

位相積分コヒーレンス補償による高性能 OFDR システムの開発

齊藤 崇記 Takanori Saitoh, 多田 彬子 Akiko Tada

〔要 旨〕

OFDR システムに必須のコヒーレンス補償の方法として、位相積分コヒーレンス補償法(Phase Integration Coherence Compensation(PICC))を考案し、これを適用した OFDR システムを開発した。アンリツ独自のこの PICC-OFDR システムは、任意の遅延長の基準干渉計信号を疑似的に生成することが可能である。したがって、任意の位置で反射された干渉信号のコヒーレンスを最大化することができる。また、距離方向の測定レンジを分割し、それぞれの分割域に最適な遅延長の基準干渉計信号を生成してコヒーレンス補償を実施することにより、測定レンジ全域でコヒーレンス補償された高品位の OFDR スペクトラムを取得することが可能になった。さらに、この OFDR スペクトラムから光ファイバの伸縮分布を算出し、光ファイバ長 400 m の範囲で歪・温度の分布が高精度かつリアルタイムに測定可能な歪・温度分布測定システムを開発した。

1 まえがき

近年、橋梁、トンネル、治水施設等の大型構造物や、道路、鉄道等の社会インフラの老朽化が進みつつあり、それらの健全性測定が重要視されてきている。従来、これら大型構造物測定には FBG(Fiber Bragg Grating)を利用した歪測定方法¹⁾が利用されていた。FBG とは、光ファイバのコアの屈折率の強弱を波長レベルの周期で変化させたデバイスであり、FBG の反射プロファイルの変化から FBG の伸縮を測定できる。したがって、この FBG を測定対象物に張り付けることにより、測定対象物の歪を測定することができる。FBG の長さは数 mm 程度であるため、重要と思われる箇所に張り付けて構造物の状態を観測することになるが、当然ながら FBG 貼り付け位置以外の歪は測定不能となる。

FBG のような“点”計測ではなく、光ファイバそのものを歪センサとし、光ファイバのすべての領域で歪の分布を計測するのであれば、測定可能領域は飛躍的に拡大する。そのため、光ファイバの長手方向の歪分布測定方法として、DAS(Distributed Acoustic Sensing)²⁾、B-OTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)³⁾、B-OCDA(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)⁴⁾、OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)⁵⁾等が開発されている。DAS は数十 km の範囲の衝撃状の歪を捉えることができるが、静的な歪は測定できず、また距離分解能は数 m と低分解能である。B-OTDR、B-OCDA は数 km の範囲の歪を測定できるがその歪分解能は 100 $\mu\epsilon$ *程度であり、低感度である。

* 1 $\mu\epsilon$ は長さ1 mの物体が1 μm 伸びる歪量

OFDR は測定範囲が 100 m 程度と他の方法に比べて短い、歪分解能、距離分解能の点で他の方式よりも優れている。また、アンリツでは OFDR 方式の 3D 形状測定システム^{6), 7)}を開発した経験がある。そこで、これまでの技術資産を生かし、これから需要が伸びることが予想される OFDR 方式の歪・温度分布測定システムを開発した。

OFDR 方式の歪・温度分布測定では、光ファイバ中で発生したレイリー散乱光を干渉計で検出するが、その偏波は光ファイバ内の位置により異なる。そのため偏波補償が必要となる。また、光源のコヒーレンス長を超えて干渉信号を検出するため、コヒーレンス補償技術も必要となる。本論文では、OFDR の原理、偏波補償法、アンリツ独自の位相積分コヒーレンス補償法(特許出願中)、歪・温度分布算出方法について言及する。

2 OFDR の原理

2.1 OFDR の光学系

図 1 に OFDR の基本的な光学系を示した。

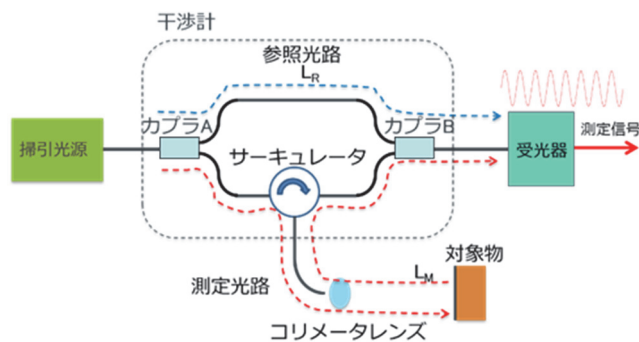


図 1 OFDR 光学系

掃引光源から出射された掃引光はカプラ A で 2 分岐され、一方はそのままだカプラ B に向かい(参照光路)、もう一方は、サーキュレ

ータを通り、コリメータレンズから空中に出射され、対象物で反射された後、再びコリメータレンズ、サーキュレータを通して、カプラ B に向かう(測定光路)。参照光路と測定光路を伝搬した掃引光は、カプラ B で合波されたのち、受光器で電気信号に変換される。

掃引光の光周波数が、時間に対して線形に変化しているとすると、時刻 t での光周波数 $\nu(t)$ は、

$$\nu(t) = \nu_0 + k \cdot t \quad (1)$$

と表せる。ここで ν_0 は、時刻 0 での光周波数、 k は掃引速度 [Hz/s] である。参照光路の光路長 L_R と測定光路の光路長 L_M との差を $\Delta L = |L_M - L_R|$ とすれば、掃引光源から受光器までのそれぞれの伝搬時間の差 τ は、

$$\tau = \frac{\Delta L}{c} \quad (2)$$

となる。ここで c は真空中の光速である。

参照光路を通った掃引光と測定光路を通った掃引光の電界強度をそれぞれ E_R 、 E_M とすれば、受光器で検出される干渉強度 P は、

$$\begin{aligned} P &= |\vec{E}_R + \vec{E}_M|^2 \\ &= |E_R e^{i2\pi\nu(t)\cdot t} + E_M e^{i2\pi\nu(t-\tau)\cdot t}|^2 \quad (3) \\ &= |E_R|^2 + |E_M|^2 + 2E_R E_M \cos\left(2\pi \frac{k\Delta L}{c} t\right) \end{aligned}$$

と表せる。干渉信号の DC 成分をカットすれば、式(3)最終式の第 3 項のみが観測される。つまり、受光器からは、

$$f_I = \frac{k\Delta L}{c} \quad (4)$$

の周波数の電気信号が出力される。したがって、電気信号をサンプリング後、FFT(Fast Fourier Transform)により OFDR スペクトラムを算出すれば、OFDR スペクトラム上の f_I の位置に、ピークが検出され、式(4)から、光路差 ΔL が計算される。

上記は掃引光の光周波数が線形に変化することが前提となっている。しかし実際の光周波数は非線形に掃引されている。そのため、サンプリング方法やソフトウェア処理によって、測定信号に線形化の補正を行う必要がある。この処理はリニアライズあるいはリサンプリングと呼ばれている。

2.2 リニアライズ

図 2 にリニアライズ系と偏波補償系を含んだ OFDR 光学系を示した。掃引光源から出射された掃引光は、カプラ C で 2 分岐され、一方は図 1 と同様の測定干渉計に、もう一方はリニアライズ用の基準干渉計に入射される。

測定干渉計には偏波スイッチを内装している。掃引光源から出力された掃引信号の 2 分周信号を偏波スイッチの偏波切替ポートに入力している。これにより、掃引ごとに参照光路の偏波は 0 度(P

偏波)、90 度(S 偏波)と切り替わる。それぞれの偏波状態の測定干渉計信号からの計算結果を足し合わせることで偏波補償を行う。また、掃引光が偏波スイッチに直線偏波で入射できるように、掃引光源から偏波スイッチまでは偏波保持ファイバで接続している。

基準干渉計はマイケルソン型とした。マイケルソン型では、反射鏡としてファラデーミラー(FR)を使用することにより、それぞれの反射鏡からの光は、遅延長 ΔL_{AUX} によらず同じ偏波状態でカプラ D に戻るため、偏波変動による干渉信号の変動を除去することができる利点がある。

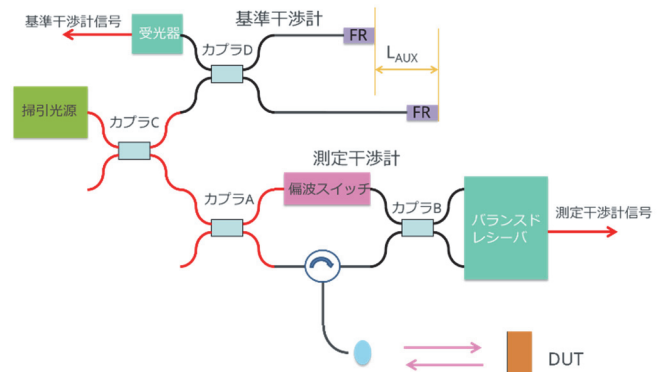


図 2 リニアライズ系を含んだ OFDR 光学系

基準干渉計信号は、式(4)から、

$$f_{AUX} = \frac{2k\Delta L_{AUX}}{c} \quad (5)$$

の周波数を持つ。式(4)と比べて 2 倍となっているのは、 ΔL_{AUX} を往復しているためである。また、干渉計の FSR(Free Spectral Range)、つまり干渉信号が正弦波 1 波分変化するために必要な光周波数は

$$FSR = \frac{c}{2\Delta L_{AUX}} \quad (6)$$

と表せることから、式(5)は、

$$f_{AUX} = \frac{k}{FSR} \quad (7)$$

と表せる。右辺は、「掃引速度 k は FSR の何倍に相当するか」を表しており、言い換えれば、 f_{AUX} とは、「光周波数が FSR 掃引されるたびに極大となる干渉信号」の周波数と言える。

測定干渉計信号の周波数である式(4)と基準干渉計信号の周波数である式(7)は、どちらも掃引速度 k に比例している。したがって、基準干渉計信号の周波数の変化から測定干渉計信号をリニアライズすることが可能となる。

リニアライズには、ソフトウェアリニアライズとハードウェアリニアライズ^{6),7)}の 2 つの方法がある。両者の一番の相違点は、干渉信号のサンプリング方法であり、ソフトウェアリニアライズでは等時間間隔に、ハードウェアリニアライズでは、等光周波数間隔にサンプリングしている。

歪測定では、後述にあるとおり測定干渉計信号と基準干渉計信号を時間軸上でずらしながら複数回リニアライズする必要があり、これにはそれぞれの干渉計信号を等時間間隔にサンプリングすると処理が簡素化できる。そのため歪測定にはソフトウェアリニアライズが適している。

2.3 ソフトウェアリニアライズ

ソフトウェアリニアライズは、基準干渉信号と測定干渉信号を同時に A/D コンバーターで等時間間隔にサンプリングする。そして、光周波数の物差しとなる基準干渉信号を元に、測定干渉信号が光周波数に対して線形になるように、測定干渉信号をリニアライズする。以下に具体的方法を記述する。

まず基準干渉計信号の位相を算出する。基準干渉計信号を FFT し、FFT 計算結果の後半半分に 0 を代入後、これを逆 FFT する。逆 FFT で計算された複素数の位相角度が、基準干渉計信号の位相である。

計算された基準干渉計の位相は、 $-\pi$ から $+\pi$ の間を繰り返し変化しているので、アンラップ、つまり位相が $+\pi$ から $-\pi$ に飛ぶ箇所では位相に 2π を加え、逆に $-\pi$ から $+\pi$ に飛ぶ箇所では位相に -2π を加えて連続した位相 χ を計算する(図 3 参照)。

連続位相は、光周波数が基準干渉計の FSR 分、掃引されるたびに 2π 増加する量であり、光周波数に比例している。

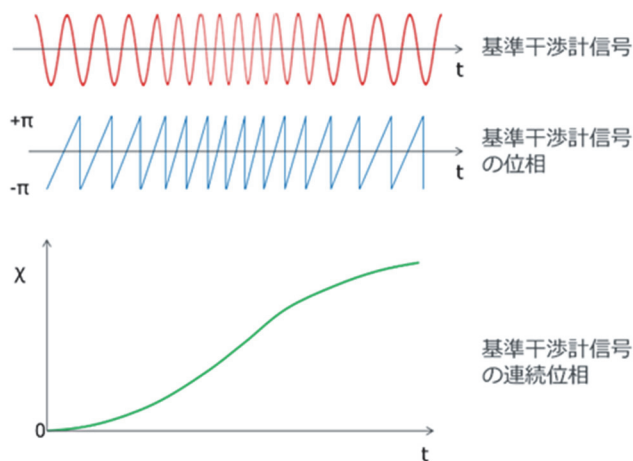


図 3 基準干渉計信号の位相計算

次に連続位相 χ を等分割し、分割点での測定干渉計信号の強度を抽出する(図 4 中央の緑丸)。抽出されたデータは、時間軸上では、等間隔ではないが、光周波数軸上では、等間隔にサンプリングされたデータとなる。このデータの FFT 計算結果である OFDR スペクトラム上には、反射点に対応する周波数位置に鋭いピークが観測される。

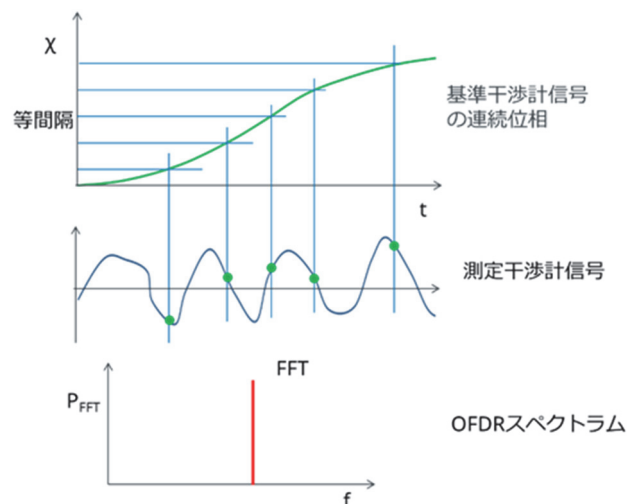


図 4 データ抽出

2.4 アンリツ製掃引光源

アンリツ株式会社では、高コヒーレンスな光周波数掃引光源を開発し、製品化している⁸⁾。図 5 に光源の外観を示した。この光源は、掃引のほぼ全域にわたってモードホップなく位相連続に光周波数掃引が可能である。表 1 に光源の主な仕様を示した。



図 5 AQB5500P 外観

表 1 AQB5500P 仕様

中心波長 λ_c	1550 nm $\pm$ 5 nm (変更不可, 製造時に決定)
波長掃引幅 W	10 ~ 50 nm
掃引周波数 f_R	150 Hz $\pm$ 20 Hz (変更不可, 製造時に決定)
光出力パワー	> 10 dBm
コヒーレンス長	> 100 m
トリガー設定分解能	1 pm

この光源から出力されるトリガー信号は、High と Low が切り替わるタイミングを波長で指定できる。短波から長波への掃引中、掃引光の波長が任意に設定した波長に達した際に、トリガーは High

となり、長波から短波への掃引中、同じく任意に設定した波長に達した際に、トリガーは low となる。このトリガー信号を使って A/D コンバーターのサンプリングを開始させることにより、常に同じ波長域でのサンプリングが可能となる。

この光源の光周波数掃引波形は正弦波状である。そのため、掃引の中心付近での光周波数は 3 次関数的に変化する。

アンリツ製掃引光源と遅延長 83.5 m の基準干渉計を用いて測定された連続位相を図 6(a)に示した。掃引波形と同様に 3 次関数的に変化している。この連続位相から 3 次関数成分を差し引いた値を図 6(b)に示した。ここでみられる振幅 100 rad 程度の変動は、個々の光源の個性であり、再現性がある。

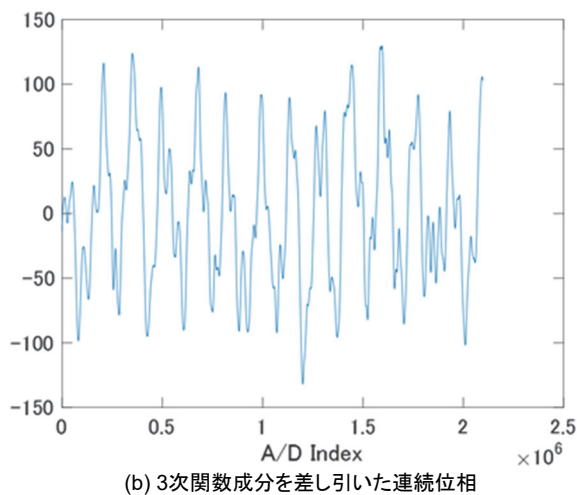
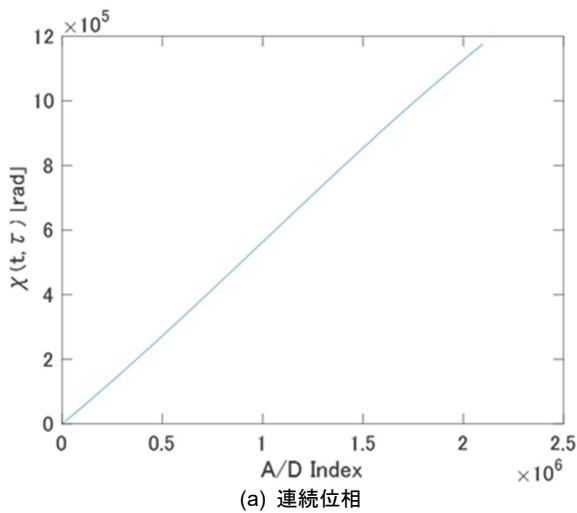


図 6 アンリツ光源の連続位相

3 位相積分コヒーレンス補償法

DUT までの距離を基準干渉計の遅延長に一致させると、DUT の位置でのリニアライズの効果が最大となる。この位置から遠ざかるほど光源のコヒーレンスの影響により効果が低下する。OCT 測定

のように DUT までの距離が限定されている場合は、DUT の位置に合わせた遅延長を持つ基準干渉計を用意すれば済むが、測定点位置が不定である距離測定系や、測定点が光ファイバ全域にわたる歪分布測定系では大きな問題となる。

NTT から、ソフトウェアリニアライズにおいて、基準干渉計遅延長の整数倍位置でリニアライズ効果が極大となる PNC(Phase Noise Compensation)法⁹⁾が考案され実用化されている。この方法は歪分布測定の測定可能範囲を大幅に拡大させたが、中間位置となる基準干渉計長の半整数倍位置ではコヒーレンスが低下している。

アンリツでも、ハードウェアリニアライズにてコヒーレンスを補償した OFDR 方式歪分布測定システム¹⁰⁾を開発したが、干渉計を 1 つ増やす必要があった。

そこで今回、従来の光学系のまま、任意の遅延長の基準干渉計信号を疑似的に生成する位相積分コヒーレンス補償法(Phase Integration Coherence Compensation(PICC))を考案した。生成された基準干渉計信号からソフトウェアリニアライズにより測定干渉計信号をリニアライズすれば、任意の DUT 位置でコヒーレンスを最大化することが可能となり、特に歪分布計測には有用である。

以下に位相積分法の原理を示す。

光の位相を $\phi(t)$ 、光速を c 、遅延長 L_{ref} の基準干渉計の遅延時間を $\tau = 2nL_{ref}/c$ とすれば、基準干渉計信号位相 $\chi(t, \tau)$ は、

$$\chi(t, \tau) = \phi(t) - \phi(t - \tau) \quad (8)$$

と表すことができる。

式(8)を近似すれば、式(9)となり、

$$\chi(t, \tau) \simeq \frac{d\phi}{dt} \tau \quad (9)$$

式(9)を積分すれば式(10)となる。

$$\phi(t) \simeq \frac{1}{\tau} \int \chi(t, \tau) dt = \Phi(t) \quad (10)$$

式(10)の中辺と右边を位相積分とする。

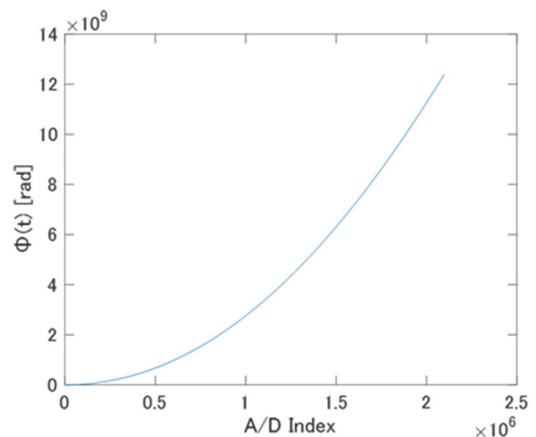


図 7 位相積分

図 7 に、図 6 に示した $\chi(t, \tau)$ から計算された位相積分 $\phi(t)$ を示した。 $\chi(t, \tau)$ がほぼ線形であったことから、位相積分は 2 次曲線のとなった。

遅延長 L 、遅延時間 $t' = 2nL/c$ の干渉計が出力するであろう干渉計信号の位相 $\chi(t, \tau)$ は、式(11)で計算できる。

$$\begin{aligned}\chi(t, \tau') &= \phi(t) - \phi(t - \tau') \\ &= \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t \chi(t, \tau) dt - \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t-\tau'} \chi(t, \tau) dt \\ &= \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau'}^t \chi(t, \tau) dt\end{aligned}\quad (11)$$

つまり、遅延長 L_{ref} の基準干渉計信号を元に、任意の遅延長の基準干渉計信号を位相積分から計算することができる。

式(11)で計算された基準干渉計信号を元に測定干渉計信号をソフトウェアリニアライズ後に FFT すれば、任意の距離 L' でコヒーレンスが最大となる OFDR スペクトラムを算出できる。その際、図 8 に示すように、 L と L' の遅延長差に対応した時間 $\delta t = 2n(L' - L)/c$ 、リニアライズのタイミングをずらす必要がある。

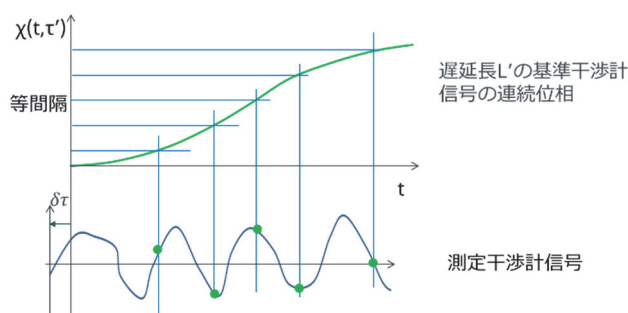


図 8 遅延長差補正

4 位相積分コヒーレンス補償 OFDR による反射ピーク測定

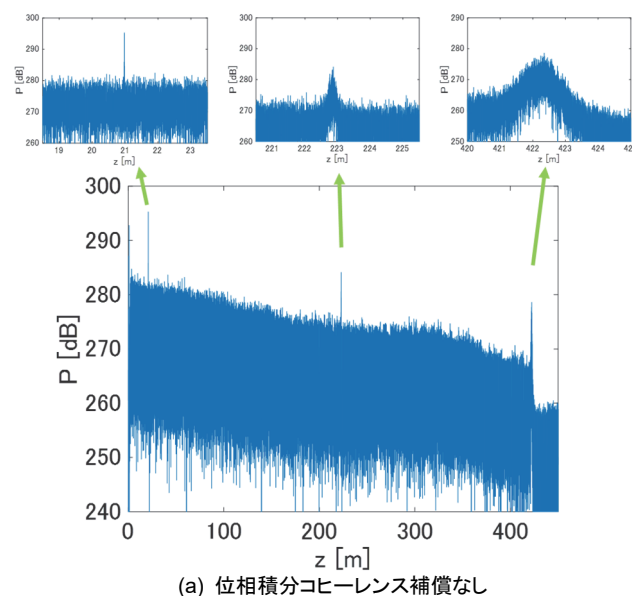
掃引中心波長 1.55 μm 、掃引幅を 10 nm に設定したアンリツ製波長掃引光源、遅延長 83.5 m の基準干渉計、サンプリング周波数 5GS/s の高速 A/D コンバータ (TELEDYNE 製 ADQ35) による OFDR システムを構築した。この OFDR システムは、約 450 m の範囲の光ファイバからの反射分布を OFDR スペクトラムとして観測することができる。

長さ 20 m、200 m、200 m の 3 本の光ファイバを直列に接続した際の反射分布と光ファイバ接続点からの反射ピークを観測した。

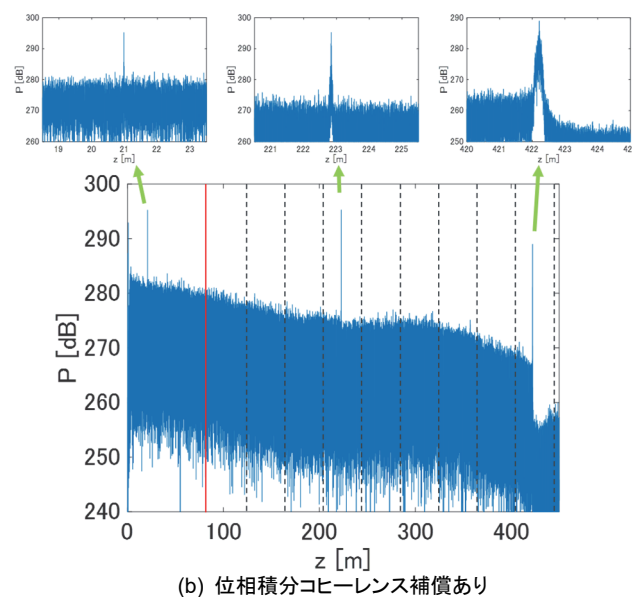
図 9(a) にコヒーレンス補償の無い場合の OFDR スペクトラムを示した。0 ~ 420 m の範囲に光ファイバ中のレイリー散乱分布が観測され、光ファイバ接続点で強い反射ピークが観測されている。波長掃引光源のコヒーレンス長は大気中で 100 m 程度であり、光ファイバ中をコヒーレンス劣化なく往復できる距離は 30 m となる。そのた

め、20 m での反射ピークは鋭い形状であるが、220 m と 420 m 反射ピークは、コヒーレンス劣化によりそれぞれ 0.5 ~ 1 m 程度に広がって観測されている。

次に位相積分コヒーレンス補償を行った場合の OFDR スペクトラムを図 9(b) に示した。位相積分コヒーレンス補償は、基準干渉計遅延長の位置 (図中赤線) から 40 m ごとの地点で実施した。図の OFDR スペクトラムは、コヒーレンス補償なしで測定した OFDR スペクトラムの中の 0 ~ 103.5 m の領域と、40 m ごとに位相積分コヒーレンス補償を実施して測定した OFDR スペクトラムの実施点 ± 20 m の領域の OFDR スペクトラムを連結した統合 OFDR スペクトラムである。3 つの反射ピークはどれも先鋭化されており、ピークの幅は数 cm となった。



(a) 位相積分コヒーレンス補償なし



(b) 位相積分コヒーレンス補償あり

図 9 OFDR スペクトラム

5 歪分布測定方法

図9のOFDRスペクトラムには、反射ピークの裾野の0 mから420 mの範囲に、接続したSMファイバからのレイリー散乱光強度分布が観測できている。一見、白色ノイズに見えるこのレイリー散乱光のスペクトラム形状は、SMファイバの屈折率分布を反映している。屈折率分布はSMファイバが製造された段階で決定され、ほぼ不変であるため、このOFDRスペクトラム強度は再現性がある。OFDRスペクトラム強度の変化から、歪分布測定は可能であるが、例えば100 mmの領域の形状変化を100 μm の精度で測定した場合、歪分解能は、1000 μe となってしまう。

そのため、歪測定ではOFDRスペクトラムの強度ではなく、その位相を観測する。OFDRで観測される測定干渉計信号の位相は、光源から反射点までの光路に依存して変化している。掃引光の波長を λ 、光ファイバの屈折率を n とすれば、光源からの距離が、 $\lambda/2n(\approx 0.5 \mu\text{m})$ 変化すると測定干渉計の位相は $2\pi[\text{rad}]$ 変化する。位相測定では0.1[rad]程度の測定が可能であることから、0.1 μe の精度での歪測定が実現できる。

実際の計算方法を以下に示す。

前章の位相積分法によるコヒーレンス補償後にリアライズされた測定干渉計信号をFFTし、OFDRスペクトラムを計算する。例として、図10に50 mから50.1 mまでの10 cmの領域のOFDRスペクトラムの実数部(青線)と虚数部(赤線)を示した。OFDRスペクトラム強度と異なり、この形状はわずかな外乱で変化する。

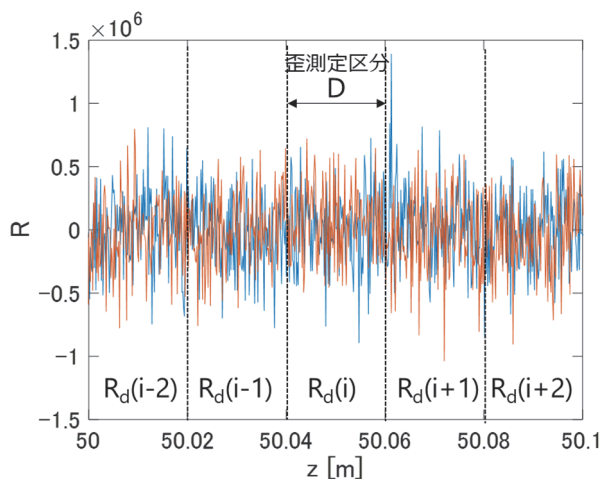


図10 OFDRスペクトラムの実数部と虚数部

OFDRスペクトラムを図10のように、所望の区分長 D ごとに分割する。この区分長が歪分布測定の距離分解能となる。例えば区分長 $D=20 \text{ mm}$ 、OFDR分解能 $\Delta z=0.446 \text{ mm}$ の場合、各区分長には44個のデータが存在する。

次に区分長内データに0パディングしてデータ数を2の累乗にする。これは後のFFTを効果的に実施するためであるが、データ数を大きくしてFFT後の分解能を向上させるためでもある。0パディング後のデータ数を N_{RDz} とすれば、 $Dz=\Delta z \times N_{RDz}$ は、計算上の区分長となり、後述する歪分解能を決定するパラメータとなる(図11参照)。

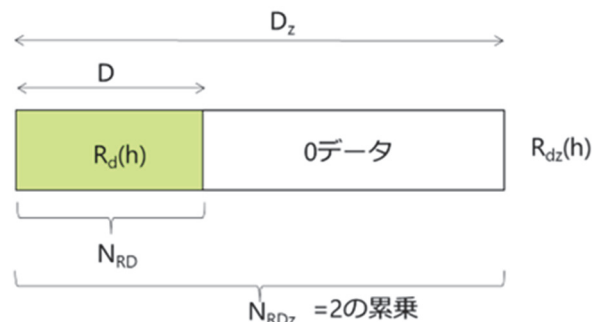


図11 0パディング

0パディングされたデータを逆FFTしその実数部を区分内の位相の変化の周波数成分として計算する。

P偏波状態で測定した測定干渉計信号から上記方法で計算した周波数成分強度 M_d^P と、同様にS偏波状態で測定した測定干渉計信号から計算した周波数成分強度 M_d^S を足すことにより、偏波補償された M_d^{PS} を算出する。

位相の変化の周波数成分強度 M_d^{PS} は、位相の変化が緩やかであれば低域成分が大きくなり、激しければ高域成分が大きくなる。また、区分が圧縮されれば位相変化が密となり全体的に高域側にシフトし、伸長されれば位相変化が粗になるため、低域側にシフトする。

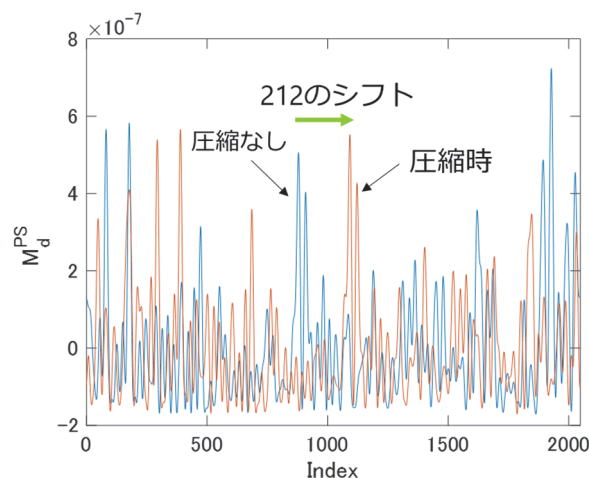


図12 M_d^{PS} のシフト

図12に、光ファイバに外力を加えていない状態で測定された M_d^{PS} (青線)と圧縮を加えた状態で測定された M_d^{PS} (橙線)を示し

た。0 パディング後のデータ数は 2048 個とした。それぞれの状態で複数のピークがみられるが、この例では、圧縮により M_d^{PS} が高周波側に 212 シフトしていることが分かる。

M_d^{PS} のシフト量を計算する方法として、一般的には相互相関関数 S_{xc} を計算しその最大値を示す位置をシフト量とする方法が用いられる。つまり

$$S_{xc}(m) = \int g(t)f(t-m)dt \quad (12)$$

が最大となる m をシフト量とする。

式(12)の計算方法として、式(13)に示すとおり、それぞれの状態の M_d^{PS} を FFT して乗算し、その結果を逆 FFT する方法がある。

$$S_{xc}(m) = FFT^{-1}\{FFT(g(t)) \times (FFT(f(t)))^*\} \quad (13)$$

この方法であれば、相互相関を高速に計算することができる。図 13 に伸縮時の相互相関を示した。相互相関のピーク位置が、伸長時間は負側に、圧縮時は正側にシフトしている様子が分かる。

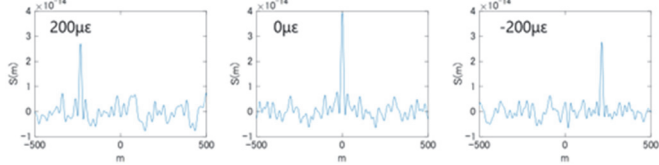


図 13 相互相関関数

区分が圧縮されて位相が 2π 増加した場合、位相の回転が 1 回転増加したこととなり、その周波数成分は 1 増加したこととなる。また、位相 2π の増加は区分内の光路長が $\lambda/(2n)$ 増加したこととなる。圧縮時、物理的にファイバ長が短くなることに加えて、屈性率が増加する。この光弾性の効果を示す係数を $\rho(=0.78)$ とすれば、シフト量 m と歪量 s との関係は、式(14)となる。

$$s = \frac{\delta D}{D} = \frac{m\lambda}{2nD_z\rho} = \frac{m\lambda}{2nN_{RDz}\Delta z\rho} \quad (14)$$

また、 m は整数値であることから、歪分解能 δs は、

$$\delta s = \frac{\lambda}{2nN_{RDz}\Delta z\rho} \quad (15)$$

となり、0 パディングにより N_{RDz} を大きくするほど歪分解能は向上する。

相互相関関数計算の性質上、 $-N_{RDz} < m < N_{RDz}$ である。したがって、測定可能な最大歪 s_{max} は、

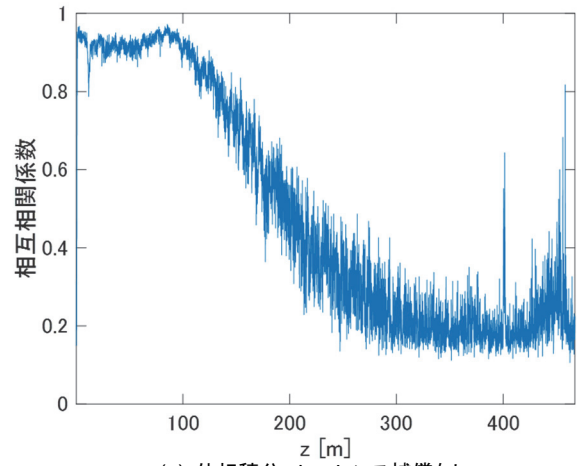
$$s_{max} = \frac{\lambda}{2n\Delta z\rho} \quad (16)$$

となり、今回のシステムでは約 $1500 \mu\epsilon$ となる。ただしこれは M_d^{PS} の S/N が十分に大きい場合であり、一般的な最大歪は、この値の 20~50%となる。

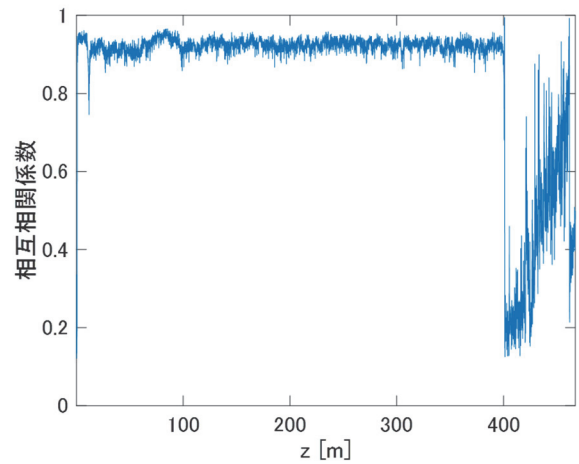
上記計算を区分ごとに実施すれば光ファイバに印加された歪分布を測定することができる。

区分長内での伸縮が不均一な場合や、周波数成分にノイズ成分が多く再現性が悪い場合、図 13 のピーク値は小さくなる。そのため、ピーク値を M_d^{PS} の二乗和の平方根で規格化した相互相関係数は、OFDR スペクトラムの品質の指数となる。

長さ 400 m の SM 光ファイバを接続した際の相互相関係数を測定した。図 14 に位相積分コヒーレンス補償の有無による相互相関係数の違いを示した。コヒーレンス補償がない場合は、コヒーレンスが最大となる基準干渉計遅延長(85.3 m)の位置を超えると相互相関係数が急激に劣化しているが、位相積分コヒーレンス補償を実施した場合は、接続した光ファイバの全領域において、相互相関係数が 90%以上を保っていることがわかる。



(a) 位相積分コヒーレンス補償なし



(b) 位相積分コヒーレンス補償あり

図 14 相互相関係数

6 位相積分コヒーレンス補償 OFDR による歪測定

6.1 静的歪分布測定

開発した位相積分コヒーレンス補償 OFDR 方式歪分布測定器の外観を図 15 に示した。写真上部は計算用のノート型のワークステ

ーションであり、GPU(Graphics Processing Unit)が内蔵されている。下方の本体には、アンリツ製波長掃引光源(波長掃引幅 10 nm, 掃引周波数 144 Hz), 干渉計(基準干渉計遅延長 83.5 m), A/D コンバーター(2ch, サンプル周波数, 5GS/s), が内蔵されている。A/D サンプル数は 2M 個とした。掃引幅 10 nm のほぼ中央付近を 1.7 nm にわたって A/D サンプルする。OFDR 分解能は 0.446 mm, OFDR スペクトラムの観測範囲は 450 m である。

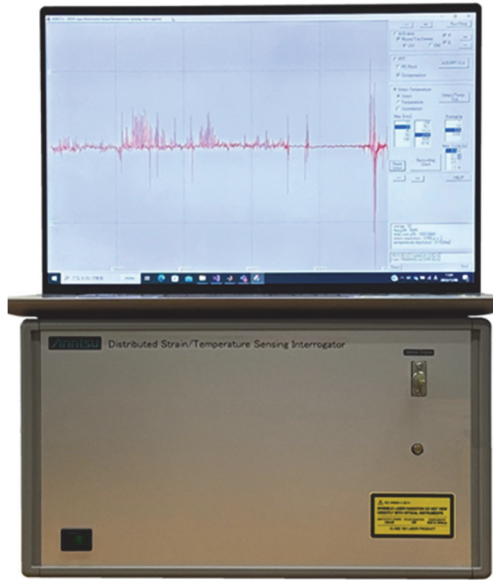


図 15 位相積分コヒーレンス補償 OFDR 歪分布測定器外観

位相積分コヒーレンス補償 OFDR 歪分布測定器の静的歪分布測定の性能を評価するために、図 16 に示した光ファイバ伸縮実験系を用いて、式(14)で計算された歪値と実際に印加した値の関係を測定した。この実験系は、長さ 510 mm の両端 SC コネクタ付き光ファイバの SC コネクタ部分を光学レール上のマイクロメーター付きステージに固定して、光ファイバを伸長させることができる。

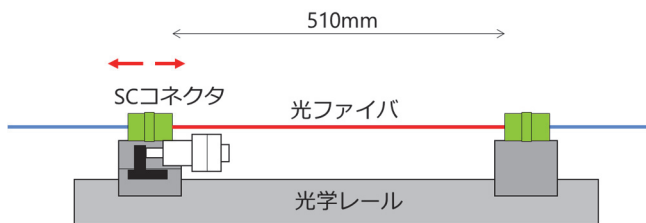


図 16 光ファイバ伸縮実験系

実際に印加された歪値 s_{App} はマイクロメーターの値 Δl と伸長された部分の長さ l から、

$$s_{App} = \frac{\delta l}{l} \quad (17)$$

と計算できる。

長さ 400 m の光ファイバの先に、この実験系を接続し、距離分解能 100 mm, 歪分解能 0.34 $\mu\epsilon$ で測定した歪印加中の歪分布

の測定結果を図 17 に示した。あらかじめ 1500 $\mu\epsilon$ 程度の張力を印加した状態を基準状態とし、そこから張力を緩めることでマイナス側の歪分布も測定している。伸長側は+900 $\mu\epsilon$ まで、圧縮側は-800 $\mu\epsilon$ までは測定できたが、それ以上の伸縮を印加した場合には相互相関が劣化して正常に歪分布測定ができなかった。しかしながら式(17)から計算される測定可能最大歪量 1500 $\mu\epsilon$ の 60%に達している。これは、位相積分コヒーレンス補正により 400 m の位置においても相互相関を十分に大きい値で保持できたためである。また、コヒーレンス補償を行わない場合、ノイズに埋もれて歪分布を全く測定できなかった。

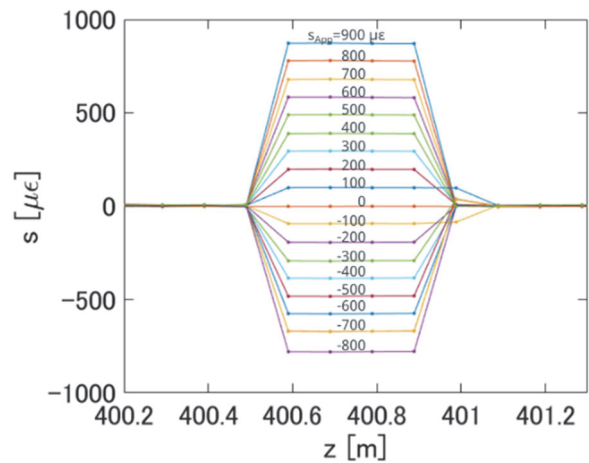


図 17 歪印加中の歪分布

印加した歪量 s_{App} と測定された歪量 s との関係を図 18 に示した。両者は線形の関係にあり、誤差 1.3% の高精度に測定できていることが分かる。

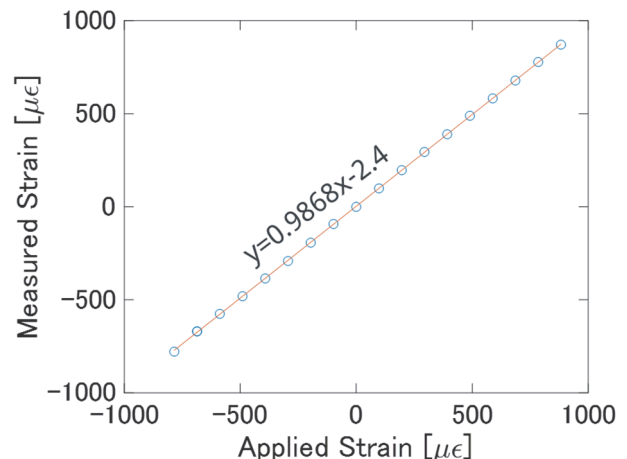


図 18 歪印加量と測定値の関係

距離分解能と歪分布の関係を測定した。距離分解能を 20, 50, 100, 200 mm に設定して測定した歪分布を図 19 に示した。距離分解能が小さくなるほど、急峻な歪立ち上がり部分を正確に測定できることが分かる。

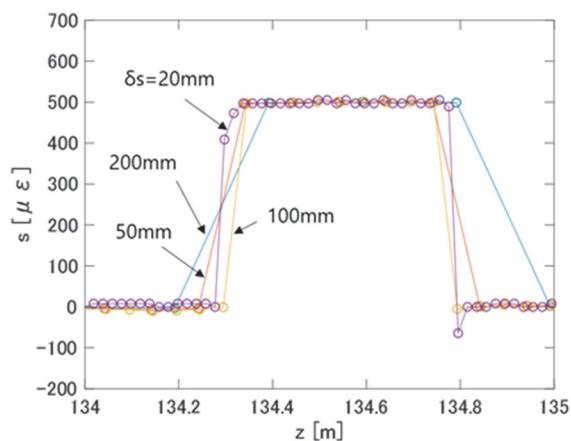


図 19 距離分解能依存性

次に歪分解能と歪分布との関係を測定した。直径約 20 cm のファイバリールを温度勾配のある場所に設置することにより、熱膨張による歪をファイバに印加した際の歪分布を距離分解能 20 mm で測定した。歪分解能 1.4, 5.3, 23 $\mu\epsilon$ でそれぞれ測定した結果を図 20 に示した。当然ではあるが、高分解能で測定するほど歪の変化を精細に測定できている。

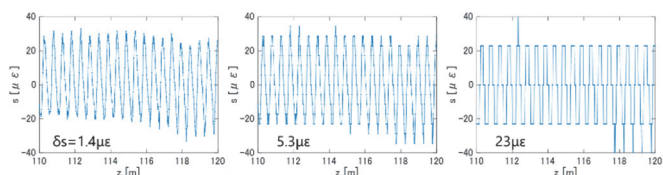


図 20 歪分解能依存性

6.2 動的歪分布測定

動的な歪分布を測定した。図 16 に示した光ファイバ伸縮実験系を自動ステージで稼働させた。自動ステージは、線形に 2.4 秒間で 600 $\mu\epsilon$ まで歪を増加後、0.2 秒間停止し、続いて 2.4 秒間で -600 $\mu\epsilon$ まで減少させる動作を繰り返させた。歪分布測定の設定は、距離分解能 100 mm, 歪分解能 1.37 $\mu\epsilon$, 位相積分コヒーレンス補償間隔 40 m。測定周波数 10 Hz とした。

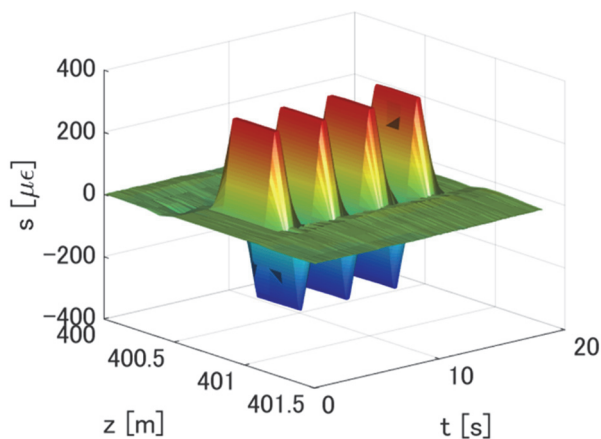


図 21 動的歪分布測定結果

測定された歪分布の動的な変化を図 21 に示した。印加された動的歪を忠実に測定できている。

図 22 に距離 400.8 m での歪値の時間変化、つまり図 21 の距離方向の断面を青線で、自動ステージによる印加歪値を赤線で示した。測定された歪値は印加歪値と良く一致している。

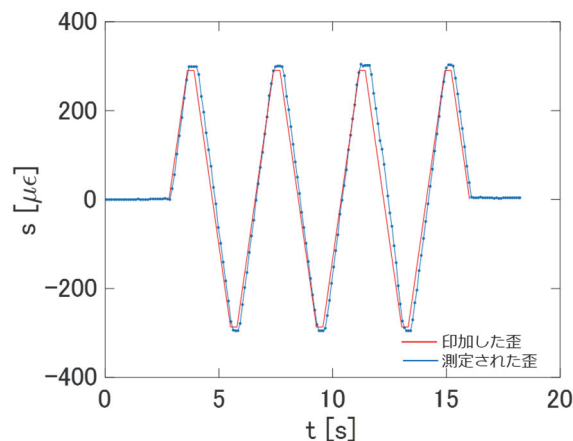


図 22 400.8 m での歪値の時間変化

歪分布測定では FFT を多く計算する。表 2 に A/D サンプリング数 2M, OFDR 分解能 0.446 mm, 距離分解能 100 mm, 歪分解能 1 $\mu\epsilon$ ($N_{RD}=2048$), 位相積分コヒーレンス補償間隔 40 m の条件での 1 回の歪分布測定で計算された FFT の数を示した。これらの膨大な計算をノート型のワークステーションに内蔵された GPU に処理させることにより、毎秒 10 回のリアルタイム測定を可能としている。

表 2 FFT 計算回数

FFT データ数	計算回数
2097152	58
2048	9000
4096	4500

上記は、すべての領域で最適化リアルタイムを実施しているが、PICCを実施する地点を 1 か所に限定すれば、その周辺 (± 20 m 程度) のみでのコヒーレンス補償となり、それ以外の場所ではコヒーレンスが劣化する。しかしながら計算処理量が削減できるため、測定速度を高速化できる。図 23 に 400 m のみで PICC を実施した際の相関関数最大値を示した。400 m 付近の相互相関最大値は 90% 以上となるが、100~300 m の領域では 80% まで低下している。しかしながら測定速度は 20 Hz となり、全域を 40 m 間隔でコヒーレンス補償を実施する場合の 2 倍となった。

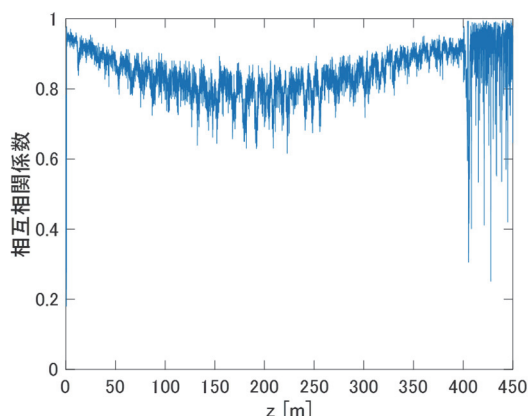


図 23 400 m 地点のみコヒーレンス補償した場合の相互相関係数

図 16 の実験系よりも高速な歪を印加できる系として、図 24 に示したカンチレバー系を作製した。このカンチレバーはプラスチック板の一端を固定したものであり、プラスチック板の表面と裏面に光ファイバを貼り付け、プラスチック板をたわませて、光ファイバに歪を印加できる。

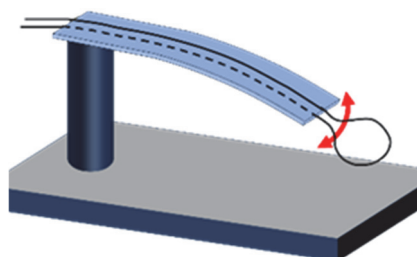


図 24 カンチレバー

カンチレバーを手で湾曲させた後、手を放してカンチレバーを振動させた際のカンチレバー表面の歪分布を測定した。歪分布測定の測定条件は、距離分解能 50 mm、歪分解能 $1 \mu\epsilon$ とした。図 25 に歪分布の時間変化を、図 26 にカンチレバー表面中央部と裏面中央部の歪量の時間変化を示した。表裏の歪がカウンター状に変化しながら減衰している様子が詳細に測定できている。

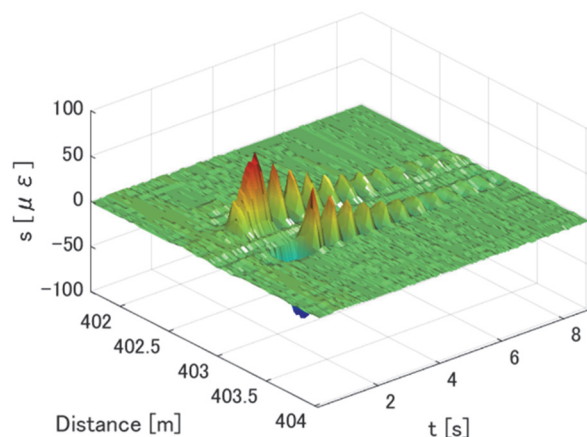


図 25 高速動的歪分布測定結果

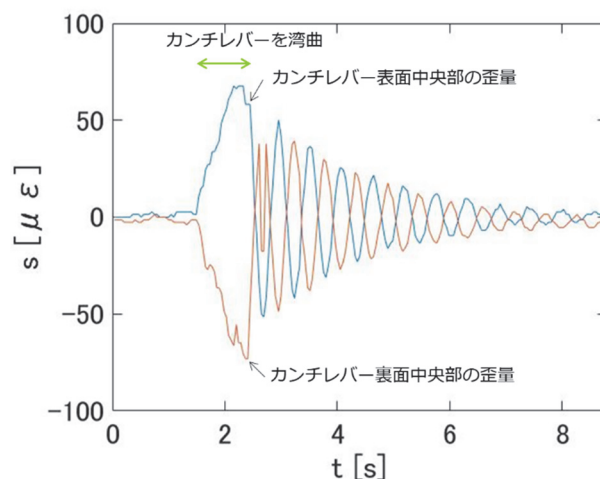


図 26 カンチレバー表裏中央部の歪量

7 位相積分コヒーレンス補償 OFDR による温度分布測定

歪分布測定において、光ファイバの伸縮の度合いは測定できるが、その原因が物理的外因によるものか、熱膨張によるものかを区別することはできない。したがって、測定された歪量は、熱膨張がないとした場合の歪量である。逆に歪量がないとして測定すれば、伸縮の原因は熱膨張であり、その量から温度分布を測定することができる。式(14)の歪への光弾性係数 p を温度弾性係数 ξ に変えれば

$$T = T_{ref} + \delta T = T_{ref} + \frac{m\lambda}{2nD_z\xi} \quad (18)$$

として温度分布を測定することができる。ここで T_{ref} は周波数成分基準値 M_{dref}^{PS} を取得した際の光ファイバの温度である。

巻き直径 12 cm でそれぞれの光ファイバ長が 50, 30, 20 m の 3 つのファイバリールを直列に接続し、これを温度分布センサとして温度分布測定を行った。図 27 に示したとおり、実験室にある木製実験テーブルの上に装置 X を置き、50 m ファイバリールは木製実験テーブル上(測定点 A)、30 m ファイバリールは、装置 X 上(測定点 B)、20 m ファイバリールは同じく装置 X 上(測定点 C)に置いた。また、測定点 C の直下の装置 X 内部には発熱源がある。

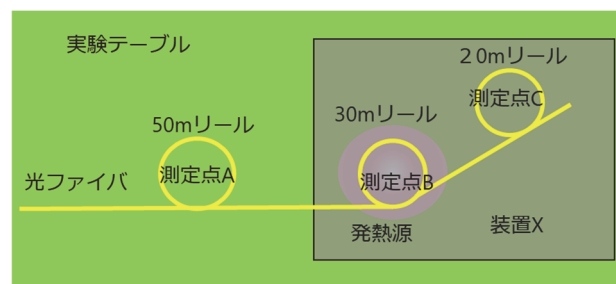


図 27 温度分布用センサ配置図

冬季の夜 20 時に温度分布測定を開始し、それと同時に装置 X の電源を投入した。その際の全体の温度は 22 度であった。実験室

の空調は 20 時の時点ではオフとなっており、翌朝の 7 時にオンとなる。温度分解能 0.07 度、距離分解能 50 mm、測定時間間隔 1 分とし、約 12 時間測定を続けた。結果を図 28 に示した。

図 28 の(a)はすべての領域の 12 時間の温度分布を、(b)は測定開始から 1 分後と 5 時間後の温度分布、(c)は 25, 75, 90 m 地点の温度変化を示している。測定点 A(0~50 m)の温度はほぼ一定であるが、測定点 B(50~80 m)では 3.5 度、測定点 C(80~100 m)では 3 度の温度上昇があった。その際、測定点 B, C の昇温は開始から 15 分ほどで完了し、その後は安定であった。

実験室の空調が始動する午前 7 時(測定開始 11 時間後)では、一時的にすべての領域で温度が 0.6 度低下していた。これは、空調始動直後は温風ではなく、冷えた空気が強めに送風されるためである。その後徐々に降温しているのは、送風により装置 X が冷却されるためと考えられる。

このように位相積分コヒーレンス補償 OFDR システムは、広い範囲を高精度に温度分布測定が可能である。

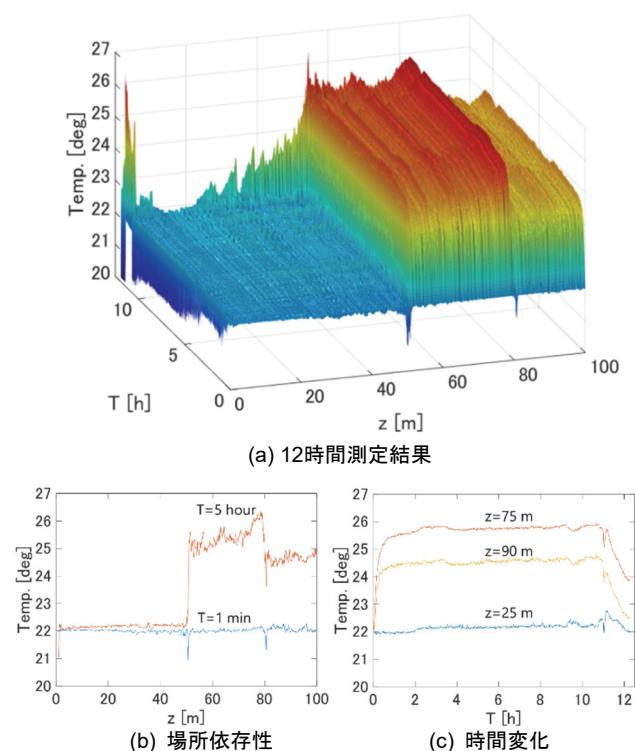


図 28 温度分布測定結果

広い範囲の温度分布はサーモカメラ等で比較的簡単に測定できるが、電気自動車に組み込まれた充電電池の温度分布や、地中の温度分布のような外部から撮影することができない測定対象物には OFDR 方式温度分布測定器は有用と言える。

8 結び

OFDR システムに不可欠なコヒーレンス補償方法として、位相積分コヒーレンス補償法を考案し、この手法を施した OFDR システムを開発した。この位相積分コヒーレンス補償 OFDR システムでは、距離方向の測定レンジ全域でコヒーレンス補償が可能となり、高品位な OFDR スペクトラムの測定が可能となった。また、得られた OFDR スペクトラムから光ファイバの歪分布を高速に計算するプログラムを開発し、歪・温度分布のリアルタイム測定を可能とした。

位相積分コヒーレンス補償 OFDR システムで測定された歪・温度分布を示し、位相積分コヒーレンス補償法が OFDR の性能を大幅に向上させ、歪・温度分布を高精度に測定できることを実証した。

参考文献

- 1) 腰原 勝, 中村賢一, 山崎教明, 斉藤崇記, 古川 浩, :“高性能 FBG センサモニタ AR4041A/AR4011A の開発”アンリツテクニカル 87 号, pp.60-67(2012.3)
- 2) María R. Fernández-Ruiz et al, “Time-expanded phase-sensitive OTDR: High-resolution DAS based on dual-comb spectroscopy,” 28th International Conference on Optical Fiber Sensors, Tu2.1(2023).
- 3) T. Kurashima, et al, “Brillouin optical-fiber time domain reflectometry,” IEICE trans. Commun. E76-B, 382 (1993).
- 4) T. Matsumoto, M. Kishi, and K. Hotate, “Discriminative and distributed measurement of temperature and strain with time-division pump-probe-read light generation by single laser diode in Simplified BOCDA system,” 28th International Conference on Optical Fiber Sensors, 9157-499 (2014)
- 5) J. Song, W. Li, P. Lu, Y. Xu, L. Chen, and X. Bao, “Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry, 2 IEEE Photon. J. 6, 6801408 (2014).
- 6) 腰原 勝, 斉藤崇記, :“高コヒーレンス波長掃引光源を用いた光干渉計測”アンリツテクニカル 97 号, pp.40-44
- 7) 斉藤崇記, :“OFDR による 3 次元形状測定”アンリツテクニカル 95 号, pp.28-34(2020.3)
- 8) 中村賢一, 腰原 勝, 斉藤崇記, 川北浩二, :高コヒーレンス波長掃引光源”アンリツテクニカル 92 号, pp.35-39(2017.3)
- 9) F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, “Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation,” J. Lightw. Technol. 30, pp.1015-1024 (2012).

- 10) Takanori Saitoh, "High accuracy OFDR by coherence compensation method," 28th International Conference on Optical Fiber Sensors, Th6.68(2023).

執筆者



斉藤 崇記
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第1開発部



多田 彬子
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第1開発部