

# 光ファイバー FBG 歪センサーの温度特性と疲労信頼性

海上安全研究領域、材料信頼性研究グループ

\*小林佑規、田中義久

## 1. まえがき

構造物の歪計測には、一般に抵抗線歪ゲージが用いられている。この歪測定法は、歪による電気抵抗変化をブリッジ回路により増幅している。微小歪の計測は、電氣的ノイズが傷害となる場合がある。

一方、光ファイバー FBG (Fiber Bragg Grating) 歪センサーによる歪計測には、次の利点がある。(a)歪の計測および伝達経路において電氣的ノイズの影響を受けない。(b)歪は、FBG の絶対波長の変化から求めるため、ゼロ点補正などの操作がなく、絶対値が測定できる。(c)歪センサーは、直列に接続できるため、1 本の光ファイバーケーブルで多点の歪計測ができる。(d)計測系は、電氣的に絶縁性、電磁無誘導性であり、落雷や防爆等の影響を受けない。しかし、光ファイバーは、温度センサーとして使用可能であるように、温度に敏感であるため、歪測定には温度補正が不可欠である。

本稿では、光ファイバー FBG 歪センサーの温度特性と疲労信頼性の実験結果について述べる。温度特性は、FBG 歪センサーの鋼材に対する挙動のほか、抵抗線歪ゲージの温度特性について検討した。疲労信頼性は、FBG 歪センサーの繰返し数  $4 \times 10^7$  回対して十分耐え得ることを実験的に確認した。なお、疲労信頼性については、(社)日本造船研究協会「SR245 二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究」の一環として行ったものである。

## 2. 計測方法

光ファイバー FBG 歪センサーは、市販の貼付形センサーを用いた。このセンサーは、光ファイバーをポリイミド樹脂のフィルムに埋め込んだ箔フィルム状である。本実験では、KA40 の

鋼材表面に、シアノアクリレート系の接着剤にて接着した。FBG 歪の計測には、マイクロオプティクス社製ファイバーブラッググレーティングシステム (FBG-IS) を用いた。図 1 に、FBG 歪計測システムの概略図を示す。

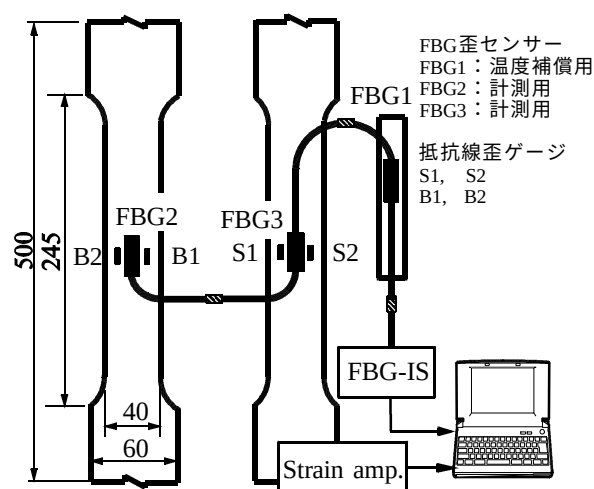


図 1 FBG 歪計測システムの概略図

FBG-IS は、動作波長が 1530 ～ 1570nm、最大測定レンジが  $40,000 \times 10^{-6}$ 、測定分解能が  $1 \times 10^{-6}$ 、測定確度が  $\pm 4 \times 10^{-6}$ 、スキャン周波数が 50Hz である。したがって、1Hz を超える繰返し速度の疲労試験では、データ収録の都度繰返し速度を 1Hz にした。また、1 回の収録データ数は、FBG の波長および歪ゲージともそれぞれ 5 秒間、250 点の測定とした。静的引張圧縮データは 250 点の平均値、疲労試験の最大および最小ピーク値はそれぞれ 1 回の測定につき 5 点の平均値である。Bragg 波長のシフト量から歪への換算は、 $1.2 \text{ pm}/\mu\text{strain}$  とした。抵抗線歪ゲージ (SG) の歪は、温度補償付きアクティブダミー 2 ゲージ法により、直流歪アンプを用いて計測した。

温度特性試験は、試験片をビニール袋で防水して恒温水槽に浸漬し、温度 -3 ～ 60℃ に変化さ

せて計測した。疲労信頼性試験は、鋼材試験片に片振りまたは両振り振幅の歪を疲労試験機にて負荷し、 $1 \times 10^7$  回ごとに、FBG のスペクトル測定および静的引張圧縮試験を行った。FBG スペクトルの測定には、スペクトルアナライザー Q8384 を用いた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 温度特性

FBG 歪センサーの温度による伸縮歪と温度の関係を図 2 に示す。 $-3 \sim 60^\circ\text{C}$  の試験範囲において、両者は良好な直線性を示した。歪出力は、 $1^\circ\text{C}$  あたり  $19.8 \times 10^{-6}$  であった。鉄の線膨張率は、理科年表によると、 $12 \sim 15 \times 10^{-6}$  である。本実験の FBG の温度特性が、これよりやや大きいのは、FBG センサーと鋼材との間でポリイミドベースや接着剤を介しており、これらの膨張係数が影響を及ぼしたものと考えられる。

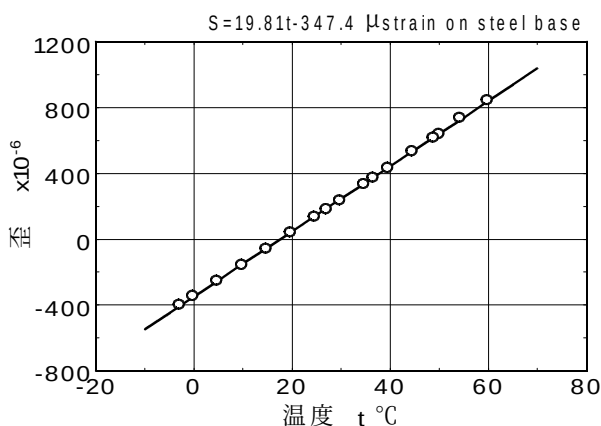


図 2 FBG 歪センサーの温度特性

微少な歪挙動を問題にする計測では、1 日の温度変化による歪出力に注意を払わなければならない。図 3 は、平成 14 年 5 月 2 日の 12 時から 5 月 3 日の 12 時にかけて測定した実験室の温度変化に対する歪出力をプロットしたものである。最高室温が  $23.7^\circ\text{C}$ 、最低室温が  $18.6^\circ\text{C}$  である。FBG 歪および SG 歪とも、室温に対応して変化している。室温変化  $5.1^\circ\text{C}$  に対する歪変化は、FBG が  $94.4 \times 10^{-6}$ 、SG が  $57.3 \times 10^{-6}$  であった。SG 歪は、2 ゲージ法による温度補正をしているものの、温度変化に対する出力が比較的大きかつ

たのは、ダミーゲージが試験片とは異なる鋼材に貼り付けてあったこと、また、ブリッジボックス内の固定抵抗の室温特性が作用したものと考えられる。

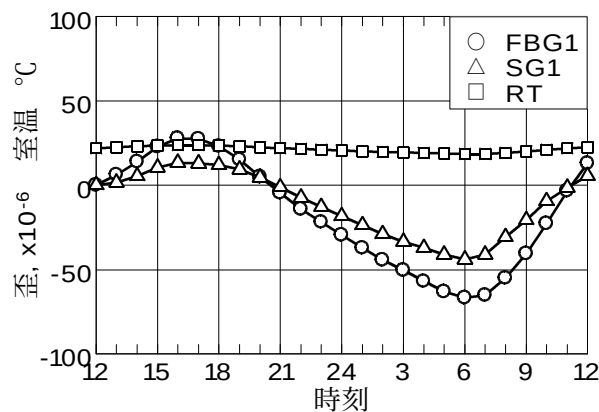


図 3 室温における FBG 歪と SG 歪の日変化

#### 3.2 疲労信頼性

##### (1) 繰返し負荷時のピーク値歪

最大および最小荷重に対する歪のピーク値と繰返し数の関係を図 4 にプロットする。FBG2 および FBG3 のピーク値歪は、公称歪  $+60 \times 10^{-6}$  ～  $+600 \times 10^{-6}$  を  $1 \times 10^7$  回繰返ししたとき(通算繰返し数  $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^7$  回)の温度補正值である。FBG2 と FBG3 のピーク値は  $1 \times 10^7$  回までの間で一定値を示しており、繰返しに対して安定した出力を示している。両者の FBG に見られるピーク値の相違は、試験片がやや湾曲しているためである。歪がゼロ点付近に存在する TEMP(FBG1)のプロットは、実験室の気温変化による歪出力を示している。

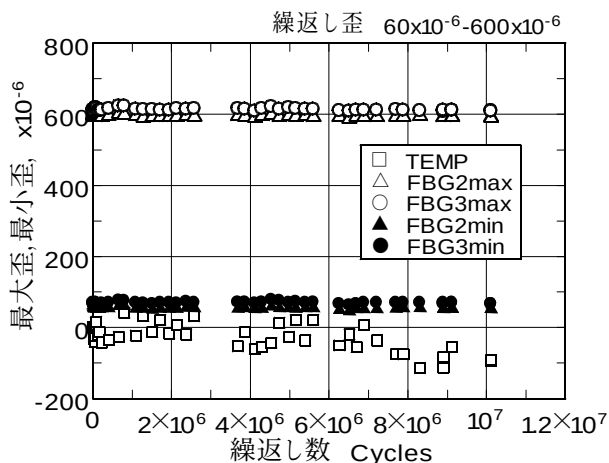


図 4 繰返し負荷中の最大及び最小歪の変化

## (2) 負荷に対する歪出力の直線性

FBG 歪センサーの静的引張圧縮試験による入出力歪の関係を、繰返し荷重  $1 \times 10^7$  回ごとに測定した。ここに、入力歪は付与荷重からヤング率  $21,000 \text{ kg/mm}^2$  として計算した値である。

歪センサー FBG3 および抵抗線歪ゲージ (SG) の通算繰返し数  $3 \times 10^7$  回後における入出力歪関係を図 5 に示す。入出力歪の関係は、FBG 歪および SG 歪とも良好な直線関係にあり、負荷・除荷過程にヒステリシスが見られない。したがって、 $3 \times 10^7$  回の繰返しを受けても負荷荷重に対する歪の再現性は十分であるといえる。

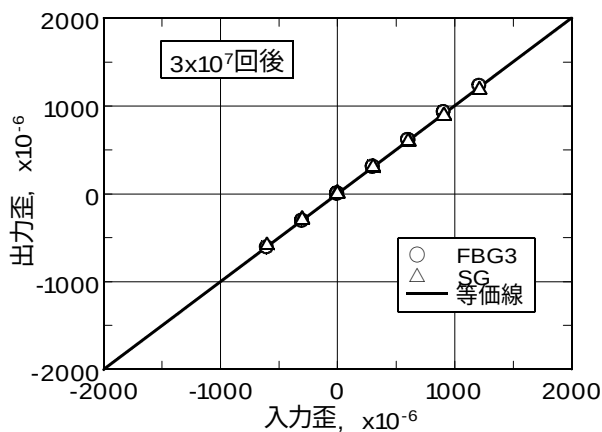


図 5 FBG 歪と SG 歪の入出力関係

## (3) 波長のピーク値変化

FBG 歪センサーの特徴の一つは、歪測定ごとにゼロ較正が不要なことである。すなわち、歪は、グリットの集積からくる波長によって絶対歪が測定できるので、構造体に取り付けたときの波長を測定しておけば、常に初期歪からの変化量が測定できる。ここでは、繰返しによって波長がどのようにずれるか、いわゆるゼロドリフトについて、FBG スペクトルのピーク値波長変動から絶対歪の変動を求めた。

無負荷時の FBG スペクトラムのピーク値波長から計算される歪と繰返し数との関係を図 6 に示す。いずれの FBG 歪とも繰返し数に対してほぼ同様な変化をしている。ただし、温度補償用の TEMP (FBG1) は、センサーを貼り付けてから 1 年以上を経過しており、初期状態から荷重の履

歴を受けていない。したがって、FBG2 および FBG3 の歪が、繰返し数とともにマイナスに変化しているのは、繰返し負荷による劣化などの変化ではなく、温度変化が要因であると考えられる。因みに、試験開始時は 7 月の最高室温を記録した時期でほぼ  $40^\circ\text{C}$  近くであり、 $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^7$  回は 9 から 10 月、 $4 \times 10^7$  回は 11 月下旬にあたる。試験の開始時から終了時では、ほぼ  $20^\circ\text{C}$  近くの気温変化がある。したがって、長期間の連続測定では、温度補償計測が必須であることを強調する。

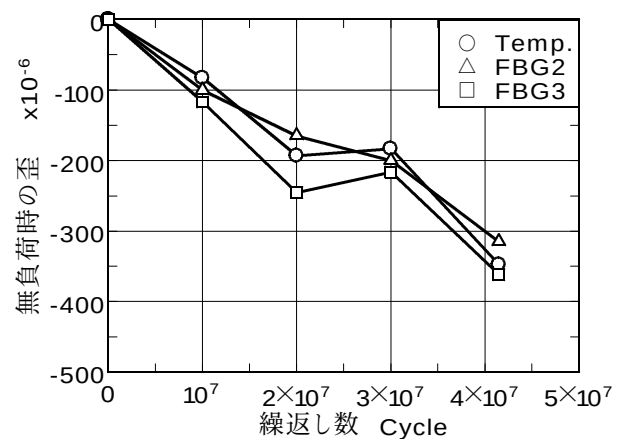


図 6 無負荷時の FBG 歪の経時変化

## 4. まとめ

本実験の FBG 歪センサーと抵抗線歪ゲージはいずれも瞬間接着剤を用いて接着した。FBG 歪センサーの温度特性、静的引張圧縮負荷および疲労信頼性に対して、次の結果が得られた。

- (1) 貼付形 FBG 歪センサーの鋼材接着に対する温度特性は、 $19.81 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  であった。
- (2) 繰返し荷重に対する最大および最小歪は安定した値であった。
- (3) 繰返し荷重試験の後における静的引張圧縮試験から、入出力関係の応答は、ヒステリシスがなく良好な直線関係にあった。
- (4) 波長のピーク値には、繰返し荷重負荷によるドリフトは見られなかった。

以上の点から、FBG 歪センサーは、繰返し荷重において十分な精度で使用可能であると評価できる。