

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22510171

研究課題名(和文) 斜面および構造物における効率的な光ファイバ計測システムの研究

研究課題名(英文) Study of an effective optical fiber sensor system for a slope and structure

研究代表者

佐藤 信也 (SATO SHINYA)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00300963

研究成果の概要(和文)：光ファイバブラッググレーティング(FBG)と狭帯域LD光源、フォトディテクタを組み合わせ、従来のFBG歪みセンサよりも安価で且つ高速に動作する新しい光ファイバ歪みセンサを提案した。複数のFBGを縦続接続した多点計測システムへ発展させ、同一システム内に温度測定用FBGを混在させて、周囲温度変化によって生じる測定誤差を補償するシステムの開発を行った。さらにバッテリー駆動により電源の無い屋外で動作できるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：The new optical Fiber Bragg Grating (FBG) distortion sensor was suggested. This system consists of FBG and a narrowband LD light source and photodetectors. The proposed technique can make a compact and high-speed measurement system and it is possible to construct it at a lower price. This system makes amends for the error of measurement by the temperature with installing FBG for the temperature compensating.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：安全システム、防災用センサシステム

1. 研究開始当初の背景

平成16年10月に発生した台風23号の例のように、豪雨等により河川構造物や道路のり面及び斜面の変状に伴う多くの災害が発生している。また、近年のトンネル等の崩落事故を教訓に、土木・建築分野における構造物の管理の高度化による安心、安全な暮らしの実現

が求められている。土木・建築構造物の管理の高度化において、光ファイバセンサによる線的及び面的な歪み計測が着目されており、多くの技術開発がなされてきた。

これらの建築構造物等の歪測定のための一つの手法として光ファイバブラッグ

グレーティング（FBG）歪センサが注目され研究され、一部では実用化に近づいている。しかし、これまで研究されているFBG歪センサは広帯域光源と光スペクトラムアナライザを用いてFBGの反射スペクトルを測定し、その中心波長の変化を測定する方法が一般的であり、測定システムが大型且つ高価になる。また、測定速度面でも従来方法では、波長スペクトルデータの走引、反射ピーク波長の検出、歪み量への換算というプロセスを経るため、測定の間隔が長くなる。さらに、FBGの反射スペクトルは歪のみならず温度によっても変化するため、純粋な歪量を測定するためには温度変化による影響を補償する必要があるが、従来方法ではこれを補償するのは困難である。

また光ファイバの歪みによって後方散乱光の周波数変化を検出するBOTDR法による歪み測定技術が開発されているが、計測器が高価であるに加え、センサ設置時に光ファイバの張力調整が必要となり、修復時には足場の悪い山中で光ファイバ融着接続の精密な作業が必要となる。

上述したように、これまでの技術は実用レベルにあるものの、高コストであることや施工性および拡張性が低いという問題があり、普及レベルに達していないのが現状である。このため新技術の普及にあたり、これらの課題を解決する必要があると考えられる。

2. 研究の目的

上述した問題を解決し土木・建築構造物の管理の高度化のための光ファイバセンサ技術を普及レベルに押し上げるための新しい歪みセンサシステムを開発する。

本研究で提案する光ファイバセンサの一つは、FBGとフォトディテクタを組み合わせる従来のFBG歪みセンサよりも安価で且つ高速に動作し、さらに周囲温度の変化による測定値の誤差を補償する方法である。FBGは光ファイバコア内に屈折率を周期的に変化させたブラッグ回折格子を形成することによって特定の波長（ブラッグ波長）近傍の光を反射する素子である。FBGに歪が加わることによってブラッグ回折格子の周期が変化し、反射波長が変化する。本研究で提案する手法は、歪によってFBGの反射スペクトルがシフトしたとき、ある特定波長において、その波長の反射率が変化することに着目した。FBG反射スペクトルの単調増加区間において、歪量と特定波長の反射率の関係は一意に定まるため、FBGに狭帯域なLD光源からの光を入射し、反射パワーを測定することによって歪量に換算することができる。

この方法ではペクトルアナライザを使用しないため、システムを小型化することができ且つ安価に構築できる。また従来方法では困難だった温度による歪み測定量の誤差を補償して、正確に測定することが可能である。またフォトディテクタで受光したデータをPCで歪み量に換算する本手法は、ほぼリアルタイムに歪み測定を行うことができ、速度面でも従来手法に比べて大きな利点がある。さらに測定の際に必要なデータ量がスペクトルデータを取り込む場合に比べて非常に小さいため、長期の連続計測に用いる場合にも本方式は優位である。

また、歪み計測用FBGと同じ温度特性のFBG（温度補償用FBG）を用意し、その反射パワーが常に一定になるように光源波長を制御することによって、周囲温度によるスペクトルのシフトによって生じる測定誤差を補償し、正確な歪み測定を行うことが可能となる。その際、制御した光源波長から温度を測定することもでき、歪みと温度の同時計測が可能となる。

さらに反射型デバイスであるFBGの特性を利用し、複数個のFBGを直列に接続してそこにパルス光を入射し、各FBGからの反射光に遅延が生じることを利用して多点計測システムに発展させることが可能である。

さらにシステム全体の小型化、省電力化が可能で屋外に設置する際のバッテリー駆動が可能となり、電源を確保できない場所における測定が可能となる。

3. 研究の方法

光ファイバブラッググレーティングは、光ファイバ側面からの紫外線照射などによって光ファイバコア中に周期的な屈折率の変化を設ける事によって作製され、特定の波長の光を反射する帯域阻止フィルタとして機能する（図1）。

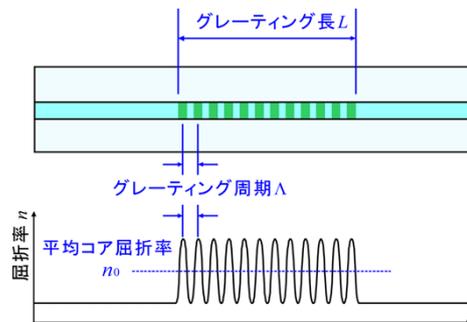


図1 ファイバブラッググレーティング（FBG）の構造

その反射の中心波長はブラッグ波長 λ_B と呼ばれ、以下のような式で与えられる。

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda$$

ここで n_0 はグレーティング部の平均コア屈折率、 Λ はグレーティング周期である。FBGに歪み加わることによって伸縮すると、グレーティング周期と平均コア屈折率が変化するため、ブラッグ波長がシフトする。これを図2に示す実験光学系に組み込んで歪み測定システムを構築する。

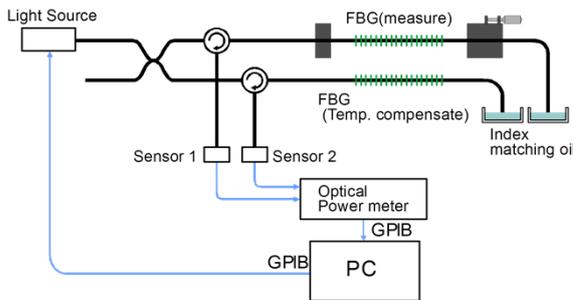


図2 実験システム概略図

本システムでは光源に波長1550nm帯の狭帯域レーザを使用し、FBGに入射する。FBGから反射する光は、光サーキュレータを通して取り出し、光検出器で電圧信号に変換する。変換された電圧信号をPCに取り込んで歪み量への換算やその時系列データとしての蓄積他各種処理を行う。

本研究で提案する手法では、光源に狭帯域レーザ光源を使用し、歪みや温度変化によってFBGの反射スペクトルがシフトしたとき、設定した光源波長における反射率が変化することに着目した。図3はFBGに歪みを与えたときのスペクトルの変化である。FBGに伸張歪みが加わって反射スペクトルが長波長側にシフトしたとき、特定の波長 (=光源の波長: 図中では1549.20nm付近) に着目すると、その波長における反射率が変化することがわかる。FBG反射スペクトルの単調増加区間において、歪みと特定波長の反射率の関係は一意に定まるため、反射パワーを測定することによって歪みに換算することができる。

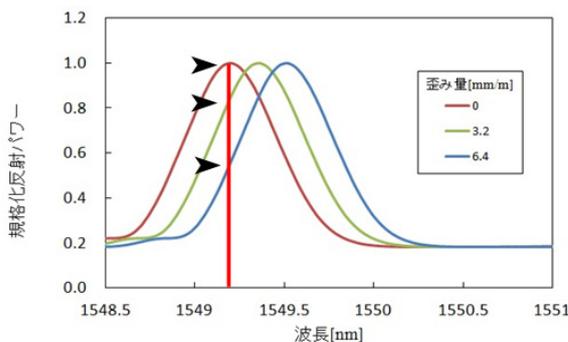


図3 歪みによる反射スペクトルのシフト

また、温度補償用のFBGを設けることによって、同じ原理で温度測定も可能となり、歪み測定FBGの反射スペクトルの温度依存性を補償することが可能となる。測定したパワーからの歪み量の算出、及び温度補償を行うための光源制御のアルゴリズムなどの計測ソフトウェアの開発を行う。特に温度補償のアルゴリズムにおいては、反射パワーの揺らぎによる誤差が蓄積していく可能性があるため、各種パラメータの最適化等を行う必要がある。

さらに複数個のセンサFBGを直列に接続した多点計測システムへ発展させる。光源にパルス光を用い、その反射光をフォトディテクタで検出して出力電圧をオシロスコープにより測定する。接続するFBGの距離に応じて反射パルス光に遅延が生じるため、時間軸上で各FBGからの反射パワーを分離して測定することが可能である。

4. 研究成果

(1)連続(CW)レーザ光源を用いた歪み測定

図2に示す実験光学系において光源に狭帯域CWレーザ光源を使った場合、FBGの歪みに伴う反射パワーの変化は図4のようになった。これを基に近似曲線を求め、歪みに対する反射パワーの関数を求める。この後、FBGからの反射パワーを測定することによって、近似した関数から歪みを算出してPCの画面に表示し、同時にHDD上のファイルに記録される。今回使用したFBGでは0～約5000 $\mu\text{m}/\text{m}$ の範囲で高精度な測定が可能であった。

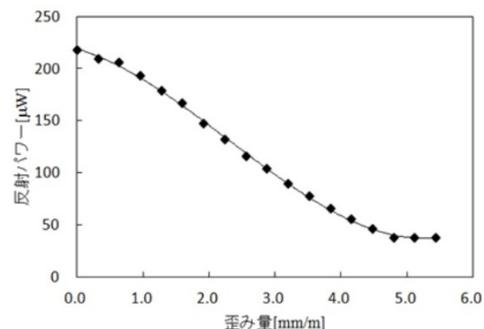


図4 歪み量に対する反射パワー

(2)連続(CW)レーザ光源を用いた温度測定

同様に図2に示す実験光学系において光源に狭帯域CWレーザ光源を使った場合、温度測定用FBG周囲の温度変化に伴う反射パワーの変化を測定し、その近似曲線を求めて温度に対する反射パワーの関数を求める。この後、FBGからの反射パワーを測定することによって、近似

した関数から温度を算出してPCの画面上に表示し、同時にHDD上のファイルに記録される。電気炉を用いて室温から50℃まで温度を上げた後、扉を開けて急冷したときの温度時間変化の測定結果を、熱電対を用いて測定した結果と比較して図5に示す。温度が急激に変化する場合において若干の誤差が生じるが、ほぼ正確に温度測定ができていることが分かる。

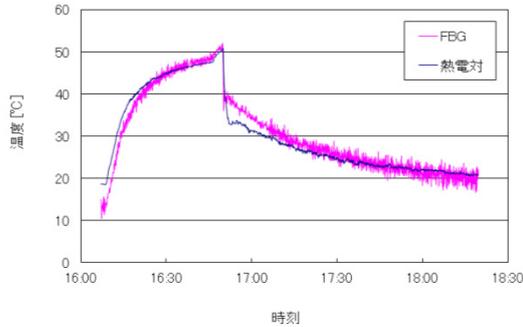


図5 温度の時間変化の測定

(3) 歪み測定における温度補償

FBGに温度変化が加わった場合、グレーティング部の平均コア屈折率が変化するため反射波長のシフトが起こる。FBG歪みセンサに温度変化が加えられると、歪みによる波長シフトと温度変化による波長シフトが重畳する。通常はこの2つの変化を切り分けることができないため、歪み測定においては温度変化が測定誤差となって現れる。そこで本システムでは歪み測定用のFBGと温度測定用のFBGをそれぞれ設けて、温度測定から予め測定した歪み測定用FBGのスペクトル変化の温度特性をもとに誤差を補正する。

(4) パルスレーザー光源を用いた多点歪み測定

複数個のFBGを直列に繋いで多点計測を行うために、図2に示す実験光学系において光源にパルスレーザー光源を使って歪み測定実験を行った。使用したパルス光源はパルス幅50nsec、立ち上がりエッジ25nsec、繰り返し周波数500kHzである。光検出器で電圧に変換された信号をオシロスコープで測定し、GPIBを用いてPCに取り込んで処理を行った。このパルスを用いた場合、縦続接続するFBGの間隔を約10m以上離すことによって、反射パルスに生じる遅延時間から、測定点の分離が可能となる。FBGに加える歪みを時間変化させて、その測定を行った(図6)。パルスを用いた場合光源のパワーが若干不安定になり、CW光源を用いた場合と比較して測定誤差が大きくなっているが、時系列データにデジタルローパスフィルタ処理を加えることにより、土木用途における長期計測においてはほぼ実用的と考えられる範囲に誤差を抑えることができた。

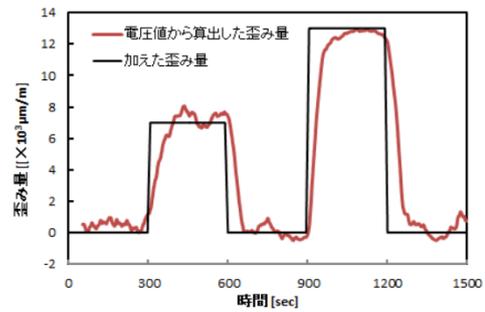


図6 パルス光源を用いた多点計測システムにおける歪みの時間変化の測定

また本システムはACアダプタで駆動できるレーザー光源、ノート型のPC、USB接続の小型オシロスコープ等で構成することにより、自動車用の鉛蓄電池とDC/ACコンバータで駆動することができ、電源の確保が難しい山間部などでも測定が行える。さらに3Gデータ通信を使って測定データを定期的にサーバへ送信するようになっており、遠隔地から歪みデータのモニタリングが可能となっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

堀雄也, 遠藤勇祐, 佐藤信也 “狭帯域波長光源を用いた多点FBG歪みセンサシステムの開発”, 第48回応用物理学会北海道支部/第9回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 2013年1月12日, 釧路.

村上智也, 堀雄也, 佐藤信也 “狭帯域光源を用いたFBG歪みセンサの多点測定”, 平成23年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2011年10月22日, 函館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 信也 (SATO SHINYA)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 00300963