

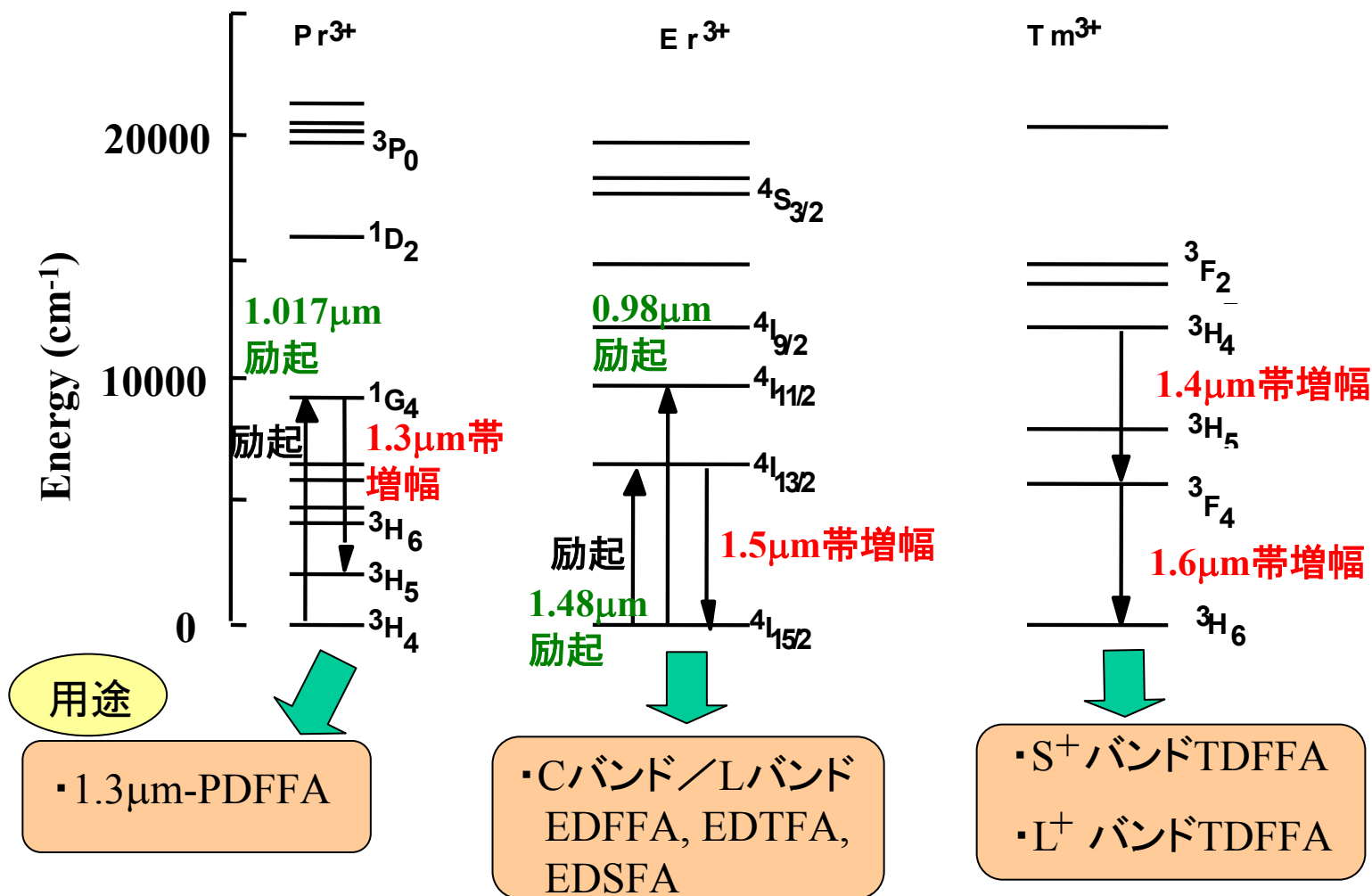
# 第11回

## 光増幅器(2)・WDM伝送技術(1)

2010年1月14日(木)

# いろいろな光増幅器

# Pr, Er, Tmイオンのエネルギー準位



\* ○○FFA: フッ化物光ファイバ増幅器  
 ○○TFA: テルライト系光ファイバ増幅器  
 ○○SFA: 石英系光ファイバ増幅器    ○○はPD, ED, TD

## 光ファイバ増幅器(EDFA)の仕様

---

信号光波長 :  $1.55\mu\text{m}$

適用波長 :  $1.535\mu\text{m} \sim 1.560\mu\text{m}$

利得 :  $20 \sim 30\text{dB}$

雑音指数(NF) :  $5.0\text{dB}$

飽和光出力 :  $+20\text{dBm}$

伝送路損失 :  $0.2\text{dB/km}$

伝送路分散 :  $0.5\text{ps/nm/km}$

## 励起波長による特性差

| 波長     | 1.48 $\mu$ m                | 0.98 $\mu$ m                       |
|--------|-----------------------------|------------------------------------|
| 光源     | InGaAsP/InP MQW-LD          | InGaAs/GaAs <sub>0.45</sub> MQW-LD |
| 利得効率   | 5dB/mW                      | 10dB/mW                            |
| 雑音指数   | 5.5dB                       | 3～4.5dB                            |
| 飽和光出力  | +20dBm                      | +20dBm                             |
| 励起波長範囲 | 1.47～1.49 $\mu$ m<br>(20nm) | 0.979～0.981 $\mu$ m<br>(2.5nm)     |
| 励起光出力  | < 400mW                     | < 350mW                            |

# L帯EDFAの利得スペクトル

- ・平均の反転分布を低い状態で使用。
- ・利得平坦度3dBの増幅帯域はEDTFAが最も広い( 1.56 $\mu\text{m}$ ～1.61 $\mu\text{m}$  )



M. Yamada et al., Electron. Lett., 33, pp. 710-711, 1997

# 広帯域EDTFAの増幅特性

- 1.48 $\mu\text{m}$ 励起EDTFA+利得等価器
- 3dB以下の利得平坦度: 1.534 $\mu\text{m}$ ～1.606 $\mu\text{m}$  (72nm)



A. Mori et al, in OFC'97, paper PD-1

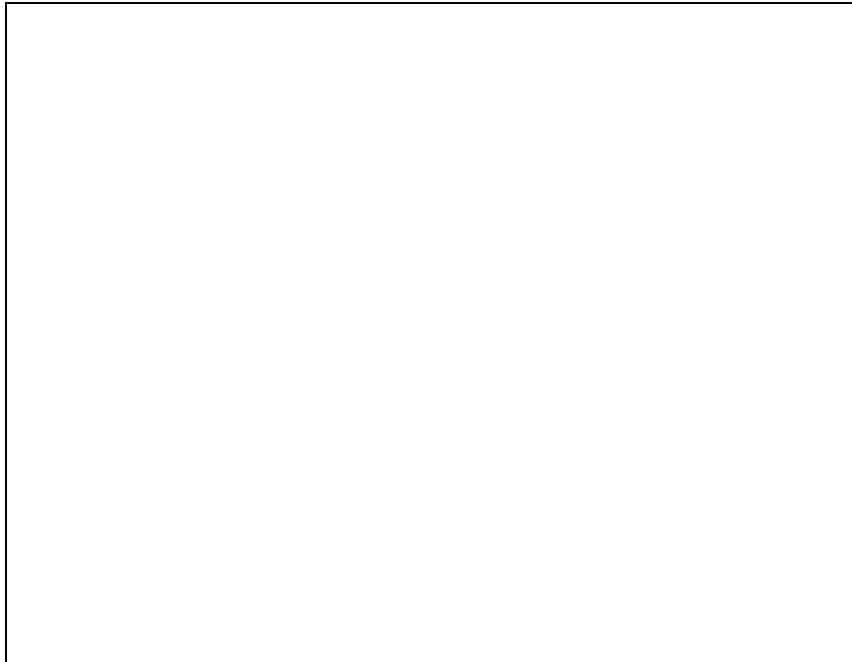
# 利得透過型TDFFAの増幅特性

- ・ツリウムドープ:  $1.4\mu\text{m}$  帯用
- ・アップコンバージョン励起法による反転分布の高維持

## 課題

- ・変換効率の向上
- ・増幅帯域の長波長側への拡大 →  $1\mu\text{m}$ ,  $1.55\mu\text{m}$  励起光同時入射 + 長尺化 (NEC 笠松ら)

T. Kasamatsu et al., in OAA'99, paper PD1



T. Sakamoto et al., in OAA'99, paper WD2.

## 利得透過型PDFFAの増幅特性

- ・プラセオジウムドープ: 1.3 $\mu\text{m}$ 帯用
- ・PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系PDFFA(下図)
- ・ZBLAN系に比べてフォノンエネルギー低い → 量子効率が高いのが特徴

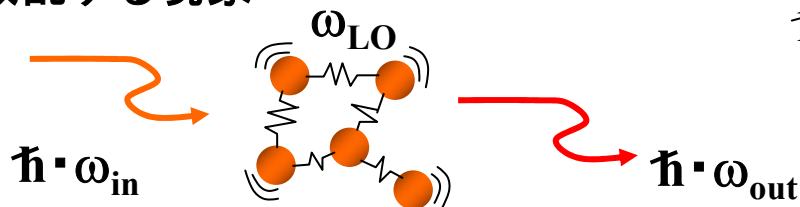


# Raman増幅器の特徴

## 信号光波長と励起光波長の関係

ラマン散乱:

励起光により分子振動(LOフォノン)を引き起こし、その差のエネルギーの光を散乱する現象

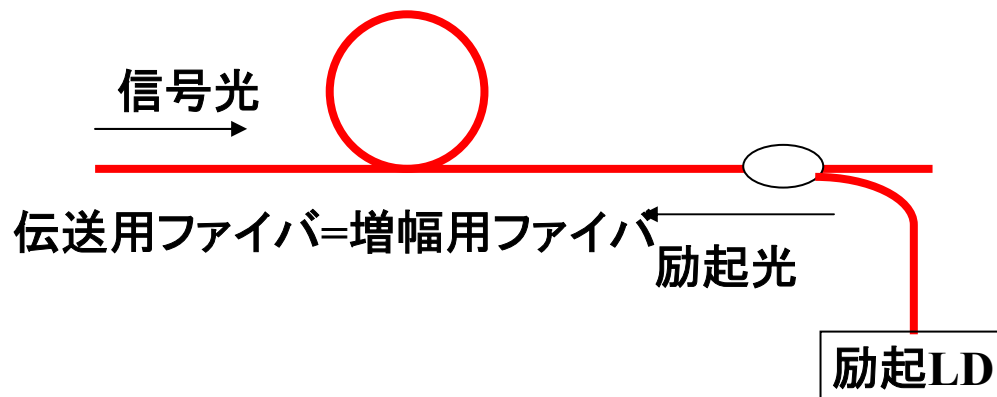


$$\hbar\omega_{in} - \hbar\omega_{out} = \hbar \cdot \omega_{LO} = \hbar \cdot 2\pi(f_{in} - f_{out})$$

$$= \hbar \cdot 2\pi \cdot 13\text{THz}$$

波長では約100nm

## ラマン増幅中継器の構成



## メリット

- 伝送用光ファイバを増幅用ファイバとして使用可能
- 任意の信号光が増幅可能

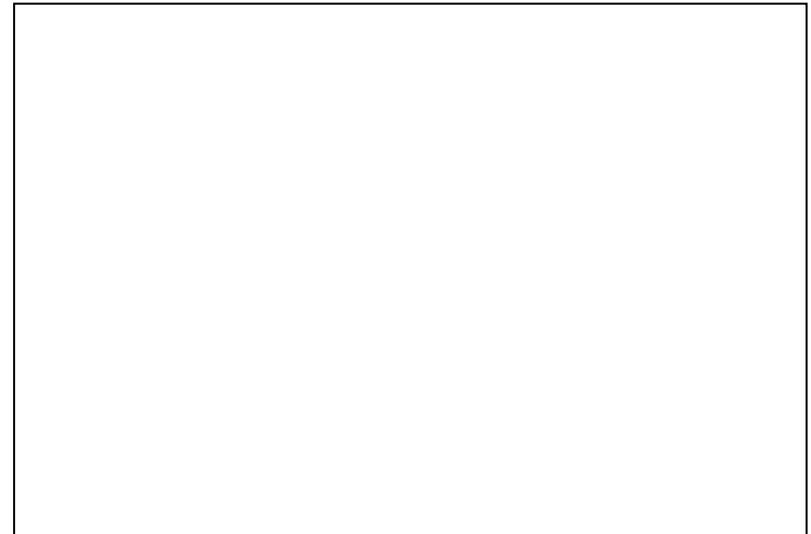
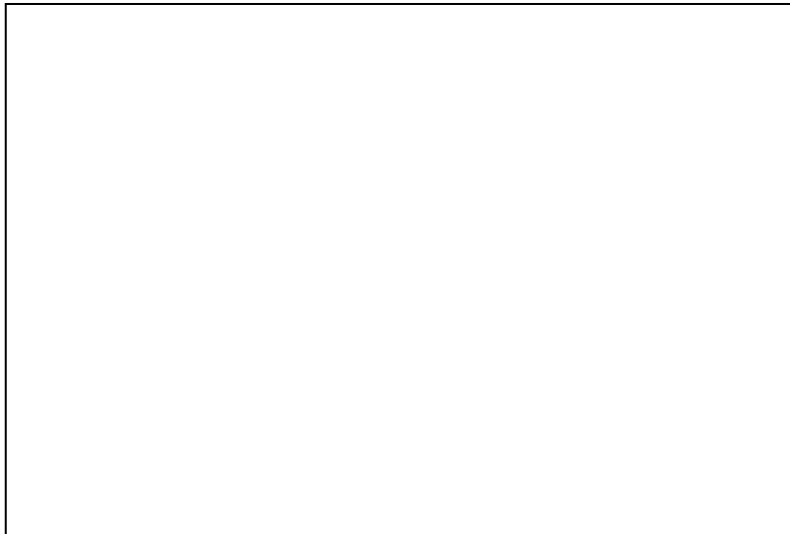
## 課題

- 長尺ファイバが必要(10km以上)
- 雑音特性の励起方向依存性

田中, 鳥居, 幸, 中元, 内藤, 横田, 2003年信学ソ大, B-10-113 (2003).



**4.23Tbps, 120km伝送**



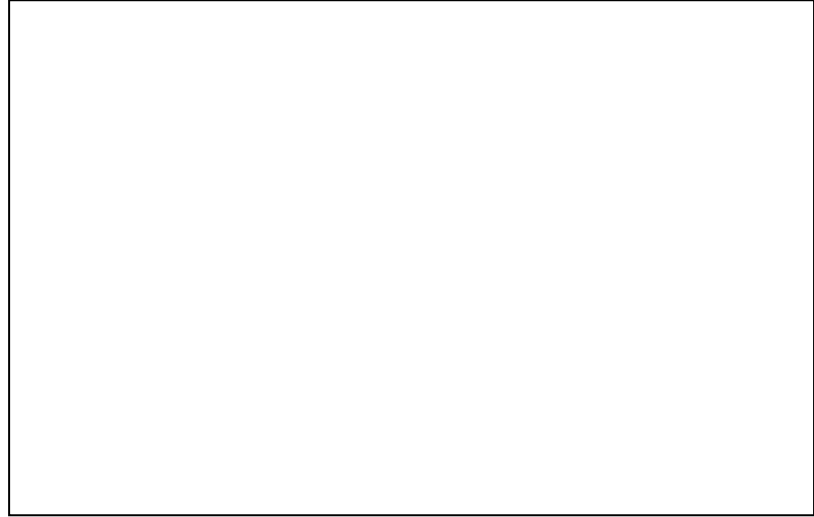
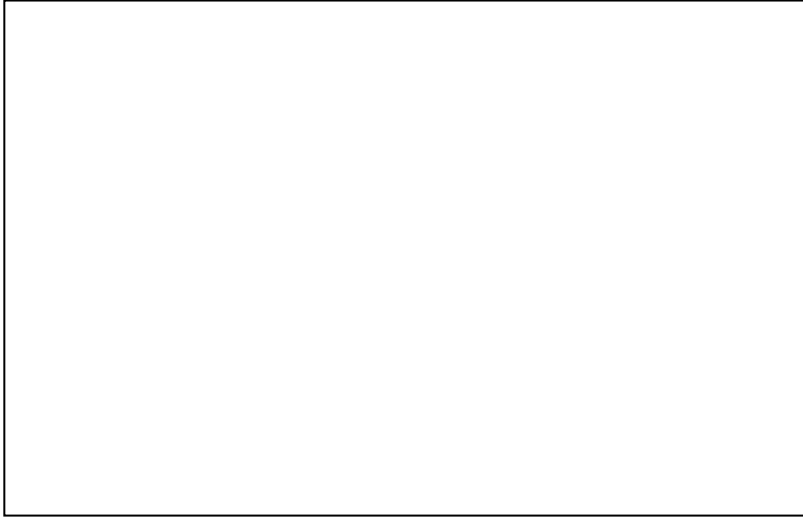
## EDFAの広帯域化の進展(1)

---

H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, and H. Fukuyama, OFC2007, PDP20.

**ハイブリッドラマン・EDFA: ラマン増幅器とEDFAを組み合わせ、広帯域と高利得を実現**





**H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, and H. Fukuyama, OFC2007, PDP20.**

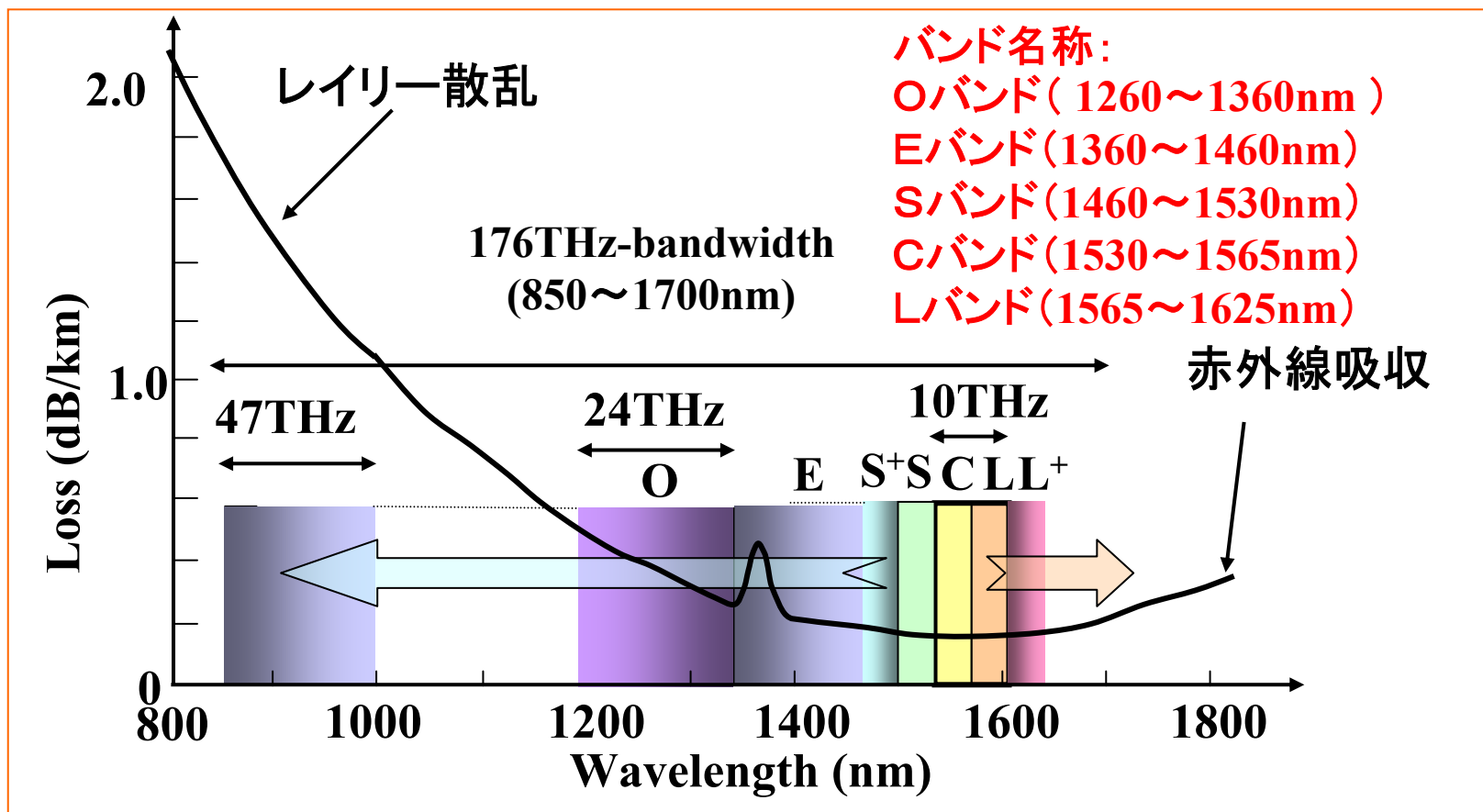
## 第8章

# 波長多重伝送技術

1. WDM伝送と分散マネジメント
2. 波長多重(WDM)伝送と変調方式
3. 分散補償器

## DWDMと使用波長(光源波長)

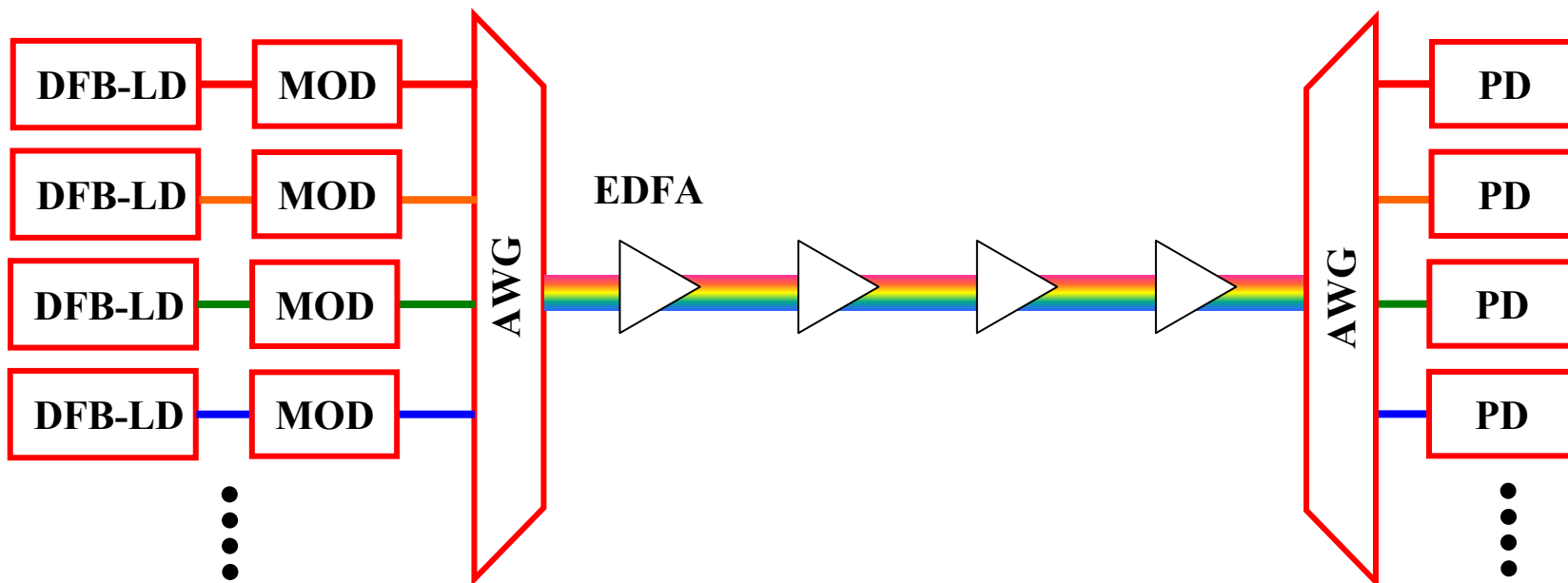
**DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing (高密度波長多重技術)**



周波数間隔:100GHz → 波長間隔:0.8nm間隔@1550nm帯 に相当

# 波長多重伝送の構成

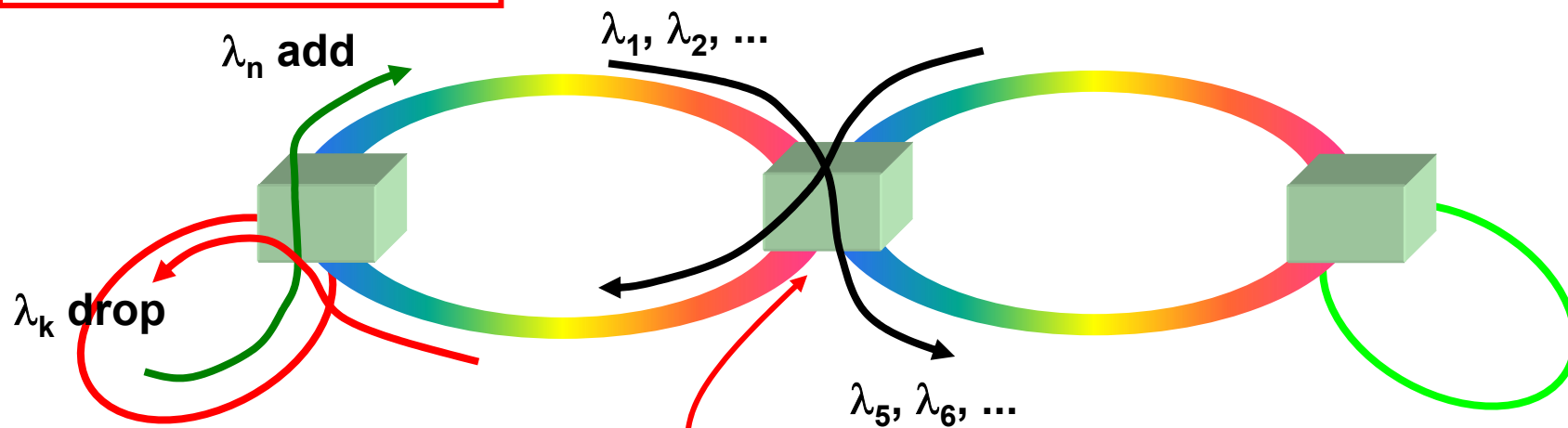
## Point-to-Point



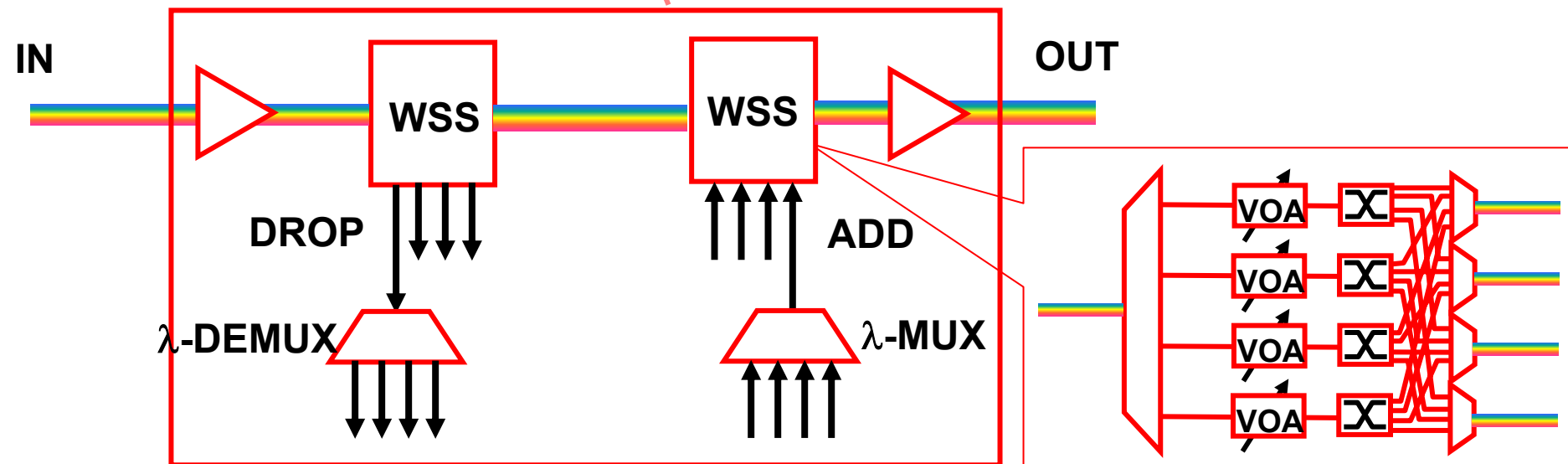
# AWGを多段中継するリングネットワーク

## 多段フィルタ中継構成

## Interconnected Ring Network Topology



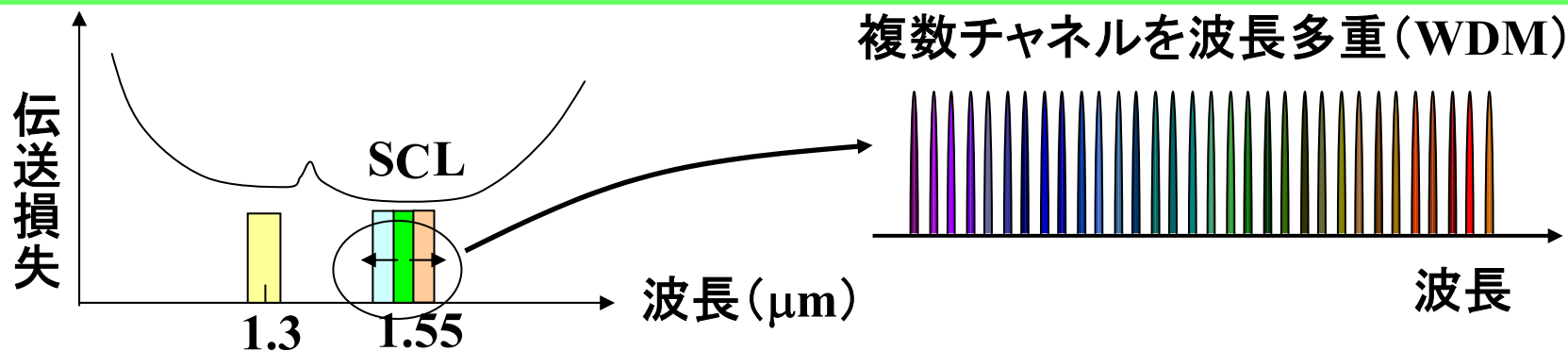
## ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer



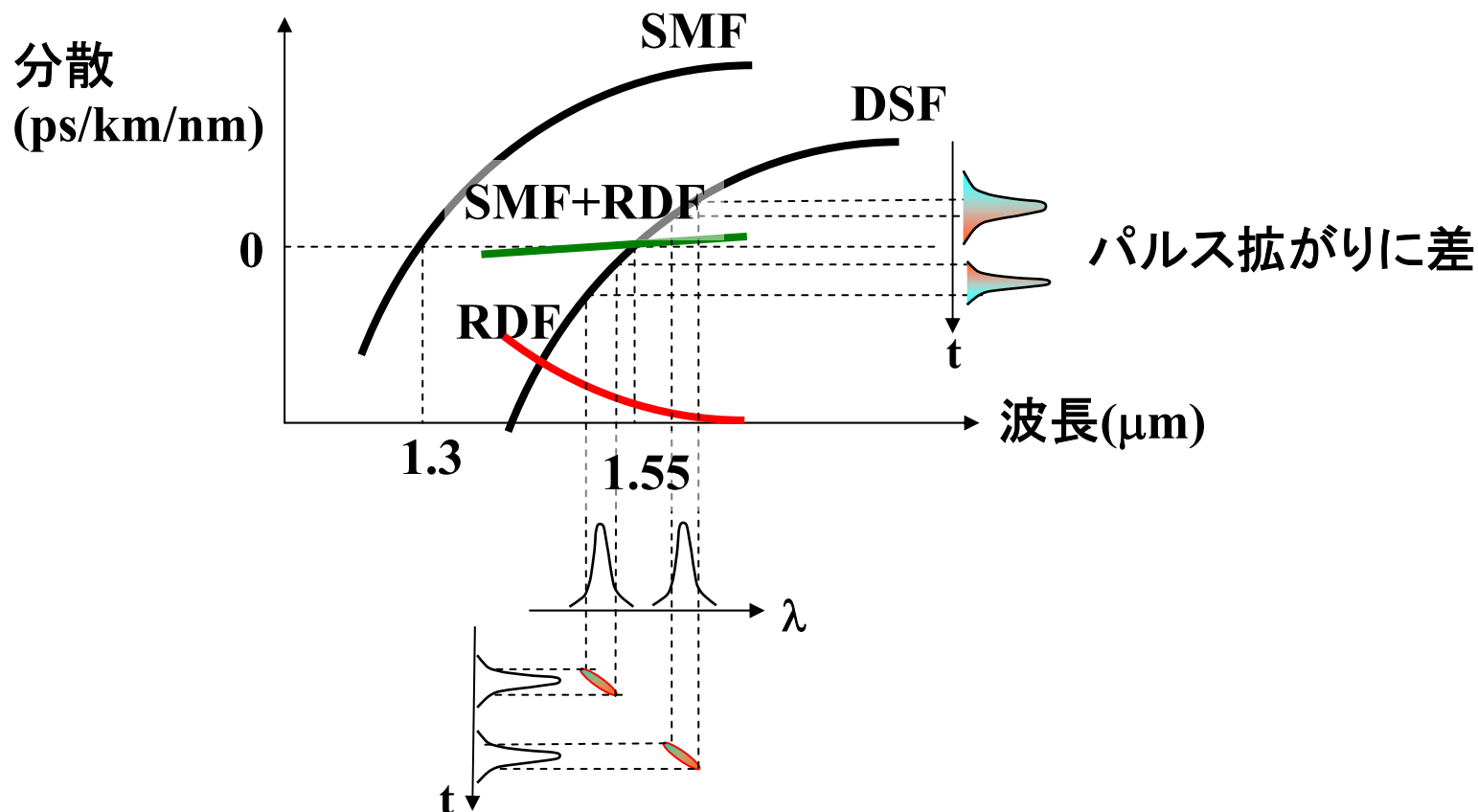
※ WSS : Wavelength Selective Switch

# 波長多重(WDM)と分散マネジメント

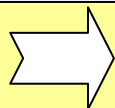
## 大容量化のための技術的アプローチ



| 技術要素            | 現在の状況                          | 課題                | 検討案                              |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| ① 1波あたり伝送速度の高速化 | 10Gbps→40Gbps                  | 高速電子回路の実現         | InP系、SiGe系                       |
| ② 使用波長帯域の広帯域化   | S, C, Lバンドの使用<br><b>トレードオフ</b> | 誘導ラマン散乱によるパワーチャルト | 分布ラマン増幅による光強度の補正                 |
| ③ 多チャネル化        | 100GHz間隔<br>→50GHz間隔           | 変調周波数とのトレードオフ     | CS-RZ, DQPSK<br>など狭帯域<br>変調方式の検討 |



WDM使用帯域の拡大

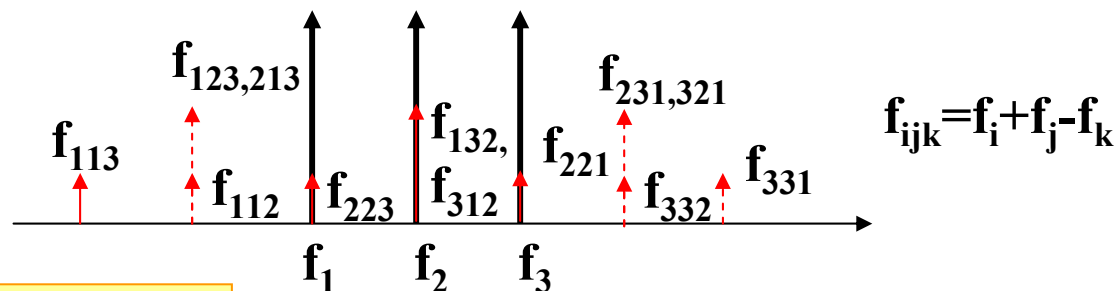


広い波長範囲でトータルの波長分散零の条件を満たしている必要がある。



波長分散の波長依存性(分散スロープ)の低減が重要

## 4光波混合の影響

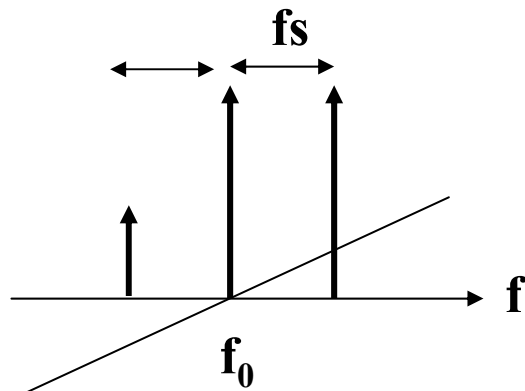


### 光ファイバの3次非線形効果

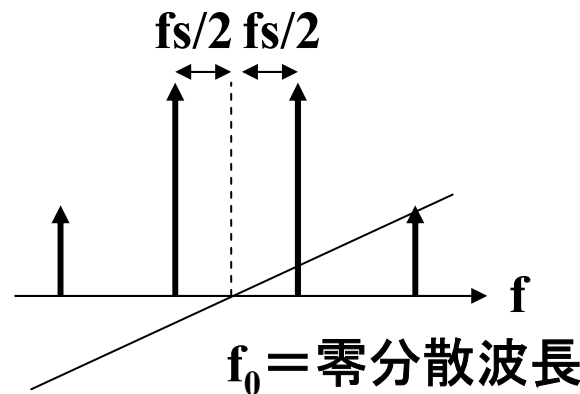
$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$  を満足する波長の発生効率は位相整合条件

$\Delta\beta = \beta(f_i) + \beta(f_j) - \beta(f_k) - \beta(f_{ijk}) = 0$  を満たす場合に最大となる。

① 動作波長が零分散波長と一致



② 零分散波長をはさんで等間隔



4光波混合光のクロストークによる  
信号伝送特性劣化



分散はある程度の大きさが必要

## 4光波混合の発生

### 発生光のパワー

$$P_{ijk}(L) = \eta_{ijk} \kappa^2 (B\chi_3)^2 P_i(0)P_j(0)P_k(0) \exp(-\alpha L)$$

ただし

$$\kappa = \frac{32\pi^2 L_{eff} / A_{eff}}{n^2 \lambda_c}$$

$$\eta_{ijk} = \left( \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \right) \left[ 1 + \frac{4 \exp(\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{\{1 - \exp(-\alpha L)\}^2} \right] \quad (\text{発生効率})$$

$$\Delta\beta = \beta(\nu_i) + \beta(\nu_j) - \beta(\nu_k) - \beta(\nu_{ijk})$$

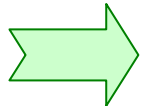
$$= \begin{cases} \frac{2\pi\lambda^2}{c} (\Delta\nu_{eq})^2 D & (\text{零分散波長と一致しない場合}) \\ \frac{\pi\lambda^4}{3c^2} \frac{dD}{d\lambda} \{(\nu_{ijk} - \nu_0)^3 - (\nu_i - \nu_0)^3 - (\nu_j - \nu_0)^3 + (\nu_k - \nu_0)^3\} & \Delta\nu_{eq} = \sqrt{|(\nu_i - \nu_k)(\nu_j - \nu_k)|} \\ & (\text{零分散波長と一致or近傍の場合}) \end{cases}$$

## 4光波混合発生効率

### ① 動作波長が零分散波長と一致しない場合

$\lambda=1.55\mu\text{m}$ ,  $L=10\text{km}$ ,  $D=15\text{ps/nm/km}$ の場合、

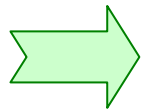
$$\Delta\nu_{\text{eq}} > 50\text{GHz/}|\text{にて}\eta_{ijk} < 1\%$$



波長間隔を大きくすることにより4光波混合を抑制可能

### ② 動作波長が零分散波長と一致あるいはきわめて近傍の場合

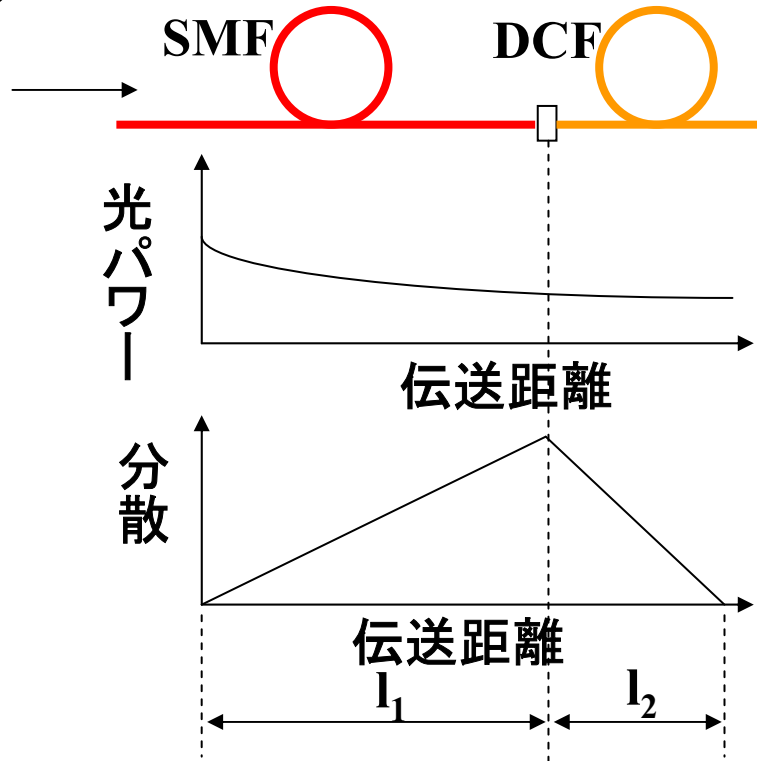
$\Delta\beta = 0$  : 位相整合条件 を満たす



$$\eta_{ijk} \doteq 100\%$$

4光波混合によるコヒーレントクロストークの影響大

## 分散マネジメント伝送 (SMF+DCF/SMF+RDFなど)

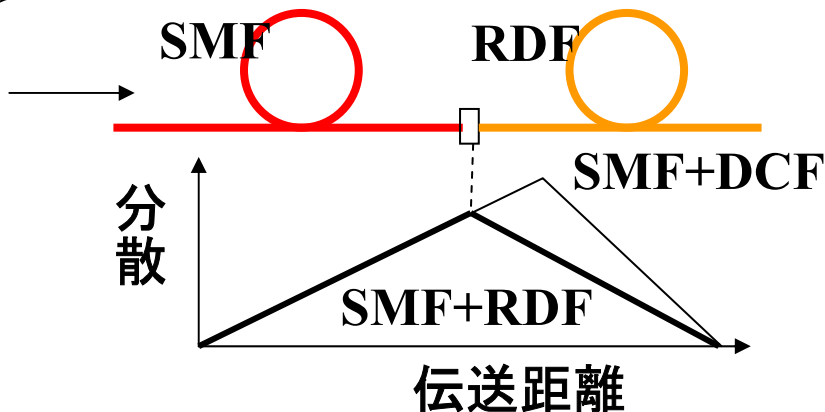


### ポイント

- ① SMF+DCFによりトータルの分散を零化
- ② 分散を持つファイバの使用により FWM抑制
- ③ 光パワーの弱くなる後半部分にコア径の小さい(非線形の起きやすい)DCFを配置

### 補足

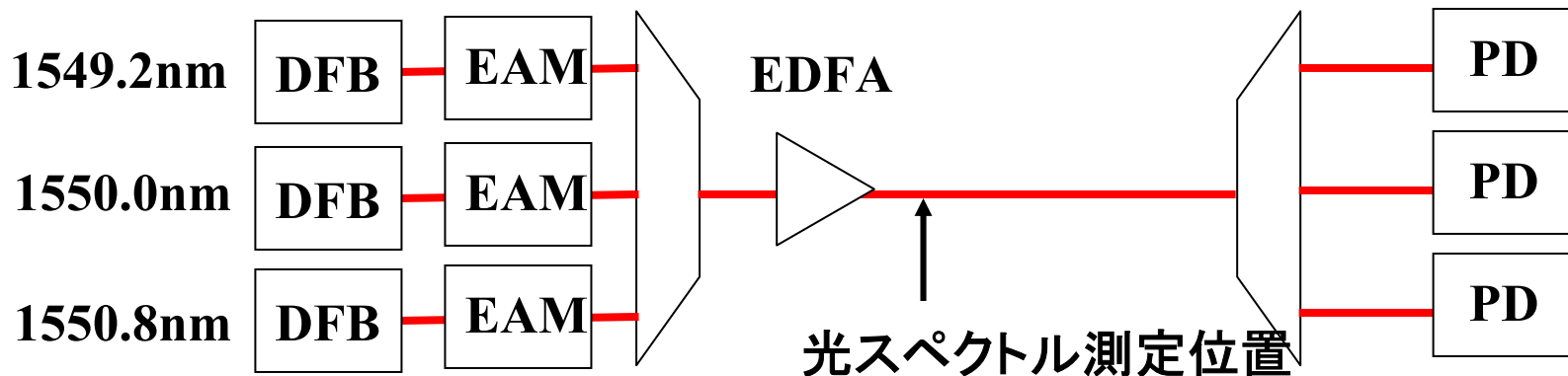
- ① DCFの伝送損失はSMFより大のため 伝送損失の低い純石英コアファイバ (PSCF) を使用し伝送路平均損失を低減



### ポイント

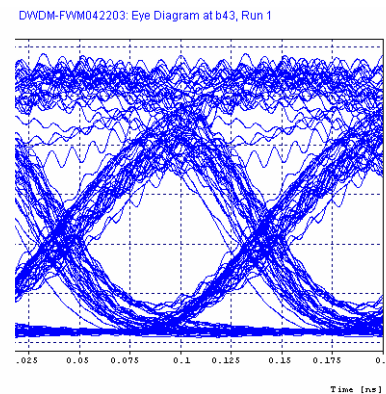
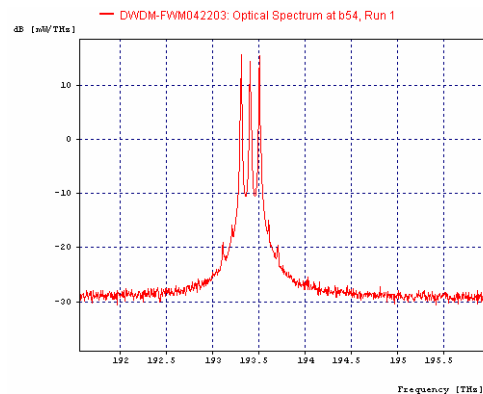
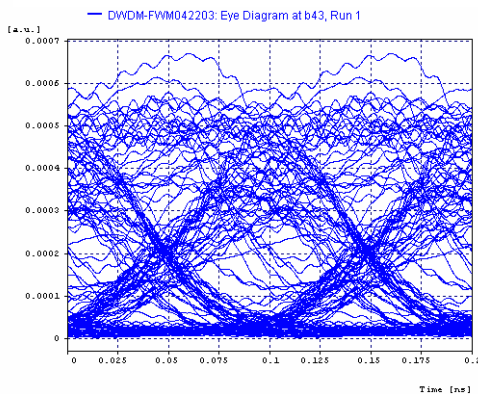
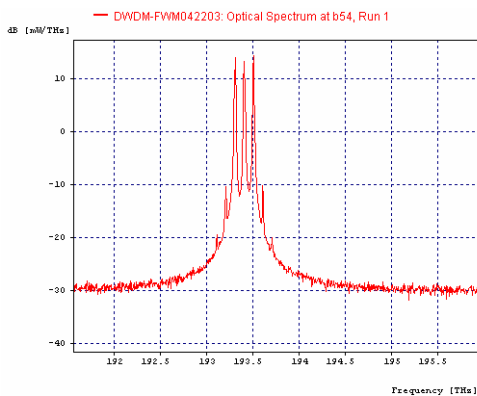
- ① SMF+RDFにより局所分散累積の低減

# FWMの影響(解析例)

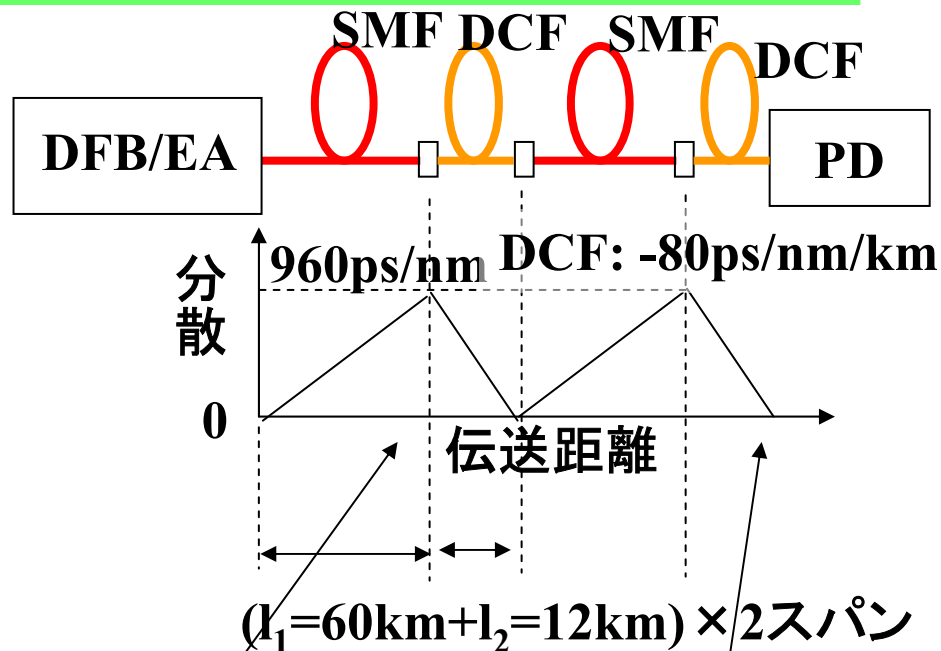
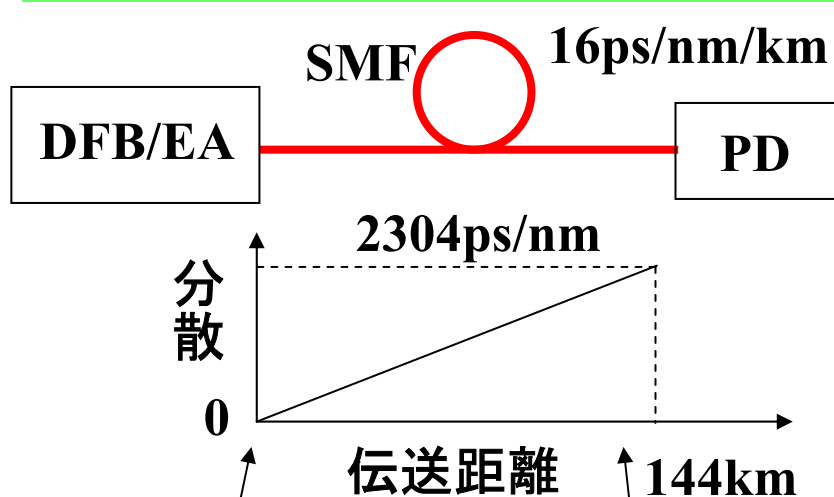


① DSF  
(分散2km/nm/km)88km

② NZ-DSF(分散8ps/nm/km) × 80km  
+DCF(分散-80ps/nm/km) × 8km



# 分散マネジメント伝送路の効果(解析例)



0km

144km

60km

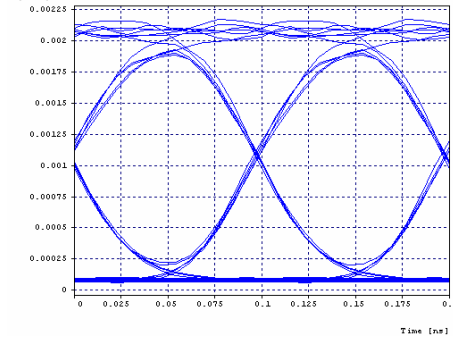
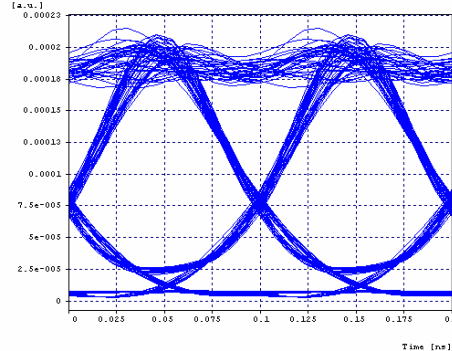
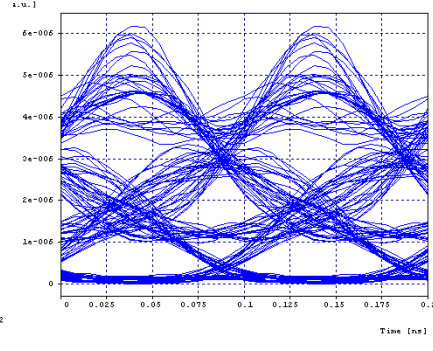
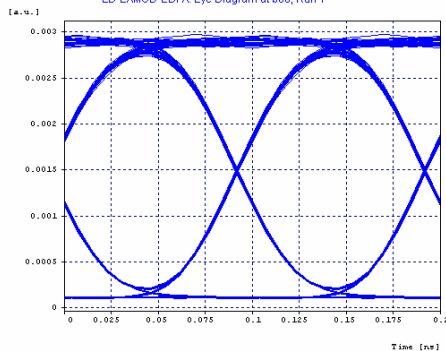
144km

LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1

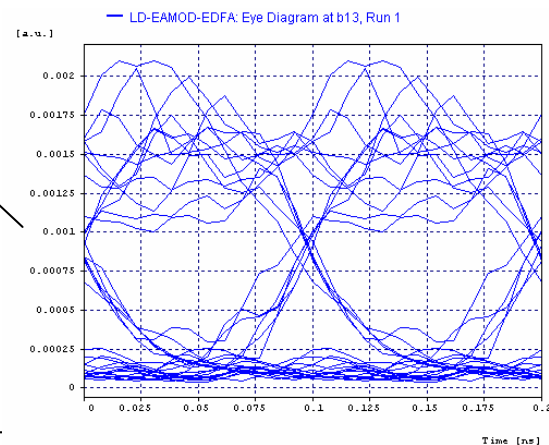
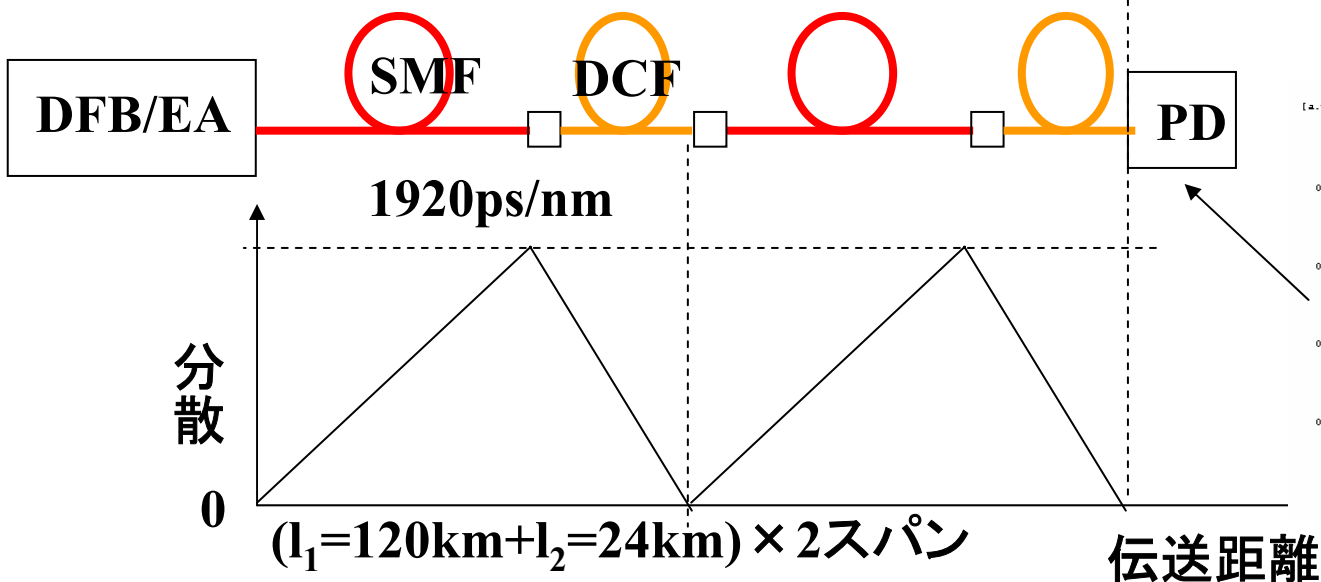
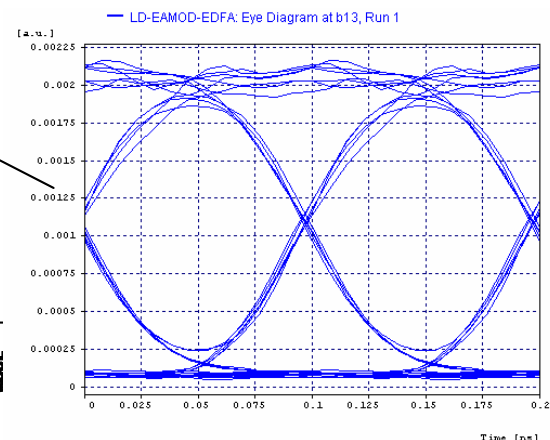
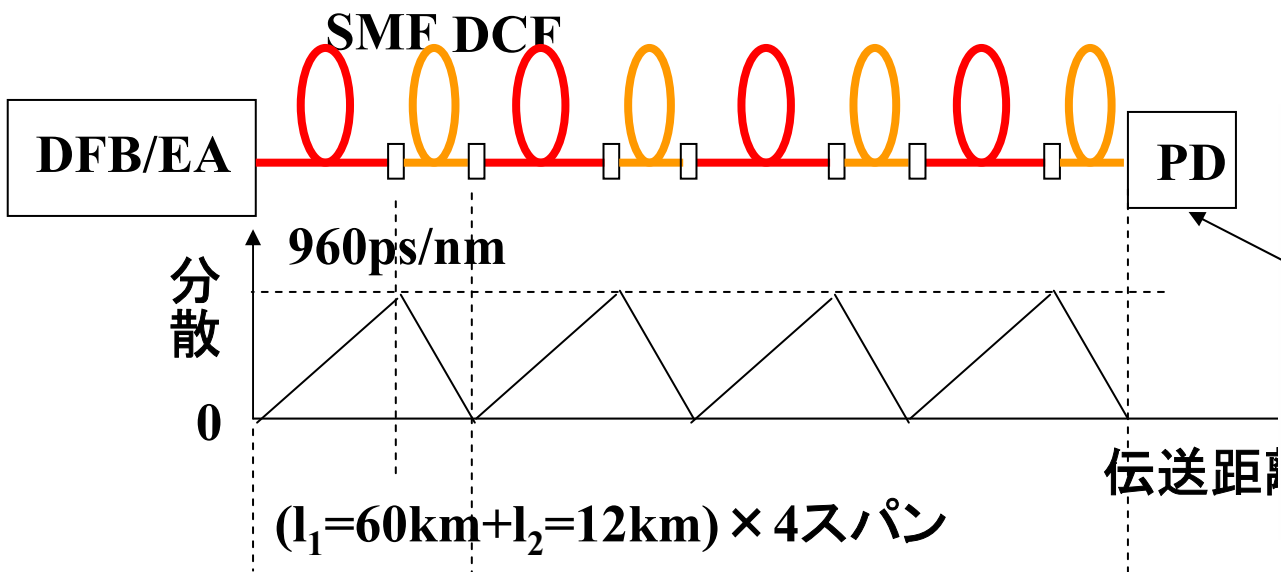
LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1

LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1

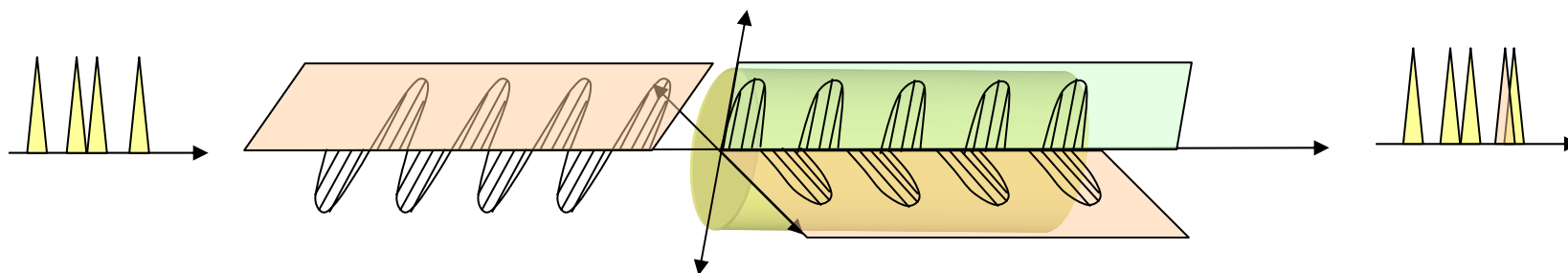
LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b13, Run 1



# 分散マネジメント伝送路における累積分散の影響

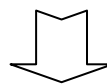


## 偏波モード分散



- ・コア形状のわずかな歪み
- ・ガラス中の残留応力
- ・外力

偏波モード間に群遅延時間の差が発生



- ・偏波モードごとの到着時間に差
- ・伝送距離を制限

(例)

偏波モード分散:  $0.05\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$

到着時間差の時間平均としてタイムスロットの30%を許容限度とした場合、

- ・40Gbpsにおいて22,500kmの距離制限 → 海底系もOK
- ・160Gbpsにおいて1,400kmの距離制限 →  $0.02\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$ 以下が必要 @ 6,000km

# 波長多重(WDM)と変調方式

## 高周波数利用効率

周波数利用効率:  $f_0/\Delta f$  の向上を目指す。

→ **狭帯域変調方式(NRZ, CS-RZ, DQPKD)**

(例) 0.8bps/Hzの時、40Gbps, 50GHz間隔

→ SCL3波長帯の伝送帯域上限16THz × (0.8bps/Hz) = **12.8Tbps**

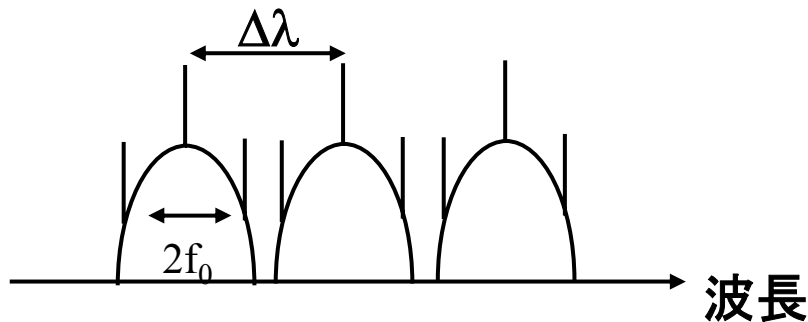
① 波長間隔が変調周波数よりも十分広い場合

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \gg 2f_0$$

$\Delta \lambda$  : DWDMの波長間隔

$\Delta f$  : DWDMの周波数間隔

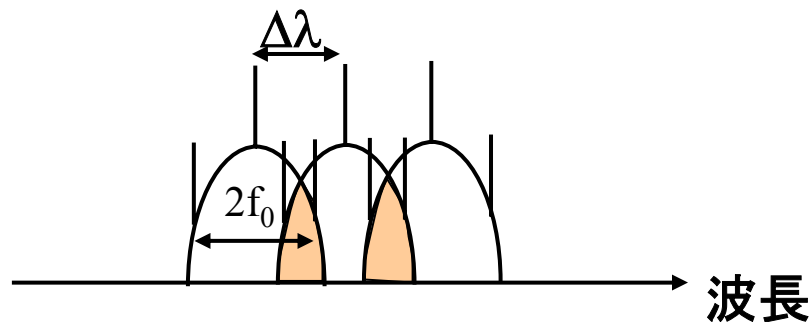
$f_0$  : 変調周波数



② 波長間隔が変調周波数に対して狭くない場合

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda < 2f_0$$

隣接チャネルのバンドが重なってしまい、クロストークとなる

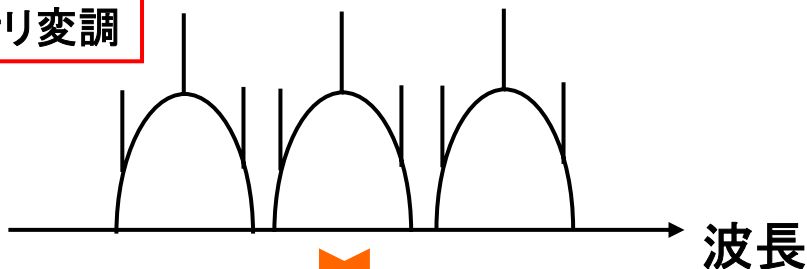


# DWDMにおける変調方式への要求仕様(1-2)

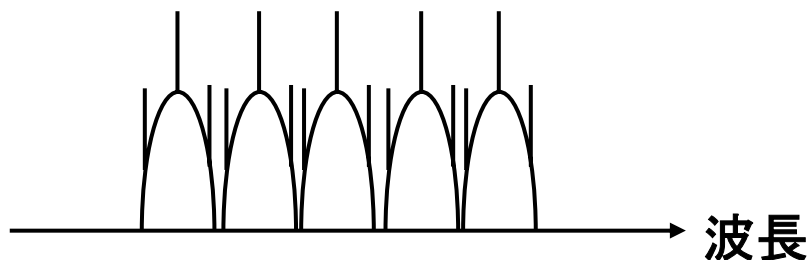
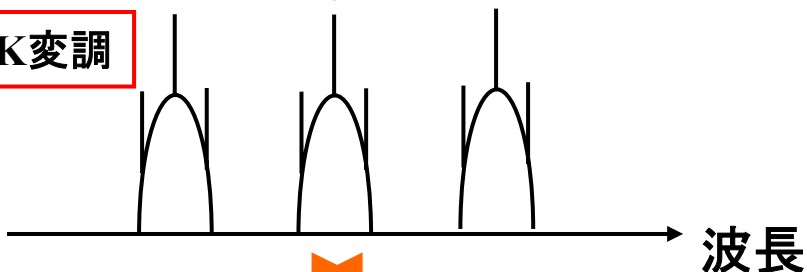
## バイナリ(2値)から多値変調へ

(例)DQPSK変調

バイナリ変調



DQPSK変調



30nm帯域, 0.8bps/Hzの変調方式を用いる場合

バイナリ変調

10Gbps (12.5GHz or 0.1nm間隔) → 300波長

$10\text{Gbps} \times 300\text{波長} = 3\text{Tbps}$

40Gbps (50GHz or 0.4nm間隔) → 75波長

$40\text{Gbps} \times 75\text{波長} = 3\text{Tbps}$

伝送容量は変わらない！

DQPSK変調

位相4値なので、バイナリ変調の半分の帯域で  
同じ伝送容量を実現

$40\text{Gbps} = 20\text{Gbps} \times 2$

20Gbps (25GHz or 0.2nm間隔) → 150波長

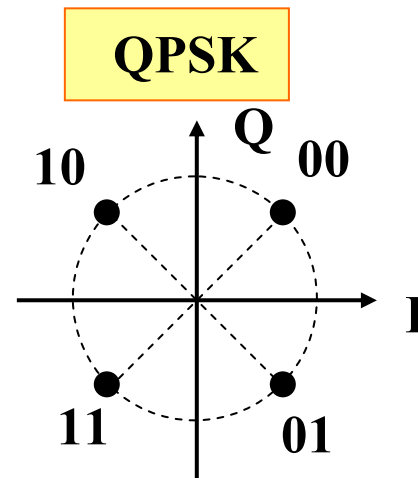
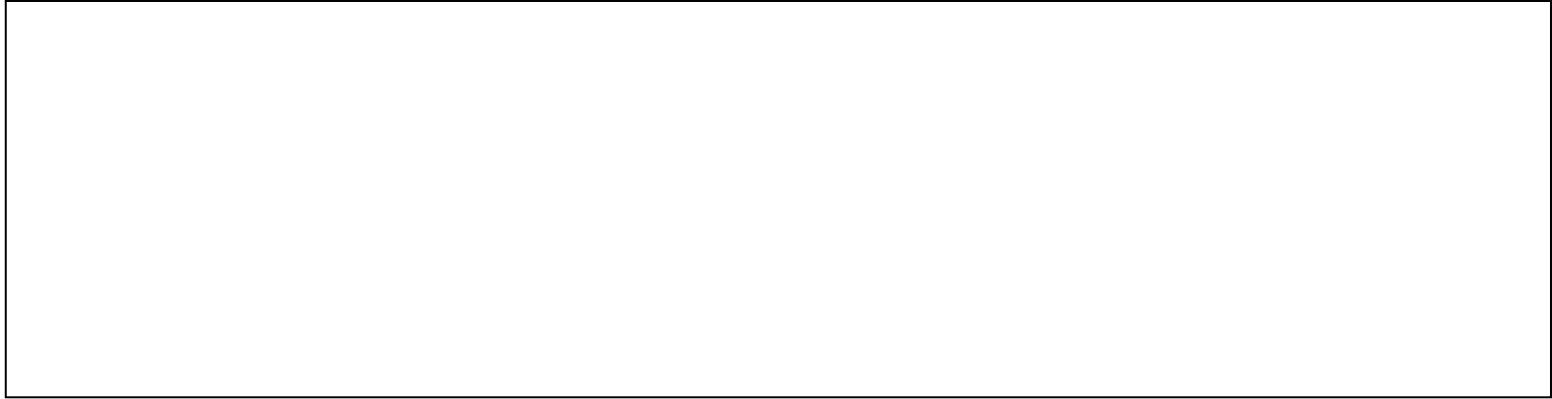
$40\text{Gbps} \times 150\text{波長} = 6\text{Tbps}$

伝送容量倍増！

# DQPSKの研究動向

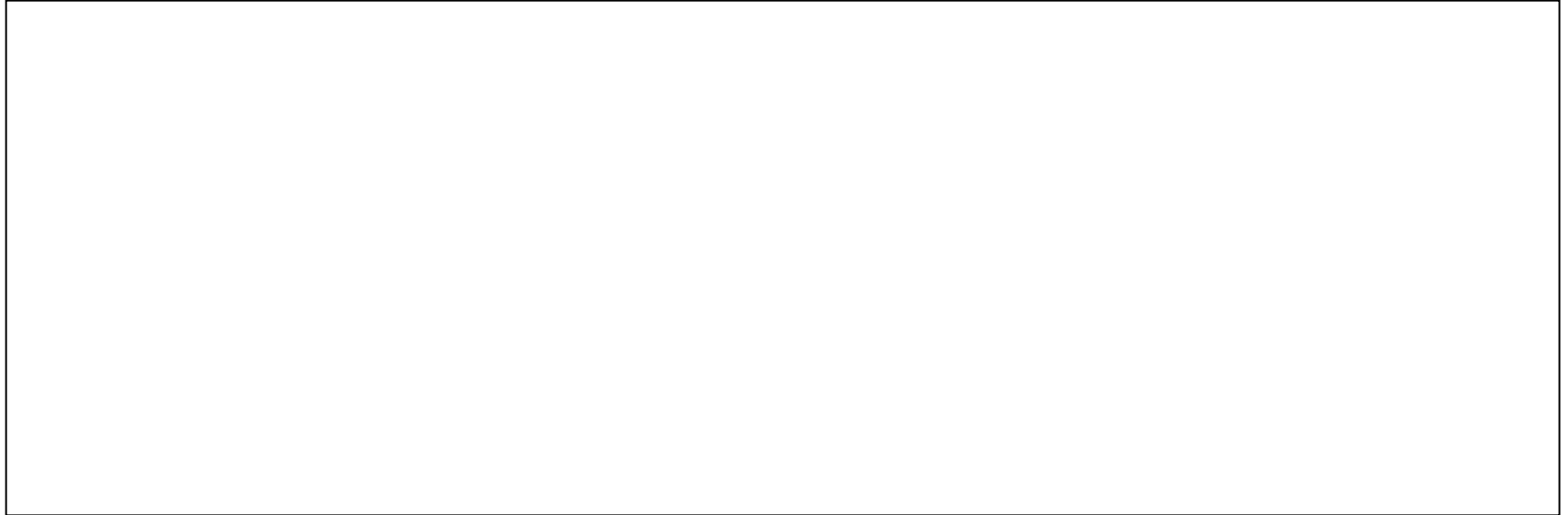
R.A. Griffin, OFC2005, OWE3.

## DQPSK : Differential Quadrature PSK



1シンボル2ビット

R.A. Griffin, OFC2005, OWE3.



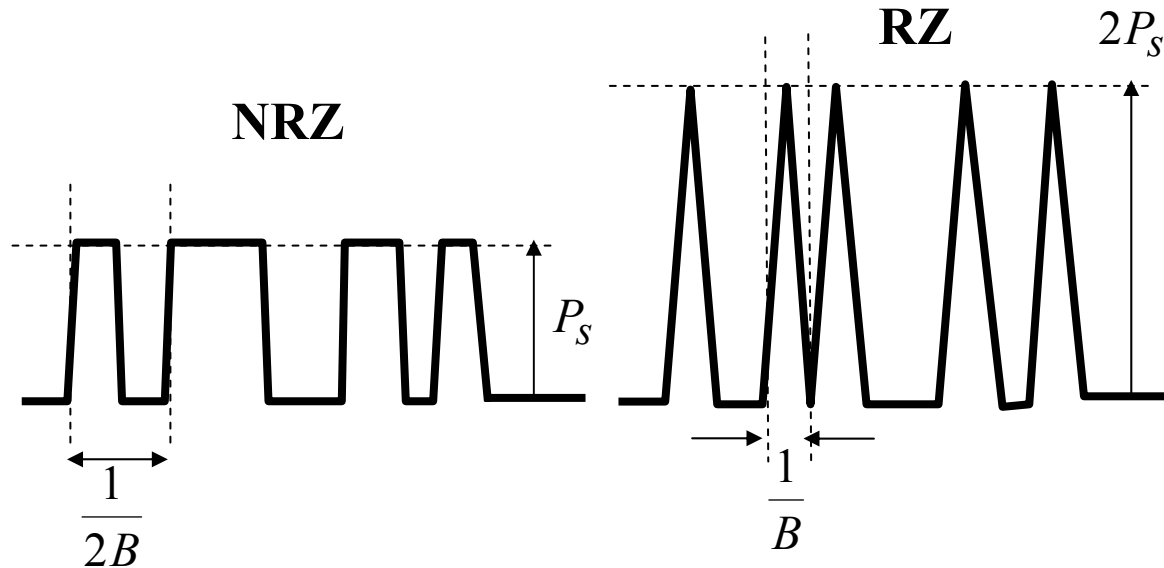
スペクトル利用効率 **2.5bps/Hz**の報告

S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh and K. Kikuchi, OFC2005, PDP29.

## 光雑音耐性

同一受信感度に対するSN比の差

→ 高SN比(高受信感度)の変調方式の選択(RZ, DPSK)



平均受信感度 $P_{ave}$ を用いてRZ・NRZのSNRを比較する。

$$SNR = \left( \frac{e\eta i \frac{GP_s}{\hbar\omega}}{\left( \frac{\sqrt{\sigma_{s,shot}^2 + \sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{s-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2} + \sqrt{\sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2}}{2} \right)} \right)^2$$

$P_s : RZ = NRZ \times 2$  (ピーク強度)

$\sigma_{s,shot}^2, \sigma_{s-sp}^2 : RZ = NRZ \times 4$  (ピーク強度&帯域)

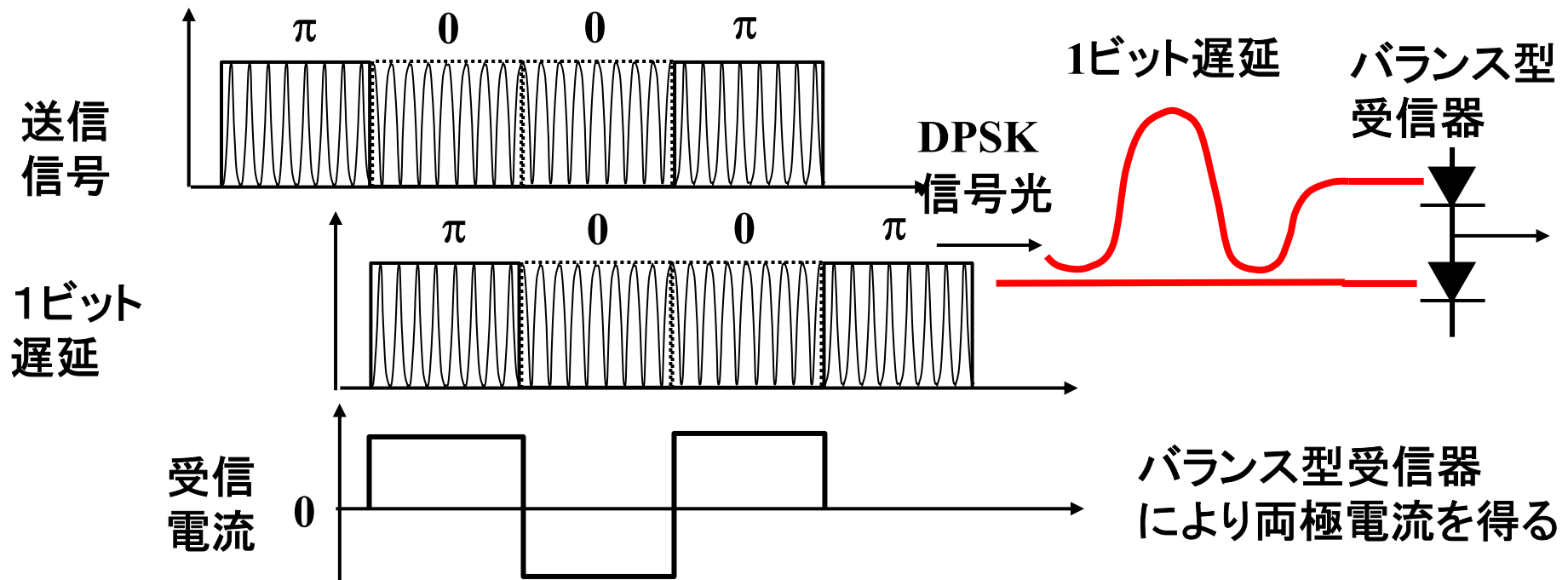
$\sigma_{sp,shot}^2, \sigma_{sp-sp}^2, \sigma_{th}^2 : RZ = NRZ \times 2$  (帯域)

より、 $SNR(RZ) > SNR(NRZ)$

## DPSK変調

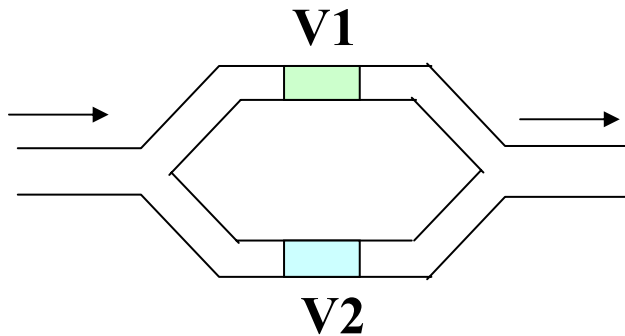
DPSK (Differential Phase-Shift-Keying, 差動位相シフトキーイング方式)

- PSK変調の1種でデータ1を隣接ビット間の位相差 $\pi$ 、データ0を隣接ビット間の位相差0に割り当てたもの。
- 40Gbps DWDMの長距離・受信感度改善を目的にこの5～6年急激に取り組みが盛んになってきた。



バランス型検波器により光位相0,  $\pi$ を電気レベル+1, -1に変換  
→ 電圧0に閾値を設定でき、レベル0,1の受信より感度を3dB改善可能

差動駆動型  
MZMを用いた場合



# DPSK変調信号の受信器

---

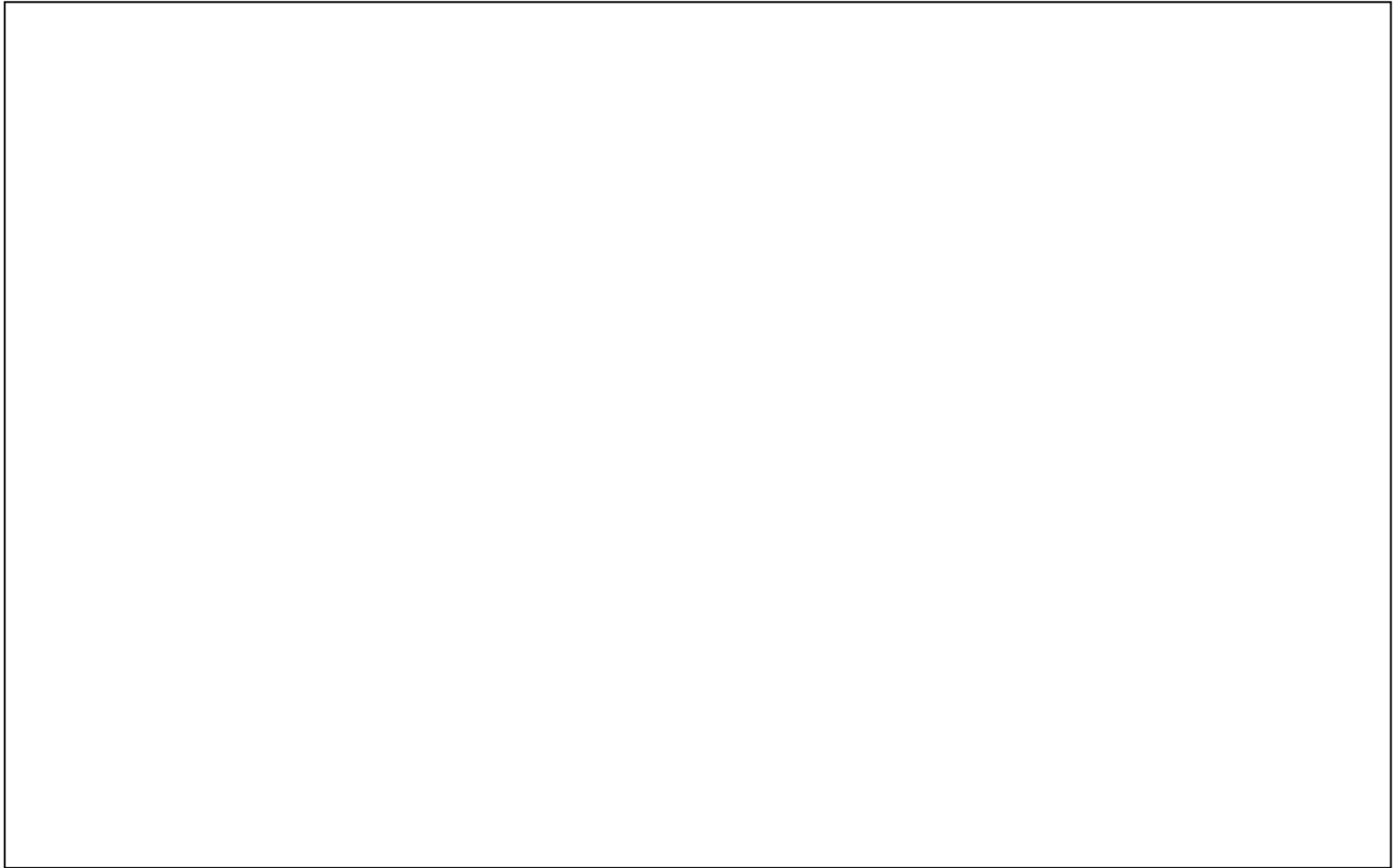
A.H. Gnauck, OFC2004 Tutorial, TuF5.



# 40Gbps RZ-DPSK伝送実験例

---

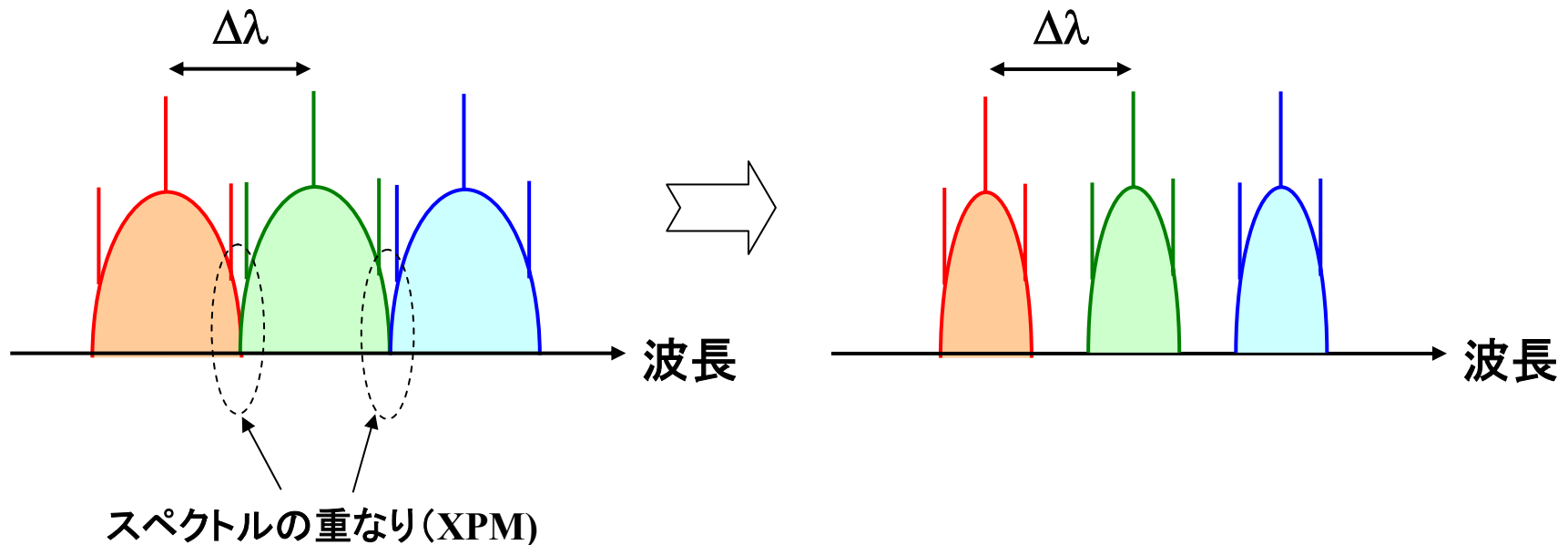
A.H. Gnauck, OFC2004 Tutorial, TuF5.



## 隣接波長チャンネル間クロストーク耐力

隣接チャンネル間の相互作用(XPM)の低減

- 隣接チャンネル間のスペクトル重なりを極力避ける
- **狭帯域の変調方式の採用**  
(2値: CS-RZ, Duobinary) (多値: DQPSK)



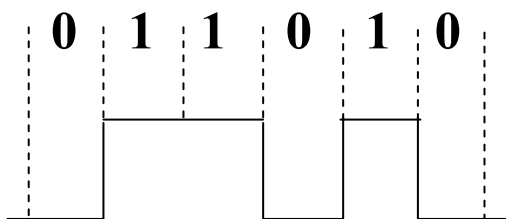
## 非線形耐力

光ファイバ伝送中の自己位相変調(SPM)による分散の影響を抑える。

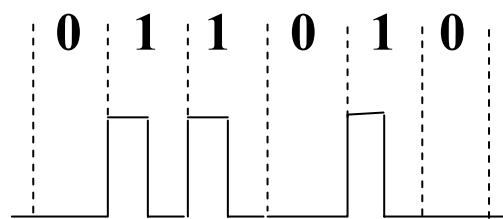
→ ・送信光平均パワーのなるべく小さな変調方式

(例1) NRZはRZの半分の帯域で済むので変調効率の観点では有利だが、1インターバルの平均光パワーが倍のため非線形耐力は劣る。

NRZ



RZ

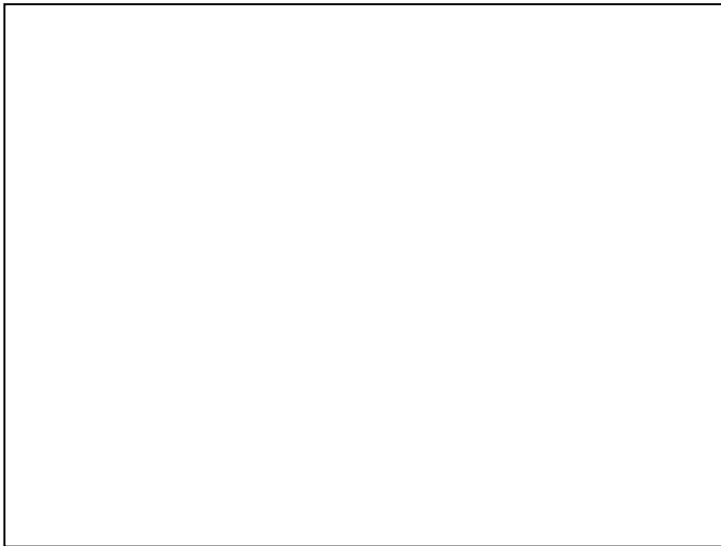


## PMD耐性

DVD (Differential Velocity Delay) による波形歪の影響の大小  
→ 変調波形形状依存

耐性:  $RZ > NRZ$

10Gbps NRZ



10Gbps RZ

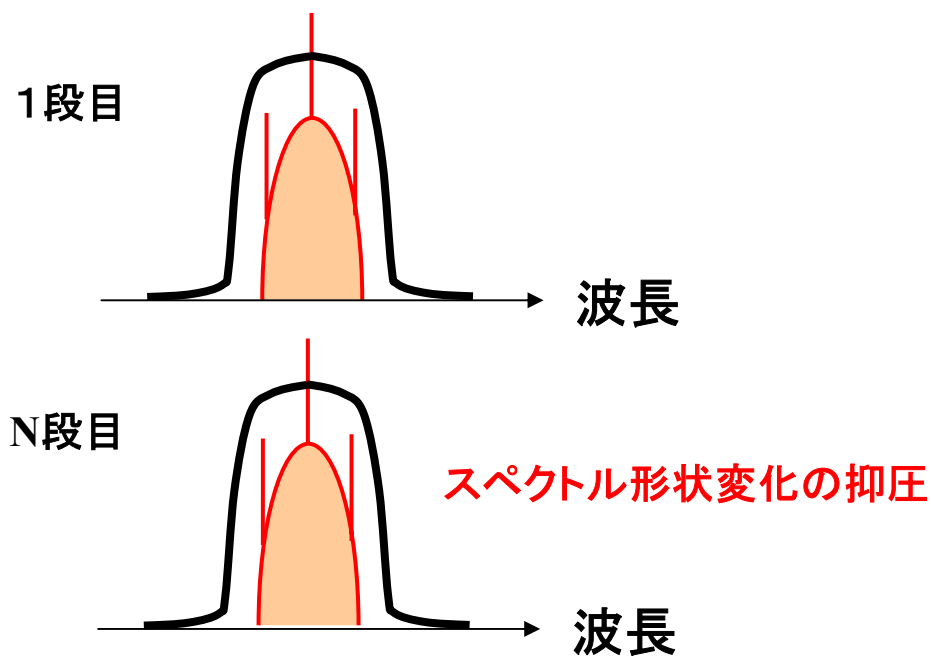
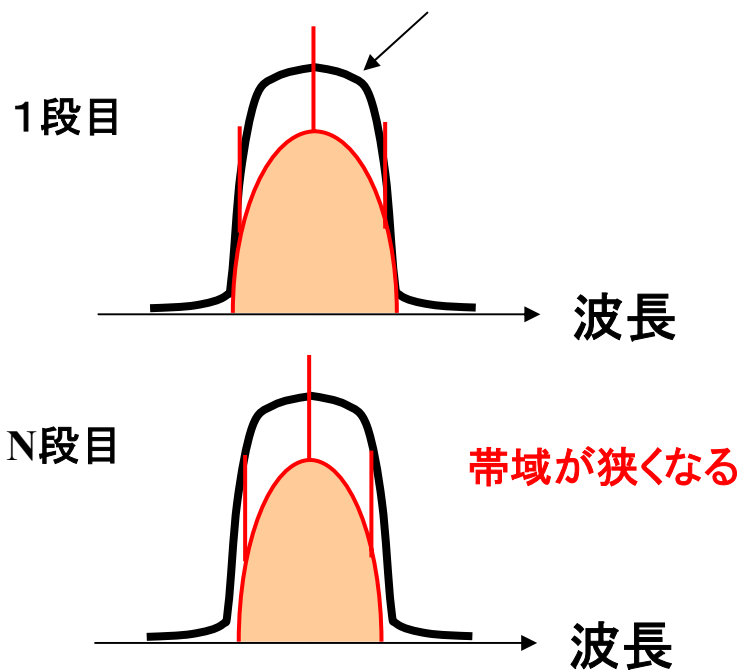


多賀, 鈴木, 波平, 2000年信学会総合大会, SB-8-7 (2000).

## 波長フィルタ多段透過耐性

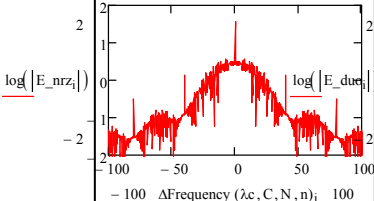
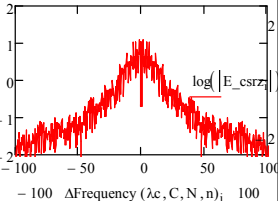
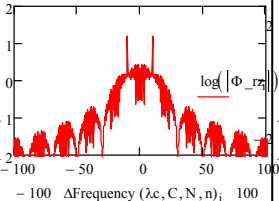
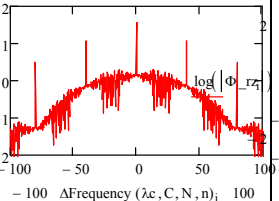
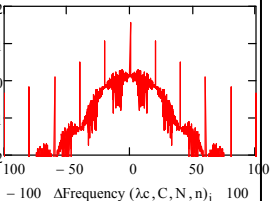
多段フィルタによるスペクトル形状変化・波形劣化→**狭帯域スペクトルの変調方式**  
(2値: CS-RZ, Duobinary) (多値: DQPSK)

波長フィルタの透過スペクトル



# 変復調方式の比較(40Gbps以上)

参考文献: 尾中(富士通), NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

|              | NRZ                                                                               | Duobinary                                                                          | CS-RZ                                                                               | RZ-DPSK                                                                             | RZ-DQPSK                                                                            |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 光スペクトル形状     |  |  |  |  |  |
| 光雑音耐力        | 悪い                                                                                | 悪い                                                                                 | 中                                                                                   | 非常によい                                                                               | よい                                                                                  |
| 波長分散耐力       | 中                                                                                 | よい(線形領域では)                                                                         | 中                                                                                   | 中                                                                                   | よい                                                                                  |
| PMD耐力        | 悪い                                                                                | 中                                                                                  | 中                                                                                   | 中                                                                                   | よい                                                                                  |
| 光学非線形耐力      | 中                                                                                 | 悪い                                                                                 | よい                                                                                  | よい                                                                                  | よい                                                                                  |
| OADMフィルタ透過耐力 | よい                                                                                | 非常によい                                                                              | 中                                                                                   | 中                                                                                   | 非常によい                                                                               |
| 構成(サイズ／コスト)  | 小                                                                                 | 大                                                                                  | 中                                                                                   | 大                                                                                   | 大                                                                                   |