



## FBG ハイブリッドセンサの提案と その活用による構造損傷検知手法に関する研究

早野洋史<sup>1)</sup>、三田彰<sup>2)</sup>

1) 慶應義塾大学大学院理工学研究科、大学院生

e-mail: h2hayano@helen.ocn.ac.jp

2) 正会員 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科、教授 Ph. D.

e-mail: mita@sd.keio.ac.jp

### 要約

本論文では、FBG ハイブリッドセンサおよびこれを利用した複数損傷指標を用いた損傷検知手法を提案する。FBG ハイブリッドセンサは、加速度と歪を一つのセンサで計測することを可能にするセンサである。光ファイバを弾性要素とし、これにマスを取り付けたテンション支持構造に基づくセンサである。FBG ハイブリッドセンサの有効性について、シミュレーションおよびプロトタイプを製作しての性能評価試験によって検証を行った。またこのセンサの特徴を活かした固有振動数と歪の併用による新しい損傷検知手法を提案する。ラーメン構造を対象として、柱の損傷と歪及び固有振動数の相関関係を求め、損傷を効率的にかつ精度良く特定する手法である。提案手法では、得られる情報から損傷位置同定を行うため、パターン認識手法の一つであるサポートベクトルマシンを用いている。その結果、2つの損傷指標を併用することによって、高い精度の損傷同定が可能であることを示す。

キーワード : FBG、加速度計測、歪計測、損傷同定、サポートベクトルマシン

### 1. 背景

エネルギーの制約などを受けて、いかに土木構造物の機能の維持・再生を図るかが重要な課題として挙げられている<sup>1)</sup>。本論文では、土木構造物の耐震性能を定量的に評価することを目的とした構造ヘルスマニタリングシステムを提案する。特に高架橋をモニタリング対象とし、交通による常時微動を計測量と考える。その計測データを用いて損傷位置を同定し構造物の性能評価を行う。

構造物の性能評価を目的とした損傷検知に関する研究では、たわみや歪、固有振動数といったデータを指標として損傷評価を行う例が数多く見られる<sup>2)</sup>。その中でも、代表的な損傷評価指標として固有振動数を用いる方法がよく知られている。近年では高次モードを含む複数の固有振動数の変化を利用することにより詳細な損傷を検出する手法も提案されている<sup>3)</sup>。しかし、実構造物では、高次モードの同定

が困難であることが多い<sup>2)</sup>。本論文で想定している実際の状況で、計測可能な固有振動数の範囲は3次程度までである。この問題を解決するため本研究では歪と固有振動数を損傷指標として併用する損傷位置同定手法を提案する。この手法は計測不可能なモードに代わる損傷指標として歪を利用する点に特徴を持ち、計測可能な固有振動数と併用することによる損傷位置同定の精度向上を目的とする。さらに想定する構造ヘルスマonitoringシステムに利用するセンサとして、加速度と歪計測を一つのセンサで測定可能なFBG(ブラッググレーティング光ファイバセンサ)ハイブリッドセンサを提案する。歪と固有振動数の測定はセンサ数の増加を招くが、このセンサの利用により構造ヘルスマonitoringシステムのセンサ数を減らし、構造物に関する情報量をより多く取得することが期待される。

図1には本論文で提案する構造ヘルスマonitoringシステムの全体像をフローチャートで示した。対象となる構造物から歪および加速度データの収集を行う。こうして求めた歪と固有振動数を特徴ベクトルとして統合する。これをパターン認識手法の一つであるSupport Vector Machine (SVM)を利用して解析的に得られた情報とパターンマッチングを行い、損傷状態を同定する。将来的にはセンサを用いた実験あるいは実測を行い、得られた固有振動数とひずみから損傷を同定する予定であるが、今回はセンサを用いた損傷同定の前段階としてシミュレーションにより適用可能性の是非を検討する。また固有振動数の同定に関しては本論文では取り扱わない。

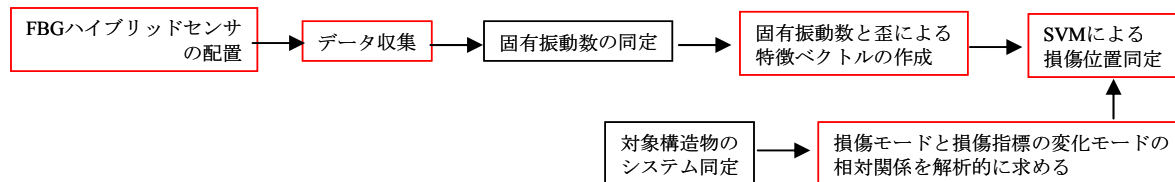


図1 複数損傷指標利用による損傷検知アルゴリズム

## 2. FBGハイブリッドセンサ

### 2.1 FBGセンサのセンシングメカニズム<sup>4), 5)</sup>

図2にFBGセンサの仕組みを示す。FBGセンサは反射波長の変化量(波長シフト)を測定することで、物理量の変化を検出するセンサである。FBGの反射波長 $\lambda$ はFBGのグレーティング間隔 $d$ とコアの屈折率 $n$ によって(1)式のように決定される。

従って、FBGの反射波長はグレーティング間隔 $d$ やコアの屈折率 $n$ を変化させる物理量によって波長シフト $\Delta\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )だけ変化することになる。この物理量としてファイバにかかる歪が増減した場合、(1)式よりグレーティング間隔の変化量 $\Delta d$ から波長シフト $\Delta\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )が求まる。特に、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の波長帯においてFBGの波長シフト $\Delta\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )とファイバにかかる歪 $\varepsilon$  ( $\mu\text{e}$ )の関係は(2)式のようになる<sup>4), 6)</sup>。つまり、部材の歪が $100 \mu\text{e}$ 増加することによって波長は $120 \mu\text{m}$ シフトする。この波長シフト量を計測するセンサがFBGセンサであり、逆算することにより部材に発生した歪を測定することができる。

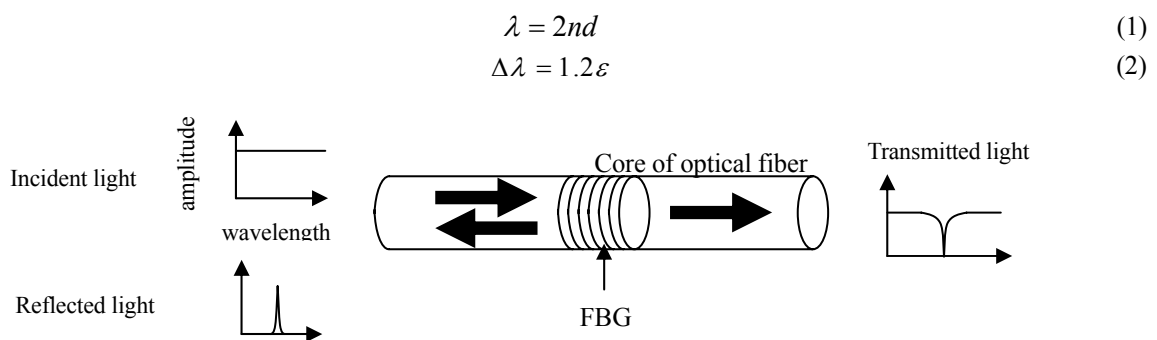


図2 FBGセンサの仕組み

## 2.2 FBG ハイブリッドセンサの測定原理と特徴

本研究で提案する FBG ハイブリッドセンサは、加速度と歪を 1 つのセンサで計測することを可能にするセンサである。FBG 加速度センサや FBG 歪センサに関しては、様々な研究がなされ多くのセンサが提案されている<sup>7), 8), 9)</sup>。しかしながらこれら 2 つの物理量を 1 つのセンサで測定する試みはほとんど見られない。

本論文では図 3 に示すような光ファイバがセンサフレームによって 2 点支持されるテンション支持型 FBG ハイブリッドセンサを提案する<sup>8), 9)</sup>。歪計測における FBG ハイブリッドセンサは、光ファイバ部分をセンサフレームに 2 点で接着し、プレテンションをかけて FBG を支持する機構となっている。この機構によりファイバ長手方向を感度として、部材に発生する歪を単純なファイバの伸縮として計測することが可能となる。表 1 および図 4 には部材に発生する歪を  $1000\mu\varepsilon$  と仮定した場合に、センサが計測する歪測定誤差を  $9.8\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ <sup>4)</sup> として温度変化による測定誤差 (%) を計算した結果を示した。歪計測に与える温度変化の影響が無視できないほど大きくなってしまふことがわかる。この温度補償に関して、温度補償部材の熱膨張を利用することにより FBG を温度の影響をキャンセルする方向に波長シフトを引き起こし、温度変動の影響による波長シフトと相殺させ、温度の影響の無い歪の計測が可能となる<sup>8)</sup>。一方、加速度計測における FBG ハイブリッドセンサは、FBG を弾性要素としこれに取り付けられたマスで構成されるテンション構造となっている<sup>9)</sup>。この機構により、測定対象に生ずる加速度によって、マスは慣性力を受け、マスに相対的な変位が引き起こされる。この変位によって結果的に FBG に歪が発生し、加速度センサとして機能する。このため重力のかかるファイバ直行方向に卓越した感度を持ち、クロストークの少ないセンサとなる。ここでクロストークとは、センサの感度方向以外に対してセンサが計測を行ってしまい、本来計測対象としている入力 of 誤差となってしまふことを意味する。

このセンサの最大の特徴はセンサの感度方向を 2 方向に分割している点にある。ファイバに対して長手方向を歪計測に、ファイバ直行方向を加速度計測に、それぞれセンサ感度を利用している。このような 2 つのセンシングが可能となる理由は、歪計測と加速度計測の対象とする測定周波数領域が異なるためである。今回対象とする歪計測の対象領域は静的な歪量の計測であり、加速度計測に関しては数 Hz ~ 数十 Hz の動的な領域である。このような区別が明確になっているために、一つのセンサで加速度と歪という 2 つの物理量測定を可能にすることができる。また、ここで利用するマスに、温度補償部材としての役割を持たせることによって他に何も付加せずに歪計測のための温度補償を実現することが可能となる。

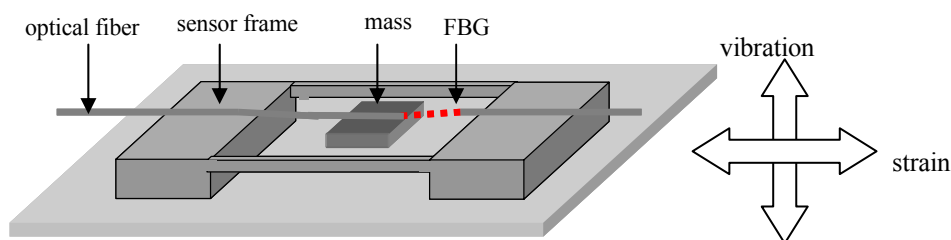


図 3 FBG ハイブリッドセンサ

表 1 温度変化による歪変化

temperature change	error ( $\mu\varepsilon$ )
30	245.0
29	236.8
28	228.7
27	220.5
26	212.3
25	204.2
24	196.0
23	187.8
22	179.7

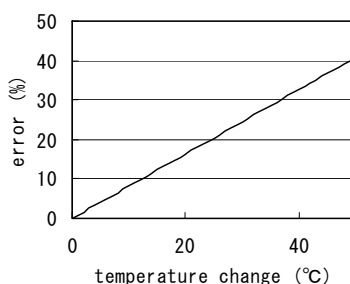


図 4 温度変化による測定誤差

### 2.3 プロトタイプ製作

製作に必要なパラメータはプレテンション、マスの重さ、そしてファイバ長の3点である。プレテンションは測定対象とする歪の大きさを $-1,000\sim 1,000\mu\varepsilon$ と設定し、 $1000\mu\varepsilon$ 程度に決定した。一方でプレテンションの増加は低周波数領域での感度低下を引き起こす<sup>9)</sup>。必要な感度を確保するためには、マスの重さなどを調整し高感度化を図らなければならない<sup>9)</sup>。本センサでは数Hz～数十Hzの測定範囲を想定し、その範囲内で感度 $1\mu\varepsilon/\text{gal}$ を必要な感度としてマスの質量を決定した。ファイバ長とは計測にかかわるファイバの二点支持間隔を示す。マスの幅を8mmとして設計し、これをファイバ長の中心に設置する。これに汎用的なFBGの長さが10mm前後であることを考慮すると最低でも28mm以上のファイバ長が必要となる。以上の検討を踏まえ製作したハイブリッドセンサの各パラメータを表2および図5に示す。また図6には実際に製作したプロトタイプを示す。本プロトタイプセンサではセンサフレームはアクリルを利用し、接着にはシアノアクリレート系の接着剤を用いた。マスには加工の容易な高比重ゴムを用い、これに切れ込みを入れファイバに挟み込むことによって固定した。プロトタイプセンサでは、マスの可動域を確保するために、センサフレームの高さを上げるための部材を挿入している。

表2 プロトタイプセンサのパラメータ

FBG optical fiber	diameter	12 $\mu\text{m}$
	Young's modulus	7455kg/mm <sup>2</sup>
	length	30mm
	pretension	900 $\mu\varepsilon$
mass	size	8 $\times$ 8 $\times$ 10mm
	weight	10g
sensor frame	fiber length	30mm

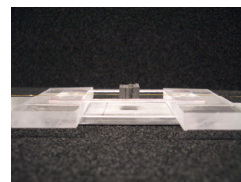
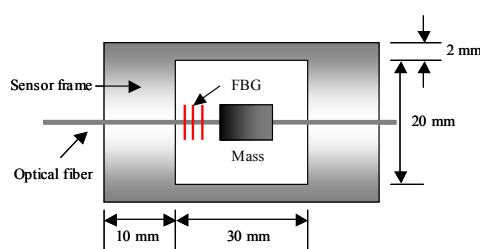


図5 プロトタイプのサイズ

図6 プロトタイプ写真

### 3. FBG ハイブリッドセンサの性能評価

#### 3.1 歪計測性能評価試験

本センサの歪計測性能評価試験について述べる。図7に示すように片持ちに設置したアルミニウム製の試験片(長さ235mm $\times$ 幅20mm $\times$ 厚さ3mm)に試作したFBGハイブリッドセンサをその中心に接着し、試験片先端に荷重をかけて歪計測を行う。データ収録装置には光スペクトルアナライザ(OSA)を使用した。この仕様を表3に示す。計測は、センサを図7に示した試験体の上面につけて引張を、下面につけて圧縮を、それぞれ錘の重さ0g、35g、50g、100g、150g、200gとして計11ケースで行った。

#### 3.2 加速度計測性能評価試験

加速度計測試験は、FBGハイブリッドセンサとサーボ型加速度センサを振動台に載せ、それを加振器によって周波数スイープ加振して行った。周波数範囲は0.1Hz～90Hz、入力加速度は約30galで、15秒間周波数範囲をスイープさせた。加振方向はファイバに対して垂直、長手、奥行き方向の3方向とする。このときのサーボ型加速度センサの出力値とハイブリッドセンサの出力値を比較することによって本センサの特性を評価する。図8にこの実験概要を示す。表4に示すI\*Sense14000を光源および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利用している。これは、各センサから反射された波長を2つの電圧値に変換し、この比率から波長シフト量を計算するモニタリングシステムである。

表3 光スペクトルアナライザ仕様

range of wavelength(nm)	600～1700
wavelength resolution(pm)	greater than 10
dynamic range(dB)	greater than 60

表4 I\*Sense14000仕様

Channels(Num)	4
Center wavelengths(nm)	1510, 1530, 1550, 1570
Optical power	greater than -4dBm input launched
Accuracy ( $\mu\varepsilon$ )	1
Full scales ( $\mu\varepsilon$ )	+/-2000
Measurement Bandwidth(Hz)	200

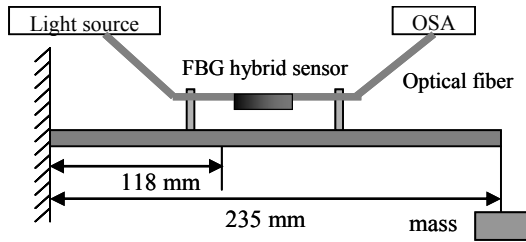


図 7 歪計測試験装置

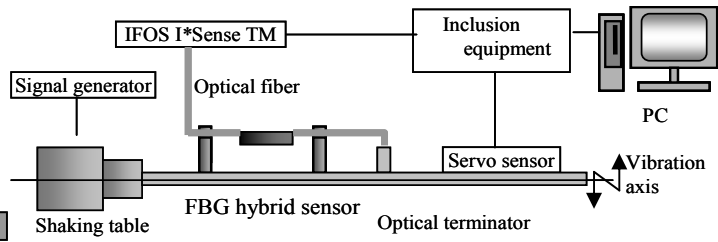


図 8 加速度計測試験装置

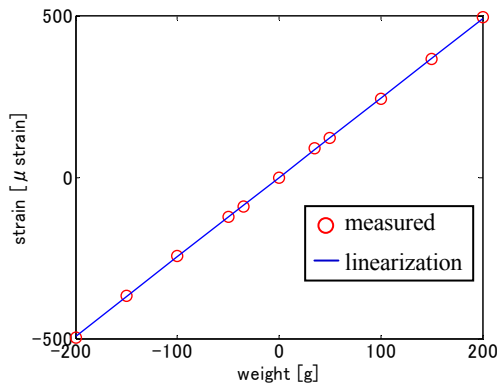


図 9 歪計測試験結果

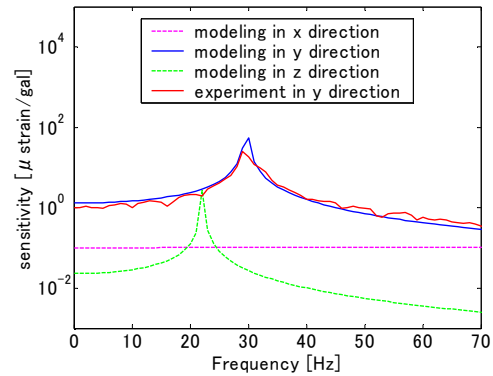


図 10 垂直 y 方向試験結果

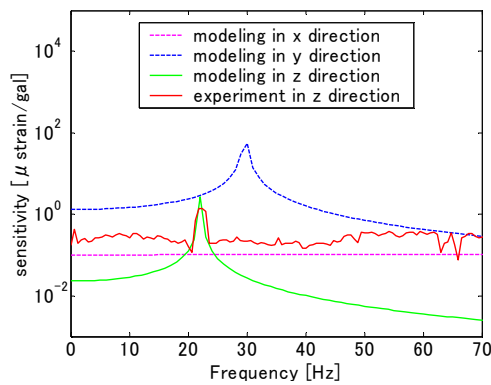


図 11 奥行き z 方向試験結果

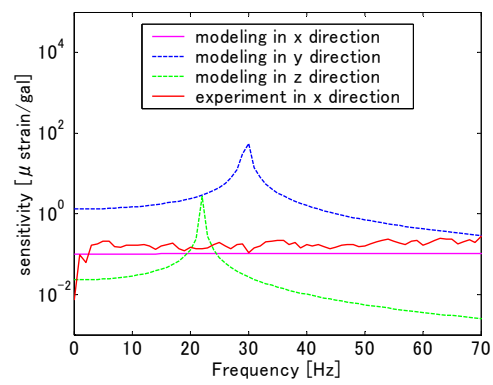


図 12 長手 x 方向試験結果

### 3.3 歪計測性能評価試験結果

歪計測実験の結果をその線形近似直線とともに図 9 に示す。なお実験温度は 24°C であり、大きな温度変化はなかった。ここでは、測定された波長から歪量への換算には、波長シフト  $\Delta\lambda$  と歪  $\varepsilon_0$  の間の線形関係としての理論値である  $1.2 \text{ pm}/\mu\text{e}^5$  を用いた。

本試験の荷重変化によって生じる歪を測定する歪センサにおいて、出力は線形関係を持たなければならない。本試験で試作した FBG 歪センサは、厳密な製作工程を経て作ったわけではないため、測定値と理論値に誤差が生じてしまうことは避けられないと考えられる。しかし、このような測定対象に生じる歪を正確にとらえる追従性はセンサに必要な性質である。そこで、ここでは、試作したセンサが必要な追従性を備えているかどうかを確認する。図 9 を見ると、本センサが歪計測において線形な出力を実現していることが確認できる。この結果から、提案する FBG ハイブリッドセンサが歪計測において十分な性能を有することが確認された。

温度補償については参考文献 8) より実現可能であることが実証されているため本論文では取り扱わないものとする。

### 3. 4 加速度計測性能評価試験結果

加速度計測試験に関しては、加振器によってスイープ入力したときのサーボセンサの出力値を gal に換算したものを入力とし、FBG センサの出力値を FBG 部の歪に換算したものを出力として、その伝達関数を求めた。伝達関数の振幅を垂直 y 方向、奥行 z 方向そして長手 x 方向の各入力方向についてそれぞれ図 10～図 12 に示す。

図 10 より共振点以外の感度、感度ピーク値などから分かる共振周波数等についてはほぼ理論と一致する結果が得られた。低周波数領域における  $0.98 \mu \text{ strain/gal}$  という感度からも垂直 y 方向に対して本センサに要求される性能を満たしていることが確認できた。奥行 z 方向の実験結果は共振点以外の領域ではモデリング結果と一致しなかった。この領域の感度は図 11 および 12 に示すように長手方向に対する感度方向と一致していることがわかる。センサの感度方向を考えたとき、長手方向の感度が奥行き方向に対するセンサ感度を越えることは考えにくい。したがって、この両方向に関してはノイズに取得信号が埋もれている可能性が考えられる。以上のことから長手・奥行き方向のセンサ感度は、垂直方向と比較して十分に小さいものであると考えられ、このセンサがクロストークに対して強いセンサであることがわかった。また本センサは図 10～12 に示すような感度特性を持つため、70Hz 以下の領域であれば固有振動数等の同定も可能である。

## 4. Support Vector Machine による損傷位置同定

### 4. 1 提案手法の評価方法

提案手法の有用性を実証するため門型フレームのモデルを用いて、損傷を仮定したシミュレーションを行った。まず、歪と固有振動数をシミュレーションによって損傷に対してどのように変化するかを求めた。こうして求めた特徴量から特徴ベクトルを構成し、パターン認識手法の一つであるサポートベクトルマシン(SVM)を利用して損傷位置同定を試みた。

### 4. 2 モデル概要

本研究では、表 5 に示すような特性を持つラーメン構造に対して提案手法を用いて損傷位置同定を行う。このフレームモデルの柱・梁をそれぞれ部材ごとに 10 個の有限要素に分割し、マトリクス法<sup>10)</sup>を用いて静的な状態での各有限要素にかかる曲げモーメントを求め、歪量を算出した。固有値は固有値解析によって算出した。なお柱脚部は固定とし、簡単のため 2 次元平面上での挙動のみ考慮する。損傷に関しては、柱の曲げ剛性の低下としてモデル化し、柱の一部に一つの要素で発生するものと仮定する。以上の条件下で、1 要素の曲げ剛性を元の剛性に対して 10%～90%(10%刻み)で変化させた。

### 4. 3 特徴ベクトル

損傷位置同定を念頭においた場合、損傷位置に依存して損傷指標が一定の相関を持って変化することが必要である。ここでは、損傷と損傷指標の間の関係について検討する。

歪 $\epsilon$ および固有振動数 $\omega$ ともに、次式で示す変化率  $c_\omega$ 、 $c_\epsilon$  を特徴量とした。ただし損傷時を「j」で示

表 5 解析対象のパラメタ

column	height	6 m
	section modulus	$0.006 \text{ m}^3$
	moment of inertia of an area	$0.00148 \text{ m}^4$
beam	length	12 m
	section modulus	$0.003 \text{ m}^3$
	moment of inertia of an area	$0.00045 \text{ m}^4$

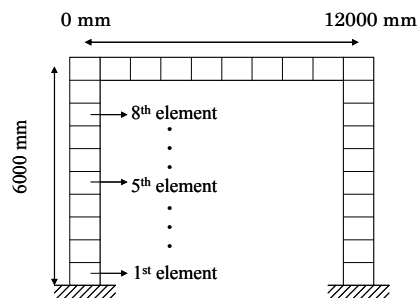


図 13 解析対象



している。

$$c_\omega = (\omega - \omega') / \omega, \quad c_\varepsilon = (\varepsilon - \varepsilon') / \varepsilon \quad (3)$$

図 14 は損傷時(50%剛性低下)の梁の歪分布の変化率を示している。分布形状が損傷要素の位置によって、独特の変化形状を示していることから、何点かの歪変化率をモニタリングし、比較することによって損傷要素の特定がある程度可能であると判断される。しかしながら、実用性を考慮して、極力少ないセンサとするために、特に相対的に差が大きい、かつ固有モードの識別が可能な配置として梁両端でのモニタリングが適切である。一方、図 15 は 1 次固有振動数が損傷位置そして損傷の程度によってどのように変化するかを示している。これに 2 次および 3 次の固有振動数の変化率を加えて損傷指標とする。本研究では計測可能な 3 次までの固有振動数と歪情報を付加することによって損傷位置同定の精度向上を目指す。これらの特徴量は、まとめて特徴ベクトル  $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  として表現する。図 16 は 1~3 次の固有振動数で構成される 3 次の特徴ベクトル、図 17 はこれに梁両端の歪変化率を  $x_4, x_5$  に付加した 5 次の特徴ベクトルである。図中の 10%~50%は健全時の剛性に対する損傷時の剛性の大きさを示している。また上段の図は 1 要素目の損傷を、下段は 4 要素目の損傷を示している。図 16 と図 17 を比較すると、図 17 の方が特徴ベクトルの変化が上段と下段で明らかであり、損傷要素の特定に有効であることがわかる。この特徴ベクトルを入力データとして用いパターンマッチングによって損傷要素を特定する。

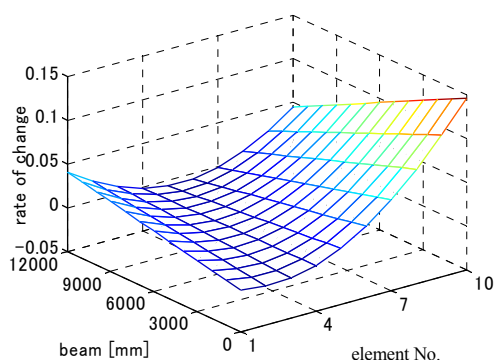


図 14 梁における歪変化率

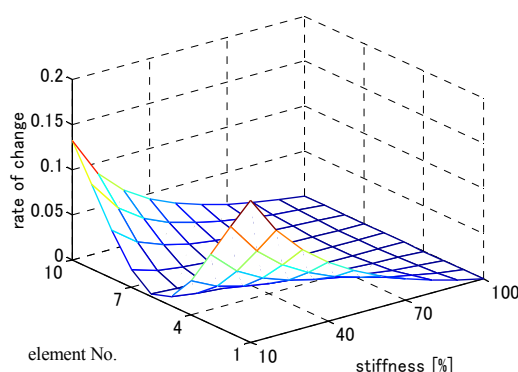


図 15 1 次固有振動数変化率

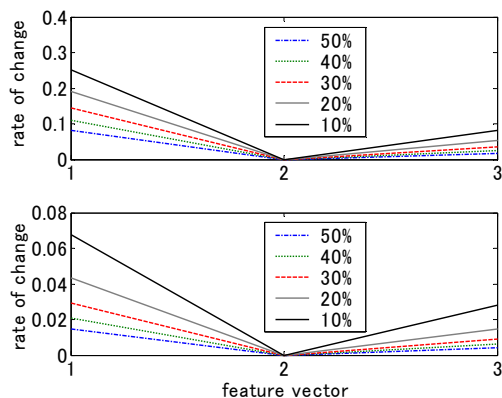


図 16 3 次特徴ベクトル

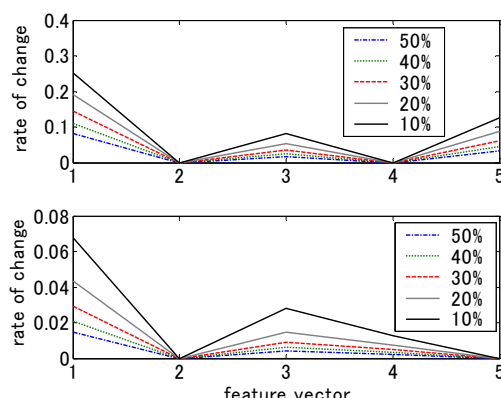


図 17 5 次特徴ベクトル

#### 4.4 パターン認識

パターン認識手法の一つであるサポートベクトルマシン(SVM)を利用して前節で述べた特徴ベクトルにより損傷位置同定を試みた。SVM は Vapnik らによって提案された学習システムで、複雑なクラス分類問題への適用が可能である<sup>11), 12)</sup>。

前述のシミュレーションモデルを用いて SVM を構築するための学習用データを作成した。損傷レベルとして無損傷時の剛性に対して 10、20、30、40、50%の変化を考慮し、5 つの特徴ベクトルを作成し

た。無損傷時の特徴ベクトルは0とし、これに各要素における損傷を想定し、最終的に51 (=10×5+1)の特徴ベクトルを作成した。これらの特徴ベクトルを用いて、1要素目から10要素目の損傷の有無を判定する計10種類のSVMを作成した。

学習用データと検証用データが同じ場合のシミュレーション結果を示す。図18は学習用の特徴ベクトルとして1～2次固有振動数変化率と梁両端の歪変化率を用い、検証用データとしては学習用データと同じデータで剛性が50%のものを利用して、その判定結果を示している。図の読み方について説明する。縦軸の量は識別超平面からの距離を表している。したがって、検証用データの識別超平面からの距離によって、縦軸の大きさが変化する。横軸のdata numberは0が無損傷のデータを示し、以下、1～10がそれぞれ1～10要素目における損傷データを示している。SVMnにおける正の出力結果はそのデータがn番目の要素の損傷を示すデータであることを示す。一方、負の出力結果は無損傷または他の要素での損傷を意味する。例えば、図18では、data number 4がSVM 4に正の出力結果を示している。それ以外のSVMでは負の出力結果をしている。つまりdata number 4は4要素目に損傷があることを示している。実際、data number 4は4要素目の損傷を仮定したデータであり、この判定結果が正しいことがわかる。したがって、このケースでは図18より構築したSVMが正確に損傷要素を特定できていることがわかる。以下がシミュレーションによって、正確に損傷要素を決定できるSVMを構築可能な特徴ベクトルであった。

- ①1～3次固有振動数変化率
- ②1～2次固有振動数変化率および梁両端の歪変化率
- ③1～3次固有振動数変化率および梁両端の歪変化率

一方で、1～2次の固有振動数変化率のみでは正確なクラス分類可能なSVMを構築することはできなかった。この結果から4次および5次の固有振動数の代わりに歪情報を併用することが有効であることがわかった。しかしながら、一般的に学習用データと検証用データが同じになるという状況は考えにくい。そこで本研究では、次に取得データに誤差が生じた場合についても位置同定が可能であるか検討した。例えば、本手法の高架橋のような構造物への適用を考えた場合、誤差の要因の1つとして温度変化が考えられる<sup>13)</sup>。温度変化は構造物全体の剛性に影響を与えるため、これが誤差として計測される。本研究では誤差として構造全体の剛性が10%変化した状況を想定した<sup>13)</sup>。ここでは2つのケースをシミュレーションし、その比較によって誤差の存在する状況に対する本手法の適用性を検討する。

ケース1として1～3次固有振動数変化率のみを用いてSVMを構築し、検証用データとして誤差を含んだこの特徴ベクトルを用いた。一方、ケース2としては1～3次固有振動数変化率および梁両端の歪変化率を利用してSVMを構築し、誤差を含んだ1～3次固有振動数変化率および梁両端の歪変化率をクラス分類した。これらの損傷位置同定結果をそれぞれ図19と図20に示す。図中に示した赤丸は誤判定を示している。その結果後者に関しては損傷要素を特定することができたが、前者では良好な結果が得られなかった。このことから、新たな損傷指標の併用により、従来よりも高精度な損傷位置同定が実現できるものと判断される。

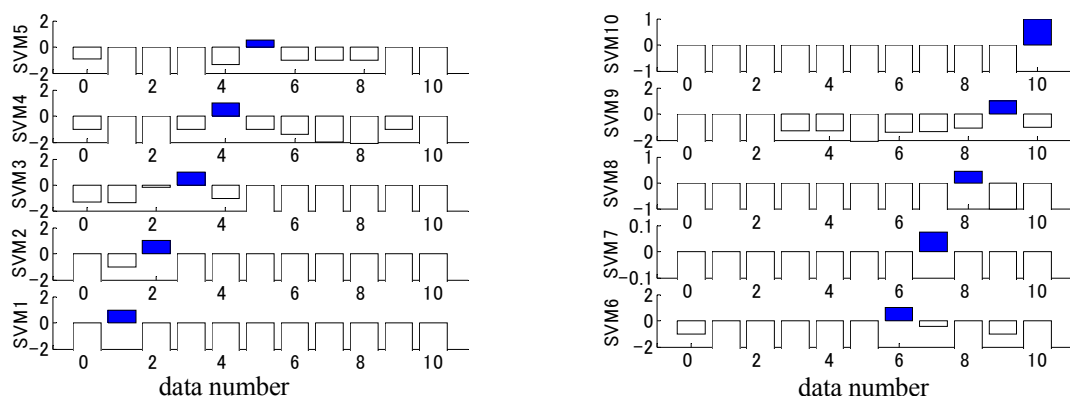


図18 4次特徴ベクトルによる損傷位置同定結果(誤差なし)



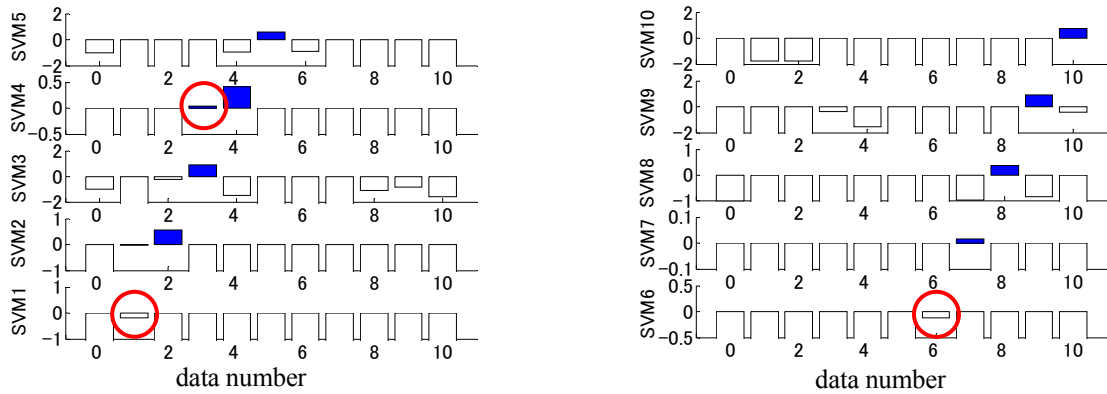


図 19 3次特徴ベクトルによる損傷位置同定結果(誤差なし)

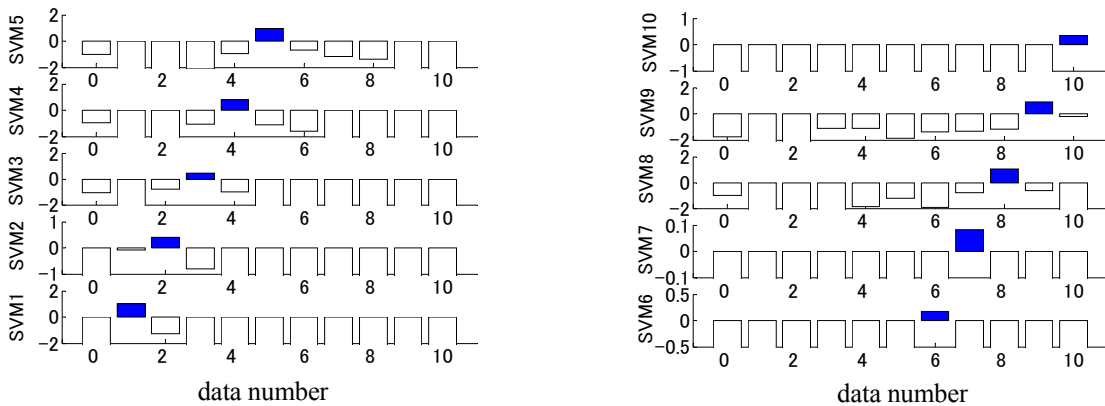


図 20 5次特徴ベクトルによる損傷位置同定結果(誤差なし)

## 5. 結論

本研究ではFBG ハイブリッドセンサを提案し、またそれを活用した新しい構造損傷検知手法を提案した。FBG ハイブリッドセンサは歪および加速度を1つのセンサで計測することを目的としている。実際にそのプロトタイプを製作し、その性能評価試験を行った。その結果、歪計測そして加速度計測ともに良好な結果が得られ、その実用性を実証することができた。一方、新しい構造損傷検知手法として、歪と固有振動数を損傷指標として併用する損傷位置同定手法を提案した。この手法は、4次および5次の固有振動数が同定できない場合、もしくは同定精度の信頼性が低い場合に、歪情報でこれを補う手法である。この手法の有効性を示すため、ラーメン構造の柱損傷の位置を同定するシミュレーションを行った。その結果、歪情報と固有振動数の併用によって、計測可能な3次までの固有振動数を同定することで損傷位置を特定できることを示した。

## 6. 参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学、東京大学出版会、2004.
- 2) Hoon, Sohn., Chacles, R. Farrar., Francois, M. Hemez., Devin, D. Shunk., Daniel, W. Stinemates., Brett, R. Nadler., and Jerry, J. Czarneckil.: A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996-2001, Los Alamos National Laboratory, 2004.
- 3) 濱本卓司、森田高市、勅使河原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出、日本建築学会構造系論文集、No.560、2002、pp. 93-100.
- 4) Brian, Culshaw., John, Dakin.: Optical Fiber Sensors, Volume Three, Artech House, 1996.
- 5) 山本鎮男：ヘルスマニタリング、共立出版、1999、pp34-.

- 6) Mita, A. : Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures, Proc. Second International Workshop on Structural Health Monitoring., Stanford University, 8-10 Sept. 1999, pp. 56-67.
- 7) M, G. Xu. , H, Geiger. and J, P. Dakin. : Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing, ELECTRONICS LETTERS. 18<sup>th</sup>, Vol.32, No.2, 1996.
- 8) H, Hayano. , A, Mita. : FBG Strain Sensor with Temperature Compensation Mechanism, Proc. First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokushima, Japan, Nov. 2003, pp. 1259-1266.
- 9) H, Kazama. , A, Mita. : Micro FBG vibration sensor system for civil infrastructure, Proc. First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokushima, Japan, Nov. 2003, pp. 1267-1275.
- 10) 吉田裕、川原睦人 : 新体系土木工学 3 有限要素法、技報堂出版、1983.
- 11) Vapnik, V.N. : The Nature of Statistical Learning Theory, Springer, 1995.
- 12) Christianini, Nello. , John, Shawe-Taylor. : An Introduction to Support Vector Machines, 2000.
- 13) Charles, R. Farrar. , Phillip, J. Cornwell. , Scott, W. Doebling. , and Michael, B. Prime. : Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges, Los Alamos National Laboratory, 2000.

(受理 : 2005 年 4 月 19 日)

(掲載決定 : 2005 年 11 月 22 日)

## Hybrid FBG sensor and Its Application to Structural Damage Detection

HAYANO Hiroshi <sup>1)</sup>, MITA Akira <sup>2)</sup>

1) Graduate student, Keio University

2) Professor, Keio University, Ph. D.

### ABSTRACT

Structural health monitoring systems are being recognized as effective tools to minimize maintenance costs for civil infrastructures. Recently, many damage evaluation methods for the systems have been proposed. In this paper, a novel monitoring system that uses a hybrid sensor and a new damage detection algorithm is proposed. At first, a hybrid FBG sensor for monitoring strain and acceleration is proposed. The sensor consists of an FBG element and a mass to form a vibration system. Performance evaluation was carried out through the strain and acceleration measurement experiments using the prototype sensor. Then, a new damage detection algorithm based upon combined use of natural frequency and strain as damage indexes is proposed. Strain information was used as a substitute for natural frequencies of higher modes. Many damage scenarios for a moment-resistant frame were tested for verifying the performance of this algorithm. The results show that the sensitivities of strain and natural frequency are significantly different. Based on this finding, damage position identification was carried out with the help of support vector machines (SVM). It is confirmed that combined use of natural frequency and strain measurement enhances the performance of the SVMs.

*Key Words: FBG, Strain Measurement, Acceleration Measurement, Damage Detection, Support Vector Machine*