## カスケード型長周期光ファイバグレーティングを用いた 高感度固体振動センシング

Highly sensitive mechanical vibration sensing by using cascaded long period fiber grating 防衛大学校 通信工学科 竹内誠, 〇月田統, 田中哲,

## 手倉森新伍, 内村良太郎, 和田篤, 髙橋信明

National Defense Academy Makoto Takeuchi, Osamu Tsukida, Satoshi Tanaka, Shingo Tekuramori, Ryoutarou Uchimura, Atsushi Wada, Nobuaki Takahashi E-mail: em51015@nda.ac.jp

これまでわれわれは、長周期光ファイバグレーティング (LPG) を用いた固体振動センサなどの各種センサを提案し, それらの高性能化に関する検討を行ってきた<sup>[1-3]</sup>. 特に強度変 調方式に基づく LPG 振動センサにおいては、1本の光ファイ バに同一の LPG を 2 つ縦続に形成したカスケード型 LPG を検 出素子として利用することで、センサシステムの応答度の向上 が可能であることを実験的に提示した[2,3]. 本研究では、カス ケード型 LPG を検出素子とした高感度な固体振動センシング を目的とし、微小振動計測実験を行った. 実験では、検出可能 な最小振動に着目し, 高感度な固体振動センシングに関して検 討を行った.

図1に示すようにカスケード型 LPG は1本の光ファイバに 同一条件で作製した2つのLPGが間隔(D)をあけて構成され、 LPG のモード間の結合を利用したマッハ・ツェンダ型の干渉計 を光ファイバ内に形成している. LPG では, コア (LPol) およ びクラッドモード(LP<sub>0m</sub>)間に結合が生じ、次式で表される位 相整合条件を満たす特定の波長  $(\lambda_p^{(m)})$  において損失ピーク (図 2:破線) が現れる.

$$\mathcal{A}_{\mathrm{p}}^{(m)} = (n_{\mathrm{core,eff}} - n_{\mathrm{cladeff}}^{(m)}) \Lambda \tag{1}$$

ここで、 $n_{\text{core, eff}}$ 、 $n^{(m)}_{\text{core, eff}}$ は、コア、およびm次のクラッドモ ードに対する実効屈折率、 $\Lambda$ はグレーティング周期である.し たがってカスケード型 LPG への入射光は,入射側 (1つ目) の LPG においてコア、およびm次のクラッドモードに分岐され る. 分岐された光波は各モードで間隔(D)を伝搬したのち, 出射側(2つ目)のLPGにおいて再結合を生じる. その際, 各 モードで伝搬した光波には位相差が生じている. ゆえに入射光 に対する透過率スペクトルには、図2(実線)で示すように、 干渉効果による急峻なチャネルスペクトルが現れる[4].

このようなファイバを振動センサとして用いる場合, 透過率 スペクトルが、振動によって波長方向にシフトすることを利用 している. 本研究では、このスペクトルシフトを透過光の強度 として検出する強度変調方式に基づいてセンサシステムを構 築した. 図3に本方式の原理を示す. 本方式では, 透過率スペ クトルの傾斜部に、レーザのような狭帯域光源を同調させる. 振動のような動的ひずみに応じて透過率スペクトルが波長方 向にシフトすると、光源の入射波長おける透過率が変化するた め、振動を透過光の強度変化として検出することができる. ま た,本方式におけるセンサの感度は,透過率スペクトルの傾斜

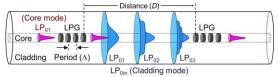


図1 カスケード型 LPG の概念図

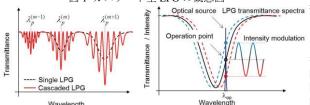
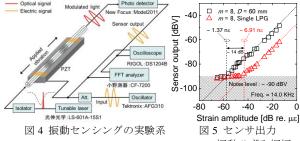


図2透過率スペクトルの概念図 図3強度変調方式の原理



vs. 振動ひずみ振幅

部の傾きと, ひずみに対する透過率スペクトルの波長シフト量 に比例するため $^{[1]}$ ,カスケード型 LPG の急峻なスペクトル形状 を利用することで、センサシステムの高感度化が期待できる.

実験では、カスケード型 LPG について透過率スペクトルの ひずみに対する依存性を評価したのち, 振動センシングの実証 実験を行った. 静ひずみ実験では, 透過率スペクトルが形状を ほぼ一定に保ったまま, 印加ひずみにほぼ比例して長波長側に シフトすることを確認し、透過率スペクトルの波長シフトの静 ひずみ依存性はm=6, 8のものに対してそれぞれ 0.61 pm/με, 2.3 pm/με と見積もられ、高次のクラッドモードの方がひずみ 対する依存性が高く、ここでは高次 (m=8) のひずみ依存性 が低次 (m=6) のものに対して約2.7倍の値を示した.一方, ひずみ依存性の LPG 間隔 (D) による違いは、ほとんど確認さ れず、単一およびいずれのカスケード型 LPG においても同程 度の値を示した.

振動センシングの実証実験では、図4に示すように、作製し たカスケード型 LPG、波長可変レーザ、圧電素子 (PZT)、発 振器、光検出器、オシロスコープ、および、FFT アナライザを 用いて実験系を構成した. カスケード型 LPG の両端を PZT に 接着し、発振器からの正弦波電圧(周波数 14.0 kHz) により PZT を駆動し、光ファイバの長さ方向に対して動的ひずみ、す なわち振動を印加する. 印加振動に応じて強度変調を受けた入 射光は光検出器で電気信号に変換されたのち, オシロスコープ および FFT アナライザにより実時間で振動に応じたセンシン グ信号が観測される. 図 5 に PZT への印加電圧から見積った センサへの振動ひずみ振幅に対するセンサ出力の依存性を示 す. ここでは、m=8、D=60 mm のカスケード型 LPG を用い た結果を示しており、比較のため、単一の LPG を用いた結果 についても併せて示してある. 図に示すように、振動ひずみ振 幅に対してセンサ出力が線形応答を示しているとともに, LPG をカスケード型にすることにより, 応答度の改善, ならびに検 出可能な最小振動ひずみの向上が確認できる. また, 本研究で 試作した最も高感度であったm=8,D=60mmのカスケード 型 LPG を検出素子として用いた実験においては、約1.4 nsの 微小振動ひずみが検出可能であり、カスケード型 LPG を用い た高感度な固体振動センシングが可能であることを実験的に sity modulation 明らかにした.

## 参考文献

- [1] 田中 他: 第71回秋季応物予稿集(6a-M-9), 05-150 (2010).
- [2] 竹内 他: 第 73 回秋季応物予稿集(13p-C-6), 05-126 (2012).
- [3] 月田 他: 第74回秋季応物予稿集(17p-A8-7), 05-118(2013).
- [4] B. H. Lee and J. Nishii: Appl. Opt. 38, 34501 (1999).