

コヒーレント OTDR で取得した光ファイバ中のレイリー散乱波形に基づく高精度長距離温度分布測定

東郷 明雄[†] 飯塚 裕太[†] 島野 良介[†] 泉田 史[†]
小山田弥平^{†a)}

Fiber-Optic Distributed Temperature Measurement with Very High Resolution Over Long Range Based on Rayleigh Backscatter Traces Obtained with Coherent OTDR

Akio TOGO[†], Yuta IITSUKA[†], Ryosuke SHIMANO[†], Hisashi IZUMITA[†],
and Yahei KOYAMADA^{†a)}

あらまし 筆者らは先にコヒーレント OTDR で取得した光ファイバ中のレイリー散乱波形に基づくひずみと温度の分布測定法を提案し、非常に高精度な測定が可能であることを示した。本論文では、本測定法の可能性を見極めることを目的として行った実験と数値シミュレーションの結果を報告する。センシング用ファイバを延長しつつ温度の分布測定実験を行い、40 km までのファイバについて距離分解能 1 m、温度精度 0.01 °C による測定を実現した。また、光ファイバのわずかな複屈折及び非線形光学効果（4 光波混合）が測定に及ぼす影響を明らかにした。これらの結果をもとに、本測定法で期待できるひずみと温度の分布測定性能を予測した。

キーワード ファイバセンサ、温度分布測定、ひずみ分布測定、レイリー散乱、コヒーレント OTDR

1. ま え が き

光ファイバは優れた伝送媒体であると同時に優れたセンシング媒体でもあり、これを利用した様々な技術開発が進められている。その中で、光ファイバのセンシング機能と信号伝送機能を融合した分布センシング技術に大きな関心が寄せられている。この種の技術としては、最初にラマン散乱を利用した温度分布測定 [1]、次いでブリュアン散乱を用いたひずみと温度の分布測定 [2]~[4] が提案された。いずれの測定器も 10 年程前から製品化されており、徐々にその応用が広がっている [5]。また、これら技術の高度化に向けた研究開発が現在も活発に進められている。

これに対して、筆者らはレイリー散乱を利用したひずみと温度の分布測定法を提案した [6], [7]。本測定法は高精度な周波数制御が可能な光源を有するコヒーレ

ント OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) を用いて行うもので、先行する 2 方式に比べて高精度な測定が可能である。先に、測定端から 8 km 離れた位置における温度分布を距離分解能 1 m、温度精度 0.01 °C で測定したことを報告したが [8]、この精度は先の 2 方式に比べて 2 けた勝っている。なお、本測定法とは別に、コヒーレント OFDR (Optical Frequency-Domain Reflectometer) で得られるレイリー散乱波形を利用した分布測定法が提案され、高い距離分解能による測定例（測定距離 20 m、距離分解能 5 mm、温度精度 0.3 °C）が報告されている [9]。しかし、この方法では測定光の位相に厳しい条件が課せられることから、長いファイバの測定は難しいと予想される。

本論文では、コヒーレント OTDR で取得したレイリー散乱波形に基づく分布測定法の可能性を見極めるために行った実験と数値シミュレーションの結果を報告するとともに、これらの結果から本測定法で期待できるひずみと温度の分布測定性能を予測する。

[†] 茨城大学大学院理工学研究科, 日立市

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi-shi, 316-8511 Japan

a) E-mail: koyamada@mx.ibaraki.ac.jp

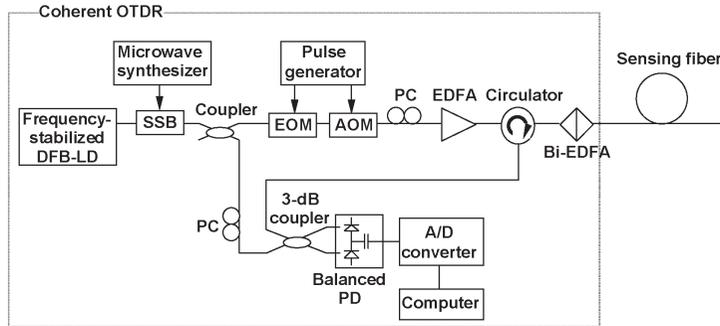


図1 実験に用いた測定系の構成
Fig. 1 Experimental setup.

2. 測定法の概要

光ファイバにコヒーレントなパルス光を入射すると、同光はレイリー散乱を受けながらファイバ内を伝搬し、各点で散乱された光波の一部が少しずつ入射端に戻る。その戻り光パワーを観測すると、散乱光間の干渉によって不規則な波形を呈し[10]、これが光ファイバのひずみと温度の変化に応じて変動する[6], [7]。本論文が主題とする測定法は、このことを利用してひずみと温度の分布測定を行う。

後述する実験で使用した測定系を図1に示す。系の基本構成はコヒーレントOTDRと同じであり、通常のものとの主な相違点はパルス光の周波数を精度良く制御できるようにしたことである。実験ではシアン化水素分子の吸収線を利用して周波数を安定化したDFB-LDを光源とし、本光源から出た連続光をSSB変調器により周波数シフトして所望の周波数を実現している。同変調器からの出力光は2分岐し、一方をEO変調器(EOM)とAO変調器(AOM)でパルス化してセンシング用ファイバへ送り、他方を局発光としている。パルス化にEO変調器とAO変調器を併用した目的は、パルス幅1~10 nsで、消光比の大きい(> 80 dB)パルス光を実現することにある[11]。

センシング用ファイバからの戻り光は、局発光と混合してバランス型PDにてヘテロダイン検波する。光ファイバのわずかな複屈折による散乱波形の偏光依存性[12]、及び局発光・散乱光間の偏光不整合による雑音を除去するために、パルス光、局発光共に偏波制御器(PC)を用いて偏波スクランブルを行いながら平均処理を行う。インラインに双方向のファイバ増幅器(Bi-EDFA)を入れた目的は、サーキュレータを含む受信光学系の損失の補償と、局発光パワーが十分では

ない場合の熱雑音による受光感度の低下を防ぐためである。なお、本測定系と先の報告[8]の測定系との相違点は、Bi-EDFAを加えたこと、3 dBカプラをサーキュレータ(EDFAとBi-EDFAに挟まれている)に置換えたこと、及びA-Dコンバータとコンピュータ間のデータ転送を高速化して平均処理回数を1,000から150,000に増したことである。

ひずみ・温度分布の測定は以下の手順で行う[8]。まず、ある時点(T_a とする)において、パルス光の周波数 ν をステップ掃引しつつOTDR測定を繰り返し行い、レイリー散乱光パワーを周波数 ν と入射端から散乱点までの距離 z の関数 $p_a(\nu, z)$ として記録する。ここで、 z はパルス光の入射から散乱光が戻るまでの時間より換算して決める。次に、その後のある時点(T_b とする)において同様の測定を行い、散乱光パワーを $p_b(\nu, z)$ として記録する。 T_a 時点から T_b 時点に至る間に光ファイバ中のひずみと温度の分布が変化しない場合には、 $p_a(\nu, z)$ と $p_b(\nu, z)$ は一致する。これに対して、変化がある場合には、 (ν, z) 平面上における散乱光パワーの分布が ν 軸に沿って $\Delta\nu$ だけシフトする。ひずみ変化量 $\Delta\epsilon$ 及び温度変化量 ΔT に対応する周波数シフト量 $\Delta\nu$ は概略次式で与えられる[13], [14]。

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx -0.78 \times \Delta\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx -(6.67 \times 10^{-6}) \times \Delta T \quad (2)$$

ここで、 ν_0 は光周波数の代表値である。 $\Delta\nu$ を求めるために、 $p_a(\nu, z)$ と $p_b(\nu, z)$ の周波数軸上における相関関数 $R_{ab}(f, z)$ を次式で求める。

$$R_{ab}(f, z) = \frac{\sum_{i=1}^K (p_a(\nu_i, z) - \bar{p}_a(z))(p_b(\nu_i + f, z) - \bar{p}_b(z))}{\left\{ \left(\sum_{i=1}^K (p_a(\nu_i, z) - \bar{p}_a(z))^2 \right) \times \left(\sum_{i=1}^K (p_b(\nu_i + f, z) - \bar{p}_b(z))^2 \right) \right\}^{0.5}} \quad (3)$$

ただし,

$$\bar{p}_x(z) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_x(\nu_i, z), (x = a, b) \quad (4)$$

ここで, K は相関をとる周波数範囲におけるデータ数である. 上述の議論より, T_a 時点と T_b 時点の間に光ファイバ中のひずみと温度の分布が変化しない場合には, $R_{ab}(f, z)$ は $f = 0$ で最大となる. 一方, 変化した場合には $f = \Delta\nu$ において最大値をとる. したがって, $R_{ab}(f, z)$ のピーク周波数からひずみまたは温度の変化に対応する周波数シフト $\Delta\nu$ が得られ, これより式 (1) または (2) を使用してひずみ変化量 $\Delta\varepsilon$ または温度変化量 ΔT を知ることができる.

3. 実験結果

3.1 温度分布の測定結果

図 1 に示した測定系において, DFB-LD 光源の発振周波数は 193.10774 THz, 長期安定度は ± 5 MHz, 線幅は 3 MHz である. 同光源から出た連続光の周波数を SSB 変調器により 50 MHz ステップで 500~2450 MHz 掃引した. センシング用ファイバに入射するパルス光の幅は 10 ns, ピークパワーは 70 mW, 受信器の帯域幅は 100 MHz, A-D 変換器のサンプリング間隔は 0.5 ns (距離分解能 5 cm に相当), Bi-EDFA 利得は 6 dB である. 一回の測定において 40 の OTDR 波形を周波数掃引しつつ取得した. 各 OTDR 波形の取得に際して 15 万回の二乗平均処理を行い, この間, 偏波制御器によりパルス光及び局発光を偏波スクランブルした.

センシング用ファイバの構成を図 2 に示す. ファイバ端 Z_1 を測定系内 Bi-EDFA の出力に接続し, 他端 Z_2 を無反射終端して測定した. 使用した機材の記録可能なデータ容量の制約により, 温度分布測定はセンシング用ファイバの遠端 70 m に絞って行った. 図に示し

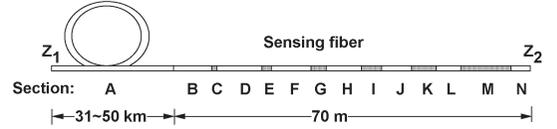
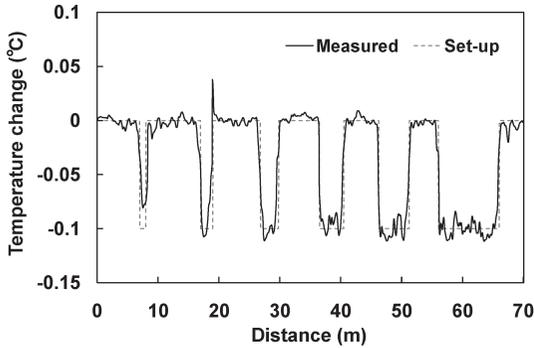


図 2 センシング用ファイバの構成
Fig. 2 Configuration of sensing fiber.

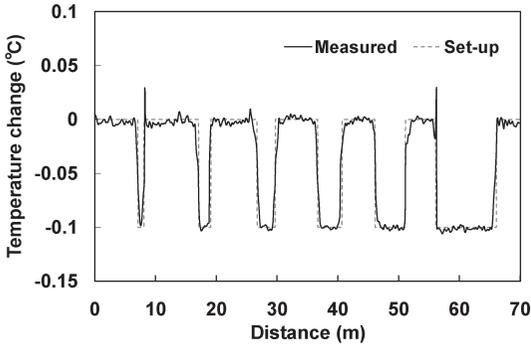
たように遠端部分を 13 の区間 B~N に分割し, 区間 B, D, F, H, J, L, N を恒温器 Ω_1 , 区間 C, E, G, I, K, M を恒温器 Ω_2 に収納した. 各恒温器の温度設定精度は 0.01°C である. まず, 両方の恒温器内の温度を 25°C に設定して 1 回目の OTDR 測定を行い, 次に, 恒温器 Ω_2 の温度を変えて 2 回目の OTDR 測定を行った. センシング用ファイバを 31 km, 40 km, 50 km と延長しながら実験を進めた.

31 km 長のファイバについて温度分布測定を行った結果を図 3 に示す. 同図 (a) はパルス光の偏波スクランブルなし, (b) は同ありで OTDR 波形を取得した場合の結果である. 明らかに (a) は測定誤差が大きい, これは, センシング用ファイバのわずかな複屈折のためにレイリー散乱波形がパルス光の偏光状態によって変わること起因している [12]. OTDR から送出するパルス光の偏光状態を一定にしても (偏波スクランブルなし), ファイバ中における偏光状態を一定に保つことは困難で, 散乱点における偏光状態は 1 回目と 2 回目の OTDR 測定時で異なることがあり, これに上記複屈折の効果が相乗して測定誤差をもたらす. なお, 文献 [15] で報告した結果は (a) と同様の条件下で測定したものである (報告時には偏波スクランブルありで測定したものと考えていたが, 後になって偏波スクランブラの非動作が判明した). 偏波スクランブルを行うことによって複屈折による誤差は除くことができ, (b) においては長さ 1 m の区間 C も含めて測定結果は設定値を良く追従しており, 測定誤差は区間と区間の境界付近を除いて 0.01°C 以内に収まっていることが分かる. 測定値が角 (つ) のような分布を示して設定値から大きく外れている箇所が区間の境界付近で見受けられるが, これは, $p_a(\nu, z)$ と $p_b(\nu, z)$ の相関ピークが雑音等による副次ピークよりも低くなって, 本来のピーク周波数 (周波数シフト $\Delta\nu$) が正しく検出されなかったために生じた誤差である. この誤差は測定器の有効性を損なうものであり, 今後その抑圧に向けた検討が必要である.

40 km 長のファイバについて測定した結果を図 4 に



(a)



(b)

図 3 31 km 長ファイバの遠端部分 70 m における温度分布の測定結果. (a) パルス光の偏波スクランブルなし. (b) 同あり. いずれの測定でも局発光の偏波スクランブルあり.

Fig. 3 Temperature distributions at final 70-m range of 31-km-long fiber measured with (a) polarization-unscrambled pulsed light, and (b) polarization-scrambled pulsed light. The polarization of local oscillator light was scrambled in both cases.

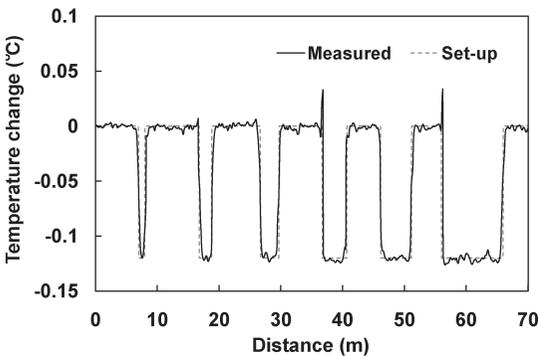


図 4 40 km 長ファイバの遠端部分 70 m における温度分布の測定結果

Fig. 4 Measured temperature distribution at final 70-m range of 40-km-long fiber.

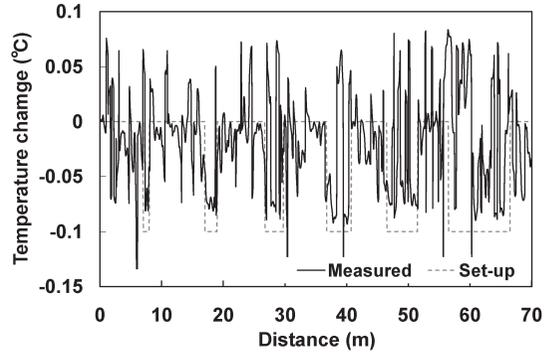


図 5 50 km 長ファイバの遠端部分 70 m における温度分布の測定結果

Fig. 5 Measured temperature distribution at final 70-m range of 50-km-long fiber.

示す. 本測定は, パルス光の偏波スクランブルありで行っている. 図 4 より, 図 3 (b) と同程度の精度で測定されていることが見てとれる. 50 km 長のファイバに関する測定結果を図 5 に示すが, 設定値と無関係な結果となっており, 温度分布の測定が全くできていないことが分かる. これは, 受信された散乱信号に関する信号対雑音比 (SNR) が不足し, 本来の相関ピークが雑音等による副次ピークに埋もれてしまったためである.

3.2 散乱信号の SNR

温度分布測定の結果を分析するために, レイリー散乱信号電力と雑音電力の比 (SNR) を測定端から散乱点までの距離の関数として測定した. パルス光をセンシング用ファイバに送信したときに受信回路に流れる電力 (P_1) と送信しないときに流れる電力 (P_0) を測定し, いずれの波形も距離に関して平準化した後, $(P_1 - P_0)/P_0$ により SNR を求めた結果を図 6 に示す. 同図では, 比較のために, 被測定ファイバに入射するパルス光パワーが 70 mW と 150 mW の場合, 及び Bi-EDFA がある場合とない場合の SNR を示している. なお, これらは平均処理前の SNR (SNR_1 (dB) とする) を表しており, N 回の二乗平均処理を行った後の SNR は $\text{SNR}_N = \text{SNR}_1 + 5 \log_{10} N$ (dB) となる.

図 6 において, 温度分布測定を行ったときと同じ条件の曲線 (パルス光パワー: 70 mW, Bi-EDFA あり) に着目すると, 40 km 及び 50 km 地点から戻る散乱信号に関する SNR_1 は各々 -14.8 dB 及び -18.5 dB と読み取れる. 一方, 温度分布測定においては 15 万回の二乗平均処理を行っており, これによって SNR は

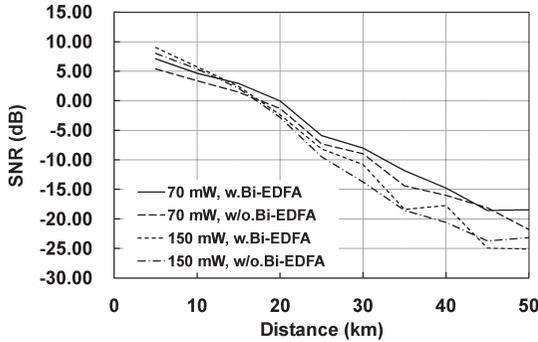


図 6 SSB 変調器で周波数シフトしたパルス光が入射した場合のレイリー散乱信号の SNR 測定結果。パルス幅：10 ns，受信帯域幅：100 MHz，波長：1.55 μm 。
 Fig. 6 Measured SNR of Rayleigh backscatter signal as a function of distance from input end to scatter points for the injection of pulsed light whose frequency was shifted with SSB modulator. Pulse width: 10 ns, receiver bandwidth: 100 MHz, wavelength: 1.55 μm .

25.9 dB 改善される。したがって、40 km 及び 50 km 地点の温度分布測定時における SNR_N は各々 11.1 dB 及び 7.4 dB であったと推定される。これと 3.2 で述べた実験結果より、温度分布測定を行うために必要な SNR のしきい値は 7.4 dB と 11.1 dB の間にあることが分かる。

また、パルス光パワーが同じで Bi-EDFA ありとなしを比較すると、Bi-EDFA による SNR 改善は 1~2 dB であることが見て取れる。図 1 の測定系においてサーキュレータではなく 3 dB カプラを用いた実験では、Bi-EDFA の導入によって 4 dB の改善が見られたが [15]、サーキュレータを採用して受光系の損失を低減した結果、Bi-EDFA による改善効果が薄れることとなった。

図 6 において、SNR は散乱点までの距離に応じて低下しているが、その割合は光ファイバの損失相当分（往復で 0.5 dB/km）よりも大きく、特にパルス光パワー 150 mW のときの傾斜が大きい。これは、SSB 変調器を起点とするファイバ内での非線形光学効果：4 光波混合によるものである。すなわち、SSB 変調器に入る光波周波数を ν 、変調器による周波数シフトを f とするとき、変調器の出力光には所望の周波数 $\nu + f$ をもつ主成分のほかに、 $\nu + nf$ ($n = -3, -2, -1, 0, 2, 3$) なる周波数をもつ副成分が主成分より約 20 dB 低いレベルに含まれ [16]、これら副成分との間で起こる光ファイバ中での 4 光波混合によって主成分のエネルギーが失われていく。この状況を数値シミュレーションした

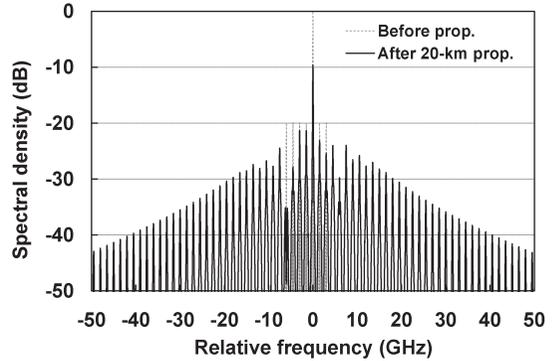


図 7 SSB 変調器で 1.5 GHz 周波数シフトしたパルス光の 20 km 伝搬前後の周波数スペクトルに関するシミュレーション結果。パルス光パワー：150 mW，パルス幅：10 ns，波長：1.55 μm ，光ファイバ：標準型単一モードファイバ（1.31 μm 零分散，損失：0.25 dB/km）。

Fig. 7 Simulated spectra of pulsed light before and after 20-km propagation in fiber. The frequency of pulsed light was shifted by 1.5 GHz with SSB modulator before propagation. Pulse power: 150 mW, pulse width: 10 ns, wavelength: 1.55 μm , sensing fiber: standard single-mode fiber with 1.31- μm zero dispersion and 0.25-dB/km optical loss.

例を図 7 に示す。図において、ファイバに入射したパルス光のスペクトルは淡い破線で描かれており、主成分 (Relative frequency = 0 GHz) のスペクトル密度を 0 dB (基準)、副成分のそれらを -20 dB としている。濃い線で描かれている 20 km 伝搬後のスペクトルは大きく広がり、主成分のスペクトル密度は -10 dB 近くまで低下していることが見て取れる。線形伝搬時の光パワー低下は 5 dB (0.25 dB/km) であるので、4 光波混合によって約 5 dB の過剰損失を被っていることが分かる。なお、零分散波長での伝搬でもないのに顕著な 4 光波混合の効果が現れるのは、主成分と副成分の周波数間隔が GHz オーダと狭いためである。

上記検討結果より、光源周波数を精度良く所望の値に設定できれば SSB 変調器を用いる必要がなく、4 光波混合も起きないので、パルス光パワーを 70 mW より上げて距離レンジを拡張できると考えられる。この可能性を探るために、SSB 変調器を除去して図 6 と同様の方法で SNR を測定した結果を図 8 に示す。

パルス光パワーが 70 mW と 150 mW の場合の SNR はおおむねファイバ損失相当の割合で距離とともに低下しており、非線形光学効果の影響が小さいことが分かる。ただし、300 mW まで上げると傾斜がやや大き

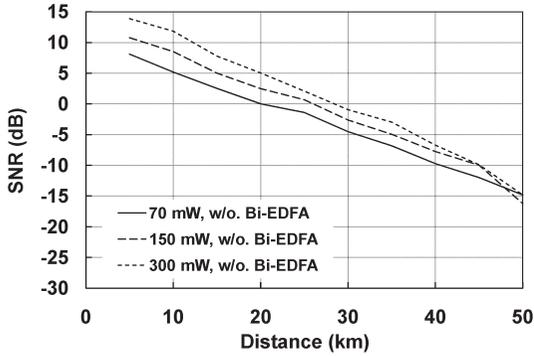


図 8 SSB 変調器で周波数シフトしていないパルス光が入射した場合のレイリー散乱信号の SNR 測定結果. パルス幅: 10 ns, 受信帯域幅: 100 MHz, 波長: 1.55 μm .

Fig. 8 Measured SNR of Rayleigh backscatter signal as a function of distance from input end to scatter points for the injection of pulsed light whose frequency was not shifted with SSB modulator. Pulse width: 10 ns, receiver bandwidth: 100 MHz, wavelength: 1.55 μm .

くなっているが、これは自己位相変調によるものであることを数値シミュレーションによって確認している。すなわち、パルス光ファイバ中を伝搬するに従ってそのスペクトルが自己位相変調のために広がり、これに伴ってレイリー散乱光のスペクトルも広がり、更に、ヘテロダイン検波後の散乱信号スペクトルが受信帯域幅 (100 MHz) を超えて広がるために受信効率が低下し、その結果、図 8 のように傾斜が大きくなる。なお、SSB 変調器を除去することによって局発光パワーが 5 dB 増えて検波器の受光感度が上がり、SNR が全体的に約 1.5 dB 向上している。図 8 の SNR は Bi-EDFA を入れないときの測定結果であるが、入れたときの SNR も略同一で、Bi-EDFA の効果は認められなかった。これは、局発光パワーが増えて受光感度が向上した結果、Bi-EDFA による信号光増幅の効果が増幅された自然放出光 (ASE) による雑音押し上げによって相殺されたためと考えられる。図 6 と図 8 の比較から、SSB 変調器を使用せずに測定ができれば、測定距離を 10 km 以上延長できると予想される。

4. 温度・ひずみ分布測定の性能予測

ここでは、前章で説明した実験結果をもとに、種々の条件下で温度・ひずみ分布測定を行ったときの性能を予測した結果を述べる。結果をまとめて表 1 に示す。同表において、測定モード A/B/C は距離分解能

表 1 レイリー散乱に基づく分布測定法の予測性能
Table 1 Estimated performance of distributed measurement based on Rayleigh backscattering.

Measurement mode	A		B		C	
Pulse width (ns)	1		10		100	
Receiver bandwidth (GHz)	1		0.1		0.01	
Spatial resolution (m)	0.1		1		10	
Temperature resolution ($^{\circ}\text{C}$)	0.1		0.01		0.001	
Strain resolution ($\mu\epsilon$)	0.9		0.09		0.009	
Distance range (km)	5	10	10	40	40	60
Measurement time (s) #	120	720	<1	2880	<1	44
	30	180	<1	115	<1	2

#) Upper row: With 70-mW input pulse power and with SSB modulator and Bi-EDFA. (See solid line in Fig. 6.)
Lower row: With 150-mW input pulse power and without SSB modulator and Bi-EDFA. (See broken line in Fig. 8.)

0.1 m/1 m/10 m で測定する装置設定の状態を表す。

3.1 で示したように、パルス幅 10 ns で測定した温度分布の測定精度は 0.01°C であったが、式 (1) と (2) より、これはひずみの測定精度 $0.09 \mu\epsilon$ に相当する。レイリー散乱光の不規則な波形はパルス幅相当の長さのファイバ区間で散乱された光波間の干渉で形成されるため、温度・ひずみの変化に対する感度はパルス幅に比例し、測定精度もこれに追従すると予想されることから、パルス幅 1 ns/100 ns で測定したときの温度精度は $0.1^{\circ}\text{C}/0.001^{\circ}\text{C}$ 、ひずみ精度は $0.9 \mu\epsilon/0.009 \mu\epsilon$ となる。なお、パルス幅 100 ns で測定する場合には、光源周波数の安定度 (中期, 短期) を 1 MHz 以下に抑える必要がある。

測定時間は、パルス光を繰返しセンシング用ファイバに送出して散乱光を取得するために要する時間と、受信データの転送・処理に要する時間に分けられるが、後者は信号処理系の能力に大きく依存する。このため、ここでは前者についてのみ検討している。表 1 に示した測定時間は、パルス光の送信周期を光波がセンシング用ファイバを往復するに要する時間の 1.2 倍として算出している。また、いずれの測定モードにおいても、図 4 の測定時と同等の SNR_N (11.1 dB) を確保するために必要な回数の平均処理を行うことを前提としている。測定時間欄の上段は図 3、図 4 の測定時と同様に SSB 変調器を用いて光周波数シフトを行う場合 (SNR_1 は図 6 の実線に沿って距離とともに変化)、下段は SSB 変調器を用いない場合 (SNR_1 は図 8 の

破線に沿って変化)を示している。なお、前者の場合の四光波混合に起因する過剰損失はウォークオフ効果の影響でパルス幅に依存することが考えられたが、数値シミュレーションと実験により、パルス幅 1 ns 及び 100 ns の場合の過剰損失は 10 ns のときと変わらないことを確認した。図 4 の 40 km 測定は周波数ごとに 15 万回、40 周波数で計 600 万回の測定を 0.48 ms 周期で行ったもので、測定時間は 2880 秒となる。測定距離が 10 km となるとパルスの繰返し周期が 1/4 となり、また、10 km 地点から戻る散乱光パワーは 40 km 地点からのそれに比べて 20 dB 向上 (図 6 参照) することから周波数ごとの平均回数を 1/10000 に減らすことが可能で、測定時間を 1 秒以下にできる。ただし、15 回程度の平均処理では局発光・散乱光間の偏光不整合及び位相不整合による雑音を十分抑圧できないため、偏波ダイバーシチ及び位相ダイバーシチによる散乱光の受信が必要である。SSB 変調器を用いない下段の条件では、 SNR_N が向上する分だけ周波数ごとの平均回数を減らすことが可能で、測定時間を短縮できる。距離分解能 10 cm で測定する場合には、パルス幅が 1/10、受信帯域幅が 10 倍となるために SNR_N が 20 dB 低下し、測定距離及び測定時間は大きな制約を受けることとなる。

図 4 はパルス光の周波数を 2 GHz (50 MHz × 40) にわたってステップ掃引しながら散乱光を取得して 0.12°C の温度変化を測定したものであるが、より大きな温度変化を測定する場合には周波数掃引の幅を拡大する必要がある。この場合、測定時間は掃引幅に比例して増加するわけではなく、むしろ、それに依存しないと考えてよい。その理由は、 $p_a(\nu, z)$ と $p_b(\nu, z)$ の相互相関 $R_{ab}(f, z)$ を計算する際のデータ数 (式 (3), (4) における K) がおおむね周波数掃引の幅 (測定周波数の数) に比例し、データ数が増えたと相互相関関数における副次的なピーク (雑音成分によるものも含む) の抑圧効果が増すことから、周波数ごとの平均回数を減らすことが可能なためである。これに関して数値シミュレーションした例を図 9 に示す。同図 (a) は図 4 の測定時と略同一の条件 (各散乱波形の $SNR_N = 10$ dB, $K = 30$) におけるシミュレーション結果である。(b) は周波数ごとの平均回数を (a) の 1/100 ($SNR_N = 0$ dB), 掃引幅を同じ ($K = 30$) とした場合、(c) は周波数ごとの平均回数を (a) の 1/100 ($SNR_N = 0$ dB), 掃引幅を 100 倍 ($K = 3000$) に広げた場合の結果である。これより、測定時間の比は

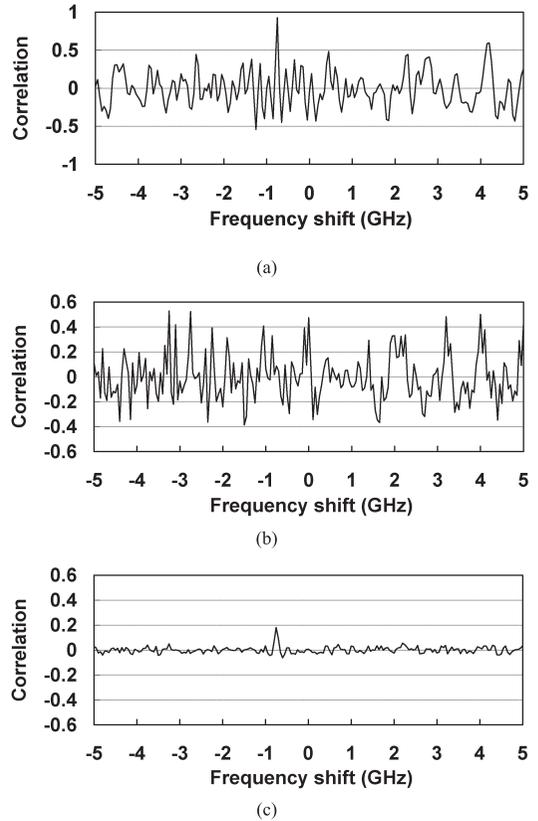


図 9 $p_a(\nu, z)$ と $p_b(\nu, z)$ の相互相関 $R_{ab}(f, z)$ に関する数値シミュレーション結果。計算条件：(a) $SNR_N = 10$ dB, $K = 30$, (b) $SNR_N = 0$ dB, $K = 30$, (c) $SNR_N = 0$ dB, $K = 3000$ 。

Fig. 9 Simulated cross correlation $R_{ab}(f, z)$ between $p_a(\nu, z)$ and $p_b(\nu, z)$ under (a) $SNR_N = 10$ dB, $K = 30$, (b) $SNR_N = 0$ dB, $K = 30$, (c) $SNR_N = 0$ dB, $K = 3000$.

(a) : (b) : (c) = 100 : 1 : 100 となり、(a) と (c) の所要時間は同じである。いずれのシミュレーションにおいても相関ピークを -750 MHz に設定しているが、(a) と (c) からはこのピークを読み取ることができる。これに対して、(b) においては本来の相関ピークは雑音による副次ピークに埋もれて読み取ることができない。このように、掃引幅を広げて測定する場合には、周波数ごとの平均回数を減らしても相関ピークを読み取ることができ、測定に要する時間は基本的な変わらないと考えられる。

5. む す び

コヒーレント OTDR を用いて取得した光ファイバ

中のレイリー散乱波形に基づくひずみと温度の分布測定法に関して、その可能性を極めることを目的として行った実験と数値シミュレーションの結果を報告した。センシング用ファイバを延長しつつ温度の分布測定実験を行い、40 km までのファイバについて距離分解能 1 m, 温度精度 0.01 °C による測定を実現した。また、光ファイバのわずかな複屈折及び非線形光学効果 (4 光波混合) が測定に及ぼす影響を明らかにした。これらの結果をもとに、本方法で期待できるひずみと温度の分布測定性能を予測した。

文 献

- [1] J.P. Dakin, D.J. Pratt, G.W. Bibby, and J.N. Ross, "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector," *Electron. Lett.*, vol.21, no.13, pp.569-570, June 1985.
- [2] T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda, "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.1, no.5, pp.107-108, May 1989.
- [3] D. Culverhouse, F. Farahi, C.N. Pannel, and D.A. Jackson, "Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensor," *Electron. Lett.*, vol.25, no.14, pp.913-915, July 1989.
- [4] T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda, and Y. Koyamada, "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering," *J. Lightwave Technol.*, vol.13, no.7, pp.1296-1302, July 1995.
- [5] J.M.L.-Higuera, L.R. Cobo, A.Q. Incera, and A. Cobo, "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *J. Lightwave Technol.*, vol.29, no.4, pp.587-608, Feb. 2011.
- [6] 小山田弥平, "レイリー散乱を利用した光ファイバの高感度歪分布測定法の提案," *信学技報*, OFT98-23, Sept. 1998.
- [7] Y. Koyamada, Y. Eda, S. Hirose, S. Nakamura, and K. Hogari, "Novel fiber-optic strain and temperature sensor with very high resolution," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E89-B, no.5, pp.1722-1725, May 2006.
- [8] Y. Koyamada, M. Imahama, K. Kubota, and K. Hogari, "Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR," *J. Lightwave Technol.*, vol.27, no.9, pp.1142-1146, May 2009.
- [9] B.J. Soller, D.K. Gifford, M.S. Wolfe, and M.E. Froggatt, "Measurement of localized heating in fiber optic components with millimeter spatial resolution," *OFC 2006*, OFN3, March 2006.
- [10] P. Healey, "Fading in heterodyne OTDR," *Electron. Lett.*, vol.20, no.1, pp.30-32, Jan. 1984.
- [11] 武田友秀, 今井大輔, 中村真毅, 小山田弥平, "光周波数を安定化したコヒーレント OTDR における波形再現性の基礎検討," *信学技報*, OFT2001-47, Oct. 2001.
- [12] 今濱 睦, 廣瀬聡一, 保寿和男, 小山田弥平, "光周波数を安定化したコヒーレント OTDR で測定したレイリー散乱波形の偏波依存性," *信学技報*, OFT2006-4, May 2006.
- [13] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Grating*, Artech House, 1999.
- [14] M. Imahama, Y. Koyamada, and K. Hogari, "Restorability of Rayleigh backscatter traces measured by coherent OTDR with precisely frequency-controlled light source," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E91-B, no.4, pp.1243-1246, April 2008.
- [15] R. Shimano, Y. Iitsuka, K. Kubota, and Y. Koyamada, "31-km distributed temperature measurement with very high resolution using coherent-OTDR enhanced with bidirectional EDFA," *OECC2010*, 7P-34, July 2010.
- [16] 下津臣一, 及川 哲, 斉藤 勉, "光 SSB 変調器の開発," *Technical Report 2001 (住友大阪セメント)*, pp.6-9, 2001.

(平成 23 年 5 月 6 日受付, 8 月 31 日再受付)

東郷 明雄 (学生員)



2011 茨城大・工・メディア通信卒。同年同大学院理工学研究科博士前期課程入学。現在、光ファイバ応用計測に関する研究に従事。

飯塚 裕太 (学生員)



2010 茨城大・工・メディア通信卒。同年同大学院理工学研究科博士前期課程入学。現在、光ファイバ応用計測に関する研究に従事。

島野 良介



2009 茨城大・工・メディア通信卒。2011 同大学院理工学研究科博士前期課程了。同年 (株) トーエネック入社。在学中は光ファイバ応用計測に関する研究に従事。



泉田 史 (正員)

1987 早大・理工・物理卒. 1989 同大大学院理工学研究科修士課程了. 同年 NTT 入社. 以来, 光線路試験システム, 所内光配線システム及び光ファイバ応用技術の研究開発に従事. 現在, NTT アクセスサービスシステム研究所主幹研究員. 2010 より茨城大大学院理工学研究科・客員教授兼務. 博士 (工学). IEEE, OSA, 応用物理学会各会員.



小山田弥平 (正員：フェロー)

1970 阪大・基礎工・電気卒. 1972 同大大学院修士課程了. 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社, 電気通信研究所に配属. 主幹研究員, 光通信線路研究部長等を歴任. 1997 茨城大・工・教授. 弾性表面波素子, 光ファイバの伝送特性, 同測定法, 及び光ファイバ応用計測に関する研究に従事. 工博. IEEE, OSA 各会員.