

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 5月31日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21510200

研究課題名（和文）非対称断面グレーティングファイバによる曲げ方向検出可能な斜面崩壊防止センサの開発

研究課題名（英文）Development of grating fiber sensor with asymmetrical cross section detectable the bending direction for prevention of slope failures

研究代表者

熊崎 裕教（KUMAZAKI HIRONORI）

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：70270262

研究成果の概要（和文）：微細加工したグレーティングファイバを用いて、斜面崩壊防止用センサとして評価した。反射中心波長とそれ以外の波長における反射光量の差を用いて、ファイバ先端部の屈折率を検出できる可能性を示した。また、反射中心波長の異なる二つのグレーティングを直列に配置し、異なる方向から非対称断面に加工したものに曲げを与え、反射光スペクトルを測定した。クラッド厚さが $14\mu\text{m}$ の場合、曲げ方向を 5° 程度、曲率を 3.0m^{-1} 程度の精度で測定できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Micro-machined grating fiber was evaluated as a sensor for prevention of slope failures. There is some possibility to detect refractive index of liquid on the fiber tip by the difference of reflected light power between at the center reflection wavelength and at the other wavelengths. Reflected light spectra were measured, when a serial arrangement of two FBGs with two different center reflection wavelengths and similar asymmetrical cross sections with different etching faces was bent. It was found that bend was recognized with accuracy of 5° in bend direction and 3.0m^{-1} in curvature when the clad thickness was $14\mu\text{m}$.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	100,000	30,000	130,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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・自然災害科学

キーワード：土砂災害、ファイバセンサ、ファイバグレーティング、異方性エッチング

1. 研究開始当初の背景

我が国は国土の多くが山地や丘陵地で占められており、地すべり・崖崩れ・落石・土石流といった自然災害が発生しやすい環境

にある。斜面が崩壊する事故が多発しても、崩壊に至るメカニズムは未だ明らかにされていない¹⁾。このような災害に対しては、斜面の安定性を評価し崩壊の危険性を予測す

ることで事故を未然に防ぐ手段を講じることが重要であり、崩壊に至る前兆現象を素早く捉える必要がある²⁾。斜面内の歪み、地盤の変位だけでなく、土壌中の水分量も崩壊を予測するために必要不可欠なパラメータである。降雨時および地震時の斜面崩壊は土壌中の水分量によって自重や動的強度が変化する等、大きな影響を受けるからである。斜面内の歪み、地盤の変位を検知する光ファイバセンサとしては、ブリルアン散乱を利用したBOTDR方式³⁾、FBGを利用した方式⁴⁾が代表的である。BOTDR方式は光歪分布測定装置に莫大なコストがかかると共に、光ケーブルの張力管理が難しいため、地盤変位の測定感度を保持することが難しい。また、FBGを利用して伸縮計や傾斜計、水位計等を実現した例も示されているが、一つのFBGで測定できる物理量は一つであり、これら複数の測定対象を一つのセンサで測定する試みはほとんど行われていない。

2. 研究の目的

近年、集中豪雨や大型台風の上陸回数が増加に伴い、山林の崖崩れや堤防の決壊などの被害が多発しており、その脅威は計り知れない。これらの被害を最小限にするために、斜面崩壊の予測システムを確立することは防災における重要な課題である。本研究は、光ファイバブラッググレーティング (FBG) と光ファイバの異方性エッチング技術を組み合わせることで作製される非対称断面をもつFBGにより、曲げ方向も含めた地盤内の応力と水分量を同時計測する斜面崩壊防止用のハイブリッドセンサを開発する目的で実施するものである。

3. 研究の方法

(1) 屈折率センサ

土壌中の水分量検出を目的として、グレーティングファイバを用いた屈折率センサについて検討した。グレーティングファイバ先端部を屈折率の異なる液体に浸漬し、反射光スペクトルを測定した。具体的には、ASE光源 (Fiber Labs 製、ASE-6001) からのレーザー光 (1530~1570nm、最大出力 5mW) を、光サーキュレータを介して反射中心波長 1548.5nm のグレーティングファイバに入射した。反射光スペクトルを光スペクトラムアナライザ (HP 製、70004A) で測定し、反射中心波長 (1548.5nm) での反射光量とそれ以外の波長 (1547.0nm) での反射光量の差を測定した。屈折率の校正にはポータブル屈折率計 (アタゴ手持屈折計、R-5000) を用いた。屈折率の異なる液体として水、デカヒドロナフタレン、濃度の異なるショ糖水溶液を使用した。ショ糖の水溶液は、常温での屈折率が 1.34~1.46 の範囲で作製した。

(2) 曲げセンサ

実験装置の概略を図3. 1に示す。グレーティング領域の断面形状を非対称に加工したグレーティングファイバ (反射中心波長: 1549.0nm) の2点を、回転ステージ (SIGMA KOKI 製 SKIDS 60YAW 型、可動範囲: 360°) の回転軸上に 80mm の間隔で固定した。この非対称断面グレーティングファイバのグレーティング領域を内側に含む2点にマイクロコントローラ (SIGMA KOKI 製) で制御した応力印加用具 (応力印加点の間隔: 50mm) で応力を与えることにより、FBG のグレーティング領域を含む範囲において均等な曲率となるような曲げを与えた。この時、曲げを与えることでFBGに張力を与えないよう、FBGは先に1点だけ固定し、応力印加用具の移動後にもう1点を固定した。ASE光源 (Fiber Labs 製 ASE-FL6001 形、1530~1570nm、7.5dBm) からの光を、光サーキュレータを介してFBGに入力し、反射光スペクトルを光スペクトラムアナライザで測定した。4方向 (0°、90°、180°、270°、加工面側からの曲げを270°方向と定義) から曲げを与え、曲率を変化させながら反射中心波長を測定した。

センサ部分は図3. 2に示す2種類について実験を行った。図3. 2(a)は単一型であり、グレーティング領域 10mm のFBGを含む90mmの断面形状を非対称に加工したグレーティングファイバ (反射中心波長: 1549.0nm) である。また、図3. 2(b)は直列型であり、反射中心波長が異なるFBG-A、FBG-Bが直列に配置されているグレーティングファイバ (FBG-Aの反射中心波長: 1548.7nm、FBG-Bの反射中心波長: 1550.3nm、グレーティング長さおよび間隔: 10mm) のFBG-Aを含む40mmの領域とFBG-Bを含む40mmの領域を90°加工方向の異なる非対称断面に加工したものである。

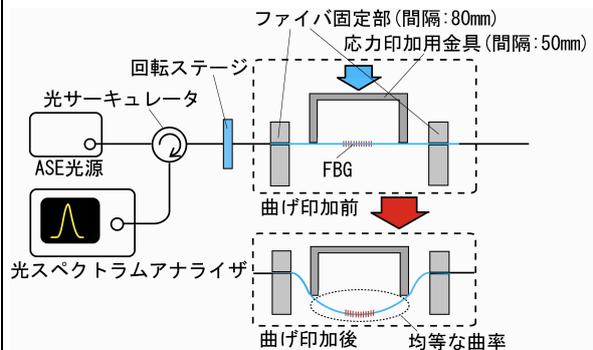
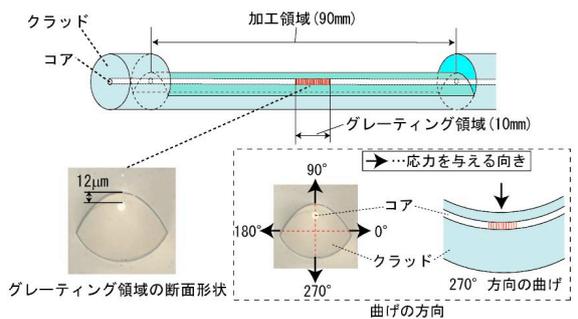
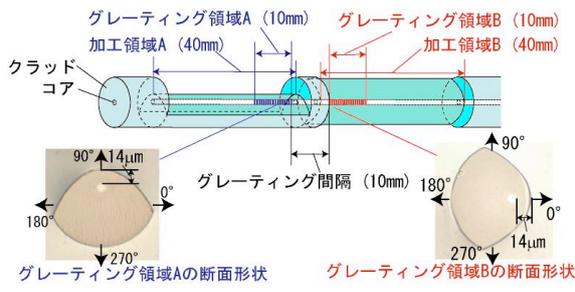


図3. 1 実験装置の概略 (曲げセンサ)



(a) : 単一型



(b) : 直列型

図 3. 2 曲げセンサの概略

4. 研究成果

(1) 屈折率センサ

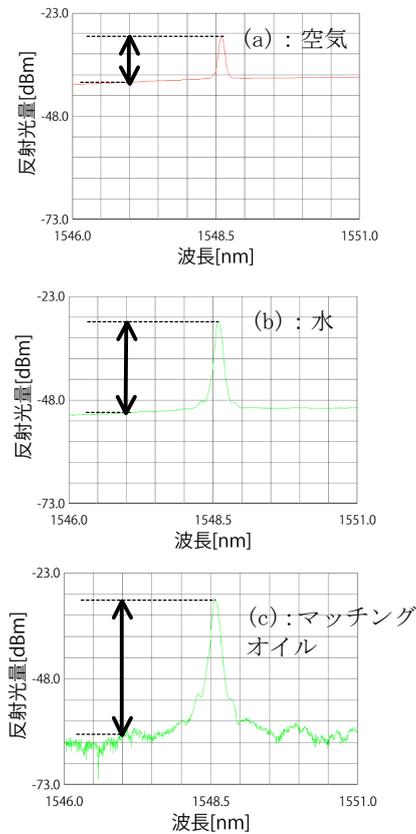


図 4. 1 FBG 先端部の屈折率に対する反射光スペクトルの変化

グレーティングファイバ先端部を空気、水、マッチングオイルに浸漬したときの反射光スペクトルを図 4. 1 (a), (b), (c) に示す。先端部に浸漬する物質の屈折率が高いほど、反射光量の差は大きくなった。先端部の屈折率がコアの屈折率に近づく程、先端部からの反射光量が減少するためと考えられる。先端部の周囲屈折率に対する反射光量の差の変化を図 4. 2 に示す。周囲屈折率に対して反射光量の差はほぼ直線的に増加した。今回の実験の屈折率範囲 (1.34~1.46) では、 4.5×10^{-4} 程度の精度で屈折率を認識できる可能性があることがわかった。

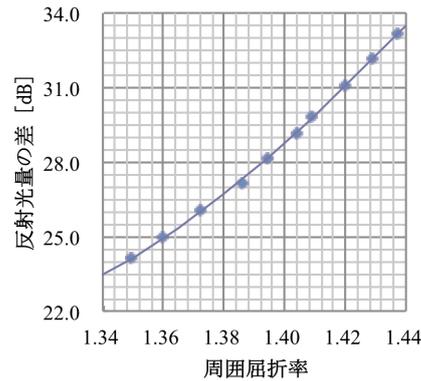


図 4. 2 周囲屈折率に対する反射光量の差

(2) 曲げセンサ

直列FBG型の応力印加用具の変位に対する反射中心波長の変化を図 4. 3 に示す。(a) ~ (h) は代表的な曲げ方向 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ の場合である。 $90^\circ, 270^\circ$ 方向の曲げではFBG-Aのみが、 $0^\circ, 180^\circ$ 方向の曲げではFBG-Bのみがほぼ直線的に変化し、3mmの応力印加用具の変位に対し、反射中心波長は約0.28nm変化した。 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 方向の曲げではFBG-A、FBG-B両者の反射中心波長が変化し、その変化量は $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の場合の約70%であった。また、応力印加用具の変位を3mm一定とした場合の、曲げ方向に対する反射中心波長の変化量を図 4. 4 に実線で示す。FBG-A、FBG-Bの反射中心波長は曲げ方向に対してほぼ正弦的に変化し、その位相はほぼ $\pi/2$ 異なったものであった。この結果から、以下に示す(4-1) 式および(4-2) 式により、曲げ方向 θ と曲率 $1/r$ を同時に検出できる可能性が示された。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\lambda_A} \quad (4-1)$$

$$1/r = k \sqrt{\Delta\lambda_A^2 + \Delta\lambda_B^2} \quad (4-2)$$

尚、 $\Delta\lambda_A, \Delta\lambda_B$ は各々、FBG-A、FBG-Bの反射中心波長の変化量、 k はエッチングされたファイバ断面によって決定される比例定数である。

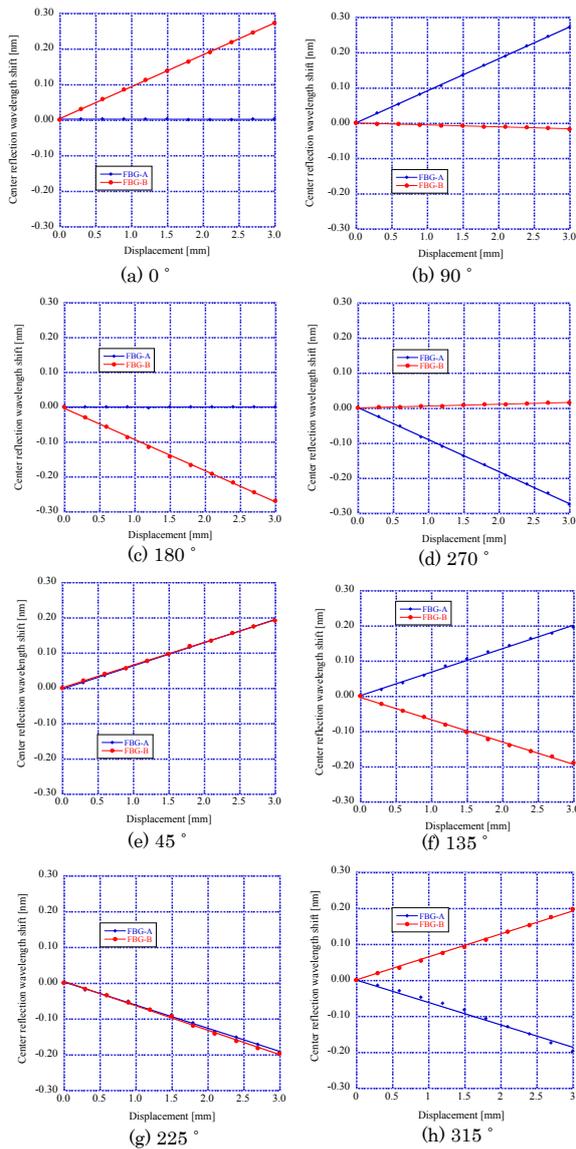


図4.3 応力印加金具の変位に対する反射中心波長の変化量 (曲げ方向: $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$)

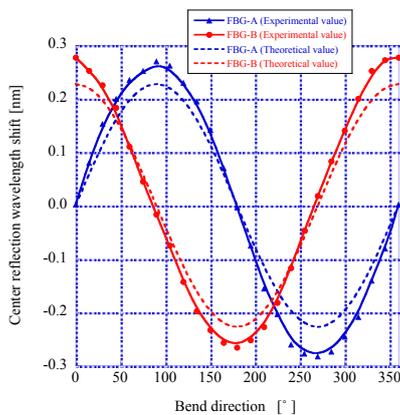


図4.4 曲げ方向に対する反射中心波長の変化量 (応力印加金具の変位: 3mm 一定 実線: 測定値、破線: 理論値)

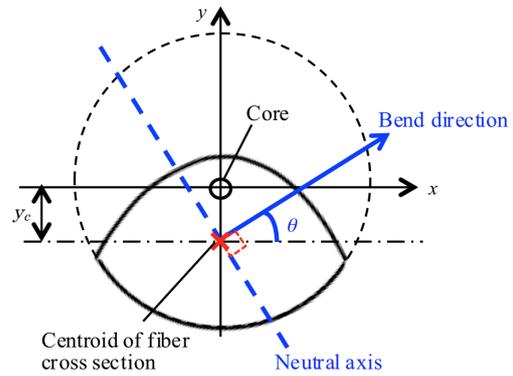


図4.5 ファイバ断面の概略図 (エッチング方向: y 軸正方向)

非対称断面に加工したFBGの曲げに対する反射中心波長の変化量について考察するために、理論的な検討を行った。ここで、応力印加金具(コの字型、間隔: 52mm)の変位によりFBGを含む80mmの領域に生じるファイバの曲率を一定と仮定した。 y 軸の正方向からエッチングを行い、上部のクラッドが除去されたファイバ断面の概略図を図4.5に示す。任意の方向(x 軸から θ の方向)に曲げを印加したと考えると、曲げの中立軸(図中の破線)は図心(図中の \times 記号)を通り、曲げ方向に直交する直線となる。コアに生じる歪みはコアと曲げの中立軸との最短距離 y_c で決まるので、反射中心波長の変化量の理論値 $\Delta\lambda$ は次式で求められる。

$$\Delta\lambda = 0.78\varepsilon\lambda_s \quad (4-3)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{r} y_c \sin\theta \quad (4-4)$$

ここで、(4-3)式の λ_s 、 ε は各々、曲げなしのときの反射中心波長、歪みであり、0.78はゲージファクターである。また、(4-4)式の $1/r$ はファイバの曲率であり、曲率を一定と仮定した条件下、応力印加金具の変位量と曲率の関係式から導出した。(4-3)式、(4-4)式から求めた理論値を図4.4の点線で示す。両者は同位相で類似の特性を示したものの、測定値は理論値に比べ、最大で40%程度大きくなった。これらの差が生じた理由として主に3つの原因が考えられる。1つ目は実験に用いたファイバの断面形状を正確に認識できていない可能性が考えられる。断面形状の測定には実験に用いたものと同時にエッチング加工したダミーファイバの先端部の断面を用いた。実験に用いたものはファイバ長手方向の中間部をエッチング加工したものであり、エッチングの状態に差が生じたことも考えられる。2つ目の原因として、応力印加金具による曲げの印加方法が考えられる。応力印加金具と

光ファイバの接触部分に摩擦が生じていれば、曲げによる応力とは別に引っ張り応力、圧縮応力が印加される可能性がある。1つ目、2つ目の原因は単一型、直列型いずれにも共通に生じる可能性がある。事実、単一型の場合、反射中心波長変化量の測定値は最大で、理論値の115%程度であった。測定値と理論値の差が異なる3つ目の原因として、単一型と直列型の加工形状の違いが起因していると考えられる。具体的には、曲げの印加領域においてファイバの断面形状が単一型ではほぼ均一であるのに対し、直列型では不連続に変化している箇所が存在する。このため、応力印加金具の変位量が同じであっても、単一型に比べ最大で20%以上、大きな曲率が生じている可能性があるものと考えられる。以上のように、曲率一定と仮定したモデルによる理論値との差異は生じたものの、非対称断面に加工した直列型FBGを用いて、5°程度の精度で曲げ方向を、10%程度の精度で曲率を測定できることが示された。

一方、一つのFBGから直列型と同等の機能が実現できないかについても実験を行った。グレーティング長20mmのFBGのうち15mmに対し任意方向から、5mmに対し90°異なる方向から各々異方性エッチングを行った。前述の方法でFBG部に曲げを与えながら反射光スペクトルを測定した。二つの領域ではグレーティング長が異なるため、反射率にも差が生じるとともに、加工方向が異なるため、任意の方向に曲げを与えた場合、反射中心波長の変化量に差が生じる。従って、応力印加金具の変位量を増大するに従い、反射光スペクトルが二つに分離することが確認でき、一つのFBGからでも直列型と類似の結果が得られた。ただし、両者の反射中心波長が約0.18nm以上の差を生じないと、反射光スペクトルを明確に分離できなかったため、適用できるのは一定(4.8m⁻¹)以上の曲率に限定される課題が判明した。

参考文献

- 1) 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊メカニズムについて, 地質と調査, Vol. 3, pp. 9-15, 2002.
- 2) 奥園誠之: 要注意切土のり面の管理技術について, 基礎工, Vol. 24, No. 6, pp. 36-41, 1996
- 3) Thi Ha, 森脇武夫, 佐々木康, 加納誠二, Dissanayake A. Kamalnath: 地盤と建設, Vol. 19, No. 1, 2001
- 4) 北村良介, 川井田実, 阿部寛史, 城本一義, 寺地卓也: 砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発, 土木学会論文集 No. 652/III -51, pp. 287-292, 2000

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)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計3件)

① 曲げに対する直列型非対称断面FBGの反射特性、○熊崎裕教・稲葉成基・小栗久和・羽根一博、平成25年電気学会全国大会論文集 (2013. 3. 22、名古屋大学)

② Mechanical stress sensors using micromachined grating fibers, ○Hironori Kumazaki, Munehiro Hiramatsu, Hisakazu Oguri, Seiki Inaba, and Kazuhiro Hane, 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, (May 19, 2011, Ottawa, Canada)

③ 微細加工FBGによるひずみ測定精度の向上、○平松宗大・梅田晶央・熊崎裕教・小栗久和・稲葉成基・羽根一博、平成22年度電気学会全国大会論文集 (2010. 3. 17、明治大学駿河台キャンパス)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊崎 裕教 (KUMAZAKI HIRONORI)

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：70270262

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：