傾斜利用ブリルアン光相関領域反射計による 10 km 遠方での温度分布測定 Distributed temperature sensing based on slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry with over 10 km measurement range

東京工業大学 未来産業技術研究所 ○李 熙永、水野 洋輔、中村 健太郎

FIRST, Tokyo Tech OHeeyoung Lee, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura E-mail: hylee@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)[1]は、光ファ イバに沿った温度や歪の分布を測定する手法の一つであり、 測定光ファイバ(FUT)の片端からの光入射での動作、高 空間分解能、ランダムアクセス機能、低廉性などの利点を 有する。通常の BOCDR は各測定点でブリルアン散乱スペ クトル(BGS)を取得するために周波数を掃引するため、 測定時間が比較的長いという問題点があった。そこで れまでに我々は、BGS の傾斜を利用することで周波数掃引 を不要とする新手法「傾斜利用 BOCDR」を提案し、高速 測定を実現した[2]。

傾斜利用 BOCDR には、高速測定が可能であることに加 理論空間分解能よりも短い歪区間・高温区間に対して も感度を有する(超理論分解能効果)という特徴がある[3]。 これを利用し、ブリルアン分布センサとして世界最短とな る2mmの歪区間の検出を実証した[4]。また、FUTとして プラスチック光ファイバや偏波維持光ファイバを用いて各 種性能を向上させるなど、種々の成果を収めてきた。しか し、それら全ての実験は、FUTの長さが15 m以下の比較 的短距離での測定であり、km オーダの長距離での測定例 -つも報告がなかった。 は-

そこで本発表では、10 km 遠方における傾斜利用 BOCDR の動作を実験的に調査した。まず、参照光に挿入 する遅延線の長さは、最低でも FUT の 4 倍の長さが必要で あることを明らかにした。続いて、超理論分解能効果を活 用し、3mの高温区間の検出に成功した。

2. 実験系

長距離測定のための傾斜利用 BOCDR の実験系を Fig. 1 に 示す。通常の傾斜利用 BOCDR との大きな違いは、参照光路の 構成である。一般に、BOCDR では、測定ファイバ中に0次の 相関ピーク(等光路点)が生じるのを回避するため、参照光 路に遅延ファイバを挿入する[1,2]。短距離測定の場合は、特 に意識をせずに十分に長い遅延ファイバを挿入しておけば、 高次の相関ピークを FUT 中に生成することができた。 しかし 長距離の FUT を用いる場合は、この遅延ファイバの長さを綿 密に計算する必要がある(長距離ファイバの伝搬損失やコス トを踏まえると、遅延ファイバの長さは最低限に抑えたい)。 遅延ファイバを最短とするには 1 次の相関ピークを FUT 中に 生成することになるが、計算の結果、最低でも FUT の 4 倍の 長さが必要であることが明らかになった(紙面の都合で詳細 は省略)

FUT として、今回は 13 km のシリカ単一モードファイバ (SMF)を用いた(先端から11 km だけ離れた3 mの区間に 温度変化を印加)が、この場合、遅延光ファイバは 52 km 以 上の長さとなる(今回は 60 km のシリカ SMF を用いた)。 れほどに長い光ファイバをレーザ光が透過すると、後方ブリ ルアン散乱光の反射などの機構により、透過光にブリルアン 散乱成分が重畳してしまう。参照光に含まれるブリルアン散 乱成分は分布測定とは無関係でありノイズとなるため、遅延 ファイバの後に狭線幅光フィルタを挿入し、ブリルアン散乱 成分を除去した(エルビウム添加光ファイバ増幅器の雑音も 同時に抑制)。これにより、分布測定の信号対雑音比(SNR) を改善させた

また、FUT が比較的短い場合は、誘導ブリルアン散乱 (SBS) の閾値が高いため、入射光パワーは高ければ高いほど分布測 定の SNR も改善した。しかし、FUT が極めて長距離の場合は、 SBS の閾値が低いため、高い光パワーを入射しても手前でその 大部分が反射されて遠方まで届かない[5]。そこで、本実験で は入射光パワーは 10 dBm に抑えた。 なお、 用いた FUT のブ リルアン周波数シフト (BFS) は 10.88 GHz であり、BGS の傾



Fig. 1. Experimental setup of SA-BOCDR with a long FUT.



Fig. 2. Measured power-change distributions around the 3-m-long heated section (23°C, 50°C, and 70°C).

斜部に当たる 10.87 GHz におけるスペクト ルパワーを BFS に関連 付けた。変調振幅は5 GHz、変調周波数は 4.51 kHz から 7.07 kHz まで掃引した。測定レ ンジは 14.5 km、 理論 空間分解能は 41.9 m から 26.7 m であった (測定位置によって変 化)。



Fig. 3. Maximal power-change plotted as a function of temperature. The dotted line is a linear fit.

3. 実験結果

FUT の手前から約 11 km 離れた高温区間付近の BGS の傾斜 パワー変化の分布(拡大図)を **Fig. 2** に示す。温度は 23℃ (室温)、50℃、70℃ と変化させた。高温区間において明瞭 なピークが観測された。超理論空間分解能効果の性質を考慮 すると、得られた波形が矩形でないのは妥当である。また、 この付近での理論空間分解能は28.2 m であったので、その程度の広がりを伴って観測されたことも妥当である。また、高 温区間における最大パワー変化量を温度に対してプロットし たのが Fig. 3 である。測定点数が少なく再測定が必要である が、依存性はほぼ線形であることから、10 km 遠方にて 3 m のホットスポットを検出できたといえる。

なお、通常の BOCDR に測定レンジ延伸法の一つである時間 ゲート法を用いて 21 km 遠方で 3 m のホットスポットを検出 したという報告もあるが[6]、本発表では測定レンジ延伸法は 導入していない。それらの手法を追加で導入することで、空 間分解能を保持したまま測定レンジを更に向上させることも 可能であると考えらえる。

本研究を行うにあたり、東京工業大学の植之原裕行教授に 実験装置をお貸し頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- [1] Y. Mizuno et al., Opt. Express 16, 12148 (2008).
- [2] H. Lee et al., IEEE Photon. J. 8, 6802807 (2016).
- [3] H. Lee et al., Opt. Express 24, 29190 (2016).
- [4] H. Lee et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 058002 (2018).
- [5] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, 1995).
- [6] O. Furukawa et al., IEEJ Trans. Fund. Mater. 137, 52 (2017).