

# 光電子デバイス

## 第6回

# 本日の講義内容

---

## 1. 波形ひずみによる伝送距離制限

光源とそのスペクトル広がり

光ファイバの分散

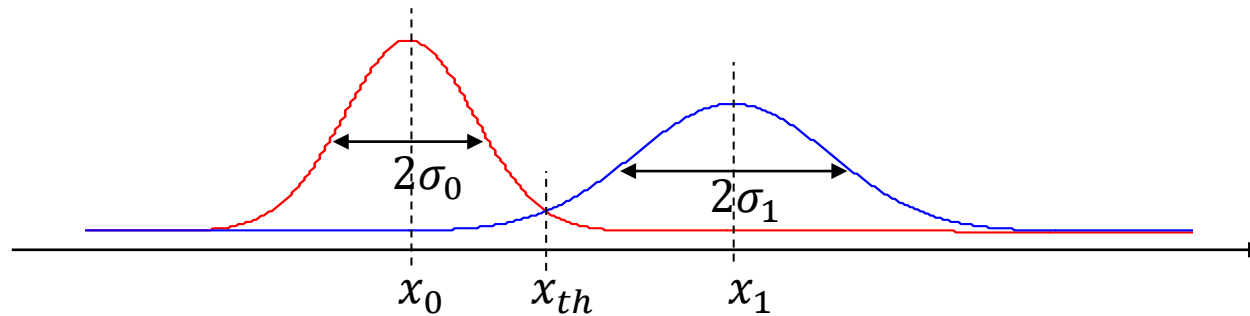
分散による最大伝送距離

## 2. 本日の演習問題

参考文献

「光通信」; 石尾; 丸善

# 符号誤り率(BER)



信号には伝送路、受信器において様々な雑音が重畳され、その強度はばらつきをもっている。雑音がGaussianの場合、“1”レベル、“0”レベルの確率分布は

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x - x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)$$

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_0^2}\right)$$

判定閾値が $x = x_{th}$ のとき、符号を誤って判定する確率は、“1”、“0”の割合が1:1とすると

$$BER = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{x_{th}} f_1(x) dx + \frac{1}{2} \int_{x_{th}}^{\infty} f_0(x) dx$$

で表される。

# Q値とは

誤り率が最小になるのは、 $x_{th}$ が二つのガウス分布の交点に設定された時である。

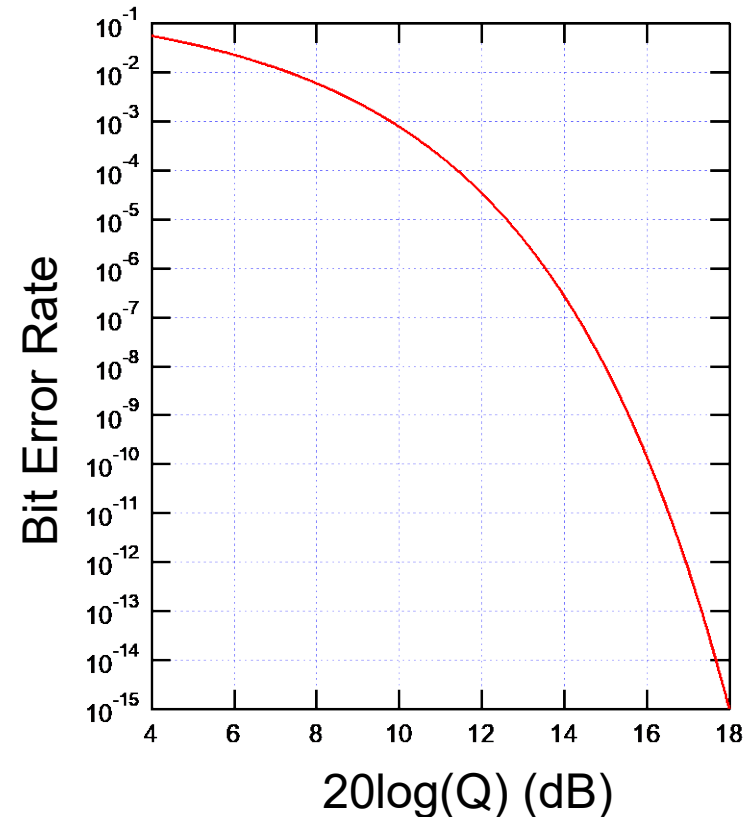
$$Q = \frac{x_1 - x_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

とおくと

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad : \text{補誤差関数}$$

とあらわされる。



光伝送システムの性能はBERまたはQ値を用いて評価される。

# 伝送路帯域と伝送速度の関係

シャノン (Shannon) の式

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

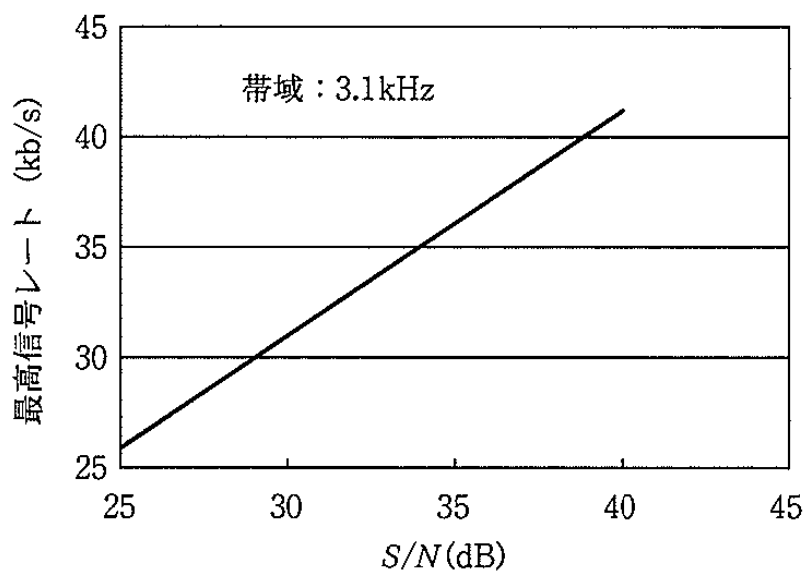
C: 最大伝送速度[b/s]

W: 伝送路帯域幅[Hz]

S: 信号電力

N: 雑音電力

(S/N): 信号対雑音電力比



# 群速度分散の単位

---

群速度分散 (GVD: Group Velocity Dispersion) を光通信分野では、波長分散とも呼ぶ

## 光ファイバの波長分散の単位 $D$

$$D \text{ [ps/nm/km]}$$

中心は波長が1nm 離れた2つの光パルスを1km伝搬させたとき、  
両パルス間の時間差が  $D$  となる光ファイバ

<例>

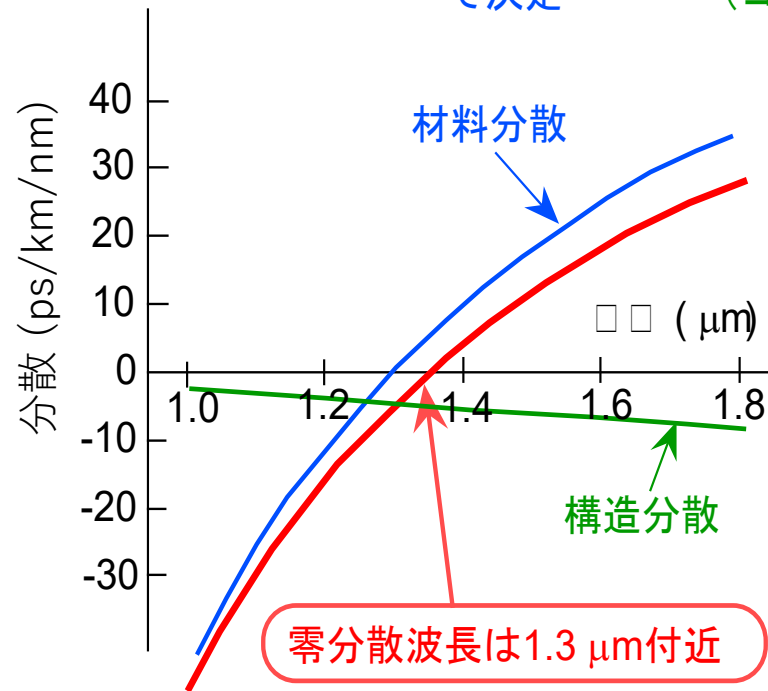
波長分散  $D$  が 10 ps/nm/km の光ファイバとは  
その光ファイバに、中心波長が 1nm 離れた光パルスが1km伝搬したとき、両  
パルス間の時間差が10psとなる。

# 単一モード光ファイバの分散特性

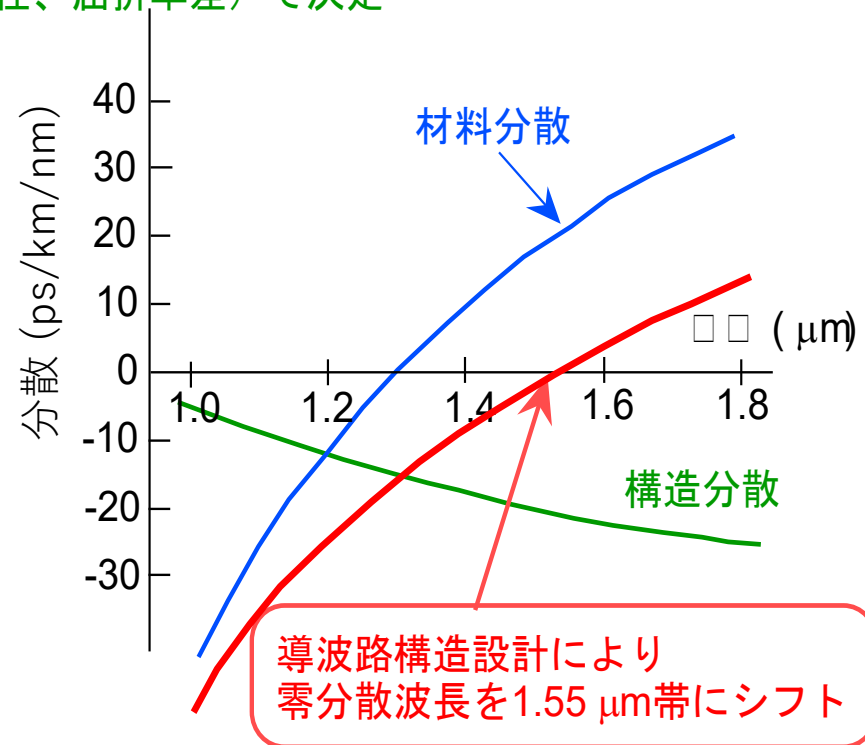
$$\text{全分散} = \text{材料分散} + \text{構造分散}$$

材料SiO<sub>2</sub>  
で決定

導波路構造  
(コア径、屈折率差) で決定



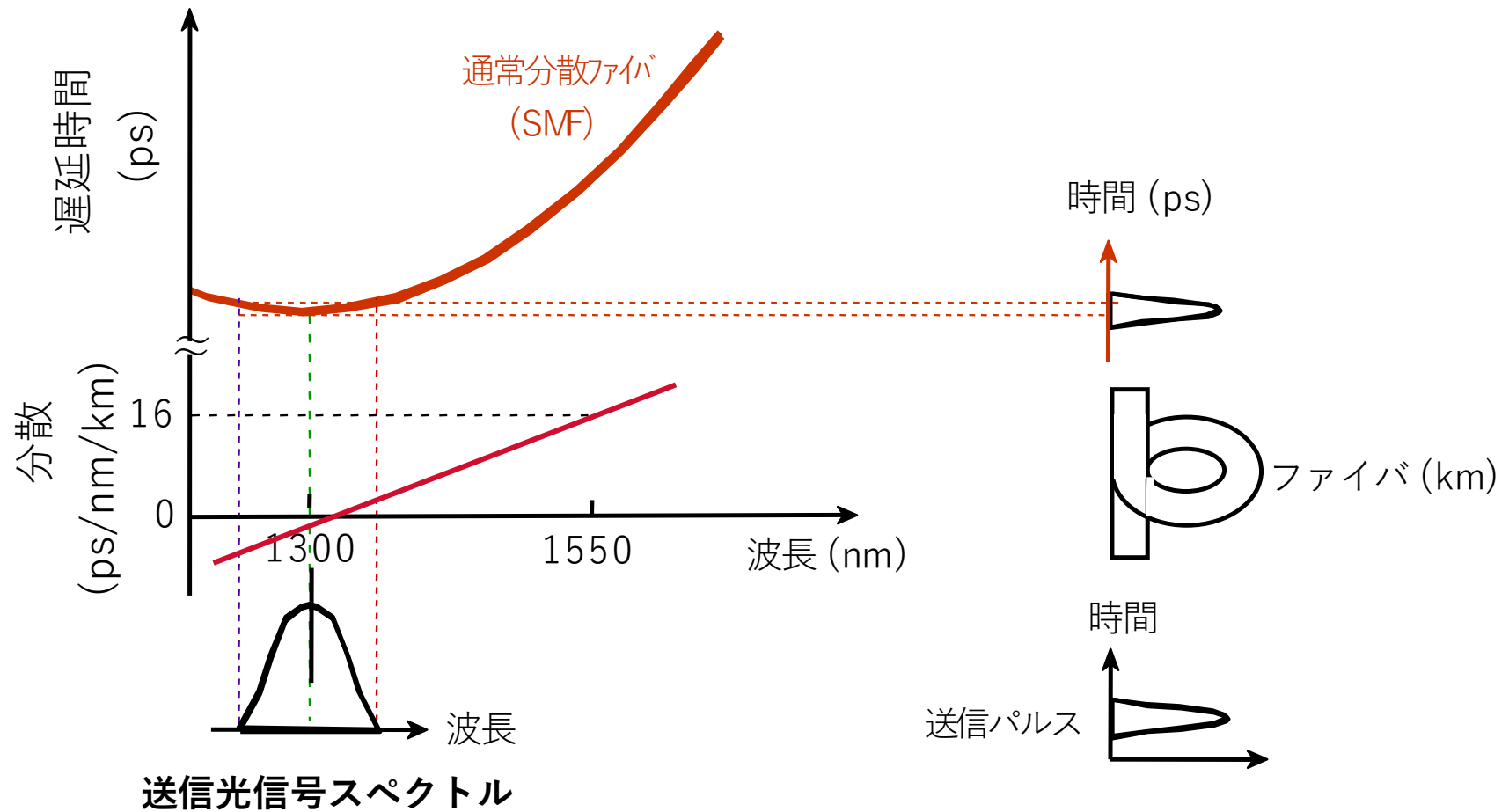
(a) 通常の単一モードファイバ  
(SMF: Single-Mode Fiber)



(b) 分散シフトファイバ  
(DSF: Dispersion-Shifted Fiber)

# 光ファイバの分散とは

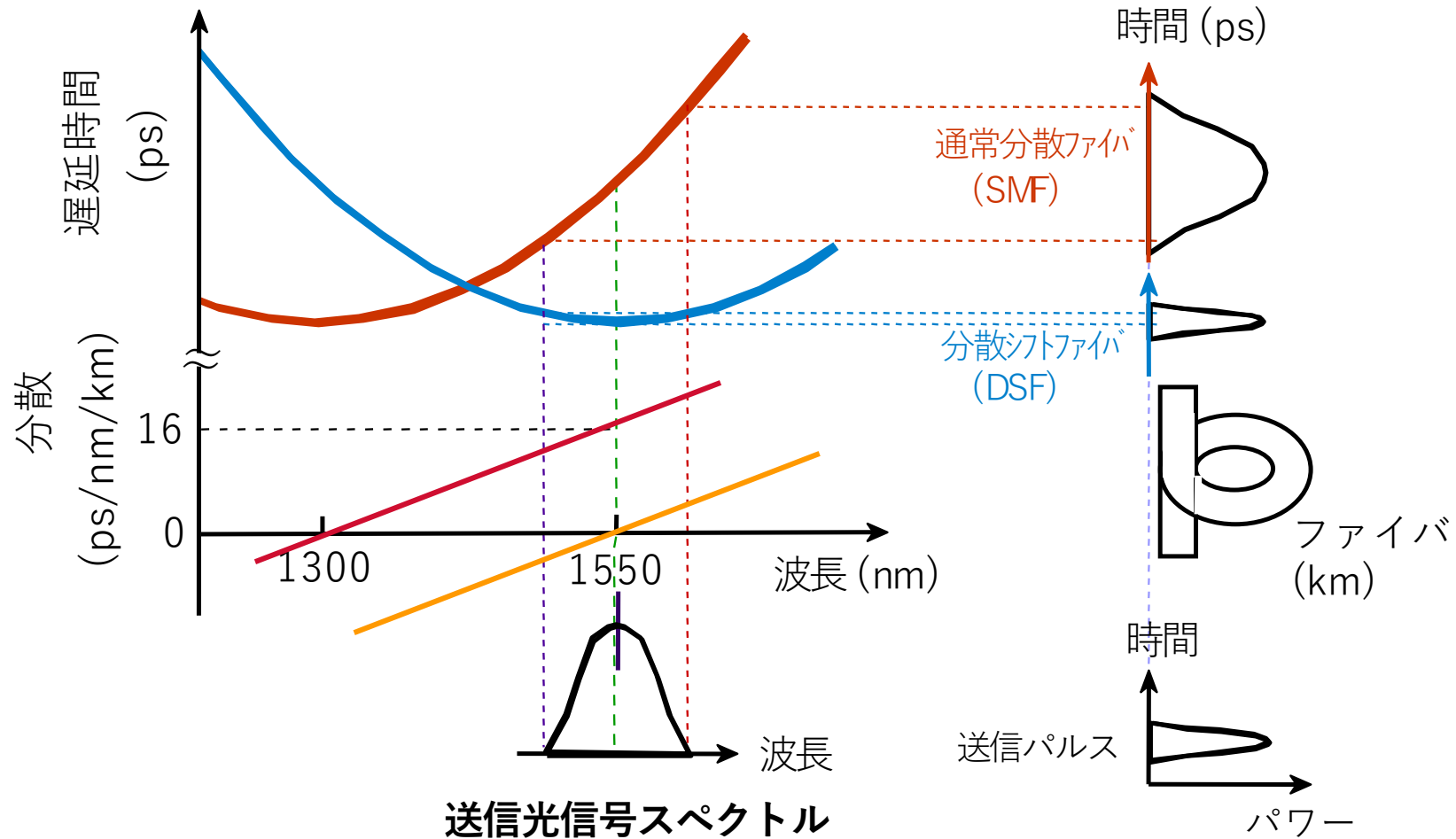
## 信号波長：1300 nm の場合





# 光ファイバの分散による光信号波形の歪み (3)

信号波長 : 1550 nm の場合



# 光源のスペクトル広がりを変調側帯波広がりより大きく広い場合の伝送可能距離

分散 $D$ 、長さ $l$ の光ファイバ伝搬後のパルス幅の広がり分

$$\Delta\tau \approx |D| \Delta\lambda l$$

波形広がり(左辺)がタイムスロット $T$ の25%(仮)以内であるという条件

$$|D| \Delta\lambda l \leq \frac{T}{4} \quad T = \frac{1}{f_c}$$

$$|D| \Delta\lambda l \leq \frac{10^3}{4 f_c}$$

$$l \leq \frac{10^3}{4 |D| \Delta\lambda f_c}$$

$D$  : 分散[ps/nm/km]

$\Delta\lambda$  : 光源のスペクトル幅[nm]

$f_c$  : 伝送速度[Gbit/s]

$l$  : 伝送距離[km]

$T$  : タイムスロット[ps]

# 光源のスペクトル広がりを変調側帯波広がりの場合の伝送可能距離

変調速度 $f_c$ のパルスの周波数広がり

$$\Delta f [\text{GHz}] \div a f_c [\text{Gbit/s}]$$

$a$ : 定数 (0.1~2程度、波形や変調方式等に依存)

周波数広がり $\Delta f$ のパルスの波長広がり $\Delta \lambda$

$$\Delta \lambda = \left( \frac{d\lambda}{df} \right) \Delta f = \left( -\frac{c}{f^2} \right) \Delta f = \left( -\frac{\lambda^2}{c} \right) \Delta f$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{より} \quad \frac{d\lambda}{df} = -\frac{c}{f^2} = -\frac{\lambda^2}{c}$$

波形広がりタイムスロットの  
25% (仮) 以内であるという条件

$$a \frac{c f_c |D| l}{f^2} \leq \frac{10^3}{4 f_c} \quad \text{又は} \quad a \frac{\lambda^2 f_c |D| l}{c} \leq \frac{10^3}{4 f_c}$$

$D$  : 分散[ps/nm/km]

$\Delta \lambda$  : 光源のスペクトル幅[nm]

$f_c$  : 変調速度[Gbit/s]

$l$  : 伝送距離[km]

$c$  : 光速[m/s]

$f$  : 光周波数[Hz]

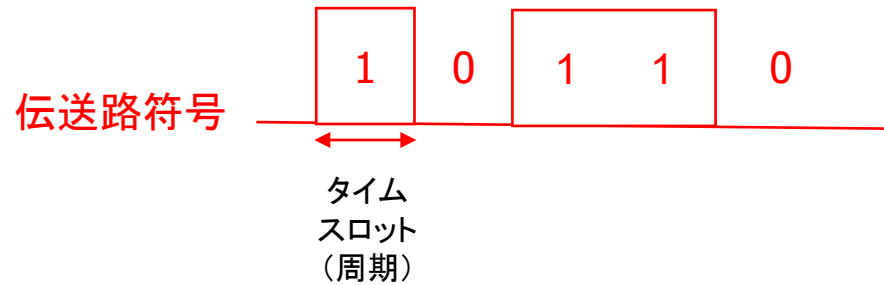
$a$  : 波形に依存した定数

$\lambda$  : 波長[nm]

$$l \leq \frac{10^3 c}{4 a \lambda^2 |D| f_c^2}$$

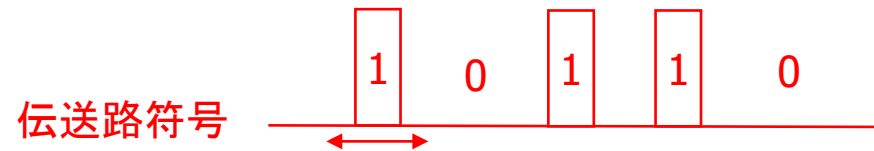
変調方式

NRZ  
(Non-return to zero)



$a = 1$

RZ  
(Return to zero)



$a = 2$   
(デューティ0.5の  
場合)

# 光電子デバイス 演習問題(5)

---

学籍番号 \_\_\_\_\_ 氏名 \_\_\_\_\_

1. 伝送路符号の速度が1Gb/sおよび10Gb/sのとき、パルス幅(NRZ)はそれぞれ何psとなるか(1psは $10^{-12}$ s)。
2. 1310nmの波長のFP-LDのスペクトル幅は波長で5nm程度の範囲の光を発光してしまう。このときにシングルモードファイバで40km伝送した場合、パルス幅はどの程度広がるか。シングルモードファイバの1310nm付近の波長分散は1ps/nm/kmとする。

---

3(1). 1550nmの波長のDFB-LDの光を理想的な強度変調器を用いて40Gbit/s でRZ変調(デューティ比50%)したときの、RZパルス幅[ps]とスペクトル幅[nm]を求めよ。これを1550nm付近で波長分散が2ps/nm/kmである零分散波長シフト型光ファイバを用いて40km伝送するときのパルスの広がりを求めよ。

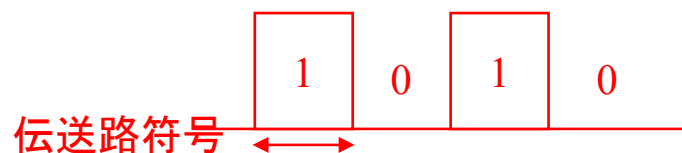
(デューティ比:タイムスロットに対するパルス幅の割合)

3(2). 上記の条件における分散制限距離を求めよ。ただし、分散制限距離は波形広がりがタイムスロットの4分の1以下であるという条件で与えられるとする。

1. 伝送路符号の速度が1Gb/sおよび10Gb/sのとき、パルス幅(NRZ)はそれぞれ何psとなるか (1psは $10^{-12}$ s)。  
(NRZ: Non Return to Zero)

$$\frac{1}{1 \times 10^9(\text{bit})} = 1 \times 10^{-9}(\text{s})$$

$$\frac{1}{1 \times 10^{10}(\text{bit})} = 1 \times 10^{-10}(\text{s})$$

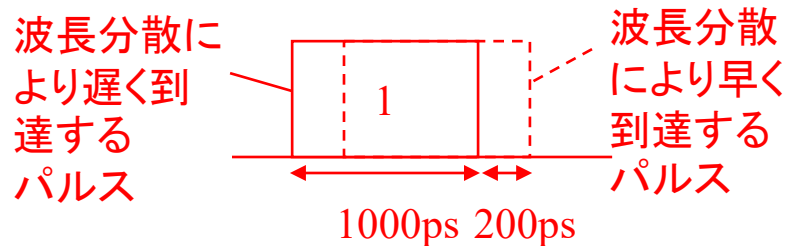


1Gb/sのとき、1000ps (1ns)

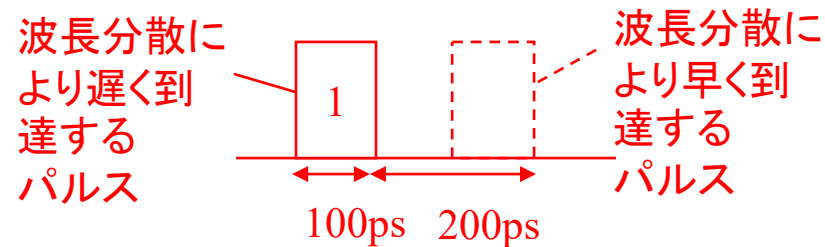
10Gb/sのとき 100ps

2. 1310nmの波長のFP-LDのスペクトル幅は波長で5nm程度の範囲の光を発光してしまう。このときにシングルモードファイバで40km伝送した場合、パルス幅はどの程度広がるか。シングルモードファイバの1310nm付近の波長分散は1ps/nm/kmとする。

$$5(\text{nm}) \times 40(\text{km}) \times 1(\text{ps/nm/km}) = 200(\text{ps}) \quad \text{よって元のパルスより約200ps広がる。}$$



(a) 1Gb/sの場合



(b) 10Gb/sの場合

3(1). 1550nmの波長のDFB-LDの光を理想的な強度変調器を用いて40Gbit/s でRZ変調したときの、RZパルス幅[ps]とスペクトル幅[nm]を求めよ。これを1550nm付近で波長分散が2ps/nm/kmである零分散波長シフト型光ファイバを用いて40km伝送するときのパルスの広がりを求めよ。

デューティ比0.5のRZパルスのパルス幅

$$\frac{0.5}{40 \times 10^9} = 0.125 \times 10^{-10} = 12.5 \text{ ps}$$

スペクトル広がり( $a=1$ とする)

$$\frac{a(=1)}{12.5 \times 10^{-12}(\text{s})} = 80 \times 10^9 = 80 \text{ GHz}$$

スペクトル広がりを波長広がりに変換

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \left| \left( \frac{d\lambda}{df} \right) \Delta f \right| = \left| \left( -\frac{c}{f^2} \right) \Delta f \right| = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f \\ &= \frac{(1550 \times 10^{-9} [\text{m}])^2}{3 \times 10^8 [\text{m/s}]} \times 80 \times 10^9 [\text{Hz}] = \frac{1.55^2 \times 8}{3} \times 10^{-10} [\text{m}] \\ &= 6.4 \times 10^{-10} [\text{m}] = 0.64 \text{ nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\tau &\approx |D| \Delta\lambda l \\ &= 2 [\text{ps} / \text{nm} / \text{km}] \cdot 0.64 [\text{nm}] \cdot 40 [\text{km}] \\ &= 51.2 \text{ ps} \end{aligned}$$

3(2). 上記の条件における分散制限距離を求めよ。ただし、分散制限距離は波形広がりがタイムスロットの4分の1以下であるという条件で与えられるとする。

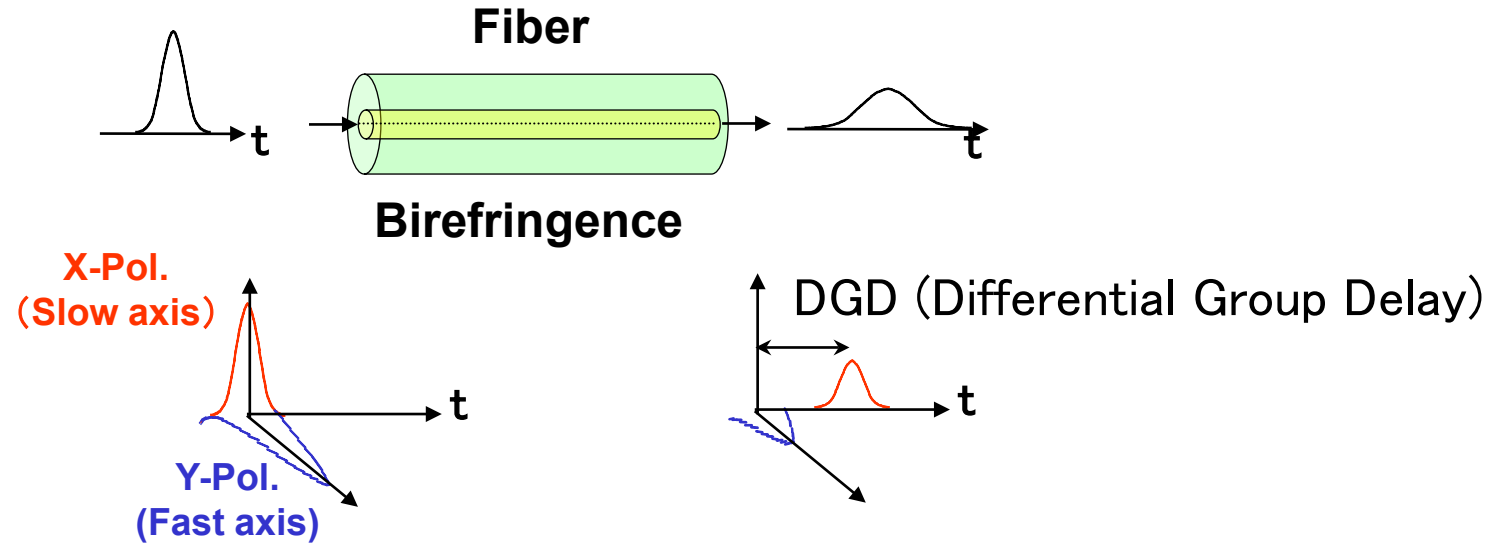
$$\Delta\tau \approx |D| \Delta\lambda l \leq \frac{25(\text{タイムスロット})[\text{ps}]}{4}$$

$$l_{\text{max}} = \frac{25}{4 |D| \Delta\lambda} = 4.9 \text{ km}$$

通常基幹伝送系では、逆分散を与える素子を受信前に挿入(分散補償という)し分散を補償することにより、300km以上の伝送を可能にしている。



# 偏波モード分散とは(1)



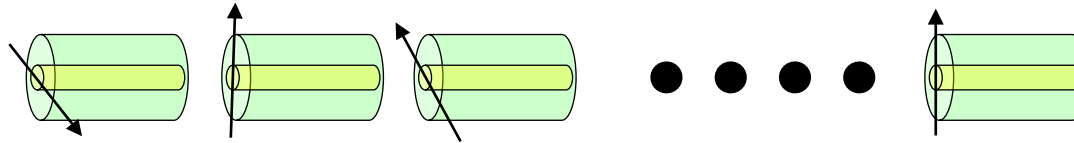
シングルモードファイバでも製造時の誤差や敷設環境における攪乱によりコアの断面が真円からわずかにひずむ



群速度の異なる2つのモードが生じる(**モード複屈折**)ため、伝搬後の光パルスの時間波形に広がりが生じる。

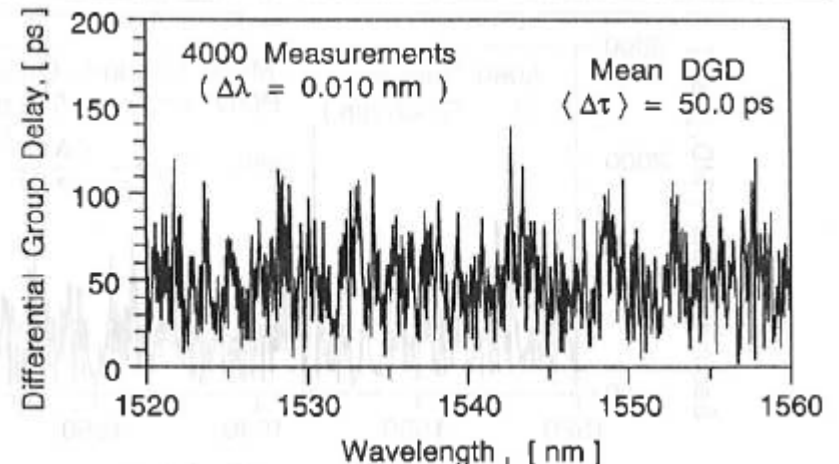
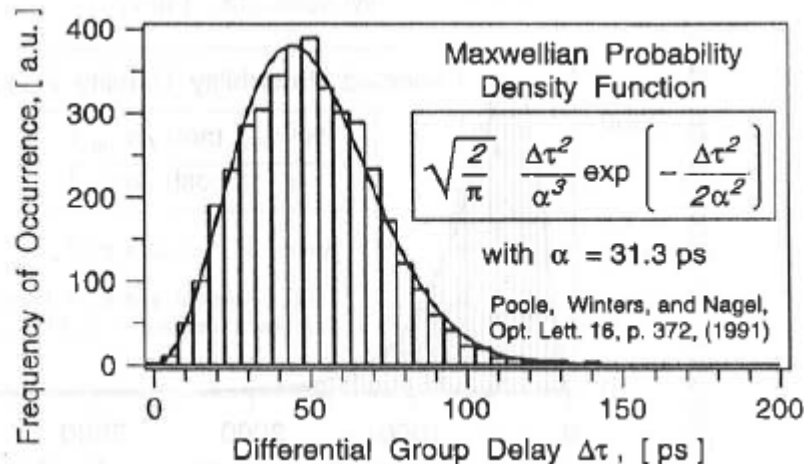
モード複屈折によって生じる伝搬遅延差を**偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)**という。

# 偏波モード分散とは(2)



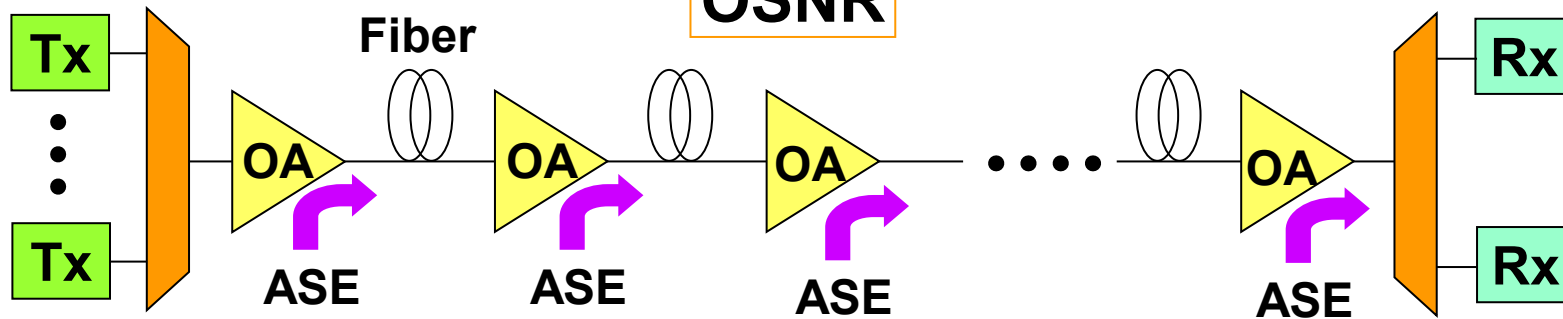
長尺の光ファイバは、複屈折ファイバがランダムな角度でカスケード接続された状態と考えることができる。

→PMDは確率的に変化する量となりMaxwell分布に従う。Maxwell分布の平均値を距離でノーマライズした値をPMD係数という(単位: psec/ $\sqrt{\text{km}}$ )。



# 高速化・長距離化に向けた制限要因

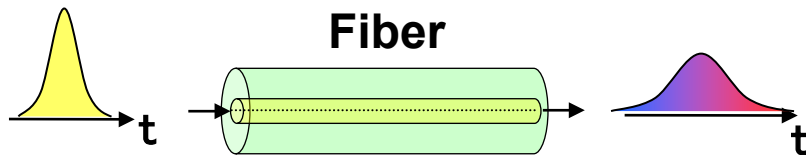
**OSNR**



**Required OSNR  $\propto B$**

**CD**

Fiber

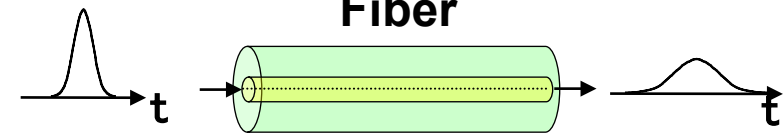


**CD  $\Rightarrow$  Higher freq.: Fast  
Lower freq.: Slow**

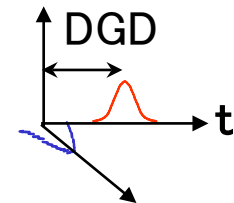
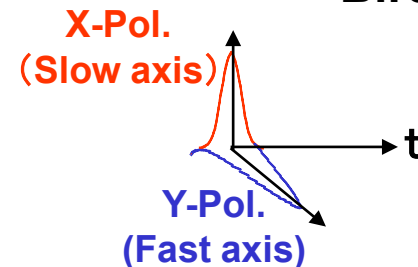
**Allowable CD  $\propto B^{-2}$**

**PMD**

Fiber



**Birefringence**



**Allowable DGD  $\propto T_s$**

OSNR: Optical Signal-to-Noise Ratio, ASE: Amplified Spontaneous Emission,  
CD: Chromatic Dispersion, PMD: Polarization Mode Dispersion, DGD: Differential Group Delay.

# 非線形光学効果の影響

## 光Kerr効果

光ファイバの3次の光非線形感受率により, 光ファイバの屈折率が光パワーに比例して変化する現象.



## SPM (Self-Phase Modulation)

- 自分自身の光強度変化による位相変調.
- 波長分散との相互作用により波形歪となる.

## XPM (Cross-Phase Modulation)

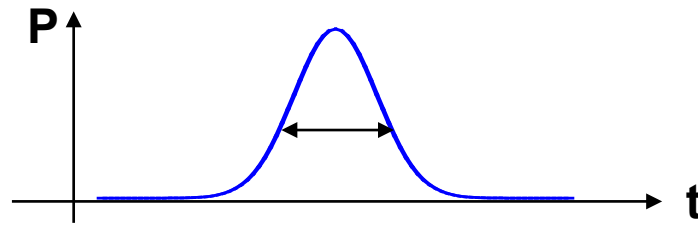
- 他の波長チャネルの光強度変化による位相変調.
- 波長分散との相互作用により波形歪となる.
- 波長分散, 波長間隔が小さいほど影響が大きい.

## FWM (Four-Wave Mixing)

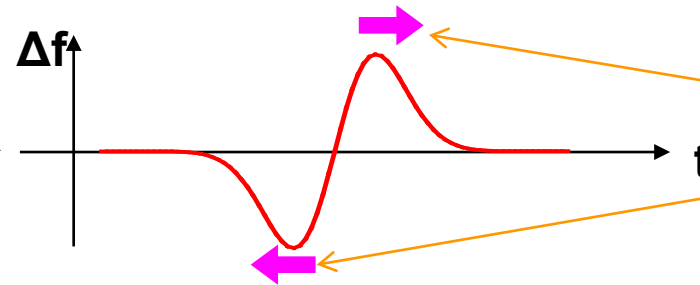
- 2波以上の波長チャネル間のビートにより別の波長の光信号が生成される.
- クロストークとなる.
- 波長分散, 波長間隔が小さいほど影響が大きい.

# SPMと波長分散の相互作用による光パルス波形の変化

伝送前  
光波形

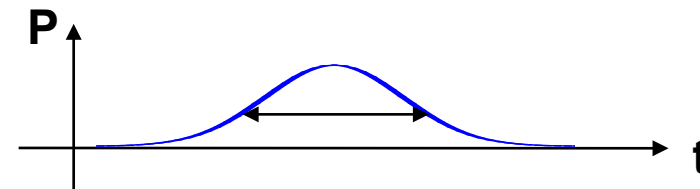


SPMによる  
周波数チャープング

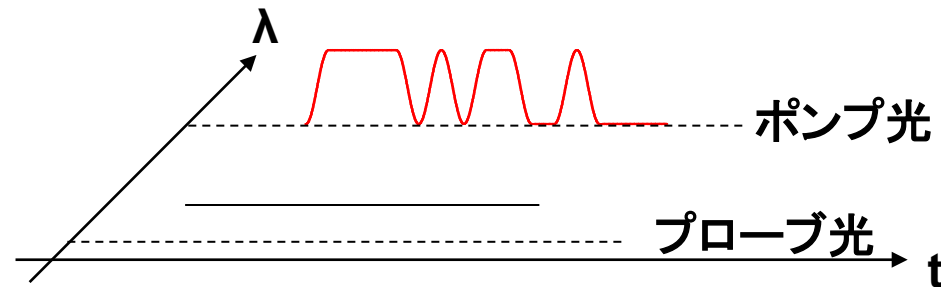


波長分散により  
伝搬速度が異なる

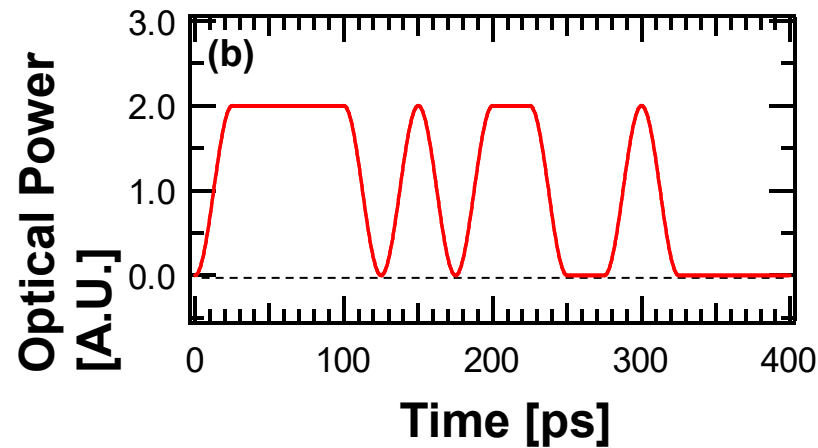
伝送後  
光波形



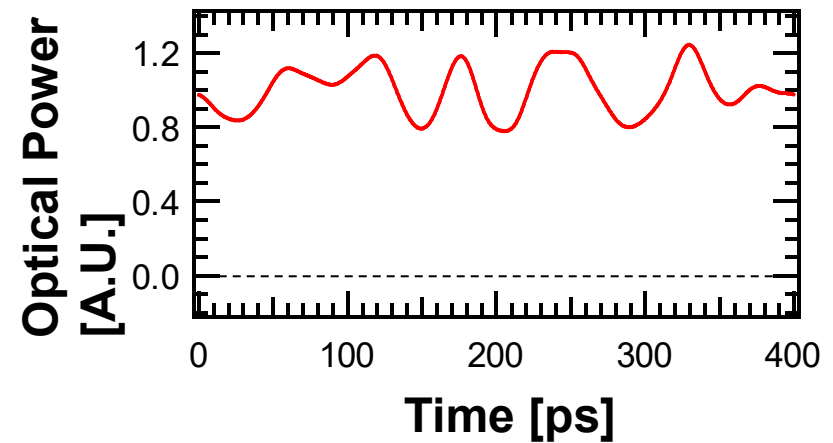
# XPMによる光波形の変化の例



ポンプ光の伝送前光波形



プローブ光の伝送後光波形



XPMと波長分散の相互作用により伝送後の波形に強度変化が生じる

# 四光波混合によるクロストークの発生

- 四光波混合 (FWM : Four-Wave Mixing)

複数の波長の光電界の相互作用により、新たな光が発生する。

この作用を四光波混合、新たに発生する光を四光波混合光と言う

- 光のパワーが大きいほど発生しやすい (光非線形効果)。

- 位相整合条件 (波長分散が小さい領域で発生しやすい)。

四波混合による発生光の光周波数

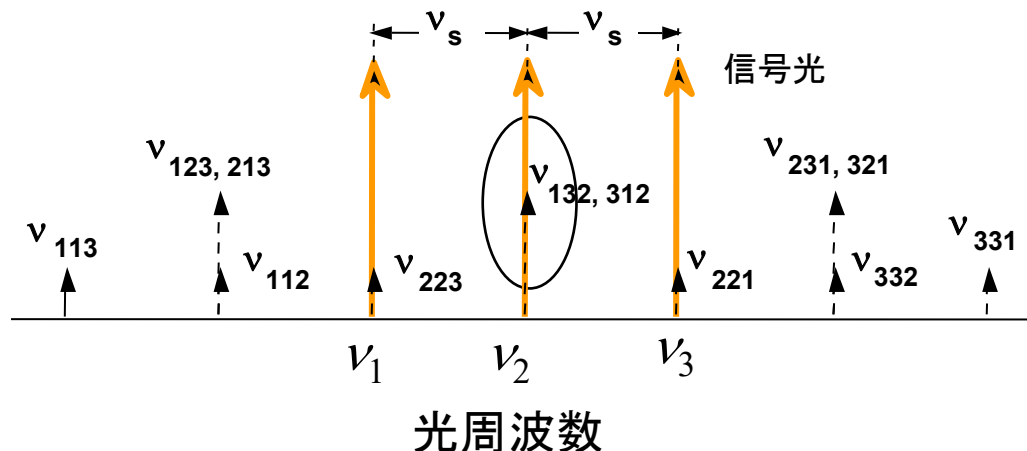
$$\nu_{ijk} = \nu_i + \nu_j - \nu_k$$



等間隔で配置した場合、FWM光と各信号光が重なり、クロストーク(漏話)が生じる

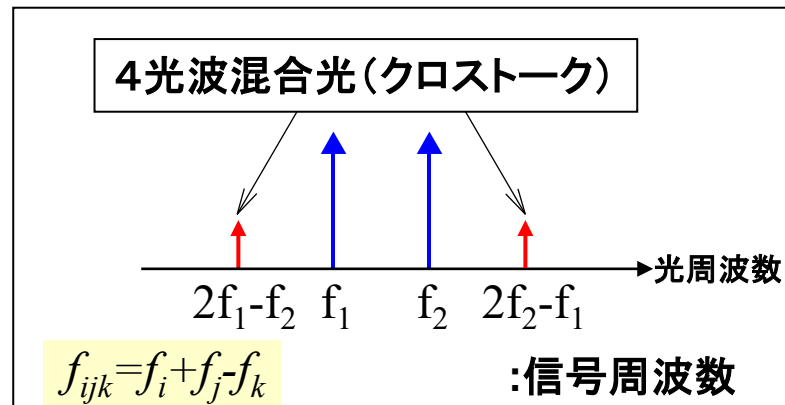


符号誤り率の増加



WDM伝送における伝送容量制限要因となる

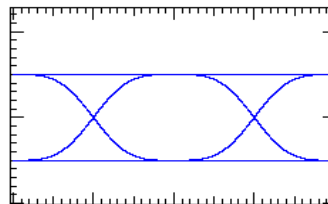
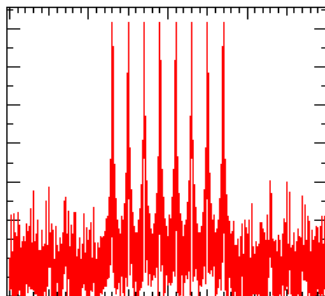
# 四光波混合によるクロストークの発生



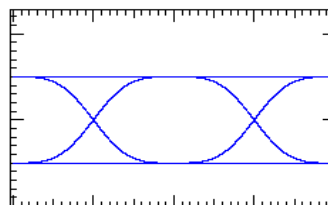
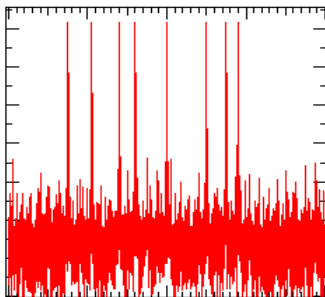
送信光信号

Cバンド  
等間隔

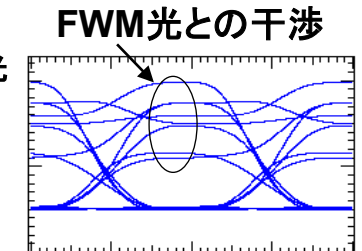
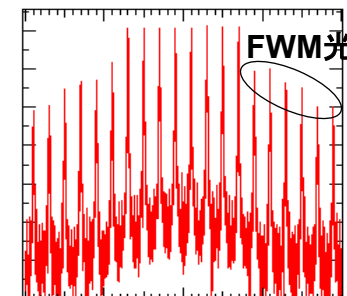
光パワ (20 dB/div) 光パワ (20 dB/div)



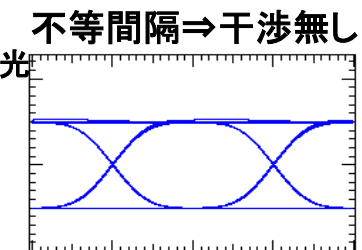
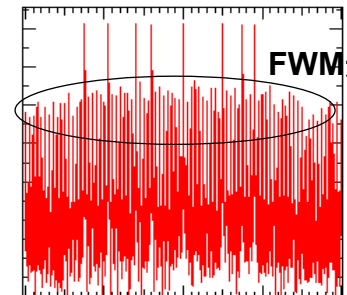
Cバンド  
不等間隔



受信光信号



FWMペナルティ発生!



FWMペナルティ無し!



# 光ファイバ中での光信号の非線形伝搬

光ファイバ中の信号(電界: $A$ )の伝搬は下記の非線形シュレディンガー方程式により記述される:

$$\underbrace{\frac{\partial A}{\partial z}}_{\text{損失}} + \underbrace{\frac{\alpha}{2} A}_{\text{波長分散}} + \underbrace{\frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}}_{\text{非線形効果}} = j\gamma |A|^2 A$$

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad D: \text{波長分散}$$

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} \quad n_2: \text{非線形屈折率}, A_{\text{eff}}: \text{有効断面積}$$

長距離光伝送システムの設計では、上式に基づき数値シミュレーションにより光信号伝搬の解析を行い、光レベルダイヤグラムを決定する。

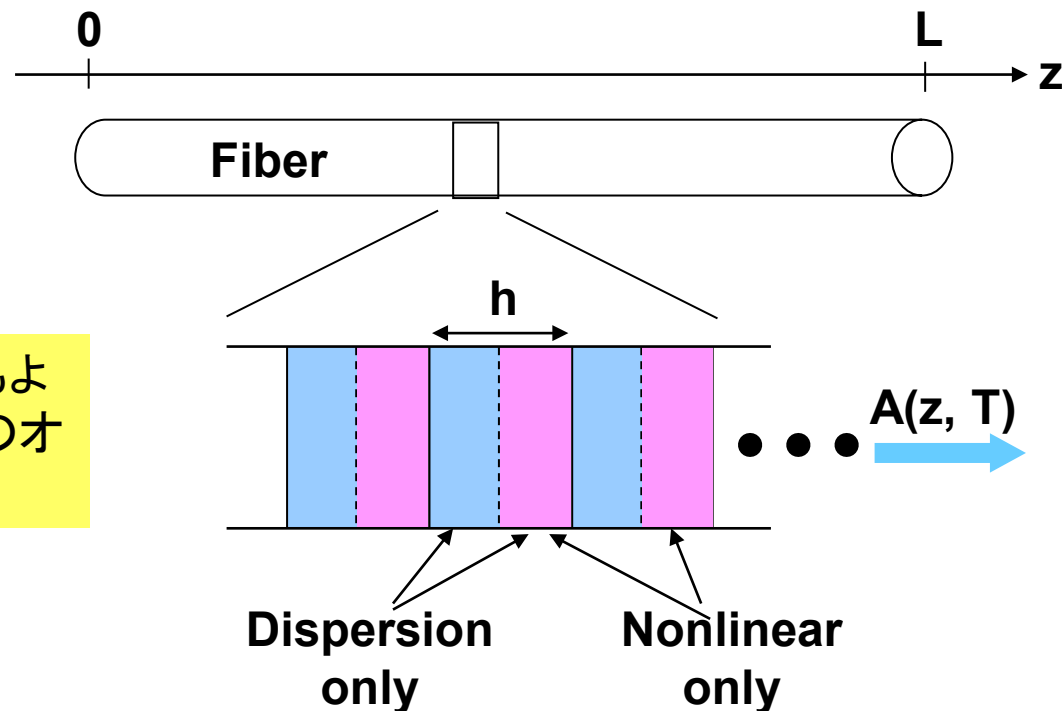
# Split-Step-Fourier法による光信号伝送シミュレーション

非線形シュレディンガー方程式の数値解法では、Split-Step Fourier法 (SFF法) が用いられる。

SFFでは、光ファイバを微小な区間 (step:  $h$ ) に区切り、1ステップ内で

線形分散 & 損失のみの区間 → 非線形位相変化のみの区間

を伝搬すると仮定して、入力端から各ステップごとに逐次的に波形変化を計算する。

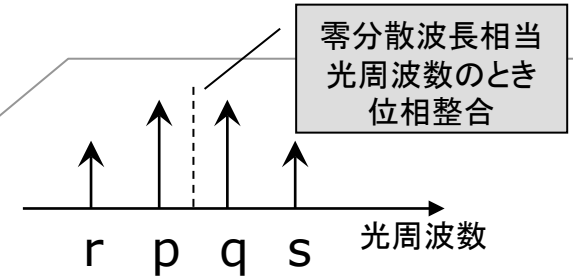


ステップ  $h$  は光パワーにもよるが数100メートル以下のオーダーとする必要がある

# 非線形劣化要因

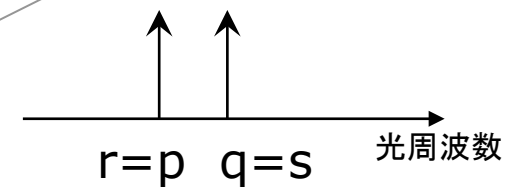
## □ 四光波混合 (FWM : Four-Wave Mixing)

- 位相整合条件充足で発生
- 零分散波長帯で多重するDWDMで波長チャネル間干渉



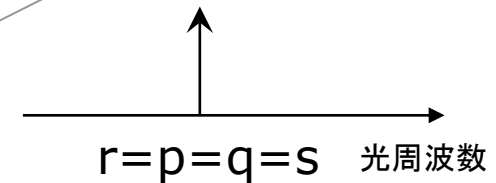
## □ 相互位相変調 (XPM: Cross-Phase Modulation)

- 位相整合条件自動充足
- 低分散領域で波長チャネル間干渉



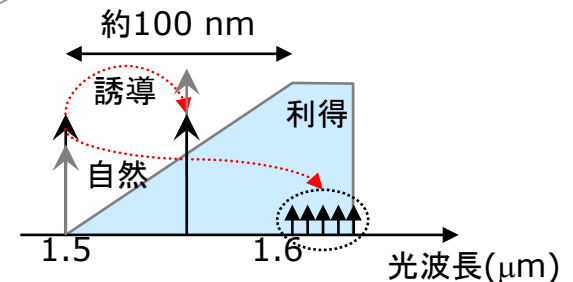
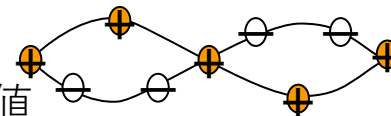
## □ 自己位相変調 (SPM: Self-Phase Modulation)

- 位相整合条件自動充足 (= TDMでも発生)
- 強度依存性チャープ (スペクトル広がり)



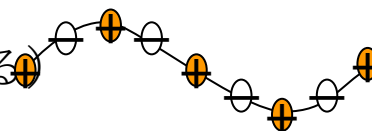
## □ ラマン散乱

- 自然ラマンでは1W/ch.がしきい値
- 誘導ラマンは、長波長ch.を短波長ch.が増幅する音響学的モード

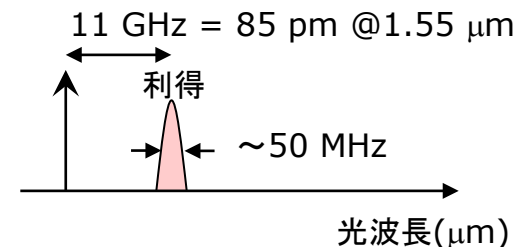


## □ ブリリュアン散乱

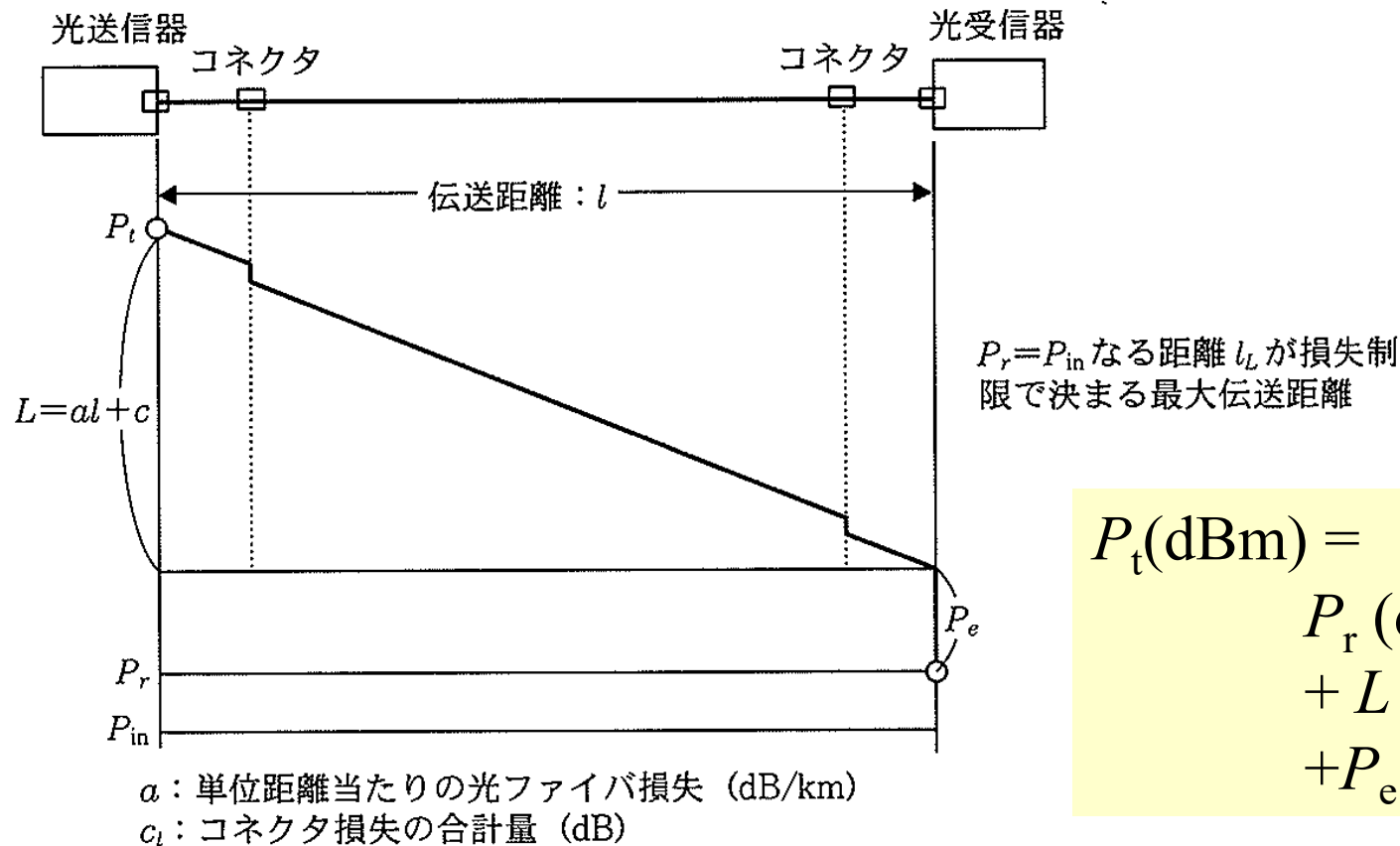
- 数W以上で逆方向に散乱 (逆進する)
- 光周波数微少変調にて対策



音響学的モード



# 光伝送系のレベル(光パワー)ダイアグラム例



$$P_t(\text{dBm}) = P_r(\text{dBm}) + L(\text{dB}) + P_e(\text{dB})$$

$P_t(\text{dBm})$ : 送信光出力パワー、 $P_r(\text{dBm})$ : 受信光パワー

$L(\text{dB})$ : 伝送路損失

(光ファイバ損[単位長当たりの損失×距離]、接続損失、コネクタ損失の和)

$P_e(\text{dB})$ : パワーペナルティ(波形歪による符号間干渉等による劣化パワー換算) 28

# 光電子デバイス 演習問題(6-1)

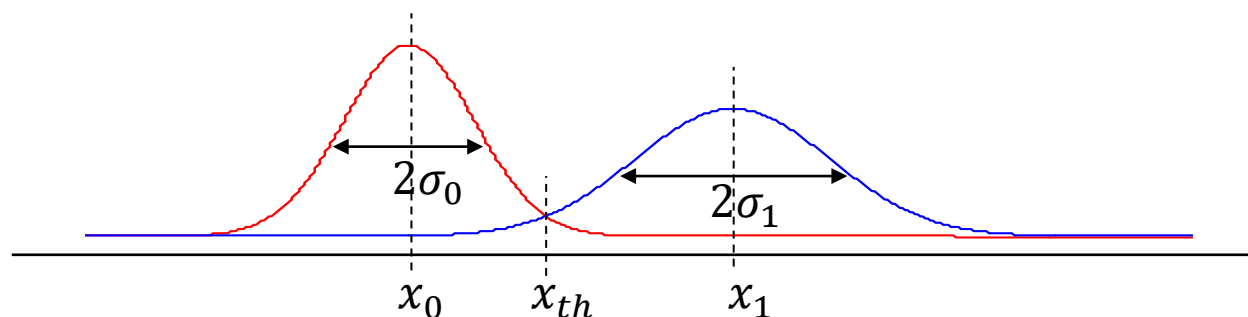


図1

1. 信号の強度が図1のようにばらつきをもち、雑音特性がGaussianで表せる場合、“1”レベル、“0”レベルの確率分布の式を示せ。

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \boxed{\phantom{e^{-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_1^2}}}}$$
$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \boxed{\phantom{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_0^2}}}}$$

2. 判定閾値が $x = x_{th}$ のとき、符号を誤って判定する確率(BER)の式を示せ。ただし、“1”、“0”の割合は1:1とする。

$$BER = \boxed{\phantom{\frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x_{th} - x_0}{\sigma_0} \right) + 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x_{th} - x_1}{\sigma_1} \right) \right]}}$$

# 光電子デバイス 演習問題(6-1)

---

3. 図1のように、"1"レベル、"0"レベルの確率分布のピーク値をそれぞれ $x_1, x_0$ として、  
"1"レベル、"0"レベルの確率分布の標準偏差をそれぞれ $\sigma_1, \sigma_0$ とする。  
 $x_1 = 4.0, x_0 = 1.0, \sigma_1 = 0.30, \sigma_0 = 0.20$ のとき、Q値を求めよ。

$Q =$

# 光電子デバイス 演習問題(6-2)

---

学籍番号 \_\_\_\_\_ 氏名 \_\_\_\_\_

1. 次の同軸ケーブル伝送システムの伝送距離を求めよ。

- ・送信電圧が1V、受信感度が4mV
- ・ケーブル損失が20dB/km
- ・符号間干渉による感度劣化(パワーペナルティ)が2dB
- ・接続点損失は無し

ただし、 $\log_{10}4 = 0.60$  とせよ。

# 光電子デバイス 演習問題(6-2)

---

2. 次の光ファイバケーブル伝送システムの伝送距離を求めよ。

- ・送信光パワーが+2 dBm、受信感度は-27dBm
- ・ケーブル損失が0.2dB/km
- ・波長分散による感度劣化(パワーペナルティ)が2 dB
- ・コネクタ接続4箇所(1箇所当たり0.5dBの損失とする)
- ・融着接続10箇所(1箇所当たり0.1dBの損失とする)

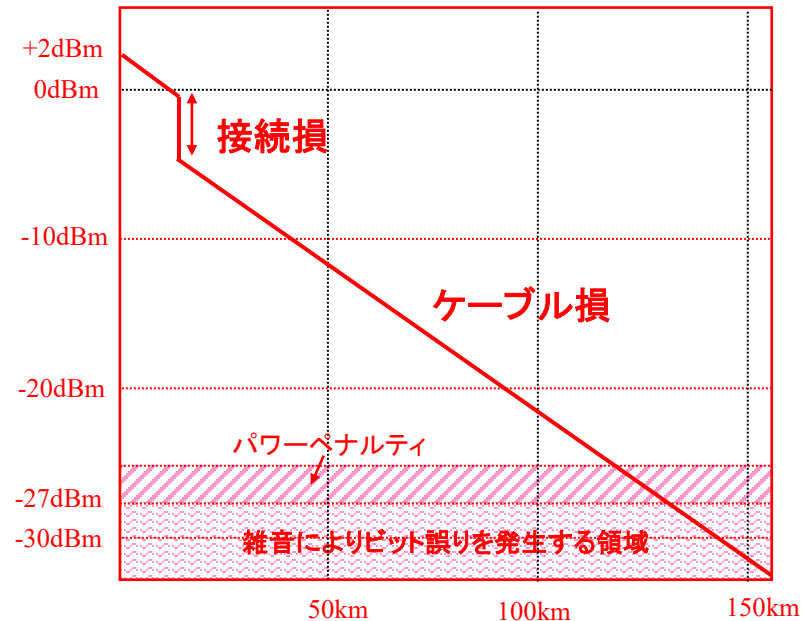


# ヒント

2. 次の光ファイバケーブル伝送システムの伝送距離を求めよ。

- ・送信光パワーが+2 Bm 、受信感度は-27dBm
- ・ケーブル損失が0.2dB/km
- ・波長分散による感度劣化(パワーペナルティ)が2 dB
- ・コネクタ接続4箇所(1箇所当たり0.5dBの損失とする)
- ・融着接続10箇所( 1箇所当たり0.1dBの損失とする)

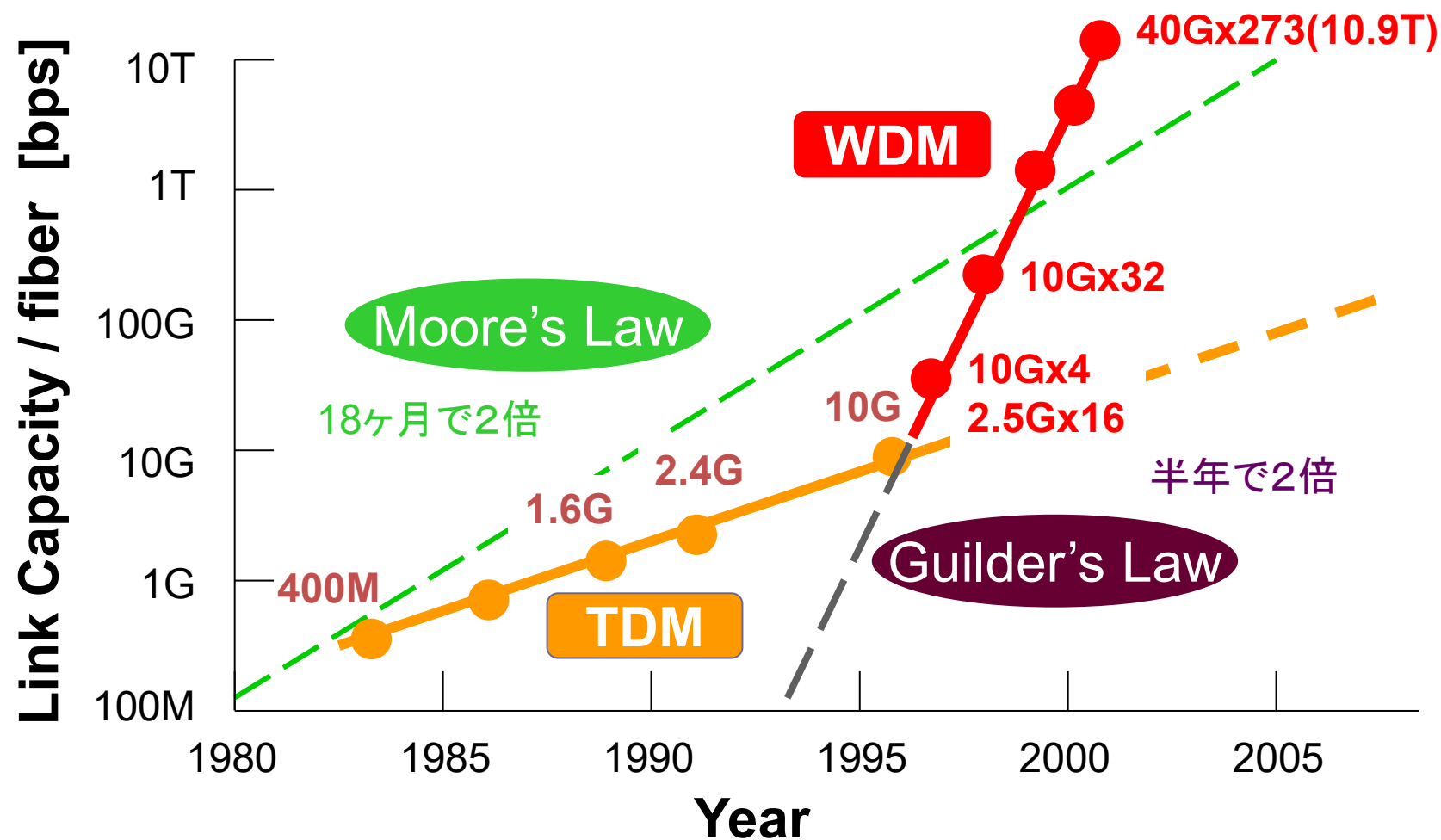
$$\begin{array}{ccccccc} & \text{コネクタ接続損失} & & \text{コネクタ融着損失} & & \text{ケーブル損失} & & \text{パワーペナルティ} \\ +2 \text{ (dBm)} & - & \boxed{\phantom{000}} & - & \boxed{\phantom{000}} & - & \boxed{\phantom{000}} & - & \boxed{\phantom{000}} = -27 \text{ (dBm)} \end{array}$$



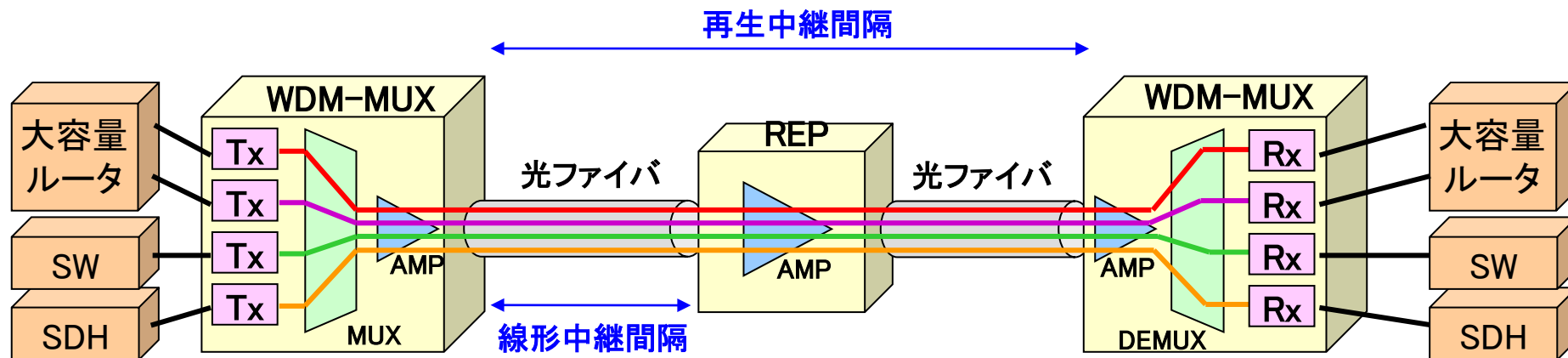
---

# 光增幅器

# 光ファイバ伝送性能の進展



# WDM伝送システムの基本構成



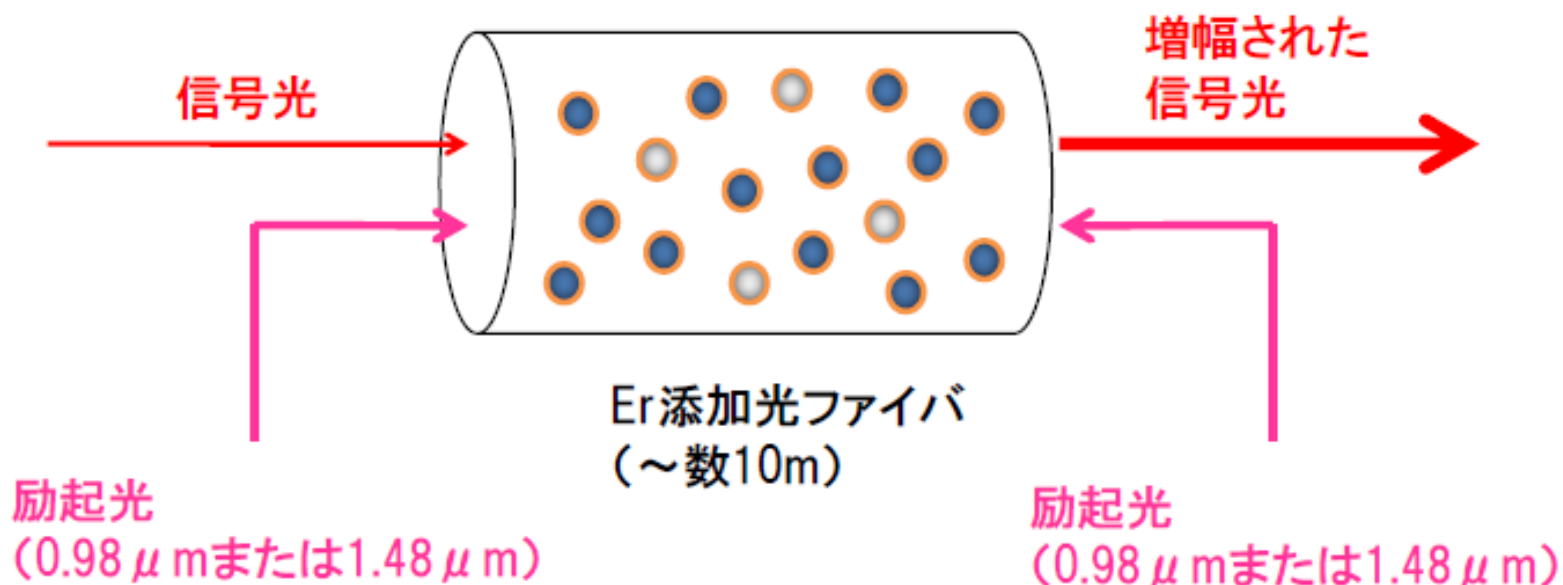
低コストWDM伝送の実現



- ・伝送速度の高速化
- ・伝送距離の長距離化
- ・伝送容量の大容量化

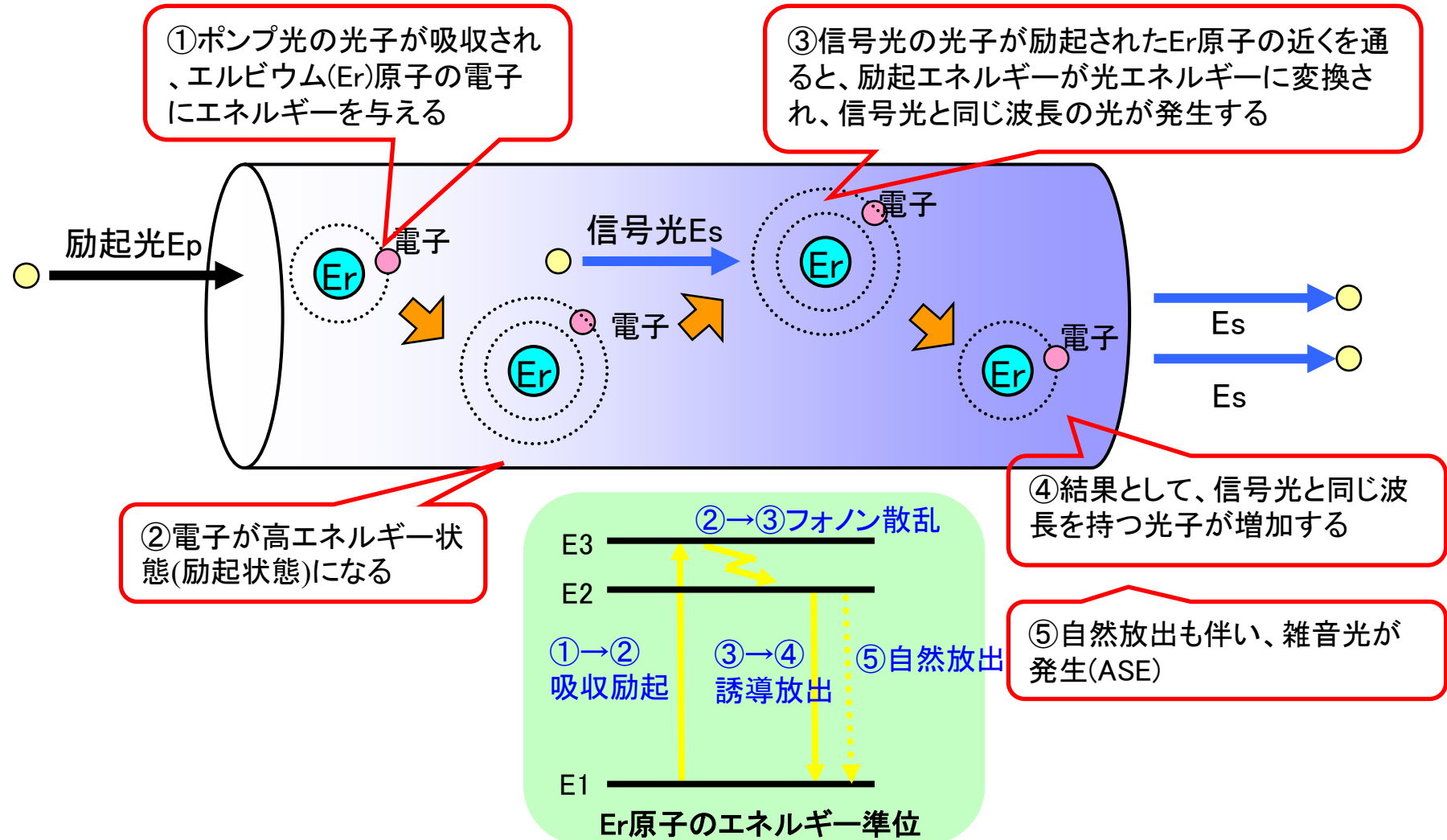
# 光ファイバアンプ

光ファイバにErなどの希土類元素を添加し、光励起により形成した反転分布からの誘導放出により、光信号を増幅する  
(EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)



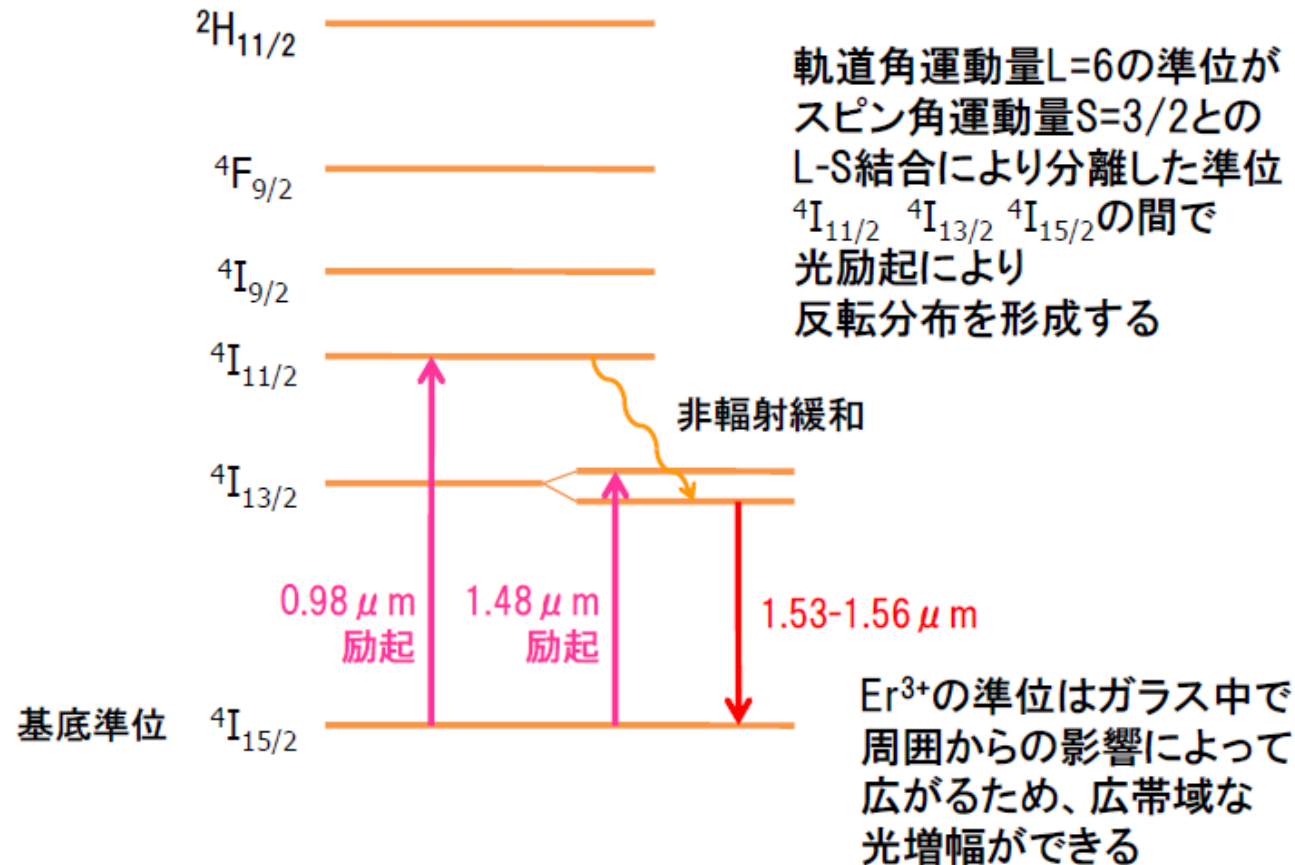
光ファイバ増幅器は、高利得(～30dB), 高出力(～+15dBm), 広帯域(～35nm), 低雑音, 偏光無依存、などの特徴がある

# 光ファイバ増幅器における光増幅の原理



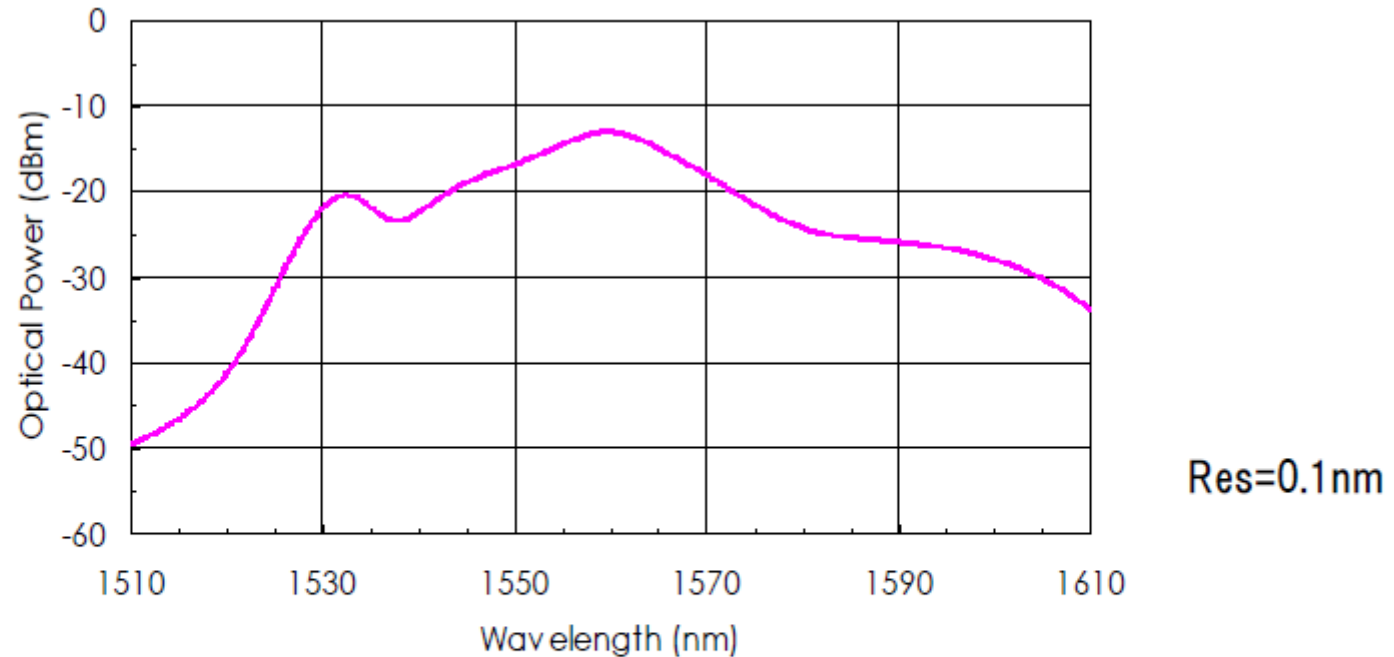
# 光ファイバ増幅器(EDFA)の励起波長

## Er<sup>3+</sup>イオンのエネルギー準位図



- 0.98  $\mu m$ 励起: 理想的な反転分布が得られる
- 1.48  $\mu m$ 励起: 反転分布が不完全となり、基底準位にもイオンが残るため、0.98  $\mu m$ 励起に比べて雑音特性がやや劣化する

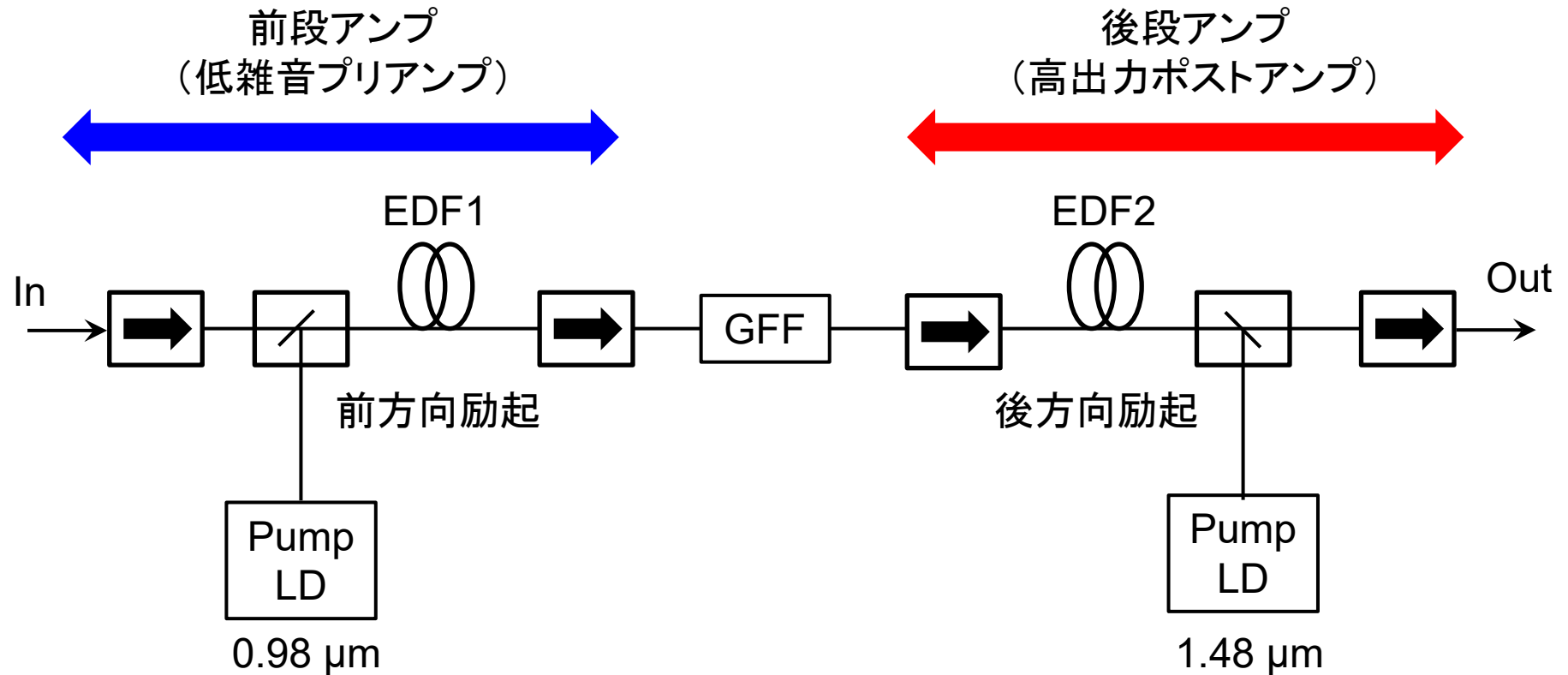
# Er添加ファイバのASE光のスペクトル



ASE光は光アンプにおいては雑音となるが、  
無偏光で安定な広帯域の光源として用いることもできる



# 光ファイバ増幅器の典型的な構成例



GFF: Gain Flattening Filter (誘電体多層膜やファイバ・グレーティングなど)

# 雑音指数

入力光のS/N比は、ショット雑音が支配的であるとすると

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{in} = \frac{n_{in}^2}{B \cdot n_{in}} = \frac{n_{in}}{B}$$

$n_{in}$ : 入力光子数、 $n_{out}$ : 出力光子数、 $n_{ASE}$ : ASE光子数、  
 $B$ : 信号帯域、 $G$ : 利得、 $n_{sp}$ : 自然放出光係数( $\sim 1$ )

光アンプの出力光には、光子数の揺らぎが加わり、雑音となる

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{n_{out}^2}{B(n_{out} + 2n_{out} \cdot n_{sp}(G-1))} = \frac{Gn_{in}}{B(1 + 2(G-1)n_{sp})}$$

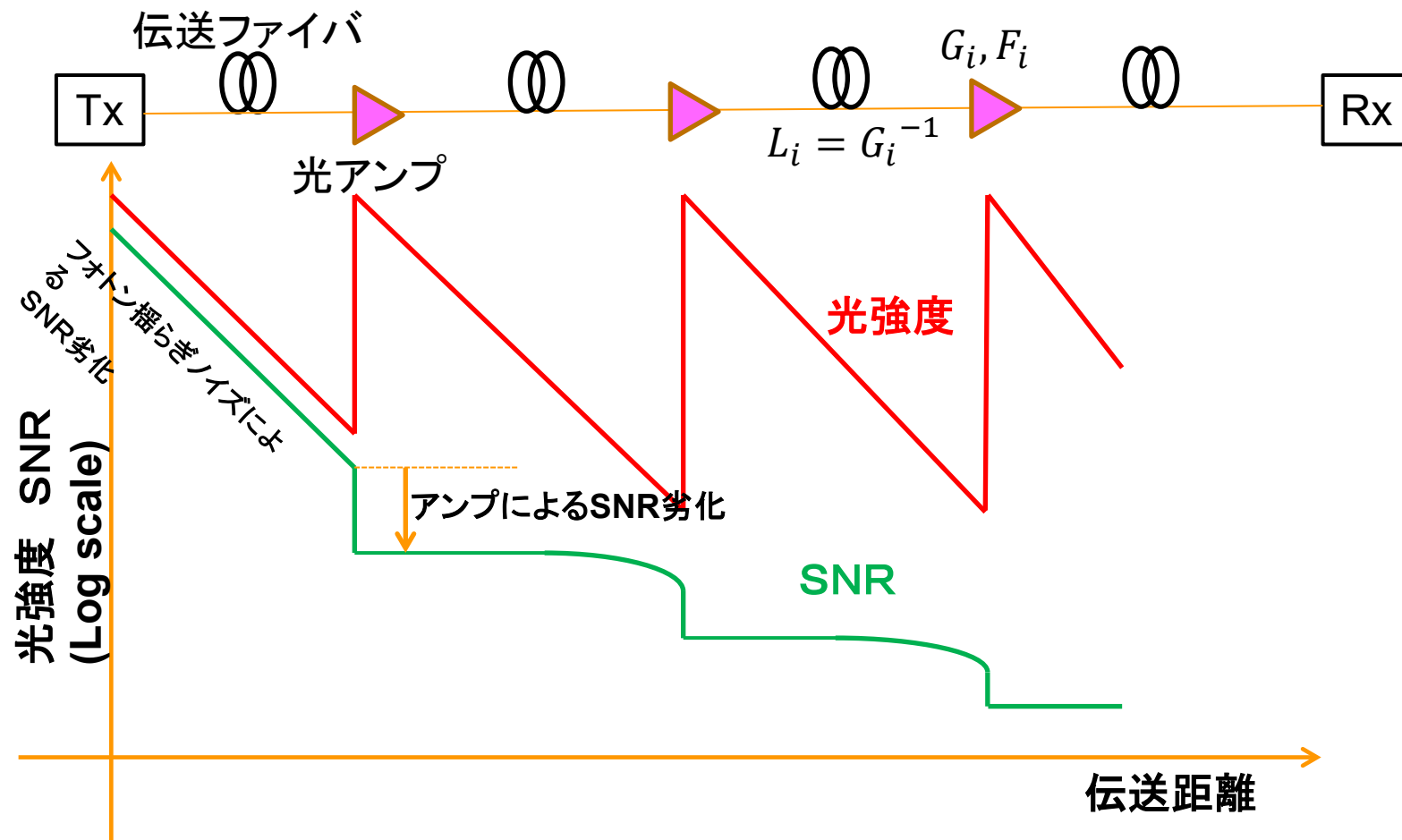
入出力のS/N比を比べると、雑音指数(Noise Figure)は

$$NF = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} = \frac{1 + 2(G-1)n_{sp}}{G} \approx 2n_{sp}$$

光アンプから出力される光信号のS/N比は、入力に比べて少なくとも1/2になる(3dB劣化する)。

また、入力側に損失があると、その分だけ信号パワーが減少するのでNFも劣化する。出力側の損失は、信号も雑音もパワーが減少するので、NFへの影響は小さい。

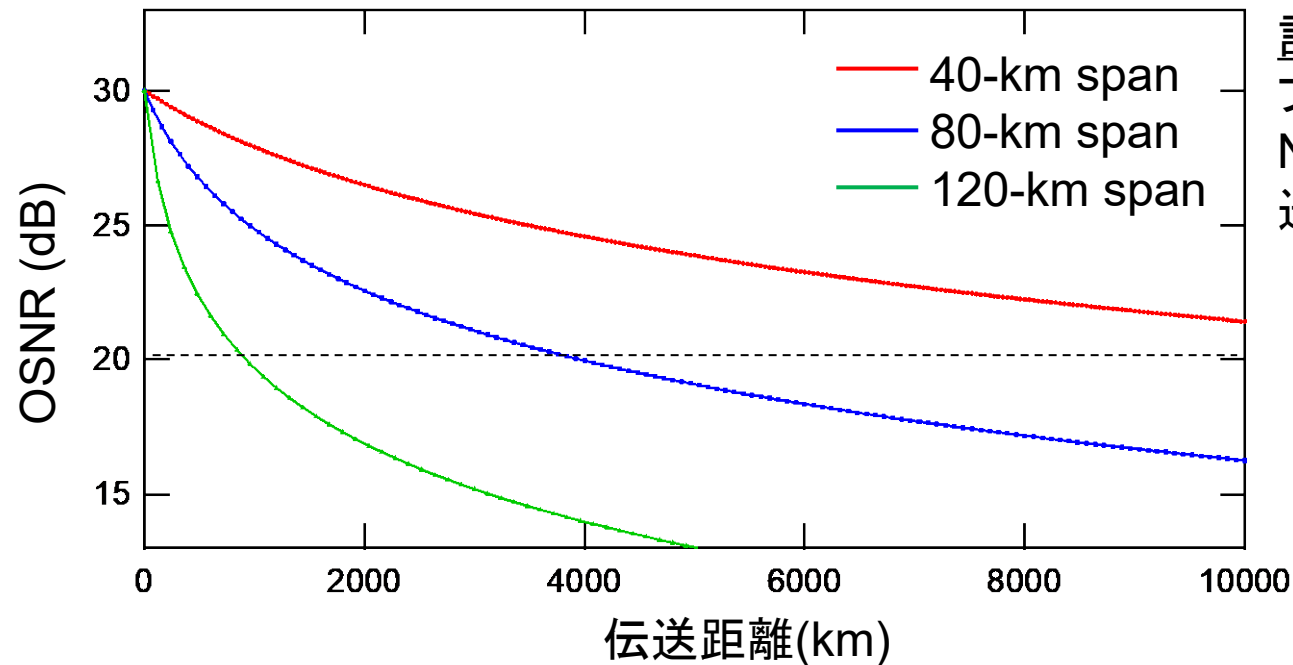
# 光増幅中継系における雑音の累積



光増幅中継系全体としてのNFは

$$F_{\text{total}} = G_1 F_1 + G_2 F_2 + \cdots + G_n F_n = \sum_{i=1}^n G_i F_i$$

# 光増幅中継系における雑音累積の距離依存性



計算条件

ファイバ損失: 0.2 dB/km

NF: 5 dB

送信OSNR: 30 dB

スパン長を短くすれば光雑音の累積を抑えることができる。  
→大洋横断などの長距離伝送では40km程度の短いスパン長が採用される。