

FBG センサによる高速動ひずみ計測技術について

中島 富男 *

Tomio Nakajima

荒川 敬弘 **

Takahiro Arakawa

概要

光ファイバセンサの一つである FBG(Fiber Bragg Grating) センサはひずみゲージと同様に局所ひずみを計測できるセンサである。FBG センサによるひずみ計測技術を産総研より技術導入し、基本的な技術を確立できた。技術導入当初は、構造物監視への適用を考え準静的か 100Hz 程度までの動ひずみ計測であったが、現状では、FBG センサによる 2kHz 以上の高速動ひずみ計測が可能であることを確認し、より小さな構造体への適用も可能となった。適用例の一つとして、回転体、特に回転中の特定の位相で荷重が負荷される回転体の過度的な高速動ひずみの計測に FBG センサが適していると考え、試作機による確認を行った。

キーワード：FBG センサ、動ひずみ計測、回転体、光ファイバセンサ

1. はじめに

近年、耐久性や耐電磁ノイズ性及び信号線の長距離性に優れる光ファイバセンサが、構造物監視に提案され実用に供されている。光ファイバセンサは、様々な原理に基づくセンサがあるが、構造物監視用としてはひずみセンサとしての適用例が多い。ひずみ計測は数センチメートルから数メートルの長さのひずみを計測する分布型センサか、通常のひずみゲージのように数ミリメートルの長さをセンサ部とする局所型センサに分類できる。実用化されている手法は分布型センサによるものが多いが、これらの分布型センサはその長さから

AE や超音波の高い周波数帯域や微小動ひずみを計測することが難しい。

一方、光ファイバセンサによる AE 計測技術も実用化されている例があるが、同じセンサでひずみ計測ができないため、構造物監視のためには、別のひずみ用センサを配置することが必要な場合が多い。

そのような背景の下、当社技術研究所では平成 17 年度から 18 年度の 2 年間に亘り、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（以下、産総研）と局所ひずみ計測型に分類されるファイバー・ブラッグ・グレーティング（Fiber Bragg Grating 以下、FBG）センサを構造物

* 技術研究所 課長

** 技術研究所 所長 工学博士

監視に適用するための共同研究を行い、産総研の有するFBGセンサによるひずみ計測技術とAE計測技術を導入した。

一般に、FBGセンサは土木や建築構造物での静ひずみ計測または数ヘルツの低周波動ひずみへの適用が進んでいるが、導入した産総研の計測技術は、FBGセンサの高速な応答性と微小なひずみに対する感度を有することに着目した点が特徴である^{1),2)}。

当社では導入した計測技術を基に、FBGセンサを、構造物監視を含む具体的な事例に適用する研究を独自に進めている。FBGセンサによるAE計測技術は、まだ具体的な適用を検討できる段階まで至っていないが、FBGセンサによるひずみ計測については、基本技術がほぼ確立でき、当初は構造物監視を考え準静的から100Hz以下であった周波数帯域は、現状では2kHz以上の高周波帯域までひずみゲージと同等な計測結果が得られることを確認した。このことから、FBGセンサによるひずみ計測技術を、大きな構造物の監視技術に適用するだけでなく、より小さな構造物の動ひずみ計測も適用先として考えることが可能となった。その一例として、ひずみゲージでは計測ラインが複雑になり、かつ、周波数帯域も限られる回転体の動ひずみ計測、特に回転中の特定の位相で荷重が負荷される回転体の過度現象の動ひずみを計測する手法として、FBGセンサが適していると考え、試作機による確認を行った。

本稿においては、FBGセンサ及び導入したFBGセンサによるひずみ計測技術の概要と、その適用例である回転体の動ひずみ計測例について示す。

2. FBGセンサについて

(1) FBGの構造と特徴

FBGの構造の模式図を図2-1に示す。FBGは、光ファイバコアの軸線に沿って屈折率を周期的に変化させ、一次元のブラッグ回折格子が形成したものである。光ファイバの光の伝播方向は進行方向か反射方向しかないため、FBGでの回折光は反射方向にのみへ伝播する。

FBGからの反射光の波長はブラッグ波長と呼ばれる。このブラッグ波長は回折格子の理論に従い、式2-1に従う¹⁾。

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad \text{式 1}$$

ここで、 λ_B はブラッグ波長、 n_e は格子部の有

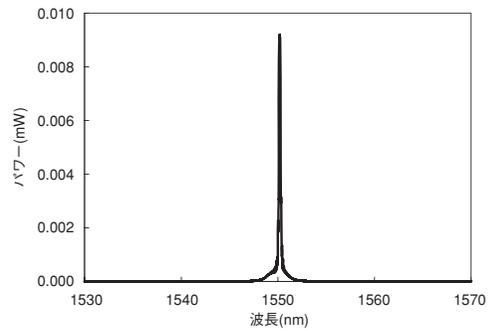


図2 FBG反射光スペクトル例

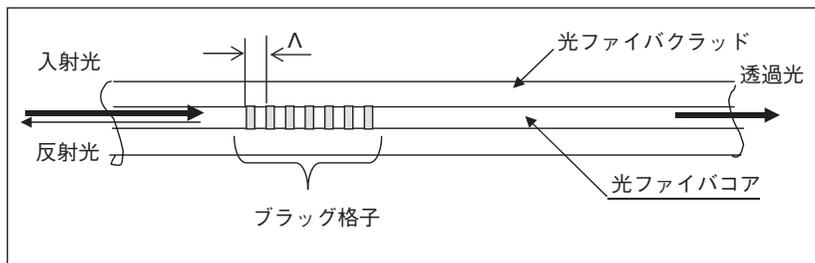


図1 FBG構造模式図

有効屈折率及び Λ は格子間隔である。図 2 に FBG に広帯域光を入射したときの FBG からの反射光スペクトルの例を示す。

FBG として一般的なシングルモード光ファイバを使って製作されたブラッグ波長 1550nm の場合には、光ファイバのコア屈折率を一般的な値である 1.46 とすると、格子間隔は凡そ $0.53\mu\text{m}$ であり、FBG の全長が 10mm では格子数は 18,800 となる。

(2) FBG のセンサとしての原理

ブラッグ波長を決定するパラメータである有効屈折率と格子間隔が変化すると、ブラッグ波長も変化する。有効屈折率と格子間隔はそれぞれ FBG の長さ変化（ひずみ）及び温度に対して感度を有するため、センサとして機能する。

実測したひずみ変化及び温度変化に対するブラッグ波長の変化特性を図 3 及び図 4 に示す。

使用した FBG はブラッグ波長と半値幅の nominal 値はそれぞれ、1550nm 及び 0.2nm である。

図 3 及び 4 から求めたひずみ感度は $1.24\text{pm}/\mu\epsilon$ 、温度感度は約 $10\text{pm}/\text{C}$ である。これは文献³⁾で示されている値と同等の結果である。

3. FBG センサによるひずみ計測

(1) FBG センサの計測系

FBG センサをひずみまたは温度センサとして使用するときの計測系は、図 5 に示す形態が一般

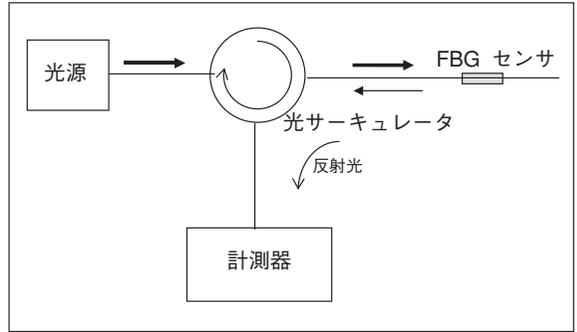


図5 一般的なFBGセンサ計測系

的である。即ち、光源には FBG センサのブラッグ波長を含む広帯域光源を使用し、FBG センサと広帯域光源の間に光サーキュレータを配置する。光サーキュレータは、光源からの光を FBG センサへ入射させる導波路となり、かつ、FBG センサからの反射光を光源と接続された導波路とは別の導波路へ分離・出力する光学受動素子である。光サーキュレータの反射光出力ポートに光計測器を設置し、ブラッグ波長変化を読み取る。

最近では、FBG センサ専用計測器も市販されているが、準静的なひずみ変化は、光スペクトルアナライザで十分に計測可能である。光スペクトルアナライザの例を図 6 に示す。一般的な光スペクトルアナライザの計測原理は、回転機構を有する回折格子と固定されたミラーを組合せて、波長を離散的に掃引し、波長毎の光強度を計測するも

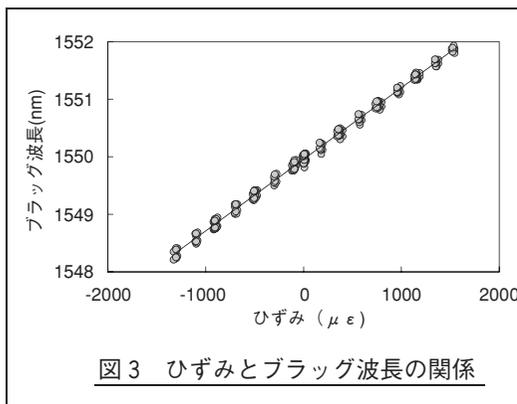


図3 ひずみとブラッグ波長の関係

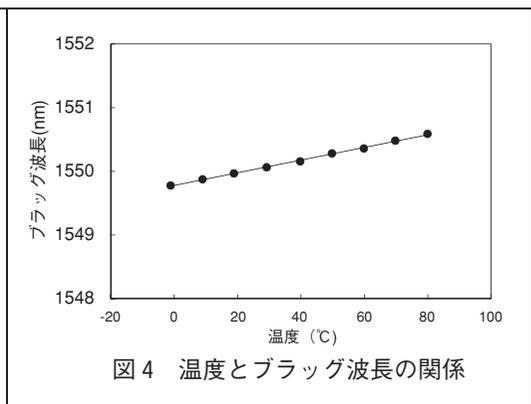


図4 温度とブラッグ波長の関係

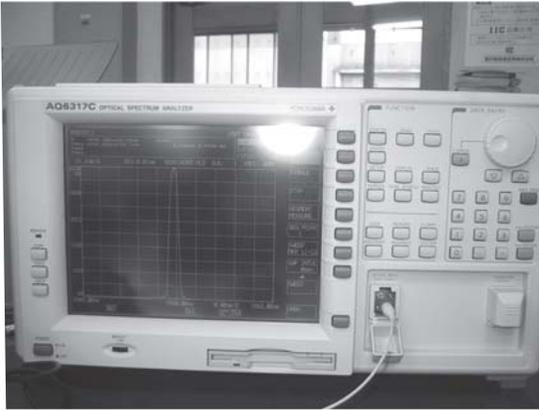


図6 光スペクトルアナライザの例
(横河 AQ6317C)

のである。光スペクトルアナライザの仕様値としては、最小波長確度が10pm程度及び最小読取値は1pm程度が一般的である。FBGセンサによる計測では最小波長確度による計測が必要である。

また、光スペクトルアナライザでは、回折格子の回転のための掃引時間が数秒から数十秒の時間を要する。よって、光スペクトルアナライザ及び同様な原理によるFBGセンサ専用計測器では、ブラッグ波長変化を連続量として計測することが難しい。

(2) 光学フィルタを用いたブラッグ波長推定による計測システム

FBGセンサによるひずみ計測には様々な手法が提案されている。その一つとして、図7に示す

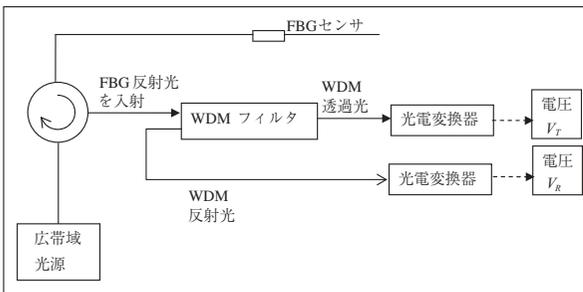


図7 WDMフィルタを使った
FBGセンサ計測システム構成図

ように入射光、透過及び反射光の3ポートを有し、図8のような透過率と反射率特性を有する光ファイバ用光学フィルタを適用する手法がある¹⁾³⁾。この光ファイバ用光学フィルタは、光ファイバを伝播する光を短波長帯域Iと長波長帯域IIIの二つの帯域に分割するためのフィルタであり、WDM (Wavelength Division Multiplexing 波長分割多重) フィルタと呼ばれる。WDM フィルタには帯域I及びIIIの間に透過率と反射率が変化する遷移帯域IIがある。この遷移帯域IIを利用し、FBGセンサのブラッグ波長変化を計測できる。

ブラッグ波長がWDMフィルタの遷移帯域IIの範囲にあるFBGセンサを使用する。その上で、図7のようにWDMフィルタの入射光ポートと光サーキュレータの反射光ポートを接続し、FBG反射光をWDMフィルタに導波させる。WDMフィルタの透過光及び反射光ポートそれぞれを光電変換器に接続し、透過光及び反射光の光強度信号を電圧信号 V_T と V_R に変換する。電圧信号 V_T と V_R から式2に示す無次元量 R 値を定義する。

$$R = \frac{V_R - V_T}{V_R + V_T} \quad \text{式2}$$

WDMフィルタの遷移域帯域IIの特性から、 R 値は図9に示すようなブラッグ波長に対する一価の関数として得られる。

よって、使用するFBGセンサに対して、 R 値-ブラッグ波長特性を取得しておくことにより、電圧信号 V_T と V_R からブラッグ波長を推定することが可能となる。また、電圧信号 V_T と V_R は連続信号なので、ブラッグ波長変化も連続信号として取得することが可能であり、高速なブラッグ波長変化(つまり高速なひずみ変化)の計測も可能となる。

ここで示した手法が、産総研より導入したひずみ計測技術の概要であり、以下に示す計測例も全て本手法によるものである。

なお、本手法によるブラッグ波長の計測範囲は

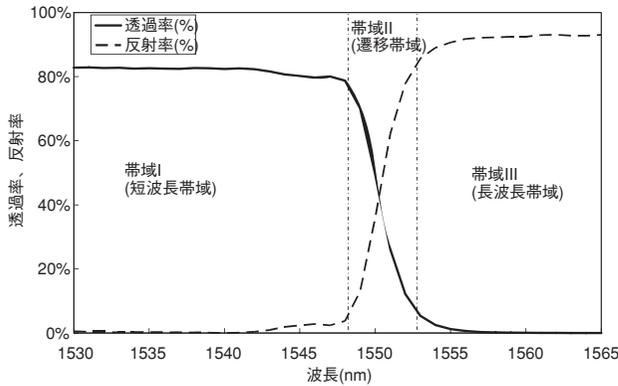


図8 WDMフィルタ特性の例

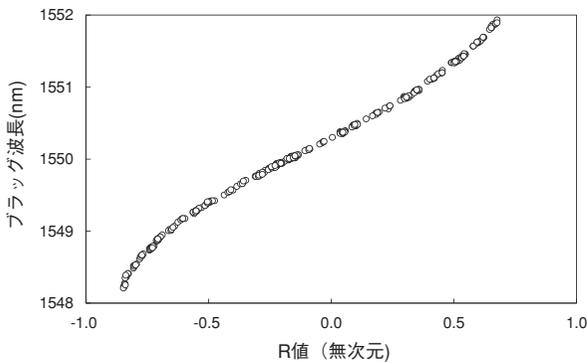


図9 無次元量R値とブラッグ波長の関係

WDM フィルタの遷移波長帯域幅に依存する。

4. FBG センサによる動ひずみ計測適用例

(1) 片持ちハリの振動

FBG センサによる高速動ひずみ計測が可能であることを、図 10 に示すような片持ちハりに衝撃荷重を荷負したときの共振・減衰振動を FBG センサによる観察結果より示す。なお、比較のためひずみゲージ(ゲージ率 2、ゲージ長さ 10mm)による計測も行った。使用した FBG センサのブラッグ波長、半値幅のノミナル値は、それぞれ 1550nm と 0.2nm である。

取得した波形の例を図 11 に、及び、その波形の周波数解析結果を図 12 に示す。図 11 により、FBG センサとひずみゲージのひずみ指示値

が同等であることが分かる。一方、図 12 より、FBG センサを用いて、ひずみゲージと同様に、約 2100Hz にあるハリの曲げ 3 次共振が明瞭に観察できていることが分かる。

上記の結果より、FBG センサを用いてひずみゲージと同等の高速動ひずみ計測が可能であることが分かる。

(2) 特定の位相でのみ荷重を受ける回転体の動ひずみ計測

地上輸送機の子車のような回転体は、回転しながら接地している部分のみが垂直荷重や横荷重を受ける。このような回転体の一部に着目すると、ひずみ波形はパルス状となり、更にひずみ波形のスペクトルは回転一次だけでなく、高次成分を有し、且つ回転体の自由振動も励起される。よって、このような回転体のひずみ計測では、過激な現象を把握できるようにするために、高速な計測系が必要である。そのような目的に FBG センサが使用可能であることは、前記の片持ちハリの動ひずみ計測結果より明らかである。

ところで、FBG センサの特徴の一つは、一本の光ファイバ上に複数の FBG センサを配置することが可能なことである(図 13)。よって、回転体での多点ひずみ計測を行う場合であっても、回転部にブラッグ波長が異なる複数の FBG 部を有する光ファイバ 1 本と光源や計測器に接続された固定部にある光ファイバ 1 本の間で信号の伝達部を構築できれば、ひずみゲージのように電気信号接点による接続よりもシンプルな信号ラインとなると考えられる。

光ファイバを用いた回転部と固定部間の信号伝達手段は様々な方式が考えられる。今回、図 14 に示す光ファイバ・ロータリジョイント(Fiber Optical Rotary Joint=FORJ)と呼ばれる部品を採用した概念確認機を試作し、回転体に発生するひずみの観察を行った。使用した FORJ は 2000rpm が

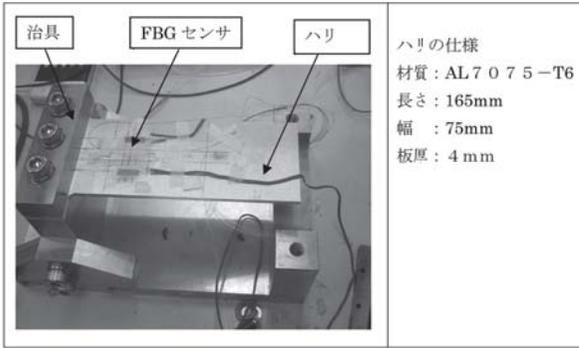


図10 ハリと治具外観

許容最大回転数である。

概念確認機の全体図を図15に示す。

ひずみを発生させる試験片は図15に示すような、アルミ製の二枚羽状で、片側が片持ちハリとなる。FBG センサは羽の片方の回転軸近傍に貼り付けた。回転部の光ファイバは中空な回転軸内に配置され、FORJにより回転部と固定部間の光ファイバが接続されている。図16に固定部側光ファイバの接続状態を示す。今回の概念確認機で

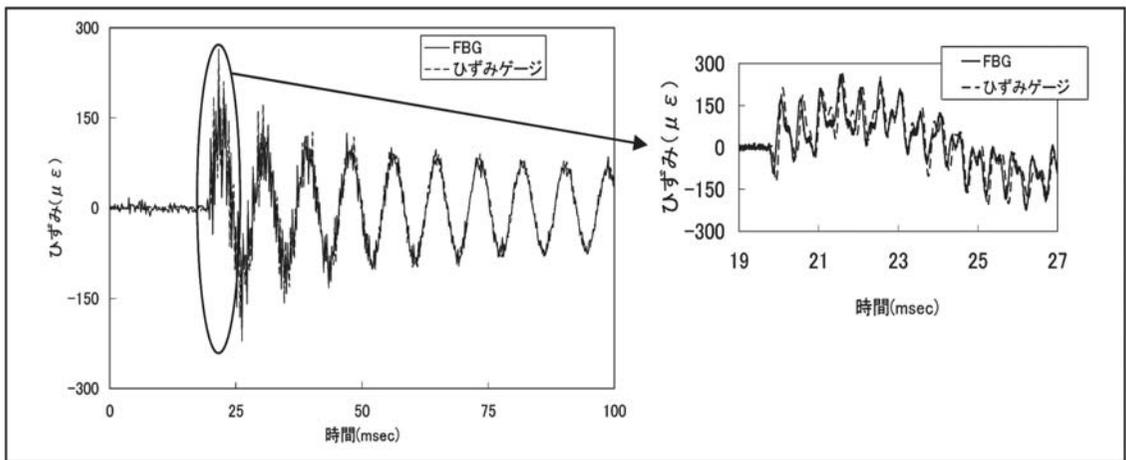


図11 片持ちハリの衝撃負荷時ひずみ波形の例

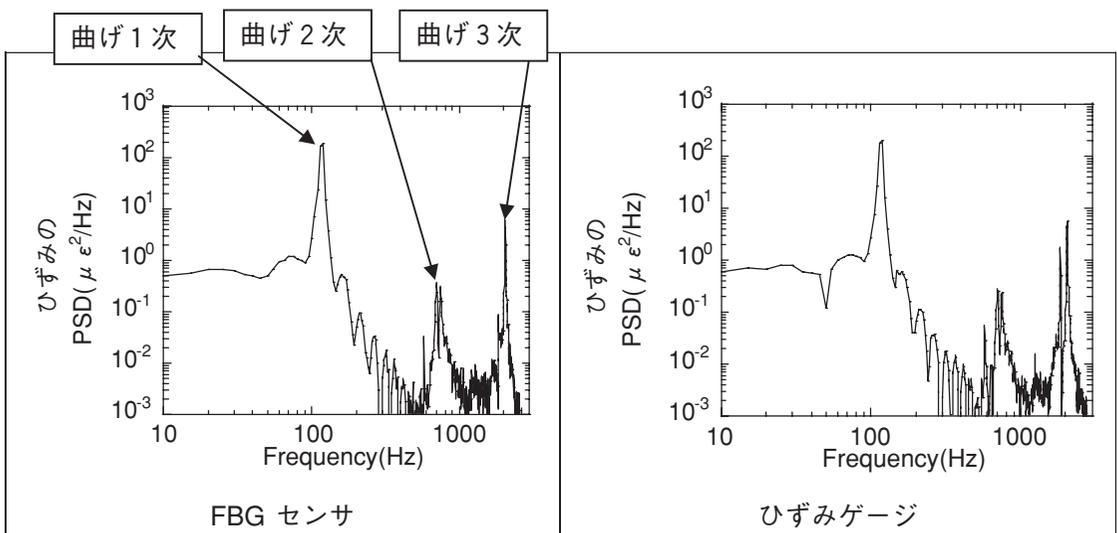


図12 片持ちハリ衝撃負荷時波形の周波数解析結果 ($\Delta f = 5\text{Hz}$)

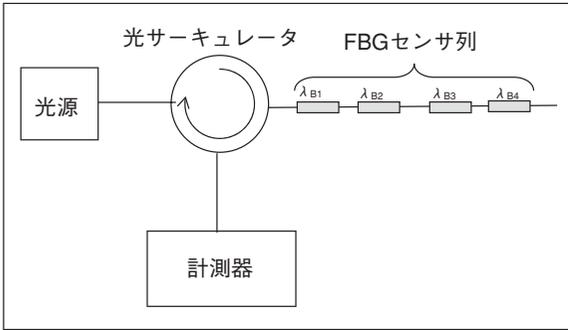


図13 多点計測のためのFBGセンサ列概念図

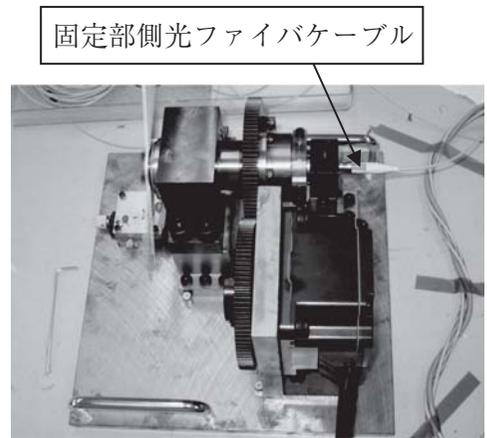


図16 固定部光ファイバの配置状態

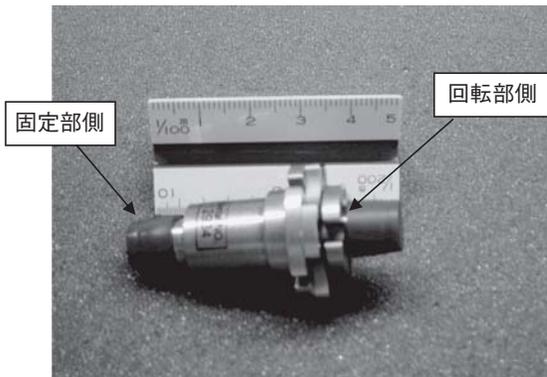


図14 FORJ外観図

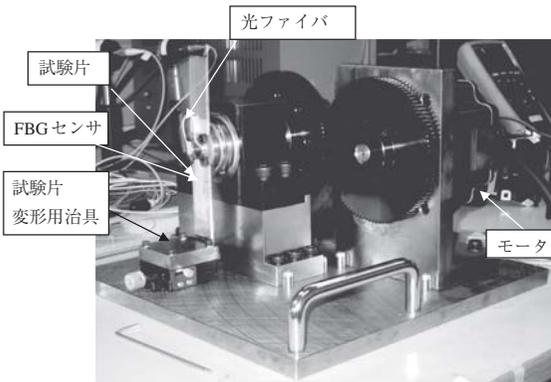


図15 FBGセンサによる
回転体ひずみ計測概念確認機外観

は、FBG センサ点数は1点であるが、プラグ波長の異なる FBG センサの多点計測を行う場合であっても、回転部と固定部の光ファイバの接続状態は同様となる。

試験片は、試験片先端が最低部にあるときのみ、試験片変形治具が試験片先端部を回転軸方向に強制的に押すことによる曲げ変形を受ける。

図17に取得した試験片のひずみ波形と周波数解析結果を示す。ひずみ波形からは、パルス状の強制ひずみと自由振動を含んだ波形が取得できている。また、周波数解析結果からは、ひずみ波形の回転一次周波数だけでなく、回転高次成分周波数及び試験片の曲げ共振周波数が計測できていることが分かる。

本結果より、FBG センサを用いた回転体のひずみ計測において過度応答を含んだ計測が行えることが確認できた。

5. まとめ

FBG センサによるひずみ計測において、光学フィルタを用いた計測システムを採用することにより、高速な動ひずみ計測が可能であることを確認した。また、採用した計測システムにより、特定の位相で荷重を受ける回転体構造物のひずみ計測にFBG センサが有効な手段であることも確認した。

FBG センサは計測系の選択により、更に高速且つより微小なひずみである AE への適用が可能

であることが共同研究を行った産総研より示されており²⁾、例えば、従来の圧電センサの使用が制限される場合での AE センサとして活用できるものと考えている。一方、1本の光ファイバ上に複数の FBG センサ部を配置できる特徴を利用した適用技術も様々考えられる。また、基礎技術としては、ひずみ計測時の温度補償技術を、適用例に対応して確立していくことも必要であり、今後も FBG センサの具体的な適用例の拡大と基礎技術の向上に努めて行く考えである。

謝 辞

本研究については、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 秋宗淑雄 部門長と津田浩博士から共同研究終了後にも多くのご指導と助言を頂いた。ここに深く感謝します。

参考文献

- 1) 津田浩、「FBG センサを用いた高速ひずみ計測」, 材料システム 第 24 巻、2006 年
- 2) Jung-Ryul Lee · Hiroshi Tsuda, 「A novel fiber Bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests」, Scripta Materilia, 53, 2005
- 3) Andreas Othonos · Kyriacos Kalli, 「Fiber Bragg Gratings」, Artech House, 1999

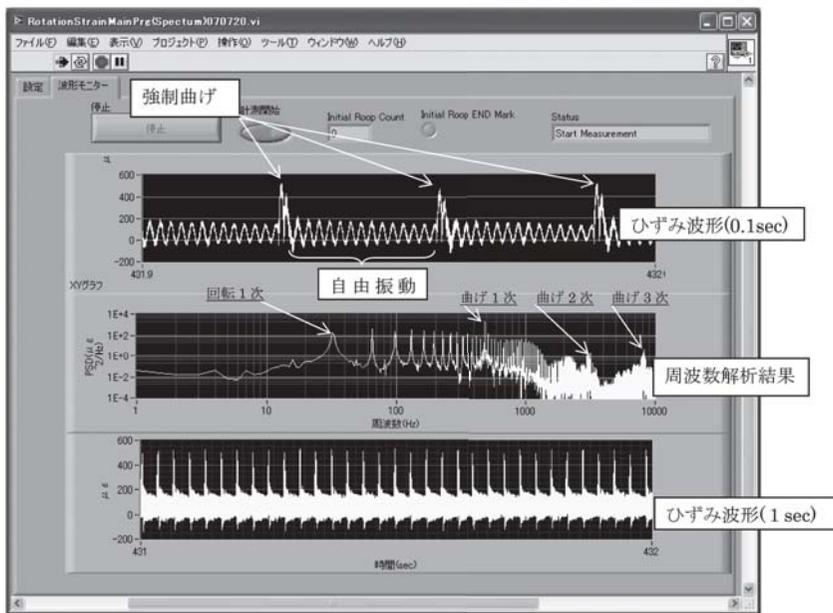


図 17 回転体のひずみ波形と周波数解析結果



技術研究所
課長
中島 富男

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155



技術研究所
所長 工学博士
荒川 敬弘

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155