多重化した FBG センサによるひずみと AE 同時計測システムの開発* (固体ロケットモータ複合材チャンバの構造ヘルスマonitoringを目的として)

中島 富男^{*1}, 佐藤 英一^{*2}, 津田 浩^{*3}, 佐藤 明良^{*4}, 川合 伸明^{*2}

Development of Simultaneous Measurement System for Strain and AE Using FBG Sensors (For Structural Health Monitoring of Solid Rocket Motor Composite Chambers)

Tomio NAKAJIMA^{*1}, Eiichi SATO, Hiroshi TSUDA, Akiyoshi SATO and Nobuaki KAWAI

^{*1} IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd, Technical Research & Development Center
2-6-17, Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 236-0004, Japan

A structural health monitoring system using multiple fiber Bragg grating sensors (FBG sensors) was developed. The system was designed to measure a large and a fast strain change and also to measure acoustic emissions (AE) simultaneously. The strain up to 1% and up to 100 kHz was considered. A multiple fiber ring laser was adopted as a light source, which consists of a multiple erbium-doped fiber amplifier (EDFA), an optical circulator, optical couplers and FBG sensors. Multiple fiber ring lasing wavelengths depended on strains loaded to FBG sensors. A CFRP beam bending test was carried out to confirm the possibility of simultaneous measurement of both strain and AE signals from a single FBG sensor. In the test, signals from a conventional electric resistive strain gage and a piezo-electric AE sensor were revealed equivalent to those from the FBG sensor. The system will be applied to development of composite structures in aerospace field such as Epsilon Launch Vehicle.

Key Words : Strain Measurement, AE Measurement, FBG Sensor, Composite Structure, Solid Rocket Motor Chamber, Fiber Ring Laser

1. 緒 言

宇宙用固体ロケットはフライト前の実機による作動試験が不可能なシステムである。そこでまず、実機と同等な別個体を供試体とした地上燃焼試験により、燃焼圧力により生じるチャンバ表面のひずみや加速度の実運用相当の環境条件の評価を行う。実機のチャンバは、地上燃焼試験の結果により保証された設計条件の耐圧試験で性能保証される。耐圧試験では、多数のひずみゲージと圧電 AE センサによる計測が行われており、センサの取付け作業と信号ケーブルの配線・接続作業は複雑で長時間を要するものとなっている。耐圧試験後にはこれらのセンサと信号ケーブルは取り外され、輸送・推進薬注形・ロケット組立の工程を経て、打ち上げに至る。

上記複合材チャンバの構造ヘルスマonitoringは、製造後からフライト前までのさまざまな環境負荷に対して、構造上の健全性を管理・評価し、フライトの信頼性を高めようとするものである。また、その手法がフライト中にまで適用できるならば、フライトデータにより得た知見を次号機の各工程に反映することが可能となり、ロケット打ち上げの信頼性をさらに高めることに寄与できる。

このような背景を受け、著者らは光ファイバセンサを複合材チャンバの構造ヘルスマonitoringに適用することを試みた。光ファイバセンサによる複合材構造物の構造ヘルスマonitoringは広く行なわれている⁽¹⁾。光ファイバセンサは多様な方式があるが、著者らは高速動ひずみ計測(～100kHz)に有効⁽²⁾な FBG センサに着目した。

* 原稿受付 2012 年 1 月 18 日

^{*1} 正員, (株)IHI 検査計測 研究開発センター (〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦 2-6-17)

^{*2} (独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1)

^{*3} (独)産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2)

^{*4} (株)IHI エアロスペース 品質保証部 (〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900)

E-mail: t_nakajima@iic.ihi.co.jp

固体ロケットの燃焼試験においては、動的なひずみ計測が要求されているからである。さらに、FBG センサは AE 信号（～2MHz）を含む超音波センサとして使用できる⁽³⁾。AE センサとして使用すれば、複合材チャンバの健全性を製作直後からフライト直前まで連続的に監視することが可能となる。また、FBG センサは多重化が容易であり、従来のひずみゲージや圧電 AE センサを使用する際の課題であった計測ラインの複雑さを簡略化し、センサと信号ラインを大幅に軽量化できる。

Tsuda らは一つの FBG センサにひずみセンサと超音波センサの両方の役割を持たせるヘルスマニタリングシステムを提案している⁽⁴⁾。著者らは、Tsuda らの提案を発展させ、一つの FBG センサによりひずみと AE を同時計測可能なことを報告している^{(5)~(8)}。著者らは、研究をさらに進めて、宇宙用固体ロケットモータ複合材チャンバの構造ヘルスマニタリングを対象とした場合の多重化した FBG センサを用いた 1%までの大ひずみ範囲におけるひずみと AE を同時に計測可能なシステムを開発した^{*5}。本稿では、開発したひずみと AE 同時計測システムのシステム検討、設計・製作結果およびシステム評価結果を報告する。開発したひずみと AE 同時計測システムは宇宙用固体ロケット複合材チャンバの地上工程での構造ヘルスマニタリングを対象としたものである。なお、(独)宇宙航空研究開発機構ではイプシロンロケットを開発中であり、著者らは開発したひずみと AE 同時計測システムをイプシロンロケットの開発段階に適用することを目指している。

2. FBG センサを用いたひずみと AE 同時計測システム要件に関する検討

2・1FBG センサの概要

FBG (Fiber Bragg Grating) は光ファイバのコア中に周期的な屈折率変化を構成させたものである⁽⁹⁾。式 (1) 中の λ_B の波長を含む光を FBG に入射すると、 λ_B の波長を強く反射する性質がある。 λ_B はブラッグ波長と呼ばれる。式(1)において n_e は FBG の有効屈折率であり、 Λ は格子間隔を表す。 λ_B が n_e と Λ の積で与えられることから、屈折率および格子間隔の変化に応じてブラッグ波長 λ_B は変化する。FBG センサはこの性質を利用しひずみセンサや温度センサとして利用されている。

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

2・2 FBG センサによる高速動ひずみとブラッグ波長変化を許容する AE 計測技術

2・2・1 高速動ひずみ計測技術

FBG センサの静的なブラッグ波長変化は光スペクトラムアナライザなど汎用光学計測器により計測可能である。しかし、高速なひずみ計測を行うためには特殊な手法が必要となる。著者は Davis & Kersey が提案した手法⁽¹⁰⁾を用いて、100kHz までのひずみ計測が可能であることを報告している⁽²⁾。Davis & Kersey の手法⁽¹⁰⁾の模式図を図 1 (a)に示す。図 1 (a) 中の PD1 と PD2 は光電変換器を表し、VT と VR は光強度に比例した PD1 と PD2 の出力電圧を示す。図 1 (a) 中の光学フィルタの透過率と反射率の例を図 1 (b) に示す。図 1 (a) の VT と VR から無次元量 R を式 (2)のように定義する。ブラッグ波長 λ_B は図 1 (b) の光学フィルタ特性から無次元量 R の一価の関数である。VT と VR は連続的に計測できるため、Davis & Kersey の手法⁽¹⁰⁾は高速なブラッグ波長変化の計測に適した方法である。

$$R = \frac{VR - VT}{VT + VR} \quad (2)$$

2・2・2 FBG センサによる AE 計測技術（従来の方法）

FBG センサを用いて AE を計測する方法として、FBG センサの反射率が半減する波長で発振するレーザ光を入射したときの反射光強度変化を計測する方法がある^{(11) (12)}。しかし、この方法は FBG センサにひずみが負荷されると入射するレーザ光の波長を変化させる必要があり、動的にひずみが増加する構造体に適用することが難しい。Lee らは広帯域光源と、FBG の反射光スペクトラム全幅に等しい FSR (Free spectrum range) を有し透過率ピーク

*5 開発した計測システムの呼称は HFS-G1 (Health monitoring system using FBG Sensor - Ground equipment 1st model) とした。

波長を $1/4$ ずらした二つのファイバ・ファブリ・ペローフィルタ (Fiber Fabry-Perot filter: FFP) を用いて、ブラッグ波長に依存しない AE 計測方法を提案している⁽¹³⁾。Lee らの手法⁽¹³⁾の計測ブロック図を図 2 に示す。著者らは Lee らの手法⁽¹³⁾を使用して、ブラッグ波長が変化する供試体の AE 計測が可能であることを報告している⁽¹⁴⁾。

(a) Block diagram of the optical circuit

(b) Example of an optical filter characteristic

Fig.1 Schematic of the Bragg wavelength measurement method proposed by Davis & Kersey⁽¹⁰⁾

Fig.2 Block diagram of the AE measurement method using FFPs proposed by Lee et al.

2・2・3 ブラッグ波長変化を許容する AE 計測技術 (光ファイバ・リングレーザを使用した場合)

Tsuda は、広帯域光源の光強度波長依存性または光ファイバアンプの増幅率波長依存性を利用し、FFP などの光学フィルタを使用せずに FBG センサによる超音波検知が可能であると報告している⁽¹⁵⁾。図 3 に広帯域光源 (ファイバラボ FL7004) の発光スペクトルを、図 4 に光ファイバアンプ (ファイバラボ AMP-GB9013-CB-13) の増幅率波長依存性の例を示す。光ファイバアンプと FBG を用いて図 5 に示す光学回路を構成すると光ファイバ・リングレーザを発振させることができる。図 5 において FBG はセンサとしてだけでなく、レーザ系のミラーとしての役割も持つ。光ファイバアンプは微弱な広帯域光を照射し、光サーキュレータを介して FBG まで伝播する。FBG からはブラッグ波長での狭帯域光が光サーキュレータと光カプラを介して光アンプに回帰する。このプロセスを光の速度で繰り返すことにより、FBG のブラッグ波長においてレーザ発振する。Tsuda は広帯域光源よりも光ファイバ・リングレーザを用いた場合の方が FBG センサによる超音波検知の S/N 比が大きいと報告している⁽¹⁵⁾。これは、光ファイバ・リングレーザを光源とすると、FBG センサ反射光の光強度が強くなり、かつ、反射光スペクトラムの S/N 比が大きいためである。図 6 に同一の FBG センサ (中心波長 1551nm, グレーティング長 2mm) を使用し、光ファイバ・リングレーザを光源とした場合と広帯域光源の場合の FBG センサ反射光スペクトラムの比較を示す。図 6 は FBG センサ反射光の $1/10$ の光強度のみを光スペクトラムアナライザ (横河 AQ6317C) により測定したものである。なお、AE 計測は、図 5 の光回路において光ファイバ・リングレーザ光の一部を光カプラで計測系に分岐することにより可能となる。

Fig.3 Example of a spectrum of emitted light from a broadband light source

Fig.4 Example of a wavelength dependency of an amplification gain of an optical amplifier

Fig.5 Block diagram of a fiber ring laser using an optical fiber amplifier and an FBG sensor

Fig.6 Reflected light spectrums from an FBG sensor

2・3 FBG センサによるひずみと超音波の同時計測系の概念

FBG センサが一つの場合のひずみと AE 同時計測系を模式的に示すと図 7 のようになる。すなわち、一つの FBG センサからの反射光を光カプラによりひずみ計測系と AE 計測系に分岐させる。ひずみ計測系ではブラッグ波長変化を計測する。このブラッグ波長変化は AE 計測系に比べて低周波数領域の変化である。一方、AE 計測系においては、高周波数のブラッグ波長変化に伴う光電変換器出力電圧変化のみを抽出する。著者らは広帯域光源を用いて、ひずみ計測系に Davis & Kersey の手法⁽¹⁰⁾を適用し、AE 計測系に Lee らの手法⁽¹³⁾を採用して同時計測が可

能であることを報告している^{(5) (6)}。さらに、光源に光ファイバ・リングレーザを適用しても同時計測が可能であり、かつ、AE 計測感度が向上することを報告している^{(7) (8)}。

Fig.7 Block diagram of the simultaneous measurement system for strain and AE for an FBG Sensor

2・4 FBG センサを多重化させるための光学系について

前節で示したひずみと AE の同時計測系を多重の FBG センサ列に適用するための方法について考える。多重化された FBG センサの識別方法は光の波長領域か時間領域で識別することが考えられる。Lee ら⁽¹³⁾や Tsuda⁽¹⁵⁾の AE 計測方法を採用するためには、波長領域による FBG センサの識別が合理的である。これは、光ファイバ通信技術の波長分割多重方式 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) を採用することを意味する。一方、AE 信号の発生はあらかじめ予見できない現象であるため、光源には連続照射光源が必要である。連続照射光源と WDM 方式を採用するシステムは、光ファイバ通信と同様に波長分割器 (WDM Module) が必要となる。

3. FBG センサを複合材チャンバに適用可能なシステムの設計

3・1 複合材チャンバの地上試験条件への対応

FBG センサを固体ロケットモータ複合材チャンバ⁽¹⁶⁾に適用するための設計条件を検討した。既存の大型固体ロケットモータ複合材チャンバの地上試験での計測条件を表 1 に示す。表 1 より 1%を超える大きなひずみ計測および 500Hz 以上のサンプリング周波数でのひずみ計測が必要である。

さらに、システム設計に当っては、FBG センサの計測技術が光ファイバ通信技術を基にしている制約を考慮する必要がある。主な制約は下記の (1) から (3) である。

- (1) 光ファイバ通信波長帯域の制約: 光ファイバ通信に使用される光の波長帯域は 1300nm から 1600nm の 300nm 帯域幅である。一方、耐圧破壊試験時の 1.5%以上のひずみに相当するブラッグ波長シフトは中心波長が 1550nm の一般的な FBG センサのひずみ感度 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ で考えると 18nm に相当する。地上燃焼試験の 1.0%ひずみの場合ではブラッグ波長変化 12nm に相当する。WDM 方式の計測システムにおいては、使用可能な波長帯域が FBG センサ多重化の制約となる。
- (2) 光ファイバ通信技術規格による制約: 光ファイバ通信技術の WDM 規格には CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) と DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) の二つがある。CWDM は主に FTTH と呼ばれる光ファイバ回線の末端に使用され、波長分割幅が 20nm である。DWDM は長距離の幹線通信回線に使用され、波長分割幅が 0.8nm または 0.4nm と狭い。システム要求から、DWDM の波長分割幅は十分でなく、CWDM が必要であるが、波長分割幅 20nm に対する透過帯域は 13nm (ひずみ 1.08%) である。CWDM や DWDM の波長分割器は汎用品であり安価である。計測要求に従い、規格外の波長分割器の製作は可能であるが、開発費用が必要となる。
- (3) 光源および光サーキュレータや光カプラの調達性の制約: 計測システムの光源如何に関わらず、FBG の反射率や半値幅等の仕様を確認・検査するため、広帯域光源および光サーキュレータや光カプラが必要となる。これらは C バンド帯 (1530nm から 1560nm の 30nm 帯域) のみに対応するものは調達性が良く、安価である。しかし、C バンドの 30nm 帯域幅のみでは、CWDM の 1 波長帯域にしか対応で

きない。FBGセンサ多重化のために複数の波長帯域に対応するためにはSバンド(1460nmから1530nm)とLバンド(1560nmから1610nm)の機器を採用しなければならないが、Cバンド帯の機器に対して価格や調達性に制約がある。

Table 1 Solid rocket motor composite chamber test condition

Item	Destructive Pressure Test	Acceptance Pressure Test for Flight Model	Ground Combustion Test
Number of Strain Measurement Points	> 200	About 100	About 25
Maximum Tensile Strain (%)	>1.5	>1.0	>1.0
Strain Measurement Sampling Frequency (Hz)	< 1	< 1	> 500
AE Measurement Position Number	8 ~ 12	8 ~ 12	Not Applied

3・2 計測システムの基本仕様

前節3・1での検討を基にした多重化FBGセンサ用ひずみとAE同時計測システムの基本仕様を表2に示す。光学系はC+Lバンド帯とし、波長分割器はC+Lバンドに対応する4波長帯CWDM用汎用品とした。透過波長幅は13nmであるため、耐圧破壊試験には対応できないが、フライトモデルの受入耐圧試験や地上燃焼試験には対応できる。この基本仕様によりシステムの妥当性が確認できれば、光学系をSCLバンドに拡張し、7波長のFBGセンサ多重化が可能となる。

Table 2 Fundamental specifications of the developed measurement system

Item	Specification
Light Source Band	C + L Band
Optical Fiber Input / Output Channel	1ch
FBGs Number on Single Optical Fiber Line	4 FBGs / Single Optical Fiber Line
WDM Module	CWDM Module
WDM Module Center Wavelength	1531nm,1551nm,1571nm and 1591nm
WDM Module Split Bandwidth	Center wavelength +/-10nm
WDM Module Pass Bandwidth	Center Wavelength+/- 6.5nm

3・3 多重ファイバ・リングレーザ発振用光ファイバアンプの開発

表2に示すシステムの基本仕様において多重光ファイバ・リングレーザ発振のための検討を行った。光ファイバ通信においては、図8に示すように、一本の光ファイバにWDM方式により多重化された信号が一方向に伝播し、光アンプで増幅可能である。一方、図9のようにひとつの光ファイバアンプに多重のFBGセンサを接続した場合、最も光強度の強いFBGセンサのブラグ波長のみでレーザ発振し、多重発振させることが難しい。そのため、表2に示した計測システムの基本仕様に合わせた四連光ファイバアンプを開発した。開発した四連光ファイバアンプはエルビウム添加光ファイバアンプ(Erbium Doped Optical Fiber Amplifier: EDFA)を基にした。図10に開発した光ファイバアンプのブロック図を示す。開発した光ファイバアンプを使用し、四重の光ファイバ・リングレーザ発振させたときのスペクトラムを図11に示す。

Fig.8 Block diagram of using an optical amplifier in optical fiber communications

Fig.9 Block diagram of using an optical amplifier in a fiber ring laser for multiple FBG sensors

Fig.10 Block diagram of the four bands EDFA

Fig.11 Spectrum of multiple optical fiber ring lasers

3・4 複合材チャンバに適用可能なひずみと AE 同時計測システムの設計結果と製作

前節までの検討結果を基に、複合材チャンバに適用可能な多重化した FBG センサにより 1% のひずみ範囲に対応したひずみと AE 同時計測システムの設計と製作を行なった。製作したひずみと AE 同時計測システムの光学系ブロック図を図 12 に示す。光源は四連 EDFA を用いた多重光ファイバ・リングレーザと広帯域光源を切り替えて使用できるようにした。光ファイバ・リングレーザを使用した場合には、1kHz までのひずみと 100kHz から 250kHz の AE を同時に計測可能である。また、広帯域光源を使用した場合には、100kHz までの高速ひずみ計測が可能である。Tsuda の報告⁽¹⁵⁾から、広帯域光源を使用した場合には図 12 の光学回路では過渡的な超音波である AE 信号を計測可能な S/N 比を得ることは難しい。光源の切り替えは光サーキュレータ入力ポートの光コネクタの接続切り替えと図 12 のブロック図中に示す光スイッチ 1 と 2 による光回路の切り替えによる。ひずみ計測系は Davis & Kersey の手法⁽¹⁰⁾を採用した。AE 計測系は Tsuda の手法⁽¹⁶⁾とした。光ファイバ・リングレーザ光の一部を図 12 中の光カプラ 1 により、計測系に分岐する。さらに、光カプラ 2, 3, 4 および 5 によって CWDM 波長分割器の各波長帯の光信号をひずみ計測系と AE 計測系に分岐する。AE 計測系の光電変換器の後段には、光電変換器出力電圧信号の信号調節を行なうアナログ電気回路を配置した。この AE 計測系により検知された AE 信号は、一般的な AE 計測装置（例えば、Vallen AMSY-5 等）に入力可能であり、圧電 AE センサで取得した AE 信号との比較ができる。表 3 に開発したひずみと AE 同時計測システムの代表的な仕様を示す。図 13 にひずみと AE 同時計測システムの外観を示す。

Fig.12 Block diagram of the optical circuit of the developed measurement system

Fig.13 Appearance of the developed measurement system

Table 3 Specifications of the developed measurement system

Item	Specification
FBGs Number on Single Optical Fiber Line	Four FBGs on Single Optical Fiber Line
Light Source	C + L Band Optical Four Fiber Ring Laser : Custom or C + L Band ASE Light Source : Fiber Labs FL7004
Electrical I/F	Strain Signal Output : D-Sub 68 Pin Connector and AE Signal Output : BNC 4 Ports
Strain Signal Frequency Range	From DC to 1 kHz (Multiple Fiber Ring Lasers) From DC to 100 kHz (Broadband Light Source)
Cutoff Frequency of the Band Path Filters for AE Signal (kHz)	100 – 250 (8th Order Butterworth Analog Filter)
Amplification Gain for AE Signal (dB)	From 0 to 80 (Discretely Variable)
Electrical Power Supply (V) / Power Consumption (kW)	AC 100 / < 1
Dimensions (mm) (Wide × Depth × Height)	570 × 630 × 1105
Weight (kg)	103

4. FBG センサ用ひずみと AE 同時計測システムのシステム評価結果

4・1 多重発振光ファイバ・リングレーザ発振波長のひずみに対する変化の確認

製作した FBG センサ用ひずみと AE 同時計測システム (図 13) のシステム評価の一環として, 多重発振させた光ファイバ・リングレーザ発振波長のひずみに対する変化を確認した. 図 14 に示す直径 500mm, 幅 100mm および厚さ 5mm の CFRP リング状試験片の周方向の同一箇所にて図 15 に示すように 4 波長の FBG センサを平行に接着した. FBG センサと同一位相点二カ所に FBG センサと平行にひずみゲージを接着した. 使用した FBG センサのグレーティング長とひずみゲージ長はともに 2mm である. FBG センサの中心波長は 1531nm, 1551nm, 1571nm および 1591nm である. CFRP リング試験片を図 16 に示すようにジグにより変形させ, FBG センサ接着部に引張ひずみと圧縮ひずみを負荷した. ひずみはステップ状に負荷し, 四波長のレーザ光の発振波長を光スペクトラムアナライザ (横河 AQ6317C) により測定した. 結果を図 17 に示す. 図 17 には広帯域光源を用いて取得した結果も示す. 光ファイバ・リングレーザと広帯域光源で同等の結果が得られた. 光ファイバ・リングレーザの場合と広帯域光源の場合のひずみ感度差は 6.3%未満であった.

Fig. 14 Appearance of the CFRP ring specimen

Fig. 15 Attached four FBG sensors on the CFRP ring specimen

Fig. 16 Schematic of deformation of the CFRP ring specimen

(a) 1531nm band

(b) 1551nm band

(c) 1571nm band

(d) 1591nm band

Fig. 17 Experimentally obtained relation between Bragg wavelength and strain

4・2 CFRP 短冊試験片の三点曲げによるひずみと AE の同時計測確認試験

製作した FBG センサ用ひずみと AE 同時計測システムによるひずみと AE 同時計測性確認のため、CFRP 短冊試験片の三点曲げ試験を行った。参考のためひずみゲージと圧電 AE センサによる計測も行った。試験片の寸法は幅 20mm、長さ 200mm および厚さ 3mm である。試験のセットアップ状況を図 18 に示す。荷重負荷点から 16mm ずらした位置に FBG センサとひずみゲージを各一点ずつ図 19 のように接着した。FBG センサのグレーティング長とひずみゲージ長はともに 2mm、FBG センサの初期ブラッグ波長は 1544.5nm である。圧電 AE センサの試験片長手方向位置を図 18 に示した。使用した圧電 AE センサは富士セラミックス AE144A（共振周波数 140kHz、直径 8mm×高さ 17.5mm）を使用した。FBG センサからの AE 信号と圧電 AE センサからの信号はともに同一の AE 計測装置（Vallen AMSY-5）に入力した。荷重負荷中の荷重と変位も同時に計測した。荷重は連続的に負荷した。

図 20 にひずみ計測結果を示す。最大ひずみは FBG センサが 0.95%、ひずみゲージが 0.96% と良い一致を示し、約 1% までのひずみを計測できることを確認した。

図 21 に AE Hit 振幅の分布を示す。図 22 に図 21 の AE Hit 振幅のヒストグラムを示す。図 22 から圧電 AE センサの Hit 数に比べて FBG センサの Hit 数が少ないことがわかる。特に 70dB 以下の Hit 数の差が顕著である。試験時間帯毎の AE Hit 数を表 4 に示す。表 4 から試験時間 0 秒から 200 秒では FBG センサと圧電 AE センサの Hit 数は同等だが、200 秒以降に差が大きくなっている。CFRP 短冊試験片三点曲げ試験の損傷 AE 信号から FBG センサと圧電 AE センサの検知特性の差異を考察することは難しいが、FBG センサと圧電 AE センサの感度差、周波数特性およびセンサ取付け位置の違い等の影響が考えられる。図 23 に FBG センサと圧電 AE センサの波形と周波数解析結果の例を示す。図 23 の周波数解析結果から、FBG センサと圧電 AE センサともに 100kHz から 150kHz にピークを有する。しかし、150Hz 以上では、FBG センサの信号は減衰傾向を示すが、圧電 AE センサの信号は 300kHz 近傍まで平坦な広帯域なものとなっている。これらの FBG センサと圧電 AE センサの信号に差異が生じる原因については、音源の位置、周波数および伝播モードが既知の疑似 AE を用いた試験により究明に努める考えである。

Fig.18 Schematic of Setup of CFRP beam bending test

Fig.19 Layout of the FBG sensor and the strain gage on the CFRP beam specimen

5. 結語

宇宙用固体ロケット複合材チャンバの地上工程での構造ヘルスマニタリングに適する多重化した FBG センサを使用したひずみと AE の同時計測システムを開発した。開発した計測システムは、1%までの大きな範囲のひず

み変化においても AE 計測を行い、かつ、ひずみと AE の四点同時計測を行うために四連光ファイバ・リングレーザを光源に採用した。システム機能はいくつかの基礎試験により確認した。評価試験の一つである CFRP 短冊試験片三点曲げ試験において、1%までのひずみ計測が可能であることを確認した。一方、AE 計測結果から、FBG センサと圧電 AE センサで検知する AE 信号に違いがあることが示された。この違いについては、疑似 AE による詳細な評価が必要であり、その実施を予定している。開発した計測システムは、光源を広帯域光源に変更することにより、AE 計測を必要としない高速ひずみ計測にも対応している。なお、開発した計測システムはイプシロンロケットをはじめとする航空宇宙分野の複合材料構造体の開発に適用されることが予定されている。

Fig.20 Strain measurement result

Fig.21 AE Hits amplitude distribution

Fig.22 Histograms of AE Hits amplitude

Table 4 AE Hits number against test time

	Hits of FBG Sensor	Hits of Piezo-electric AE Sensor
All Test Time	283	1375
0-200 s	207	263
200-600 s	21	356
600-800 s	55	756
600-800 s (> 70 dB)	13	16

Fig.23 Examples of AE signal and frequency analysis result of the FBG sensor and the piezo-electric AE sensor

謝辞

本研究は、独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が主宰する宇宙オープンラボ制度の支援により実施した「大型構造物の構造ヘルスマニタリング技術の研究開発」の一部である。また、図4の光ファイバアンプ増幅率のデータはファイバラボ株式会社堀田昌克氏に提供頂いた。

文献

- (1) 武田展雄, “構造ヘルスマニタリング技術の研究開発”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 52, No. 605 (2004), pp. 142-148
- (2) T. Nakajima, “Frequency characteristic evaluation of FBG sensor using a Hopkinson’s bar”, *Proceeding of EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCURAL HEALTH MONITRING 2010* (2010), pp. 1313-1318
- (3) G. Wild, S. Hinckley, “Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art”, *IEEE SENSOR JOURNAL*, Vol. 8, No.7 (2008), pp. 1184-1193
- (4) H. Tsuda, J. Lee, “Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system”, *Composite Science and Technology*, Vol.67 (2007), pp. 1353-1361
- (5) 中島富男, 佐藤英一, 津田浩, 佐藤明良, 荒川敬弘, 湊将志, 倉林秀幸, 塩野秀幸, 中村英之, “固体ロケットモータケースの構造ヘルスマニタリングへのFBGセンサの適用”, 日本非破壊検査協会平成22年度春季講演大会講演概要集 (2010), pp. 77-78
- (6) 中島富男, 佐藤英一, 津田浩, 佐藤明良, 荒川敬弘, 湊将志, 倉林秀幸, 塩野秀幸, “固体ロケットモータケースヘルスマニタリングへのFBGセンサの適用”, 日本機械学会2010年度年次大会講演論文集 (6) (2010), pp. 313-314
- (7) T. Nakajima, E. Sato, H. Tsuda, A. Sato, N. Kawai, H. Kawasaki, “Development of simultaneous measurement system for strain and acoustic emission using a fiber Bragg grating sensor and a fiber ring laser”, *Proceeding of International Workshop on Structural Health Monitoring 2011* (2011), pp. 463-470

- (8) 中島富男, 佐藤英一, 津田浩, 佐藤明良, 川合伸明, “光ファイバリングレーザを用いた FBG センサ用ひずみとアコースティックエミッションの同時計測システムの開発”, 日本非破壊検査協会平成 23 年度秋季講演大会講演概要集 (2011), pp. 51-52
 - (9) A.Othonos, K. Kalli, *Fiber Bragg Grating* (1999), pp. 95-99, Artech House Publishers
 - (10) M.A. Davis, A.D. Kersey, “All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler”, *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 1 (1994), pp. 75-77
 - (11) N. Takanishi, K. Yoshimura, S. Takahashi, K. Imamura, “Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating”, *Ultrasonics*, Vol. 38 (2000), pp. 581-585
 - (12) H. Tsuda, E. Sato, T. Nakajima, H. Nakamura, T. Arakawa, H. Shiono, M. Minato, H. Kurabayashi, A. Sato, “Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions”, *OPTICS LETTERS*, Vol.34, No.19 (2009), pp. 2942-2944
 - (13) J. Lee, H. Tsuda, Y. Akimune, “Apodized fibre Bragg grating acousto-ultrasonic sensor under arbitrary strain using dual Fabry-Perot filters”, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 9 (2007), pp. 95-100
 - (14) T. Nakajima, E. Sato, H. Tsuda, A. Sato, N. Kawai, N. Tanaka, Y. Tsurui, N. Sakyo, “DEVELOPMENT OF A FIBER BRAGG GRATING ACOUSTIC EMISSION MEASUREMENT SYSTEM FOR SPACE ROCKETS”, *Proceeding of Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 2010* (2010), pp. (1A11) 1-9
 - (15) H. Tsuda, “Fiber Bragg grating vibration-sensing system insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser”, *OPTICS LETTERS*, Vol. 35 (2010), pp. 2349-2351
 - (16) 佐野昇, 木内重基, 山田敏之, “H-IIA ロケットの固体ブースタについて”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 46, No. 535 (1998), pp. 23-26
-