FBG センサによる振動計測の自動車用車輪台上試験への適用

中島 富男^{*1}, 廣瀬 尚哉^{*2}, 早川 努^{*2}, 荒川 敬弘^{*3}

Application of FBG sensor for vibration measurement in wheel bench test of automobile

Tomio NAKAJIMA ^{*1}, Naoya HIROSE ^{*2}, Tsutomu HAYAKAWA ^{*2} and Takahiro ARAKAWA ^{*3}^{*1,*2,*3} IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd.^{*1,*3} Technical Research & Development Center^{*2} System Equipment Division, System & Device Department

2-6-17 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 236-0004, Japan

Received 28 January 2014

Abstract

Vibration measurements of a road-wheel were demonstrated using a fiber Bragg grating sensor (FBG sensor) and a flat-belt test machinery. Davis and Kersey's method to measure Bragg wavelength of an FBG sensor was applied in the tests. An assembled wheel of a tire and a road-wheel for an automobile was set on the machinery. When the flat-belt ran at the velocities of 10~200 km/h, the belt rotated the wheel at the velocities of the belt. The vertical load between the wheel and the belt was loaded by weights of 400 kg. An FBG sensor was attached to the back surface of the road wheel to measure radial vibrations of the wheel. The Bragg wavelength changes without the 0-Hz elements possessed almost the same waveforms against the non-dimensional time by the 1-cycle period under different velocity conditions of the flat-belt running. The waveforms show two peaks in the longer wavelength side and one peak in the shorter wavelength side in one-periods. The waveforms seem to be general in radial vibrations of wheels. The spectra of Bragg wavelength changes show the two major peak frequencies. One is the rotational first-order frequency and the other is the rotational second-order frequency. The powers of the two frequencies are almost same. The spectra also show that the FBG sensor detected wide frequency-range vibrations from 1 Hz to 1.3 kHz. These results reveal that FBG sensors are effective to measure vibrations of wheels. Moreover, the testing and evaluating techniques in the test using an FBG sensor facilitate to measure vibrations of rotating wheels.

Key words : FBG sensor, Strain measurement, Vibration measurement, Road wheel, Wheel bench test, Rotating object

1. 緒 言

近年, 光ファイバセンサの1つであるファイバ・ブラッグ・グレーティングセンサ (Fiber Bragg grating sensor: FBG sensor) が土木建築技術分野から航空宇宙技術分野まで広く利用されるようになってきている. FBG センサは温度変化とひずみの両方に感度を有するが, FBG センサを構造物に適用する場合, ひずみセンサとして使用されることが多い. 一般的な FBG センサは長さ 2~4 m の通信用シングルモード光ファイバ (Single mode fiber: SMF) の長さ方向中央部に長さ数 mm から数 10 mm にわたって構成される. よって, FBG センサの機械的な性質は SMF と同じである. SMF は石英ガラスが材料であり, 密度とヤング率は, それぞれ, 2200 kg/m³ と 72GPa 程度である. SMF のクラッド外径は 125 μ m であり, 長さ 4 m の SMF の質量は 0.1 g 程度である. また, 長さ 10 mm の FBG センサを両端固定丸棒とみなして縦振動共振周波数を概算すると 500 kHz 以上となる. このような FBG センサの機械的性質を考慮すると, FBG センサにより高速な振動・衝撃現象の計測が可能になると期待できる. 著者は

No.14-00047 [DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0241]

^{*1} 正員, (株)IHI 検査計測 研究開発センター (〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦二丁目 6-17)^{*2} (株)IHI 検査計測 機器装置事業部 システム・製品部^{*3} (株)IHI 検査計測 研究開発センター

E-mail of corresponding author: t_nakajima@iic.ihl.co.jp

FBG センサの高速ひずみ計測性を、直径 30 mm のステンレススチール製ホプキンソン棒を伝播するひずみパルスを用いて、100 kHz にいたる周波数帯域までのひずみを評価可能なことを報告している(Nakajima, 2010). また、著者らは、CFRP 短冊試験片曲げ試験において、一つの FBG センサにより、試験片のひずみと材料から発生する超音波帯域弾性波であるアコースティックエミッション (AE) を同時に計測可能であることを報告している(Nakajima, et al. 2013). さらに、著者らは、光ファイバが耐爆性に優れることを利用して、電気引火爆発の危険性から電気センサの使用が制限される液体水素雰囲気下において、30000 rpm と高速回転する軸受により励起される機構品の微小な振動計測に FBG センサを適用した結果を報告した(中島他, 2013).

光ファイバおよび FBG の細さと軽量性を利用すると、電気センサによる振動・衝撃計測に困難さを伴う運動状態の計測が可能になると期待できる. 例えば、自動車用車輪の振動計測に FBG センサを適用すると、低速～高速までの広い車輪回転速度範囲の振動計測が可能になると期待できる. そこで、著者らは、自動車用車輪台上試験機を用いて、回転する車輪のロードホイール径方向振動計測への FBG センサの適用性を調べるための実験を行い、有意と考えられる結果を得たので報告する.

車輪の回転は振動計測の困難さを伴う運動状態の 1 つであり、回転する車輪振動の実験報告は少ない. しかし、自動車や鉄道車両において、車輪はさまざまな機能を要求される重要な部品である. 主要な機能として、動力の伝達と旋回力・制動力の発生がある. 一方、車両の重さを路面やレールに伝達するため、車輪の強度は安全上、極めて重要である. さらに、車輪は振動や騒音の発生源でもある. そのため、車輪については、さまざまな観点から研究が行われている.

城戸らは、自動車用車輪の振動伝達の観点から、タイヤとロードホイールの連成振動解析方法を報告している(城戸他, 2006). 福岡らは、安全性の観点から、大型トラックの車輪を車軸に取付けるボルトの応力振幅について、車輪に実車相当垂直荷重と車輪回転位相を変化させた実験結果を報告しているが、車輪の位相変化は静的に与えられた(福岡他, 2010). 小泉らは車輪振動の観点から、タイヤ回転時の振動挙動解析と車輪台上試験における実験結果を報告している(小泉他, 2011). 小泉らの実験においては、タイヤの側面振動をレーザ振動計により計測している. Matsuzaki らはタイヤを知的構造とする研究の一環として、制動力と垂直荷重によるタイヤ内面変形をタイヤ内に配置した CCD カメラによる計測結果を報告しているが、荷重は静的に負荷している(Matsuzaki, et al., 2012). 鉄道車両用車輪振動については、村田と長倉による、車両走行中の車輪振動を圧電式加速計によって計測した報告がある(村田, 長倉, 2012). 村田と長倉の評価した周波数帯域は、100 Hz～5 kHz である.

FBG センサを自動車車輪台上試験に適用するに当たっては、二つの課題があった. 一つは回転する車輪と固定部の光ファイバの接続に関すること、もう一方の課題は、FBG センサの温度補償に関することである. それらの課題検討のため、著者は、回転する自動車車輪の回転を模擬した一定回転速度(600 rpm)で回転しながら特定位相において強制曲げ変形を受けるアルミ片もちはりのひずみを FBG センサにより計測する実験を行った(中島, 2013). 回転部と固定部間に配置された光ファイバ間の接続は、ファイバ・オプティカル・ロータリ・ジョイント(Fiber optical rotary joint: FORJ)と呼ばれる部品を用いて可能とした. FBG センサによるひずみ計測においては、一般に、温度変化の影響を取り除くための温度補償用センサが必要とされるが、著者は、ひずみによる周期的なブラッグ波長変化と周波数が異なることに着目した自己温度補償法を導入することにより、振動計測時の温度補償の容易化を図った. これらの成果は、本研究に反映させた.

本研究で実施した自動車車輪台上試験において、車輪に垂直荷重を負荷し、回転速度を 10～200 km/h まで変化した. この回転速度範囲は、公道を走行する自動車の車輪振動評価のためには十分な試験条件であると考えられる. 実験結果の評価において、FBG センサの広帯域性を活用し、周波数 0.1 Hz～5 kHz を評価帯域することを試みた. 回転する車輪の振動計測において、このような広帯域の評価は、一般的な箔ひずみゲージや圧電式加速度計とそれらの信号調節器、および、信号伝送系の仕様上困難である. しかし、本研究のための実験に使用した FBG センサと計測装置、および、FORJ に必要とした費用は、箔ひずみゲージや圧電式加速度計を利用する場合と比較して同等以下であった.

本研究において使用した FBG センサによる振動計測、および、評価手法は、箔ひずみゲージや圧電式加速度計などの電気センサの適用に困難さがあった回転中の車輪振動計測を容易にすると考えられる.

2. FBG センサとブラッグ波長の計測系について

2・1 FBG センサについて

FBG の機能を模式的に図 1 に示す。FBG は図 1(a)のように光ファイバコア軸方向に屈折率の周期的な変化を構成したものである。図 1(b), (c), および, (d)は, それぞれ, FBG に入射される広帯域, FBG 反射光, および, FBG 透過光のスペクトラムを表している。それぞれの横軸と縦軸は波長と光強度である。FBG の有効屈折率と屈折率変化の間隔 (以降, 格子間隔) をそれぞれ n_e と Λ とすると, FBG は式 (1) に示す波長 λ_B 含む狭帯域光を強く反射する。波長 λ_B はブラッグ波長と呼ばれる (Othonos and Kalli, 1999)。

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

Fig. 1 Schematic of the function of a fiber Bragg grating (FBG). (a) Schematic of periodic refractive index-change of an optical fiber core, (b) spectrum of emitted light from a broadband light source to an FBG, (c) that of reflected light from an FBG and (d) that of transmitted light of the FBG. The horizontal and vertical axes in (b), (c) and (d) are light wavelengths and optical powers, respectively.

FBG のひずみと温度が変化するとブラッグ波長 λ_B が変化する。この性質をセンサとして利用する。ひずみ $\Delta\epsilon$ と温度変化 ΔT に対するブラッグ波長変化は、一般に、式 (2) のように線形独立の関係にあるとみなされている。式 (2) において、 $\Delta\lambda_B$ はブラッグ波長変化である。 $\Delta\lambda_{B\epsilon}$ と $\Delta\lambda_{BT}$ は、それぞれ、ひずみと温度変化によるブラッグ波長変化である。 α_ϵ と α_T はブラッグ波長のひずみ感度と温度感度であり、 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ と $14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 程度である。FBG センサのひずみ感度と温度感度は一般に定数とされる。ブラッグ波長とひずみの関係について、著者らはひずみ $0 \sim 1 \%$ の範囲においてひずみ感度 α_ϵ を定数として扱える結果を報告している (Nakajima, et al., 2013)。

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{B\epsilon} + \Delta\lambda_{BT} = \alpha_\epsilon \Delta\epsilon + \alpha_T \Delta T \quad (2)$$

2・2 Davis と Kersey の手法によるブラッグ波長計測について

自動車用車輪台上試験に FBG センサを適用するにあたっては、回転するアルミ片持ちはりに適用した Davis と Kersey の手法による FBG センサ用計測装置 (中島, 2013) を使用した。試験に使用した FBG センサ用計測系ブロック図を図 2 に示す。図 2 において、光源から照射された光は光サーキュレータとファイバ・オプティカル・ロータリ・ジョイント (Fiber optical rotary joint: FORJ) と呼ばれる回転する光ファイバと固定する光ファイバを接続する機構を介して FBG センサに達する。FBG はブラッグ波長 λ_B を中心とする狭帯域光を反射する。FBG 反射光は再び FORJ を通って、光サーキュレータに戻るが、光サーキュレータは FBG センサ反射光を光源に接続された光ファイバではなく、光学フィルタに接続された光ファイバに分岐する。図 2 中の光学フィルタの透過率と反射率は波長に対して、図 3 に示すように互いに変化する特性を有する。図 3 にブラッグ波長の光強度により正規化した FBG 反射光スペクトラムを帯域の比較のため示す。光学フィルタの透過光強度と反射光強度は、それぞれ、光電変換器 PD1 と PD2 により電圧 V_T と V_R に変換され、AD 変換器を介してコンピュータにより収録される。

FBG センサのブラッグ波長が変化すると、図 3 の光学フィルタの透過率と反射率特性に従い、透過光強度と反射光強度が変化し、光電変換器出力電圧 V_T と V_R も変化する。光電変換器出力電圧 V_T と V_R を用いて無次元量 R 値を式 (3) のように定義する。図 3 の光学フィルタの透過率と反射率特性から、無次元量 R 値は、ブラッグ波長 λ_B の一価の関数である。図 4 に実験的に取得したブラッグ波長と無次元量 R 値の関係を示す。光電変換器出力電圧 V_T と V_R のサンプリング周波数は、AD 変換器の性能のみに依存し、高速なブラッグ波長計測が可能である。

Davis と Kersey の手法の高速ひずみ計測性とひずみゲージの計測精度比較について、著者は、直径 30 mm、長さ 2 m のホプキンソン棒を伝播する弾性波パルスを用いて、FBG センサとゲージ率-100 と 150 の半導体ひずみゲージにより計測し、比較を行い、100 kHz に至る周波数帯域まで一致する結果を報告している(Nakajima, 2010). さらに、著者らは、1 次曲げ共振周波数 120 Hz のアルミ製片持はりのハンマリング試験により、FBG センサとゲージ率 2 のひずみゲージによる計測結果の比較を行い、良好に一致する結果を報告している(中島他, 2013). なお、そのアルミ片持はりのハンマリング試験において、FBG センサを用いて、29 kHz の振動成分を識別可能であったことも示した。

$$R = \frac{V_R - V_T}{V_T + V_R} \quad (3)$$

Fig. 2 Block diagram of Bragg wavelength measurement method proposed by Davis and Kersey (Davis and Kersey, 1994) for a single FBG sensor with a fiber optical rotary joint (FORJ) to measure strain of a rotating object (Nakajima, 2013). The optical fibers 1 and 2 are located at the rotor and stator sides of the FORJ respectively. PD1 and PD2 are the photo-detectors, which convert the optical powers of the transmitted and reflected lights to the voltages V_T and V_R .

Fig. 3 Example of transmittance and reflectance of an optical filter illustrated in Fig. 2 and normalized spectrum of a reflected light from an FBG. The transmittance and the reflectance change against wavelength, respectively, within a bandwidth 4 nm. The bandwidth of the normalized FBG reflected light spectrum is 0.25 nm, which is narrower than the bandwidth of 4 nm.

Fig. 4 Example of relation between Bragg wavelength and R value defined as eq. (3) and normalized spectrum of a reflected light from an FBG. The relation between Bragg wavelength and R value was obtained experimentally by measuring Bragg wavelength, V_T and V_R coincidentally under loading strain to an FBG.

3. FBG センサによる振動計測の自動車車輪台上試験への適用

3・1 試験

自動車車輪をフラットベルト試験装置(廣瀬, 2010)という台上試験装置により回転させたとき, ロードホイール径方向に生じる振動を FBG センサにより計測した.

試験形態を図 5 に示す. 試験実施状況を図 6 に示す. 図 5 において, 自動車用車輪 (タイヤとロードホイール) を治具に取り付け, 回転可能な状態とし, 車輪と治具を金属製のベルト (以下, フラットベルト: Flat-belt) 上に載せた. 使用したタイヤとロードホイールのサイズは, それぞれ, 225/60R17 および 17×6.5JJ である (動半径 345 mm). 治具の上に錘を置き車輪とフラットベルト間に垂直荷重を負荷した. フラットベルトは, 図 5 に示すローラ 1 とローラ 2 により張力が与えられて巻かれている. ローラ 1 を回転させると, フラットベルトが移動しタイヤが回転する.

FBG センサをロードホイールディスク部裏面に, 車輪径方向のひずみを計測できるように, シアノアクリレート系接着剤を用いて接着した. FBG センサの接着状況を図 7 に示す. 使用した FBG センサのブラッグ波長と FBG 長は, それぞれ, 1550 nm と 10mm である. 図 5 に示す治具の裏面固定部に FORJ を置き, FBG センサを含む光ファイバ 1 は車輪中心軸に設けた穴を通して, FORJ の回転子側に接続した. FORJ の固定子側には, 計測装置からの光ファイバ 2 を接続した.

Fig. 5 Schematic of a wheel test on the flat-belt test machinery. The optical fiber 1 connected to the FBG sensor was set through the hole at the center axis of the wheel. The optical fiber 1 rotated with the wheel. The optical fibers 1 and 2 were connected using a fiber optical rotary joint (FORJ) at the back of the jig. The optical fiber 2 was connected to the measurement apparatus for an FBG sensor illustrated in Fig. 2.

Fig. 6 Test set-up for the wheel using the flat-belt test machinery. The machinery consisted of the flat-belt, the roller 1 connected to an electric motor, the roller 2, the jig equipped with a hub and a bearing for a wheel and the weight to apply a vertical load between the wheel and the belt. The vertical load was supported by an air bearing under the belt. The flat-belt made of steel was wound on the rollers 1 and 2, and was tensed by the rollers. The wheel was assembled from a tire and a road wheel of which sizes were 225/65R17 and 17×6.5JJ, respectively. When the belt ran according to the rotation of the roller 1, the wheel rotated at the velocity of the running belt.

Fig 7 Appearance of the attached FBG sensor on the back surface of the road-wheel. The red inked optical fiber was the FBG sensor. The direction of measuring vibration was radial. The Bragg wavelength and the grating length were 1550 nm and 10 mm, respectively.

3・2 試験条件および計測条件

試験条件を表 1 に示す. 質量 400 kg の錘を用いて車輪に垂直荷重を負荷し, フラットベルト速度を変化させた. FBG センサのブラッグ波長計測には § 2・2 に示した Davis と Kersey の手法を適用した(Davis and Kersey, 1994), (中島, 2013). ブラッグ波長をサンプリング周波数 10 kHz として収録した.

Table 1 Flat-belt running test conditions. The tests were conducted to investigate the effects of rotational velocities of the wheel, when the weight was 400kg.

Test	Flat-belt constant velocity (km/h)	Weight (kg)	All test duration (s)	Flat-belt constant velocity running time (s)
1	10	400	390	40~350
2	20	400	430	80~370
3	30	400	520	120~430
4	60	400	540	150~460
5	90	400	440	230~380
6	120	400	730	290~600
7	200	400	1500	810~1120

4. ブラッグ波長変化の抽出

4・1 ブラッグ波長変化の抽出方法

一般に, 計測したブラッグ波長信号列 $\lambda_B(n)$ から, ひずみ, または, 温度変化に比例するブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_B(n)$ は, ある特定した時刻のブラッグ波長を $\lambda_{B0} [= \lambda_B(0)]$ として, ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_B(n) = [\lambda_B(n) - \lambda_{B0}]$ として求められる. しかし, 本論文においては, ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_B(n)$ について, 離散フーリエ変換したとき, 0 Hz の成分となる静的ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_{BS}(n)$ と, 0 Hz 以外の成分となる動的ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_{BD}(n)$ に区別する. すなわち, 式 (4) である. 記号 n はブラッグ波長信号の配列指標である.

$$\lambda_B(n) = \lambda_{B0} + \Delta\lambda_B(n) = \lambda_{B0} + \Delta\lambda_{BS}(n) + \Delta\lambda_{BD}(n) \quad (4)$$

式 (4) に対して, 動的ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_{BD}(n)$ は, ブラッグ波長 $\lambda_B(n)$ の移動平均値 $\langle\lambda_B(n)\rangle$ を用いて, 式 (5) のように考えることが可能である. なお, 式 (5) は, ブラッグ波長信号列 $\lambda_B(n)$ へのデジタルハイパスフィルタ処理であることは自明である.

$$\Delta\lambda_{BD}(n) \approx \lambda_B(n) - \langle\lambda_B(n)\rangle \quad (5)$$

Fig. 9 History of the moving averaged Bragg wavelength $\langle \lambda_B(n) \rangle$ of Test 1. The adopted moving averaging data length s of 200001 is corresponding to the cut off frequency of 0.05 Hz. The vibrating element of Bragg wavelength $\lambda_B(n)$ in Fig. 8 is attenuated by the moving averaging within the time of the flat-belt velocity running at 10 km/h of constant.

Fig. 10 Histories of the moving averaged Bragg wavelength $\langle \lambda_B(n) \rangle$ and first-peak frequency of dynamic Bragg wavelength change $\Delta \lambda_{BD}(n)$ of Test 7. The adopted moving averaging data lengths condition is same in the case of Fig.9. The change of $\langle \lambda_B(n) \rangle$ in the case of test 7 is larger than that in the case of test 1 as shown in Fig. 9. Meanwhile, the history of 1st peak frequency varies from 0 to 25 Hz, which corresponds with the running velocity of the flat-belt and the rotational velocity of the wheel.

図 11(a)および(b)に試験時間 500 s と 1000s の場合の、ブラッグ波長 $\lambda_B(n)$ 、移動平均値 $\langle \lambda_B(n) \rangle$ 、および、動的ブラッグ波長変化 $\Delta \lambda_{BD}(n)$ を示す。線の色は、図 8 と同じである。図 11(a), および, (b)ともに、ブラッグ波長 $\lambda_B(n)$ と動的ブラッグ波長変化 $\Delta \lambda_{BD}(n)$ は振動的である。一方、移動平均値 $\langle \lambda_B(n) \rangle$ は共に、それぞれの試験時間において、一定である。しかし、移動平均値 $\langle \lambda_B(n) \rangle$ は図 11(a)から(b)にかけて、長波長側に遷移している。

図 10 の 0~1500 s にわたる移動平均値 $\langle \lambda_B(n) \rangle$ の変化と図 11 の動的ブラッグ波長変化 $\Delta \lambda_{BD}(n)$ の変化は、それぞれ、振幅も周波数も異なっており、異なる要因によるブラッグ波長変化と考えられる。図 6 に示すフラットベルト試験装置を用いた車輪転動試験においては、車輪に負荷された垂直荷重と、車輪とフラットベルト間の摩擦力を考慮する必要がある。前者は車輪の転動速度に対応した振動的なひずみによるブラッグ波長変化を発生させ、後者は、摩擦熱によるゆっくりとした温度変化に伴うブラッグ波長変化を生じさせたとみなすことが、図 10 と図 11 の評価として妥当と考えられる。

(a) Test time at 500 s

(b) Test time at 1000 s

Fig. 11 Waveforms of Bragg wavelength $\lambda_B(n)$ (blue), moving averaged Bragg wavelength $\langle \lambda_B(n) \rangle$ (red) and dynamic Bragg wavelength change $\Delta\lambda_{BD}(n)$ (black) derived by eq. (5) in the case of Test 7 at 500 s (a) and 1000 s (b). The amplifications of the dynamic Bragg wavelength change $\Delta\lambda_{BD}(n)$ at 500s and 1000 s are almost same. However, averaged Bragg wavelengths are different in the cases of 500s and 1000 s each other, which corresponds with the change of $\langle \lambda_B(n) \rangle$ shown in Fig. 10.

4・4 転動速度が異なる場合の動的ブラッグ波長変化の比較

4・2, および, 4・3 節において試験 1 と 7 に適用した動的ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_{BD}(n)$ の抽出条件 (カットオフ周波数 0.05 Hz, 移動平均データ点数 200001 点) を試験 4 と 6 にも適用し, 試験 1 と 7 の波形と比較した結果を, 試験条件それぞれの 1.5 波長分の波形として図 12 に示す. 比較のため, 横軸の時間は各試験条件の 1 周期を 2π とする正規化時間としている. 試験 1, 4, 6, および, 7 の 1 周期はそれぞれ, 0.75 s, 0.13 s, 0.06 s, および, 0.04 s である.

図 12 の 4 条件の波形は, ほぼ重なっており, それぞれ, 1 周期中に長波長側に 2 つの山と短波長側に 1 つの谷がある. ブラッグ波長の長波長側および短波長側への変化は, それぞれ, 引張ひずみと圧縮ひずみに対応している. これは, 転動中のロードホイールに図 13 に示す位相 A~D の変形が生じているためと考えられる.

- (1) 位相 A の状態: ロードホイールの FBG センサ接着部は, 錘の荷重をフラットベルトに伝えて, 圧縮ひずみが生じる (図 12 の短波長側の谷 A).
- (2) 位相 B の状態: ロードホイールが位相 A から角度 $\pi/2$ 回転した状態であり, このとき, ロードホイールの FBG センサ接着部は引張ひずみの状態となる (図 12 の長波長側の山 B).
- (3) 位相 C の状態: 位相 B からロードホイールが角度 $\pi/2$ 回転すると, ロードホイールの FBG センサ接着部は無荷重状態となり, ひずみが 0 となる. (図 12 の C の位置).
- (4) 位相 D 状態: 図 11 位相 C からロードホイールが角度 $\pi/2$ 回転すると, 再び引張ひずみの状態となる (図 12 の D の位置).

上記, 図 12 と図 13 の FBG センサ位相によるひずみの向き of 妥当性の検討を, 石原と川嶋の, 鋼製ロードホイールへの垂直荷重による応力解析の報告 (石原, 川嶋, 1989) との対比により試みる. 石原と川嶋は, 鋼製ロードホイールは, 垂直荷重により, ロードホイールは上下方向を短軸, 前後方向を長軸とする楕円状の変形が生じるとしている. さらに, 上下方向短軸の変位は, ロードホイール下部 (荷重負荷側) が大きく, ロードホイール上部の方が小さいとしている. 石原と川嶋の解析結果は, 図 12 に関する図 13 の位相の関係と定性的に一致すると考えられる. すなわち, 図 13 の位相 A と C の場合, FBG センサ計測方向が楕円短軸側となり, 圧縮ひずみが生じる. 位相 A は圧縮ひずみとなっていることは明白である. 一方, 位相 C の場合, 図 12 において, 動的ブラッグ波長変化 $\Delta\lambda_{BD}(n)$ の極値は, わずかであるが, 圧縮ひずみが生じている (図 12 矢示 E). 一方, 位相 B と D の場合, FBG センサ計測方向は, 楕円長軸側となり, FBG センサ接着部は引張ひずみとなっている.

Fig. 12 Waveforms of dynamic Bragg wavelength change $\Delta\lambda_{BD}(n)$ in Test 1 (black), 4 (red), 6 (blue) and 7 (green). The horizontal axis is the normalized time by each period. One period is non-dimensioned as 2π . The period of Test 1, 4, 6 and 7 are 0.75s, 0.13 s, 0.06 s and 0.04 s, respectively. The waveforms show two peaks in the longer wavelength side and one peak in the shorter wavelength side in each one-period. A, B, C and D are corresponding to the phases illustrated in Fig. 13.

Fig. 13 Schematics of the phases of the wheel. Phases A, B, C and D are at the bottom, the back, the top and the front, respectively, for the positions of the FBG sensor against the rotational axis.

5. 車輪転動時ブラッグ波長変化の周波数解析

試験 1～7 のフラットベルト一定速度とした全時間のブラッグ波長 $\lambda_B(n)$ を周波数分解 $df=0.1$ Hz として周波数解析を行った。試験 1, 4, 6 および 7 の周波数解析結果を図 14(a)～(d)に示す。図 14(a)～(d)には, Peak A, および, B として矢示した, パワーが同等な大きな 2 つのピークがある。Peak A と B 以外の周波数にも多くのピークがある。10 番目のピーク周波数を Peak C として矢示した。さらに, 各試験条件の第 11 番目以上の最大パワー周波数とノイズレベル以上の識別可能な最大ピーク周波数を, それぞれ, Peak D と E として, 図 14(a)～(d)に矢示した。図 14 から以下の知見が得られる。

- (1) 第 1～10 ピーク周波数について：第 1～10 ピーク周波数のフラットベルト移動速度に対する変化を図 15 に示す。図 15 にはフラットベルト移動速度をタイヤ動半径規格値 345 mm としたときの転動 1 次～10 次周波数計算値を線として示した。図 15 において, 第 1～10 ピーク周波数は, 車輪転動 1 次から 10 次の周波数に良く一致している。さらに,

- ① Peak A と B について：Peak A と B は車輪転動 1 次と 2 次の振動である。Peak A と B のパワーが同等である理由は, 図 12 において, 車輪転動 1 周期中にブラッグ波長変化の長波長側の山が 2 回あるためと考えられる。
- ② 試験 7 のピーク周波数の計算値とのズレについて：図 15 において, 試験 7 の第 1～10 ピーク周波数が, 転動次数周波数計算値よりも小さい。フラットベルト移動速度 200 km/h の場合の転動 1 次周波数計算値は 25.6 Hz であるが, 図 14(d)の Peak A の周波数は 24.8 Hz であり, フラットベルト移動速度 194 km/h に相当する。これは, 3%のズレである。図 15 において, 試験 7 のフラ

ット移動ベルト速度を 194 km/h とした場合を三角の凡例としてプロットした。この結果は、計算値の直線と良く一致する。これは、図 10 において、フラットベルト移動速度が一定時間中に、第 1 ピーク周波数が、わずかに変化していることに対応する。

- (2) 高周波数側のノイズレベルについて：図 14(a)～(d)の数 100 Hz～5 kHz の高周波数側ノイズレベルは、4 つの試験条件とも $7 \times 10^{-9} \text{ nm}^2/0.1\text{Hz}$ 以下と一定である。このような高周波数側のノイズレベルは FBG センサによる振動計測時の特徴であり、著者は、他の実験においても同様なノイズの状態を示している(中島他, 2013)。
- (3) Peak D と E について：Peak D と E の周波数の Peak A の周波数に対する係数を表 2 に示す。Peak D と E も車輪転動 1 次周波数のほぼ整数倍となっており、高次成分と考えられる。
- (4) FBG センサによる評価可能周波数帯域について：図 14(a) Peak A～図 14(d) Peak E まで、すなわち、1.3 ～1291.9 Hz の周波数帯域の振動を FBG センサにより評価可能である。

(a) Test 1: 10 km/h and 400kg weight

(b) Test 4: 60 km/h and 400kg weight

(c) Test 6: 120 km/h and 400kg weight

(d) Test 7: 200 km/h and 400kg weight

Fig. 14 Power spectrum densities of Bragg wavelength of Test 1, 4, 6 and 7 under the constant velocity conditions of the flat-belt.

The spectra show two major peaks marked as Peaks A and B. Peaks C are the 10th peak frequencies. Peaks D are the peak frequencies of the maximum power over the 10th peaks. Peaks E are the recognizable highest peak frequencies over the noise levels of $7 \times 10^{-9} \text{ nm}^2/0.1 \text{ Hz}$.

Fig. 15 Relation between peak frequencies up to 10th peak and flat-belt velocities. The calculated rotational order frequencies lines are also drawn. The measured peak frequencies up to 10th peak are well corresponding to the rotational order frequencies of the wheel, respectively.

Table 2 Frequencies of Peaks D and E in Fig. 14(a)~(d). Frequencies of Peaks D and E are regarded as very high order frequencies of the wheel rotations from the coefficients divided by frequencies of Peaks A. The FBG sensor detected very wide frequency-range vibrations from about 1Hz (Test 1 Peak A) to 1.3 kHz (Test7 Peak E).

Test No.	1	4	6	7
1st peak freq. (Peak A) (Hz)	1.3	7.8	15.5	24.8
Max power peak freq. over 10th peak (Peak D) (Hz)	39.2	281.2	279.9	347.3
Recognizable highest peak freq. (Peak E) (Hz)	136.3	546.7	760.5	1291.9
Coefficient of Peak D freq. divided by Peak A freq.	30.2	36.1	18.1	14.0
Coefficient of Peak E freq. divided by Peak A freq.	104.8	70.1	49.1	52.1

6. 結 言

自動車用車輪台上試験時のロードホイール径方向振動計測に FBG センサの適用を試みた。FBG センサの広帯域性を活用し、0.1 Hz~5 kHz までを評価対象周波数とした。ロードホイール転動 1 周期の動的ブラッグ波長変化波形は長波長側に 2 つの山と、短波長側に 1 つの谷を有し、転動速度を変えても同様であり、かつ、車輪転動 1 次と 2 次周波数成分が同等のパワーを有した。この振動は、自動車用ロードホイールに限らず、車輪径方向の振動として一般的なものと考えられる。また、ブラッグ波長の周波数解析結果には、約 1 Hz~1.3 kHz の周波数帯域の範囲に、多くのピーク周波数が現れたが、それらは、車輪転動の高次振動とみなすことができた。

本論文に用いた FBG センサの計測および評価手法は、車輪の振動計測に適しており、かつ、転動中にも適用可能であるため、車輪振動計測を容易にすることに寄与できると考える。

文 献

- Davis, M. A. and Kersey, A. D., All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler, *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 1 (1994), pp.75-77.
- 福岡俊道, 野村昌孝, 上平貴弘, 北野堅祐, 実機転用試験装置による大型車両ホイールボルトの応力振幅の評価, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 76, No. 772 (2010), pp.3768-3775.
- 廣瀬尚哉, タイヤ試験装置, 凸凹模擬方法, 外側ベルト, 特開 2010-054316 (2010).
- 石原広一郎, 川嶋寿一, 自動車用鋼製ホイールの半径方向荷重下の応力解析, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 55, No. 513 (1989), pp. 1254-1258.
- 城戸一郎, 上山さざり, 末岡淳男, 2 つの分系が強く連成する振動系の解析法 (第 2 法, 自動車のタイヤとホイールへの適用), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 72, No. 715 (2006), pp.735-742.

- 小泉孝之, 辻内伸好, 松原真己, 松山幸司, 相川将隆, 大島裕子, 回転効果に着目したタイヤ転動時における振動解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 777 (2011), pp.2018-2029.
- Matsuzaki, R., Hiraoka, N., Todoroki A. and Mizutani, Y., Strain monitoring and applied load estimation for development of intelligent tires using a single wireless CCD camera, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 6, No. 9 (2012), pp.935-949.
- 村田香, 長倉清, 走行する鉄道車両の車輪振動特性, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 974-978.
- Nakajima, T., Frequency characteristic evaluation of FBG sensor using a Hopkinson's bar, Proceeding of European Workshop on Structural Health Monitoring 2010 (2010), pp.1313-1318.
- Nakajima, T., Sato, E., Tsuda, H, Sato, A. and Kawai, N., Development of simultaneous measurement system for strain and AE using FBG sensors for structural health monitoring of solid rocket motor composite chambers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 7, No. 2 (2013), pp.324-339.
- 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, Vol. 79, No. 803 (2013), pp.1054-1064.
- 中島富男, 繰返し荷重を受ける場合の FBG センサを用いたひずみ計測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.1555-1570.
- Othonos, A. and Kalli, K., Fiber Bragg Grating (1999), p.92, Artech house.

References

- Davis, M. A. and Kersey, A. D., All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler, Electronics Letters, Vol. 30, No. 1 (1994), pp. 75-77.
- Fukuoka, T., Nomura, M., Kamihira, T., Kitano, K., Evaluation of the amplitude of wheel bolts for large vehicles by full-scale test, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, No. 76, Vol. 772 (2010), pp.3768-3775 (in Japanese).
- Hirose, N., TIRE, TESTER, ROAD SURFACE IRREGULARITY SIMULATION METHOD, OUTER BELT, Japanese patent disclosure 2010-054316 (2010) (in Japanese).
- Ishihara, K. and Kawashima, H., Stress evaluation of automobile steel road wheel under radial load, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, No. 55, Vol. 513 (1989), pp.1254-1258 (in Japanese).
- Kido, I., Ueyama, S. and Sueoka, A., Analytical approach for strongly coupled vibration system composed of two substructures (2nd report, application of analytical approach to vibration of tire and wheel on vehicle), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 72, No. 715 (2006), pp. 735-742 (in Japanese).
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N., Matsubara, M., Matsuyama, K., Aikawa, M. and Oshima, H., Vibration behavior analysis of rolling tire on effect of rotation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 77, No. 777 (2011), pp. 2018-2028 (in Japanese).
- Matsuzaki, R., Hiraoka, N., Todoroki, A. and Mizutani, Y., Strain monitoring and applied load estimation for development of intelligent tires using a single wireless CCD camera, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 6, No. 9 (2012), pp. 935-949.
- Murata, K. and Nagaoka, K., Vibration characteristic of a wheel of a running railway vehicle, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 974-978 (in Japanese).
- Nakajima, T., Frequency characteristic evaluation of FBG sensor using a Hopkinson's bar, Proceeding of European Workshop on Structural Health Monitoring 2010 (2010), pp.1313-1318.
- Nakajima, T., Sato, E., Tsuda, H, Sato, A. and Kawai, N., Development of simultaneous measurement system for strain and AE using FBG sensors for structural health monitoring of solid rocket motor composite chambers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 7, No. 2 (2013), pp. 324-339.
- Nakajima, T., Takada, S., Sato, E., Tsuda, E., Sato, A., Vibration measurement of an mechanical element in liquid hydrogen using an FBG Sensor, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 79, No. 803 (2013), pp. 1054-1064 (in Japanese).
- Nakajima, T., Self-temperature compensating strain measurement technique using an FBG sensor under cyclic loaded cases, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 79, No. 807 (2013), pp.1555-1570 (in Japanese).
- Othonos, A. and Kalli, K., Fiber Bragg Grating (1999), pp.95-96, Artech house.