

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 (宇宙用固体ロケット複合材モータケース構造健全性監視を対象として)

Development of Simultaneous Measurement System for Strains and AE Using Multiple FBG Sensors (For Structural Health Monitoring of Solid Space Rocket Composite Motor-Case)

中 島 富 男 株式会社 IHI 検査計測 研究開発センター 研究開発グループ 課長
佐 藤 英 一 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
津 田 浩 独立行政法人産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造物画像診断グループ グループ長 工学博士
佐 藤 明 良 株式会社 IHI エアロスペース 技師長
川 合 伸 明 熊本大学 パルスパワー科学研究所 准教授 博士(工学)

光ファイバセンサの一つである FBG センサを宇宙用固体ロケット複合材モータケースの構造健全性監視に適用する研究を行った。研究成果として、多重発振させたファイバリングレーザを採用し、多点の FBG センサによって 1% までのひずみを計測しながらアコースティックエミッション (AE) も計測可能なシステムを製作した。開発したシステムは広帯域光源を使用し、高速なひずみ計測も可能である。システムの評価の一環として、イプシロンロケット開発中のモータケース耐圧試験の一部に適用した。

A study was conducted to apply fiber Bragg grating (FBG) sensors, a kind of optical fiber sensor, to structural health monitoring of solid space rocket composite motor-cases. A new measurement system was developed as a result of the study. The system possesses two light sources. When using multiple fiber ring lasers as the light source, the system can simultaneously measure strains of up to 1% and acoustic emission (AE) using multiple FBG sensors and when a broadband light source is used, the system can also measure very fast strains. The system was applied to a pressure test for system evaluations in the development of Epsilon Launch Vehicles.

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・組立など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って実施されている。

一方、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、打上げシステムの知能化などによって、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た。第 1 図に射点に立つイプシロンロケットを示す。イプシロンロケットは 3 段式の全段固体ロケットである。イプシロンロケットのような最新の宇宙用ロケットの開発および運用においては、近年著しく進歩した検査・計測技術を導入する機会である。

筆者らは、イプシロンロケットなどの複合材モータケー



(注) <http://www.jaxa.jp/projects/rockets/epsilon/> から引用

第 1 図 射点に立つイプシロンロケット
Fig. 1 Epsilon-1 on the launch pad

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 センサをアコースティックエミッション (AE) 信号検知も含む超音波センサとする試みも報告されている⁽²⁾。しかし、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もたせることが可能であると報告していた⁽³⁾。

筆者らは、Tsuda らの考えを発展させ、一つの FBG センサによってひずみと 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共同研究を行った。本稿では、研究の最終成果である「多点の FBG センサによって、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。

筆者らは、開発した計測システムをイプシロンロケット開発中の複合材モータケース耐圧試験の一部に適用した。

2. FBG センサについて

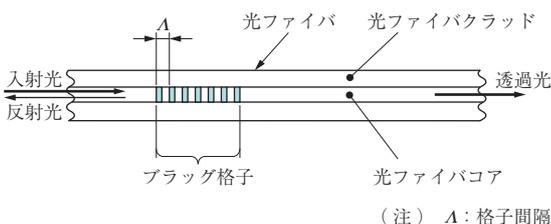
FBG センサは光ファイバセンサの一つである。FBG は光ファイバコアに周期的な屈折率変化を人工的に構成させたものである。FBG の原理模式図を第 2 図に示す。

FBG に (1) 式の関係で示される波長を含む広帯域光を照射すると、(1) 式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。

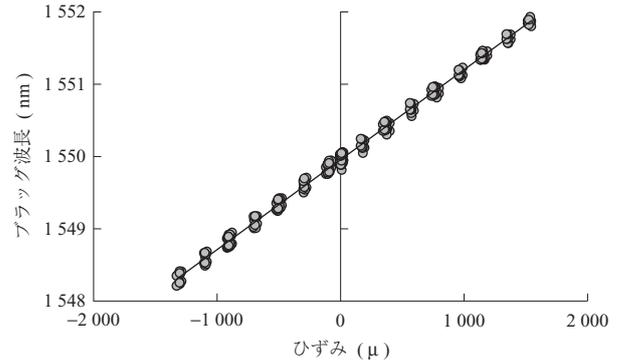
$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \dots\dots\dots (1)$$

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。第 3 図にひずみとブラッグ波長の関係の例を示す。また、第 4 図に温度とブラッグ波長の関係の例を示す。

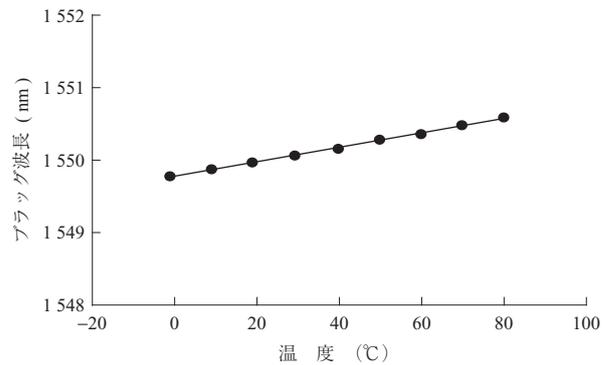
光ファイバは軽量かつ高剛性であり、FBG をひずみセ



第 2 図 FBG の原理模式図
Fig. 2 Schematic of FBG principle

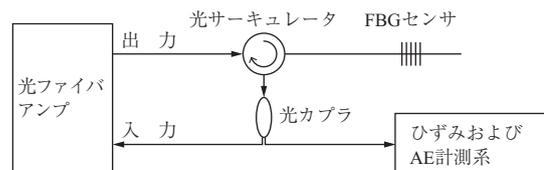


第 3 図 ひずみとブラッグ波長の関係
Fig. 3 Relationship between strain and Bragg wavelength



第 4 図 温度とブラッグ波長の関係
Fig. 4 Relationship between temperature and Bragg wavelength

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。筆者は 100 kHz までの動ひずみを計測可能なことを報告している⁽⁴⁾。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⁾。筆者らは Tsuda が提案した光ファイバリングレーザを用いる手法⁽⁵⁾を適用することによって、ひずみと超音波の一種である AE 信号を同時に計測可能にした。Tsuda の手法の模式図 (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) を第 5 図に示す。



第 5 図 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
Fig. 5 Block diagram of measurement system using an FBG sensor and a fiber ring laser

3. 研究体制

研究はFBGセンサ計測技術に強みをもつ独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)および株式会社IHI検査計測(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(IA)の共同研究として実施した。研究体制と分担を第6図に示す。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IAが提示した。AIST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4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IAが提供した。一方、システムの操作やデータ解析はAISTとIICが担当した。得られたデータは4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。以上の結果、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1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、多点のFBGセンサ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、すべてのFBGセン

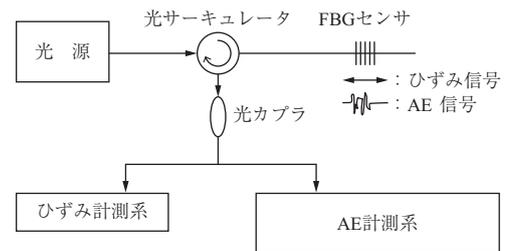
サに常時、光が照射されないため、信号の発生が予測できないAE計測には適用できなかった。

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⁽⁶⁾。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。

筆者らは、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、AIST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⁽⁷⁾は、光源と分光器の両方に掃引部がなく、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の同時計測の概念に対して、FBGセンサが一つの場合を第7図に示す。第7図においてFBGセンサからの信号を光カプラでひずみ



第7図 FBGセンサによるひずみとAE同時計測概念の模式図
Fig. 7 Schematic of simultaneous measurement for strain and AE using an FBG sensor



第6図 共同研究体制と分担
Fig. 6 Collaborative research system and roles

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って、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、この概念は試験により検証でき
ている。

5. 開発した FBG センサ計測システム⁽⁸⁾

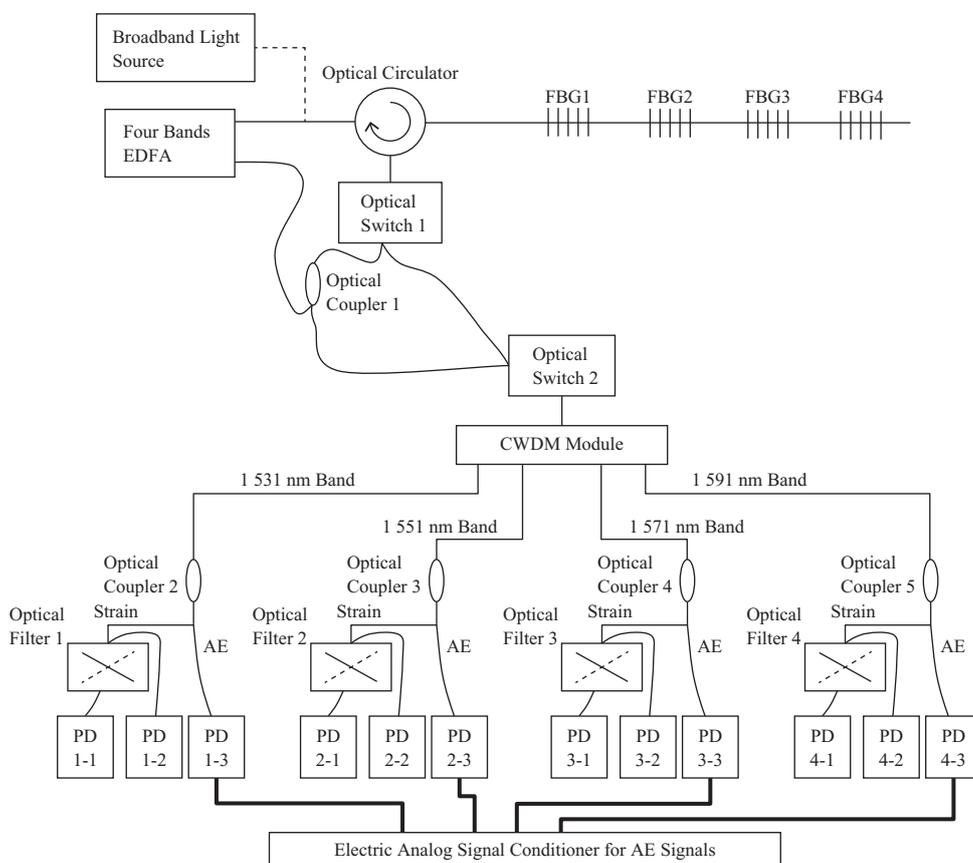
開発した FBG センサ用計測システムブロック図を第
8 図に示す。また、外観を第 9 図に示す。本システムは、
光源として FBG センサ用として一般的な広帯域光源とエ
ルビウム添加ファイバアンプ (EDFA) を用いた光ファイ
バリングレーザを切り替えて使用可能である。それぞれの
光源を使用したときの主仕様を第 1 表に示す。ひずみの
計測レンジは複合材モータケース完成検査時の耐圧試験時
に発生するひずみを考慮して 1% までのひずみ変化に対応
している。



第 9 図 開発した FBG センサ用計測システム外観
Fig. 9 Appearance of the developed measurement system

第 1 表 開発したシステムの主仕様
Table 1 Main specifications of the developed system

項 目	広帯域光源 の場合	光ファイバリングレーザ の場合
ひずみ計測周波数	DC ~ 100 kHz	DC ~ 1 kHz
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 100 ~ 250 kHz)
FBG 点 数	4 点	4 点



第 8 図 開発した FBG センサ用計測システムブロック図⁽⁸⁾
Fig. 8 Block diagram of the developed measurement system⁽⁸⁾

6. 結 言

先進的な打上げシステムを採用した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にした。開発したシステム評価の一環として、イプシロンロケット開発中に実施されたモータケース耐圧試験の一部に適用した。また、光ファイバセンサの耐爆性を活用して、開発した計測システムを、液体水素中の機構品の振動計測に適用し、良好な結果を得ている⁽⁹⁾。

なお、本稿の研究はJAXA宇宙オープンラボ研究テーマ「大型建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。研究成果は、共同研究者それぞれの観点から発表されている⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾。

本稿は、IICが発行しているIIC REVIEWに「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」⁽¹²⁾として掲載した記事を加筆・修正したものである。

参 考 文 献

- (1) 中島富男, 荒川敬弘: FBGセンサによる高速動ひずみ計測技術について IIC REVIEW 第38号 2007年10月 pp. 37 - 44
- (2) G. Wild and S. Hinckley: Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art IEEE SENSOR JOURNAL Vol. 8 No. 7 (2008. 7) pp. 1184 - 1193
- (3) H. Tsuda and 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. 6) pp. 1353 - 1361
- (4) 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 第44号 2010年10月 pp. 18 - 22

- (5) H. Tsuda: Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser Optics Letters Vol. 35 (2010. 7) pp. 2349 - 2351
- (6) N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi and K. Imamura: Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating Ultrasonics Vol. 38 (2000. 3) pp. 581 - 585
- (7) M. A. Davis and A. D. Kersey: All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler Electronics Letters Vol. 30 No. 1 (1994. 1) pp. 75 - 77
- (8) 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 (個体ロケットモータ複合材チャンバの構造ヘルスマモニタリングを目的として) 日本機械学会論文集A編 第78巻789号 2012年5月 pp. 728 - 741
- (9) 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振動計測 日本機械学会論文集A編 第79巻803号 2013年7月 pp. 1054 - 1064
- (10) 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 - シンセシオロジー 第6巻第1号 2013年2月 pp. 45 - 54
- (11) 佐藤英一, 津田 浩, 志波光春: 宇宙機器に関する非破壊信頼性評価 - NIMS-AIST-JAXA 3機関連携協力 - 非破壊検査 第62巻第7号 2013年7月 pp. 326 - 331
- (12) 中島富男, 佐藤英一, 津田 浩, 佐藤明良, 川合伸明: 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 IIC REVIEW 第49号 2013年4月 pp. 21 - 27