FBG 光ファイバセンシングによる回転軸表面のねじりひずみ分布計測

葉山 裕^{*1}, 大島 史洋^{*2}, 衣袋 順一^{*3}, 松尾 晃^{*4}, 萩原 世也^{*5}Measurement of surface torsional strain distributions on rotary shaft
using FBG optical fiber sensingYutaka HAYAMA^{*1}, Fumihiro OHSHIMA^{*2}, Junichi IBUKURO^{*3},
Akira MATSUO^{*4} and Seiya HAGIHARA^{*5}^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Saga University

1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502, Japan

^{*2,*5} Department of Mechanical Engineering, Saga University

1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502, Japan

^{*3} Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.

7-6-1 Higashinarashino, Narashino-shi, Chiba 275-0001, Japan

^{*4} S.E.A Systems, Inc.

3-3 Nagiri-machi, Sasebo-shi, Nagasaki 857-0023, Japan

Received 15 July 2015

Abstract

Structural health monitoring has been used to confirm the durability evaluation and safety of a structure in which long-term use is required. Because the transmission loss of the optical fiber sensor is extremely small, it can measure the present status of structures from far away. Generally the FBG (Fiber Bragg Grating) optical sensing systems are often used to get reliable indices from structures. The shipping industry recently, there has been a growing interest in fuel efficiency improvements and energy regulation in international shipping. Therefore, during sailing, to measure the exact power of the main shaft of the ship has become important. We proposed the monitoring system using space optical transmitting of the FBG optical fiber to get information from a rotational shaft. And we evaluated the performance of the space optical transmission of the FBG optical fiber sensing system for rotational shaft in the previous study. Consequently, we reported that it can be effectively measured and space optical transmission metric is effective for performance prediction. In this paper, the strain and the temperature on the rotating torsion shaft, is measured by the FBG optical fiber sensor and the space optical transmission. We confirm reliability of the information that is retrieved from the rotating shaft subjected to torsion in the experiment. The conditions for reliable data from the rotating shaft under loading is obtained on the basis of the experimental results of the proposed systems.

Key words : FBG sensor, Strain distribution, Structural health monitoring, Optical measurement, Rotating body, Optical space transmission

1. 緒 言

構造健全性モニタリングは、長期間使用が要求される構造物の耐久性評価や安全性を確認するために用いられている。使用されるセンサは多種あるが、一般的には光ファイバセンサが、伝送損失が極めて小さく、長距離測定が可能であり、信頼性が高く分布計測が可能であるためによく用いられている(三田, 2001)(武田, 2004)。一方、船舶分野においては、国際海運におけるエネルギー規制ならびに船舶の燃費改善が必要とされており、そのために

No.15-00392 [DOI:10.1299/transjsme.15-00392], J-STAGE Advance Publication date : 13 January, 2016

^{*1} 正員, 佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)

^{*2} 正員, 佐賀大学大学院工学系研究科

^{*3} 日鐵住金溶接工業(株) (〒275-0001 千葉県習志野市東習志野 7-6-1)

^{*4} (株) エスイーエー創研 (〒857-0023 長崎県佐世保市名切町 3-3)

^{*5} 正員, フェロー, 佐賀大学大学院工学系研究科

E-mail of corresponding author: hagihara@me.saga-u.ac.jp

は、航行中の船舶の正確な馬力計測を行うことが重要である(日下部他, 2011)(日刊 CARGO 電子版, 2013). また、燃費改善のための最適船速計画には、正確な出力-速力のパワーカーブが必要であり、運転中の出力を把握するのに正確な軸馬力の測定が必要である(三上, 2013)(加納, 佐藤, 2012).

ファイバセンサを軸馬力測定へ適用するためには、回転軸の外周から空間光伝送によって測定データを取り出すことが必要である. これにより、航行中の船舶に取り付けて軸馬力を測定できる. また、ロータリコネクタなどの装置が不要となるため、従来の方法と比べコスト削減とメンテナンス性の向上を同時に実現することができる. 著者らは(葉山他, 2015)FBG(Fiber Bragg Grating)方式の光ファイバセンサを使用した回転軸モニタリングシステムを提案し、回転試験によりそのシステムの評価を行った. その結果、精度面から軸回転数が 700 rpm (回転速度が 5.6m/sec) まで有効測定でき、あわせて空間光伝送の評価指標が性能予測に有効であることを報告した.

本研究では、FBG 方式の光ファイバセンサを船舶の軸馬力計として使用するために、実際に軸にトルクを加えたねじり試験を行い、発生する回転軸表面のひずみ分布や温度を測定し、FBG 方式光ファイバセンサの軸馬力計としての有効性について評価した.

2. FBG 方式の光ファイバセンシング

2・1 FBG センサと固定方法

光ファイバセンシングには BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry), ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectometry) の分布型センサや FBG の準分布型 (多点型) センサがある(保立, 村山, 2012). 本研究では、応答性や測定精度、多用途性を考慮し、FBG 方式の準分布型 (多点型) センサを用いる.

図 1 は、FBG ひずみセンサの固定方法を示す. 図 1(a)は、ファイバ素線を直接測定対象物にボンドを用いて取付ける方法 (Type A) である. 現場で施工しなければならないために使い勝手が悪い. 図 1(b)は、施工の便宜性を考慮して中間に取り付け用ゴムマグネットシートを介在させる方法 (Type B) である. ゴムマグネットシートにあらかじめセンサをボンドで固定しておくことができるのに加え、測定したい場所に貼り付けることができるので取り扱いが簡単となる.

l_1 : Grating part length l_2 : Free portion length l_3 : Sensor unit length

Fig. 1 Fixed method of FBG strain sensor

図 1 (c)は、取付け用ゴムマグネットシートでファイバ素線をカバーし、測定対象物に押し付け固定する方法 (Type C) である. この方法は、ボンドを使わないので一番容易に固定できる方法である. また、図 1 (d)は、耐環境性向上と固定性をより安定させるために測定物にセンサをボンドで固定した後、ゴムマグネットシートをカバーする方法 (Type AC) である. 図 1 (e)は、マグネットシートの上にセンサをボンドで固定した上にさらにマグネットシートをかぶせる方法 (Type BC) である. 最後に、FBG 温度センサには、ひずみの影響を受けないように初期張力をかけず、緩く対象物に取り付ける基本型 (Type BT), およびゴムマグネットシートに細いパイプをボンドで取付け、パイプ内に FBG センサを固定せず通したユニット型 (Type UT) とがある.

2・2 FBG センサのひずみ感度

FBG センシングの原理について文献(根本他, 2005)(中島, 2013)をもとに以下に簡単に説明する. FBG センサはグレーティングの周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみが反射される原理にもとづいており, FBG の反射波長はひずみや温度等の物理変化量に応じて波長シフト量 $\Delta\lambda$ だけ変化する. そのため, この波長シフト量によりひずみや温度を計測できる. ひずみによる屈折率変化の寄与を表す光弾性係数 P_e を用いて, 波長シフト量 $\Delta\lambda$ (pm)とひずみ ε ($\mu\epsilon$)の関係は式 (1) で与えられる.

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - P_e)\varepsilon$$

(1)

ここで, ひずみ感度 ($\Delta\lambda/\varepsilon = \lambda(1 - P_e)$) は FBG グレーティング部の製造方法や測定条件により変化するが, 平面かつ反射波長が 1550 nm の場合, 約 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ といわれている.

また FBG に温度変化を与えた場合には, 温度変化量 ΔT により屈折率やグレーティング間隔が変化するので, 屈折率温度係数 ζ および光ファイバの線膨張係数 α を用いて波長シフト量と温度変化量の関係は式 (2) で与えられる.

$$\Delta\lambda = \lambda(\zeta + \alpha)\Delta T$$

(2)

ここで, 温度感度 ($\Delta\lambda/\Delta T = \lambda(\zeta + \alpha)$) は, センサの材質・製造方法や試験方法にも依存するが, 反射波長が 1550 nm で室温の場合, 9.5~14 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 程度といわれている. したがって, ひずみ計測において温度の影響を一般に無視することはできず温度補正が必要となる.

Fig.2 Strain sensitivity of FBG sensor

Table 1 Summary of tensile test

Tensile tester		SHIMADZU AG-IS 100KN		
Test piece		JIS 1B test pieces SS400, L200mm*W25mm*T6mm		
Sensor type		FBG unit sensor (Type C) with magnet rubber cover sheet L200mm*W25mm*T2mm		
Test condition	Test case	1	2	3
	Tensile speed	0.02mm/min	0.1mm/min	0.08mm/min
	Max. load	30KN		

FBG センサのひずみ感度を確認するために単軸引張試験を行った. 表 1 に, 使用した FBG センサと単軸引張試験の試験条件を示す. 図 2 に, 単軸引張試験結果を示す. 縦軸に波長シフト量, 横軸にひずみを示し, 計算値は式 (1) を用いてひずみ感度が1.2pm/ $\mu\epsilon$ の場合を示し, 実験値は試験荷重から逆算したひずみに対する測定波長シフト量を示す. なお, 逆算には試験片の断面積 150mm² と SS400 の縦弾性係数 206GPa を使用した. 図から, FBG センサのひずみ感度は, 一般的に使用される1.2pm/ $\mu\epsilon$ とほぼ等しいことがわかる. また, 試験に使用した FBG ひずみセンサは Type C のユニット型センサであるが, ねじり試験に使用した Type AC と Type BC のセンサとは対象物への固定法が異なるだけで, 室温の範囲内でひずみ感度に差はないとされる.

2・3 回転軸モニタリングへの適用

回転軸モニタリングシステムは, FBG 方式光ファイバセンサ, ファイバ, ならびに光学的空間伝送装置から構成される(葉山他, 2015). FBG 方式光ファイバセンサは, 1 ラインでひずみや温度など多目的に, 同時かつ容易に (準) 分布計測することができる. こうした多点計測機能を活用して, FBG センサによるひずみ計測は, 1 ラインに複数の FBG センサを直列につなぎ各ブラッグ反射波長の区別を行うことにより, 必要に応じた多点計測を行う. また, 光学的空間伝送装置は, センサの光学的情報を回転軸から非接触で伝送する装置である.

回転軸に光ファイバケーブルと FBG センサを取り付け, 回転軸と固定床に分けて, 治具で対向するよう配置された二つのコリメータにより光が空間伝送される. なお, 回転軸と固定側との空間光伝送は, 軸回転により間

欠的に行われる。その後、光は再度光ファイバケーブルを通り計測器で波長を測定された後、コンピュータに取り込まれ必要なデータ処理がなされる。

3. 静止ねじり負荷試験

3・1 試験装置

ねじりによるひずみ測定では安定した測定を行うために、電気的センシングでも 2 枚, 4 枚の複数ゲージを組み合わせて回路を構成したものが使用されている(渡辺, 1982)。FBG センサでは、単独センサとなるので、電気的センシングのように直接的に誤差を相殺できないが、センサの組み合わせにより間接的に誤差を相殺できるかどうかを確認するために静止ねじり負荷試験を行った。

Fig. 3 Experimental apparatus for static torsional loading

Fig. 4 FBG sensors on the test specimen (static torsional loading)

Table 2 Summary of FBG sensors

(a) Installed FBG sensors					(b) Combination of sensors			
No.	Initial wavelength	Mount position	Line angle	Sensor type	Name	Mount position	Sensor	
							1	2
①	1533nm	P3	45°	BC	Cb1 ^{*1}	P1	⑥	②
②	1540nm	P1	45°	BC		P2, P4	⑦	③
③	1543nm	P4	0°	BC	Cb2 ^{*2}	P3	⑧	①
④	1546nm	P4	0°	UT	Cb3 ^{*1}	P1	⑥	②
⑤	1550nm	P4	0°	BT		P2, P4	⑦	③
⑥	1550nm	P1	-45°	AC	Cb3 ^{*1}	P3	⑧	①
⑦	1554nm	P2	-45°	AC		P1	⑥	②
⑧	1560nm	P3	-45°	AC	Cb3 ^{*1}	P2, P4	⑦	③
						P3	⑧	①

図 3 は本研究で用いた円管の静止ねじり負荷試験装置を示す。円管の一端を固定し、ギヤボックスの入力軸に取り付けた腕に荷重を加えて、ギヤボックスと円管の間のトルクメータで測定しながら円管にトルクを加えた。なお、円管およびトルクメータの継手はたわみ軸継手を用いた。試験体測定部の材質・寸法は配管用炭素鋼鋼管 SGP100A (外径 109.3 mm, 長さ 374 mm, 肉厚 2mm) で、端部は外径 120 mm (光空間伝送用治具寸法にあわせて) のフランジと鍛造による厚肉円筒構造で双方を溶接接合している。

表 2(a)と図 4 は、本研究に使用したセンサ詳細とセンサ配置を示す。3 個の基本型ひずみセンサ⑥⑦⑧ (Type AC) を張線角度で -45° ，取付け位置は図の上側で，測定部長 $L=374\text{mm}$ の端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ (P1)， $L/3$ (P2)， $L/2$ (P3) の位置に取付けた。同様に，2 個のユニット型ひずみセンサ②① (Type BC) を張線角度で 45° ，取付け位置は図の下側で，端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ (P1)， $L/2$ (P3) の位置に取付けた。また，張線角度で 0° ，取付け位置は，測定部長 $L=374$ の左端 (P4) に軸ひずみ測定用ユニット型センサ③ (Type BC) を取付けた。張線角度 $\pm 45^\circ$ でひずみ感度は最大となり，張線角度 -45° で図の上側は圧縮、張線角度 $+45^\circ$ で図の下側は引張りのひずみ状態となる。FBG ひずみセンサでは，初期張力をかけた状態で対象物に固定し，圧縮の応力でも引張応力場で測定できるようにしてある。また，センサ取付けの作業性および安定面から下面 (逆面) への取付けは避け，上面から可能な範囲でのセンサ取付けを優先した。

表 2(b)は，測定精度を向上させるため，互いに誤差を相殺する複数センサを組み合わせた対センサの構成を示している。対センサの基本的な考え方を次に説明する。測定ひずみは測定対象ひずみと測定対象外ひずみの和から構成される。ここで測定対象外ひずみを誤差と定義する。誤差を消去するのに 2 種類の方法があり，一方が互いに直交するセンサを組み合わせて互いに差をとることで誤差を消去するのが誤差相殺型 (Cb1 と Cb3) である。他方が互いに張線角度が異なる複数のセンサ (主と副) を組み合わせ，主センサで測定対象ひずみ，副センサで測定対象以外のひずみを測定し，互いの差をとることで，測定対象以外のひずみを消去するのがひずみ直接相殺型 (Cb2) である。

温度測定用に FBG 温度センサと防滴デジタル温度計を使用した。防滴デジタル温度計 (CUSTOM 製 CT-450WR) のプローブは，図の左端 (P4) に接触させた。FBG 温度センサは，ひずみの影響の受け難い張線角度 0° で，位置は防滴デジタル温度計と同じ図の左端 (P4)，上側に基本型温度センサ⑤ (Type BT)，下側にユニット型温度センサ④ (Type UT) を取付けた。

6 個のひずみセンサ寸法はグレーティング長 $l_1=10\text{mm}$ ，固定間隔 (フリー長) $l_2=30\text{mm}$ ，センサ部長 $l_3=100\text{mm}$ (l_1 , l_2 , l_3 の説明は図 1 を参照)，特性は半値幅 $0.22\sim 0.23\text{nm}$ ，反射率 90%，中央波長は各々 $3\sim 7\text{nm}$ 間隔をあけて $1533\text{nm}\sim 1560\text{nm}$ に分布しており FBG センサ波長範囲は 27nm となる。また，マグネットシートの寸法は，取付け用 $L100\text{mm}\times W25\text{mm}\times T2\text{mm}$ ，カバー用 $L100\text{mm}\times W25\text{mm}\times T0.6\text{mm}$ である。

3・2 温度測定

静止ねじり負荷試験を行う際，同時に 2 回にわけて試験体温度を測定した。1 回目試験の開始時室内温度は 25.4°C ，2 回目試験の開始時室内温度は 24.4°C であった。図 5 は，FBG 温度センサ (Type UT) の測定結果と防滴デジタル温度計による測定結果を比較して示す。縦軸は FBG センサの測定波長，横軸はデジタル温度計の温度を示す。図では，1 回目試験の測定値 (●点)，2 回目試験の測定値 (□点)，測定値の線形近似直線 (一実線) である。2 回で温度差 1.4°C の変動に対し波長差 15pm とよく追従できており，温度感度は室温で $10.5\text{pm}/^\circ\text{C}$ となり 2・2 での一般値とほぼ等しいことがわかる。また，図には示さないが，FBG 温度センサ (Type BT) の温度感度も同様に $12.2\text{pm}/^\circ\text{C}$ となった。なお，ひずみセンサの波長変動分から温度センサの波長変動分により，ひずみの温度補正を実施している。

3・3 静止ねじり負荷試験結果

図 6 は，静止ねじり負荷試験の結果で，縦軸がひずみ，横軸がトルクとして対センサ Cb1～Cb3 のひずみ測定値と式 (3) で張線角度 45° の場合のトルクによるひずみ計算値を示している。なお，トルクは約 $500\text{N}\cdot\text{m}$ まで負荷し，同じ試験を 3 回繰り返した。また，波長変動の基準となる初期波長は，1 測定開始無負荷時の波長としている。図より，対センサの試験結果と計算値は差が小さく良く一致しており，対センサ Cb2 (ひずみ直接相殺型) は精度的にやや落ちるものの，Cb1 と Cb3 (誤差相殺型) は精度的に殆ど差がないことがわかる。また，センサ③の軸ひずみは小さいことから，Cb2 と Cb1，Cb3 との差が，対センサの効果と考えられる。したがって，センサの軸への取付け位置よりも対センサの組み方による影響の方が大きいと推定される。

実験結果と比較するための式 (3) は，一様な軸ねじりの場合の Saint-Venant 基礎式 (鶴戸口他，1957) を使用して求めた。ここで， T_q はトルク (Nm)， GJ は軸ねじり剛性 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)， r_s は軸半径 (m)， ε は測定ひずみ， θ は周方向展開時の FBG センサの張線角度 ($^\circ$)，ただし $GJ = 1.44119 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}^2$ ， $r_s = 0.05465\text{m}$ である。

$$\varepsilon = \cos \theta \sqrt{1 + \left(\tan \theta + \frac{r_s T_q}{GJ} \right)^2} - 1 \quad (3)$$

$$\varepsilon \approx \frac{r_s T_q}{2GJ} \sin 2\theta \quad (4)$$

式 (3) の高次項を省略すると、一般的にひずみとトルクの関係式として使用される式 (4) が得られる。

Fig. 5 Relationship between temperature and wavelength

Fig. 6 Relationship between torsional loading and strain

4. 回転試験装置によるねじり負荷試験

4・1 回転試験装置

図7は回転ねじり負荷試験の試験装置全体、図9に試験装置の概要を示す。図3の静止ねじり負荷試験装置に駆動用モータを取り付けることによって、動力は、モータ、ギヤボックス、トルクメータ、試験体、パウダーブレーキの順に伝達される。なお、トルクはパウダーブレーキの励磁電圧を調整することによって変化させることができる。図8に計測システム全体、表3に計測システムの仕様を示すが、試験体およびセンサ・センサの配置は図4と表2に示すものと同一のものをを用いた。また図に示す計測器は、表3のアンリツデバイス製AR4011A FBG センサモニタであり、シングルモード波長掃引光源と対数アンプによる増幅機能付受光器からなる。

Fig. 7 Experimental apparatus for rotational loading

Fig. 8 Measurement system for rotation torsional load test

Table 3 Specification of measurement system

Composition	Specification
Sensor & Fiber	FBG sensor *8
	Single mode optical fiber
Space optical transmission device	Confrontation type collimator
	Positioner
Spectrum analyzer	Anritsu AR4011A
Processor & Monitor	Core i5-2.4GHz

Fig. 9 Schematic figure of experimental equipments

4・2 回転無負荷試験

4・2・1 間欠的な空間光伝送と光学的特性起因の波長シフト

間欠的な空間光伝送においては、著者らはその性能評価のための指標として、回転速度ごとのデータ取得率、データ取得回数および光学的特性起因の波長シフト量を導入した(葉山他, 2015)。

実験結果から求まるデータ取得回数 N_e とデータ取得率 $d_1(\%)$ との関係は式(5)であり、ここで光結合機会数 n_c は軸回転数 $R_c(\text{rpm})$ 、測定時間 $\Delta T(\text{sec})$ を用いて式(6)となる。

$$d_1 = 100 \times \left(\frac{N_e}{n_c} \right) \quad (5)$$

$$n_c = \left(\frac{R_c}{60} \right) \times \Delta T \quad (6)$$

ここで、データ取得回数は測定時間内にデータ伝送・取得に成功した回数とする。

次に理論的なデータ取得率 d_2 は、計測器サンプリング周波数 $n_s(\text{KHz})$ 、有効光軸間距離 L_e 、回転速度 $v_\theta(\text{mm/ms})$ 、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s(\text{nm})$ 、波長掃引速度 $v_s(\text{nm/ms})$ から式(7)で得られる。また、 v_θ は軸中心とコリメータ中心との距離を示す回転半径 $r(\text{mm})$ を用いて $v_\theta = 2 \times \pi \times r \times (R_c / 60000)$ となる。基準光軸間距離 L_0 は静的状態のもので、 L_e は L_0 に対し実際の測定中に各種の外乱要因から減少した値となる。さらに式(7)を変形した式(8)を用いて、 d_1 または d_2 から L_e を推定できる。

$$d_2 = 100 \times n_s \times \left[\left(\frac{L_e}{v_\theta} \right) - \left(\frac{\Delta\lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (7)$$

$$L_e = v_\theta \times \left[\left(\frac{d_2}{100} \right) \left(\frac{1}{n_s} \right) + \left(\frac{\Delta\lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (8)$$

一方、光学的特性起因の波長シフトとは、光学的結合特性に起因する要因と低光強度に起因する要因により生ずる波長の変化を指し、受光器増幅用対数アンプを使用した計測器と間欠的な空間光伝送の場合に顕著な現象になるといわれている(斎藤, 2012)。このように、間欠的な空間光伝送においては、光学的特性に起因する波長シフトの影響を受けやすいので、フィルターなどを設けて光学的特性に起因する波長シフトの影響を緩和した上で、通常通り複数回の測定データ平均化処理を行う必要がある。そのため、次のフィルターを設けて、平均化処理に使用できる有効測定データの抽出を行う。

(1) 設置全 FBG センサの反射波長を検出できた測定のみ有効と判断する。

(2) 光学的特性に起因する波長シフト量を規制するしきい値を設ける。

ここで、光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s(\text{pm})$ は、測定波長 $\lambda_1(\text{nm})$ 、初期波長 $\lambda_0(\text{nm})$ を用いて式(9)で与えられる。

$$\Delta\lambda_s = 1000 \times (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (9)$$

$\Delta\lambda_s$ の評価の目安は、計測器の測定精度や分解能、ならびに測定対象となる物理変化量からみた許容精度などを勘案して決める。この評価目安の妥当性や基本性能を確認するため、無負荷・無ひずみで測定対象の物理変化に起因する波長シフトが生じない回転試験を行う。無負荷の回転試験結果を整理することで、各試験装置の測定信頼性を推定できる。

4・2・2 試験結果

この回転試験装置における光学的空間伝送装置での間欠的な空間伝送性能確認のため、無負荷の回転試験を実施した。図10は、データ取得率とデータ取得回数に及ぼす回転速度の影響を示す。計算値は、式(5)による実験のデータ取得率 d_1 を式(8)に代入して得られた有効光軸間距離 $L_e = 0.23\text{mm}$ を使用して、式(7)から求めた d_2 である。式(7)の他の計算条件として、計測器サンプリング周波数 n_s は1.25KHz、回転半径 r は77mm、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s$ は27nm、波長掃引速度 v_s は430nm/msである。図には、光学的特性起因の波長シフトの整理結果もあわせて示す。

Fig. 10 Performance of space optical transmission device (no-load rotation test)

図では、式(7)によるデータ取得率の計算値 d_2 ($n_s = 1.25\text{KHz}$, $L_e = 0.23\text{mm}$, 図の左軸, 実線)を示す。また、回転速度 v_θ (軸回転数 R_c) ごと測定時間 ΔT 20秒間で、式(5)による実験のデータ取得率 d_1 (図の左軸, ■点), データ取得回数 N_e (図の右軸, □点)の内数として、式(9)による光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s$ が10pm以下となるデータ取得回数 N_1 (図の右軸, ○点), 100pm以上となるデータ取得回数 N_2 (図の右軸, △点)を示している。図10より、 n_s が1.25KHzの場合、 v_θ が1.5m/sec ($R_c = 180\text{rpm}$)まで d_1 が8%で測定でき、有効測定の可能条件が、 $N_1 > N_2$ および測定データ平均化処理の必要性から $N_1 \geq 4$ とすると、有効測定の限界回転速度域は $v_\theta = 1.0 \sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120 \sim 150\text{rpm}$)であることがわかる。また、実験において有効測定できるデータ取得率の目安も20%以上であることがわかる。

4・3 回転ねじり負荷試験

4・3・1 ひずみの測定結果

回転無負荷試験の結果を踏まえて、有効測定の限界回転速度である $v_{\theta} = 1.21\text{m/sec}$ ($R_c = 150\text{rpm}$) まで $v_{\theta} = 0.24\text{m/sec}$ ($R_c = 30\text{rpm}$) 刻み 5 点, トルクは試験装置能力の制限から $150\text{N}\cdot\text{m}$ まで $50\text{N}\cdot\text{m}$ 刻み 3 点で試験を行った. 図 11 にトルクによる発生ひずみの測定結果を示す. 測定時間 ΔT は約 20 秒である.

Fig. 11 Results of measured strain for rotational loading

図 11(a)では, 横軸にトルク, 縦軸にひずみで式 (3) による計算値 (実線), 対センサ Cb3 の静止ねじり試験の測定値 (●点), 対センサ Cb1 の測定平均値 (□点), 対センサ Cb2 の測定平均値 (◇点), 対センサ Cb3 の測定平均値 (○点) を示している. 平均値とは, 回転速度 5 点のうち有効測定できた 4 点のひずみの平均を指す. 図から, 線形性を維持して, 計算値や静止ねじり試験結果とも良く一致していることがわかる.

図 11(b)では, 横軸に回転速度, 縦軸にひずみで式 (3) を用いて, トルク $50\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (破線), トルク $100\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (一点鎖線), トルク $150\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (実線) を示す. また, 回転速度 0m/sec には各対センサの測定平均値を示し, 有効測定できた回転速度 4 点について, 対センサ Cb1 の測定ひずみ (■点), 対センサ Cb2 の測定ひずみ (◆点), 対センサ Cb3 の測定ひずみ (●点) を示している. 図から, Cb1, Cb2, Cb3 の順で測定精度が良くなることがわかる. これは静止ねじり試験結果と異なるが, その理由として, Cb2 は軸力によるひずみが発生して, それを直接相殺するセンサ構成が有効に作用している. 一方, Cb1 は回転端部に近く, 静止ねじり試験時にはない外乱要因により悪化しているためと推定される.

4・3・2 空間光伝送性能の測定結果

空間光伝送性能の評価指標について, 回転ねじり負荷試験結果を整理して, 図 12 に示す. 図 12(a)には, 横軸に回転速度, 縦軸にデータ取得率として式 (7) の計算値 d_2 ($n_s = 1.25\text{KHz}$, $L_e = 0.23\text{mm}$, 実線), 式 (5) による実験のデータ取得率 d_1 (■点) を示している. 図から, 有効測定できるデータ取得率の目安が 20%以上であるとした場合には, 無負荷の回転試験結果と同様に, 有効測定の限界回転速度域は $v_{\theta} = 1.0\sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120\sim 150\text{rpm}$) であることがわかる. ただし, $v_{\theta} = 0.73\text{m/sec}$ ($R_c = 90\text{rpm}$) 付近に別途性能低下要因があると推定される.

図 12(b)には, 横軸に回転速度, 縦軸に波長シフト量 $\Delta\lambda$ (pm)として式 (3) と式 (1) を用い, トルク $50\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (破線), トルク $100\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (一点鎖線), トルク $150\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (実線) を示す. また, 有効測定できた回転速度 4 点について, センサ①の測定波長シフト量 (●点), センサ②の測定波長シフト量 (■点), センサ⑥の測定波長シフト量 (□点), センサ⑦の測定波長シフト量 (◇点), センサ⑧の測定波長シフト量 (○点) を示している. 図から, $v_{\theta} = 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 150\text{rpm}$) で明確な異常測定となっており, 大きな光学的特性起因の波長シフトが生じているものと推定される. ここからも, 有効測定の限界回転速度域は $v_{\theta} = 1.0\sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120\sim 150\text{rpm}$) であることがわかる.

Fig. 12 Performance of space optical transmission device

4・3・3 軸馬力の計算式

軸馬力は、測定したひずみデータから式 (10) で計算できる.

$$Skw = 2\pi \frac{R_c}{60} \frac{1}{1000} \frac{GJ}{r_s} \left\{ \sqrt{\left(\frac{1+\varepsilon}{\cos \theta} \right)^2} - 1 - \tan \theta \right\} \quad (10)$$

ここで, Skw は軸馬力(kw), R_c は軸回転数(rpm), GJ は軸ねじり剛性($N \cdot m^2$), r_s は軸半径(m), ε は測定ひずみ, θ は周方向展開時のFBG張線角度($^\circ$)である.

5. 考 察

5・1 ひずみ測定精度の評価

表4に、静止ねじり負荷試験と回転ねじり負荷試験で測定されたひずみの誤差について、比較のため、図6と図11(a)をもとに二乗平均誤差として計算した結果を示す. 表から、静止ねじり試験結果として対センサの精度改善効果は2~3%であることがわかる. また回転の結果、2.6%精度が低下し、対センサは平均94%程度の測定精度であることもわかる. ここで、回転による精度低下の理由として、光学的起因の波長シフトの発生という光学的要因、および回転に伴う曲げや軸力などねじり以外に起因するひずみの増加という物理的要因が考えられる. 光学的要因は全センサ共通のもので、空間光伝送性能を向上させる対策 (センサ数や波長掃引範囲の縮小などを含む) をとるのに対し、物理的要因については、個別センサごとに異なるので図12(b)をもとに分析を行う.

図12(b)から、全センサが計算値に対し+側にシフトする傾向を示すが、センサ①②と⑥⑦⑧ではやや差がみられる. 対センサとして誤差相殺されると同時に、その差が残存誤差となっている. その原因は、センサ配置の関係から、曲げと軸力によるひずみの影響を分離できていないことによる. また、場所P1のセンサ⑥は、P2やP3の⑦⑧と比較し誤差が大きく、場所により影響が異なることがわかる. これは、P1が回転端部に近いことと関係があると推定される. したがって、対センサの適切な組み方が、精度改善にとって重要なことがわかる.

Table 4 difference of strain error in two torsion test

Item	Static torsional load	Rotation torsional load
	Strain error*, %	Strain error *, %
Exp. Cb1	3.0	9.6
Exp. Cb2	5.4	5.5
Exp. Cb3	2.5	3.6
Exp. Ave.	3.6	6.2

*Strain error : Sum of squares mean strain error between measured values and calculated values at each measurement points.

Table 5 Critical rotational speed range

Item		Reference* ¹	Present
		Le* ² =1.3mm	Le* ² =0.23mm
Poor level* ³	v_0 (m/sec)	6.5	1.5
	R_c (rpm)	800	180
Good level* ⁴	v_0 (m/sec)	5.6	1.0
	R_c (rpm)	700	120

*¹Reference:HAYAMA,Y. et al. 2015

*²Le: Effective distance between two optical axes.

*³Poor level: Data acquisition rate is 10-12%.

*⁴Good level: Data acquisition rate is over 20%.

5・2 空間光伝送性能の評価

表 5 に、著者らが既に報告した回転試験結果(葉山他, 2015), ならびに今回行った無負荷の回転試験, 双方の空間光伝送性能について比較した結果を示す. 船舶の常用軸回転数が 100~400 rpm で, 概ね回転速度が 6.0m/sec 以下であることから, 本計測システムは, 船舶用の軸馬力計として基礎的な空間光伝送性能を保有しているといえる. ただし, 回転ねじり負荷試験で確認された, 有効測定できる限界回転速度は 1.0m/sec 超であるので, 中型内航船を中心に隻数が多い船舶の回転速度域 2.0~4.0m/sec に対応するために, 実用的な空間光伝送性能の改善が課題となる.

ここで, 有効測定できる限界回転速度が, 前回試験における 5.6m/sec から今回 1.0m/sec 超へと低下した理由は, 式 (7) より他のパラメータは同じなので, 有効光軸間距離 L_e が 1.3mm から 0.23mm に低下したことにあるといえる. L_e は対向するコリメータの軸径方向ずれが影響するので, 二つの回転試験装置間には回転により発生するずれに差があり, その差は装置剛性の差に起因するものが大きく, 試験体のフランジ軸継手において, 固定軸継手とたわみ軸継手の違いなどが推定される.

実用的な空間光伝送性能の改善は, 装置剛性の向上を含めて, 光結合機会数, サンプリング回数を多くし, あるいは光軸維持時間とデータ伝送・処理必要時間との比率を大きくすることである. 式 (5) (6) (7) をもとにデータ取得回数を増加させる, あるいは評価指標のデータ取得率に関する式 (7)をもとに有効掃引可能時間 (=有効光軸維持時間- データ伝送・処理必要時間) を大きくすることである. そのために, データ取得率 20%以上, 平均化処理に利用できる有効データ取得回数 4 回以上が, 有効測定できる限界回転速度の目安となる.

6. 結 言

FBG 光ファイバセンシングを使用した回転軸モニタリングシステムの構築を提案し, 中型内航船への適用を想定した計測システムを製作, 回転ねじり負荷試験によりひずみ測定精度および光ファイバの空間伝送性能を含めた検証を行った. その結果, FBG センサの張線角度・施工法・センサ種別を選択し, 互いに精度補完する複数センサを組み合わせ対センサとするなどにより, 回転軸の健全性判断に必要なひずみ分布を測定でき, あわせて温度, トルク, 軸馬力, スラスト力なども計測可能なことがわかった. また, FBG 測定と光の空間伝送を組み合わせた回転軸モニタリングシステムは, 船舶の軸馬力計として必要な基礎的性能を保有しており, 船舶の省エネルギー化にむけ応用可能なことを示した.

文 献

日刊海事プレス, MHI マリンエンジ, 無線式の光学軸馬力計を開発, 日刊海事プレス, 5 月 17 日(2013), p.10, 株式会社海事プレス社.

- 葉山裕, 大島史洋, 衣袋順一, 松尾晃, 萩原世也, FBG 光ファイバセンシングによる回転軸の光学的空間伝送性能評価, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826(2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00072.
- 保立和夫, 村山英晶監修, 光ファイバセンサ入門(2012), pp.105-125, 光防災センシング振興協会.
- 加納敏幸, 佐藤圭二, 実海域船舶性能データの Visual Mining Studio を用いたマイニング, 数理システム ユーザーコンファレンス (2012), pp.5-25.
- 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<上>/海運・造船の何が変わるか, 日刊海事プレス, 9月28日(2011), pp.4-5, 株式会社海事プレス社.
- 三上郁夫, 琉球海運の省エネ運航の取り組み, 日本船舶機関士協会,
<<http://www.marine-engineer.or.jp/images/2013ppt3.ppt>>(2013), pp.12-14, (参照日 2014年5月28日).
- 三田彰, スマート建築構造物と光ファイバセンサ, 第50回理論応用力学講演会講演論文集 (2001), pp.527-528.
- 中島富雄, 繰返し荷重を受ける場合の FBG センサを用いたひずみ計即時自己温度補償方法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 79, No. 807(2013), pp. 1555-1558.
- 根本勇, 廣瀬浩二, 角谷久子, 藤島絵里子, 森山健二, FBG を用いた光ファイバセンサについて, 共和技報 533, DEC.2005(2005), pp. 4109-4113.
- 斎藤崇記, 高精度 FBG センサモニタ, 電気学会計測研究会(2012), IM-12-041.
- 武田展雄, 構造ヘルスモニタリング技術の研究開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.52, No.605(2004), pp.142-148.
- 鶴戸口英善, 川田雄一, 倉西正嗣, 材料力学 上巻(1957), pp.96-104, 裳華房.
- 渡辺理, ひずみゲージとその応用 (1982), pp.63-77, 株式会社日刊工業新聞社.

References

- Daily-Kaiji Press ed., MHI Marine Engineering has developed an optical shaft horsepower meter of wireless system, Daily-Kaiji Press, 17 May(2013), p.10, Kaiji Press Co., Ltd. (in Japanese).
- Hayama,Y., Oshima,F.,Ibukuro,J.,Matsuo,A. and Hagihara,S., Evaluation of optical space transmission performance for rotary shaft using FBG optical fiber sensing, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.826 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00072.
- Hotate, K. and Murayama, H. ed., Optical fiber sensor introduction(2012), pp.105-125, the Photonic Sensing Consortium for Safety and Security(in Japanese).
- Kano, T. and Sato, K., Mining using Visual Mining Studio of the actual seas ship performance data, Proceeding of mathematical system user conference(2012), pp.5-25(in Japanese).
- Kusakabe, K., Kunugi, R. and Tsushima, K., What of shipping and shipbuilding change ?, <Series> verification EEDI <No.1>, Daily-Kaiji Press, 28 September(2011), pp.4-6, Kaiji Press Co., Ltd. (in Japanese).
- Mikami, I., Efforts of energy-saving operations in the RKK Line, Japan Marine Engineers' Association, available from <<http://www.marine-engineer.or.jp/images/2013ppt3.ppt>>(2013), pp.12-14, (accessed on 28 May, 2014)(in Japanese).
- Mita, A., Smart structures and fiber optic sensors, Proceedings of the 50th National Congress of Theoretical and Applied Mechanics(2001), pp.527-528(in Japanese).
- Nakajima, T., Self-temperature compensating strain measurement technique using FBG sensor under cyclic loaded cases, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 1555-1558 (in Japanese).
- Nemoto, I., Hirose, K., Kakuya, H., Fujishima, E. and Moriyama, K., Optical-fiber sensors using Fiber Bragg Grating, Journal of KYOWA Engineering News 533, DEC.2005 (2005), pp. 4109-4113(in Japanese).
- Saitoh,T.,High precision FBG interrogator, Proceedings of IEE workshop of Instrumentation and Mesurement, IM-12-041(2012) (in Japanese).
- Takeda, N., Research and development of structural health monitoring technology, Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.52, No. 605 (2004), pp.142-148(in Japanese).
- Udoguchi, T., Kawada, Y. and Kuranishi, M., Mechanics of material first volume (1957), pp.96-104, Shokabo(in Japanese).
- Watanabe, O.,Strain gage and it's applications (1982), pp.63-77(in Japanese).