

FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップ による片持ち梁^{はり}の振動計測性能の比較

福本伸太郎^{*1} 中島 富男^{*2}
Fukumoto Shintaro Nakajima Tomio

アルミ合金製片持ち梁を用いて、FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップの振動計測性能の比較を行った。固定端直近の振動に着目することにより、応力や固有振動数の評価が容易となる。その結果、FBG センサは、ひずみゲージや加速度ピックアップの応答周波数帯域以上の振動モードまで、計測が可能であることがわかった。

キーワード：FBG センサ、ひずみ計測、振動計測、光ファイバセンサ、同時計測

1. はじめに

近年、光ファイバセンサの1つであるFBG センサが、土木建築分野や航空宇宙分野まで広く利用されている。FBG センサは、温度変化とひずみの両方の計測ができる。構造物に適用する場合、ひずみセンサとして使用されることが多い。また、FBG センサの機械的性質を考慮すると、振動や衝撃の計測も可能であることが報告されている⁽¹⁾。

一般的に、梁構造物では、外力が加わると、固定端部が最大応力の発生箇所となり、破壊の起点となる。その箇所において、ひずみと加速度を同時に計測することで、構造物の健全性評価が可能になると考えられる。また一般的に、計測時には、使用環境や他の機器による電氣的な影響に注意しなければならない。ひずみゲージや加速度ピックアップでは、電氣的な影響を受けやすく、振動波形のノイズを除去するフィルタ（ローパス、およびハイパスフィルタ）を使用する。そのため、計

測可能な周波数範囲が限定される。一方、FBG センサは、光を用いて計測するので、電磁誘導によるノイズを受けず、フィルタも必要ない。そのため、計測可能な周波数範囲が限定されず、広範囲の計測が可能と考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、片持ち梁固定端直近の振動に着目し、FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップの計測性能の比較をした。さらにFEM（有限要素法）による固有値解析結果との比較をした。

2. FBG センサの特徴

まず、FBG センサの原理について説明する。**図1**にFBG センサの構造図を示す。FBG センサとはファイバ・ブラッグ・グレーティング（Fiber Bragg Grating）の略称であり、本センサは電気抵抗式ひずみゲージと比較し、電氣的影響を受けない、防爆性を有する、ひずみ感度が高い、1本の光ファイバで複数点の計測ができる、といった特

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：総務部 課長

長を持つ。FBG センサは、光ファイバのコア内にブラッグ格子と呼ばれる回折格子を形成し、特定の波長のみを反射する機能を持たせた光ファイバ型デバイスである。FBG によって反射した波長 λ_B は、式 (1) で表せる。

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

ここで、 n_e は光ファイバの屈折率、 Λ は回折格子の周期である。式 (1) を満たす波長で強い反射が生じ、それ以外の波長は透過する。この反射した波長はブラッグ波長と呼ばれる。

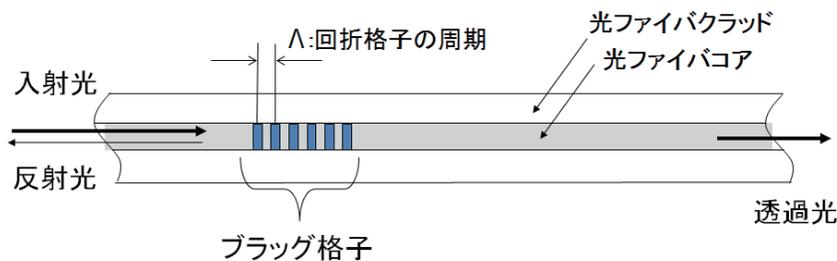


図1 FBG センサの構造図

図2にASE光源（増幅自然光源）およびFBG センサの透過光スペクトルを、図3にFBG センサの反射光スペクトルを示す。図2、図3より、透過光は1550 nm 以外の波長スペクトルを、反射光は1550 nm のみの波長スペクトルを示していることがわかる。

ブラッグ波長 λ_B は、ひずみ、および温度に依存して変化する。図4および図5に、FBG のひずみと温度をそれぞれ独立に変化させたときのブラッグ波長変化を示す。それぞれ直線性を示して

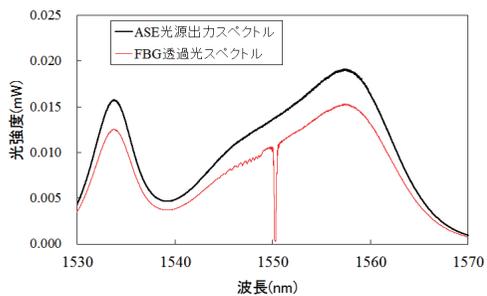


図2 ASE光源およびFBG センサの透過光スペクトル

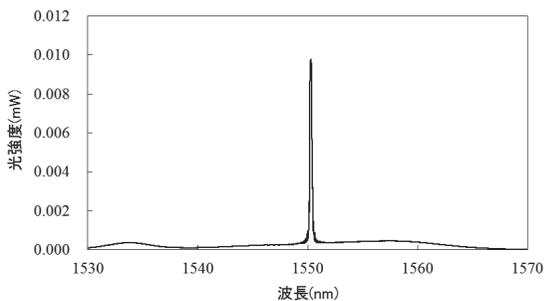


図3 FBG センサの反射光スペクトル

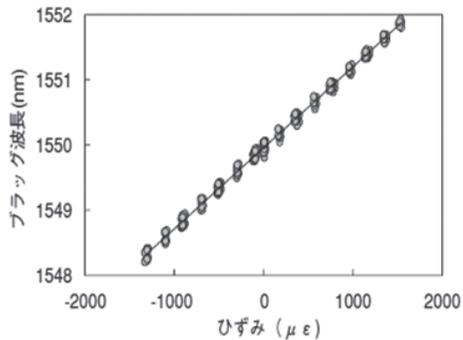


図4 ひずみとブラッグ波長の関係

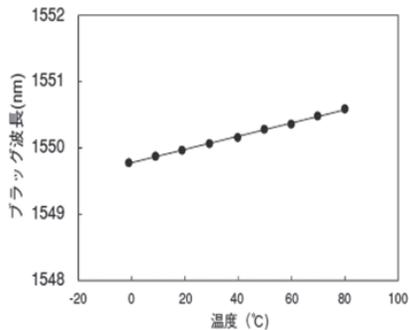


図5 温度とブラッグ波長の関係

おり、ひずみ、および温度の計測が可能となる。
 図4から求めたひずみ感度は $1.24 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、図5から求めた温度感度は約 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ である。各図における直線の傾きが感度を表す。これらの値は文献⁽²⁾で示されているものと同等の結果である。

3. 試験内容

3.1 試験概要

片持ち梁を用いて、FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップによる固定端直近の振動計測性能の比較を行った。なお、衝撃印加は、ハンマリングショックによるものである。

3.2 試験片

本試験では、試験片①、および試験片②の2種類を使用した。試験片①の寸法は長さ165 mm、幅70 mm、厚さ4 mm、試験片②は長さ400 mm、幅75 mm、厚さ4 mmであり、材質はともにアルミ合金 (AL7075-T6) である。

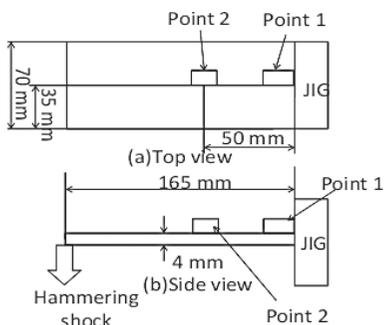


図6 試験片①のセットアップ図

3.3 試験セットアップ

各試験片にFBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップを貼り付けた。図6に試験片①、図7に試験片②のセットアップ図を示す。試験片①においてはPoint 1、2にFBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップを、試験片②においてはPoint 1、2、3にFBG センサ、およびひずみゲージを配置した。今回の試験では、固定端直近以外の場所での固有振動数を算出し、各値に差がないかを確認した。試験片①において、ひずみゲージにはKFG-5-120-C1-23 (株式会社共和電業)、加速度ピックアップには2222C (ENDEVCO 社) を使用した。また試験片②において使用した加速度ピックアップは、AS-50B (共和電業) である。なお、ひずみゲージは、試験片①で使用したものと同一である。FBG センサについては、1本の光ファイバで複数点の計測ができるという特徴を生かし、試験片①では2点の計測を、試験片②では3点の計測を1本の光ファイバで行った。図8に、試験

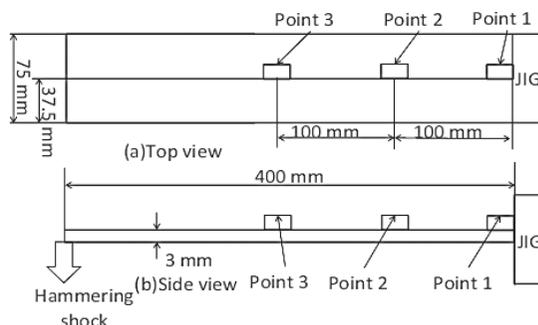


図7 試験片②のセットアップ図

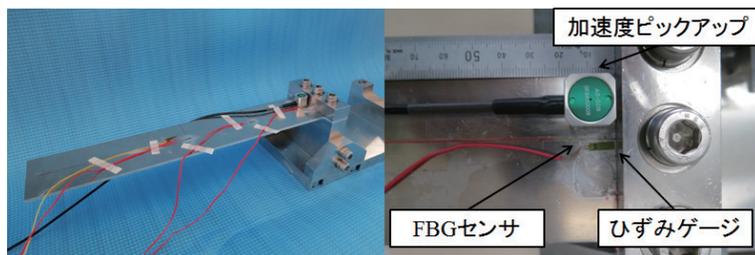


図8 試験片②の治具設置状況、および固定端直近の各センサ設置状況

片②の治具設置状況、および固定端直近の各センサ設置状況を示す。

4. 試験結果

4.1 ひずみ波形と加速度波形

図9に試験片① Point 1、図10に試験片② Point 1における各センサの信号波形を示す。なお、試験片①における計測では、サンプリング周波数を500 kHz、試験片②では5000 Hzとした。サンプリング周波数とは、1秒間の計測点数である。周波数解析時の周波数帯域は、サンプリング周波数の半分となる。図9より、試験片①における衝撃印加による振動は、FBGセンサ、およびひずみゲージではおよそ $\pm 100 \mu\epsilon$ のひずみ、加速度

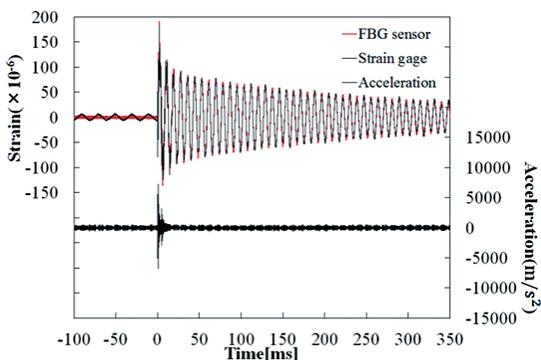


図9 試験片① Point 1における各センサ信号波形

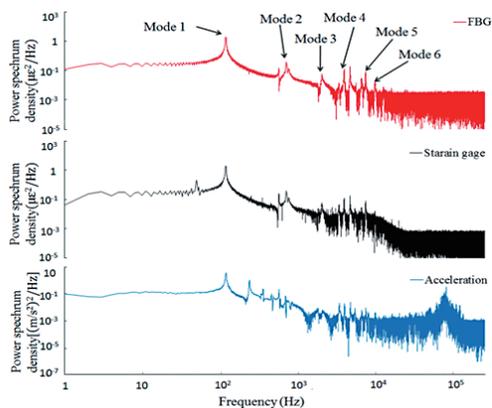


図11 試験片① Point 1における各センサの周波数解析結果

ピックアップではおよそ 5000 m/s^2 の加速度であった。また、図10より、試験片②におけるそれぞれの値は、およそ $\pm 40 \mu\epsilon$ のひずみ、 50 m/s^2 の加速度であった。これらの結果より、FBGセンサでは、ひずみゲージと同等のひずみ計測が可能であることが確認できた。

4.2 周波数解析結果

図11に試験片① Point 1、図12に試験片② Point 1における各センサの周波数解析結果を示す。図11の横軸に示す周波数範囲は1 Hz ~ 250 kHz、図12は0.1 Hz ~ 2.5 kHzである。なお図中の各ピークは、曲げ振動による固有振動数を示している。各図より、FBGセンサでは、曲げ1

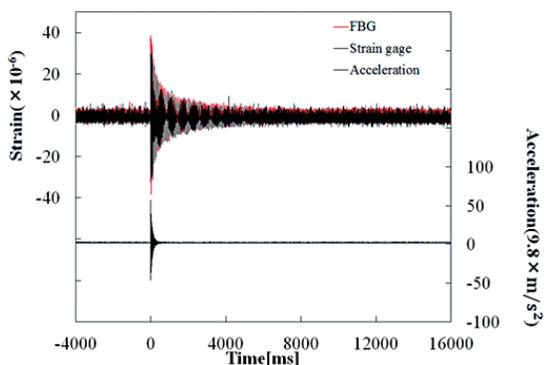


図10 試験片② Point 1における各センサ信号波形

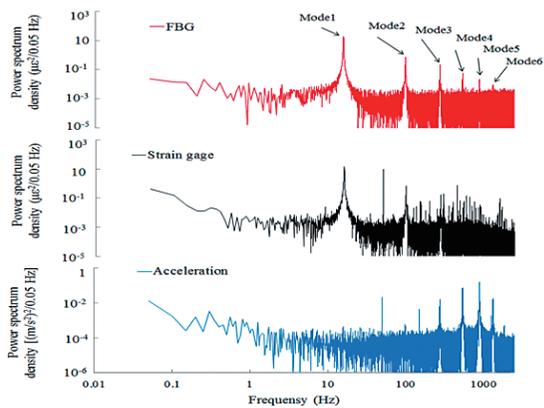


図12 試験片② Point 1における各センサの周波数解析結果

次～6次の固有振動数が確認できる。一方、ひずみゲージでは曲げ1次は確認できるが、それ以降においては、ノイズとの識別が難しい。加速度ピックアップは、**図 11**ではひずみゲージとほぼ同様であり、**図 12**では曲げ1次も確認できなかった。これらはノイズ除去のためにフィルタ(ローパス、およびハイパスフィルタ)を使用したためである。以上の測定結果より、FBG センサでは、15 Hz～100 kHzの固有振動数を得ることができ、ひずみゲージや加速度ピックアップよりも広範囲の振動計測が可能であることが確認できた。

また、各センサの傾向として、固定端直近以外の場所での固有振動数も、固定端直近と同じ結果となった。

5. 固有値解析

FEM (有限要素法) を用いて、固有値解析を実施した。モデルは4節点四辺形要素、最小メッシュは1 mm である。試験片①の周波数解析範囲は30 kHz まで、試験片②は1 kHz までとした。**図 13**に固有値解析例として、試験片①の曲げ6次のモード図を示す。なお、色の変化は変位分布である。

試験片①に対するFEM 解析モデルと、FBG センサで得られた固有振動数の比較を**表 1**に、試験片②に対する両者の比較を**表 2**に示す。**表 1**および**表 2**より、FBG センサとFEM 解析の結果は、曲げ6次までにおいて、誤差が2%未満であっ

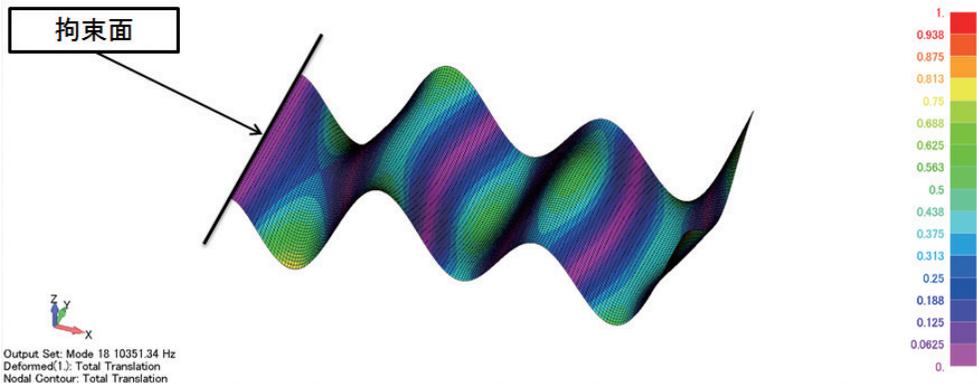


図 13 試験片①の曲げ6次のモード図

表 1 試験片①に対するFEM 解析モデルと、FBG センサで得られた固有振動数比較

Mode	FEM(Hz)	FBG sensor	
		Frequency spectrum(Hz)	Error(%)
1	118	117	0.85
2	707	704	0.43
3	2033	2024	0.44
4	3940	3924	0.41
5	7409	7404	0.07
6	9770	9733	0.38

表 2 試験片②に対するFEM 解析モデルと、FBG センサで得られた固有振動数比較

Mode	FEM(Hz)	FBG sensor	
		Frequency spectrum(Hz)	Error(%)
1	15.6	15.7	0.64
2	98.4	98.4	0
3	275	275	0
4	542	539	0.56
5	905	891	1.57
6	1321	1327	0.45

た。これらの結果から、FBG センサによる計測は、十分信頼性があるといえる。なお、試験片の物性値から求めた厳密解と FEM 解析の結果は同等であった。

6. まとめ

本研究において、アルミ合金製片持ち梁を用いて、FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップの振動計測性能の比較をした。その結果、FBG センサでは、ひずみゲージや加速度ピックアップの応答周波数帯域以上の振動モードまで計測が可能であることがわかった。

これまで当社では、FBG センサを動的センサとして使用してきたが、長期間計測の需要が高

まってきている。FBG センサ自体は、ガラス製なので劣化しないが、長期間計測のためには、接着や養生方法の問題を解決する必要がある。これらの課題が解決できれば、より広範囲の条件下で FBG センサによる計測が可能となる。

参考文献

- (1) 中島富男、廣瀬尚哉、早川努、荒川敬弘：FBG センサによる振動計測の自動車用車輪台上試験への適用、日本機械学会論文集 80 巻、816 号、2014
- (2) Othonos, A. and Kalli, K. : Fiber Bragg Grating, Artech House Publishers, 1999, pp.98-99



研究開発センター
研究開発グループ

福本伸太郎

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



総務部
課長

中島 富男

TEL. 045-791-3513
FAX. 045-791-3539