$

$$df_{zy} = EA \frac{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2} - L_0}{L_0} \frac{0}{\sqrt{L^2 + (y_i + dy)^2}} = 0 \quad (9-3)$$

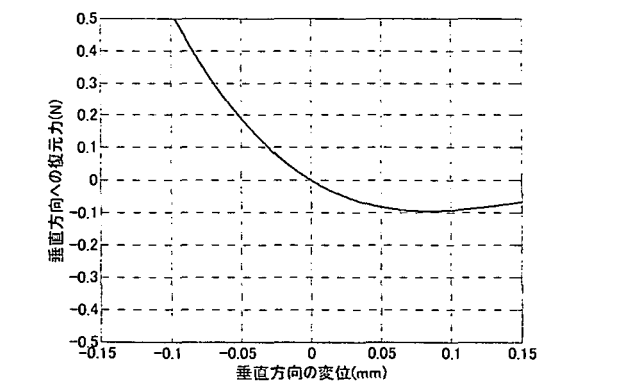
と表せ、各方向のばね定数*K*は、それぞれを微小変位 $dy$ で割ることにより求まる。同様に $dx$ 、 $dz$ を与える

ことにより、この一区間の光ファイバの剛性マトリクスは以下のように決定することができる。

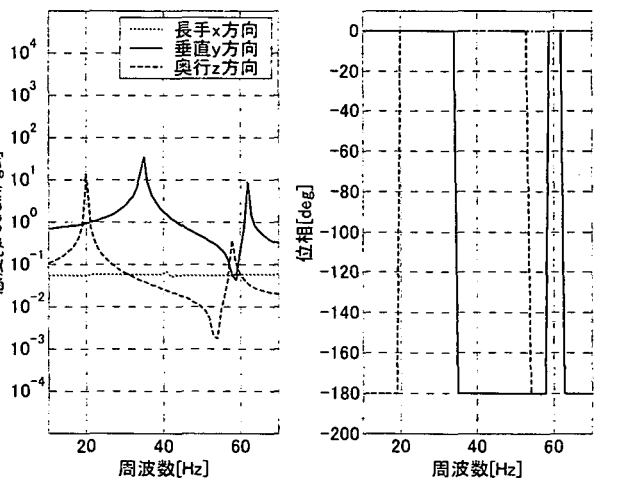
$$K_i = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} & -K_{xx} & -K_{xy} & -K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} & -K_{yx} & -K_{yy} & -K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} & -K_{zx} & -K_{zy} & -K_{zz} \\ -K_{xx} & -K_{xy} & -K_{xz} & K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ -K_{yx} & -K_{yy} & -K_{yz} & K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ -K_{zx} & -K_{zy} & -K_{zz} & K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \tag{10}$$

状態変数を各マスの変位と速度とすると、この剛性マトリクスを状態変数ベクトルに対応させて足し合わせていくことにより、システム全体の剛性マトリクスを求めることができる。また、入力を各  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向のマスに生じる慣性力と定義し、変位との関係を再び線形近似を用いることにより光ファイバの歪を出力と定義することにより、入力行列  $B$ 、出力行列  $C$  を決定し、状態方程式を導出した。表－１のパラメータを利用し分割数 10 の場合について本センサのボード線図を図－9 に示す。

この結果から垂直  $y$  方向においてのみその他の方向の約 10 倍程度の感度特性を得ることができていることが確認できる。これは 2. 2 の基本原理において述べたように、自重によるプレテンションが垂直方向においてのみ生じることに起因するものである。



図－8 垂直方向の変位と復元力の関係



図－9 分割数 10 のセンサののボード線図

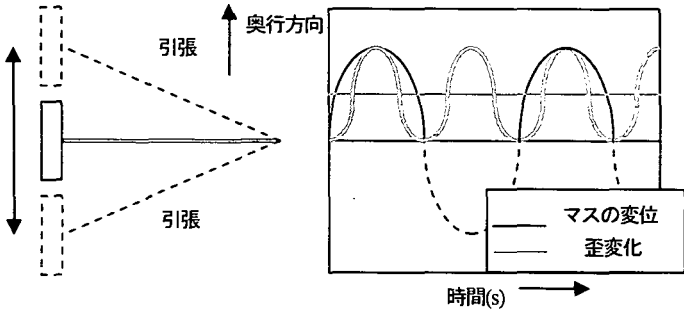
### 3. 2 非線形振動現象の影響

前節の動的なモデリングを行った際、微小振動を仮定し、変位と復元力、変位と歪の間に比例関係があるとして、剛性マトリクスと出力行列  $C$  を導出した。本節ではその線形近似では表現しきれない現象について述べる。

#### (1) 奥行方向振動

奥行方向の変位と歪の関係、つまり出力行列  $C$  は線形近似によって現すことができない。なぜならば図－10 に示すように、実際には奥行方向については、重力によるプレテンションがないため、慣性力によってマスがどちらの方向に変位しても光ファイバに生じる力は常に引張力となるためである。つまり正負の区別がなく、変位の絶対値と歪とが一对一に対応するわけで、負の変位までを考慮に入れた線形化は不可能である。そのため振動センサとしては 30 Hz で加振を行ったとしても FBG からの反射波はその倍の 60 Hz の振動として検出されることになる。つまり奥行方向については入力振動数の倍の振動数の出力となっていることを考慮に入れて出力値の解析を行う必要がある。

そのため奥行方向については伝達関数を、入力が各振動数で一定であると仮定し、入力振幅と入力振動数の倍の振動数の出力振幅の比と定義することとした。



図－10 奥行方向の変位と歪の関係

#### (2) 振幅の大きい領域での非線形特性

本節では、実際に微小振動とはみなせないような 10 gal 以上の加振が行われた場合についてのシステムの動特性の変化について考察する。図－8 に示したように垂直方向についてある程度大きい変位までを考えると、 $y$  のプラス方向、つまり上方向の変位に対しては変位が大きくなるにつれ復元力が線形近似によって求めた値よりも弱まる軟化スプリングの特性を持ち、逆に下方向の復元力については変位とともに強まっていく硬化スプリングの特性を持っていることがわかる。そのため非常に複雑な非線形特性を持ち、その特性を解析的に表現するのは難しいが、定性的には図－11 に示すように、入力が強まるにつれ共振ピークが低周波側に曲がっていく軟化スプリングの共振曲線と、高周波側に曲がっていく硬化スプリングの共振曲線とが合わさった形となり、振動数下降時には低周波

側に、逆に上昇時には高周波側により強いピークを持つような形になると想定される。

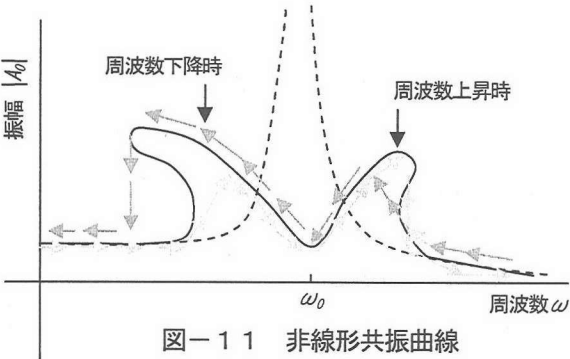


図-1-1 非線形共振曲線

4. プロトタイプの製作と性能評価

4. 1 各パラメタの選定

前節によって求めたモデリング結果から本センサの最適なパラメタについて考察した。まず必要なマスの質量について考えることとする。本センサは地下構造物に取り付けるという目的があり、できる限りの小型化を図りたいため、マスの質量は少なくともすむことに越すことはない。しかしながら微小振動を検知するためには、波長シフト量を読み取る収録システムの精度にもよるが、最低でも0.6μstrain/galの感度は必要である。以上の条件から連続体にしてもその感度以下にならないようなマスとして13.6gと決定した。

次に光ファイバの長さとの感度について示す。まず静的な感度をみると、式(5)において $L_0$ の総和は $L_{all}$ と等しいことを用いると長さに関するパラメタはすべて消去できることから、静的な感度に長さは影響しないことがわかる。次に、求めた状態方程式から、長さの変化に対する動的な特性を見ると図-1-2のようになった。この結果からファイバ長を変えることによって感度を変えずに、共振振動数のみを測定対象に合わせて任意に変えることができる性質を持つことが確認できる。またファイバ長を長くすることによって感度を下げることなく、全体としてセンサをより長手方向に長細く小型化することができる。

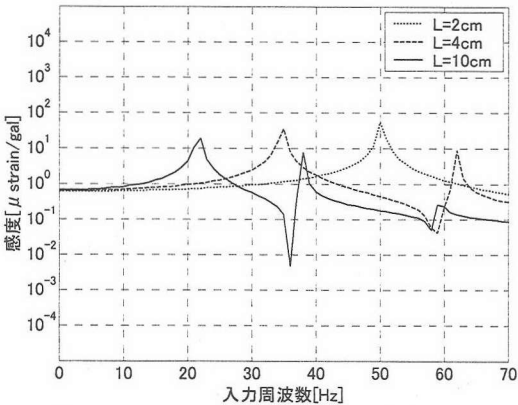


図-1-2 ファイバ長と動的感度の関係

4. 2 プロトタイプの製作

以上のパラメタの選定結果に基づいて、実際に質点を分布させたテンション支持型FBG加速度センサを製作した。マスは10質点の等分布質点とし、材質は中心に同心円状のゴムを埋め込むための切り込みが入った円形の厚さ1.5mmの真鍮によって製作した。その中心に埋め込んだゴムに切り込みを入れ光ファイバを挟み込むことによってマスを接着することで、取り外し可能で、光ファイバの伸び縮みを邪魔しないマスとした。ファイバは直径125μmの通常径光ファイバを用い、ファイバの長さは2.2cmと4cmの二種類を製作した。

表-2に製作したセンサの各パラメタの詳細を、図-1-4に製作したセンサの写真を示す。ここでファイバ長とはフレーム間に張られた光ファイバの長さである。

表-2 各パラメタ

|          |       | Sensor1    | Sensor2 |
|----------|-------|------------|---------|
| FBG光ファイバ | 直径    | 125μm      |         |
|          | ヤング率  | 7455kg/mm² |         |
|          | ファイバ長 | 22mm       | 40mm    |
| マス (真鍮部) | 直径    | 120mm      |         |
|          | 質量    | 13.6 g     |         |
| マス (ゴム部) | 直径    | 2mm        |         |

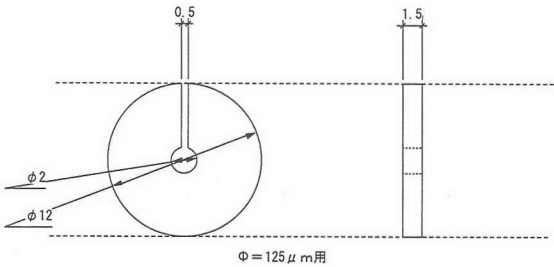


図-1-3 分布マスの設計図

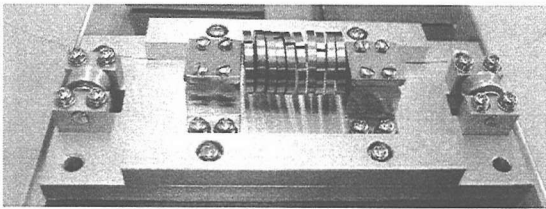


図-1-4 テンション支持型FBG加速度センサ

4. 3 静的性能評価実験

(1) 実験方法

まずは重力1G下における初期状態の歪量を、光スペクトルアナライザを用いて、透過波長のノッチ波長(ブラッグ波長)を直接測定することによって算出した。この実験ではセンサの光源として、モニタリングのための光学的装置であるI\*Sense™14000を利用した。実験の概要図を図-1-5に示す。

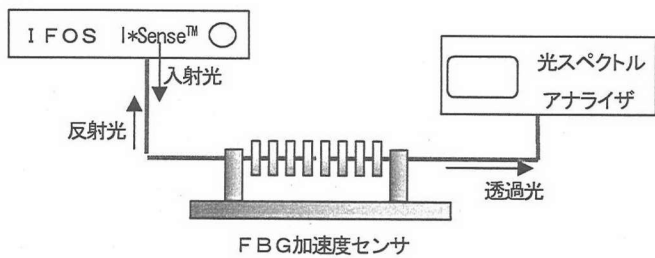


図-1 5 静的性能評価実験概要図

## (2) 実験結果と考察

図-1 6にファイバ長4cm センサの透過波を示す。

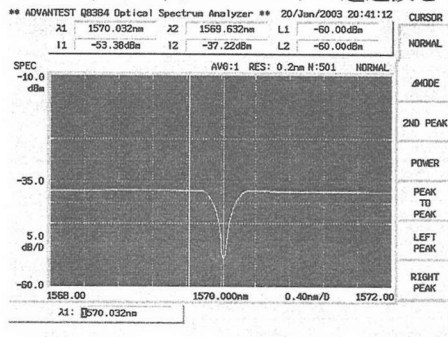


図-1 6 A 0 G時透過波

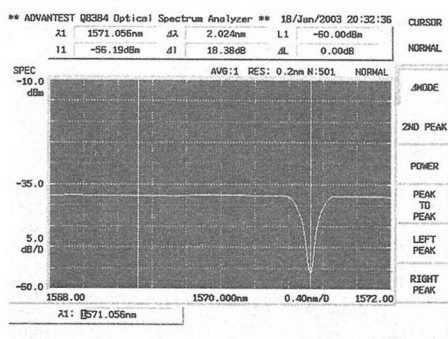


図-1 6 B 1 G時透過波

図-1 6から、重力による歪によって波長シフトが起ることが確認できる。波長シフト量を感度の比例定数である  $1.2 \text{ pm}/\mu\text{strain}$  で割って 1G での歪量を算出し、そこから加速度—歪曲線が理論と同様のカーブを見せると仮定し、実験結果から感度を算出した。理論値と比較すると表-3のようになる。

これを見ると理論とは 10%強の誤差が生じていることが分かる。誤差原因としてまず考えられるのは、理論的な値である波長シフト量と感度の比例定数や光ファイバのヤング率等が実際とずれているということである。しかし最も大きな原因と考えられるのは荷重のかかり方がモデリングと異なる点である。本センサのモデリング時には分割されたマスのある位置の中心において光ファイバに集中荷重が働くとして考えたが、実際今回製作したセンサは、図-1 4を見ても分かるように、光ファイバ全体をマスが覆うような分布荷重系に近いものとなっている。それにより、モ

デリング時より低感度の結果となってしまったと考える。ファイバ長との関係から相対的には集中荷重系に近い Sensor 2 のほうが誤差が小さいことから、そのことが裏付けられる。

表-3 静的感度

|         | 波長シフト<br>(nm) | 感度(実験値)<br>( $\mu\text{strain}/\text{gal}$ ) | 感度(理論値)<br>( $\mu\text{strain}/\text{gal}$ ) | 誤差<br>(%) |
|---------|---------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------|
| Sensor1 | 0.952         | 0.55                                         | 0.67                                         | 18        |
| Sensor2 | 1.024         | 0.59                                         | 0.67                                         | 12        |

## 4. 4 動的性能評価

### (1) 実験方法

この実験では、実際に加振器によって今回製作したセンサとサーボ型のセンサを同時に加振し、本センサの動的特性を調べた。加振方向については、感度方向である垂直方向だけでなく、長手、奥行各方向についても行なった。図-1 7に実験概要図で示す。本実験では I\*Sense™14000 を光源としてのみでなく、波長シフト量を測定するインタロゲーションシステムとしても用いている。

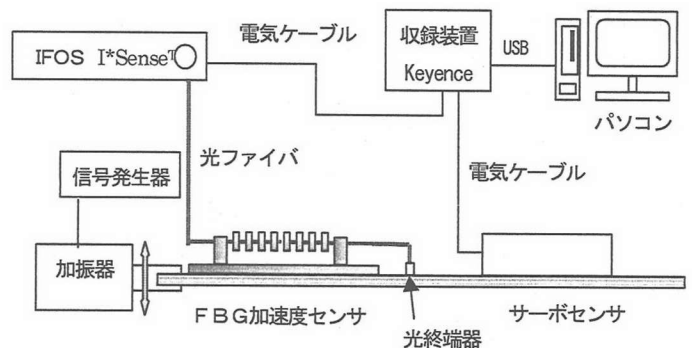


図-1 7 動的性能評価実験概要図

### (2) センサの伝達特性

サーボ型センサの測定値を入力値、sensor 2 の測定値を出力値として、伝達関数を求めた結果を示す。

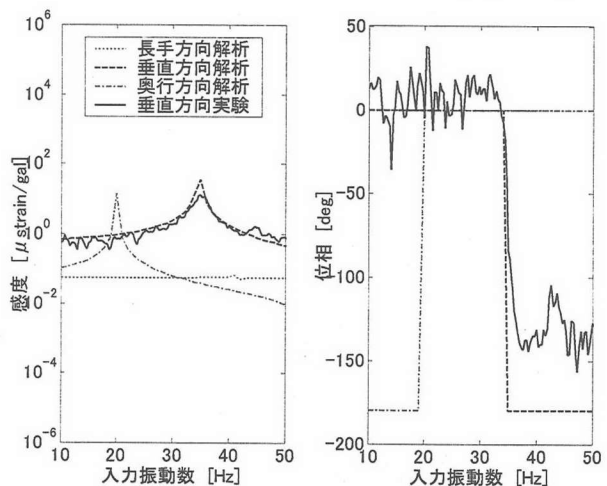


図-1 8 A sensor 2 垂直方向加振

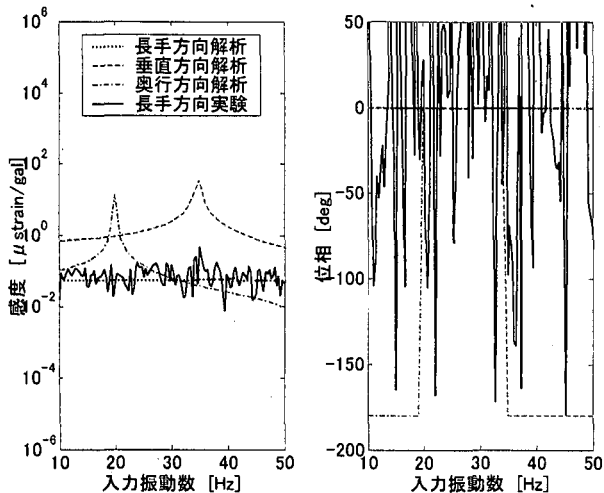


図-18B sensor 2 長手方向加振

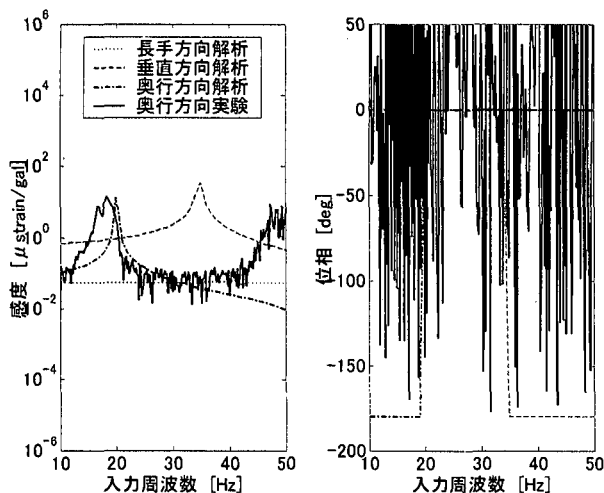


図-18C sensor 2 奥行方向加振

図-18より各方向からの加振に対する応答はほぼモデリングどおりの結果となっており、最初の予測どおり感度方向の垂直方向のみが他方向のおよそ10倍程度の感度を得ており、他軸方向からのクロストークの影響は微小であることが確認できる。長手・奥行各方向の位相が乱れているのは低感度なためノイズの影響を強く受けたためと考えられる。また、先に述べたようにFBGシステムを微小振動検知用の加速度センサとして利用する際に必要だとされる $0.6\mu\text{strain/gal}$ 以上の感度も垂直方向において得ることができていることから今回提案し設計した、質量分布テンション支持型FBG加速度センサの有用性が十分確認できたといえる。

(3) センサ部の長さの影響

4. 1で述べたように、同じマスの質量でセンサの光ファイバの長さを変えると、感度は変化せずに共振振動数のみが移動することを実験を通して確認した。本研究で製作したsensor 1, sensor 2の二つのセンサについて垂直方向加振に対する応答結果を図-19に示す。ほぼ理論どおりの感度を持つことが確認でき、モ

デリングの正しさが確認できた。なお sensor 2 のピークが割れているのは非線形振動の影響である。

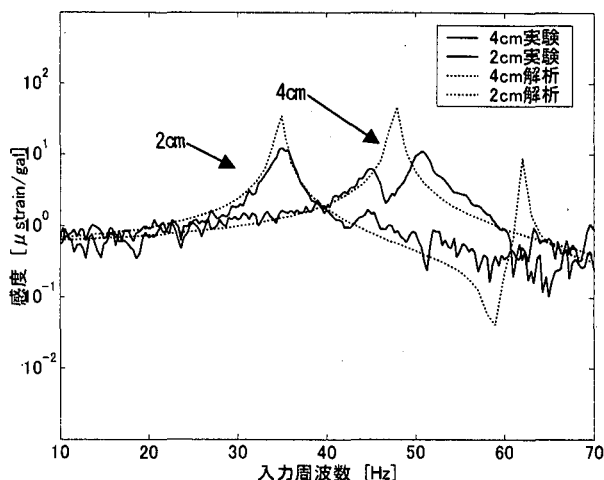


図-19 光ファイバ長と動的感度の関係

#### (4) 奥行方向の振動特性

モデリングが正しいのならば本センサの奥行方向の振動は入力振動数の倍の振動数を出力しているはずである。サーボ型センサと製作したセンサの共振周波数付近における周波数スイープ時の時系列の応答結果を図-20に示す。共振付近でスイープさせているため時系列に対して若干位相のずれが生じ、また振幅応答も周波数に応じて変化しているが、この結果から考察どおり加振振動数のほぼ倍の振動数の出力値を持つことが確認できる。この特徴は、入力振動数と同じ振動数を出力する感度方向である垂直方向と、計りたい方向ではない奥行方向とを、振動数によって区別することが可能になり、クロストークの影響をより下げることができるという利点を持つ。またもっと積極的にこの特性を利用して、得られたデータをウェーブレット変換などの作業により垂直方向からの振動と奥行方向からの振動の割合を算出することにより、斜めからの入力に対してその角度の同定をできる可能性も持つと考える。

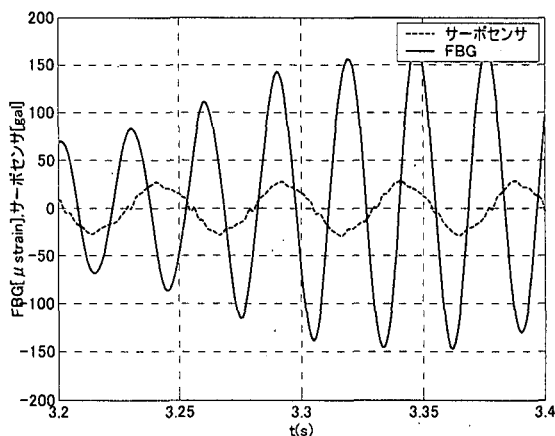


図-20 奥行方向振動時系列結果



## (5) 振幅の影響

モデリングの考察で述べたように本センサは大きな入力に対して強い非線形特性を持つと考えられる。そこで、実験により確認するために非線形性が強く現れるように入力振動数をゆっくりと上昇・下降させそのときの入力加速度の強さに応じた出力値を測定した。

それらの関係を入力振動数を横、入力加速度を縦、そのときの感度を高さとして図-21に示す。この非線形特性についてもモデリング時に考えたように振動数上昇時には共振振動数が高周波側に広がっていく硬化スプリングの特性が強く現れ、逆に振動数下降時には低周波側に広がっていく軟化スプリングの影響が強く現れていることが確認できた。このような複雑な非線形特性を持つことは入力加速度を精度よく測定するというセンサ性能に対しては好ましくないが、地下に埋めるセンサとしては地震等の大きな入力が生じたときに、非線形特性によって鋭いピークをもたなくなるため、光ファイバの破断を防ぐことができるというメリットとなる。これにより減衰等の付加といったシステムの複雑化をする必要がない利点が挙げられる。

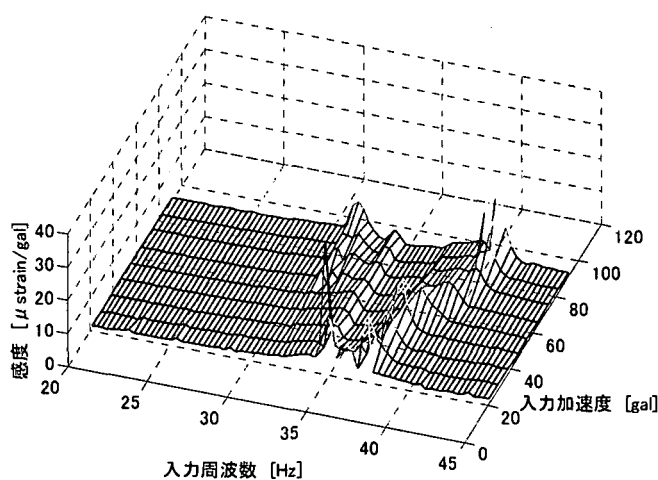


図-21A 入力振動数上昇時

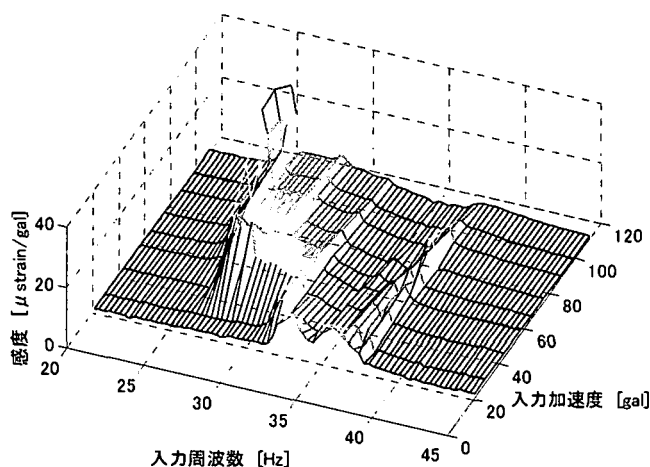


図-21B 入力振動数下降時

## 5. 結論

本研究では、フレームによって2点を支持したFBG光ファイバ全体にマスを分布させるシンプルなシステムによって、地下構造物のスマート化のための小型・低コスト・メンテナンスフリーなFBG振動センサシステムを提案した。解析によりシステムの最適パラメータと特性を考察し、実際に製作・性能評価実験を行い、その有用性を確認した。得られた特性を以下にまとめる。

- ・ 質点分割に対する感度の低下は軽微である。
- ・ 重力方向が常に高感度である。
- ・ 光ファイバ長を変えるだけで静的感度を考えずに任意に高感度な振動数帯域を設定できる。
- ・ 奥行方向の加振に対しては入力の倍の振動数の振動を出力する。
- ・ 大振幅の場合、非線形特性が現れピークが割れることにより減衰の付加が必要ない。

今回は実験モデルとして製作したが、最終的な実用化レベルにおいては本センサをWDMによって多重化し、フレームを小型化することにより保護チューブに一体化させた直径1cmほどのケーブル状の多点振動センサシステムとして製作することが可能である。

また直径50μmの細径光ファイバ<sup>8)</sup>を用いることによって更なる小型化も可能なため、現在評価実験中である。

## 参考文献

- (1) 東京大学社会基盤工学教室著、中村 秀夫編：東京のインフラストラクチャー、技報堂出版、1997
- (2) M. D. Todd, G A Johnson, B A Althouse, and S T Vohra : Flexural beam based fiber Bragg grating accelerometer, IEEE Photon. Techno. Lett. 10 No.11, 1998
- (3) A Mita, and I. Yokoi : Fiber Bragg Grating Accelerometer for Structural Health Monitoring, Proc. Sixth International Conference on Motion and Vibration Control, Sydney, Australia, pp.631-636, 2000
- (4) P. Krammer, M. Willsch, N. Theune and M. Rothhardt : Novel fiber optic Bragg grating acceleration sensor detection scheme, 2000
- (5) S J Spammer, P L Fuhr, Y Zhu, A A Chtcherbakov : Optical fiber Bragg grating accelerometer, Part of the OSJ/SPIE conference on optical engineering for sensing and nanotechnology (ICOSN,99), 1999
- (6) 神田亜希子, 三田彰：微小振動検知のための光ファイバセンサに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 2 構造II, pp959~960, 2001
- (7) J.M.T.Thompson, H.B.Stewart 著、武者 利光訳：非線形力学とカオス, 1988
- (8) 佐島耕自, 福地圭介他：埋め込み型歪センサ用細径ポリイミド被覆光ファイバグレーティング, 「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp23~26, 2000

(2003年4月18日受付)