

FBGセンサによるフラットベルト上の ロードホイール回転時の高速動ひずみ計測

荒川 敬弘 * 中島 富男 **
Takahiro Arakawa Tomio Nakajima

著者らは、光ファイバセンサの一つである FBG (Fiber Bragg Grating) センサからの反射光を光学フィルタに通し、透過光と反射光の光強度を電圧に変換してひずみを計測する方式が、高速動ひずみの計測に優れ、また回転物に FBG センサを取り付け、光ファイバ・ロータリジョイント (Fiber Optical Rotary Joint = FORJ) を介して光信号を外部に取り出すことにより回転物の高速動ひずみを監視できることを既に報告している⁽¹⁾。今回、自動車用のロードホイールのディスク部およびリム部に FBG センサを取り付け、路上走行を模擬したフラットベルト上でタイヤを時速 200km までの速度で回転させたときの動ひずみを低雑音で計測できたので報告する。このとき取得したひずみ波形は低速回転から高速回転まで相似であり、周波数解析結果より回転次数成分はロードホイールの回転数増加につれて、高周波数側へ移動するだけで、雑音によるスペクトルの劣化はなかった。また、高速回転時には、100kHz 以上の高い周波数帯域にロードホイールの弾性変形に伴う共振と考えられるピークも観察された。

キーワード：FBG センサ、動ひずみ、光学、ひずみ計測、ロードホイール、フラットベルト

1. はじめに

近年、各種の光ファイバを用いたひずみや変位などの計測システムが提案され、さらなる実用化に向けて着々と研究が進められている。著者らは FBG センサからの反射光を透過光ポートと反射光ポートを有する光学フィルタに通し、各々のポートの光強度を電圧に変換する産総研 (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) 殿が提案されている方式が、高速動ひずみの計測に優れており、かつ比較的コンパクト

なシステムで耐衝撃にも優れた長所を持つと考え、産総研との共同研究を通して、この特長を生かした適用開発に取り組んできた。この度、当社が開発したフラットベルト上を高速で回転する自動車のロードホイールに発生するひずみをリアルタイムに計測することができたので報告する。

フラットベルトとは、路上での走行状態をより忠実に再現するために、路面に近いフラットなベルトを回転させる装置である。なお、輪荷重 (車輪の荷重が一点に作用する場合の荷重) を模擬して、10kN までの垂直荷重をタイヤに負荷するこ

* フェロー 工学博士

** 研究開発センター

とが可能である。このとき、フラットベルトの平坦さはエアベアリングにより維持している。ロードホイールに発生する動ひずみを時速 200km の高速条件において低雑音で計測できた。取得したひずみ信号の周波数解析によりタイヤの回転高次成分およびロードホイールの弾性共振と思われる信号を計測することができた。

2. 計測システム

FBG (Fiber Bragg Grating) とは、光ファイバコアの軸線の屈折率を周期的に変化させ、一次元のブラッグ回折格子を形成させたものである。図 1 に FBG の構造を模式的に示す。この FBG からの反射光は、FBG 部の有効屈折角とブラッグ格子間隔により決まる特定の波長のみの光となる。この波長をブラッグ波長と呼ぶ。FBG にひずみが加わってブラッグ格子間隔が変化すると、FBG からの反射光の波長が変化する。この性質をセンサとして利用する。FBG 反射光の波長の計測には、光スペクトルアナライザがよく用いられているが、光スペクトルアナライザは回転機構を有する回折格子とミラーを組合せて波長ごとの光強度を測定するため、掃引時間に数秒を要することがあり、高速での動ひずみの計測は不可能である。

高速の動ひずみの計測を可能にするために、光学フィルタを用いている。図 2 に示すように、FBG センサからの反射光は、光サーキュレータを介して WDM フィルタと呼ばれる光学フィルタに導かれる。

WDM (Wavelength Division Multiplexing 波長分割多重) 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ものである。図 3 に使用した WDM フィルタの特性を示しているが、短波長帯域 I と長波長帯域 III の間に、透過率と反射率が順次変化する遷移領域 II が存在する。FBG センサで変化するブ

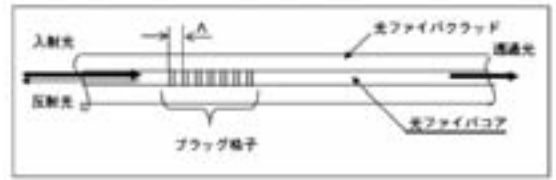


図 1 FBG センサの構造の模式図

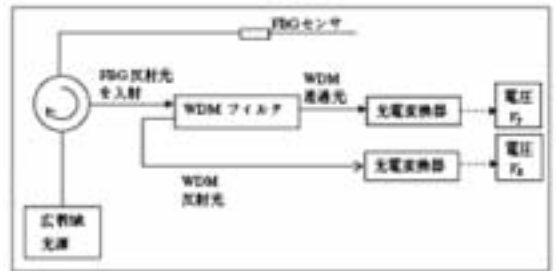


図 2 WDM フィルタを用いた FBG センサ計測システムの構成図

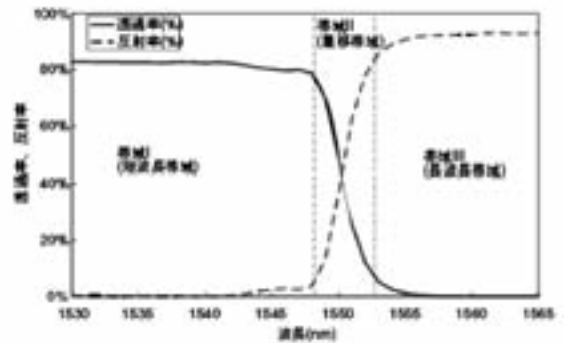


図 3 WDM フィルタの特性

ラッグ波長をこの遷移領域 II を利用して推定することが可能である。

予め、FBG センサからの反射光の波長が、WDM フィルタの遷移領域 II の波長範囲に位置するようにしておくと、FBG センサにひずみが負荷されブラッグ波長が変化すると、WDM フィル

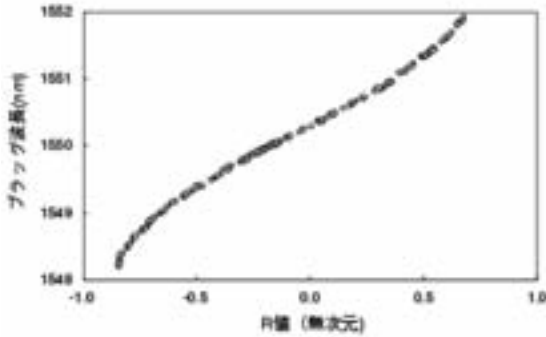


図4 無次元量 R 値と波長の関係

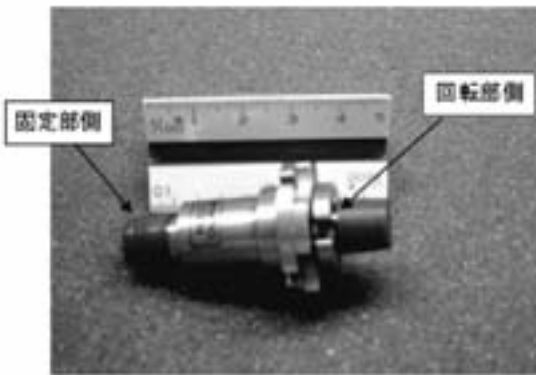


図5 光ファイバ・ロータリジョイント (Fiber Optical Rotary Joint = FORJ) の外観

タを透過した反射光と透過光の光強度は変化する。WDM フィルタを通過した透過光と反射光を光電変換器に接続して、光強度を電圧信号 V_T と V_R に変換する。この電圧信号 V_T と V_R から次式に示す無次元量 R 値を定義している。

$$R = (V_R - V_T) / (V_R + V_T) \dots (1)$$

この R 値と波長の関係を予め測定しておけば、計測した R 値より FBG センサからの反射光の波長を推定することができる。図4に測定した R 値と波長の関係を示す。

先に述べた、光スペクトルアナライザを用いて

波長を測定する方式に比べて、本方法は間接的ではあるが、光電変換器で変換した電圧により測定するもので、高速の動ひずみの計測が可能であり、また、システムがコンパクトに構成でき、衝撃性に強い特徴が得られている。同一の光ファイバで複数の箇所のひずみを同時計測する場合には、ブラッグ波長の異なる複数の FBG センサを直列に繋ぎ、それぞれの反射光の波長に対して波長遷移領域Ⅱを有する複数の WDM フィルタを組み合わせることによりそれぞれの箇所のひずみを分離できる。

回転物に FBG センサを取り付けて回転物に発生するひずみを監視するには、光信号を回転物から外部に取り出す仕組みが必要となる。ここでは光ファイバ・ロータリジョイント (Fiber Optical Rotary Joint = FORJ) (図5) を用いた。すなわち、ロードホイールの回転と共に回転する軸と、固定した軸との軸心を通して光信号の伝達を行っている。

なお、FBG センサからの反射光の波長は、FBG センサに加わるひずみの他にも、温度による光ファイバの屈折率の変化にも強い影響を受ける。通常はひずみの加わらない状態の FBG センサをダミーに用いて温度の影響を測定し、これにより補正を行うのが一般的である。回転体の測定を行う本試験においては、回転体のひずみ変動は周期的な変化を示すのに対し、温度による変化は連続した変化と予測されるので、これを分離するアルゴリズムを用いて補正している。すなわち、ダミーの FBG センサを設置することなしに、コンピューター上のソフトにより補正している。

3. ロードホイールの高速動ひずみ計測

3.1 試験方法

図6に示すように、ロードホイールのディスク部の中央部とより車軸に近い側の2箇所および

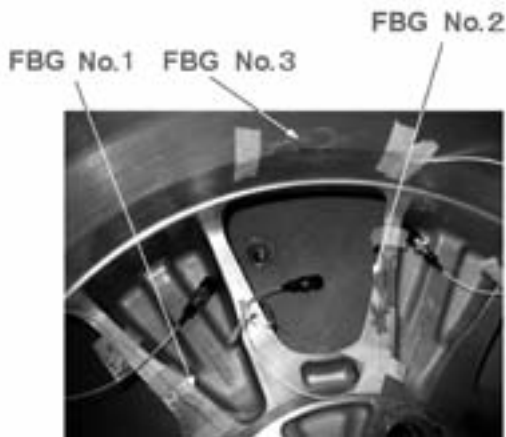


図6 ロードホイールへの
FBG センサ取り付けの様子



図7 フラットベルト上での
ロードホイールのひずみ計測の様子

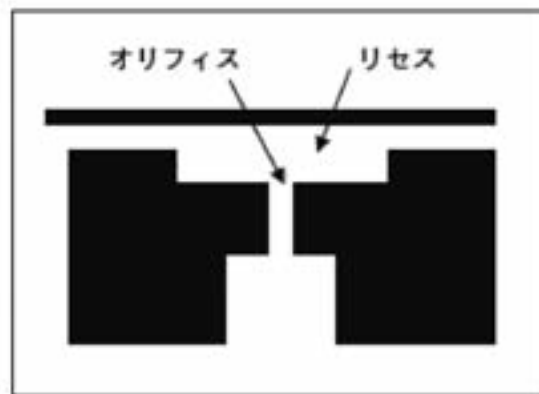


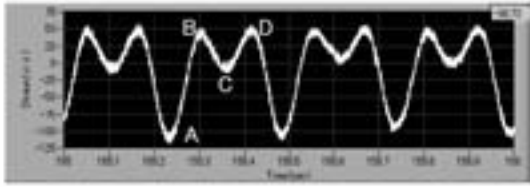
図8 エアベアリングの構造の模式図

リム部に1箇所FBGセンサを取り付け、それぞれ半径方向及び周方向の動ひずみを計測した。用いたFBGセンサは、無ひずみ（常温）での反射波長が1550nm、半値幅0.2nmである。FBGセンサよりの光信号は、軸心部に取り付けた光ファイバ・ロータリジョイント（公称回転数：2000rpm以下）を介して外部に取り出した。

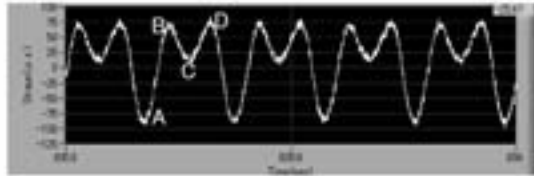
測定は、図7に示すように、フラットベルト上のロードホイールに垂直荷重4kNを負荷して、フラットベルトの速度を変化させ、一般道路での走行を模擬して試験した。なお、フラットベルト

は、ベルトを回転させる機構（速度可変）を持つとともに、タイヤより負荷される垂直荷重をエアベアリングで支持しベルトをゆがませることなく、道路上での走行を模擬するためにフラットの状態を維持する機構を有している。図8にエアベアリングの構造を模式的に示しているが、オリフィスより高圧の空気を噴出させて、ベルトのフラットな状態を維持させている⁽²⁾。

なお、用いたタイヤは、225/60R17、ロードホイールは17×6.5JJ 5穴 PCD114 オフセット35 ハブ径60のものである。試験は時速200kmま

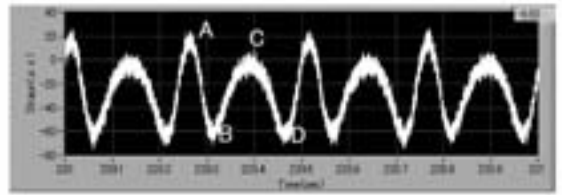


(a) 時速 30km 走行におけるディスク部の 1 秒間のひずみ履歴



(b) 時速 200km 走行におけるディスク部の 0.2 秒間のひずみ履歴

図 9 時速 30km 及び 200km 走行時の
ロードホイールディスク部のひずみ履歴



(a) 時速 30km 走行におけるリム部の 1 秒間のひずみ履歴

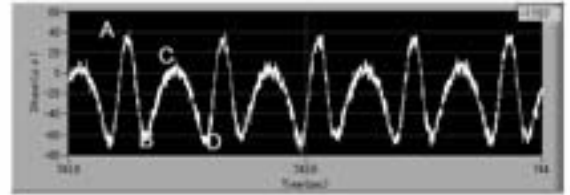
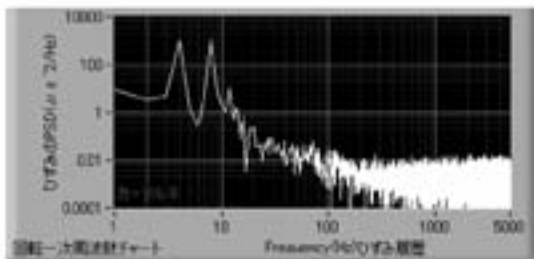
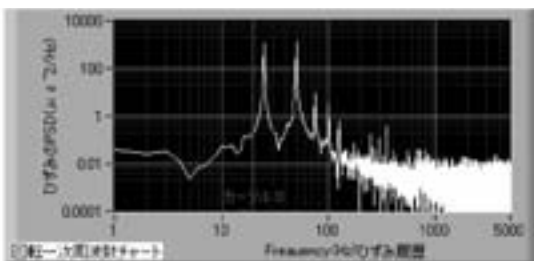


図 11 時速 30km 及び 200km 走行時の
ロードホイールリム部のひずみ履歴

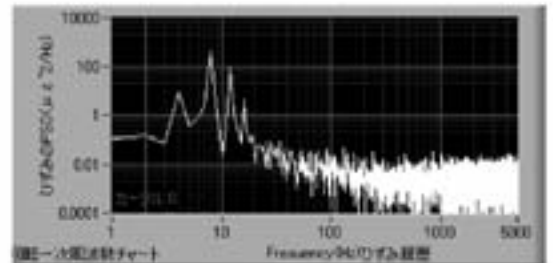


(a) 時速 30km 走行におけるひずみ履歴の周波数解析結果

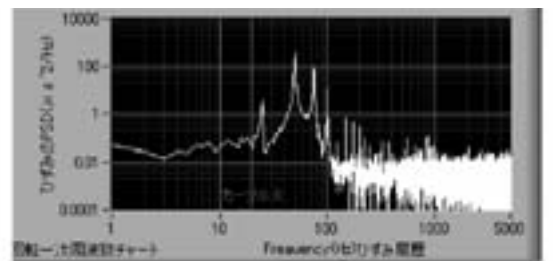


(b) 時速 200km 走行におけるひずみ履歴の周波数解析結果

図 10 時速 30km 及び 200km 走行時のロード
ホイールディスク部のひずみ履歴の周波数解析結果



(a) 時速 30km 走行におけるひずみ履歴の周波数解析結果



(b) 時速 200km 走行におけるひずみ履歴の周波数解析結果

図 12 時速 30km 及び 200km 走行時のロードホイール
ディスク部のひずみ履歴の周波数解析結果

でを模擬して行ったが、時速 30km 時のロードホイールの回転数は 240rpm に、時速 200km では 1500rpm の回転数に相当した。

3.2 試験結果及び考察

図 9 に、ロードホイールのディスク部中央に取り付けた FBG センサによる半径方向のひずみを計測したときのひずみ波形を示している。(a) 図は時速 30km における計測結果であり、1 秒間の横軸の間隔に周期的に 4 つの波形が現れており、4Hz のサイクルで 240rpm のホイールの回転数に一致している。(b) 図は時速 200km での計測結果で、0.2 秒間に周期的に 5 波形があり、25Hz、つまり 1500rpm に相当する。

1 周期におけるひずみ波形の傾向は、時速 30km と時速 200km で大差なく、A 点における最大の圧縮ひずみを受け、B 点で最大の引張ひずみに変わり、C 点のほぼ無ひずみ状態を経て、D 点の再度最大の引張ひずみに変化しているのがわかる。A 点においては、FBG センサを取り付けたディスクの位置が、車軸とフラットベルトとの接地点との間に位置して最大の圧縮ひずみを受けている。逆に C 点では、ホイールが 180 度回転した状態での計測で、無負荷状態になっている。これに対して ± 90 度回転した位置では逆に引張のひずみを受けているのがわかる。

なお、時速 30km の計測に対して、時速 200km 計測の場合に、最大の圧縮ひずみはやや小さめの値になるのに対し、最大の引張ひずみは、時速 30km の場合は約 $50\mu\epsilon$ に対し、時速 200km では約 $75\mu\epsilon$ と大きくなっているのも観察されている。

一方、得られたひずみサイクルの周波数解析結果を図 10 に示している。それぞれ回転一次の周波数は、時速 30km 試験では 4Hz に、時速 200km 試験では 25Hz に現れており、それぞれ二次、三次と回転高次成分も観察されている。一方、時速

200km 試験においては、時速 30km 試験では観察されなかった 100Hz ~ 450Hz の周波数のピークが観察されている。これらは、ロードホイールの弾性変形に伴う共振と考えられる。100Hz から 400Hz の周波数帯域は、高速走行時に車室内騒音の原因となるロードノイズの周波数帯域に相当する。本計測手法は、ロードホイールを伝達系とする車両の振動・騒音試験に適用できる可能性を示すものと考えられる。ここで示した結果より、光学フィルタを用いた FBG センサによるひずみ計測システムは高速での動ひずみ解析に有効な手段と考えられる。

なお、ディスク部でよりリム部側に取り付けた FBG センサの計測では、ひずみ値は小さいが、中央部とほぼ同様の傾向が得られている。

図 11 に、ロードホイールのリム部に取り付けた FBG センサにより周方向のひずみを計測したときのひずみ履歴を示している。FBG センサがフラットベルトとの接地点に位置すると考えられる A 点において、最大の引張ひずみが計測されており、FBG センサが上方に位置して荷重の影響を受けない C 点において無ひずみ状態となることが観察されている。また、A 点と C 点との中間においてそれぞれ圧縮のひずみが計測されている。最大の引張ひずみは、時速 30km の場合には約 $20\mu\epsilon$ であるのに対して、時速 200km では約 2 倍の $40\mu\epsilon$ と高くなることも観察されている。

ひずみ履歴の周波数解析結果を図 12 に示している。ディスク部での観察結果と同様に、ロードホイールの回転一次成分及び二次、三次成分のピークが観察されており、また、時速 200km の場合に、時速 30km では観察されていない 100Hz を超える帯域での弾性変形に伴う共振が観察されている。リム部の周波数解析結果で特徴的なことは、回転一次成分より回転二次成分の方が大きいことである。これはロードホイールのリムは回転

数の2倍の周波数で加振されていることを表している。

4. まとめ

FBG センサを使用し高速回転する自動車用ロードホイールの動ひずみ計測が低雑音で可能なことを確認した。

取得したひずみ波形は低速回転から高速回転まで相似であった。周波数解析結果からは回転次数成分はロードホイールの回転数増加につれて、高周波数側へ移動するだけで、雑音によるスペク

トルの劣化は無かった。

本試験結果より、FBG センサを用いて、回転中のロードホイールの動ひずみ計測は十分可能であると考ええる。

参考文献

- 1) 中島、荒川：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年10月)、p.p.37-44
- 2) 社会や産業の安心・安全に寄与する製品展開、IIC REVIEW No.40 (2008年10月)、p.p.105-109



フェロー
工学博士
荒川 敬弘

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



研究開発センター
課長
中島 富男

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