

FBG センサによる液体水素中での 機構品の動ひずみ計測

中島 富男^{*1} 高田 仁志^{*2} 佐藤 英一^{*3}
Nakajima Tomio *Takada Satoshi* *Sato Eiichi*
 津田 浩^{*4} 佐藤 明良^{*5}
Tsuda Hiroshi *Sato Akiyoshi*

FBG センサにより液体水素中に浸された機構品の動ひずみ計測を試みた。計測対象はボール軸受外輪を保持するステンレススチール製軸受カートリッジである。試験温度は 26K、軸受定常回転速度は 30,000rpm であった。計測した動ひずみ RMS 値は 10×10^{-6} 以下と微小であったが、軸受カートリッジの振動を計測可能であった。動ひずみ波形の周波数解析結果のピーク周波数は軸受回転速度と良く一致した。本結果は、耐爆性への配慮が必要な液体燃料ロケットエンジンの地上動作試験に FBG センサにより計測可能であることを示すものである。

キーワード：FBG センサ、ひずみ計測、液体水素、軸受

1. はじめに

光ファイバセンサは耐爆性に優れており、危険物や液体水素容器や容器内の機構品の機械計測用センサとして期待されている。ファイバ・ブラッグ・グレーティング (Fiber Bragg Grating : FBG) センサは光ファイバセンサの一つであり、高速な動ひずみ計測が可能である。著者は FBG センサを用いて 100kHz までの動ひずみ計測が可能であることを報告している⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは、FBG センサを液体ロケットエンジン燃料である液体水素中で動作する機構品の動ひずみ計測に FBG センサを適用することを試みた。液体水素を燃料とするロケットエンジンは極低温の液体水素と酸化剤である液体酸素を高速回転するターボポンプにより加圧さ

せた上で燃焼させ推力を発生させる。液体水素ロケットエンジンは日本の基幹宇宙ロケットである H-IIA の一段と二段のロケットエンジンに採用されている。今回供試体とした機構品は液体水素に浸され、定常回転 30,000rpm と高速回転する軸受の外輪を保持する軸受カートリッジである。軸受カートリッジから径方向に延びるステンレススチール (SUS304) 製の直径 8mm のロッドに FBG センサをシアノアクリレート系接着材で接着し、液体水素容器内に入れ、光ファイバを容器外に引き出すことによりひずみ計測を行った。計測部位の定常運転時の動ひずみ振幅は 10×10^{-6} 以下と微小であったが、振動波形を十分に識別し、かつ、周波数解析結果からは軸受回転数と対応するピーク周波数が一致するという良好な結果を得た。

*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 宇宙輸送系推進技術研究開発センター 主任研究員 博士 (工学)

*3：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

*4：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

*5：株式会社 IHI エアロスペース 技師長室 技師長

なお、本報は一般社団法人日本機械学会 2012 年度年次大会において『FBG センサによる液体水素中での機構品の動ひずみ計測』と題して講演を行った内容を基に、FBG センサや計測技術に関する記述を加筆したものである。

2. FBG センサによる高速動ひずみ計測方法

FBG は光ファイバコアに紫外線レーザー照射により屈折率の周期的な変化を構成させたものである。FBG は式 (1) に示す関係のブラッグ波長 (λ_B) と呼ばれる波長の光を強く反射性質がある。この性質を利用し FBG は光ファイバ通信のフィルタとして多用されている。式 (1) において Λ は屈折率変化の間隔、すなわち、格子間隔であり、 n_e は FBG 部の有効屈折率である。格子間隔および屈折率は FBG に負荷されたひずみ変化もしくは温度変化により変化し、その結果、ブラッグ波長も変化する。ブラッグ波長のひずみおよび温度に対する変化はそれぞれ線形性が良く、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。

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

著者らは FBG センサによるひずみ計測方法として Davis & Kersey が提案した方法⁽³⁾を採用している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。この方法は FBG センサからの反射光を誘電体薄膜フィルタに入射し、誘電体薄膜フィル

タを透過および反射した光強度から FBG センサのブラッグ波長を推定する方法である。計測方法の光学系のブロック図を図 1 に示す。誘電体薄膜フィルタの透過率および反射率の例を図 2 に示す。

図 1 において光源から照射された光は光サーキュレータを介して FBG センサに到達する。FBG センサから照射された光源からブラッグ波長を中心とした狭帯域の光が再び光サーキュレータを介して誘電体薄膜フィルタに導かれる。誘電体薄膜フィルタを透過した光強度と反射した光強度が光电変換器 PD1 と PD2 で電圧信号 VT と VR に変換される。ここで、無次元量 R 値を式 (2) のように定義すると、ブラッグ波長は図 2 の誘電体薄膜フィルタの透過率および反射率特性から、無次元量 R 値の一価の関数である。そのため、実際には電圧 VT と VR を計測することによりブラッグ波長を知ることが可能となり、VT と VR の変化からブラッグ波長変化を知ることができる。

光源を連続照射し、光电変換器 PD1 と PD2 の出力電圧を連続的に集録すると、連続的なブラッグ波長測定が可能であり、著者は本手法により 100kHz までの高速なひずみ変化を計測可能なことを示している⁽¹⁾⁽²⁾。

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

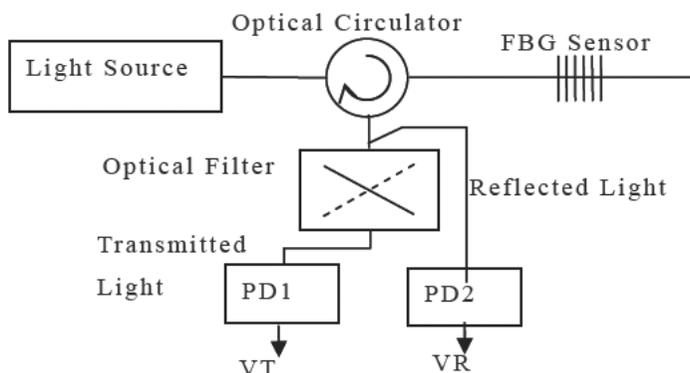


図 1 FBG センサにより高速ひずみ計測可能なシステムのブロック図

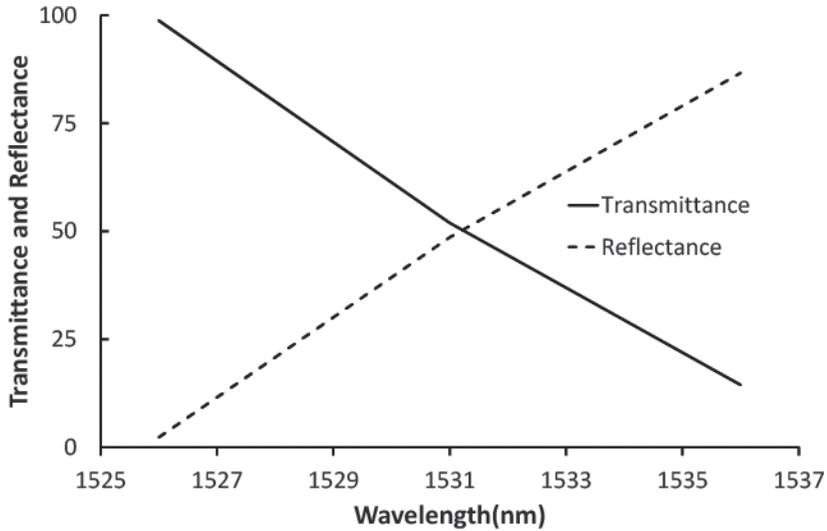


図2 誘導体薄膜フィルタの透過率と反射

3. 試験装置および試験方法

3.1 試験装置

使用した液体水素中で軸受を回転させる装置の断面図を図3に示す⁽⁷⁾。この装置は宇宙用液体ロケットエンジンの液体水素ターボポンプ用の軸受の性能と寿命を評価する装置であり、JAXA 角田宇宙センターに設置されている。

図3の装置は上部にエアタービンが設けられた回転軸がラジアル方向およびスラスト方向ともエアベアリングで支持されている。供試体となる軸受の内輪が回転軸の先端に取り付けられる。軸受の外輪は図4に示す軸受カートリッジで支持されている。軸受カートリッジのスラスト方向もエアベアリングで支持されている。軸受カートリッジのラジアル方向は図4で矢指した直径8mmおよび長さ60mmのステンレス鋼製のロッドで液体水素容器外部のトルク計測用ロードセルと連結され支持されている。回転軸をエアタービンで回転させる等、本装置は耐爆性に留意され設計・製作されている試験装置である。

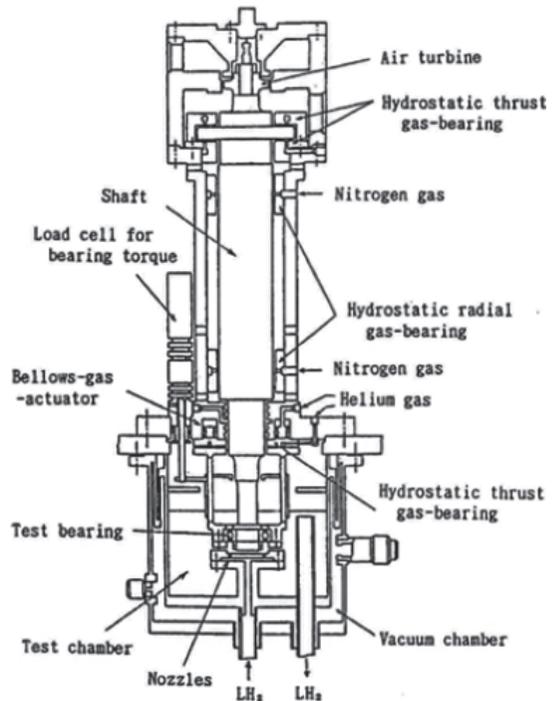


図3 液体水素用軸受試験装置概要図

3.2 試験方法

FBG センサは軸受カートリッジ (図4) のトルク計測用の前記のロッドにシアノアクリレート系接着材で接着した。使用した FBG センサは中心波長 1534nm (室温時)、グレーティング長 5mm である。図5に FBG センサ接着状況を示す。図3の試験装置の容器内に液体水素を充満させ、軸受温度が 26K 以下で安定したのち、軸受内輪を回転させた。図6に軸受の温度履歴を示す。

計測は FBG センサによるひずみ計測とあわせて、熱電対による軸受温度、ロードセルによる軸受カートリッジのトルクおよび軸受を回転させるシャフトの回転数である。軸受の定常回転数が 30,000rpm (周波数に換算すると 500Hz となる) と高速であり、軸受の回転に伴う高次の振動が発生することも予想されたため、FBG センサによるひずみ計測にあたっては、サンプリング周波数を 50kHz と高速な条件により計測を行った。また、軸受定常回転 (30,000rpm) は約 30 分保持した。

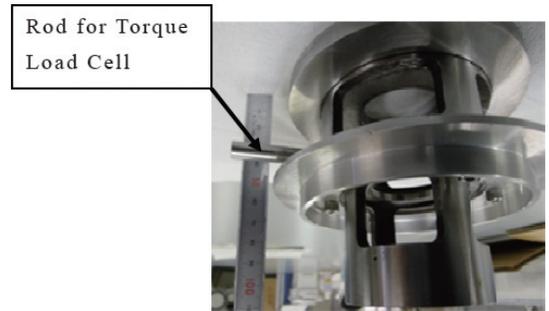


図4 軸受カートリッジ

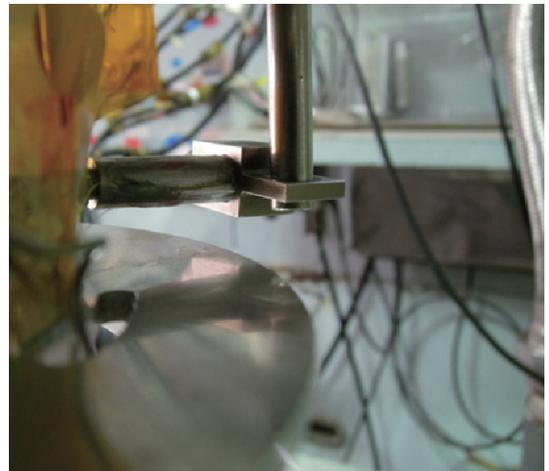


図5 FBG センサ接着状況

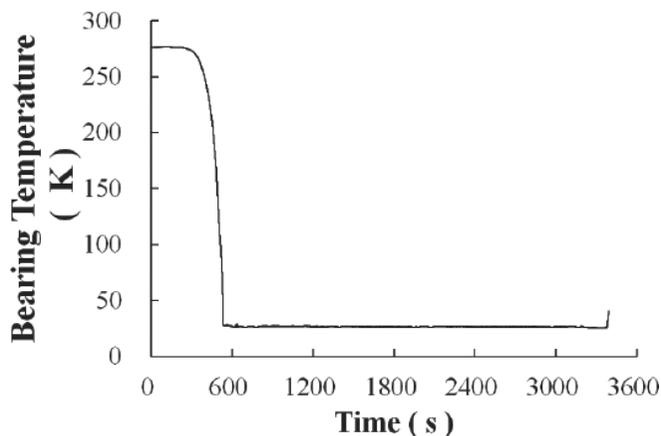


図6 軸受温度履歴

3.3 FBG センサ計測装置

FBG センサへの光の照射および光電変換は JAXA 宇宙オープンラボ平成 20 年 - 22 年研究テーマ『大型構造部品の構造ヘルスマニタリングに関する研究』の研究成果である、FBG センサ用計測装置（呼称 HFS-G1）を使用した⁶⁾。図 7 に HFS-G1 のセットアップ状況を示す。本装置を使用すると、FBG センサ数 4 点で 100kHz までの動ひずみを評価可能である。今回の試験においては FBG センサの接着部位が小さいため FBG センサは 1 点として計測を実施した。



図 7 HFS-G1 セットアップ状況

4. 試験結果

図 8 に取得した動ひずみの 1 秒毎の RMS 値と回転速度の関係を示す。軸受回転速度の加減速中は動ひずみの RMS 値が大きく変化するが、定常回転数（30,000rpm）では動ひずみの RMS 値は安定していることがわかる。図 9 に定常回転中の試験時間 15 分付近の動ひずみ波形を示す。図 8 より、30,000rpm の回転数に相当する 2msec 毎の周期的な波形が現れている。

取得した波形を 1 秒毎に周波数解析し、そのピーク周波数を求めた。周波数解析を行うにあたっては、静的なひずみを除去するため、0.1 秒毎に平均ひずみを求め、瞬間値から平均値を除すを行った。さらに、カットオフ周波数 30Hz のデジタルハイパスフィルタ処理を行ったのち DFT 解析を行った。スペクトラムは平滑化のため 10 回の平均化処理を行った。その結果を図 10 に示す。図 10 よりデータ収録開始直後のピーク周波数はランダムであるが、高速回転になると、ピーク周波数は軸受回転数に対応して変化していることがわかる。このことより、FBG センサは接着した部位の回転速度に対応した動ひずみを計測できていると判断できる。

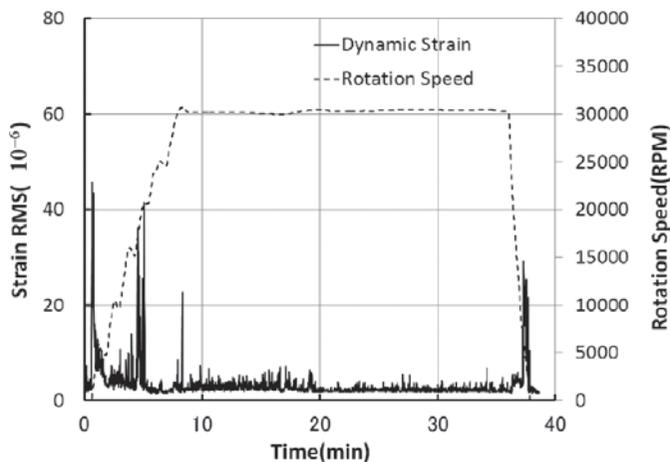


図 8 1 秒毎の動ひずみ RMS 値と回転速度

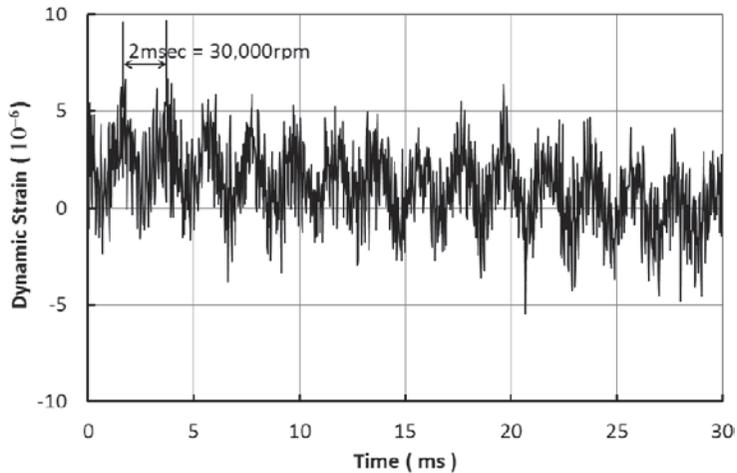


図9 取得した動ひずみ波形の例

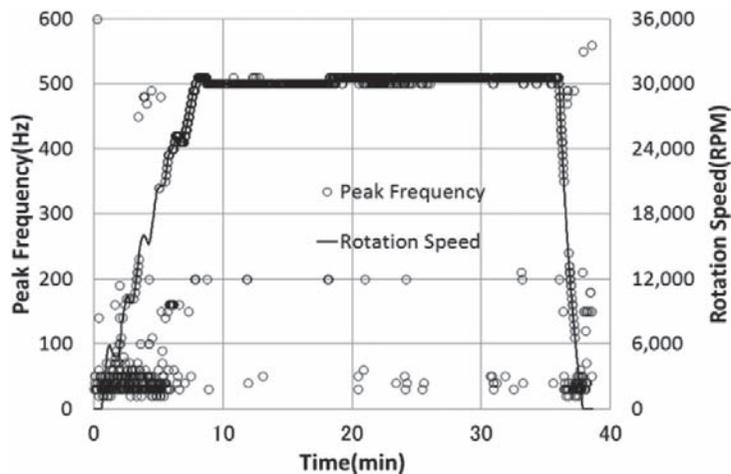


図10 1秒毎の周波数解析結果のピーク周波数と回転速度

図11に試験時間0分（静止時）、6分および22分時の動ひずみの周波数解析結果（パワースペクトラム密度関数）を示す。解析条件は図11に記した通りである。試験時間6分時と22分時に回転一次に相当するピーク周波数が明瞭に現れている。また、回転一次の0.4次成分に相当するピーク周波数が試験時間6分時と22分時のスペクトラムで共に現れている。このピーク周波数については軸受および試験装置の機械振動について詳しい知識を必要とする。また、軸受回転時には1kHzから10kHzに回転一次よりもパワーの小さいピー

クが現れている。静止時にこれらのピークは無く、軸受回転に起因するものと予想されるが、この評価についても、軸受および試験装置の振動特性に関する詳細な知識を必要とし、本報で報告可能な範囲を超えることをお許しいただきたい。

なお、図11のスペクトラムで特徴的なこととして、ピーク周波数以外の周波数においては、静止時と軸受回転時でスペクトルパワーが解析周波数帯域全域で変化していない。これは、FBGセンサが高周波数帯域まで高いS/N比を有するひずみセンサであることを示している。

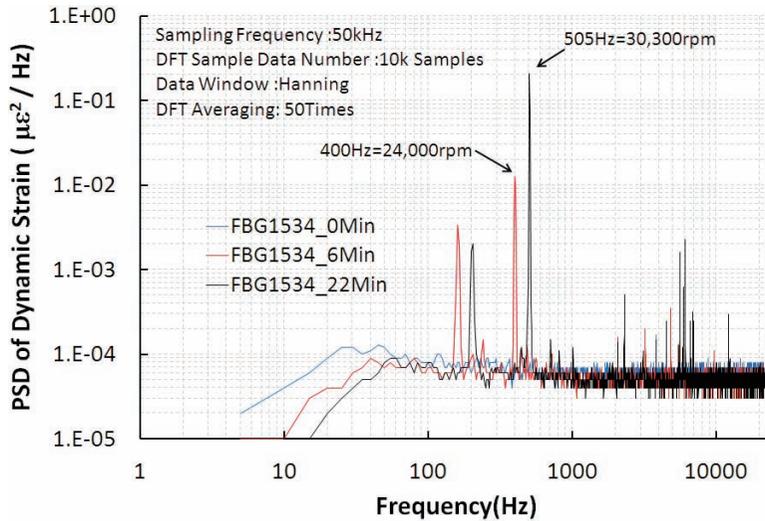


図 11 周波数解析パワースペクトラム密度関数の一例

5. 結言

液体水素に浸された軸受カートリッジに取り付けられたステンレススチール製の直径8mmのロッドにFBGセンサを接着し、軸受が30,000rpmで回転するときの動ひずみの計測を試みた。動ひずみの振幅は片振幅で 10×10^{-6} に満たない微小なものであったが、回転速度に対応する信号を取得することができた。また、取得した動ひずみの周波数解析結果のピーク周波数の履歴は、軸受の回転速度と良く一致した。本試験の結果は、爆発性を有するため電気センサによる計測が難しかった液体水素ロケットエンジン用機構品の実運用試験に、FBGセンサを適用できることを示すものである。さらに、耐爆性に留意が必要なため、電気センサの使用が制限されていた危険物流体中の機構品のひずみ計測に適用することも可能である。このようにFBGセンサは従来の電気抵抗式ひずみゲージが適用できないような機構品を含む構造体の計測が可能であることは、本報の最も大きな成果である。

参考文献

- (1) T. Nakajima, Frequency characteristic evaluation of FBG sensor using a Hopkinson's bar, Proceeding of EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING 2010 (2010), pp.1313-1318
- (2) 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評価、IIC Review、No.44 (2010)、pp.18-22
- (3) 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), pp.75-77
- (4) 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、No.38 (2007)、pp.37-44
- (5) 荒川敬弘、中島富男、FBGセンサによるフラットベルト状のロードホイール回転時の高速動ひずみ計測、IIC Review、No.41 (2009)、pp.42-48

- (6) 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
- (7) M. Nosaka, M. Kikuchi, N. Kawai, K. Hiroshima, Effects of Iron Fluoride Layer on Durability of Cryogenic High-Speed Ball Bearings for Rocket Turbopumps, Tribology Transactions, 43, 2 (2000), pp.163-174



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
宇宙輸送系推進技術研究開発センター
主任研究員 博士(工学)

高田 仁志

TEL. 050-3362-7232
FAX. 0224-68-3579



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
技師長室
技師長

佐藤 明良

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