



高分解能光ファイバー温度センシングシステム

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-10-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 和田, 健司 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10466/00017103

高分解能光ファイバー温度センシングシステム

High-resolution fiber optic temperature sensing system

和田 健司

Kenji Wada

大阪府立大学大学院工学研究科 電子物理工学分野, 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

Dept. of Physics and Electronics, Osaka Prefecture University, 1-1, Gakuen-Cho, Naka-Ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

Abstract : We have constructed a fiber optic temperature sensing system including a gain-switched semiconductor laser as a light source and a 70-m single-mode optical fiber as a sensor. The temperature resolution of this system was estimated to be ca. $1 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$, and was improved in proportion to the number of reciprocations of the optical pulse in the fiber optic sensor. Using this system, we succeeded in monitoring a minute temperature change of $\sim 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ in a thermostat 1 km away from the light source.

Keyword : fiber optic sensor, high-resolution temperature sensor, gain-switched DFB laser, ASE noise, cross-correlation

はじめに

センシングは、対象のシステムを正常に動作させることを目的に補助的に行われることが多い。したがって、高度な新規技術に基づく感度や分解能の向上は望まれるが、実際の応用では、生命に直接かかわる対象や特別な事情がある対象でない限り、センシングにかける費用は抑制される方向にある。そこで、センシングデバイスには、高度に洗練され、かつ安価な市販品であることが求められる。この厳しい要求に対して、光センシング分野では半導体レーザーと光ファイバーが条件を満たしている。1970年（光ファイバー通信の元年）に前者は室温連続発振に成功¹⁾、後者は20 dB/kmの低損失を達成²⁾して以来、ほぼ半世紀が経過し、両者ともに、いわゆる「通常の」と呼ばれる高度に洗練された安価な市販品が存在する。

我々は、まず半導体レーザーの特性を活かしたセンシングシステムの構築を目指した。半導体レーザーは小型で電流注入励起が行えるため、ギガヘルツ帯で電流変調することにより、安価なピコ秒パルス光源として利用できる。ただし、ピコ秒パルスを時間分解できる高速光検出器を用いた直接測定では、検出器側が高価となり安価な光源の利点は薄れてしまう。そこで、高速光検出器を必要としない光干渉計測の光源としての利用を目指した³⁾。干渉計の構成のうち、2つのアームの長さが同程度の場合（自己相関計）、光源の出力形態（パルス光、連続光）によらず、干渉計の出力は光源出力のスペクトル形状によって決定される。こ

の場合、測定における空間分解能の向上を目指すには、連続光出力で広い出力帯域幅を持つSLD（スーパーミネッセントダイオード）の利用が小型・簡便さの点からも有利となる。一方、干渉計の2つのアーム長が異なる場合（相互相関計）、有効な干渉計の出力を得るためには、光源の出力形態はパルス列でなければならない。また、利得変調動作時のパルス列の周期は、変調周波数を変えることにより可変であるため、干渉信号を得る際の時間遅延を電氣的に掃引できる利点もある。このことから、我々は、利得変調した半導体レーザー光源を含む相互相関計を構成し、単一モード光ファイバーの光路長（ $\sim \text{km}$ ）の精密測定を行い、精度 10^{-8} で測定できることを報告した⁴⁾。

上の測定では、温度変化に応じて光ファイバーの光路長が敏感に伸縮し、見積られる光路長が測定ごとに変動した。そこで、光ファイバーをセンサーとして利得変調半導体レーザーと組み合わせる温度センシングシステムの構築をめざした⁵⁾。光ファイバーセンサー⁶⁾は、ファイバーブラッググレーティング（FBG）や干渉計を用いるポイントセンシング^{7,8)}と後方散乱（ブリルアン、ラマン、レイリー）を利用する分布型センシング^{9,10)}に分けられる。前者は、温度変化、振動、ひずみに起因する光ファイバーの長さや屈折率変化を測定することにより、対象の物理量を読み出す。したがって、長い光ファイバーを用いて、これらの微小な変動を長さ方向に積算すれば、物理量測定における高感度化、高分解能化が期待できる。しかし、一般的な応用では、空間分解能の向上を目指して、センサーの

小型化が優先的に図られるため、これとはトレードオフの関係にある物理量測定の高分解能化については犠牲にされることが多い。そこで我々は、温度管理された空間や温度変化の少ない海底等の比較的広い領域における微小な温度変化を測定する応用を想定して、長い（～70 m）光ファイバーを用いた高分解能光ファイバー温度センサーについて検討することにした。

光ファイバー温度センシングシステムの構成

図1に提案する光ファイバー温度センシングシステムの構成を示す。中心波長1,550 nmの分布帰還型半導体レーザー（DFB-LD）を変調周波数1 GHz付近で利得変調することによりピコ秒光パルス（パルス幅～30 ps、平均出力120 μW）を発生させた。変調器の周波数はGPSに同期をとり精度 10^{-12} で安定させた。DFB-LDからの出力パルスをサーキュレーター（CIR）を介して、光ファイバー端面をコーティングした50/50ビームスプリッター（BS）に入射し、その透過光を70 m長光ファイバー（ポビン1巻き）とリトリフレクター（RR）を直列接続した本システムの温度センサー部に導く。RRからの反射パルスのうち再びBSを透過した成分は、光源側からBSで反射された成分との間で干渉し、CIRを介して増幅器付きフォトダイオードとRFスペクトラムアナライザで検出される。システムに含まれる光ファイバーは、全て単一モードタイプを用い、センサー部の光ファイバーはハイトレル被覆付きとした。また、BSからRRまでの光ファイバーセンサー部は恒温槽（AS ONE）内に配置した。

光ファイバー光路長の精密測定⁴⁾に用いた実験構成では、系に含まれる光ファイバーの全長がセンサー部となり、熱源である光源と空間的に分離することができなかった。そこで、図1に示すようにBSを用いることにより、光ファイバーセンサーを光源やその他の光ファイバーと分離している。また、図1の系には測定器も含めて可動部がなく、長期的な維持が可能である。

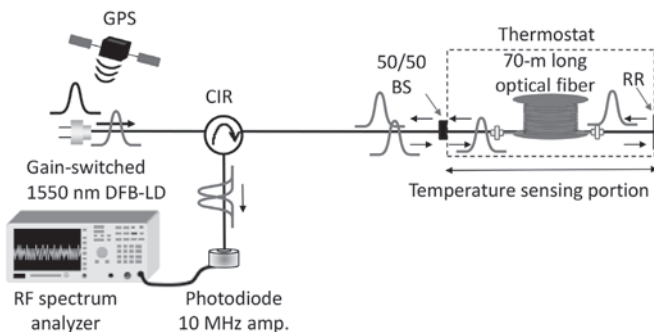


図1 光ファイバー温度センシングシステムの構成

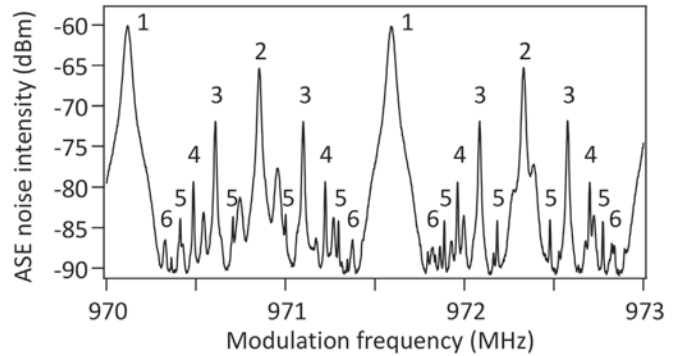


図2 変調周波数掃引した時のASE雑音強度の変化
図中の数字は光ファイバーセンサー内の光パルスの往復回数。

光ファイバー温度センシングの原理

図1の系でDFB-LDの変調周波数を970から973 MHzの範囲で1 kHz間隔で掃引すると、BSで干渉する光パルス間の時間遅延が連続的に変化し、検出器では図2に示す相互相関出力が得られる。相互相関出力を通常の線形検出器を用いて平均すると、遅延差に対して一定強度になってしまうため、一般的には、第2高調波発生に基づく非線形検出器の利用やオシロスコプのピーク検出モードの利用が検討される。しかし、前者では感度が著しく低下し、後者では波形の平滑化に必要な積分時間がかなり長くなるため、ここでは自然放出光（ASE）雑音強度の測定を行った。ASE雑音強度は、非線形検出器による測定と同様に、遅延差に依存して変動し、遅延差ゼロで最大値を持つ⁴⁾。また、線形計測であるため高感度であり、系に光増幅器を導入する必要もない。ASE雑音強度を測定するために、RFスペクトラムアナライザは分解能帯域幅9 kHz、中心周波数7 MHz、ゼロスパンに設定し、狭帯域フィルタとして動作させた。

図2中に記された数字は、光ファイバーセンサー（BS－RR間）内の光パルスの往復回数 m を示しており、6往復まで確認できる。ASE雑音強度ピークが現れる変調周波数 $f_{m,n}$ （ n ：センサー光路長内に存在する光パルスの個数：整数）と近接の $f_{m,n-1}$ を式（1）に代入すると n が求まる。次に、 n と $f_{m,n}$ を式（2）に代入すると、BS－RR間の往復光路長 L に往復回数 m を乗じたセンサー光路長 mL が求まる。

$$n = \frac{f_{m,n}}{f_{m,n} - f_{m,n-1}} \quad (1)$$

$$mL = \frac{nc}{f_{m,n}} \quad (2)$$

ここで、 c は光速である。 mL は周囲の温度変化により敏感に伸縮するため、連続的に mL を測定することにより、温度変化をモニターすることができる。センシングシステムが決定されると n は一定値になるので、温度変化をモニターするには、ASE 雑音強度ピークを与える変調周波数 $f_{m,n}$ を精密に連続測定すればよい。

センシングシステムの温度分解能

1. センサー光路長計測の距離分解能

図 1 中の恒温槽の水温を 40°C 一定に設定した。図 2 に示した $m = 1$ の ASE 雑音強度ピークに対応する変調周波数 $f_{i,n}$, $f_{i,n-1}$ に対して、それぞれの半値幅に相当する周波数範囲を 1 kHz 間隔で周波数掃引し、ASE 雑音強度を測定した。 $f_{i,n}$ に対する結果を図 3 に示

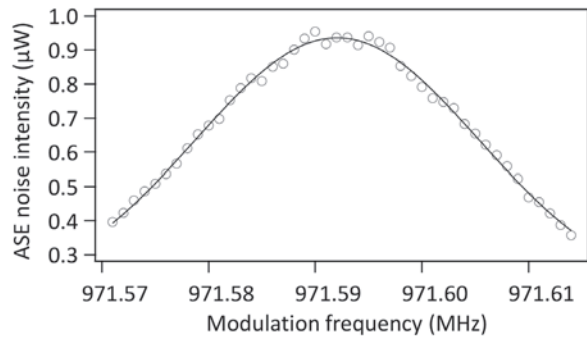


図 3 $m = 1$ のピーク付近で変調周波数掃引した時の ASE 雑音強度の変化実線はガウス関数フィッティング。

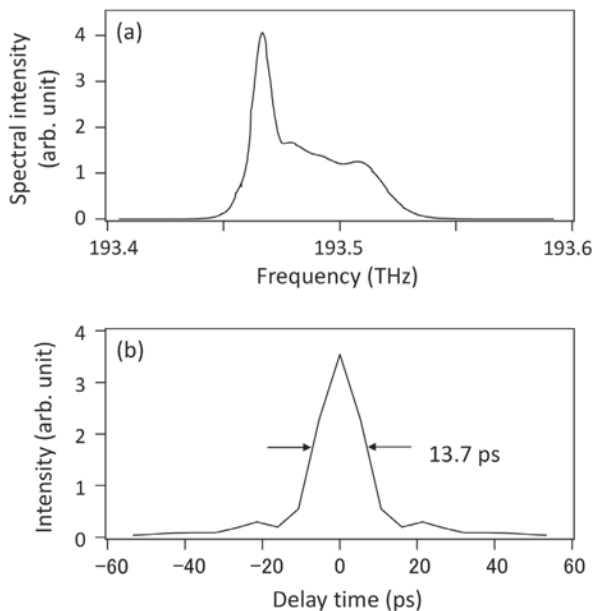


図 4 DFB-LD からの利得変調パルスの (a) 強度スペクトルと (b) それを逆フーリエ変換した自己相関波形の 2 乗形状

す。計 42 点の測定値 (丸) を線形表示し、ガウス関数フィッティング (実線) を行った結果、 $f_{i,n} = 971.592026 \text{ MHz} \pm 58 \text{ Hz}$ を得た。同様に見積った $f_{i,n-1} = 970.118311 \text{ MHz} \pm 69 \text{ Hz}$ とともに式 (1), (2) に代入すると、 $n = 659$ と $L = 203.339699 \text{ m} \pm 12 \mu\text{m}$ を得た。この標準偏差 (距離分解能) は、光源のスペクトル幅と測定時間に依存する。

まず、光源のスペクトル幅について考察する。図 4 に変調周波数 $f_{i,659}$ の時に出力された利得変調パルスの (a) 強度スペクトルと (b) それを逆フーリエ変換した自己相関波形の 2 乗形状を示す。この 2 乗形状は RF スペクトラムアナライザのミキサ出力に対応させている¹¹⁾。図 3 の波形は、変調周波数を変えるごとにパルス波形が異なるため、厳密には相互相関波形ではないが、 $f_{i,659}$ に対する周波数掃引幅の比は 4×10^{-5} であるため、掃引幅内でパルス波形はほぼ同一であり、相互相関波形と見なせる。この場合、測定周波数間隔 (1 kHz) は距離 $206 \mu\text{m}$ に対応し、半値幅では $8446 \mu\text{m}$ となり、これを遅延時間に換算すると 28.2 ps を得る。この半値幅が狭いほど $f_{i,659}$ が精度よく決定され、標準偏差は小さくなる。図 4b の自己相関幅に比べて相互相関幅が広い理由は、DFB-LD からの利得変調パルスには比較的大きい時間ジッターが含まれるためである¹²⁾。したがって、距離分解能を改善するためには、スペクトル幅がより広く、時間ジッターの少ない利得変調半導体レーザーを用いることが望まれる。より安価なファブリーペロー半導体レーザーがこれに相当すると考え、現在調査中である¹³⁾。

次に、測定時間について考察する。図 3 の測定では、各変調周波数に対する測定時間 1 秒を 42 点繰り返しており、 $f_{i,659}$ の値を 1 個得るために 42 秒要する。つまり、70 m 長の光ファイバーセンサーが温度変化に応答し、42 秒間の平均として指示する値が $f_{i,659}$ であり、光ファイバーセンサーは時間的・空間的な平均温度変化を検出している。測定時間の短縮のため、周波数掃引範囲や測定点数の縮小を試みたが、いずれの場合も $f_{i,659}$ 測定における標準偏差は急激に増加した。したがって、高い温度分解能を得るために、標準偏差を小さく維持することを優先し、以降の実験では図 3 の場合と同じく、ASE 雑音強度ピークの変調周波数 1 点を見積る時間は 42 秒に固定した。また、測定時間短縮の観点から、変調周波数を固定し、ASE 雑音強度の変化を測定する手法も考えられるが、標準偏差程度の変動では ASE 雑音強度の変化に反映されないため、この場合は温度分解能が著しく低下することになる。

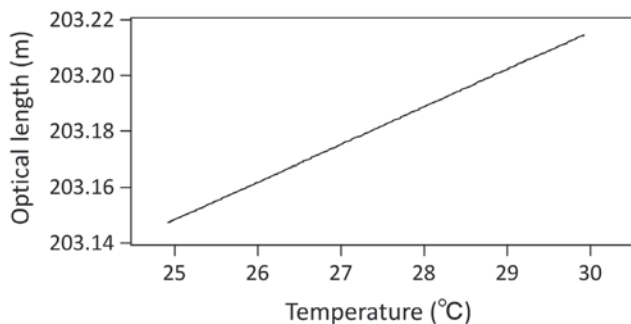


図5 水温とセンサー光路長の関係

2. センサー光路長と温度変化の関係

図3と同じ実験を連続的に行いながら、図1の恒温槽内の水温を25℃から30℃まで2.5時間かけて一定の温度勾配で上昇させ、 $f_{i,659}$ の温度依存性を調べた。図5に水温とセンサー光路長（往復回数 $m = 1$ ）の関係を示す。両者には一次関数の関係が成立し、単位温度当たりのセンサー光路長の伸縮は $13.45 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ であり、これを25℃における光路長（203.147 m）を用いて単位長さ当たりで表現すると $66.2 \text{ } \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ と見積られる。0～50℃の温度範囲で同様の実験を行い、この関係が成立することを確認した。この値はハイトレル被覆なしの素線を用いた場合（ $20.7 \text{ } \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ）の約3倍である。これより、光ファイバーセンサーとしての温度分解能は、前項1の $f_{i,659}$ 測定における標準偏差を用いて、 $8.9 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ （ $12 \text{ } \mu\text{m} / 13.45 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ）と見積られる。

センサー光路長が km 程度に長くなった場合も、標準偏差は図3の結果と同程度であるため⁴⁾、センサー光路長を長くすると、比例して温度分解能が向上し、原理的には $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ や $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ の温度分解能が実現できる。ただし、長い光ファイバーセンサーをポビンに巻き付けた場合、積層構成となるため、応答速度が顕著に低下してしまう。図1のシステム構成を維持し、センサー光路長を実質的に長くするためには、センサー内の光パルスの往復回数 m を増加すればよく、この場合、温度分解能は $(8.9/m) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ で改善される。注意すべきは、温度分解能が向上した場合、半値幅に相当する周波数帯幅が狭くなるため、温度変動が大きい場合には ASE 雑音強度ピークを見失いやすく、連続測定が困難になることである。

温度センシングの例

図6に示すように CIR と BS の間に 1 km 長の光ファイバーを挿入し、センサー部と同様に恒温槽①の中に設置した。室温 24℃ に対して、光ファイバーセン

サーが入った恒温槽②中の水温は 30℃ 一定に設定し、図3と同様の測定を 200 回（140 分）連続して行った。一方、恒温槽①中の水温は、恒温槽②の測定が開始された直後は 33℃ 一定に設定し、恒温槽②での測定が 20 回（14 分）終了するごとに 1℃ ずつ上昇させ、100 回（70 分）終了時に 38℃ に設定した後、残り 100 回の測定中は 38℃ 一定とした。また、恒温槽①及び②内に白金抵抗温度計（温度分解能 $0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、温度精度 $0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ）を設置し、それぞれの温度を連続測定した。

図7に測定結果を示す。恒温槽①内の白金抵抗温度計の指示値の変化（a）は、設定した通り、測定回数 20 回ごとに 33℃ から 1℃ ずつ上昇し、測定回数 100 回で 38℃ に達している。この条件では室温との温度差が大きいため、水温の低下とヒーターによる加熱が頻繁に繰り返されている様子が確認できる。一方、室温に近い 30℃ 一定に設定した恒温槽②では、図7bに示すように白金抵抗温度計の指示値は、測定回数 200 回の間、 $29.96 \text{ } ^\circ\text{C}$ と $29.94 \text{ } ^\circ\text{C}$ の $0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ の温度差（温度分解能に相当）内だけで変動した。この図に、同時に測

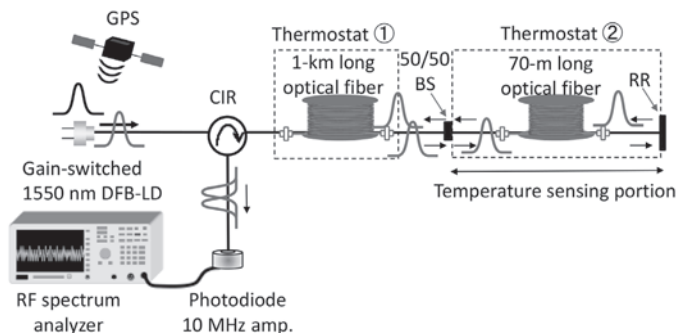


図6 光ファイバー温度センシングの測定系

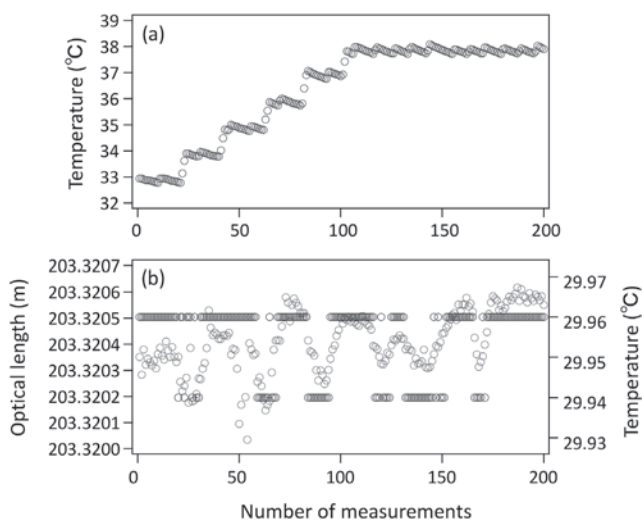


図7 光ファイバー温度センシングシステムによる測定結果 (a) 恒温槽①内の温度の時間変化。(b) 恒温槽②内の温度とセンサー光路長（波線型を示している丸印群）の時間変化。

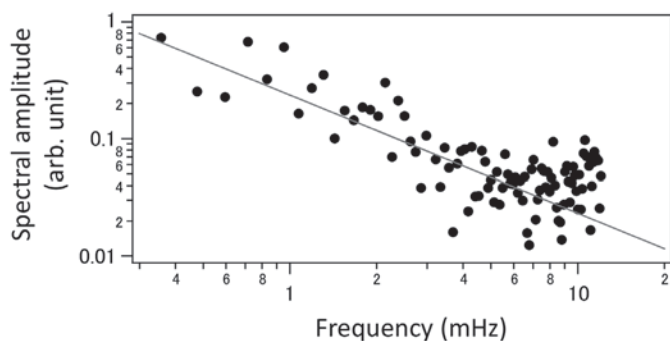


図8 光路長測定データの振幅スペクトル
実線は $1/f$ 特性.

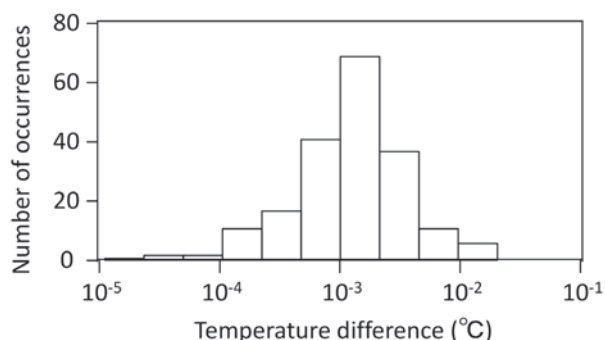


図9 恒温槽内の温度変化量のヒストグラム表示

定した光ファイバー温度センサーの光路長変化（波線型を示している丸印群）を重ねた。プロットの際には、まず始点の光路長を適当な温度（例えば、 29.94°C ）に対応させ、残りすべての光路長を図5の結果を利用して温度に変換した。次に、その変換した温度を四捨五入によって 0.02°C のグリッドに丸めた。この結果を白金抵抗温度計の指示値と比較し、最も良い相関が得られるまで始点の温度を走査した。この手法により、センサー光路長は、白金抵抗温度計の指示値で校正された。図7bの結果より、光源及び観測場所から1 km離れた位置の温度測定において、途中の経路で大きく温度変動がある場合でも、 10^3°C レベルの微小な温度変化を検出できることがわかった。

図8にセンサー光路長の時系列測定データ $L(t)$ をフーリエ変換して得た振幅スペクトルを描く。赤実線の $1/f$ 特性に沿う傾向を示すことから、測定データは白色雑音に埋もれず、恒温槽内の温度変化を反映していることがわかる。また、近接データ間の温度差を基に時系列データを作成し、ヒストグラム表示した結果を図9に示す。この時の温度差の平均値は $1.6 \times 10^3^{\circ}\text{C}$ であった。この値は、センシングシステムの温度分解能に近い値のため、往復回数3回 ($m = 3$) に対応する ASE 雑音強度ピークを利用して温度分解能 $3 \times 10^4^{\circ}\text{C}$ の下で図7bと同じ実験を行った。その結果、得られた平均値は上とほぼ同じ値 ($2.0 \times 10^3^{\circ}\text{C}$) であった。

したがって、使用した恒温槽では、室温との温度差 6°C で42秒間の平均測定を行う条件において、平均 $1.6 \sim 2.0 \times 10^3^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変化が生じることを見積った。

まとめ

利得変調した分布帰還型半導体レーザーを光源とし、70 m長の単一モード光ファイバーをセンサーとする光ファイバー温度センシングシステムを構築した。このシステムの温度分解能は $1 \times 10^3^{\circ}\text{C}$ 程度であり、さらに光ファイバーセンサー内の光パルスの往復回数に比例して温度分解能が改善されることを示した。このシステムを用いて、光源や検出器から1 km離れた恒温槽内の 10^3°C 程度の微小な温度変化をモニターすることに成功した。本研究は、安価な市販品を組み合わせた光システムにより先端的計測を行えるかという問いに対する1つの解を示したと考えている。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP16K06389 の助成を受けて実施した研究成果である。

【参考文献】

- 1) Panish M B, et al.: "Double-heterostructure injection lasers with room-temperature thresholds as low as 2300 A/cm^2 ," Appl. Phys. Lett., 16 (1970) 326-327.
- 2) Kapron F P, et al.: "Radiation losses in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., 17 (1970) 423-425.
- 3) Wada K, et al.: "A gain-switched laser diode as a low-coherence light source," Opt. Commun., 228 (2003) 49-54.
- 4) Wada K, et al.: "Precise measurement of single-mode fiber lengths using a gain-switched distributed feedback laser with delayed optical feedback," Opt. Express, 23 (2015) 23013-23020.
- 5) Ishiguro A, et al.: "High resolution fiber temperature sensor based on precise measurement of long fiber length," Proc. of CLEO-PR2017 (2017) S1682.
- 6) Udd E and Spillman Jr W B (eds): "Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists," (Wiley-Interscience, New York, NY, 2nd Edition, 2006) .
- 7) Uchimura R, et al.: "Fiber Fabry-Perot interferometric sensor using Bragg gratings in polarization maintaining fiber," J. Lightwave Technol., 33 (2015) 2499-2503.
- 8) Wada K, et al.: "Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor," Opt. Express, 19 (2011) 21467-21474.
- 9) Bolognini G and Hartog A: "Raman-based fiber sensors: Trends and applications," Optical Fiber Technol., 19 (2013) 678-688.
- 10) Mizuno Y, et al.: "Recent advances in Brillouin optical correlation-domain reflectometry," Appl. Sci., 8 (2018) 1845.
- 11) Mizutani R, et al.: "Linear cross-correlation measurement of timing jitter in a gain-switched distributed feedback laser," Proc. of CLEO-PR2017 (2017) S1692.
- 12) Wada K, et al.: "Timing and amplitude jitter in a gain-switched multimode semiconductor laser," Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 042702.
- 13) 大前貴寛ほか: "線形相互相関にもとづく光ファイバー温度センシングにおける光源比較," 第79回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 18p-PA4-15 (2018) 03-162.