

ホプキンソン棒を用いた ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) センサ の周波数特性の評価

中島 富男*

Nakajima Tomio

ホプキンソン棒試験法を用いてファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) センサの周波数特性を評価した。使用したホプキンソン棒は長さ 2m、直径 30mm のステンレス鋼製の直棒である。ホプキンソン棒を用いて高周波数成分を有する弾性波パルスを発生させることができる。弾性波パルスは棒の軸方向に伝播するため、棒表面に接着されたセンサ (FBG センサ及び半導体ひずみゲージ) により軸方向のひずみを計測することが可能である。FBG センサと半導体ひずみゲージの計測結果は時系列波形及び周波数解析結果の両方において良い一致を見た。計測された弾性波パルスの周波数解析結果から、FBG センサにより 100kHz までの高速ひずみ変化を計測することが可能であることを示すことができた。FBG センサのひずみ計測システムは高速な現象の計測要求がある宇宙・航空分野の計測技術として適用できるものと期待できる。

キーワード：FBG センサ、動ひずみ計測、ホプキンソン棒、周波数特性評価

1. 緒言

ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) センサは電気抵抗式ひずみゲージの適用が難しい構造体の健全性監視 (ヘルスマモニタリング) 用センサとして期待されている。FBG は光ファイバコアに周期的な屈折率変化を紫外線レーザーの照射により格子状に生じさせたものである。FBG は光学的には一次元の回折格子として機能し、格子間隔 Λ と FBG 部の屈折率 n_e から $2\Lambda n_e$ の波長の光のみを強く反射する性質がある。この波長はブラッグ波長 (Bragg wavelength) と呼ばれる。FBG は光通信用のフィルタとして多用されているが、格子間隔 Λ と屈折率 n_e はそれぞれ長さや温度に感度を有するため、

ひずみセンサや温度センサとしても広く利用されている⁽¹⁾。FBG センサを静的また準静的な計測方法により構造体のヘルスマモニタリングに適用した例は数多く報告されている。また、FBG センサが数 MHz 程度までの高速な応答性を有することは広く知られており、FBG センサを受信用の超音波センサやアコースティックエミッション (AE) センサとして利用しようという試みもなされている⁽²⁾。

一方、動的な構造ヘルスマモニタリングの要求が宇宙航空技術分野にある。超音波検査 (UT) や AE と言った計測方法だけでなく、ひずみや加速度などの物理量を高速に計測できることは構造体監視技術として重要である。

IIC では FBG センサを用いた高速動ひずみの計

* 研究開発センター 研究開発グループ 課長

測システムの研究を進めてきた。10kHz 程度までのひずみを計測できることは既に確認している⁽³⁾。本研究の延長として、より高速なひずみまで計測可能かを検討することとした。その一環として、高速なひずみパルスを発生できるホプキンソン棒を用いた方法により評価することを試みた⁽⁴⁾。その結果、100kHz 程度までの動ひずみの計測が可能であることが確認できたので、その結果を報告する。

2. FBG センサの計測システム

FBG センサの計測システムはさまざまな方式が提案されているが、IIC では Davis and Kersey が 1994 年に提案し、その後津田らが研究を進めている光学フィルタの透過特性と反射特性を利用する方式を採用してきた^{(5), (6)}。本手法は FBG センサからの反射光を、入射光、透過光及び反射光の 3 つの入出力端子を持つ光学フィルタに入射し、光学フィルタを透過する光強度と反射する光強度から FBG センサ反射光を復調する方法である。図 1 に FBG センサのブラッグ波長を計測するために使用する光学フィルタの透過率と反射率の例を示す。図 1 において、このフィルタは三つの帯域を持つことがわかる。第一の帯域は透過率が大きく、反射率が小さい波長帯域 1 である。第二の帯域は透過率が小さく、反射率が大きい波長帯域 2

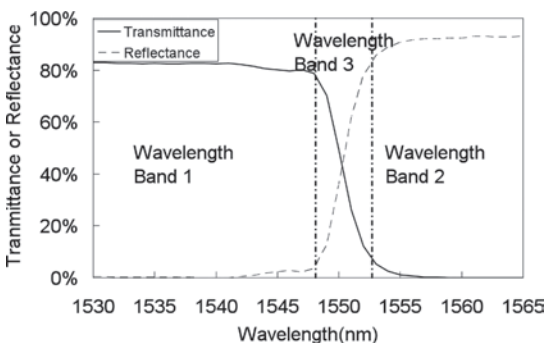


図 1 光学フィルタの透過率と反射率の例

である。そして、第三の帯域は透過率と反射率が波長に対して変化する波長帯域 3 である。FBG センサのブラッグ波長がこの波長帯域 3 の中で変化すると、フィルタの透過ポートと反射光ポートの光強度も同時に変化する。光学フィルタの透過光ポートの光強度を P_T 、反射光ポートの光強度を P_R とすれば、 P_T と P_R から式 (1) に示す無次元量 R 値を定義することができる。

$$R = \frac{P_R - P_T}{P_T + P_R} \quad (1)$$

FBG センサのブラッグ波長がひずみにより変化すると、同時に無次元量 R 値も変化する。事前に R 値とブラッグ波長の関係を取得しておけば、 P_T と P_R を同時に計測することにより R 値を知ることができ、 R 値とブラッグ波長の校正特性からブラッグ波長を推定することが可能となる。 P_T と P_R を高速に計測することは実用的ではないため、代わりにフォトダイオードを用いた光で変換器により P_T と P_R を電圧 V_T と V_R に変換して計測する。電圧に変換することにより連続的な計測が可能となる。 V_T と V_R を使用すると、式 (1) は下記の式 (2) のように書き換えられる。

$$R = \frac{V_R - V_T}{V_T + V_R} \quad (2)$$

図 2 に R 値とブラッグ波長の関係の例を示す。図 3 には本手法の計測システムのブロックダイアグラムを示す。本システムは広帯域光源と光サーキュレータと 3 ポートの光学フィルタと二つの光電変換器により構成される。

3. ホプキンソン棒による高周波弾性波試験法

ホプキンソン棒による試験は衝撃加速度を計測する加速度計の校正方法としてしばしば利用される^{(7), (8)}。今回の試験ではステンレス鋼の直径

30mm、長さ 2 m の直棒を使用した。

ホプキンソン棒は長手方向の二ヶ所で小さなベアリングボールにより支持され、軸方向に自由に移動できる。ホプキンソン棒の片端の端面に衝撃を印加すると弾性波パルスが生成され、棒の軸方向に伝播する。本試験ではアルミ製の径 14mm、長さ 30mm の飛翔体をエアコンプレッサによる空気圧で加速し、ホプキンソン棒に衝突させることにより弾性波パルスを発生させた。本手法で発生

する弾性波パルスの持続時間はおよそ $100 \mu \text{sec}$ である。発生した弾性波パルスは棒の軸方向に伝播し、もう一方の端面で反射する。ホプキンソン棒による試験においては、反射する前の弾性波パルスのみを使用することが一般的である。弾性波パルスは棒の表面に軸方向に接着されたセンサによりひずみとして計測することができる。図 4 にホプキンソン棒試験装置の構成を示す。

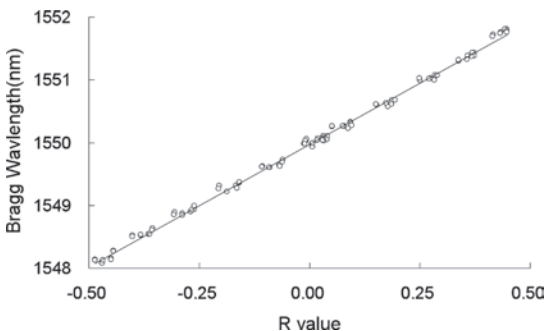


図 2 光学フィルタの R 値とブラッグ波長の関係の例

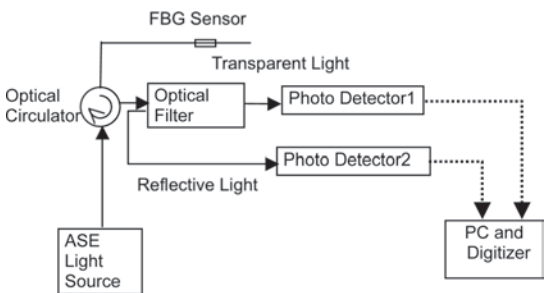


図 3 ひとつの FBG センサ用の計測ブロックダイアグラム

4. 試験条件

試験はブラッグ波長の異なる二つの FBG センサと、比較のための二種類の半導体ひずみゲージをホプキンソン棒の表面に軸方向のひずみを計測するように接着して実施した。二つの FBG センサはホプキンソン棒の曲げひずみを除去できるように棒の周方向において 180° 位相のずれを持つように配置した。軸方向の位置は同じである。

比較用の半導体ひずみゲージもホプキンソン棒の軸方向には同一な箇所接着した。周方向においては、二つの FBG センサの配置と同様の理由により、曲げひずみを除去できるように配置した。また、半導体ひずみゲージは温度変化によるホイーストンブリッジのバランスを安定化させるため、2 アクティブ・2 ダミーの 4 ゲージ法によりブリッジ回路を結線した。

表 1 に使用した FBG センサの代表的な仕様を示す。同様に、表 2 に使用した半導体ひずみゲージの代表的な仕様を示す。計測対象の弾性波パル

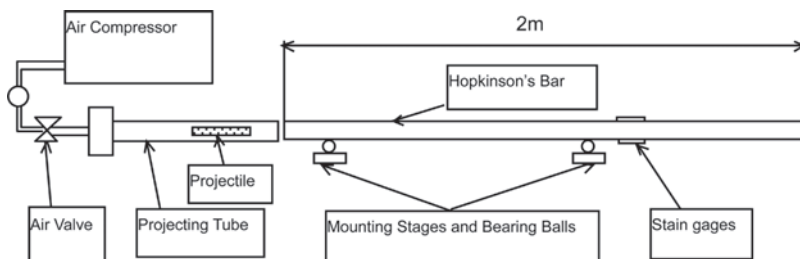


図 4 FBG センサ試験装置の構成

表 1 FBG センサ代表仕様値

FBG sensor's number	No.1	No.2
Supplier	AVENSYS	FUJIKURA
Center wavelength at room temperature	1550nm	1560nm
Band width at -3dB	0.4nm	0.8nm
Grating length	5mm	2mm

表 2 ひずみゲージ代表仕様値

Strain gage's number	No.1	No.2
Supplier	KYOWA	KYOWA
Strain gage's type	KSP-1-350-E4	KSN-2-120-E4-16
Gage length	1mm	2mm
Gage factor	150	-100

スを明瞭に計測するため、10MHz のサンプリング周波数と垂直軸 12bit の AD 変換器 (NI PCI-6115) を使用した。

5. 試験結果

図 5 に本試験において取得した弾性波パルス をひずみ時系列波形として計測した例を示す。図 5 は FBG センサの信号と半導体ひずみゲージの信号の 3 本の線があるが、判別が難しいほど良い一致を示している。

なお、一つの FBG センサの信号には電気抵抗式ひずみゲージをシングルアクティブゲージで計測した場合と同様に弾性波パルスの圧縮ひずみとホプキンソン棒の曲げひずみが含まれている。電気抵抗式ひずみゲージではホイーストブリッジ結線を 2 アクティブ結線とすることにより曲げひずみを除去することが可能である。一方、FBG センサの場合には、ホプキンソン棒の周方向に 180 度位相をずらして接着した二つの FBG センサの同一時刻におけるブラッグ波長シフトの平均値を求めることにより曲げひずみを除去した。図 5 において、FBG センサのブラッグ波長からひずみへの換算には一般値である $1.2\text{pm}/\mu\text{E}$ を使用した。

図 6 に図 5 の時系列波形を周波数解析したパ

ワースペクトラム密度 (PSD) を示す。図 6 より、FBG センサ及び二つの半導体ひずみゲージの信号は 100kHz までの周波数帯域を含んでいることがわかる。宇宙用ロケットの段間分離時の火工品によって発生する衝撃加速度は 50kHz 程度までが評価対象とされており、100kHz までの帯域の動ひずみが計測できることは十分に有効と考える。

図 7 に今回使用したひずみアンプの出力電圧を示す。図 2、図 5、図 6 及び図 7 より、FBG センサのダイナミックレンジは半導体ひずみゲージより広いことがわかる。一方、ノイズレベルはほぼ同等であることもわかった。

6. 結言

ホプキンソン棒を用いて励起された高速弾性波パルスを二つの FBG センサと二種類の半導体ひ

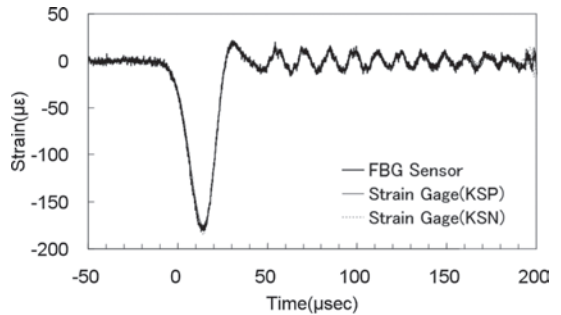


図 5 FBG センサ及び半導体ひずみゲージで測定された弾性波パルス

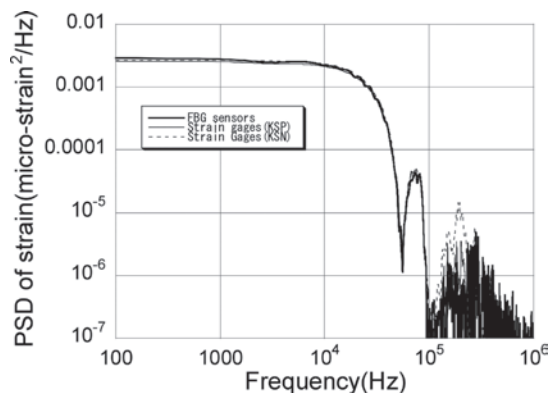


図 6 ひずみのパワースペクトラム密度

ずみゲージより計測した。それぞれのセンサで計測された結果は時系列波形及び周波数解析結果の両方において良い一致を示した。

今回の試験の結果は、FBG センサにより 100kHz までの高速なひずみを計測することが可能であることを明瞭に示すものであった。また、FBG センサと半導体ひずみゲージの信号の比較から、FBG センサのダイナミックレンジは半導体ひずみゲージよりも広いことが示された。一方、ノイズレベルは 100kHz 程度まで同等であった。

今回使用した FBG センサの計測システムは高速現象の取扱が必要な宇宙航空用の構造体の試験や監視に有効であることが示されたと考える。

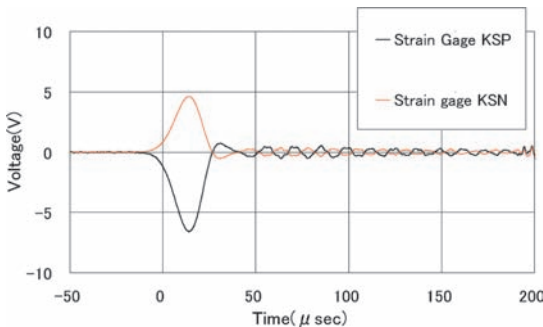


図7 半導体ひずみゲージを接続したひずみアンプの出力電圧

参考文献

1) 中島、荒川、2007、“FBG センサによる高速動ひずみ計測について”、IIC REVIEW

38:pp.37-44

- 2) Tsuda, H., Sato, E., Nakajima, T., et al., 2009, “Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions”, OPTICS LETTERS, 34(19):pp. 2942-2944
- 3) 中島、津田、荒川、秋宗、2008、“FBG センサによる高速ひずみ計測”、日本非破壊検査協会平成 20 年春季講演大会講演概要集、pp.133-134
- 4) 中島、2006、“衝撃加速度を用いた加速度計校正方法について”、IIC REVIEW 35:pp.44-53
- 5) Davis, M.A, Kersey, A.D, 1994,“All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler”, Electronics Letters, Vol30, pp.75-77
- 6) Tsuda,H., Lee, J. R., 2007, “Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system”, Compos. Sci. Technol., 67, pp. 1353-1361
- 7) Davies, R.M.A.,1948, “A Critical Study of Hopkinson Pressure Bar”, Phil.Trans. A,240,pp.375-457
- 8) Ueda, K., Umeda, A., 1993, “Characterization of Shock Accelerometers Using Davies Bar and Strain gages”, EXPERIMENTAL MECHANICS, 33(3), pp.228-233



研究開発センター
研究開発グループ 課長
中島 富男
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547