

宇宙用固体ロケット複合材モータケースの構造健全性 評価を対象にした多点 FBG センサによるひずみと AE 同時計測システムの開発について

中島 富男^{*1} 佐藤 英一^{*2} 津田 浩^{*3}
Nakajima Tomio *Sato Eiichi* *Tsuda Hiroshi*
 佐藤 明良^{*4} 川合 伸明^{*5}
Sato Akiyoshi *Kawai Nobuaki*

FBG センサを宇宙用固体ロケット構造、特にロケットの燃料容器と圧力容器の二つの役割を担う複合材モータケースに適用するための共同研究を独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所、独立行政法人産業技術総合研究所および株式会社 IHI エアロスペースとともに平成 20 年 10 月から平成 23 年 3 月まで行った。その成果として多点化した FBG センサを用いてひずみとアコースティックエミッションを同時計測可能なシステムを製作し評価した。本稿はその成果の一部を紹介する。

キーワード：ひずみ計測、AE 計測、FBG センサ、複合材料、固体ロケットモータチャンバ、
ファイバリングレーザ

1. 緒言

宇宙用ロケット打上げの信頼性は設計、材料、部品、製造、輸送および組立等の各工程におけるさまざまな品質保証手順により確保されている。これらの工程の品質保証手順は、開発ステージにおける設計と各種開発試験によって確立されたものである。宇宙用ロケットの開発試験は十分な信頼性と実績を有する計測技術により実施されている。

一方、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、打上げシステムの知能化等により、高い信頼性を維持しながらも、打上げ前工程の簡素化と打上げシステムの革新性を目指したイプシ

ロンロケットを開発している（図 1）。イプシロン



図 1 イプシロンロケットイメージ図
 (JAXA WEB Site より：http://www.jaxa.jp/projects/rockets/epsilon/index_j.html)

*1：研究開発センター 研究開発グループ 課長
 *2：独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授 工学博士
 *3：独立行政法人 産業技術総合研究所 計測フロンティア部門 構造体診断技術研究グループ グループ長 工学博士
 *4：株式会社 IHI エアロスペース 技師長
 *5：独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 助教 博士（工学）

ロケットは3段式の全段固体ロケットである。このような背景から、イプシロンロケットの開発および運用においても、近年著しく進歩した計測・検査技術を導入する機会となっている。

著者らは、イプシロンロケットの複合材モータケースに光ファイバセンサによる計測技術を導入することを試みることにした。具体的には、光ファイバセンサとして、静ひずみおよび動ひずみ計測に対応できるファイバ・ブラッグ・グレーティング (Fiber Bragg Grating : FBG) センサを採用した。一般にFBGセンサはひずみセンサとして使用される⁽¹⁾。一方、FBGセンサをAE信号を含む超音波センサとする試みも報告されている⁽²⁾。さらに、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ことが可能であると報告していた⁽³⁾。

著者らは、Tsudaらの報告を発展させ、一つのFBGセンサによりひずみとAEを同時計測可能な計測手法を宇宙用固体ロケットの複合材モータケースに適用させるための共同研究を行った。研究成果の一部については既に報告している⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。本稿では、研究の最終成果である、『多点のFBGセンサにより、1%までの大ひずみ変化を計測しながらAEも同時に計測できるシステム』の開発について報告する。

現在、イプシロンロケットの開発試験が進行しており、著者らは、本稿において紹介する計測システムのイプシロンロケット開発試験への適用を試みている。

2. FBG センサについて

FBGセンサは光ファイバセンサの一つである。FBGは光ファイバコアに周期的な屈折率変化を人工的に構成させたものである。FBGの模式図を図2に示す。

FBGに式(1)の関係で示される波長を含む広帯域光を照射すると、式(1)の波長の狭帯域光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) λ_B と呼ばれる。 n_e はFBGの有効屈折率、 Λ は格子間隔を表す。

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

ブラッグ波長 λ_B は有効屈折率 n_e と格子間隔 Λ に伴い変化する。この性質をセンサとして利用し、ひずみセンサや温度センサとして利用されている。図3にひずみとブラッグ波長の関係の例を示す。また、図4に温度とブラッグ波長の関係の例を示す。

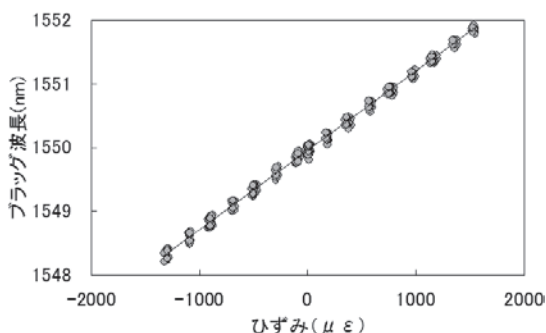


図3 ひずみとブラッグ波長の関係

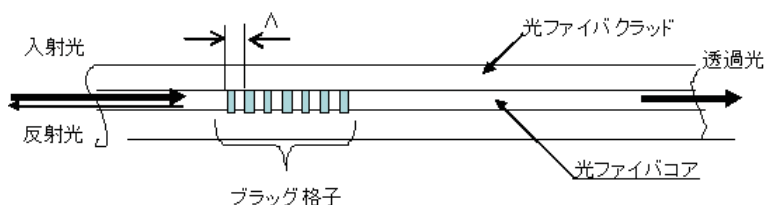


図2 FBG 原理模式図

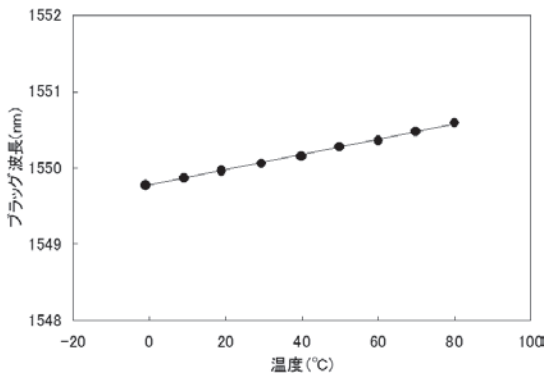


図4 温度とブラッグ波長の関係

光ファイバは軽量かつ高剛性であり、FBG をひずみセンサとして利用した場合には、静ひずみから高速なひずみ変化を計測することが可能である。著者は100kHzまでの動ひずみを計測可能なことを報告している⁽⁸⁾。FBG センサの高速な応答性を利用して、超音波センサとする多様な手法が提案されている⁽²⁾。著者らは Tsuda が提案した光ファイバリングレーザを用いる手法⁽⁹⁾を適用することにより、ひずみと超音波の一種である AE 信号を同時に計測可能なことを確認し、その成果は IIC REVIEW 46 号において報告している⁽¹⁰⁾。Tsuda の手法の模式図を図5に示す。

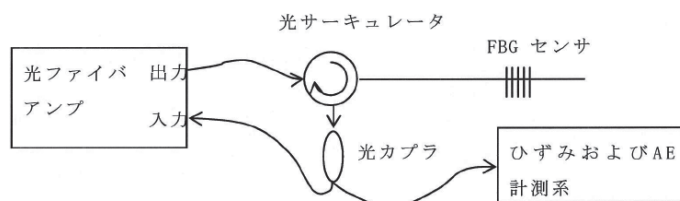


図5 光ファイバリングレーザを利用したFBGセンサ用計測システムブロック

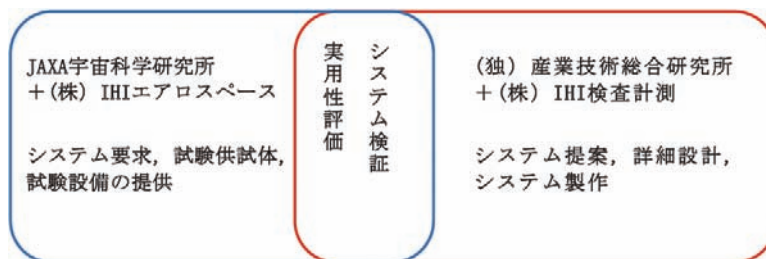


図6 共同研究体制と役割分担

3. 研究体制

研究はFBGセンサ計測技術に強みを持つ独立行政法人産業技術総合研究所およびIICと宇宙研究開発を担うJAXA宇宙科学研究所および株式会社IHIエアロスペースの共同研究として行った。研究体制と分担を図6に示す。すなわち、複合材モータケースのひずみ計測やAE計測に必要な条件はJAXA宇宙科学研究所と(株)IHIエアロスペースが提示した。(独)産業技術総合研究所とIICは適切と思われる計測システムの仕様を提示し、条件に合致しているかについての協議を行い計測システムの概念設計を行った。決定した仕様を基に、システムの詳細設計と製作は主にIICが担当した。

製作したシステムが設計要求を満足しているかの検証は四者共同で行った。供試体や試験設備はJAXA宇宙科学研究所と(株)IHIエアロスペースが提供した。一方、システムの操作やデータ解析は(独)産業技術総合研究所とIICが担当した。得られたデータは四者共同で評価を行いながら研究を進めた。

本研究においては、各者が有する技術と資源を

提供し合いながら、新たな知見についての共有と意見の交換を頻繁に行った。その結果、研究を円滑に進めることができた。

4. 研究目標について

FBG センサを利用した計測はさまざまな構造体を対象に行われている。その多くはひずみ計測である。また、超音波の受信センサとして利用する方法も提案されている⁽²⁾。しかし、従来技術では、一つの FBG センサによりひずみと AE を同時に計測し、かつ、FBG センサの特長である一本の光ファイバ上に複数の FBG 部を配置する多点化は光学系の仕様から実現されていなかった。

従来のひずみ計測技術では FBG センサの多点のブラッグ波長識別のために光源もしくは分光器の掃引が行われていた。掃引方式の光学系では、全ての FBG センサに常時光が照射されないため、信号の発生が予測できない AE 計測に適用できなかった。

一方、AE 計測においては、FBG センサの反射光スペクトラムの光強度が半分になる波長のレーザー光を FBG に照射し、AE 信号による微小なブラッグ波長変化を光強度変化として計測する手法が知られている⁽¹¹⁾。しかし、この手法は、FBG センサにひずみが負荷されるとブラッグ波長が変化してしまい、ひずみを動的に計測しながら AE を計測することが不可能であった。

著者らは、従来技術の問題点は光源もしくは分光器の掃引にあると考えた。そのため、産業技術総合研究所と IIC が採用している Davis と Kersey が提案した誘電体薄膜光学フィルタを用いるひずみ計測手法⁽¹²⁾は、光源と分光器の両方に掃引部が無く、ひずみと AE の同時計測を可能にすると考えられた。一つの FBG センサによりひずみと AE の同時多点計測が可能となれば、複合材モータケースの受けるさまざまな構造的な環境負荷を常

時監視できると期待された。

このような背景を基に、本研究では『一つの FBG センサの信号からひずみと AE 信号の両方を同時に取得し、かつ、FBG センサの多点化も可能とすること』を目標とした。

FBG センサによるひずみと AE の同時計測の概念を FBG センサが一つの場合に図 7 に示す。図 7 において FBG センサからの信号を光カプラでひずみ計測系と AE 計測系に分岐する。ひずみ計測系では比較的低周波数の大きなブラッグ波長変化を計測する。一方、AE 計測系では比較的高周波数のブラッグ波長変化に伴う光強度変化を計測する。このようにすることにより、一つの FBG センサでひずみと AE の同時計測が可能となる。前述しているように、この概念は実験により検証できている⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。

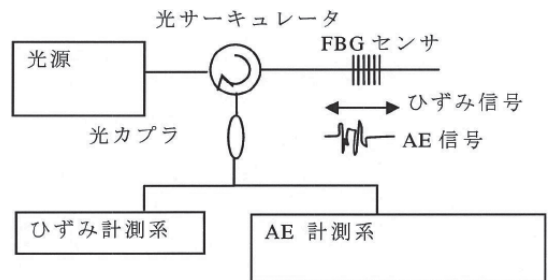


図 7 FBG センサによるひずみと AE 同時計測概念の模式図

5. 開発した FBG センサ計測システム⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

開発した計測システムのブロック図を図 8 に示す。また、外観を図 9 に示す。本システムは、光源として FBG センサ用として一般的な広帯域光源とエルビウム添加ファイバアンプ (EDFA) を用いた光ファイバリングレーザーを切り替えて使用可能である。それぞれの光源を使用したときの特徴を表 1 に示す。ひずみの計測レンジは複合材モータケース完成検査時の耐圧試験時に発生するひずみを考慮して 1% までのひずみ変化に対応している。



図 9 開発した FBG センサ用計測システム外観

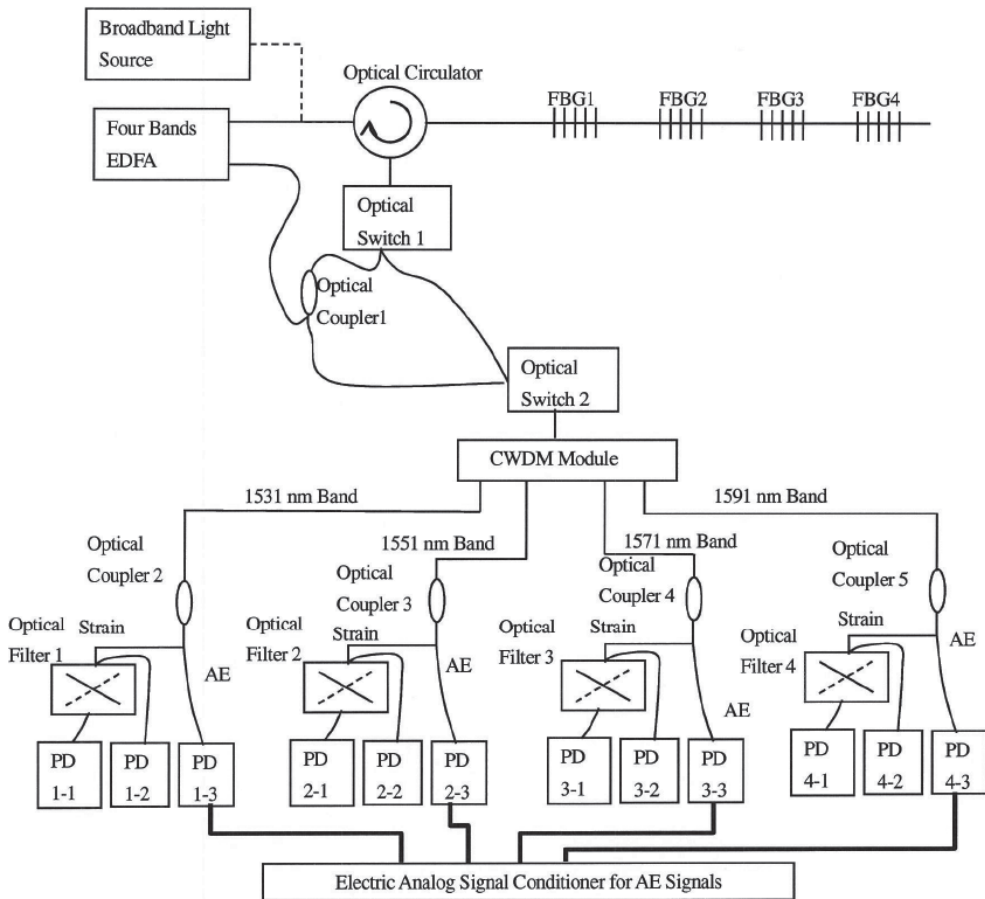


図 8 開発した FBG センサ用計測システムブロック図

表 1 開発したシステムの代表仕様

	広帯域光源の場合	光ファイバリングレーザーの場合
ひずみ計測周波数	DCから100kHz	DCから1kHz
ひずみ計測レンジ	0～1%	0～1%
AE計測	適用せず	適用 (AE周波数100kHz～250kHz)
FBG点数	4点	4点

6. 結言

先進的な打上げシステムを採用するイプシロンロケットの開発から運用に対応して、先進的な計測技術の採用を検討し、多点化したFBGセンサによるひずみとAEを同時に計測可能なシステムを開発した。特に、固体ロケットの主構造である複合材モータケースへの適用を対象とした。本システムは、現在進行しているイプシロンロケットの開発試験に適用されている。また、開発した計測システムは、複合材料構造物に限らず、金属構造物にも適用可能であることも既に報告している⁽¹⁵⁾。

なお、本稿の研究はJAXA宇宙オープンラボ研究テーマ『大型構造物の構造ヘルスマモニタリングの研究開発』として平成20年度から平成22年度に実施された研究成果の一部である。

参考文献

- (1) 中島富男、荒川敬弘、“FBGセンサを用いた高速動ひずみ計測技術について”、IIC REVIEW No.38 (2007)、pp.37-44
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 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モニタリングへの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
- (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、“固体ロケットモータケースヘルスマモニタリングへの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
- (6) 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
- (7) 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ーを用いた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
- (8) 中島富男、“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”、IIC REVIEW No.44 (2010)、pp.18-22

- (9) 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
- (10) 中島富男、佐藤英一、津田浩、佐藤明良、川合伸明、川崎拓、"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同時計測システムの開発", IIC REVIEW No.46 (2011), pp.10-16
- (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) 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
- (13) 中島富男、佐藤英一、津田浩、佐藤明良、川合伸明、"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", 日本機械学会論文集A編、Vol.78, No.789 (2012), pp.147-160
- (14) 津田浩、佐藤英一、中島富男、佐藤明良、"光ファイバ広帯域振動検出システムの開発—FBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測技術—", Synthesiology Vol.6 No.1 (2013), pp.45-54
- (15) 中島富男、高田仁志、佐藤英一、津田浩、佐藤明良、"FBGセンサによる液体水素中での機構品の動ひずみ計測", IIC REVIEW No.48 (2012), pp.20-27



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



独立行政法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所
教授 工学博士

佐藤 英一

TEL. 050-3362-2469
FAX. 042-759-8461



独立行政法人産業技術総合研究所
計測フロンティア部門
構造体診断技術研究グループ
グループ長 工学博士

津田 浩

TEL. 029-861-9284
FAX. 029-861-5882



株式会社IHI エアロスペース
技師長

佐藤 明良

TEL. 0274-62-7646
FAX. 0274-62-7738



独立行政法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所
助教 博士(工学)

川合 伸明

TEL. 050-3362-7539
FAX. 042-759-8461