

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 元 年 5 月 16 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06307

研究課題名（和文）短波長域長周期ファイバグレーティングのセンサーへの応用

研究課題名（英文）Application of long period fiber grating to the sensor in the short-wavelength region

研究代表者

大橋 正治（Ohashi, Masaharu）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40347505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、熱収縮チューブ、ネジ、ファイバを用いたシンプルで簡単に作製可能な長周期ファイバグレーティング（LPFG）の基本的な特性およびそのアプリケーションに関して検討した。特に、短波長領域で用いるLPFGの温度および圧力特性について実験を行い、共振波長および損失と温度および圧力との関係を明らかにした。また、本LPFGの特性である偏波依存性損失を利用した振動の測定法について提案し振動測定が可能であることを示した。また、本LPFGを用いたアプリケーションとして、ガス圧センサー、モード変換器への応用およびカスケードにしたLPFGの基本特性および振動測定への適用性について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、簡単で安価に作製できる長周期ファイバグレーティング（LPFG）に関するものであり、このLPFGの基本特性を明確にすることにより適用領域が明確になり、IoT社会における安価な光センサーシステムの構築に反映できる。また、LPFGにおけるモード間の結合特性と環境変化（温度、圧力、振動等）との関係を明らかにすることは、ファイバセンサーを研究する上で学術的に重要な意味を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the fundamental properties of long period fiber gratings (LPFGs) fabricated with heat shrinkable tubes, screws and fibers and their applications. In particular, experiments were made on the temperature and pressure characteristics of LPFG used in the short wavelength region, and the relationship between the resonant wavelength and loss against the temperature and pressure was clarified. We also proposed a method for monitoring the vibration utilizing the polarization dependent loss (PDL), which is the characteristic of the present LPFG. We confirmed the feasibility of the our LPFG to vibration monitoring experimentally. We clarified that our LPFG can be applied to gas pressure sensors, mode converters. Moreover, we clarified basic characteristics of cascaded LPFG and application of cascaded LPFG to vibration measurement with a high sensitivity.

研究分野：光波電子工学、光ファイバ工学

キーワード：光ファイバ 光ファイバセンサー 長周期ファイバグレーティング 偏波依存性損失

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光ファイバセンサーとして、ファイバブラッググレーティング(FBG)やLPFG が主に用いられている。FBG や LPFG は光ファイバのコア中に屈折率の周期構造を有するものであり、特定の波長の光を反射させたり吸収させたりする特性がある。この屈折率の周期構造の作製には、紫外光を用いて作製する方法があるが、この作製法においては、紫外光を発生するエキシマレーザーなどの強力なレーザー光を用いて行くとともに、極めて高精度な光学系や周期構造作製のためのマスクが要求されるため、高価にならざるを得ない。

ここで提案している LPFG も、同様にエキシマレーザーや炭酸ガスレーザーを用いた作製法が提案されている。しかしながら、レーザーを用いたファイバグレーティングは、一度作製するとその周期構造を消すことができないため、不良なものを作製するとともに戻すことができない欠点もある。

一方、ファイバのコア中に比較的周期 Λ の大きい(Λ : 100 μm ~1mm 程度)屈折率の周期構造を作製する方法として、光弾性効果を利用した方法も検討されてきている。この光弾性効果は、透明な弾性体に外力を加えると、その歪みによって応力を生じ光学特性が一時的に変化して複屈折性を示す現象である。つまり、ガラスなどの透明な弾性材料に力を加えたとき、圧力を加えた方向とそれに垂直な方向で屈折率が変化する現象である。したがって、周期構造を有する治具と、おもりをファイバの上に置くことにより、この光弾性効果により、ファイバコア中に、治具の周期に応じた屈折率の周期構造を作製することができる。しかし、この効果を利用した安定な小型の LPFG が提案されていない。この原因としては、ファイバに応力を印加する小型の治具が見つからなかったためであると考えられる。以上述べたように、現状の問題点としては、安価なファイバグレーティングが困難、一度作製すると元に戻すことができない、光弾性効果を利用した小型のファイバグレーティングの作製が困難の3点があった。この欠点を解決したのが申請者の提案した熱収縮チューブを用いた LPFG である。

そこで、本研究においては、申請者が提案している熱収縮チューブを用いた LPFG の特性について明らかにするとともに、本 LPFG の新しい適用領域についても検討する。また、実用化を目指した光ファイバセンサーとしては、光源および受光器が安価である可視域での利用が望まれている。したがって、可視域での本 LPFG の設計および作製を行い、LPFG の特性を明らかにする。

この可視域の LPFG を用いることにより、圧力・水深はもちろんのこと振動数および温度をセンシングすることが可能となると考えられるが、温度、圧力および振動に関するセンサーとしての基本特性について調べる必要がある。また、可視の光源波長に合わせたセンサー用の可視単一モードファイバあるいは多モードファイバの設計も必要である。更に、各種光センサーに必要な特性についての要求条件を明らかにし、本センサーの適用の可能性について明らかにする。また、将来的には、このセンサーを用いた各種セキュリティおよびヘルスマonitoringの領域へのセンシングの実用化を目指している。

2. 研究の目的

光ファイバセンサーは、電磁誘導の影響を受けず、しかも、光ファイバが低損失であることより遠隔でセンシングが可能であるため、最近光ファイバセンサーが盛んに研究されている。本研究は、このような特徴を有する光ファイバセンサーとして、ネジと熱収縮チューブと光ファイバからなる簡単に作製可能な機械式長周期ファイバグレーティング (MLPFG: mechanical long period fiber grating) を申請者が提案している。本研究は、この申請者が提案している MLPFG を用いた光ファイバセンサーの特性の解明とそれを利用した低価格なセンシングシステムへの適用性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

可視の MLPFG の温度および圧力に対するセンサーの特性を明らかにするとともに、振動に対する MLPFG の特性を明らかにする。この可視 MLPFG を用いた光ファイバセンサーの圧力および温度と減衰特性の関係を明確にする。更に、熱収縮チューブを用いた MLPFG 小型センサーを作製し、偏光依存性について明らかにするとともに MLPFG の偏波依存性損失 (PDL) に関しても明らかにし、この偏光依存性を制御する方法についての検討を行う。この偏波特性を明確にすることにより、この PDL 特性を利用した振動センサーへの適用についても明らかにする。これらの課題を検討することにより、可視域の MLPFG 小型センサーの各種セキュリティおよびヘルスマonitoringへの応用の適用可能性について見出すことができるものと考えられる。

4. 研究成果

(1) 本対象の MLPFG の概要

図1に、本研究対象の MLPFG の構造を示す。図1(a)は、模式図を表す。図1(b)は実際に作製した MLPFG の写真を示す。図に示されているように、光ファイバと規格が決められている M ネジを熱収縮チューブに入れて、熱収縮チューブを加熱して収縮し常温に戻ると、光弾性効果によ

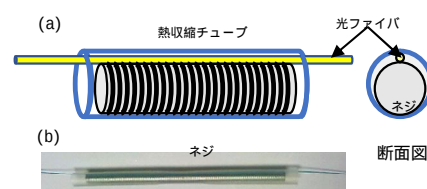


図1 MLPFG の概要 (a)模式図、(b)写真

ってネジの周期に依存した屈折率の周期構造が形成され MLPFG が作製できる。この時の MLPFG の透過特性を図 2 に示す。図からわかるように、減衰量大きい波長 λ_i および λ_{i+1} があるのがわかる。この波長を共振波長と呼ぶ。共振波長 λ_p は次式で記述できる。

$$\lambda_p = \Lambda(n_{co} - n_{cl}^m) = \Lambda \Delta n_{eff} \quad (1)$$

ここで、 Λ は MLPFG のグレーティングの周期、 n_c および n_{cl}^m は、それぞれコアモードおよび m 次のクラッドモードの実効屈折率を表す。式(1)からわかるように、共振波長は、グレーティング周期あるいはコアおよびクラッドモード間の実効屈折率差を変化させることで制御できることがわかる。本研究では、図 1 に示す MLPFG の特性およびアプリケーションに関して検討を行った。

(2)MLPFG の偏光依存性

Jones matrix を用いた、MLPFG の透過光スペクトルの偏光依存性をあらわす簡単なモデルを提案した。このモデルの妥当性を明らかにするために、プレート、ネジとおもりを用いて単純な MLPFG を構成し、おもりの重さに対する透過光スペクトルの変化を測定した。この測定結果と提案モデルによる数値計算結果を比較した。図 3 に印加圧力に対する MLPFG 透過光スペクトルの測定結果および数値計算結果を示す。図 3(a) は x-、y-の各固有偏光モードを入射した時、(b) は白色光源を入射した時の透過スペクトルの測定結果および数値計算結果を示す。実線および点線は、それぞれ実測結果および数値計算結果を表している。数値計算結果と測定結果は、減衰ピーク波長の近傍で、よく一致しており、提案モデルの妥当性を明らかにした。MLPFG の透過特性は、印加圧力と MLPFG の測定スペクトルから得られた結合係数との関係を用いて容易に推定でき、提案されたモデルを用いて共振波長周辺のスペクトルを推定できることを明らかにした。

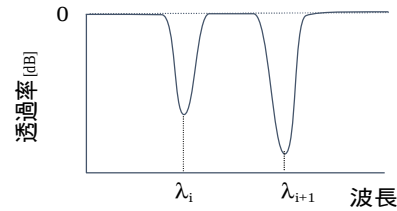


図 2 MLPFG の透過特性

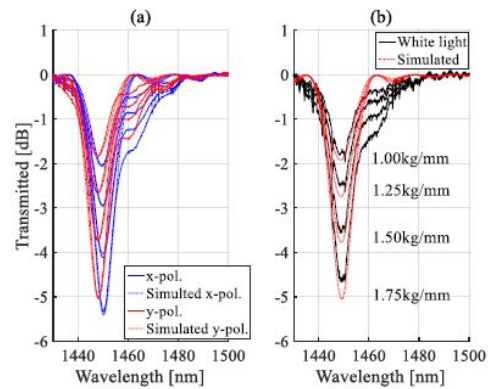


図 3 MLPFG の透過スペクトル

(3)短波長 MLPFG の基本特性

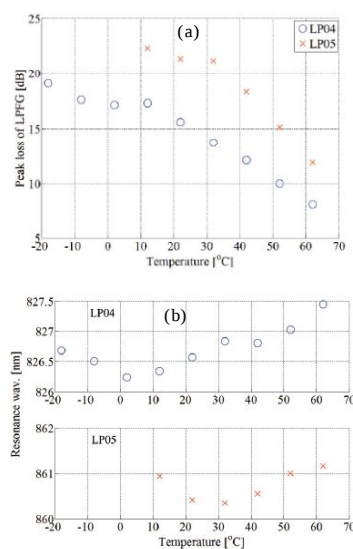


図 4 LPFG の温度に対する透過特性 (a) 温度と損失の関係、(b) 温度と共振波長の関係

熱収縮チューブとねじとカットオフ波長が 600nm の単一モードファイバを用いて LPFG を作製し、この LPFG の透過特性の温度依存性を測定した。周期の異なる 2 つの MLPFG の各共振波長および共振波長の減衰量と温度の関係について調べた結果を図 4 に示す。MLPFG1 および MLPFG2 の周期は、それぞれ 0.7mm と 1.25mm であった。共振波長は、低温領域ではチューブの圧力の影響が、高温領域ではネジの線膨張の影響がそれ

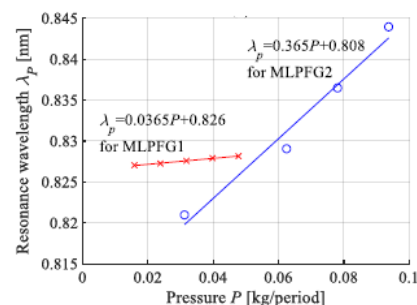


図 5 圧力と共振波長の関係

ぞれ支配的になった結果、温度が高くなるにつれて減少し、ある温度以上では増加することがわかった。この LPFG の共振波長の温度変化のメカニズムについても明らかにした。

周期の異なる 2 つの MLPFG の印加圧力と共振波長の関係を明らかにした。実験結果を図 5 に示す。図より周期 1.25 mm の MLPFG の共振波長の温度に対する変化量 ($d\lambda_p / dP$) は、0.7 mm の MLPFG に比べて約 10 倍大きいことを実験的に明らかにした。

(4) センサー用ファイバの検討

光弾性効果を利用して作製された MLPFG の透過特性のモデルを提案した。光弾性効果を利用した MLPFG の透過特性の実験結果と提案モデルによる数値計算結果との傾向が良く一致することを確認した。また、0.8 μm 帯および 1.55 μm 帯で利用する MLPFG の透過特性を計算し、両者の特性を比較した。その結果、0.8 μm 帯の LPFG の方が 1.55 μm 帯の LPFG より、屈折率変動量に対して、結合係数の変化が大きいことを確認した。光弾性効果により作製した MLPFG は、動作波長を 0.8 μm 帯にすることでセンサー感度が向上することが分かった。また、グレーティング長 L に対する減衰量の変化も同様に、0.8 μm 帯の MLPFG の方が 1.55 μm 帯の LPFG よりも大きいことをシミュレーションで確認した。

(5) 振動センサーの検討

MLPFG の偏光依存性を利用した振動測定法のセンシングファイバの種類が与える受光感度の

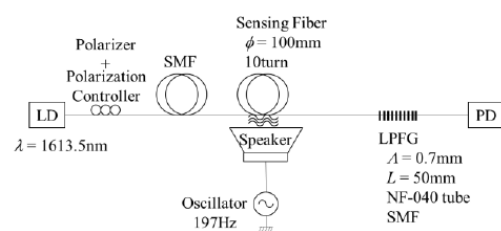


図 6 振動測定系

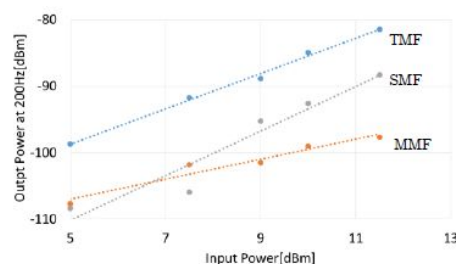


図 7 各センシングファイバと 200Hz の出力の関係

影響について図 6 に示す測定系を用いて実験

を行った。センシングファイバとしては、マルチモードファイバ (MMF)、2 モードファイバ (TMF) およびシングルモードファイバ (SMF) の 3 種類を対象とした。図 6 に示すように、スピーカーからセンシングファイバに振動を与えており、その振動周波数は 200Hz であった。フォトディテクター (PD) で測定された時間波形をフーリエ変換し、入力パワーと 200Hz の振動周波数成分パワーの関係を図 7 に示す。この結果より、信号光パワーが弱いときは TMF、MMF、SMF の順に、パワーが強いときは TMF、SMF、MMF の順に、PD で受光される 200Hz の振動周波数成分が大きいことがわかった。また、入力パワーに対する出力パワーの傾きは MMF、TMF、SMF の順で大きいことがわかった。この原因については、更に検討が必要である。

(6) カスケード MLPFG の基本特性と応用

2 つの MLPFG をカスケードした MLPFG の印加圧力による損失と共振波長の特性を検討した。グレーティング周期 1.25 mm の MLPFG を 2 つカスケードした系と、グレーティング周期 1.25 mm および 0.7 mm の MLPFG をカスケードした系で、圧力に対する共振波長と共振波長での損失の特性を測定し比較した。圧力に対する損失特性はどちらの系もほぼ同じであった。一方、図 8 に示すように圧力に対する共振波長の変化はグレーティング周期 1.25 mm の MLPFG を 2 つカスケードした系のほうが約 6.6 倍大きいことを実験的に明らかにした。また、同じ MLPFG を 2 つカスケードした系を用いた振動測定法を提案した。この振動測定法は、PDL を利用したものより感度が高いことを明らかにした。

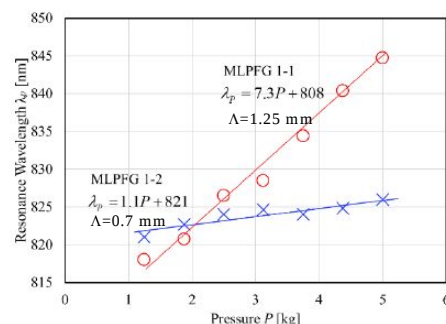


図 8 印加圧力と共振波長の関係

(7) ガス圧センサーへの応用

熱収縮チューブとねじを用いた MLPFG を作製し、簡単なガス圧の測定法を提案した。ガス圧測定のためのセンサー構造を図 9 に示す。図 10 に示すようにガス圧は MLPFG の共振波長の損失に大きく依存することを明らかにした。この原因は、MLPFG におけるグレーティングの結合係数が空気圧に比例するため

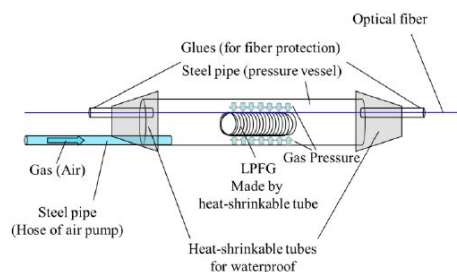


図 9 ガス圧センサーの構造

であることも明らかにした。

(8) TMF を用いた LPFG による広帯域モードコンバータの設計

TMFを用いたLPFGによるLP₀₁モードとLP₁₁モード間の広帯域モードコンバータの設計に関する検討を行った。広帯域モードコンバータとしてのLPFGの位相整合条件を満足するTMFのファイバパラメータを明らかにした。このパラメータを有するTMFを用いたLPFGの透過スペクトル特性を計算し、モードコンバータの帯域幅が500nmとなることを明らかにした。また、グレーティング周期の変化に対する3dB帯域幅の変化についても明らかにし、TMFを用いたLPFGで広帯域モードコンバータを実現可能であることを確認した。

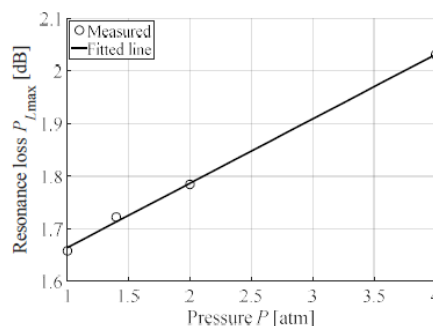


図 10 ガス圧と共振波長の損失の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) Y. Tsutsumi, T. Hase, M. Ohashi, Y. Miyoshi, H. Kubota, "Model for estimating the properties of mechanically induced long-period fiber grating based on polarization and applied pressure," IEICE Commun. Express, 査読有, Vol. 6, No. 9, pp. 554-559, 2017. DOI: 10.1587/comex.2017XBL0090
- (2) Y. Tsutsumi, M. Ohashi, and Y. Miyoshi, "Temperature sensing using an optical time domain reflectometer and mechanical long-period fiber gratings fabricated from a heat-shrinkable tube," IEICE Commun. Express, 査読有, Vol. 6, No. 2, pp. 103-108, 2017. DOI: 10.1587/comex.2016XBL0189

〔学会発表〕(計 17 件)

- (1) 三田浩基, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "可視域単一モードファイバを用いた LPFG の特性," 電子情報通信学会 関西支部 第 23 回 学生会研究発表講演会, 2019.
- (2) 長谷隆弘, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "SMF を用いた 850 nm 帯カスケード MLPFG の圧力印加による損失および共振波長特性," 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, 2018.
- (3) 北原健太, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "短波長帯の LPFG の透過特性," 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, 2018.
- (4) 塩路基之, 久保田寛和, 大橋正治, 三好悠司, "TMF を用いた LPFG による LP₀₁, LP₁₁ 間の広帯域モード変換器に関する検討," 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, 2018.
- (5) 新堂由依, 堤康弘, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "LPFG の偏光依存性損失を利用した振動計測," 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, 2018.
- (6) M. Shioji, H. Kubota, M. Ohashi and Y. Miyoshi, "A broadband mode converter from LP₀₁ to LP₁₁ modes based on a long-period fiber grating using a two-mode fiber," Asia Communications and Photonics Conference ACP2018, Su1B.5, October 26-29, 2018.
- (7) K. Kitahara, Y. Tsutsumi, T. Hase, M. Ohashi, H. Kubota, and Y. Miyoshi, "Transmittance modeling of long-period fiber gratings based on the photo-elastic effect," The 23rd Opto-Electronics and Communications Conference OECC2018, P2-06, July 2-6, 2018.
- (8) Y. Shindo, Y. Tsutsumi, T. Hase, M. Ohashi, Y. Miyoshi, and H. Kubota, "Vibration monitoring based on the polarization dependent loss of long period fiber gratings," The 23rd Opto-Electronics and Communications Conference OECC2018, P2-04, July 2-6, 2018.
- (9) 新堂由依, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "熱収縮チューブを用いた LPFG による振動計測," 電子情報通信学会関西支部 第 23 回学生会研究発表講演会, 2018.
- (10) 北原健太, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "光弾性効果による LPFG の透過特性のモデル化," 電子情報通信学会関西支部 第 23 回学生会研究発表講演, 2018.
- (11) 長谷隆弘, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "SMF を用いた 850nm 帯 MLPFG の圧力印加による共振波長特性," 電気関係学会関西連合大会, 2017.
- (12) 長谷隆弘, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "熱収縮チューブを用いた 800 nm 帯 LPFG の温度特性," OFT 研究会, 2017.
- (13) T. Hase, Y. Tsutsumi, M. Ohashi, H. Kubota, and Y. Miyoshi, "Resonance wavelength sensitivity due to pressure and temperature changes for mechanically-induced long period fiber grating in the 850-nm wavelength range," ACP2017, Su1L.7, Nov. 10-13, 2017.

- (14) Y. Tsutsumi, T. Hase, M. Ohashi, Y. Miyoshi, and H. Kubota, "Low-cost temperature sensors using mechanical long period fiber grating in 850 nm-wavelength range," OECC2017, S1593, Jul.31-Aug.4, 2017.
- (15) 長谷隆弘, 堤康宏, 大橋正治, 久保田寛和, 三好悠司, "熱収縮チューブを用いた LPFG センサーの基本特性," 電子情報通信学会関西支部学生会, 2017.
- (16) 堤康宏, 大橋正治, 三好悠司, 久保田寛和, "機械式長周期ファイバグレーティングの偏光依存性モデル," 電気関係学会関西連合大会, 2016.
- (17) Y. Tsutsumi, M. Ohashi, Y. Miyoshi, and H. Kubota, "Optical gas pressure sensor with long period fiber grating fabricated with heat-shrinkable tube," ACP2016, AF3C.5, Nov.2-5, 2016.