

CO₂ レーザー加工による長周期ファイバーグレーティング 温度分布センサー

勝山 豊・小山 長規

Optical Fiber Sensing LPFG Temperature Distribution Sensor Fabricated by CO₂ Laser

Yutaka KATSUYAMA and Osanori KOYAMA

A multiplexed long-period grating (multi-LPG) sensor was investigated and fabricated by a CO₂ laser for distributed sensing to detect abnormal high temperatures of a nuclear power generator and a large-scale chemical plant. To fabricate the multi-LPG sensor, a carved LPG was introduced for easy fabrication of the multi-LPGs with different resonant wavelengths in a similar loss spectrum. It was investigated experimentally how the CO₂ laser beam is scanned for the carving. As a result, the carved LPG could be fabricated and the resonant wavelength could be shifted successfully for the distributed sensor.

Key words: long-period fiber grating, distributed sensor, temperature sensing, carving, CO₂ laser

LPFG (long-period fiber grating) は光ファイバーに数百マイクロピッチのグレーティングを設けたもので、このグレーティングにより散乱された光がクラッドモードとカップリングすることで特定の共振波長で損失のピークが発生する。共振波長は、温度、周囲媒体の屈折率、ひずみなどの外部要因により変化するため、共振波長の変化を測定することで外部要因をセンシングすることができる。LPFGは紫外線照射¹⁾、CO₂ レーザー照射²⁾、周期応力の付加³⁾などにより比較的容易に作成できるため、LPFGの性質や応用について多くの研究がなされている。しかし、LPFGによる分布センシングの研究結果はあまりみられない。一般に、光ファイバーによる分布センシングはブリュアン散乱法⁴⁾により実現され、例えば高精度な温度分布測定が可能なが報告されている。しかし、この方法は微小な後方散乱光を測定するため、検出装置に微小光用の高精度な光部品や高精度な信号処理機能が必要になる。

LPFGで分布測定を行うと、大きい透過光により共振波長を測定するため、測定系が簡易になる利点がある。温度分布測定の対象として、大規模設備、たとえば原子力発電所や化学プラントなどの内部の異常が高温を引き起こす場合が考えられ、高温部を遠隔検出することが大規模設備の安全確保に重要になる。この場合、周囲より数十度から百

度以上の温度差を50 cm～1 m オーダーの分解能でモニターすることになり、要求条件は高分解能より過酷な条件下でのセンシングになる。本来石英は安定な材料で、LPFGはパッシブ動作であるため、センサー部は電力が喪失しても動作する。このように、大規模設備の高温分布センサーとしてLPFGは適した条件にある。しかし、LPFGを分布測定に適用する場合、共振波長が異なる複数のグレーティングを多重する必要がある、これに対応する技術が必要になる。

1. 温度分布センサーとファイバー照削による共振波長シフト

図1に分布センサー用多重LPG (long-period grating) の模式図を示す。長さ ΔL の異なる共振波長 λ_{R1} , λ_{R2} , ...をもつLPGを1心の光ファイバーに多重すると、透過光スペクトルは多重された損失ピーク λ_{R1} , λ_{R2} , ...をもつ。各共振波長の変化を測定すれば、空間分解能 ΔL の分布測定ができる。多重数を増やすには、類似スペクトルをもち、かつ共振波長が少しずつ異なり、シャープなピークをもつLPGを多数作成する必要がある。共振波長を変えるには、グレーティングピッチ Λ を変えて作成することが考えられるが、スペクトル形状が異なるため多重には適さな

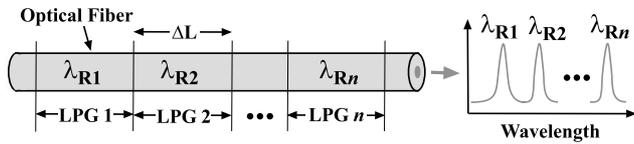


図1 多重LPG温度分布センサー.

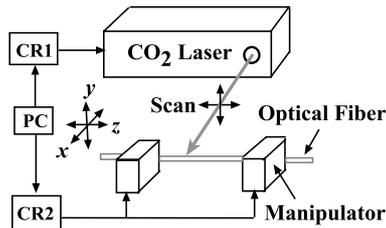


図2 CO₂レーザー光照射システム.

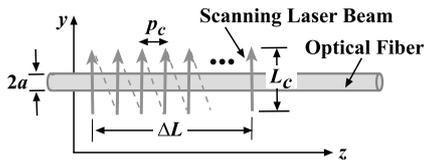


図3 照削用CO₂レーザーのスキャン手法.

い. 筆者らは, CO₂レーザー光でファイバーを照削することで共振波長をシフトさせることを提案⁵⁾し, 分布センサーとしての可能性を示した. 「照削」はレーザー光の照射でファイバー表面を削ることを意味し, ドライブプロセスであるため興味深い. この現象はファイバー表面にCO₂レーザー光で溝を設けてLPGFを作成する論文⁶⁾で報告され, この論文ではcarvingと表現されている. Carvingに対応する適切な訳語が見当たらず, レーザー照射で削るため本論文では照削とよんでいる. 照削の現象はこの論文が唯一の報告であるが, 溝を設けただけである. われわれは, 照削がファイバー表面を削るほどの局所加熱を行っていることに着目し, 加熱・冷却により石英の屈折率変化を生じさせ得ると想定した. この屈折率変化により共振波長をシフトさせ, 分布センサーに適用することを考えた. このため, 一定長の長さによりファイバー表面を照削することを行った.

CO₂レーザー光照射システムを図2に示す. CO₂レーザーは波長10.6 μmの光を出力し, パソコン(PC)によりコントローラー1(CR1)を経由して, 出力パワー, 出射方向とスキャン速度を制御できる. 光ファイバーは微動台に固定し, CR2により3軸方向に移動できる. ファイバーはレーザーのビームウエスト位置に来るよう設定した. ビームウエスト位置でのスポットサイズは0.16 mmである. このシステムで照射条件を設定することで, ファイ

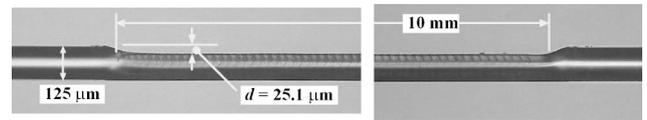


図4 y軸スキャンによる一定長の照削.

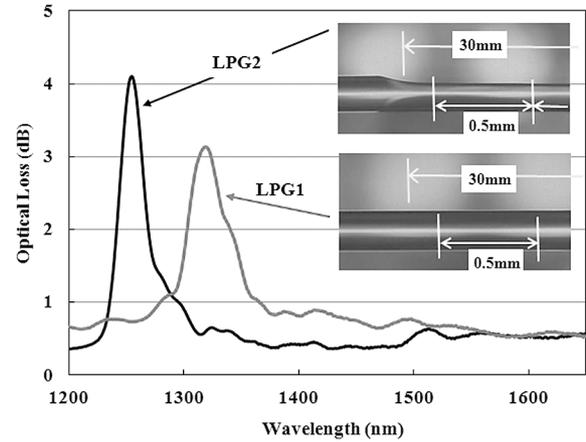


図5 照削による共振波長の変化.

バーの照削とLPG書き込みの両方を行える.

一定長の照削を行う手法を図3のように設定した. CO₂レーザーはy軸方向に長さ L_c だけスキャンし, 次にピッチ p_c だけz軸方向に移動し, 再びy軸方向に長さ L_c だけスキャンする. これを長さ ΔL まで繰り返す. このスキャンを1セットとし, 照削を深くする場合は, 複数回のセットを繰り返す. この手法で照削を行うこととし, 深さを指定したとき, その照削に適したCO₂レーザーの出力パワー P とスキャン速度 V を検討し, 適切な条件を指定することで一定長にわたりファイバー表面を照削できた. 図4に, 10 mm長にわたり照削した写真を示す. 10 mm長にわたりほぼ一定の深さ25.1 μmで照削されていることがわかる. また, 同様に30 mmの長さまで, ほぼ一定の深さで照削できることを確認している.

2. 共振波長の多重

分布センサー用に, 照削による共振波長シフト量を検討した. まず, 照削していないファイバーにピッチ0.5 mm, 長さ30 mmとなるようグレーティングを書き込んだLPG1を作成し, 損失波長特性を測定した. 結果を図5に示す. 使用したファイバーは, 通信用単一モード光ファイバー(ITU規格G.652)である. 次に, 照削を行った後にグレーティングを書き込んだLPG2を作成し, 損失波長特性を測定した結果を図5に合わせて示した. 照削条件は図5に示した場合と同じであるが, 今回は30 mm長まで照削した. グレーティングを書き込むCO₂レーザーの条件は, パワー3.6 W, スキャン速度45 mm/sであり, LPG1, LPG2とも

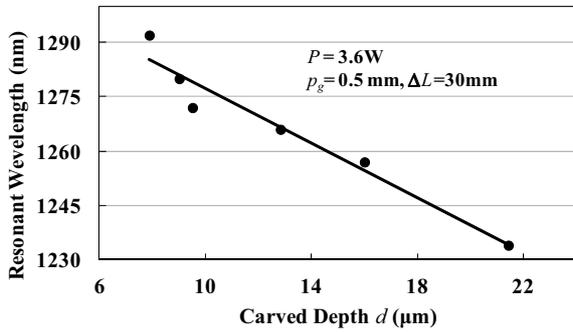


図6 照削深さと共振波長のシフト。

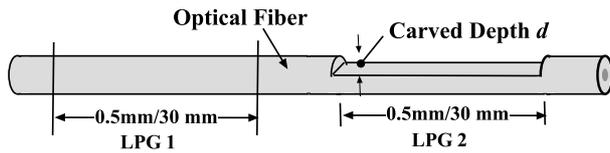


図7 共振波長が異なる LPG の多重。

に同じである。図5に示した結果から、LPG1の共振波長は1318 nmであり、LPG2の共振波長は1255 nmであることがわかり、照削により共振波長を短波長側に63 nmシフトさせられることがわかった。

次に、共振波長のシフト量の照削深さ依存性を測定した。上記のLPG2と同様に照削ファイバーを作成したが、照削時のスキャン速度を変化させ、異なる照削深さのLPG2を作成した。照削部の顕微鏡写真を撮り、深さ d を測定した後に共振波長を測定した。結果を図6に示す。図6の結果から、照削深さ d を大きくすると共振波長のシフトも大きくなった。この結果から、照削深さを変えることで、共振波長のシフト量を変えたLPGを作成できることがわかる。

照削により共振波長をシフトさせることが確認できたため、図7に示すように1心のファイバーにLPG1とLPG2を書き込み、異なる共振波長を多重した。両LPGともにピッチ0.5 mm、長さ30 mmは同じであるが、書き込み時のレーザーパワーは図5の場合より10%大きく、照削時のパワーは10%少なくした。多重したLPGの損失波長特性を測定した結果を図8に示す。1つのスペクトルに2つの共振波長ピークが現れていることがわかり、2つのLPGを1心のファイバーに多重できていることがわかる。LPG1の共振波長は1297 nm、LPG2の共振波長は1274 nmであり、両波長間の差は23 nmであった。図7の結果より、狭い波長間隔で多重できていることがわかる。

温度分布センシングを目的に、CO₂レーザー照射により

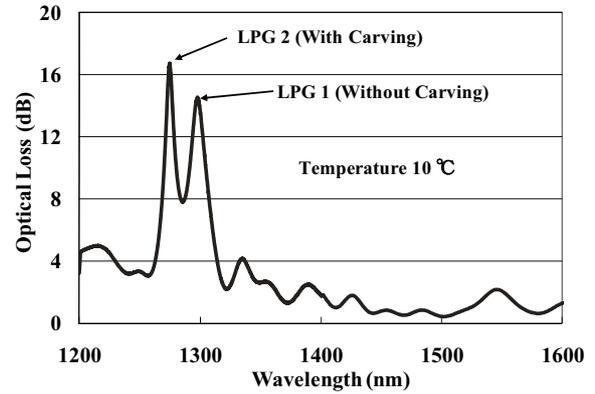


図8 多重LPGの損失スペクトル。

LPGを多重する手法を検討した。多重するために、類似スペクトルをもち、かつ共振波長をシフトさせる手法として、ファイバー表面をCO₂レーザー照射により一定長にわたり照削する新しい手法を取り上げ、非照削LPGと照削LPGを多重したLPGを作成した。照削による共振波長のシフトは、局所加熱によるクラッドの屈折率変化によるものと想定しているが、不明な点もあり、今後さらに検討を要する。また、温度分布センサーとしての適用には、片面の照削による偏光依存性、多重数の増加等が今後の課題である。

文 献

- 1) A. M. Vengsarkar P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan and J. E. Sipe: "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, **14** (1996) 58-65.
- 2) D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, S. G. Kosinski, S. C. Mettler and A. M. Vengsarkar: "Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser beams," *Electron Lett.*, **34** (1998) 302-303.
- 3) C. H. Lin, Q. Li, A. A. Au, Y. Jiang, E. B. Wu and H. P. Lee: "Strain-induced thermally tuned long-period fiber gratings fabricated on a periodically corrugated substrate," *J. Lightwave Technol.*, **22** (2004) 1818-1827.
- 4) T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda: "A technique to measure distributed strain in optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **2** (1990) 352-354.
- 5) Y. Katsuyama, Y. Tokunaga, S. Kasahara, R. Sougen, O. Koyama and M. Yamada: "Multi long-period gratings in a fiber carved and written by a CO₂ laser for distributed sensing," *The International Conference on Optical Fiber Sensors 21* (Ottawa, 2011) 77539L.
- 6) Y.-P. Wang, D. N. Wang, W. Jin, Y.-J. Rao and G.-D. Peng: "Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO₂ laser to carve periodic grooves on the optical fiber," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 151105.

(2012年2月10日受理)