

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究 A

研究期間：2006～2008

課題番号：1868035

研究課題名（和文） 高機能性フォトニック光ファイバーセンサーの開発

研究課題名（英文） The research of photonic crystal fiber sensors

研究代表者

亀山 晃弘 (KAMEYAMA AKIHIRO)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：00264367

研究成果の概要：

巨大構造物（石油コンビナート、トンネル、高層ビル等）の極僅かな歪み、及び自動車、航空機等を使用中に常時モニターして破壊を事前探知する研究（スマートセンシング技術）が進められている。現在、ファイバーブラックグレーティング（FBG）やマルチコアファイバー等の光ファイバーセンシング技術が研究されているが、我々は更に高機能なセンシング方式である、「フォトニック結晶ファイバーセンサー」の特に作成技術を開発するために研究を行った。結果、FBGや長周期ファイバーグレーティング（LPG）を作製することに成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2007 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：センシングデバイス、フォトニック結晶ファイバー、AE 診断、長周期構造

## 1. 研究開始当初の背景

巨大構造物、例えば、石油コンビナート、トンネル、高層ビル、等は老朽化や地震などで崩落する危険性がある。それ故、これらの巨大構造物の極僅かな歪みを常時モニターしておくことが望まれている。また近年、自動車や航空機などを使用中に常時モニターして破壊を事前に探知する研究（スマートセンシング技術）が進められている。特に航空機を使用中にモニターすることは、静的な状態をモニターする場合に比べて、構造物の疲労状

態をより正確に計測することが可能である。現在、ファイバーブラックグレーティング（

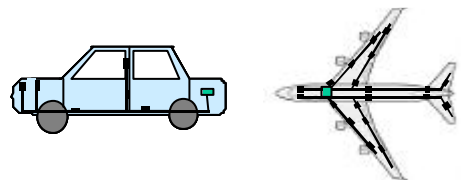


図 1 光ファイバーセンサーの使用例

FBG) やマルチコアファイバーなどの各種光ファイバーを用いたセンシング技術が研究されているが、一方で、更に高機能な特性を持たせようとする試みがある。

## 2. 研究の目的

次世代光ファイバーセンシング技術として、私達はフォトニック結晶ファイバーに注目して研究を行ってきた。フォトニック結晶ファイバーとは、光ファイバーのコア又はクラッド部分のどちらか一方、又は両方を、光の波長程度のサイズを持った誘電体を束ねて作製したファイバーのことである。従来の光ファイバーと比べて、

有効屈折率を大きくする事ができるので、より高感度で超音波を検出できる。波長による分散特性を小さく出来るので、高精度で超音波を検出できる。偏波特性を利用することにより、3次元のあらゆる方向からの超音波を検出可能。

等の優位性を持っている。よってフォトニック結晶ファイバーを用いることにより、高感度な超音波の測定装置、つまりは応力検出用センサーを作製する事が出来る。申請者はこれまで、FBG方式の光ファイバーセンサーの開発と、光ファイバー又は石英ガラスを用いてレーザーの波長変換を行う研究開発、及びフォトニック結晶ファイバー並びにフォトニックデバイスの作製技術の開発を行ってきた<sup>(2)</sup>。今回(H18~H20年度)行った研究テーマはこれらの成果をもとに発展させたものである。本提案では、高性能の超音波検出用フォトニック結晶ファイバーの開発及び、作製したフォトニック結晶ファイバーを用いた高感度応力検出システムの構築を目指して研究を行った。研究の具体的なテーマは以下の通りである。

フォトニック結晶ファイバー製作装置の開発

最適なフォトニック結晶ファイバーの構造を見つけ出す理論計算

フォトニック結晶ファイバーの製作と応力検出装置の構築

## 3. 研究の方法

### (1) フォトニック結晶ファイバー製作装置の開発

H18年度に、まずフォトニック光ファイバー製作装置を設計製作した。従来のFBG光ファイバーの場合に比べて、除振動能力に優れた(固有振動数、垂直1.2Hz、水平1.0Hz)

光学実験台の上に、製作装置を製作した。そしてコヒーレント長が通常よりも2桁長い固体レーザーを書き込み用レーザーとして採用した。書き込み実験を行ったところ、所定の能力を得る事ができた。

### (2) 最適なフォトニック結晶ファイバーの構造

物体に応力がかかった際の微弱な超音波を含む弾性波(AE)の検知には、より超音波に対して高感度なフォトニック結晶ファイバーを開発する必要がある。このため、歪みによって光ファイバーが伸縮した時、コア部分の光路長が変化することを利用して歪み検知を行うFBGの代わりに、光路長変化に加えて、コア部分とクラッド部分の屈折率差も利用することで、極めて高感度に歪みを検知できる長周期回折格子(Long Period Grating: LPG)をセンサーとして開発<sup>(11)</sup>することを考えた。LPGの原理を図2に示す。

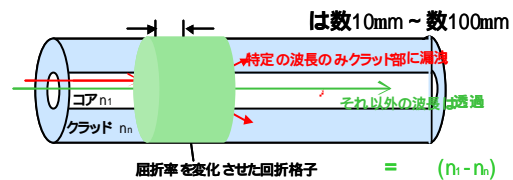


図2 LPGの原理

LPGにおいては、光ファイバーコア内の回折格子の格子間隔 $\Lambda$ を数10 $\mu\text{m}$ ~数100 $\mu\text{m}$ とする。進行波をLP<sub>01</sub>モード、コア部分の屈折率を $n_1$ 、クラッドモードをLP<sub>0n</sub>モード、その実効屈折率を $n_n$ とすると、式(1)で求められる波長 $\lambda$ において伝搬光がクラッドモードに変換され、コアを伝搬する進行波に損失が生じる<sup>(12)</sup>。

$$\lambda = \Lambda(n_1 - n_n) \quad (1)$$

FBGと異なる点は、コアモードとクラッドモードの各屈折率 $n_1$ と $n_n$ の差が歪みに対して変化するため、その結果、波長変化特性が変化する点にある<sup>(13)</sup>。このため、Geドープシリカファイバーを基本とするFBGよりも高感度なものが作製できる可能性がある。通常光ファイバーにおいては、Geに加えFやP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等を添加してコアやクラッドに必要な屈折率を得るが、それだけでは屈折率差の大きな変化は望めない。小さな歪みでもより大きな波長変化を得るためには、コアとクラッド部分の屈折率差が大きく変化することが重要となる。歪み計測、振動計測、アコースティックエミッション(AE)計測に最適なフォトニック結晶ファイバーの構造を検討した。図3に主なフォトニック結晶ファイバーの断面を示す<sup>(14)</sup>。

ホールアシスト型はGe等を含んだ石英ガラスからなるコア部分の周りを少数の空孔が

取り囲んだ構造になっているホールアシスト型は Ge 等を含んだ石英ガラスからなるコア部分の周りを少数の空孔が取り囲んだ構造になっている。インデックスガイド型は石英ガラスのコアの周りを多数の正孔で取り囲んだ構造になっている。フォトニックバンドギャップ型はコア部分が中空（空気）になっている。

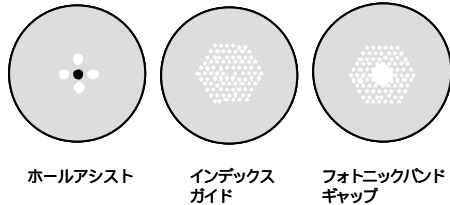


図 3 フォトニック結晶ファイバーの断面構造

LPG・フォトニック結晶ファイバーを作製する場合、注意すべき点が 2 つある。1 つは、LPG を作製するため、コア部分に Ge をドープした光ファイバーを使う必要がある点である。もう 1 つは、クラッド部分に空孔が多数存在すると、コア部分にレーザー光を照射した際に、レーザー光が散乱してしまい、LPG 作製に支障がでるので、空孔の数は少数であることが望まれる。よって、上記の図 1 に取り上げたフォトニック結晶ファイバーの中で、コア部分が Ge を含んだ石英ガラスで、空孔数が少ないホールアシスト型がセンサーとして有望であることを見出した。

(3) フォトニック結晶ファイバーの製作と応力検出装置の構築

3-1 紫外線レーザー照射による屈折率変化評価

LPG・フォトニック結晶ファイバー作製の第一段階として、図 4 に示すような 10Hz のフラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを基本とした実験装置を設計・製作し、通常の Ge ドープシングルモード光ファイバーに FBG を書き込むことで、実用的な書き込みが可能か否か、すなわちどの程度の屈折率変化が実現できるかを評価した。

試料には、コア部分に Ge を 3 mol% ドープした光ファイバーと Ge-B 共添加の光ファイバーの 2 種類を用いた。UV レーザー照射に対する光感受性を増進させる為、光ファイバーを水素 120 気圧雰囲気中で 14 日間晒して、水素処理を施した。光ファイバーを治具に取り付け、一定の張力で固定した。Nd:YAG レーザーの第 4 高調波 ( $\lambda=266 \text{ nm}$ ) を位相マスクに通して得られた干渉光を、光ファイバーのコア部分に照射した。レーザーのエネルギー密度は  $30 \text{ mJ/cm}^2$  とした。FBG の書き込み長

さは 6 mm とした。

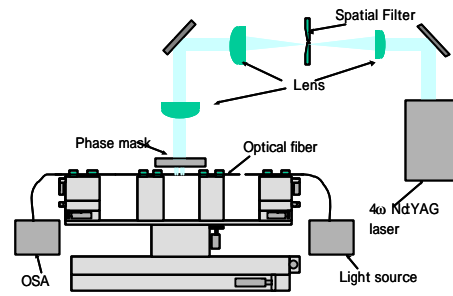


図 4 LPG・FBG 作製装置

3-2 LPG の作製

LPG 光ファイバーセンサーの製作を行った。図 4 に示すような実験装置を製作した上で、位相マスクの代わりに周期  $100 \mu\text{m}$  の強度マスクを置いて、書き込み実験を行った。試料には、コア部分に Ge-B 共添加の光ファイバーを用いた。(1)の時と同様に UV レーザー照射に対する光感受性を増進させる為、光ファイバーを水素 120 気圧雰囲気中で 14 日間晒して、水素処理を施した。その後、 $6 \text{ mJ/cm}^2$  の光強度で紫外線レーザーを 0~40 分間照射した。LPG の書き込み長さは 15 mm とした。

3-3 FBG・LPG を用いた振動計測

LPG 及び FBG を用いて、振動計測を行った。空気バネ式除振台の上に製作した FBG 及び LPG を設置し、空気中に振動を伝搬させることにより、振動を検出できるかどうかを確かめた。

4. 研究成果

(1) 紫外線レーザー照射による屈折率変化評価

図 5 に照射時間に対する FBG の反射スペクトルの反射率を示す。試料は Ge を 3 mol% ドープした光ファイバーである。照射開始後 45 分までは FBG の反射率は増加した。反射率の最大値から屈折率変化  $n$  を見積もると、約  $3 \times 10^{-4}$  であった。LPG で AE 検出を行うには、10cm 以内の LPG の書き込み長さで約 -10 dB の透過率が必要であるが、見積もった  $n$  から計算すると、長さ 5 cm の LPG で -10 dB の透過率が達成でき、AE センサーとして使用可能なサイズであることがわかった。一方、Ge-B 共添加の光ファイバーの場合、 $6 \text{ mJ/cm}^2$  の弱いレーザー強度でも約  $2 \times 10^{-4}$  程度の屈折率変化  $n$  を得ることが確認でき、十分に LPG が書き込めることがわかった。

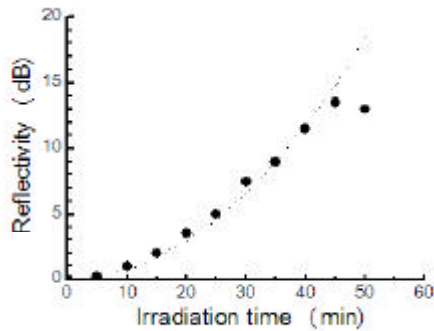


図5 FBG 反射スペクトルの反射率の照射時間依存性

(2) LPGの作製

(1)の検討結果を考慮したうえで、水素ドープしたGe-B共添加の光ファイバーにLPGの製作を行った。6mJ/cm<sup>2</sup>の光強度で紫外線レーザーを照射することにより、LPGのピークが観測できた。照射時間を経ることによって、吸収ピーク強度は大きくなり、また吸収ピーク位置は長波長側にシフトした。照射時間440分後にはピーク波長1548nm、半値幅10nmで1dB程度の吸収ピークを作製する事ができた。得られた吸収ピークは室温では安定であるが、300以上の高温では数時間で消滅した。これは屈折率変化に関係しているガラス中の欠陥生成が、熱処理によって消滅するからである。

(3) FBG・LPGを用いた振動計測

LPG及びFBGを用いて、振動計測を行った。両者の方式とも空気中を伝搬する振動を計測したところ1~2nmのピーク位置の変化が観測できた。また振動継続時間は1s以下であった。現在、両者の方式での感度の差異について検討を行っているところである。

まとめ

今回、本科学研究費補助金による助成の結果、フォトニック結晶ファイバーを用いた高性能光ファイバーセンサーを開発する為の基礎技術を作ることができた。今後の予定としては

1. 作製したフォトニック結晶ファイバーセンサー、特にLPGを用いて、高層ビル等の材料であるコンクリートや航空機の材料である金属や強化プラスチックを用いて振動計測を行う。
2. 現在行っているLPGやFBG作製方法では数百度以上の高温での使用が困難である。そこで光ファイバー中に微細空孔を形成することで半永久的に性能が保持できる光ファイバーセンサーを作製する。方法としてはプラズマを用いる方

法や極短パルスレーザーを用いる方法を検討している。

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)

[雑誌論文](計5件)

甲藤正人、亀山晃弘、横谷篤至 他、紫外・真空紫外光源の開発と光プロセスへの応用、レーザー学会第381回研究会報告 レーザー応用、RTM-08-43、5-10、2008、無

亀山晃弘、横谷篤至 他、高機能性光源によるマテリアルプロセッシング、レーザー学会第378回研究会報告 レーザー応用、RTM-08-35、33-38、2008、無

M. Katto, A. Kameyama, et al., "Crystallized hydroxyapatite coatings deposited by PLD with targets of different densities", Journal of Physics: Conference Series, 59, pp.75-78, 59, 2008, 有

亀山晃弘、横谷篤至 他、高機能性光源を用いたマテリアルプロセッシングの研究、レーザー学会第365回研究会報告 レーザー応用、RTM-07-30、15-20、2007、無

K. Ishibashi, M. Katto, A. Kameyama, et al., Effect of laser fluence on poly-crystallized hydroxyapatite film by PLD method, The 4th The 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2006), 348, 2006, 有

[学会発表](計3件)

亀山晃弘、横谷篤至 他、高機能性光源によるマテリアルプロセッシング、レーザー学会研究会、虹の原ホテル(唐津市)、2008年09月29日

亀山晃弘、軟X線照射による石英ガラスの屈折率変化、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学理工学部、2008年03月28日

亀山晃弘、高エネルギーフォトン照射による石英ガラスの改質、第68回応用物理学学会学術講演会、北海道工業大学、2007年09月06日

[ その他 ]

[http://www.miyazaki-u.ac.jp/~deee\\_01/](http://www.miyazaki-u.ac.jp/~deee_01/)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

亀山 晃弘 ( KAMEYAMA AKIHIRO )

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号 :

00264367

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

なし ( )

研究者番号 :

# 様式 C-19 (記入例)

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 年 月 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2004～2007

課題番号：16000000

研究課題名 (和文) に関する研究

研究課題名 (英文) A A A A A A A A A A

研究代表者

学振 太郎 (GAKUSHIN TARO)

大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：

研究成果の概要：

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2005年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2006年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2007年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
年度			
総計	40,000,000	12,000,000	52,000,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

(1)

(2)

2. 研究の目的

(1)

(2)

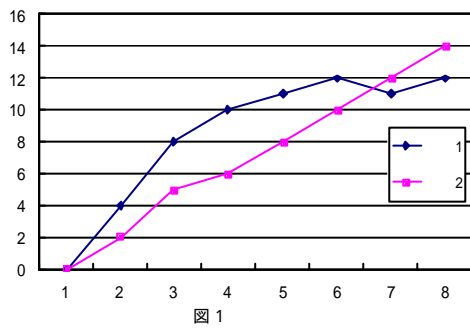
### 3. 研究の方法

(1)

(2)

### 4. 研究成果

(1)



(2)

(3)

(4)

(5)

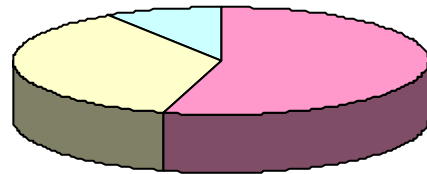


図 2

(6)

(7)

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10件)

学振太郎、半蔵門一郎、学振花子、論文名、掲載誌名、巻、最初と最後の頁、発表年(西暦)、査読の有無

学振太郎、論文名、掲載誌名、巻、最初と最後の頁、発表年(西暦)、査読の有無

学振花子、論文名、掲載誌名、巻、最初と最後の頁、発表年(西暦)、査読の有無

〔学会発表〕(計5件)

〔図書〕(計2件)



〔産業財産権〕  
出願状況（計 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 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  
<http://>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

学振 太郎 (GAKUSHIN TARO)  
大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：

### (2) 研究分担者

学振 花子 (GAKUSHIN HANAKO)  
大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：

学振 次郎 (GAKUSHIN JIRO)  
大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：

学振 三郎 (GAKUSHIN SABURO)  
大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：

### (3) 連携研究者

学振 四郎 (GAKUSHIN SHIRO)  
大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：