

ブリルアン散乱に基づく光ファイバ型温度計測プローブの空間分解能に関する考察

Spatial resolution of fiber-optic temperature sensing probe based on Brillouin scattering

○戸田 歌音¹、大坪 謙太¹、野田 康平^{1,2}、李 ひよん³、中村 健太郎²、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 工学研究院 ²東京工業大学 未来産業技術研究所 ³芝浦工業大学 工学部

OKanon Toda¹, Kenta Otsubo¹, Kohei Noda^{1,2}, Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Shibaura Institute of Technology

E-mails: toda-kanon-bw@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

長距離かつ軽量で、電磁ノイズの影響を受けにくく防爆性に優れているなどの利点から、多様な光ファイバ型温度センサの研究が推進されている。ここでは、光ファイバの先端付近の温度を計測する技術に注目する。

これまでに、測定光ファイバ (FUT) の先端付近にファイバ・ブラッグ・グレーティング^[1]や長周期ファイバ・グレーティングを描画する手法や、FUT 端面への特殊な加工 (薄膜等によるキャビティ形成やテーパ加工) によりファブリ・ペロ干涉等を生じさせる手法^[2]など様々な方式の温度計測プローブが提案されてきた。しかし、市販の光ファイバを特殊な加工なしで用いて、先端付近の温度のみを低コストに計測する手法は報告されていない。光周波数領域反射計 (OFDR) やブリルアン光時間領域反射計 (BOTDR) などの温度分布計測技術を用いれば FUT の端面付近の温度を選択的に計測することは可能であるが、高コストであった。

このような背景の下、我々は低コヒーレンス (LC-) ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR) の技術を応用し、FUT への特殊な加工を必要とせずに先端付近の温度のみを計測する手法を提案した^[3]。しかし、空間分解能や温度ダイナミックレンジに関する詳細な特性は未解明であった。そこで本研究では、FUT の端面付近で加熱する長さを変化させ、理論空間分解能に対する実際の空間分解能、および、温度ダイナミックレンジとの関係について調査した。

2. 原理

近年、FUT 中のブリルアン散乱の周波数シフトに基づいて温度分布を計測する手法が注目されており、その一つに BOCDR^[4,5]がある。標準的な BOCDR では、狭帯域な半導体レーザを光源に用いる。レーザに正弦波で周波数変調を施した出力光 (参照光) と FUT からのブリルアン散乱光を干渉させ、相関ピーク (測定点) を FUT 中に生成する。次に、変調周波数を掃引することで相関ピークを FUT に沿って掃引し、分布測定を実現する。空間分解能は相関ピーク幅によって決定される (正確な議論は^[5]を参照)。

一方、2022年春に、我々は低コヒーレンス (LC-) BOCDR を提案した^[6]。LC-BOCDR では、ノイズ変調を施した光源を用いる。参照光とブリルアン散乱光の等光路点付近のみでただ一つの相関ピーク (0次) が生成され、測定点となる。参照光路に可変遅延線を設け、0次の相関ピークを掃引し、分布測定を実現する。このとき、空間分解能は光源の可干渉距離 (コヒーレンス長) によって決定される。

ここで、LC-BOCDR の独立した参照光路を撤廃し、**Fig. 1** に示す温度計測プローブを提案した。FUT の先端におけるフレネル反射光を参照光として利用することで、この参照光とブリルアン散乱光の等光路点は FUT の先端となり、先端付近が測定領域となる。これにより、FUT への特殊な加工を必要としない、先端付近の温度のみを選択的に計測可能なプローブが実現できる。

3. 実験

レーザに 7.0 V の直流バイアスを印加し、振幅 0.2 V_{p-p} のノイズを施した (理論空間分解能: 約 26 cm)。測定ファイバとして、長さ 13 m のシリカ単一モードファイバ (SMF) を用い、その一端を切断しコネクタ等の加工が無い状態にした。FUT の先端 60, 50, 40, 30 cm の区間を恒温槽に入れ、25°C から 70°C まで加熱し、ブリルアン利得スペクトル (BGS) を電気スペクトラムアナライザで観測した。

先端付近の 60, 50, 40, 30 cm を加熱した際の BGS およびブリルアン周波数シフト (BFS) の温度依存性を **Fig. 2(a~d)** と **Fig. 3(a~d)** にそれぞれ示す。ただし、先端からのフレネル反射パワーに揺らぎがあったため、**Fig. 2** では BGS のピークパワーを 0 dB に規格化した。温度の上昇に伴い、BGS のピーク付近の成分が高周波側にシフトしたが、加熱範囲を短くしていくと高温時にシフト成分が、温度依存性を示さない成分に埋もれてしまう様子が観測された。BGS のうち FUT 先端付近の温度に依存しない成分は、FUT 先端付近以外で生じた BGS が積算されたものと考えられる。

以上の結果から、ピーク周波数から温度を直接推定する方法で理論空間分解能に近い長さを測定する際には温度ダイナミックレンジが制限されること、すなわち、実際の空

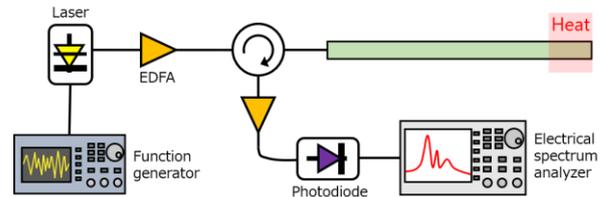


Fig. 1. Experimental setup of the temperature sensing probe.

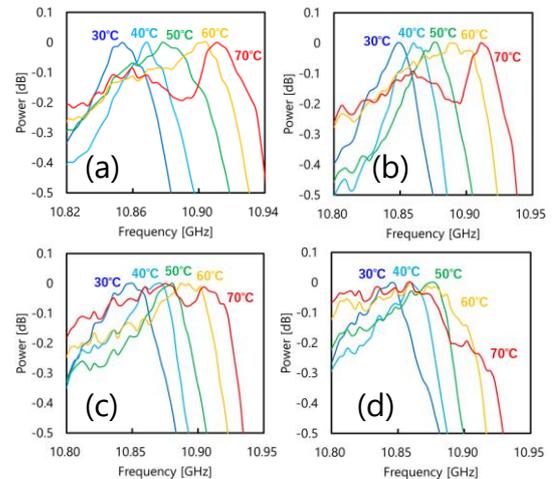


Fig. 2. Temperature dependencies of the BGS, measured when the lengths of the heated sections were (a) 60 cm, (b) 50 cm, (c) 40 cm, and (d) 30 cm at the fiber end.

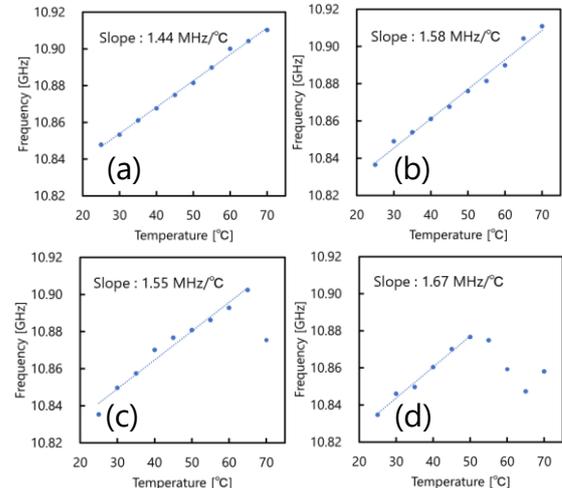


Fig. 3. Temperature dependencies of the BFS, measured when the lengths of the heated sections were (a) 60 cm, (b) 50 cm, (c) 40 cm, and (d) 30 cm at the fiber end.

間分解能と温度ダイナミックレンジにはトレードオフの関係があることが明らかになった。

参考文献

- [1] A. D. Kersey, et al., *J. Lightw. Technol.*, **15**, 1442 (1997).
- [2] R. Correia, et al., *J. Opt.* **20**, 073003 (2018).
- [3] 戸田 他, 2022 秋応物, 23p-C302-16.
- [4] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express*, **16**, 12148 (2008).
- [5] Y. Mizuno, et al., *J. Lightw. Technol.* **28**, 3300 (2010).
- [6] 大坪 他, 2022 春応物, 22p-D215-4.