

光ファイバ長手方向波長分散分布測定法の改良

Improvement of a Measurement Method for the Longitudinal Chromatic Dispersion Distribution

忠隈昌輝*
Masateru Tadakuma味村 裕*
Yu Mimura麻生 修*²
Osamu Aso

概要 全光信号処理デバイスに必要となる高非線形光ファイバは、その仕様要求として長手方向に安定した波長分散性を持つことが必要とされる。そのため、長手方向での波長分散分布特性を高精度で評価する手段が必要となる。ファイバ中の四光波混合現象を用いる非線形OTDR法は波長分散分布を測定する有効な方法であるが、非線形性の高いファイバを評価する際には、その特性ゆえの測定誤差要因が存在していた。そのため、このようなファイバの波長分散分布特性を評価する際の測定誤差要因を検討し、更なる高精度に向けた測定系の改良を行って、測定誤差の低減を実現しその有効性を確認した。

1. はじめに

情報通信分野の自由化と情報社会の発展により、通信情報量が飛躍的に増大する傾向にある。光を直接増幅するエルビウムドープファイバ増幅器(EDFA; erbium-doped fiber amplifier)やラマンファイバ増幅器(raman fiber amplifier)の実用化によって、波長1.55 μm 帯では非常に高い強度の光信号が得られるようになった。これによって光ファイバの伝送損失が補償され、数千kmにも及ぶ無中継伝送が可能となっている。このような光増幅技術を用いて、波長多重(wavelength division multiplex; WDM)通信方式や時分割多重(time division multiplex; TDM)通信方式により大容量化・高速化が進んでいる。光中継システムの高速度が進むにつれ、光信号が光ファイバ中を伝播する際に受ける波長分散、非線形効果、偏波モード分散などによる信号波形劣化が顕著になる。このような信号劣化を補償したり電気信号処理ではできない高速処理を行うデバイスとして光ファイバの非線形性を用いたファイバ型デバイスが注目されている^{1)~3)}。非線形ファイバデバイスには通常のファイバより10倍程度大きな非線形性を持つ高非線形ファイバが用いられる^{4), 5)}。ファイバ中での非線形効果を利用する際、その非線形性の大小とともに波長分散値の変化がその度合いに影響を与える。そのためファイバ全長にわたって均一な波長分散値であることが求められる。しかし光ファイバは母材の安定性や線引時の変化など製造過程の不確定性により、長手方向に波長

分散特性の変動が生じてしまう。そのため光ファイバ長手方向の波長分散値の分布状態を非破壊で評価する手段が求められており、様々な方法が検討されてきた。ファイバの両方向からOTDRにより後方散乱光波形を観測し、その平均値から構造分散変化を求める方法⁶⁾や非線形光学現象を利用した方法が提案されている。現在多く用いられている方式は、ファイバ中の四光波混合(FWM; four wave mixing)により発生するアイドラ後方散乱光を観測しその強度変動周期から分散を求める非線形OTDR法⁷⁾と呼ばれている測定方法である。そのほか変調不安定性(MI; modulation instability)の発生効率からゼロ分散波長の分布を測定する方法⁸⁾や光スペクトラムからゼロ分散波長の分布を推定する方法⁹⁾等が提案されている。これらの方法の中から我々は非線形OTDR法を採用し、各種ファイバの評価を行ってきた。しかし高非線形ファイバに対しては、精度の高い測定値が求められることと、非線形性が高い特性から従来のファイバとは異なり大きな測定誤差が生じる問題があった。本報告では高非線形ファイバを測定する上での測定誤差の検討及びその問題に対処した測定系の改良、高非線形ファイバ測定評価結果を示す。

2. 非線形OTDR法の測定原理

非線形OTDR法の概念図を示す(図1)。

波長の異なる二波長のパルス光(ポンプ光とプローブ光)をファイバに入射する。ファイバ中では四光波混合によりアイドラ光が発生する。ファイバに入射した波長の異なるパルス光の間には波長分散による遅延が生じるため、ファイバ長手方向の各地点において互いの位相差が変化する。そのため発生するア

* 研究開発本部 ファイナルフォトニクス研究所

*² 研究開発本部 横浜研究所

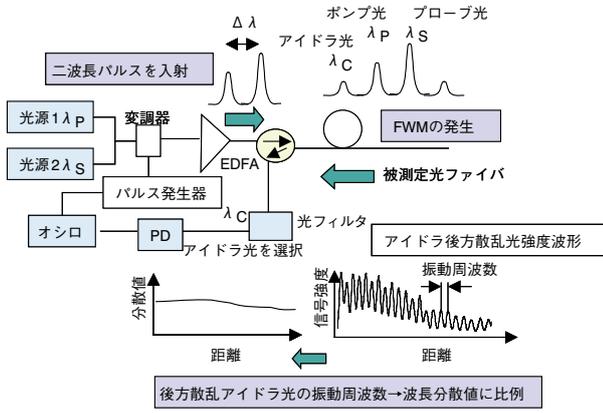


図1 非線形OTDR法概念図
Schematic of nonlinear OTDR technique.

イドラ光の強度がその位相差に応じて変化する。そこでアイドラ光の後方散乱光の時間的強度変動を観測し強度変化の周期を見積もることにより波長分散を求めることができる。

非線形OTDR法において用いる理論的測定原理を、下記に示す光ファイバ中での四光波混合現象を記述する非線形結合モード方程式(1)～(3)式から検討してみる。

$$\frac{dE_p}{dz} + \frac{1}{2} \alpha E_p = i\gamma \left[|E_p|^2 + 2|E_s|^2 + 2|E_c|^2 \right] E_p + 2E_p^* E_s E_c \exp(i\Delta\beta z) \quad (1)$$

$$\frac{dE_s}{dz} + \frac{1}{2} \alpha E_s = i\gamma \left[|E_s|^2 + 2|E_c|^2 + 2|E_p|^2 \right] E_s + E_c^* E_p^2 \exp(-i\Delta\beta z) \quad (2)$$

$$\frac{dE_c}{dz} + \frac{1}{2} \alpha E_c = i\gamma \left[|E_c|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_s|^2 \right] E_c + E_s^* E_p^2 \exp(-i\Delta\beta z) \quad (3)$$

ここでp, s, cは各々ポンプ光, プローブ光, アイドラ光を表す。 α は光ファイバの損失であり, γ は非線形定数($\gamma = 2\pi/n_2 \cdot n_2/A_{\text{eff}}$, n_2 :非線形屈折率, A_{eff} :有効コア断面積)である。 $\Delta\beta$ は伝搬定数の位相不整合条件 z は長手方向を示す

$$\Delta\beta = \beta_s + \beta_c - 2\beta_p \quad (4)$$

であり, 周波数的には位相整合条件

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_c \quad (5)$$

を満たしているものとする。ここで, $\omega_p, \omega_s, \omega_c$ はそれぞれポンプ光, プローブ光, アイドラ光の角周波数を示す。

非線形結合モード方程式((1)～(3)式)の厳密な解を求めるのが困難なため, 以下のような近似による解析解を用いて考察している。

条件(1) FWM発生過程においては伝送損失が影響しない
条件(2) 自己位相変調(SPM)及び相互位相変調(XPM)の効果は考慮しない

条件(2)を満たすためには発生するアイドラ光強度が小さくポンプ光とプローブ光の強度に影響を及ぼさないことが求められる。またこの時, 入力ポンプ光強度 $P_p(z=0)$ と入力プローブ光強度 $P_s(z=0)$ は以下のような関係を保つことが必要である。

$$P_s(z=0) = 2P_p(z=0) \quad (6)$$

この(6)式の条件を保つことにより, SPMやXPMの効果打ち消し, 上記条件(2)の仮定を成立させることになる。

上記条件(1), (2)を考慮した式の導出は以下ようになる。

$$\frac{dE_p}{dz} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dE_s}{dz} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dE_c}{dz} = i E_s^* E_p^2 \exp(-i\Delta\beta z) \quad (9)$$

E_p :波長 λ_p (ポンプ光)電界, E_s :波長 λ_s (プローブ光)電界
 E_c :アイドラ光電界, P_p^0 :入力波長 λ_p 強度
 P_s^0 :入力波長 λ_s 強度, $\Delta\lambda$:入力二波長間隔

これより長手方向 z の位置におけるアイドラ光の電界及び光強度は以下ようになる。

$$E_c = \frac{E_s^* E_p^2}{\Delta\beta} \{1 - \exp(-i\Delta\beta z)\} \quad (10)$$

$$P_c = 4 \left(\frac{\gamma^2 P_s P_p}{\Delta\beta^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta\beta z}{2} \right) \quad (11)$$

ここでポンプ光, プローブ光及びアイドラ光の伝送損失を考慮して, ファイバ距離 z を伝搬し受光されるアイドラ後方散乱光強度は以下の式で記される。

$$P_c(z) \propto \left(\frac{\lambda_p}{D_c \Delta\lambda^2} \right)^2 \left(\frac{n_2 P_p^0}{A_{\text{eff}}} \right)^2 R P_s^0 \sin^2(\Delta\beta z/2) \exp(-4\alpha z) \quad (12)$$

R :レーリー散乱係数, α :損失係数, D :波長分散値
ここで位相不整合条件 $\Delta\beta$ とポンプ光波長での波長分散値 D との関係は次式で表される。

$$\Delta\beta = -\frac{\lambda_p^2}{2\pi c} D(\lambda_p) (\omega_c - \omega_p)^2 = -\frac{\lambda_p^2}{2\pi c} D(\lambda_p) (\lambda_p - \lambda_s)^2 \quad (13)$$

ここで $\lambda = 2\pi c/\omega$ の関係から(13)式は,

$$\Delta\beta = -2\pi c D(\lambda_p) \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_p} \right)^2 \quad (14)$$

と表すことができる。

そして得られる波長分散値は(15)式で示される。

$$D(\lambda_p, z) = \frac{2n}{c^2} \left(\frac{\lambda_p}{\Delta\lambda} \right)^2 f \left\{ t = \left(\frac{2n}{c} \right) z \right\} \quad (15)$$

$f(t)$:時間 t におけるアイドラ後方散乱光波形の瞬時周波数
このようにアイドラ後方散乱光の時間的変動波形(OTDR波形)を観測し, その強度変動周期が波長分散値に比例していることから, 長手方向各地点での波長分散値を求めることができることになる。

3. 高非線形ファイバ測定時の問題点

非線形OTDR法を用いて光ファイバの波長分散分布をより精度よく求めるには, アイドラ光のSN比が高く明瞭な時間的変動波形を観測し正確な信号周波数を算出することが望まれる。そのためにはより高いピーク強度を持つパルス光を入射す

ることが必要となる。しかし高非線形ファイバを測定する際、入射するパルスピーク強度を強くすると、その高い非線形性から以下に示す誤差要因が生じる問題がある。

3.1 誘導ブリュアン散乱 (SBS; Stimulated Brillouin Scattering) の発生

SBSは、あるしきい値以上の入力強度でファイバ中において起こる非線形現象であり、入力光と異なる波長の後方散乱光が誘導散乱してしまうため、全ての入力パワーが出力端まで透過していかない。これはファイバ条長が長い場合や非線形性が高いファイバでより発生する。この現象を回避するためには、位相変調により光源スペクトル線幅を広げることが効果的であることが知られているが入力パワーが高い場合には完全に抑えることは難しい。また非線形OTDR法では入力ポンプ光及びプローブ光に強いピーク強度が必要になるため、光源であるLDからの光を光増幅器(EDFA)で増幅して使用することが一般的である。この時EDFAで増幅されるポンプ光及びプローブ光は被測定光ファイバの全長を往復する周期で繰り返すパルスでそのDuty比(パルス繰り返し時間間隔に対するパルス時間幅の割合)は0.1～数%程度である。たとえば条長10 kmのファイバに対しては、パルス繰り返し時間間隔が98 μ s、パルス幅が500 nsという値である。このようなDuty比が低く繰り返し周期の長いパルスをEDFAで増幅すると、パルスの先端部分が急激に増幅されパルス形状が変形する(パルスサージが発生する)現象が起こる。これはエルビウム添加ファイバ中でパルスが透過しない間に励起光によりエルビウムイオンがエネルギー準位に励起され、次にパルスが透過する際に上準位から急激なレーザ遷移が生じるためである。このようにパルスの先頭部分だけが異常に強度が強い変形したパルスはファイバ伝播中にその先頭部分においてSBSを誘発してしまう。また非線形OTDR法においてポンプ光とプローブの強度設定は、(6)式に示したようにその強度比が1:2となるように設定している。しかし先頭にサージが生じパルス幅の中でピーク強度が変化するパルスにおいては、パルス幅の全幅において強度比を2:1に設定することは困難である。(6)式が示すように強度比を2:1に保つことで余計な非線形効果を相殺しているわけであるが、この条件が崩れると相殺されない非線形効果の影響で(12)式で示した理論関係に誤差を生じる。また(12)式で示されるようにファイバ長手方向の任意の地点 z における後方散乱アイドラ光強度はポンプ光及びプローブ光のパルス幅とピーク強度に比例しているため、後方散乱アイドラ光の振動波形はパルス幅で積算された効果として現れる。従って光増幅されながらもサージが抑えられパルスの全幅において強度が一様なすなわち矩形のパルスが(6)式の条件を満たす最も望ましい形状であることが分かる。

3.2 変調不安定性 (MI; modulation instability) の影響

変調不安定性は信号光と周辺の波長の雑音との非線形な相互作用によるもので、異常分散性ファイバ中で発生することが知られている。特に高出力を得るためにEDFAを用いる際、信号光とASEノイズとの相関で発生することが多い。非線形OTDR法において波長の異なる二波長の強度設定は、(6)式に示したようにその強度比が2:1となるように設定している。しかしファイバ中でMIが発生するとエネルギーが周辺の波長成

分として広がり、入力条件として強度比を2:1に設定しても、出力端では二波長の光の強度比は2:1からかけ離れた状態となる。このような状態では上記SBSにおける問題と同様に、相殺されない非線形効果の影響で(12)式で示した理論関係に誤差を生じる。MIはファイバ条長が長いほど発生するため、この影響がある場合には波長分散分布の測定結果はパルス入力側から末端に進むにつれその測定精度が悪くなり誤差が大きくなっていく。

図2に非線形OTDR法において異常分散性ファイバ測定時にMIが発生した状態での被測定光ファイバ入力及び透過スペクトルを示す。入力スペクトルではポンプ光波長1553.4 nm、プローブ光波長1555.4 nmに対し、出力では中心波長は変わらないものの入力光波長以外のスペクトル成分が発生している。またこの時観測するアイドラ光は1551.4 nmに位置しているが、MIが更に大きく発生すると観測するアイドラ光波長におけるノイズレベルが上昇しついにアイドラ光ピークがノイズレベルに埋もれてしまい識別できない状態になってしまう。

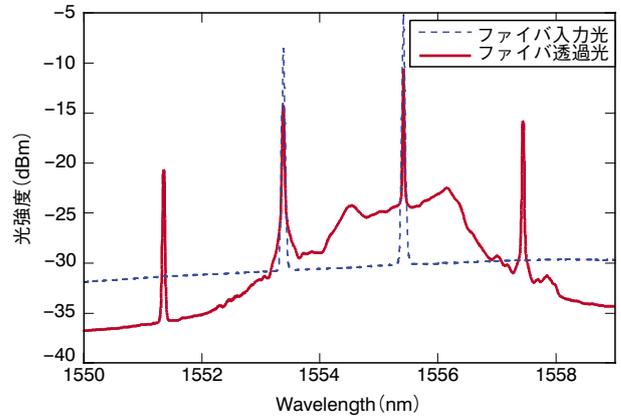


図2 MI発生時の入力及び透過光スペクトル
Optical input and transmission spectrum with MI.

MIはピーク強度に依存するため、その影響を抑えるためには強度を下げるが必要になる。しかし強度を下げると観測するアイドラ光の発生も弱くSN比が悪くなることから測定誤差が大きくなる。異常分散ファイバの波長分散分布を測定する際のこのような問題は問題提起がされており、この問題を回避する測定方法が提案されている¹⁰⁾。しかし、より複雑な測定系構成が必要になり作業性が悪い難点がある。

4. 測定系の改良

上記した測定誤差要因を回避するための測定上のポイントをまとめると以下のようなになる

- ・ 入力光強度の低減
- ・ 矩形パルスの実現
- ・ アイドラ後方散乱光のSNRの向上

これらの条件を同時に満たすための測定系の改良を行った。

4.1 入力光ノイズ低減によるアイドラ光SNR向上

従来の測定系構成では入力する2つの波長の光を合波・パルス化し光増幅器で増幅後、被測定光ファイバに入射していた。この構成では光増幅器で発生するASEノイズが混在してしまう。また入力光の波長設定は測定する光ファイバの平均波長分

散値に対応して調整するため光増幅器の出力直後に光フィルタを挿入してASEノイズをカットすることも困難である。そのためパルス(ポンプ、プローブ)それぞれの光のノイズを低減するため、各々の光を独立にパルス化、光増幅し、ASEノイズをカットする構成とした。

4.2 EDFAによるパルスサージを抑えるパルス整形

従来の測定では入力光は矩形波電気信号パルスが印加された光変調器で矩形波パルス化され、光増幅器での増幅後サージが発生していた。そこでパルスサージを抑制するため、EDFA出力後の光パルス波形が矩形になるようにパルス化する光変調器に印加する電気信号波形を調整した。図3に電気信号波形調整によるパルスサージ補正の有無によるEDFA出力光パルス波形を比較した。電気信号波形はファンクションジェネレータにより任意のパルス形状に生成され、EDFA出力光パルスの形状を観測し矩形波となるように調整している。

測定系構成を図4に示す。

送信部で光ファイバに入力する二つの波長のパルス光(ポン

プ光とプローブ光)はそれぞれ独立して光増幅し狭帯域光バンドパスフィルタでASEノイズをカットされる。これらのパルス光は時間的に重なり合うように遅延時間を調整しカップラで合波される。合波した光は被測定光ファイバに入力する。ファイバ中では非線形効果によりアイドラ光が発生する。被測定光ファイバが異常分散性ファイバである時ファイバ中でMIが発生するが、ファイバへ入力するポンプ光及びプローブ光は光フィルタでASEノイズが除去されポンプ光及びプローブ光のSN比が向上したことによりMIの発生効率を低減させることができる。そのためアイドラ光波長においてもMIによるノイズの増加を抑えることができ、観測する後方散乱アイドラ光のSN比を向上させることができる。

5. 高非線形ファイバ評価

表1に示す特性を持つ波長分散の正負が異なる二種類の高非線形ファイバ(No.1, No.2)の測定を行った。測定条件を表2に示す。入力光強度はプローブ光ピークにおいて20~30 mWと従来の非線形OTDR法で用いられているピーク強度(約1 W)から大幅な強度低下を実現している。また異常分散性ファイバ評価時にはファイバ透過光スペクトルから、「ポンプ光:プローブ光強度比が1:2」がほぼ保たれていることを確認した。二波長間隔 $\Delta\lambda$ はより広く設定した方が、アイドラ光強度振動周波数が高くなり、距離的な測定精度は向上する。しかし(12)式で示されるようにアイドラ光強度は $\Delta\lambda$ の4乗に反比例して弱くなる。したがって $\Delta\lambda$ の設定限界は受光部での感度に依存してくる。本測定系では、サーキュレータにより分岐された後方散乱光を二つの狭帯域波長可変光バンドパスフィルタ(半値全幅0.6 nm及び約3 GHz)を用いてアイドラ光を選択しAPD及び電気増幅器で信号波形を検出・増幅しており微弱光観測が可能である。そこで $\Delta\lambda$ を末端まで強度変動波形が認識できる限界に設定した。観測されたアイドラ後方散乱光波形を図5に、

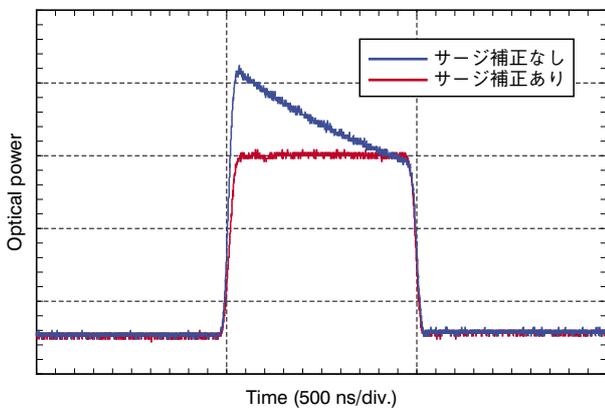


図3 サージ発生及び補正入力光パルス
Optical input pulse shapes with surge, with and without compensation.

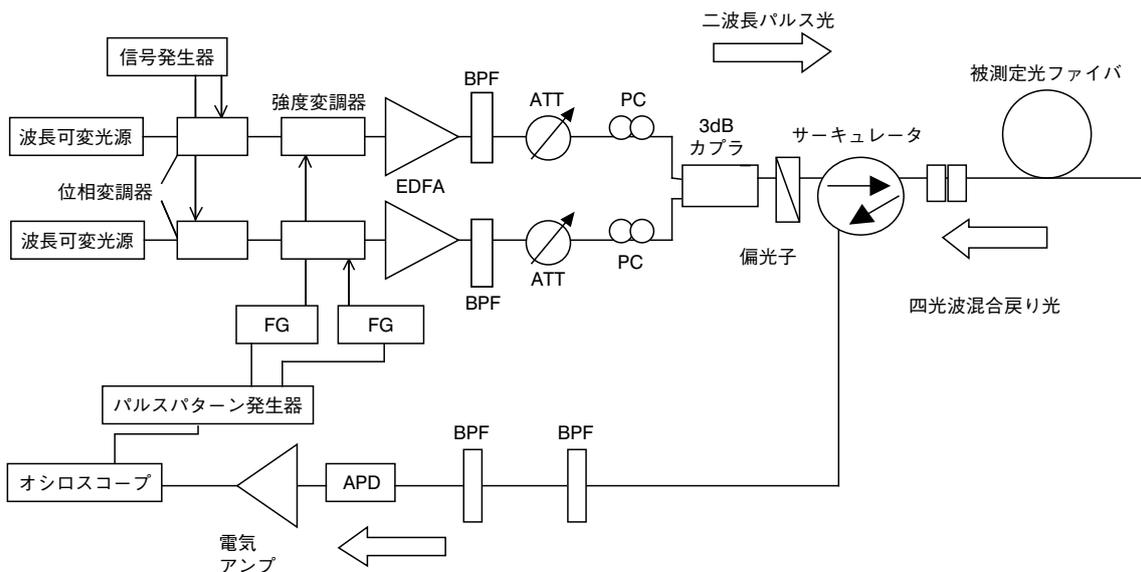


図4 測定系構成図
BPF: 光バンドパスフィルタ, ATT: 光アッテネータ, PC: 偏波コントローラ, APD: アバランジェフォトダイオード, FG: ファンクションジェネレータ
Experimental setup.
BPF: Optical band-pass filter, ATT: Optical attenuator, PC: Polarization controller, APD: Avalanche photodiode, FG: Function generator

波長分散分布測定結果を図6、図7及び表3に示す。測定はファイバ両端(IN側, EX側)からパルスを入力し測定した結果を比較している。IN側, EX側それぞれから測定した全長平均値を比較すると、その差は0.01 ps/nm/km以下であった。また位相法による全長平均波長分散値と比較すると、ファイバNo.1, No.2はそれぞれ0.8%, 3.4%の差でありほぼ等しいことが確認された。また各ファイバにおいてIN側, EX側からの測定値を比較し、長手方向各地点での差を求め、局所ばらつきとして評価した。この時、局所ばらつきの最大値を求めると、ファイバNo.1, No.2はそれぞれ0.046, 0.027 ps/nm/kmであり、これは全長平均分散値の3.38, 0.78%に対応し、長手方向の分布としても誤差4%程度で測定されていると考えられる。

またこの測定系は高非線形ファイバだけでなく、非線形性の低い通常の伝送路用光ファイバも同様の精度で測定できることを確認している。

表1 高非線形ファイバの特性
Characteristics of selected fibers with high nonlinearity.

特性項目	No.1	No.2
分散 (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹) @1550nm	-1.431	3.506
分散スロープ (ps · nm ⁻² · km ⁻¹) @1550 nm	0.021	0.021
カットオフ波長λ _c (nm)	1141.1	1293.1
条長 (m)	7500	8000
n ₂ /A _{eff} (× 10 ⁻¹⁰ /W) @1550 nm	30	
損失 (dB/km) @1550 nm	0.386	0.419

表2 測定条件
Measurement conditions.

ファイバ	No.1	No.2
ポンプ光波長 (nm)	1553.254	1553.250
プローブ光波長 (nm)	1558.370	1557.084
二波長間隔 (nm)	5.166	3.834
プローブ光ピーク強度 (mW)	20.5	31.2
パルス幅 (ns)	300	300

※ポンプ光強度はプローブ光強度の1/2に設定

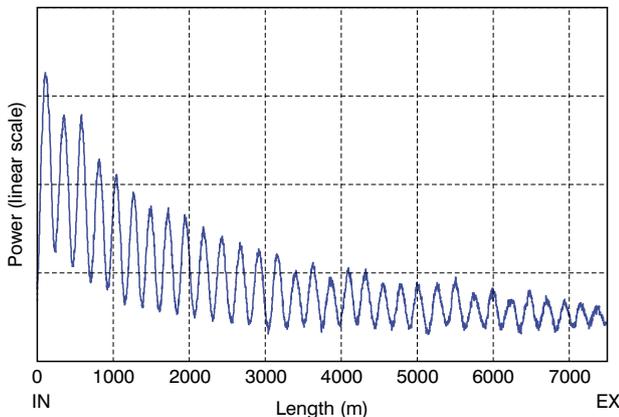


図5 観測されたイドラ後方散乱光波形
(No.1.正常分散性ファイバでのIN側入射時における例)
Observed trace of idler back scattering light over the fiber length.

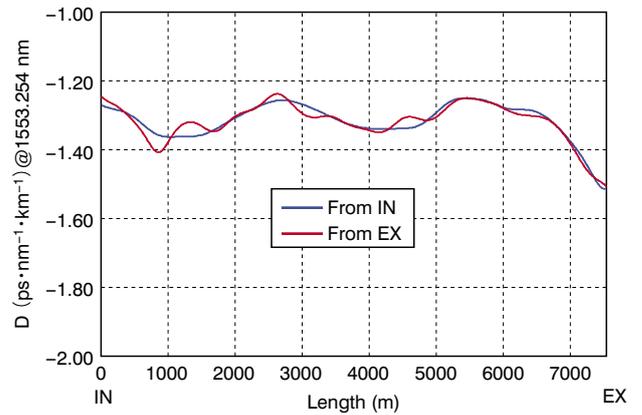


図6 波長分散分布特性 (No.1 正常分散性ファイバ)
Chromatic dispersion distribution of No.1 fiber with normal dispersion.

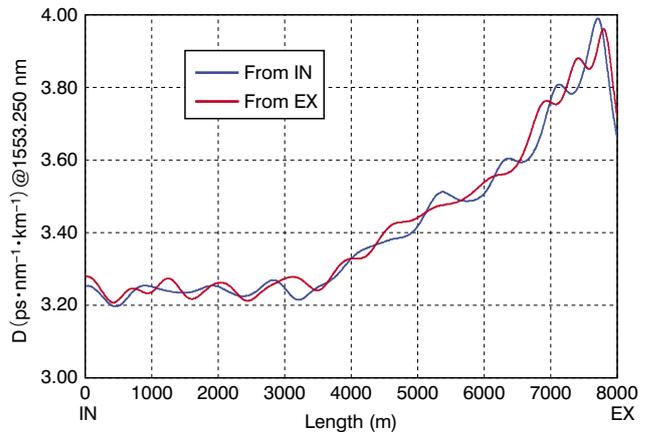


図7 波長分散分布特性 (No.2 異常分散性ファイバ)
Chromatic dispersion distribution of No.2 fiber with anomalous dispersion.

表3 長手方向波長分散分布測定結果
Measurement results of chromatic dispersion distribution of selected fiber.

(単位; ps · nm⁻¹ · km⁻¹@1553.3 nm)

ファイバ	No.1		No.2	
	IN	EX	IN	EX
測定方向				
全長平均	-1.316	-1.317	3.411	3.420
IN - EX 平均	-1.316		3.416	
標準偏差	0.052	0.053	0.211	0.212
最大値	-1.250	-1.237	3.991	3.961
最小値	-1.514	-1.506	3.197	3.208
局所ばらつき	0.052		0.100	
最大値	3.95% (対平均値)		2.55% (対平均値)	
位相法測定値	-1.363		3.443	
位相法との誤差	0.046 (3.38%)		0.027 (0.78%)	

※位相法測定値はポンプ光波長換算値

6. おわりに

全光信号処理に使用される高非線形ファイバは高い非線形特性とともに波長分散値の安定性も求められており、測定精度の高い波長分散分布測定方法で評価することが必要となる。そこで送信パルス光のノイズ低減、矩形波パルス整形を行い、低入力光強度で非線形ノイズを低減した非線形OTDR測定系を構築し、高非線形ファイバの測定評価を行った。その結果、位相法による全長平均分散値からの差及び長手方向各地点での局所的誤差ともに全長分散値の4%程度の精度での測定が実現された。

参考文献

- 1) O. Aso et al.: Electron. Lett., **36** (2000), 709.
- 2) F. Futami et al.: OAA2003, MD07 (2003), 82.
- 3) K. Igarashi et al.: OAA2003, CMH7 (2003).
- 4) T. Okuno et al.: IEEE J. Selct. Top. Quantum Electron., **5** (1999), 1385.
- 5) J. Hiroishi et al.: ECOC2002, PD-1, 5 (2002).
- 6) K. Nakajima et al.: J. Lightwave Technol., **15** (1997), 1095.
- 7) L. F. Mollenauer, et al.: Opt. Lett. **21** (1996), 1724.
- 8) S. Nishi et al.: Electron. Lett., **32** (1996), 579.
- 9) I. Brener et al.: Opt. Lett., **23** (1998), 1520.
- 10) M. G. Herraes et al.: ECOC2003, PD Th4.1.5 (2003).