

# 100 Gbit/s デジタルコヒーレント光トランスポンダ

新規事業推進センター 高橋 智和<sup>1</sup>・高地 悠貴<sup>1</sup>・横山 修司<sup>1</sup>・  
梅沢 正彰<sup>1</sup>・藤咲 芳春<sup>2</sup>

## 100 Gbit/s Digital Coherent Optical Transponder

T. Takahashi, Y. Takachi, S. Yokoyama, M. Umezawa, and Y. Fujisaku

次世代光伝送システムの必須技術として、デジタルコヒーレント方式が期待されている。従来の強度変調・直接検波方式と比べて、受光感度や周波数利用効率が向上し、強力な波形等化機能により波長分散や偏波モード分散などの線形波形歪を補償できる利点がある。本稿では、新たに開発したデジタルコヒーレント方式の 100 Gbit/s 長距離光トランスポンダを紹介する。本製品は、業界標準である OIF-MSA に準拠している。システム要求により追加可能なオプションとして、パルスカーバと可変光減衰器を内蔵することができる。

Digital coherent technology is expected to be the most important technology for the next generation optical transmission systems. Compared with the conventional intensity modulation-direct detection technique, the digital coherent can improve sensitivity and spectral efficiency, and can compensate with powerful digital equalization function for the linear waveform distortion, such as chromatic dispersion and polarization mode dispersion. In this paper, we introduce a newly developed 100 Gbit/s optical transponder using digital coherent technology for long reach. This product is based on OIF-MSA. The pulse carver and variable optical attenuator can be built in as an optional extra to meet the requirement for a variety of transmission systems.

### 1. ま え が き

近年のブロードバンドの普及にともない、インターネットトラフィックは年々増加している。ネットワーク利用形態の変化に加え、スマートフォンやタブレット端末の普及により、この勢いは衰える兆しが無い。このような状況下で、基幹系光ネットワークでもさらなる高速化、大容量化が求められている。

近年の大容量光通信システムは、主に 10 Gbit/s ベースに波長多重技術 (WDM) を併用することで実現してきたが、さらなる大容量化を進めるためにはチャンネル当たりの高速化が必須となる。しかしながら、40 Gbit/s 以上の伝送を実現するにあたり、従来から採用されてきた直接変調・直接検波方式を適用すると、要求される光雑音耐力、光占有帯域幅、分散耐力などの特性確保が困難になる。そこで、40 Gbit/s ベースのシステムには多値位相変調・遅延検波 (DQPSK) 方式が導入されている<sup>1)</sup> が、伝送速度が 100 Gbit/s 以上になると、DQPSK 方式を用いても上述の諸課題が顕著になり、伝送距離が制限されてしまう。近年、これらの課題を克服する技術として、無線で実用化されているホモダイン検波、デジタル信号処理技術を光通信に応用したデジタルコヒーレント

方式<sup>2)</sup> が脚光を浴び、研究開発や実用化が活発になっている。デジタルコヒーレント方式は、コヒーレント検波をするため、従来の直接検波方式と比べて受信感度を向上することができる。また、光信号の振幅と位相を正確に検出するため、強力な波形等化機能により波長分散 (CD) や偏波モード分散 (PMD) などの線形波形歪みを補償することが可能である。さらに、多値変調技術や偏波多重技術との組合せに柔軟に対応できるため、周波数利用効率が向上することができる。

本稿で紹介する光トランスポンダは、光通信装置の中の物理層 (電気-光変換、光送受信など) の機能を受け持つサブシステムである。当社では、これまで長距離通信用の光トランスポンダの開発に注力し、業界標準である 300 pinMSA<sup>3)</sup> に準拠した、10 Gbit/s、40 Gbit/s の光トランスポンダの開発を進めてきた<sup>4)5)</sup>。このたび、OIF-MSA<sup>6)</sup> に準拠したデジタルコヒーレント方式の 100 Gbit/s 光トランスポンダを開発したので、その特徴と性能を報告する。

### 2. 機 能

#### 2.1 外観

光トランスポンダの外観を図 1 に示す。筐体部 (放熱用のヒートシンクを含む) の寸法は、127 mm × 177.8 mm × 33 mm であり、OIF-MSA サイズに準拠している。

1 テレコム製品部

2 テレコム製品部グループ長

## 略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
WDM	Wavelength Division Multiplexing	一本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を同時に入力し、大容量の情報を送る方式
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	2ビットのデータを4つの位相に割り当てるデジタル変調方式であって、直前のシンボルとの差分に位相情報を与えるもの
CD	Chromatic Dispersion	光ファイバ中を伝搬する光の速度の波長依存性により、光のパルス幅が広がる現象
PMD	Polarization Mode Dispersion	光ファイバ中を伝搬する光の直交する2つの偏波モード間の群遅延差により、光のパルス幅が広がる現象
MSA	Multi Source Agreement	複数の企業が集まって統一した仕様を策定し、それに準拠した製品を提供する形態
OIF	Optical Internetworking Forum	光ネットワーク機器、部品全般に係わる業界標準の推進を行う標準化団体
SFI-S	Scalable Serdes Framer Interface Standard	40 Gbit/s 超のアプリケーション向けに策定されたインターフェース規格
DSP-LSI	Digital Signal Processing - Large Scale Integration	デジタル信号処理をになう大規模集積回路
MUX	Multiplexer	複数のデジタル信号をまとめ、より高いデータレートで出力する機構
DP-QPSK	Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying	直交する2つの偏波に対してそれぞれ、2ビットのデータを4つの位相に割り当てるデジタル変調方式
ROADM	Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer	光信号の分岐／挿入をおこなう多重化システム
VOA	Variable Optical Attenuator	光信号の強度を調整する部品
RZ	Return to Zero	各ビットの間がいったんゼロになる2値の符号化方式
NRZ	Non Return to Zero	各ビットの間がいったんゼロにならない2値の符号化方式
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	光信号と雑音との比

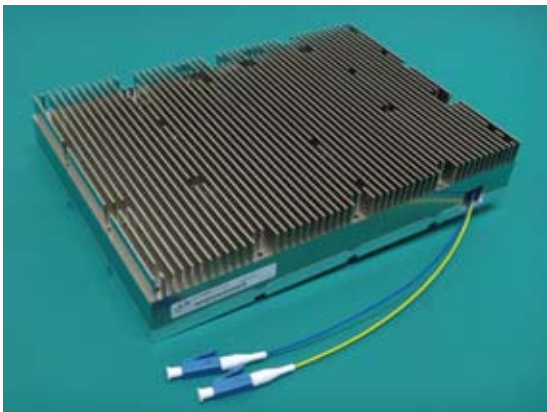


図1 光トランスポンダの外観  
Fig. 1. Appearance of optical transponder.

## 2. 2 機能概要

光トランスポンダのブロック図を図2に示す。図中、濃い太線は光信号の流れを、細線は電気信号の流れを、薄い線は要求により追加可能なオプション部分を、それぞれ表している。

主要な光コンポーネントは、波長可変レーザ、IQ変調器、コヒーレントレシーバなどで構成される。波長可変レ

ーザはフルバンドの波長可変機能を有しており、送信部の信号光および受信部の局部発振（Local Oscillator、以下LOと記す）光に使用する。デジタルコヒーレント方式では、受信側で信号光にLO光を干渉させることで位相情報を検出するため、従来方式では問題にならなかった光源の位相ノイズの影響を受ける。そこで、波長可変レーザは位相ノイズの小さい狭線幅タイプを使用している。IQ変調器はLiNbO<sub>3</sub>を使用したマッハツェンダ型光変調器（LN変調器）であり、2段のマッハツェンダ干渉計で構成される変調器が2つ集積されている<sup>7)</sup>。コヒーレントレシーバは、偏波ビームスプリッタ、信号光とLO光を干渉させる90°ハイブリッド、光電変換するバランスドレシーバが集積されている<sup>8)</sup>。

電気信号のインターフェースはOTL4.10<sup>9)</sup>あるいはSFI-S<sup>10)</sup>に準拠しており、10 Gbit/s × 10の平行接続となる。

送信信号は、まず10 Gbit/s × 10の電気信号が168 pinコネクタを経由して入力される。DSP-LSIで誤り訂正や信号処理に必要なオーバーヘッドがデータ信号に付与され、6 Gbit/s × 20の平行電気信号が出力される。次いで、20:4マルチプレクサ（MUX）で32 Gbit/sの平行信号4本（垂直偏波Ich、垂直偏波Qch、

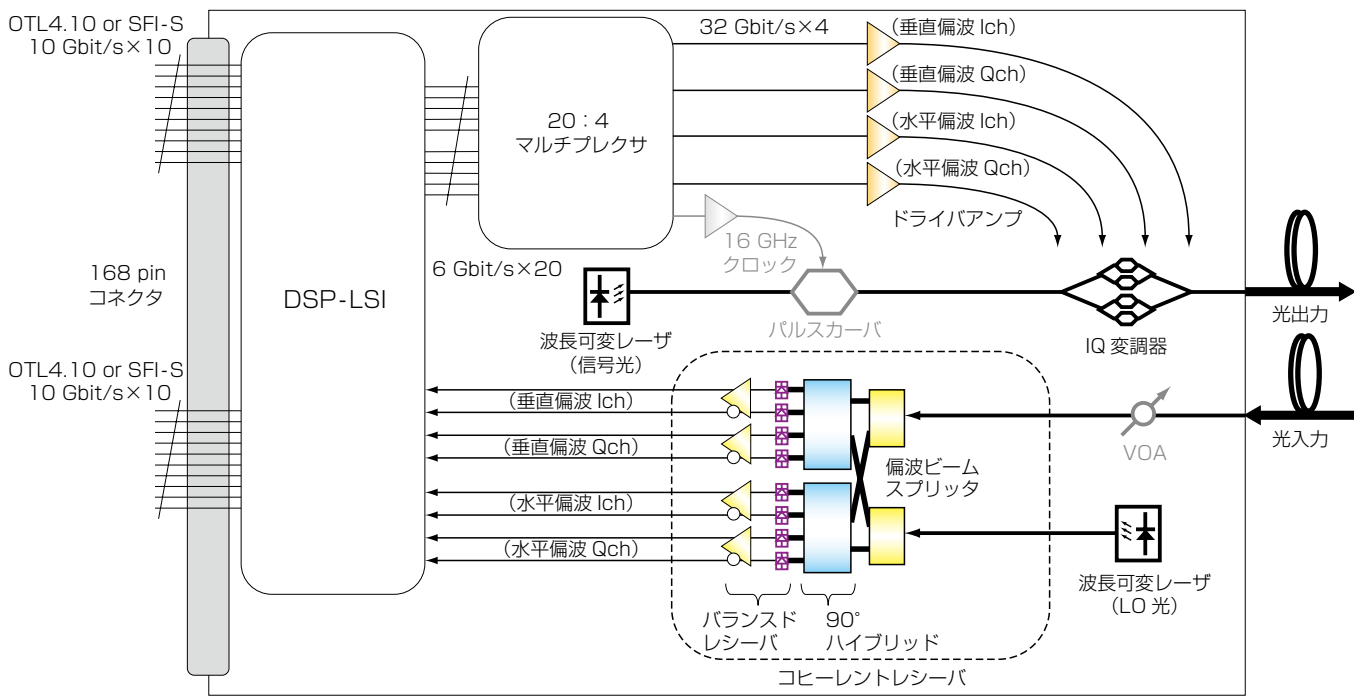


図2 光トランスポンダのブロック図  
Fig. 2. Block diagram of optical transponder.

水平偏波Ich, 水平偏波Qch,)に多重され, ドライバアンプでそれぞれ増幅される. MUXは低消費電力を考慮して, CMOSプロセスを用いたICを採用した. IQ変調器では, 波長可変レーザーからの連続光が2分岐された後, 直交する2つの偏波成分それぞれに対して4値に位相変調され, 合波されることで, 偏波多重4値位相変調(DP-QPSK)信号に変換される.

要求により, パルスカーバを内蔵して出力信号をRZ化することが可能である. パルスカーバは, 振幅変調用のLN変調器であり, 波長可変レーザーとIQ変調器との間に挿入される. MUXから出力された16GHzのクロック信号は, ドライバアンプで増幅され, パルスカーバに入力される. ここで連続光がデューティ比33%のパルス信号に変換され, IQ変調器でDP-QPSK変調されることでRZ-DP-QPSK信号に変換される. RZ信号に変換することで, 非線形耐力を改善することができる<sup>11)</sup>.

受信信号は, まず, 受信信号と同じ波長のLO光とともに, コヒーレントレシーバに入力される. コヒーレントレシーバでは, 受信信号を直交する2つの偏波成分に分離し, それぞれの成分ごとにLO光と干渉させることにより, 受信信号の複素振幅が抽出され, バランスドレシーバで電気信号に変換される. この電気信号はDSP-LSIに入力され, アナログ-デジタル変換によってデジタル化される. 次にデジタル信号処理により, 波長分散補償, 偏波分離, PMD補償, 誤り訂正などを行い, 各偏波成分のQPSK信号を復号する. 復号された受信データは10Gbit/s x 10の平行信号に変換され, 168pinコネクタを経由して出力される.

要求により, コヒーレントレシーバの前段に可変光減

衰器(VOA)を内蔵することが可能である. 波長分波器や波長選択スイッチを用いないフィルタレスのROADMシステムでは, 波長多重信号がそのまま受信器に入力される. LO光の波長と異なるチャンネルは電気回路の帯域外となることを利用して受信チャンネルを選択できるが, 受信チャンネルのパワーは波長多重数に依存して大きく変動する可能性がある. そこで, コヒーレントレシーバ前段のVOAにより, 受信チャンネルの光入力パワーを最適に調整できるようにしている<sup>12)</sup>.

2.3 主要諸元

主要諸元を表1に示す. 変調フォーマットは標準仕様ではNRZ-DP-QPSKであるが, パルスカーバを内蔵する場合はRZ-DP-QPSKとなる. また, 波長帯域はC-band, またはL-bandを選択できる.

3. 特性

3.1 送信波形

送信波形を図3に示す. 図3ではケース温度, 波長をパラメータに, 送信波形を示している. いずれの条件においてもトレースが細く, 良好な送信波形が得られている. また, 温度依存性, 波長依存性は小さく抑えられており, 均一な送信波形が得られている.

位相情報を評価するために, 光変調アナライザ(Agilent Technologies製N4392A)を用いてコンスタレーションを測定した. 図4に垂直偏波成分および水平偏波成分のコンスタレーションを示す. コンスタレーションは光の振幅と位相を複素平面上に表現したものである. 両偏波ともに4値の位相状態はそれぞれ狭い領域

表1 主要諸元  
Table 1. Main specifications.

項目	最小	最大	単位	備考
共通				
変調フォーマット	NRZ-DP-QPSK		-	標準仕様
	RZ-DP-QPSK		-	パルスカーバ内蔵
伝送速度	111.81	127.16	Gbit/s	
電源	12		V	
消費電力	-	100	W	標準仕様
	-	105		パルスカーバ内蔵
動作温度範囲	0	70	℃	ケース温度
サイズ	127×177.8×33		mm	ヒートシンク含む
送信部				
光出力パワー	1	5	dBm	標準仕様
	-4	0		パルスカーバ内蔵
動作中心波長	1528.773	1563.455	nm	C-Band
	1570.416	1607.035		L-Band
波長間隔	約 0.4		nm	50 GHz
波長確度	-25	25	pm	
受信部				
光入力パワー	-20	0	dBm	
波長分散耐力	-40000	40000	ps/nm	

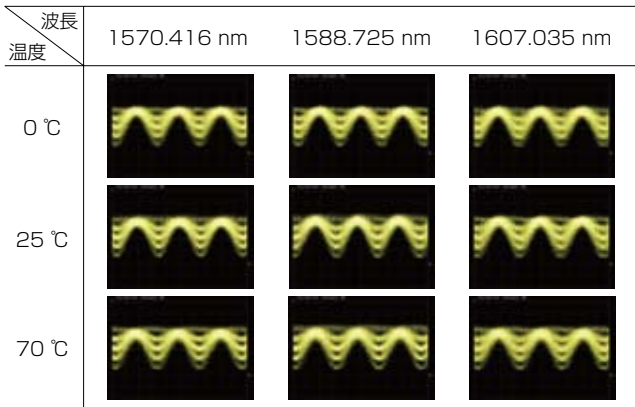


図3 NRZ-DP-QPSKの送信波形

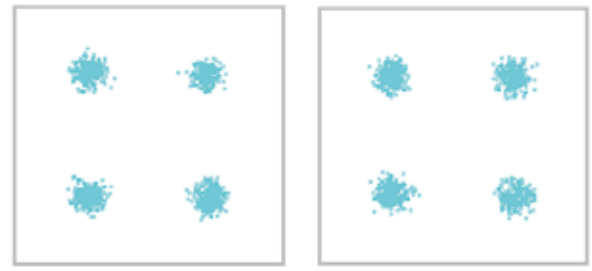
Fig. 3. Optical output waveforms of NRZ-DP-QPSK.

に集まっており、直交性も良く、適切に位相変調が行われていることが確認できる。

図5にパルスカーバでRZ化した場合の送信波形を示す。RZ-DP-QPSK信号は、パルス状に観察される。図5では異なる波長の送信波形を示している。NRZ-DP-QPSKと同様に、いずれの条件においてもトレースが細く、良好な送信波形が得られている。また、波長依存性は小さく抑えられており、均一な送信波形が得られている。

### 3.2 光雑音耐力

光雑音耐力を図6, 図7, 図8に示す。図6では波長をパラメータに、信号光の光入力パワー-12 dBmの条件において、OSNRに対する誤り率をプロットしている。なお、プロットしてある誤り率は、誤り訂正前のものである。波長による誤り率の変動は小さく、良好な特性を確認している。図7は波長を1607.035 nmに設定



(a) 垂直偏波 (b) 水平偏波

図4 コンスタレーション  
Fig. 4. Constellation.

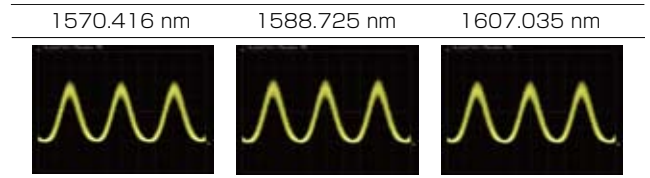


図5 RZ-DP-QPSKの送信波形

Fig. 5. Optical output waveforms of RZ-DP-QPSK.

し、OSNR = 16 dB, OSNR = 20 dBの条件において、信号光の光入力パワーに対する誤り率をそれぞれプロットしている。光入力パワーが-20 ~ 0 dBmの範囲でフラットな特性が得られており、温度依存性も小さいことを確認している。図8はパルスカーバを搭載してRZ-DP-QPSKとしたときのOSNRに対する誤り率を示している。比較のため、NRZ-DP-QPSKの結果を併記している。NRZ-DP-QPSKと同等の性能が得られており、非線形耐力の向上による伝送距離の延伸が期待される。

### 3.3 波長分散耐力

デジタル信号処理の波形等化による波長分散補償を確認するために、波長分散エミュレータを用いて最大45000 ps/nmの波長分散を生成し、波長分散耐力の評価を行った。図9は、波長分散量に対して誤り率が $10^{-2}$ および $10^{-3}$ となるOSNRをプロットしてある。データは、送信波長1570.416 nm、信号光の光入力パワー-12 dBmの条件で測定している。波長分散量が45000 ps/nmのときのOSNRペナルティは、誤り率が $10^{-2}$ の場合で1 dB以下、誤り率が $10^{-3}$ の場合で2 dB以下となっており、波長分散補償の効果が確認できる。ここで、OSNRペナルティとは、波長分散がないときのOSNRと波長分散があるときのOSNRとの差分である。

## 4. むすび

当社で開発したデジタルコヒーレント方式の100 Gbit/s長距離光トランスポンダについて、機能、特性を詳細に紹介した。今後もデジタルコヒーレントの技術を軸にして、様々な伝送技術が発展していくと予想されるので、今回培った技術をベースに市場のニーズにあわせた製品開発を推進していく予定である。

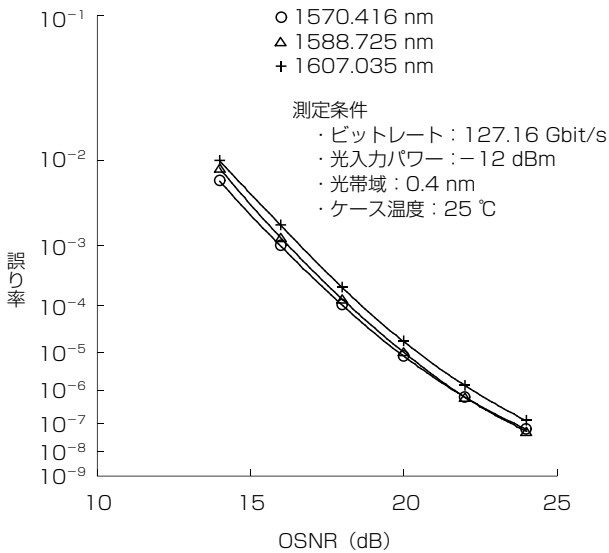


図6 光雑音耐力  
Fig. 6. OSNR tolerance.

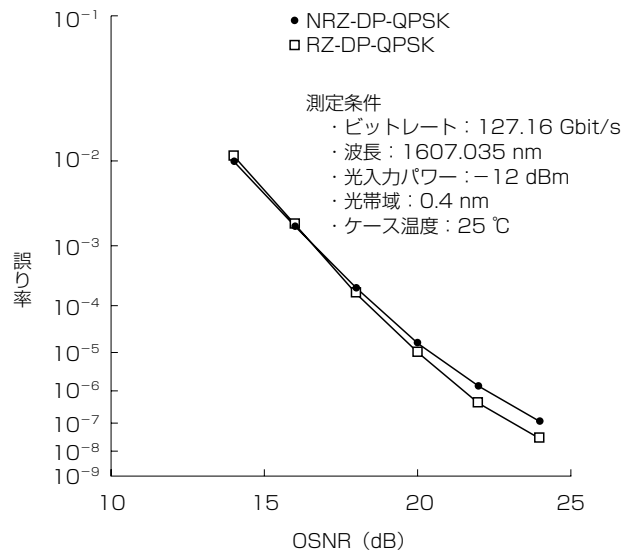


図8 RZ-DP-QPSKの光雑音耐力  
Fig. 8. OSNR tolerance of RZ-DP-QPSK.

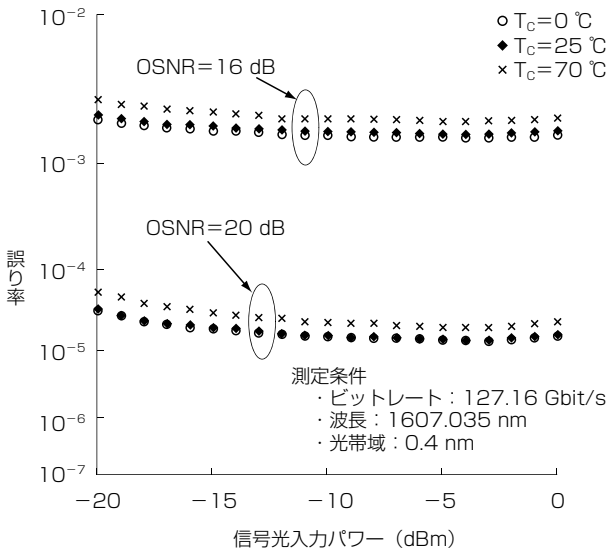


図7 信号光入力パワーに対する光雑音耐力  
Fig. 7. OSNR tolerance as a function of optical input power.

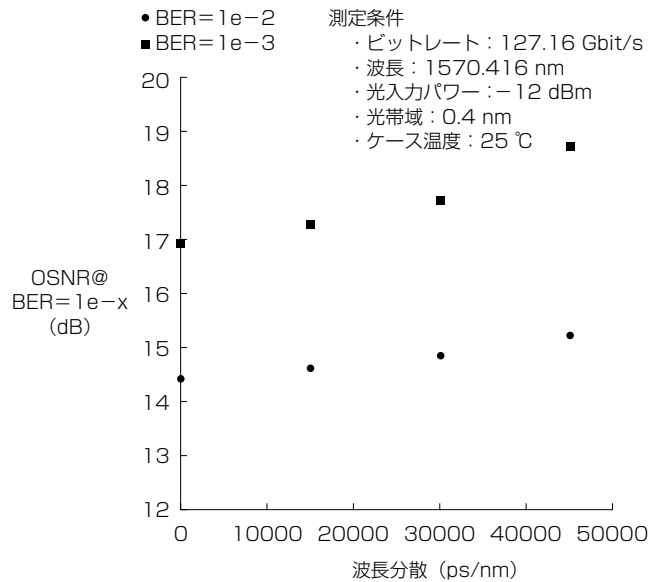


図9 波長分散耐力  
Fig. 9. Chromatic dispersion tolerance.

参 考 文 献

- 1) 松田ほか：「東名阪基幹伝送路に導入した40G-DWDMシステムの開発」, NTT技術ジャーナル, Vol. 20 No. 4, pp.58-61, 2008
- 2) 財団法人機械システム振興協会：「コヒーレント光通信システムに関する調査研究報告書(要旨)」, システム技術開発調査研究, 21-R-7, 2010
- 3) <http://www.300pinmsa.org>
- 4) 藤咲ほか：「10 Gbit/sフルバンドチューナブル光トランスポンダ」, フジクラ技報, 第111号, pp.16-19, 2006
- 5) 藤咲ほか：「多値位相変調方式を用いた40 Gbit/s光トランスポンダ」, フジクラ技報, 第120号, pp. 23-28, 2011.
- 6) <http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-MSA->

- 100GLH-EM-01.1.pdf
- 7) <http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-PMQ-TX-01.0.pdf>
- 8) <http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-DPC-RX-01.1.pdf>
- 9) ITU-T Rec. G.709/Y.1331
- 10) [http://www.oiforum.com/public/documents/OIF\\_SFI-S\\_01.0\\_IA.pdf](http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_SFI-S_01.0_IA.pdf)
- 11) D. Ogasahara, et al. : "Real-Time Evaluation of Optical Nonlinear Effects on 112Gbps PM-QPSK Signal in Dispersion Managed Links," OFC2011, OMR3
- 12) L. E. Nelson, et al. : "Real-time Detection of a 40Gbps Intradyne Channel in the Presence of Multiple Received WDM Channels," OFC2010, OMJ1