

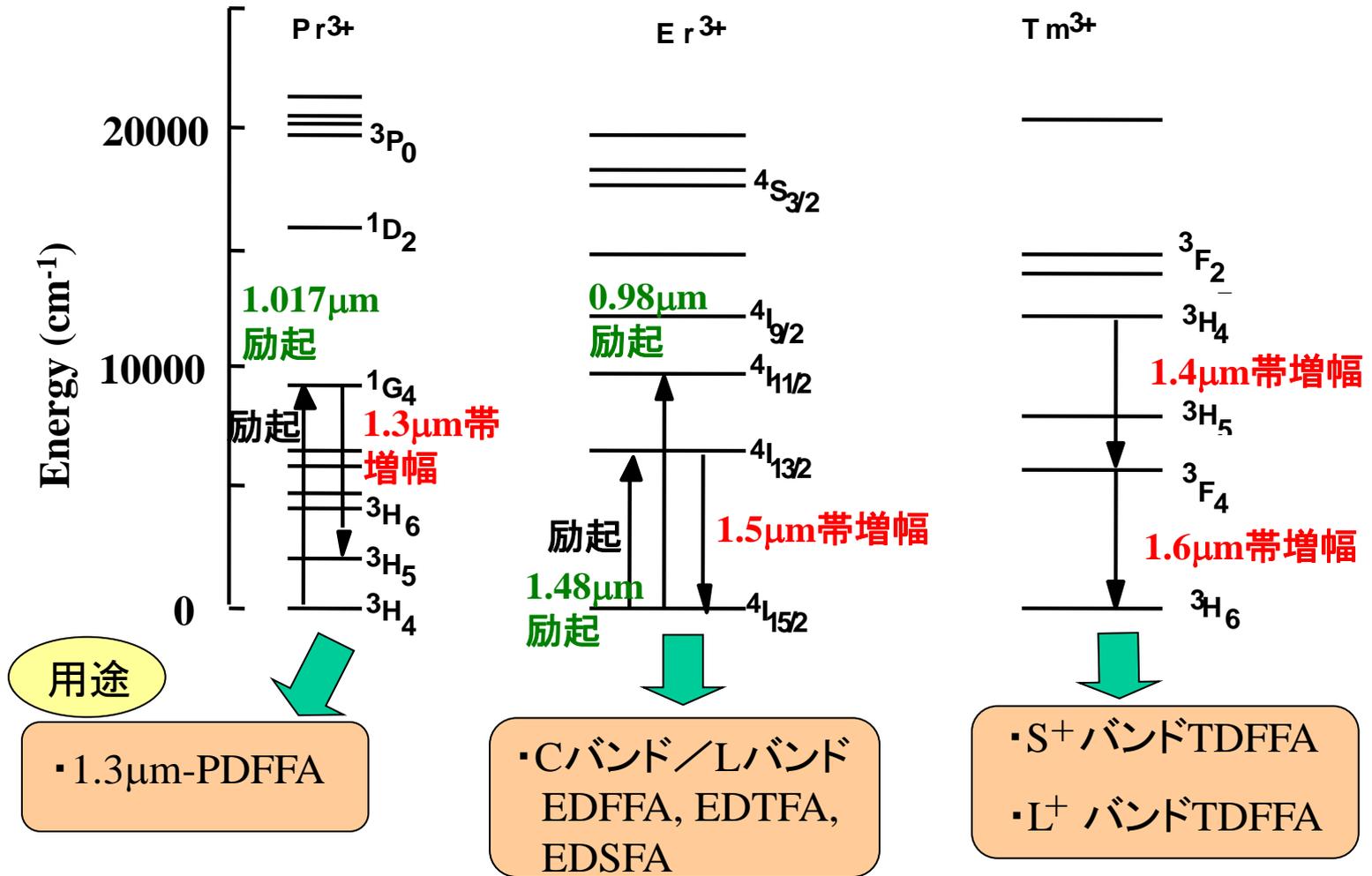
# 第13回

## 光増幅器(2)・WDM伝送技術(1)

2014年1月14日(火)

# 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
- OTFA: テルライト系光ファイバ増幅器
- OSFA: 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 ~ 30dB

雑音指数(NF) : 5.0dB

飽和光出力 : +20dBm

伝送路損失 : 0.2dB/km

伝送路分散 : 0.5ps/nm/km

## 励起波長による特性差

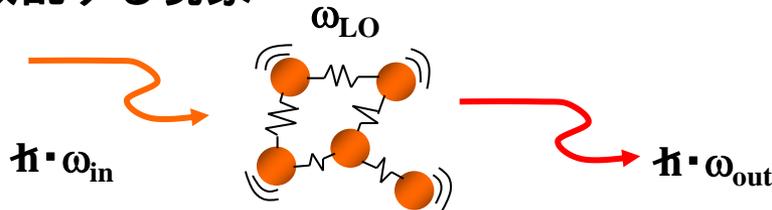
| 波長     | 1.48 $\mu$ m                | 0.98 $\mu$ m                   |
|--------|-----------------------------|--------------------------------|
| 光源     | InGaAsP/InP MQW-LD          | InGaAs/GaAs MQW-LD             |
| 利得効率   | 5dB/mW                      | 10dB/mW                        |
| 雑音指数   | 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                        |

# 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



$$\begin{aligned}\hbar\omega_{in} - \hbar\omega_{out} &= \hbar \cdot \omega_{LO} = \hbar \cdot 2\pi(f_{in} - f_{out}) \\ &= \hbar \cdot 2\pi \cdot 13\text{THz}\end{aligned}$$

波長では約100nm

## ラマン増幅中継器の構成



### メリット

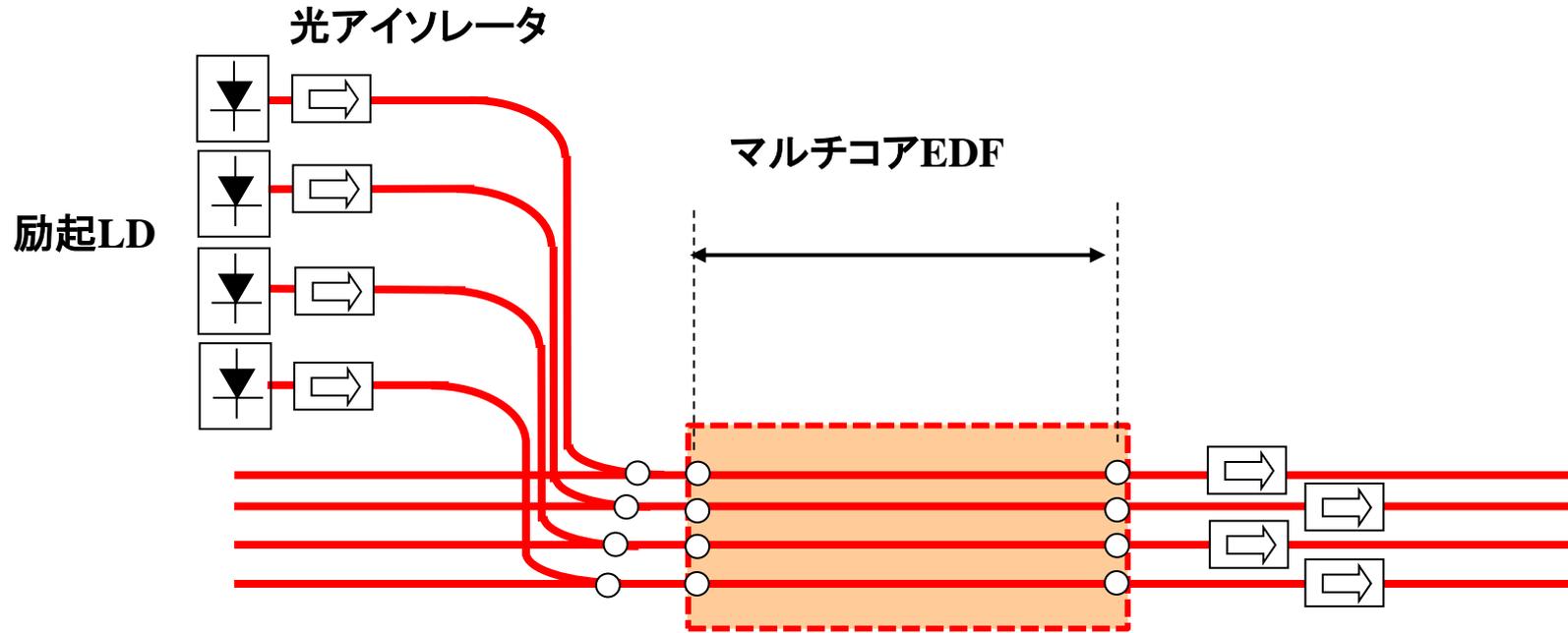
- 伝送用光ファイバを増幅用ファイバとして使用可能
- 任意の信号光が増幅可能

### 課題

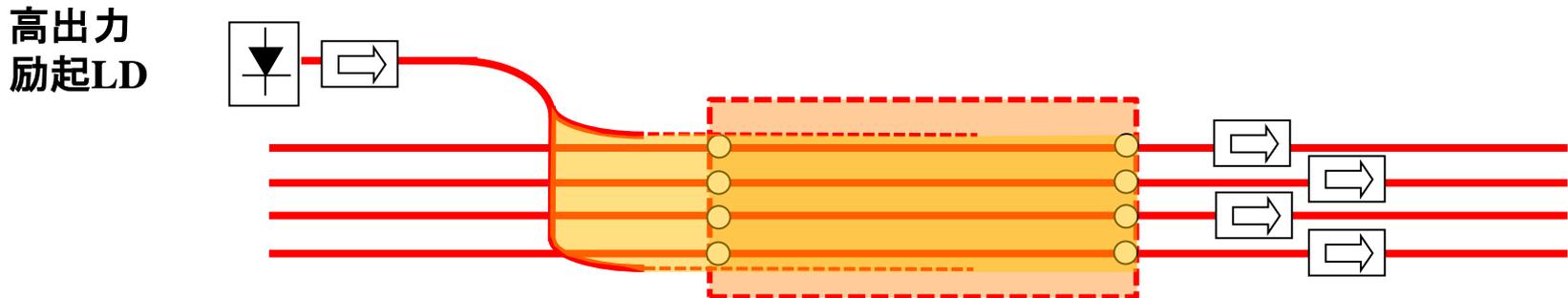
- 長尺ファイバが必要(10km以上)
- 雑音特性の励起方向依存性

# マルチコアEDFA

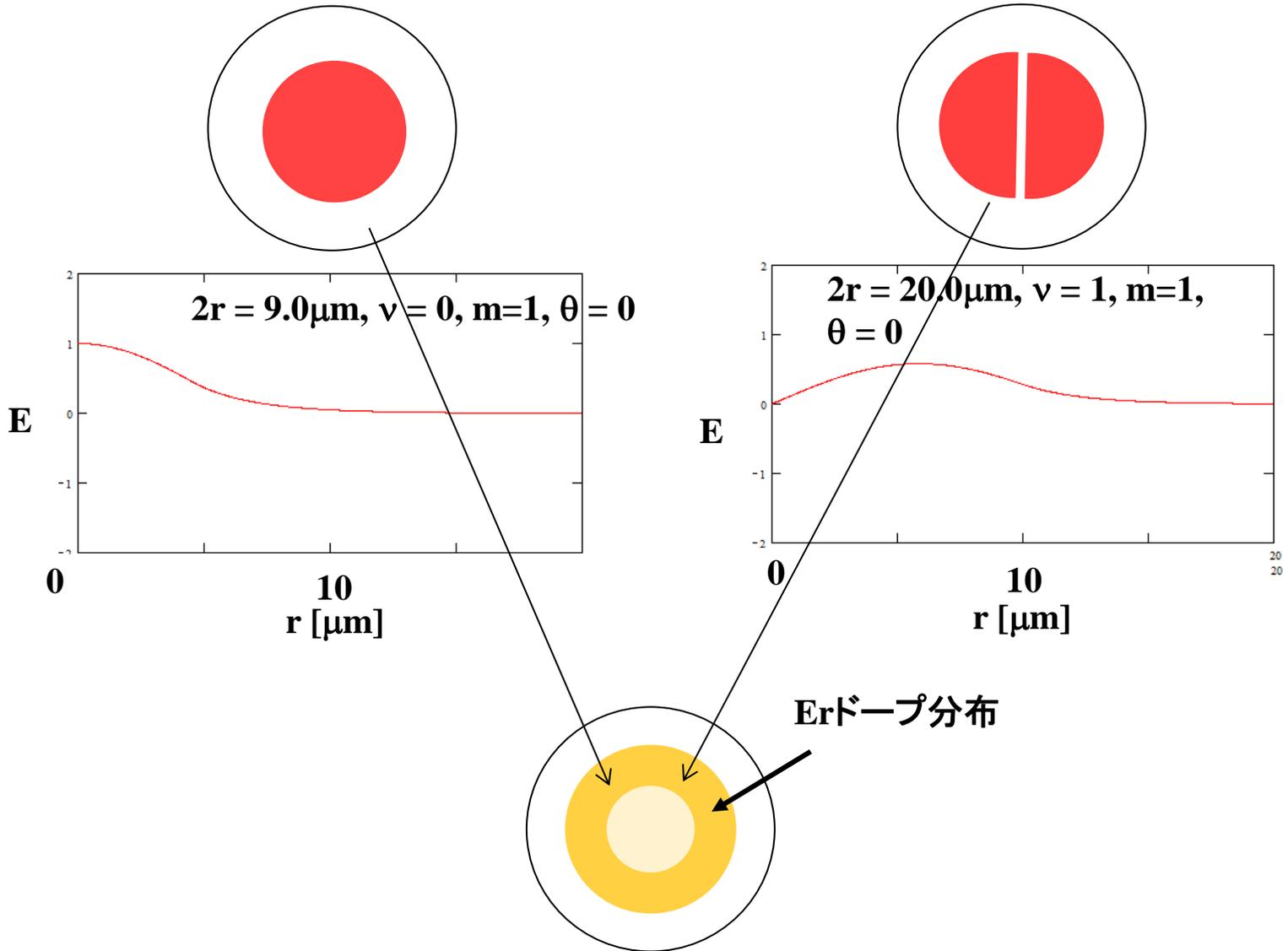
## 個別励起方式



## 一括クラッド励起方式



# マルチモードEDFA



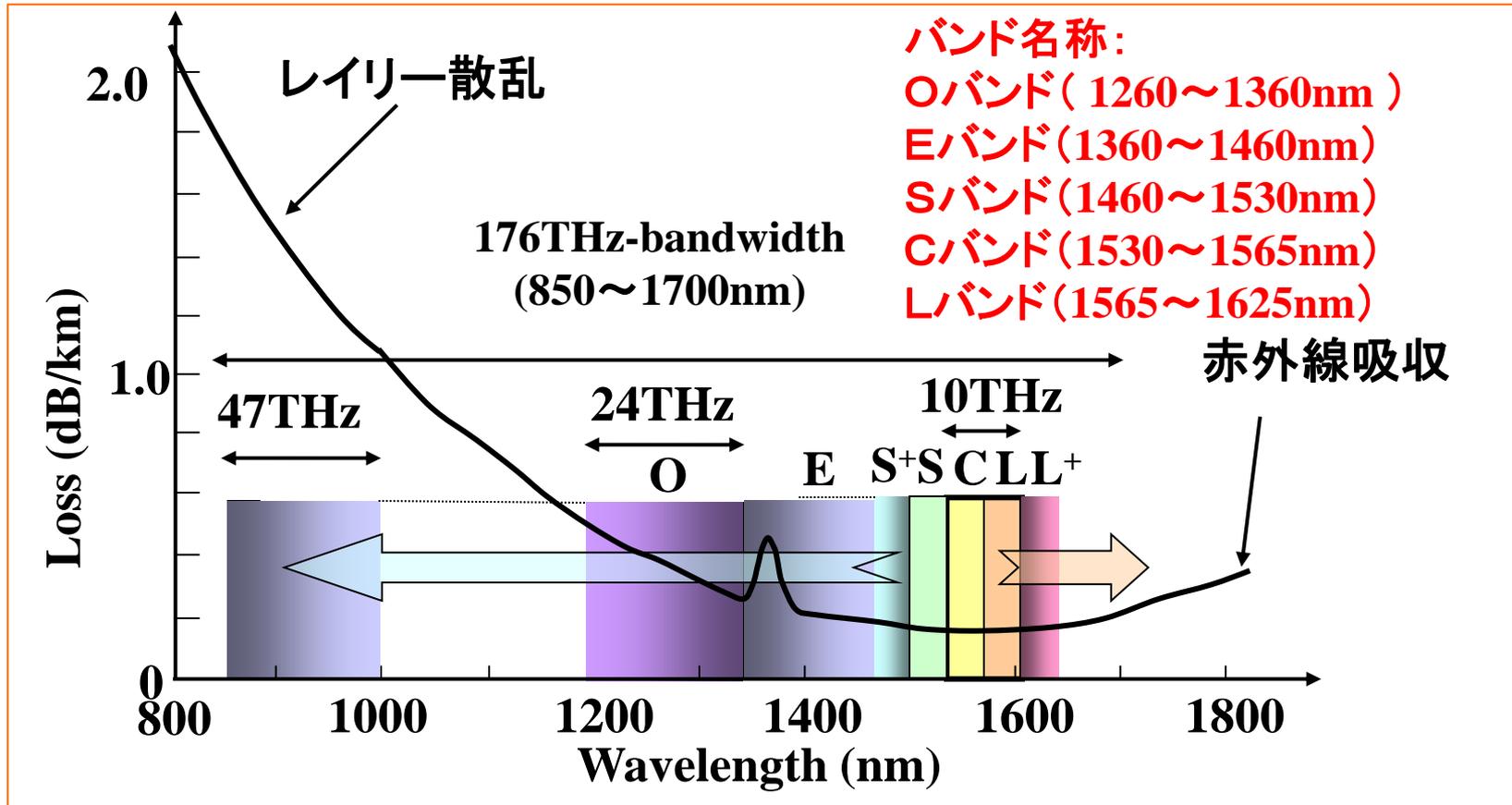
# 第7章

## 波長多重伝送技術

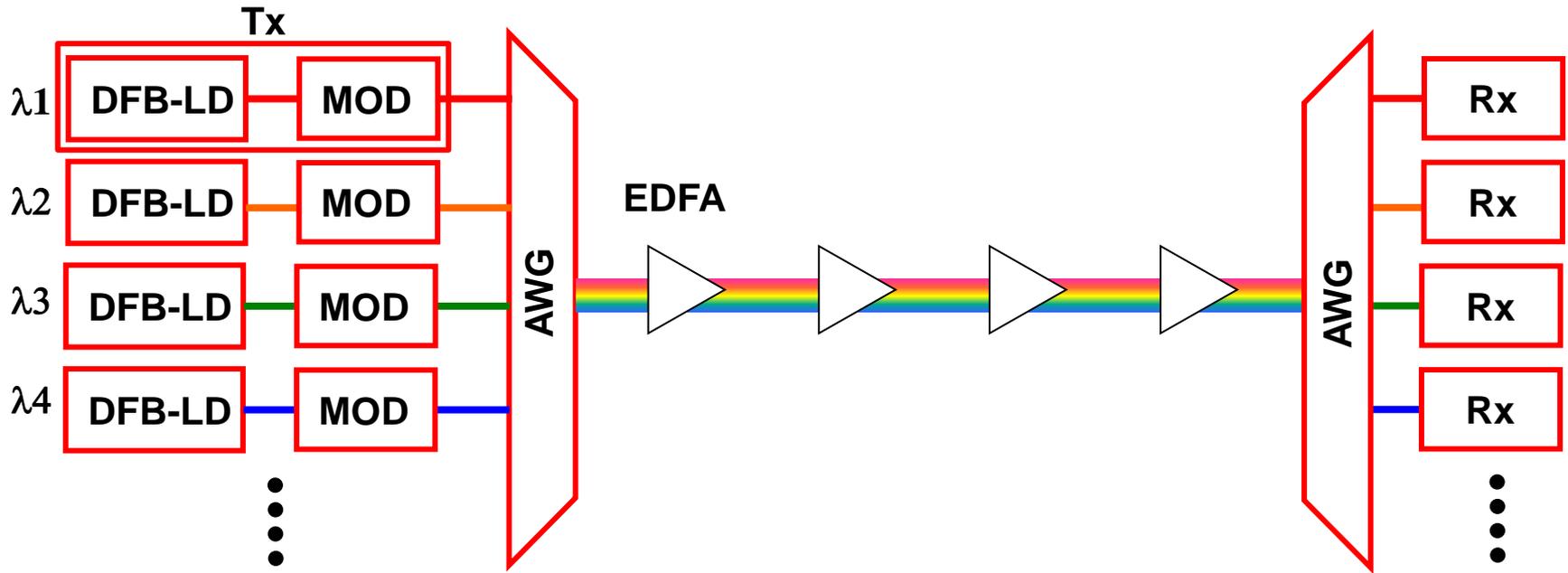
- 7-1 DWDM伝送と分散マネジメント
- 7-2 WDM用光ファイバ
- 7-3 波長多重(WDM)伝送と変調方式
- 7-4 CWDM
- 7-5 WDM用光送受信器
- 7-6 AWG
- 7-7 非線形歪補償

# 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



DFB-LD: 分布帰還形半導体レーザ

MOD: 変調器

AWG: アレイ導波路格子

EDFA: 光ファイバ増幅器

Tx: 光送信器

Rx: 光受信器

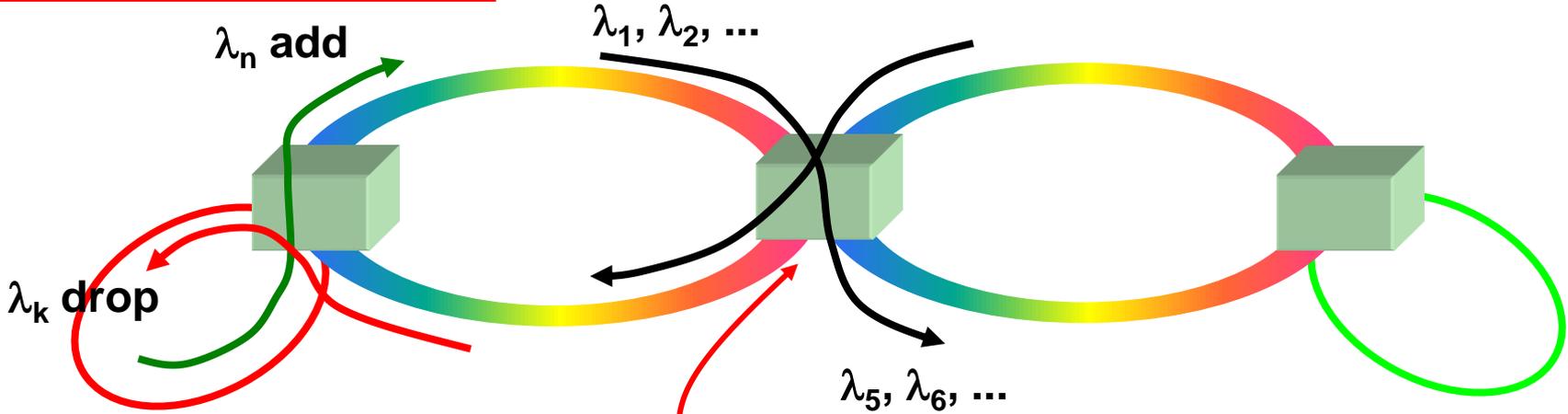
## 重要なポイント

- 多値変調方式: 1シンボルで複数の情報を送信
- マルチコア光ファイバ: 独立な伝送路を高密度配置
- 光ファイバのモード多重: 空間多重

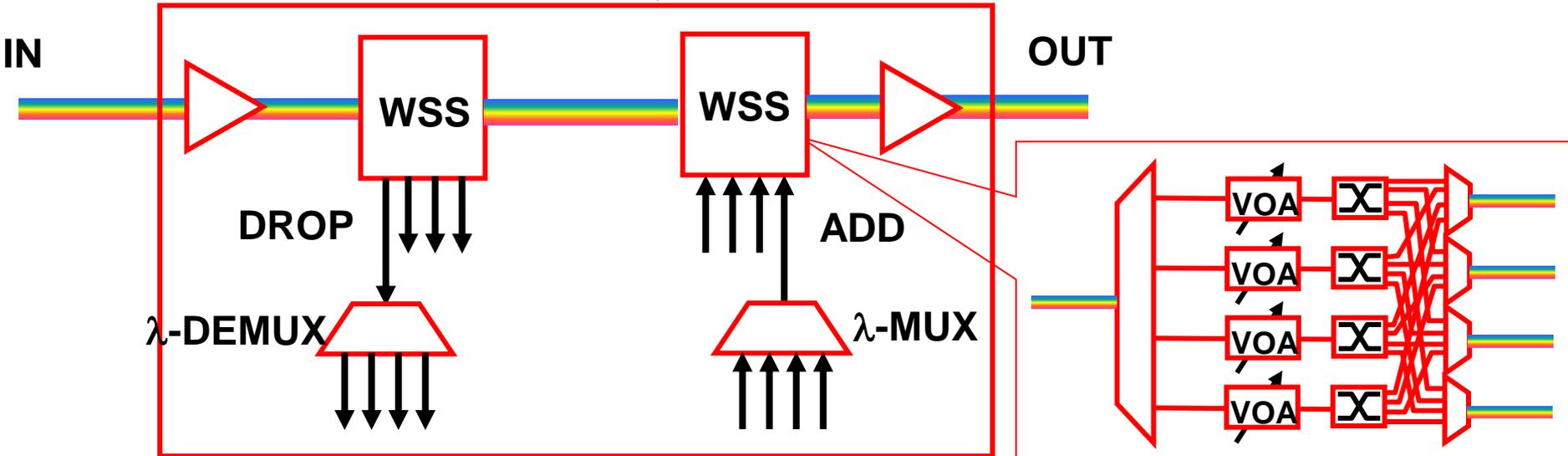
# AWGを多段中継するリングネットワーク

## 多段フィルタ中継構成

## Interconnected Ring Network Topology



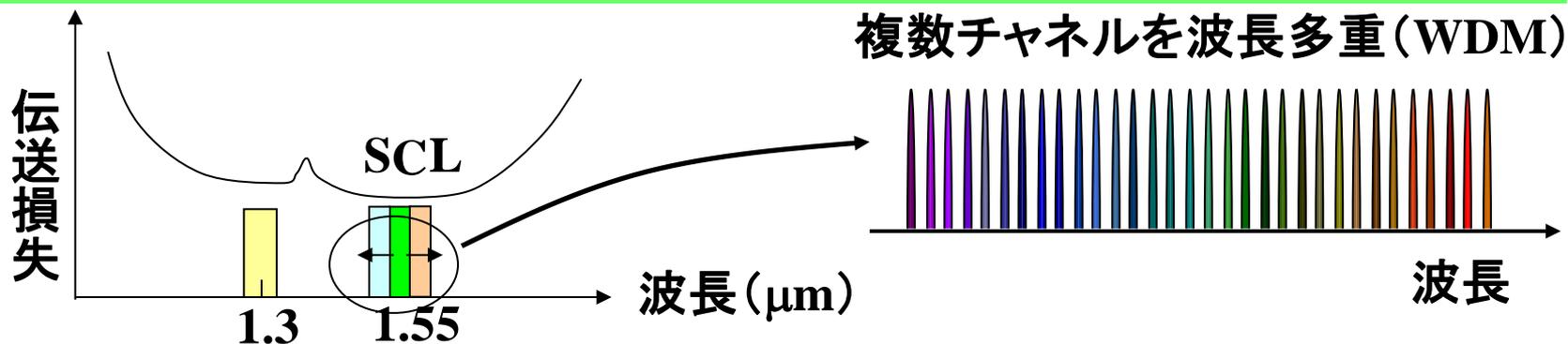
## ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer



※ WSS : Wavelength Selective Switch

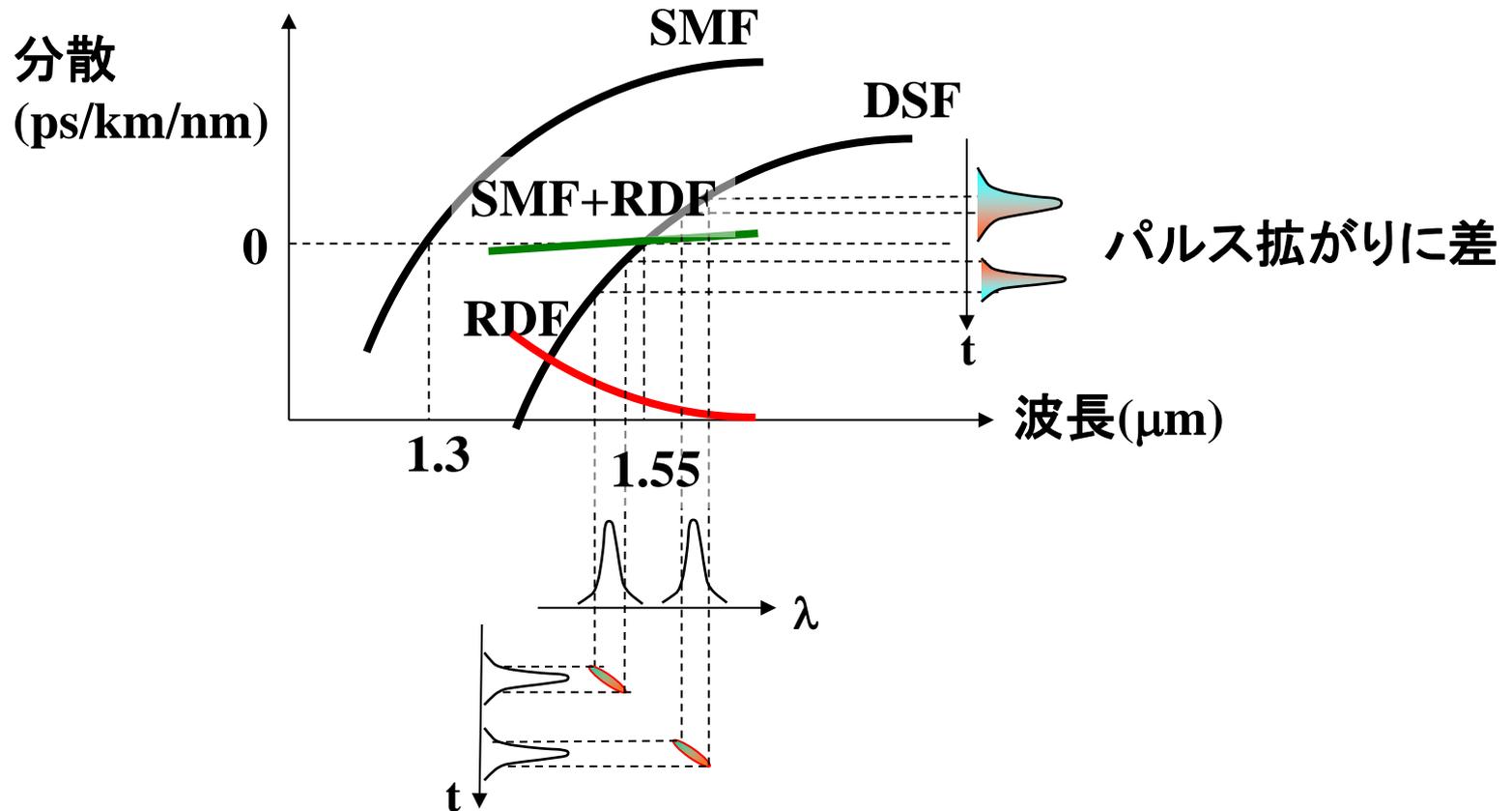
# 波長多重(WDM)と分散マネジメント

# 大容量化のための技術的アプローチ

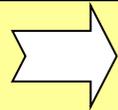


| 技術要素            | 現在の状況                          | 課題               | 検討案                      |
|-----------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
| ① 1波あたり伝送速度の高速化 | 10Gbps→40Gbps                  | 高速電子回路の実現        | InP系、SiGe系               |
| ② 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など狭帯域変調方式の検討 |

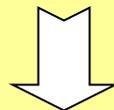
# 波長分散による影響 分散スロープによるWDM帯域の制限



WDM使用帯域の拡大

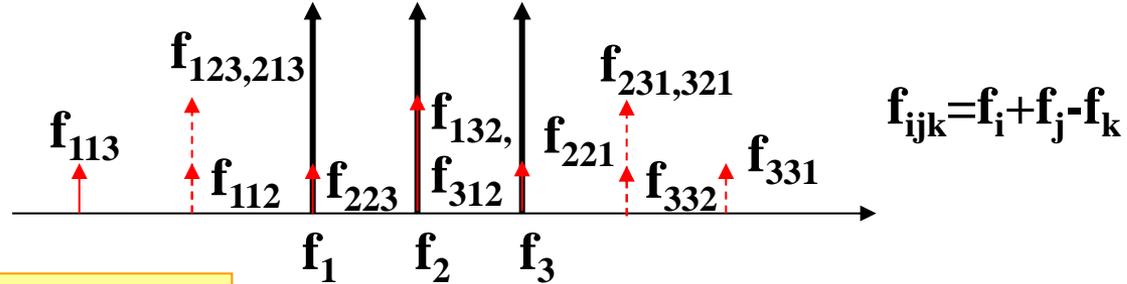


広い波長範囲でトータルの波長分散零の条件を満たしている必要がある。



波長分散の波長依存性(分散スロープ)の低減が重要

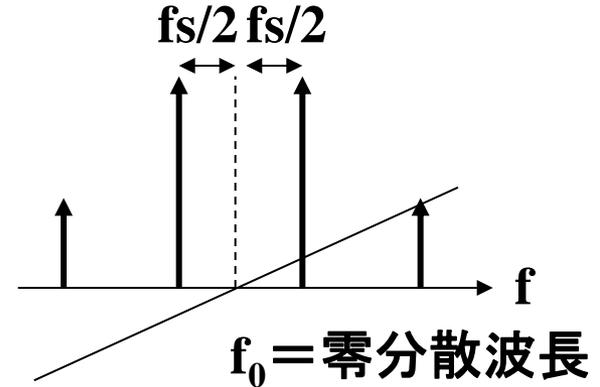
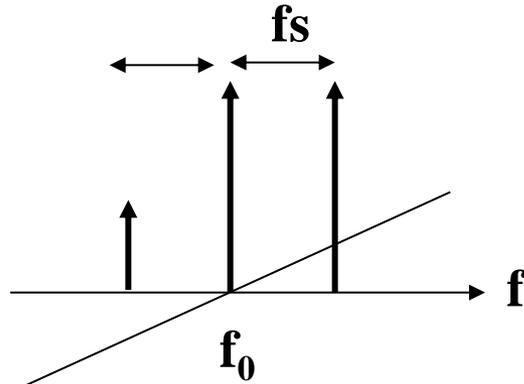
## 4光波混合の影響



### 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

$$\kappa = \frac{32\pi^3 L_{eff} / A_{eff}}{n^2 \lambda \cdot c}$$

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

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

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

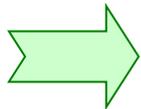
$\Delta\nu_{eq} = \sqrt{|(\nu_i - \nu_k)(\nu_j - \nu_k)|}$

## 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、

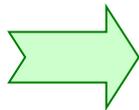
$$\Delta\nu_{\text{eq}} > 50\text{GHz} \text{にて } \eta_{ijk} < 1\%$$



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

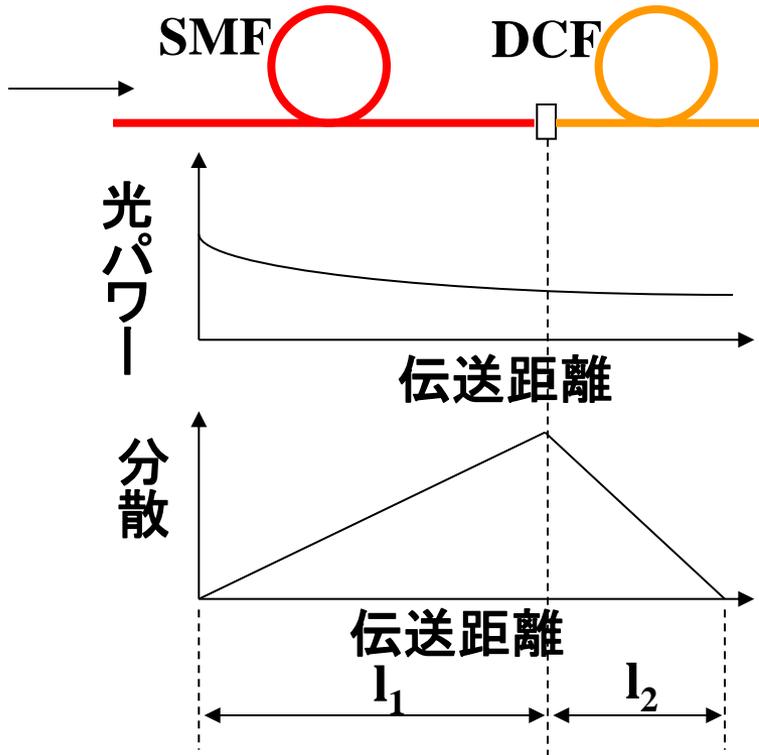
$\Delta\beta = 0$  : 位相整合条件 を満たす



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

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)

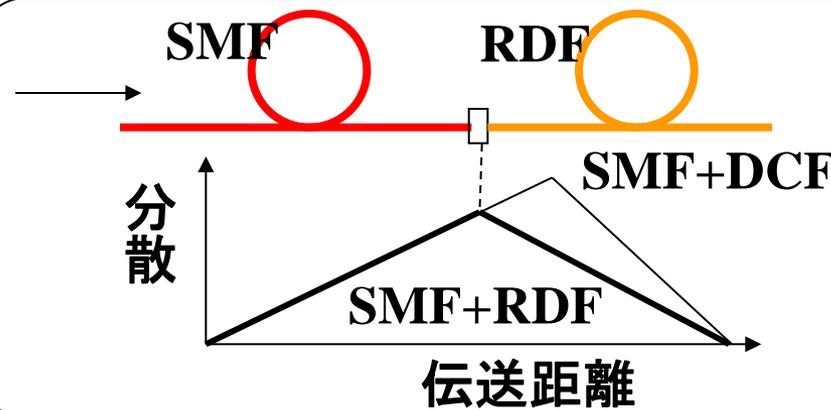


## ポイント

- 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

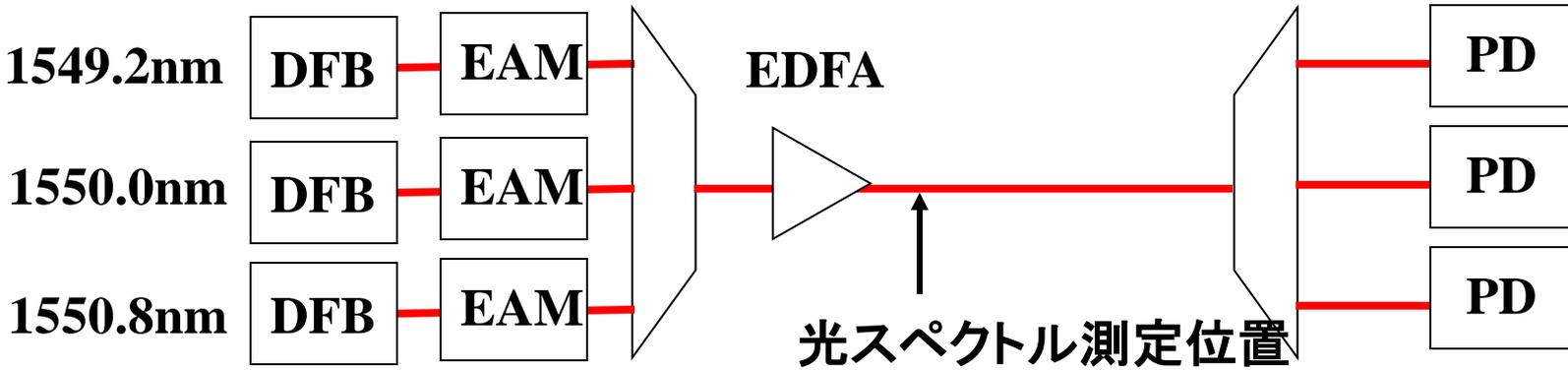
- ① DCFの伝送損失はSMFより大のため 伝送損失の低い純石英コアファイバ (PSCF)を使用し伝送路平均損失を低減



## ポイント

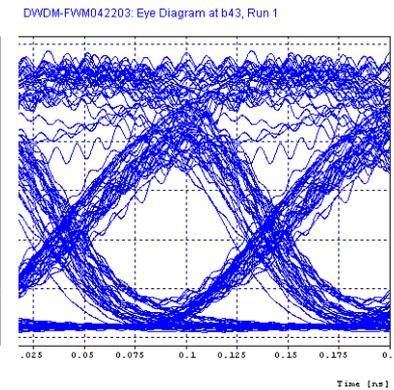
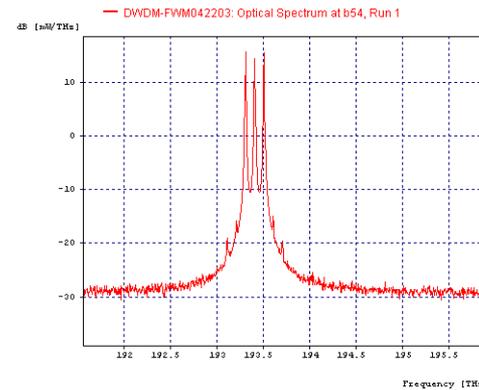
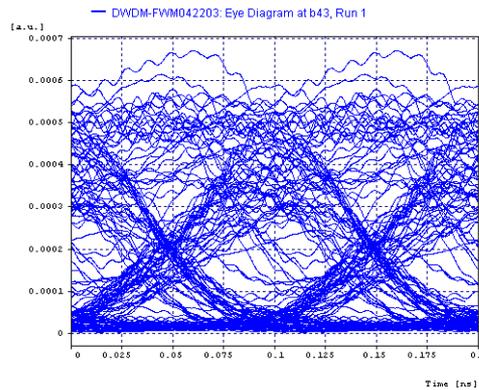
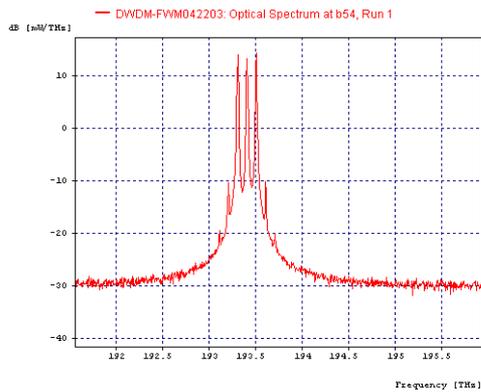
- ① SMF+RDFにより局所分散累積の低減

# FWMの影響(解析例)

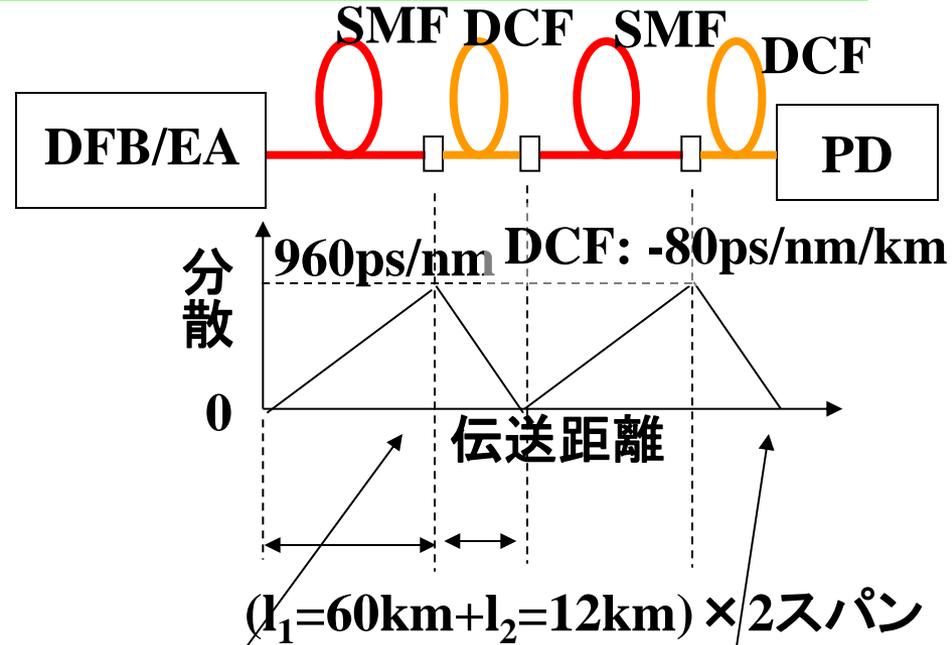
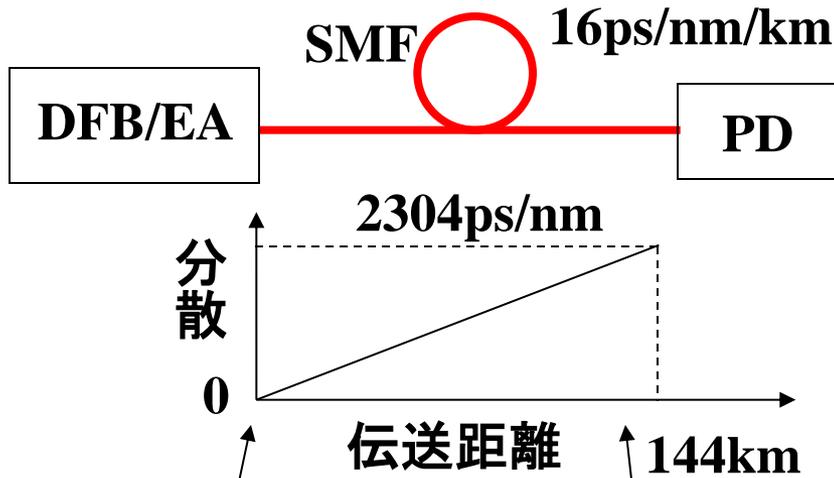


① DSF  
(分散2km/nm/km) 88km

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

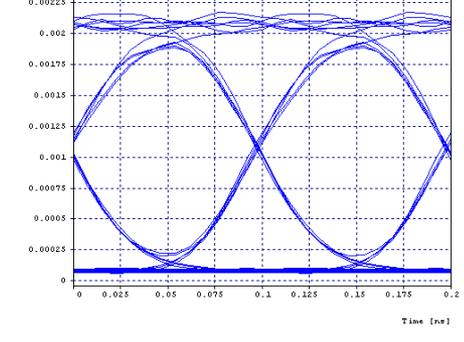
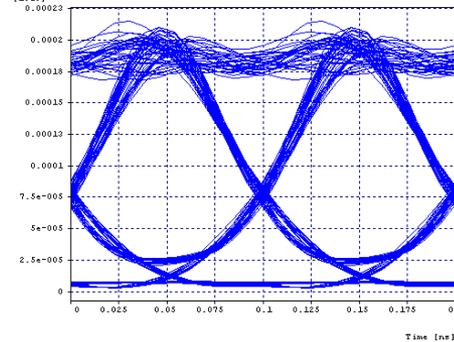
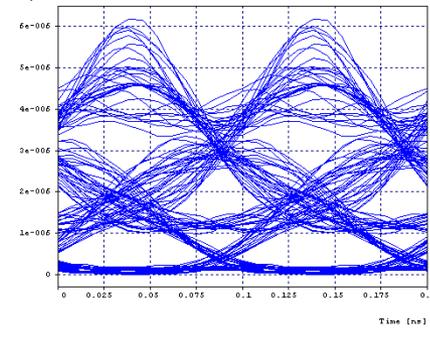
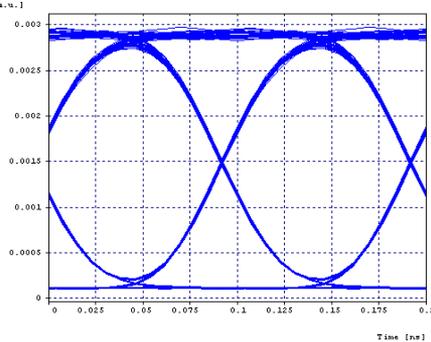
144km

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

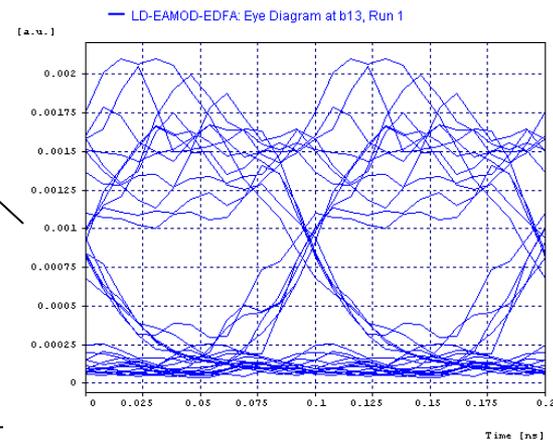
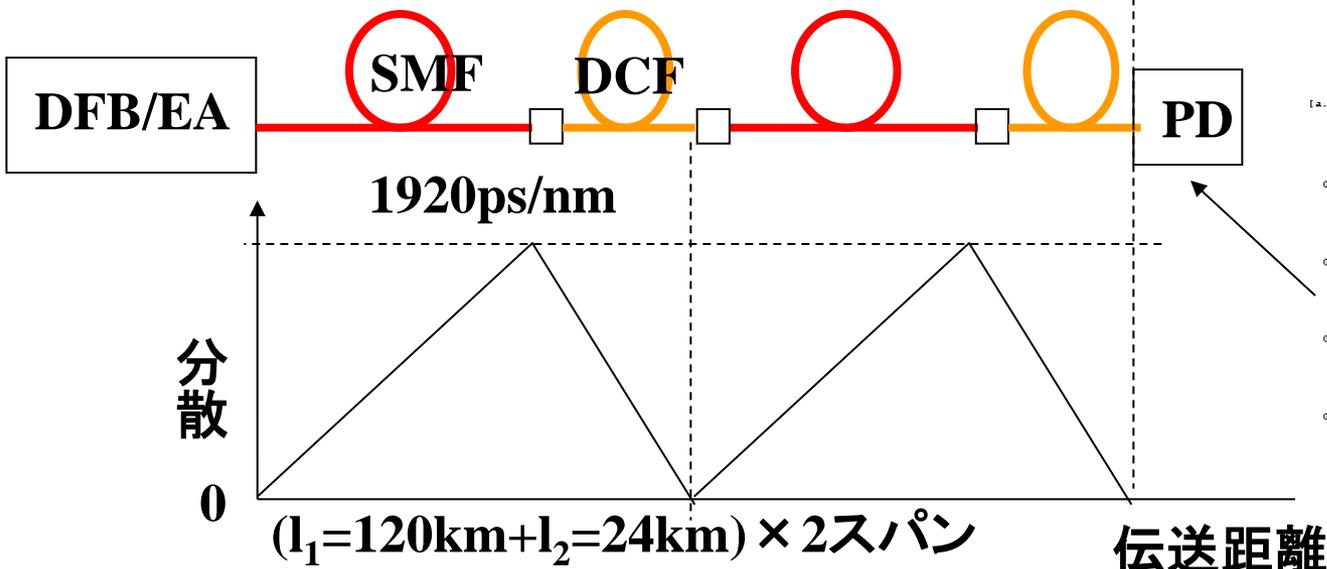
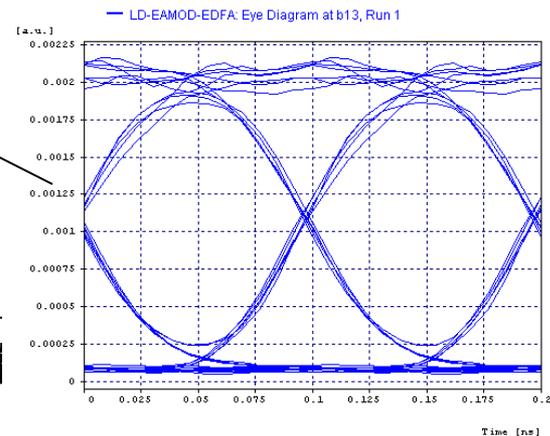
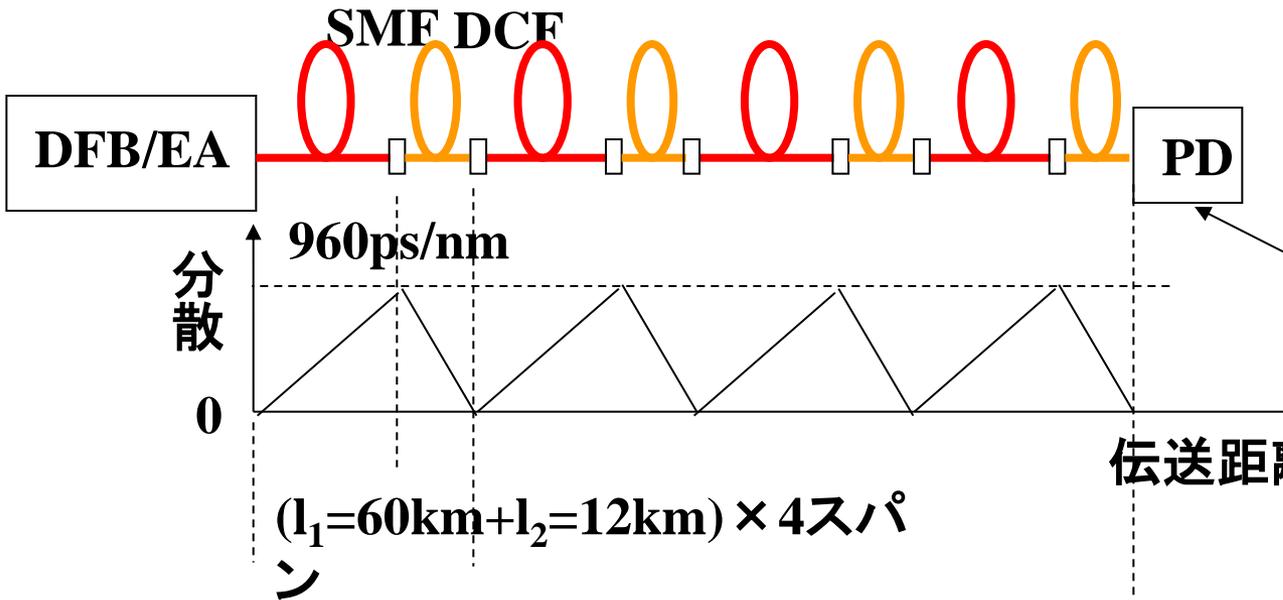
— LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1

— 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



# WDM用光ファイバ

## FWM発生効率

$$\eta = \left[ \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \frac{\alpha}{D} \right]^2$$


$A_{\text{eff}}$  : 実効コア断面積

$n_2$  : 非線形屈折率

$\alpha$  : 伝送損失

$D$  : 波長分散

## FWM抑制の条件

- ① 大 $A_{\text{eff}}$
- ② 大分散
- ③ 低 $n_2$  : ガラス材料により決まる量
- ④ 低損失 : 十分な低損失を実現済み

# 大 $A_{\text{eff}}$ 光ファイバ

| タイプ                | 屈折率分布 | 電界分布 | $A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$<br>@ 1550nm | MFD ( $\mu\text{m}$ )<br>@ 1550nm | 波長分散<br>(ps/nm/km) | 分散スロープ<br>(ps/nm/km)<br>@ 1550nm |
|--------------------|-------|------|--|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 標準SMF              |       |      | 80~85  | 10                                | +17                | 0.06                             |
| 階段型<br>DSF         |       |      | 40~50  | 7.5~8.5                           | -5~+5              | 0.07~0.1                         |
| セグメンテッド<br>コア型     |       |      | 70~80  | 8~9                               | -5~+5              | 0.10~0.12                        |
| 中心ディップ<br>型(単リング)  |       |      | 80~120                                       | 8~10                              | -5~+5              | 0.08~0.09                        |
| 中心ディップ<br>型(2重リング) |       |      | 80~150                                       | 8~10                              | -5~+5              | 0.08~0.09                        |

$A_{\text{eff}}$ 大 → カットオフ波長の長波長シフト → 曲げ損失増大 →  $A_{\text{eff}} \leq 80 \mu\text{m}^2$

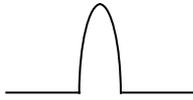
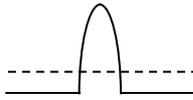
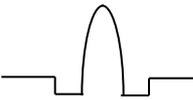
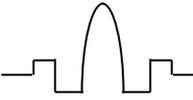
電界分布が中心にディップを持つ → 通常ファイバとの接続損失大 (1dB程度)

## NZ-DSFファイバの仕様比較

各社ホームページの製品情報より

| メーカー    | 製品名        | 伝送損失<br>(dB/km) | 分散<br>(ps/nm/km)               | 分散スロープ<br>(ps/nm <sup>2</sup> /km) | PMD<br>(ps/√km) |
|---------|------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 住友電工    | PureGuide® | ≤ 0.22          | 5.0 - 10.0(C)                  | ≤0.063<br>≤@ 1550nm                | ≤ 0.2           |
| Corning | Leaf™      | ≤ 0.25          | 2.0 - 6.0(C)<br>4.5 - 11.2(L)  | Not shown                          | ≤ 0.04          |
| Lucent  | TrueWave™  | ≤ 0.25          | 2.6 - 6.0(C)<br>4.0 - 8.9(L)   | ≤0.05<br>≤@ 1550nm                 | ≤ 0.1           |
| Alcatel | TeraLight™ | ≤ 0.25          | 5.5 - 10.0(C)<br>7.5 - 13.8(L) | 0.058<br>@ 1550nm                  | ≤ 0.08          |

# 分散補償ファイバ

| 屈折率分布  | MFD ( $\mu\text{m}$ )<br>@ 1550nm | 波長分散<br>(ps/nm/km) | 分散スロープ<br>(ps/nm/km)<br>@ 1550nm | 性能指数<br>(ps/nm/dB)<br>@ 1550nm |
|--|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|       | 5.0                               | -70~-90            | +0.08                            | 200~250                        |
|       | 5.0                               | -70~-90            | +0.08                            | 200~250                        |
|       | 4.5                               | -100~-135          | -0.2~-0.5                        | 200~300                        |
|  RDF | 5.8                               | -15.6              | -0.046                           | 62                             |
|     | 5.0                               | -100~-300          | -0.15                            | 300~400                        |

和田 朗, “光ファイバー研究開発の最新動向”, O plus E, pp.68-73 (1999).

## 分散マネジメント伝送路の例

@ 1550nm

| ファイバ  | 損失<br>(dB/km) | $n_2$<br>( $\times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ ) | $A_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}^2$ )<br>@ 1550nm | 波長分散<br>(ps/nm/km) | 分散スロープ<br>(ps/nm/km) |
|-------|---------------|--|--|--------------------|----------------------|
| +D    | 0.171         | 2.8  | 112  | +20.6              | +0.060               |
| -D    | 0.296         | 4.0  | 19   | -55.9              | -0.142               |
| +D/-D | 0.212         | —  | 79   | -1.5               | +0.007               |

# WDM用光ファイバ研究の変遷 (多値変調方式と伝送限界の観点から)

---

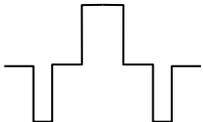
非線形歪の影響から、

NZ-DSF → SMF → PSCF(Pure Silica Core Fiber, 低損失)へ

A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, F. Forghieri, J. Lightw. Technol., vol.30, pp.1524-1539 (2012).



OFC2011の発表内容を元に(1550nmでの値)

| メーカー名   | 伝搬損失<br>[dB/km] | $A_{eff}$<br>[ $\mu\text{m}^2$ ] | 分散<br>[ps/nm/km] | 分散スロープ<br>[ps/nm <sup>2</sup> /km] | 特徴  |
|---------|-----------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|---|
| 住友電工    | 0.16            | 134                              | 21               | 0.061                              | 純シリカコア<br>プライマリ被覆樹脂の<br>ヤング率低減による<br>マイクロベンドロスの低減   |
| Corning | 0.17            | 140                              |                  |                                    | 純シリカコア<br>トレンチ・アシスト   |
| Draka   | 0.183           | 155                              | 21.7             | 0.064                              | トレンチ・アシスト<br>純シリカコア<br> |

# 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, DQPK)**

(例) 0.8bps/Hzの時、40Gbps, 50GHz間隔

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

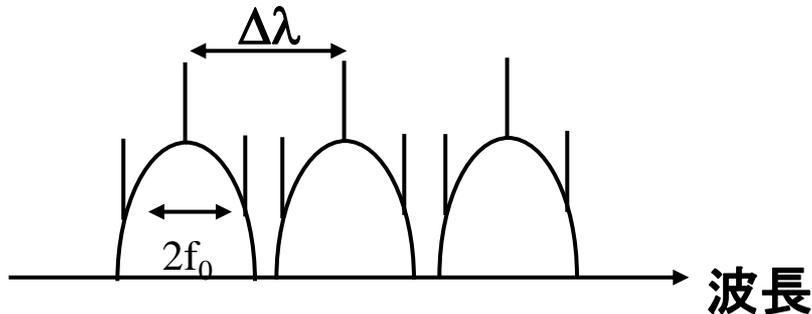
① 波長間隔が変調周波数よりも十分広い場合

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

$\Delta\lambda$  : DWDMの波長間隔

$\Delta f$  : DWDMの周波数間隔

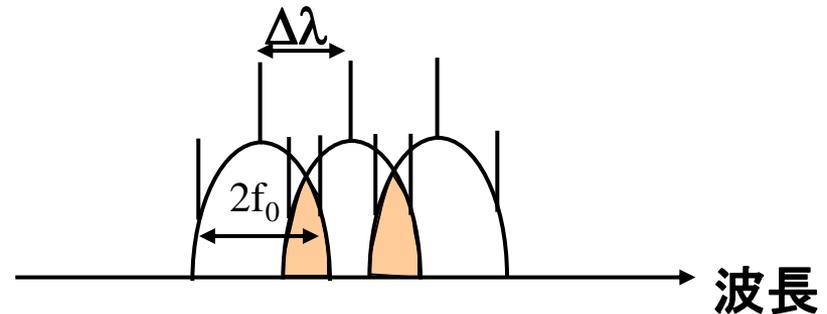
$f_0$  : 変調周波数



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

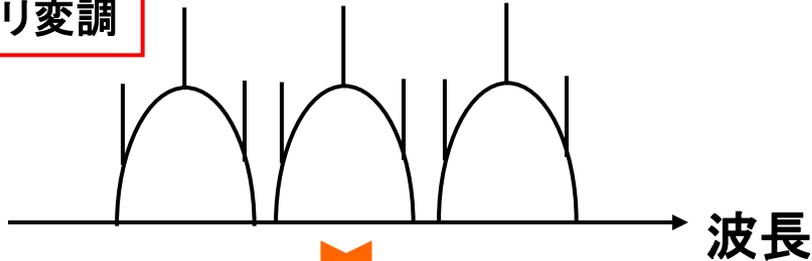


# DWDMにおける変調方式への要求仕様(1-2)

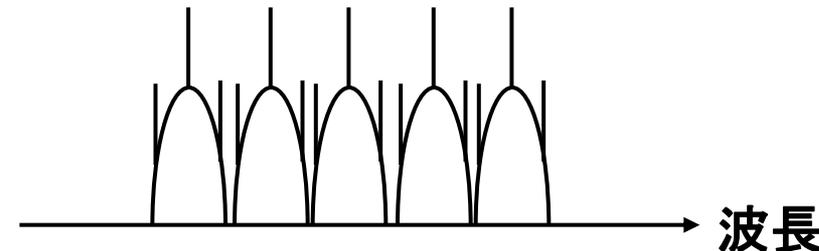
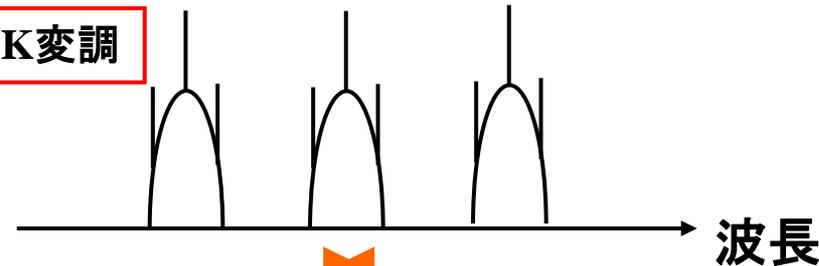
## バイナリ(2値)から多値変調へ

## (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

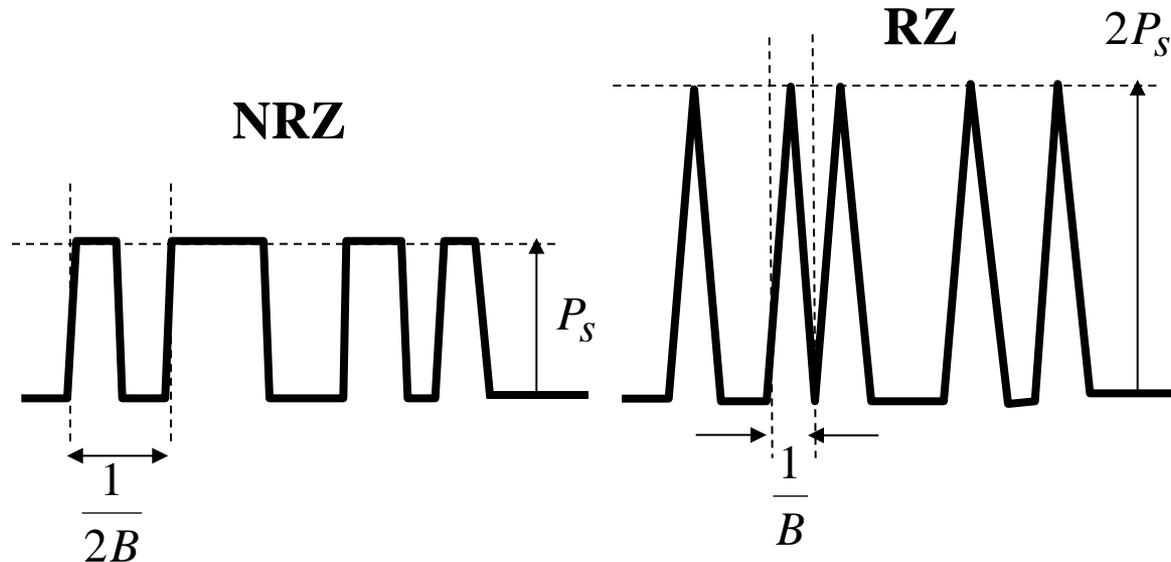
$40\text{Gbps} = 20\text{Gbps} \times 2$   
20Gbps (25GHz or 0.2nm間隔) → 150波長  
 $40\text{Gbps} \times 150\text{波長} = 6\text{Tbps}$

伝送容量倍増!

## 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。

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

$P_s$  : RZ = NRZ × 2 (ピーク強度)

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

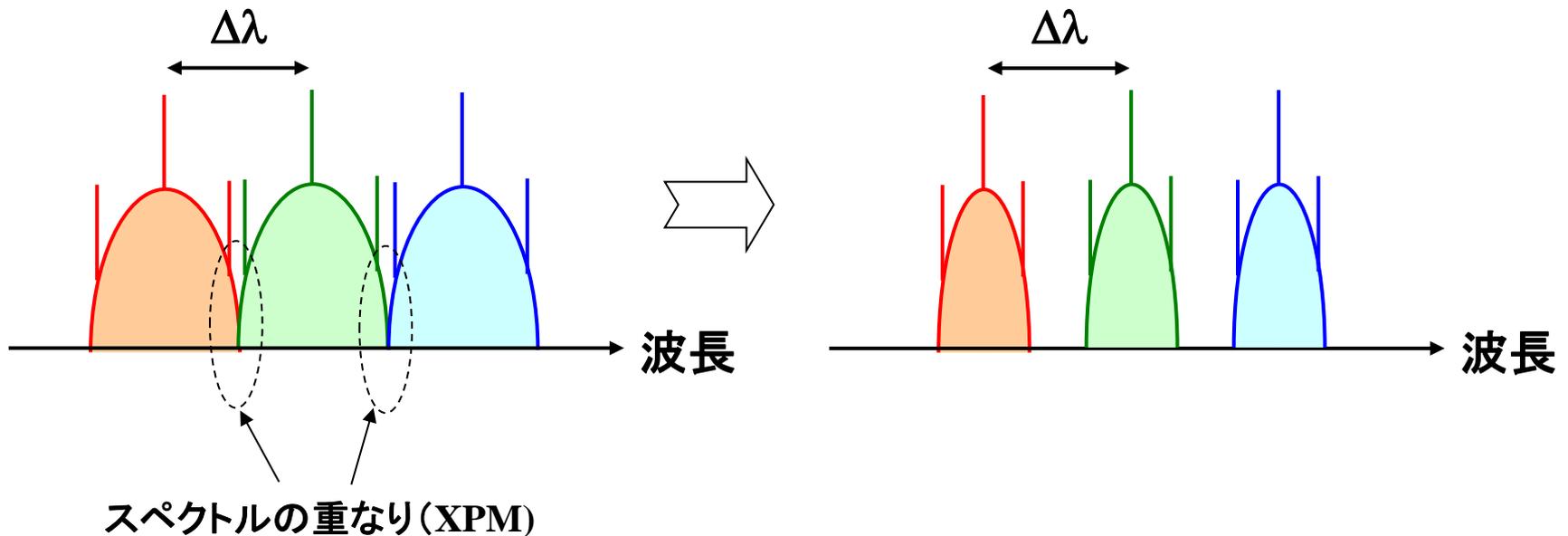
$\sigma_{sp,shot}^2, \sigma_{sp-sp}^2, \sigma_{th}^2$  : RZ = NRZ × 2 (帯域)

より、SNR(RZ) > SNR(NRZ)

## 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)



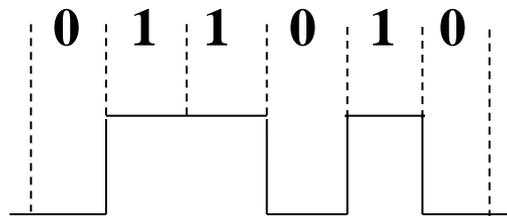
## 非線形耐力

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。

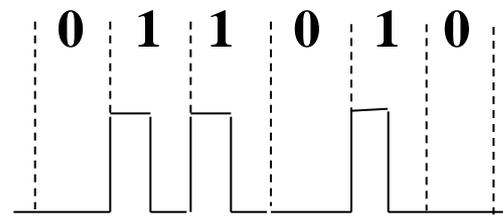
→ ・送信光平均パワーのなるべく小さな変調方式

(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

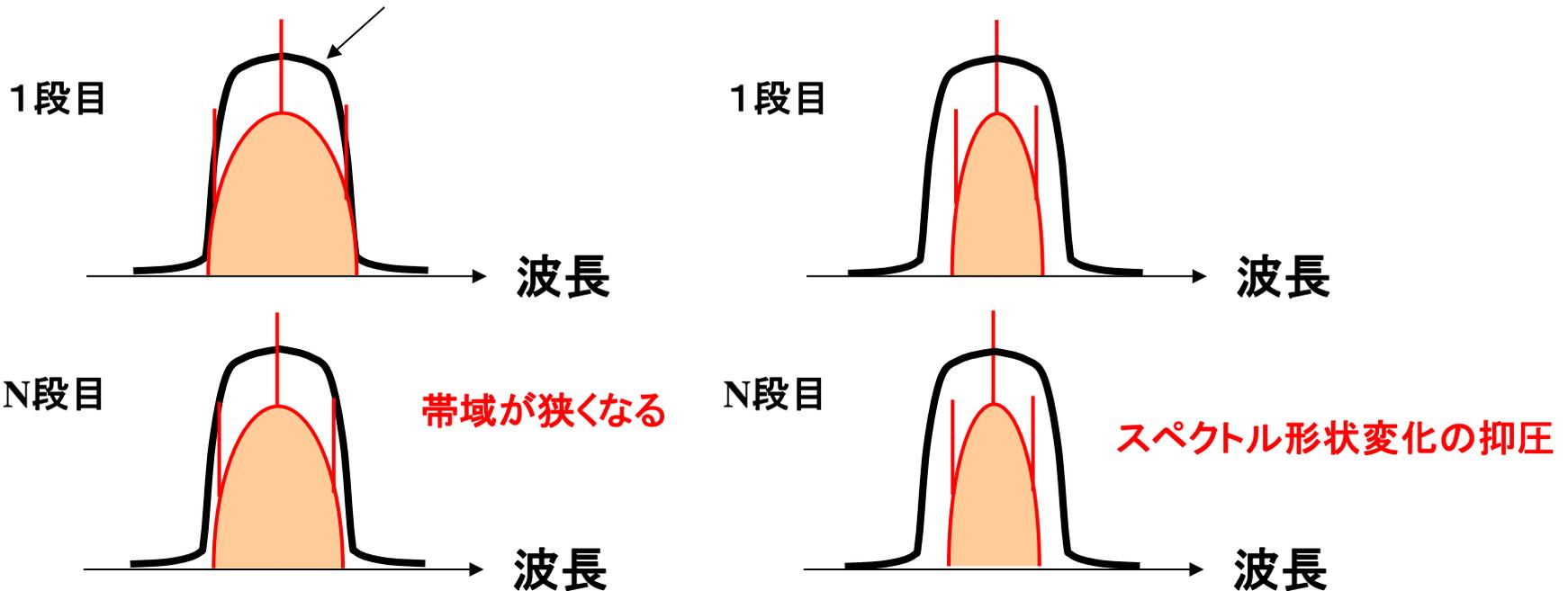
10Gbps NRZ

10Gbps RZ

## 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  
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



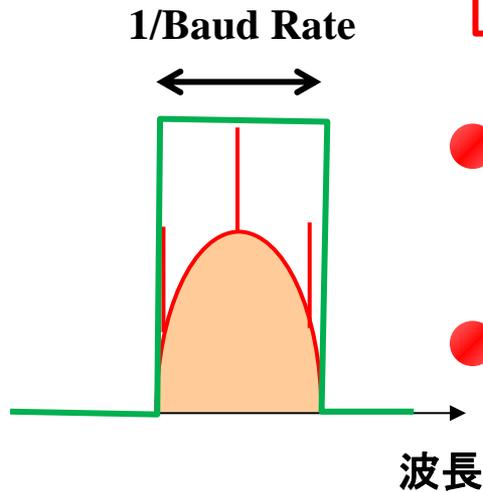
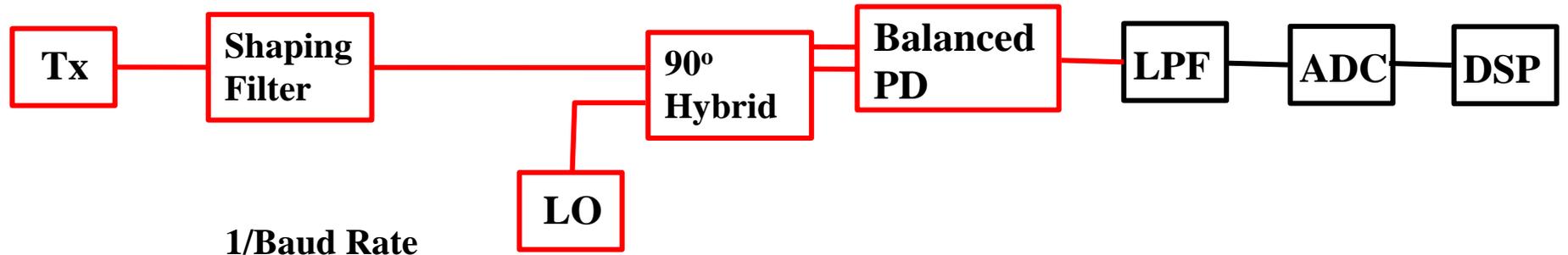
# 変復調方式の比較(40Gbps以上)

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        |

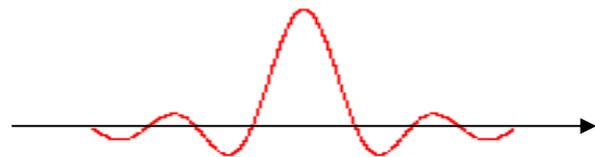
# 周波数利用効率の向上へ (ナイキストWDM)

G. Bosco, A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, E. Torrenco, and F. Forghieri, ECOC2010, Tu.3.A.4 (2010).



- チャンネル間の干渉を防ぐため、フィルタで帯域制限 (フィルタの帯域: ボー・レートの逆数, 急峻な透過特性)

- チャンネル間隔を1/ボーレートに設定



時間波形がsinc関数(シンボル間干渉: ISI)が低減可能