

第8回

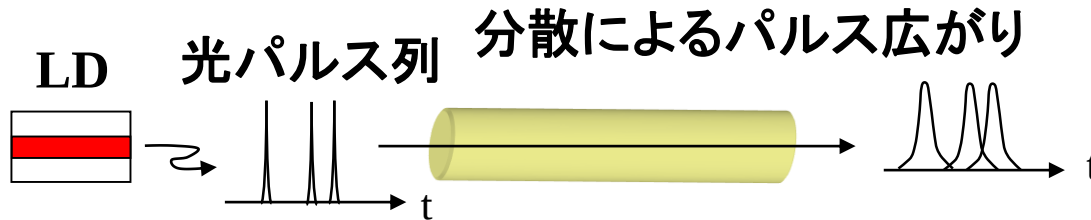
ファイバの伝送特性 (分散による伝送限界)

講義スケジュール(1)

	日付	内容
第1回	10/6	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	10/13	光通信システム(メトロ・アクセス・LAN・インターコネクション)
第3回	10/20	光変調符号
第4回	10/27	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	11/10	光変復調技術(デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	11/17	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	11/24	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/1	ファイバの伝送特性(分散による伝送限界)

講義スケジュール(2)

	日付	内容
第9回	12/8	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	12/15	光増幅器
第11回	12/22	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/5	ビット誤り率(コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/19	波長多重(WDM)伝送(分散マネジメント技術)
第14回	1/26	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/2	光スイッチング技術・最新の光通信関連技術

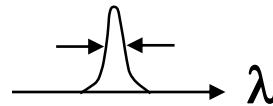


※波長分散:
光ファイバの屈折率波長依存性
による光の到達時間(群遅延)差

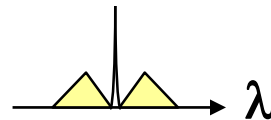
パルス広がりによる信号劣化 → 波長分散を抑えることが望ましい

LD光スペクトル広がり原因

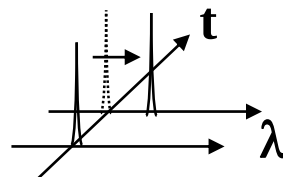
① LD自身の持つ波長広がり



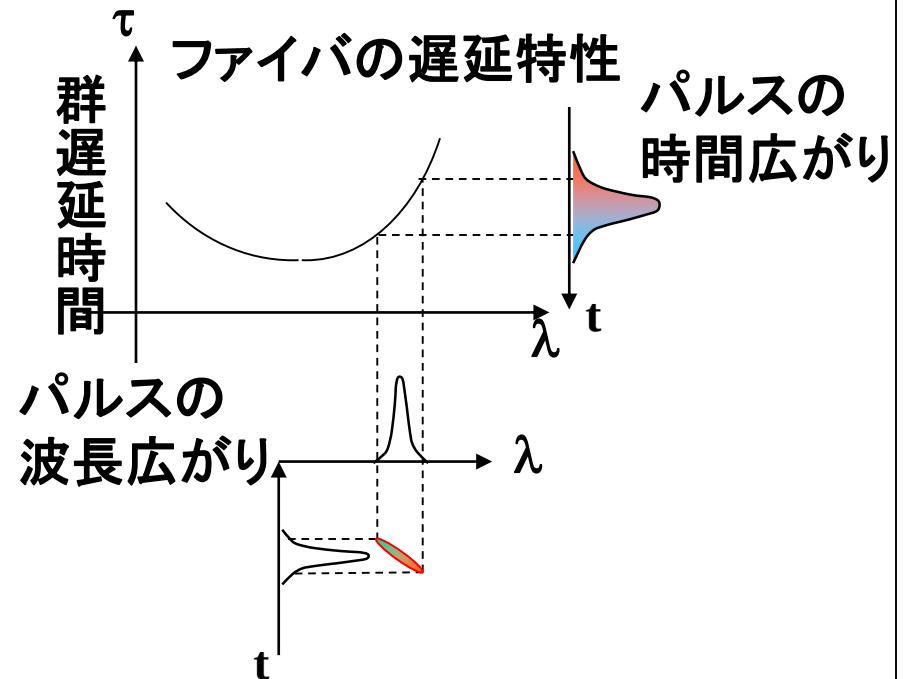
② 変調によるサイドバンドの発生



③ 変調によるチャープングの影響で波長が変動



パルスの時間広がり原因



光ファイバの波長分散

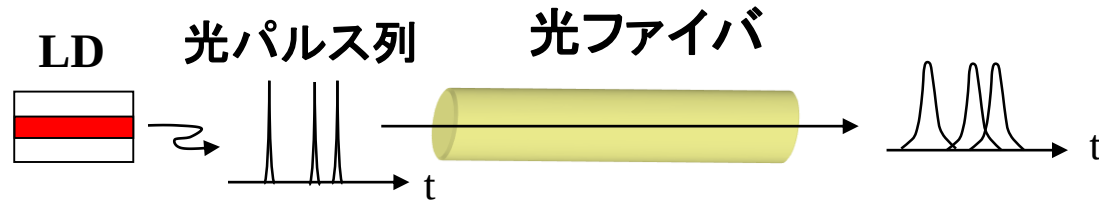
$$\begin{aligned} & \text{(光ファイバの分散)} \\ & = \text{(材料分散)} + \text{(導波路分散)} \end{aligned}$$

材料の屈折率の
波長依存性

導波路の構造
(屈折率分布)に
依存

分散は導波路の構造(屈折率分布)
によって制御可能

光ファイバ中の信号伝搬(1)



入射光波形

$$E(x, y, 0; t) = A(x, y, 0; t)e^{j\omega_0 t} \quad (8.1) \quad (\text{以下 } x, y \text{ 座標は省略})$$

フーリエ変換スペクトルは、

$$E_F(0; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(0; t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} A(0; t)e^{-j(\omega - \omega_0)t} dt = A_F(0; \omega - \omega_0) \quad (8.2)$$

距離 z 伝搬した時、位相変化 $\exp[-j\beta z]$ (β は伝搬定数)が加わるので
(振幅の減衰は無視)、出射端でのフーリエスペクトルは、

$$A_F(z; \omega) = A_F(0; \omega - \omega_0) \exp[-j\beta z] \quad (8.3)$$

光ファイバ中の信号伝搬(2)

距離 z 伝搬した時間波形は $A_F(z; \omega)$ の逆フーリエ変換なので、

$$E(z; t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_F(z; \omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_F(0; \omega - \omega_0) \exp[-j\beta z] e^{j\omega t} d\omega \quad (8.4)$$

$\omega - \omega_0 = u$ と変数変換して

$$E(z; t) = \frac{1}{2\pi} e^{j\omega_0 t} \int_{-\infty}^{\infty} A_F(0; u) \exp[j(ut - \beta(u)z)] du \quad (8.5)$$

β を ω_0 近傍でテーラー級数展開した式

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (8.6)$$

を $E(z; t)$ の式に代入

$$\frac{1}{v_g} = \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega_0} \quad (v_g: \text{群速度})$$

$$\beta'' = \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} \quad (\text{分散に 関係})$$

$$E(z; t) = \frac{1}{2\pi} e^{j[\omega_0 t - \beta(\omega_0)z]} \int_{-\infty}^{\infty} A_F(0; u) \exp\left[ju\left(t - \frac{z}{v_g}\right) - j\frac{\beta''}{2} zu^2\right] du \quad (8.7)$$

$\beta''=0$ (分散が零)としたとき、

$$E(z;t) = A(0;t - \frac{z}{v_g}) e^{j[\omega_0 t - \beta(\omega_0)z]} \quad (8.8) \quad \Rightarrow \quad t - \frac{z}{v_g} \text{ における } z=0 \text{ の波形と同じ}$$

$$\tau \equiv \frac{z}{v_g} = z \frac{d\beta}{d\omega} \quad \text{: 群遅延} \quad (8.9)$$

入力光をガウス型波形と仮定: $A(0;t) = A_0 \exp[-(\frac{t}{\tau_0})^2]$ (8.10)

$$\text{フーリエ変換: } A_F(0;\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A(0;t) e^{-j\omega t} dt = A_0 \sqrt{\pi} \tau_0 \exp[-\frac{\tau_0^2 \omega^2}{4}] \quad (8.11)$$

ただし、 $\exp[-\alpha t^2]$ のフーリエ変換が $\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp[-\frac{\omega^2}{4\alpha}]$ となる(ガウス関数の

フーリエ変換はガウス関数)ことを利用した。

光ファイバ中の信号伝搬(4)

(8.10)の強度 $|A(0;t)|^2$ の半値全幅 T_0 は

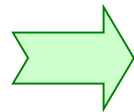
$$\left(\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^2\right] \right)^2 = \frac{1}{2} \quad \text{より} \quad T_0 = \tau_0 \sqrt{2 \ln 2} \quad (8.12)$$

(8.11)の強度 $|A_F(0;\omega)|^2$ の半値全幅 $\Delta\omega$ は

$$\left(\exp\left[-\frac{\tau_0^2 \omega^2}{4}\right] \right)^2 = \frac{1}{2} \quad \text{より}$$

$$\Delta\omega = \frac{2\sqrt{2 \ln 2}}{\tau_0} \quad (8.13)$$

$$T_0 \Delta\omega = \frac{4 \ln 2}{2\pi} \approx 0.441 \quad (8.14)$$



チャージングを起こしていないパルスについて成立(Transform-limited pulse)

光ファイバの分散の計算(1)

(8.9)の群遅延をテーラー級数展開して、

$$\tau(\omega) = L \frac{d\beta}{d\omega} = L \left[\frac{d\beta}{d\omega} \Big|_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Big|_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \cdots \right] \quad (8.15)$$

(8.15)を規格化伝搬定数 b , V パラメータで表現する。

$\beta = k[n_1^2 b + n_2^2 (1-b)]^{1/2}$ と表して、

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{L}{c} \frac{d\beta}{dk} = \frac{L}{c} \frac{[n_2 N_2 + (n_1 N_1 - n_2 N_2)(b + \frac{1}{2} V \frac{db}{dV})]}{[n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2)b]^{1/2}} \quad (8.16)$$

ただし、

$$N_i = n_i + k \frac{dn_i}{dk} \Big|_{\omega=\omega_0} = n_i - \lambda \frac{dn_i}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} \quad (8.17)$$

(群屈折率または実効屈折率)

※注: 分散方程式から求められる伝搬定数に基づく等価屈折率とは異なる。波長依存性を含んだ値。

光ファイバの分散の計算(2)

弱導波路近似($\Delta \ll 1$)が成り立つ場合、(8.16)は

$$\tau \approx \frac{L}{c} \left[N_2 + (N_1 - N_2) \frac{d(Vb)}{dV} \right] \quad (8.18)$$

$\frac{d\beta}{dk}$ を再度kで微分して2階微分を計算し、

$$\delta\tau = L\delta\lambda \left[\underbrace{\left(-\frac{1}{c\lambda_0}\right)}_{\sigma_{\text{tot}}} \underbrace{\left\{ k \frac{dN_2}{dk} + \left(k \frac{dN_1}{dk} - k \frac{dN_2}{dk} \right) \left(b + \frac{1}{2} V \frac{db}{dV} \right) \right\}}_{\sigma_m} \right]$$

$\delta\tau = \sigma_{\text{tot}} : \text{全分散} \times (L\delta\lambda)$

$\sigma_m : \text{材料分散}$

$$+ \underbrace{\left(-\frac{1}{c\lambda_0}\right) \frac{1}{2} \frac{(n_1 N_1 - n_2 N_2)^2}{n_2 (n_1^2 - n_2^2)} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}}_{\sigma_w}$$

$\sigma_w : \text{導波路分散}$

(8.19)

ステップ・インデックス型ファイバにおける光閉じ込め係数 Γ は

$$\Gamma = b + \frac{1}{2}V \frac{db}{dV} = \frac{1}{2} \left[b + \frac{d(Vb)}{dV} \right] \quad (8.20)$$

材料分散 σ_m は以下で表される。

$$\sigma_m = -\frac{1}{c} \left[\Gamma \lambda \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} + (1 - \Gamma) \lambda \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} \right]_{\lambda=\lambda_0} \quad (8.21)$$

セルマイヤーの式 (Sellmeir's formula)

屈折率の波長依存性

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - (l_i)^2} \quad \lambda: [\mu\text{m}] \text{単位}$$

例) SiO₂に対して以下の数値が知られている。

$$A_1 = 0.6961663$$

$$A_2 = 0.4079426$$

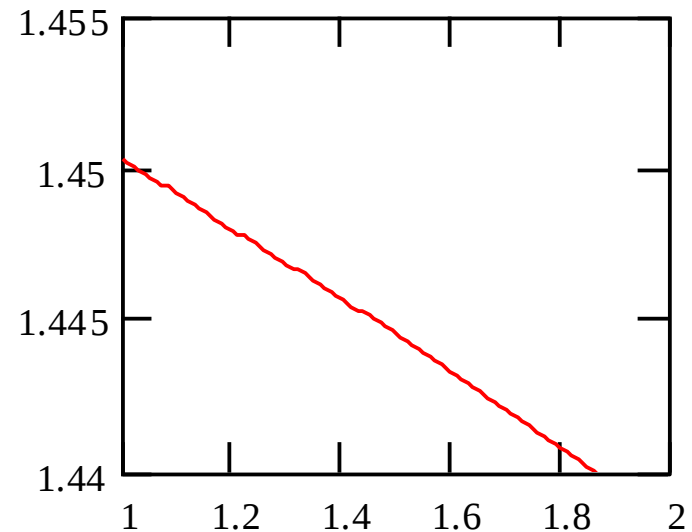
$$A_3 = 0.8974794$$

$$l_1 = 0.0684043$$

$$l_2 = 0.1162414$$

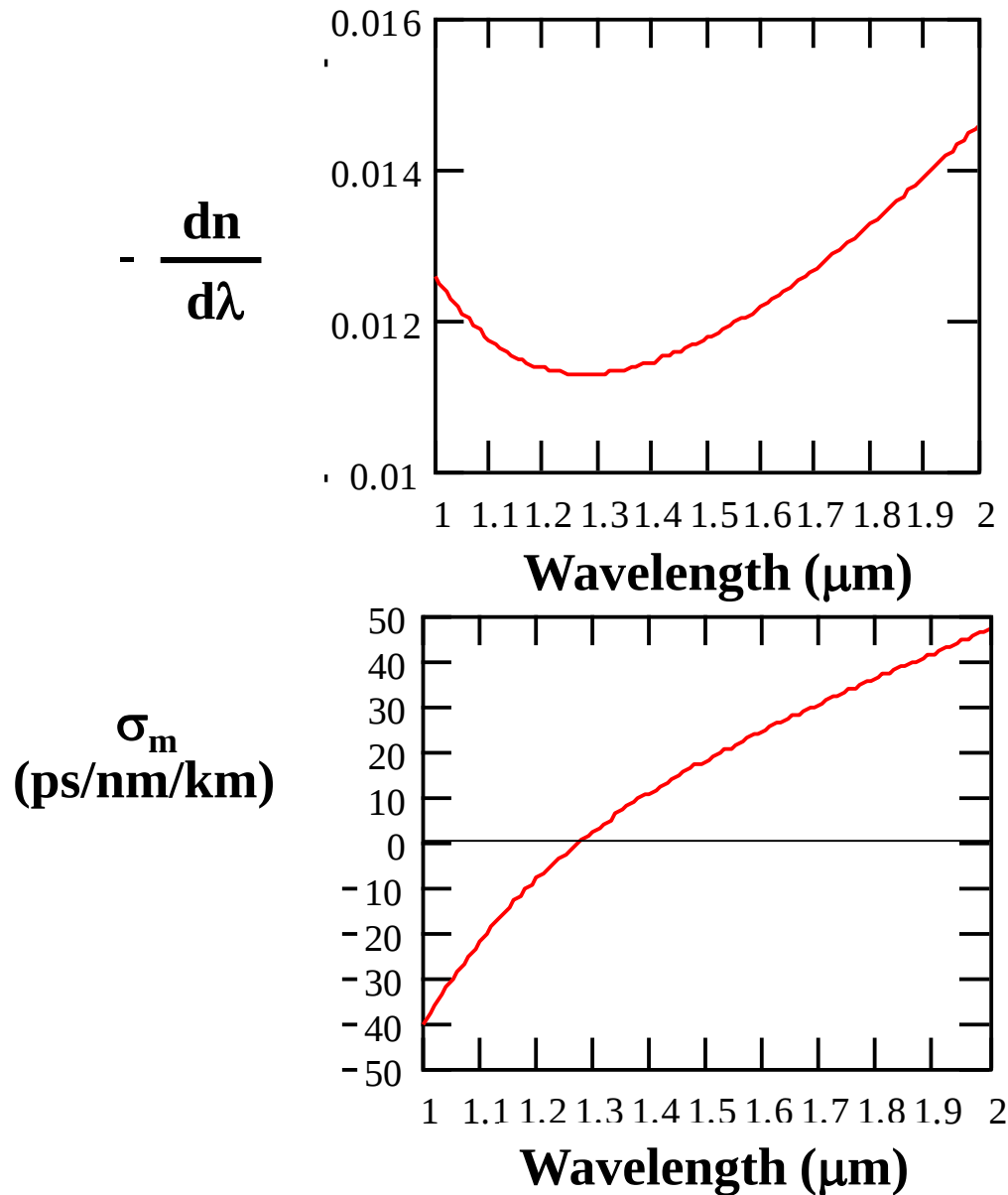
$$l_3 = 9.896161$$

n



Wavelength (μm)

材料分散の計算結果

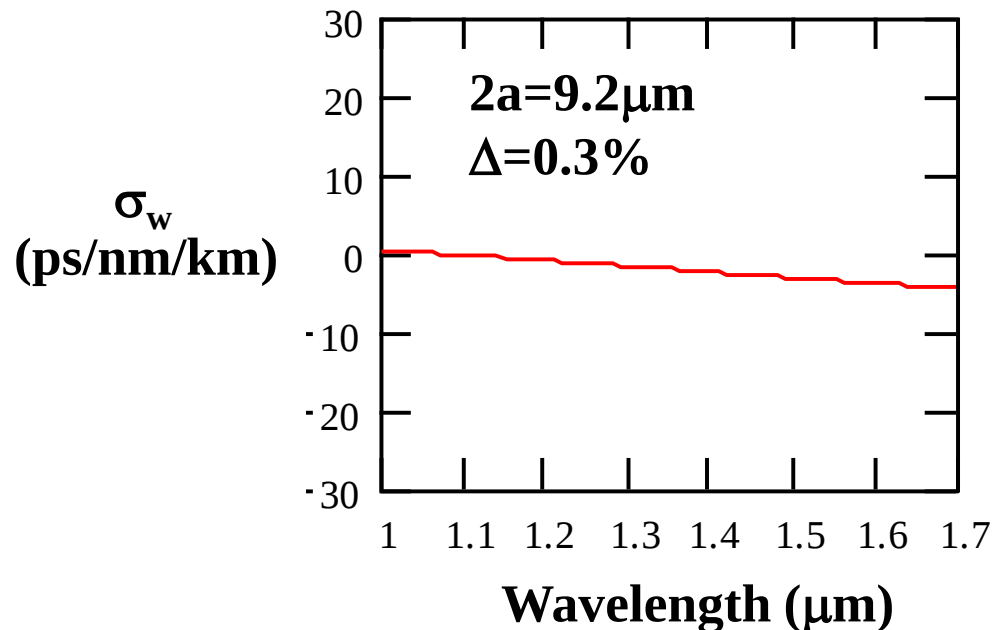


導波路分散 σ_w は、

$$\sigma_w = -\frac{1}{c\lambda_0} \frac{1}{2} \frac{(n_1 N_1 - n_2 N_2)^2}{n_2 (n_1^2 - n_2^2)} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (8.22)$$

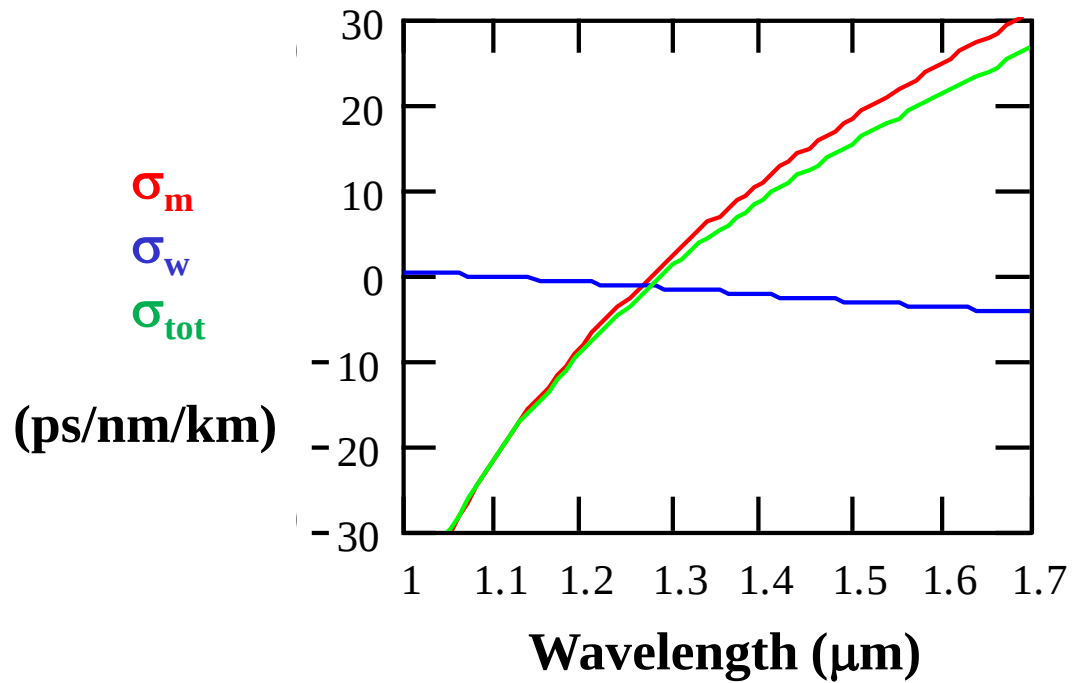
弱導波路近似($\Delta \ll 1$)が成り立つ場合は

$$\sigma_w \approx -\frac{1}{c\lambda} (N_1 - N_2) V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (8.23)$$



光ファイバの全分散

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_w$$



光ファイバ中の信号伝搬(5)

次に $\beta'' \neq 0$ (分散が零でない) としたときを考える。

(8.11)を(8.7)に代入

$$E(z;t) = A_0 \underbrace{\frac{\tau_0}{\sqrt{\tau_0^2 + j2\beta''z}} \exp\left[-\frac{(t - \frac{z}{v_g})^2}{\tau_0^2 + j2\beta''z}\right]}_{A(z;t - \frac{z}{v_g})} e^{j[\omega_0 t - \beta(\omega_0)z]} \quad (8.24)$$

$A(z;t) = |A(z;t)|e^{j\Phi(z;t)}$ としたときの波形と位相について考える。

波形

$$|A(z;t)| = A_0 \frac{\tau_0}{\left[\tau_0^4 + (2\beta''z)^2\right]^{\frac{1}{4}}} \exp\left[-\frac{t^2}{\tau_0^2 + \frac{(2\beta''z)^2}{\tau_0^2}}\right] \quad (8.25)$$

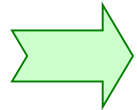
位相

$$\Phi(z;t) = \frac{2\beta''z}{\tau_0^4 + (2\beta''z)^2} t^2 - \frac{1}{2} \tan^{-1}\left[\frac{2\beta''z}{\tau_0^2}\right] \quad (8.26)$$

光ファイバ中の信号伝搬(6)

(8.25)の波形の振幅が1/2になる半値全幅 T_{FWHM} は

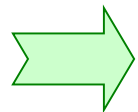
$$T_{FWHM} = T_0 \sqrt{1 + (4(\ln 2) \frac{\beta'' z}{T_0^2})^2} \quad (T_0 = \tau_0 \sqrt{2 \ln 2}) \quad (8.27)$$



Transform-limited pulseでも伝送するに従い広がる。

(8.26)を(8.24)に代入し位相項の時間微分をとると、瞬時角周波数 $\omega(t)$ は

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{4\beta'' z}{\tau_0^4 + (2\beta'' z)^2} t \quad (8.28)$$



パルス波形中の瞬時角周波数が変化：チャープング

ファイバの分散による波形歪の影響

入射波形

負分散による波形歪

$$\beta'' > 0 (\sigma_T < 0)$$

正分散による波形歪

$$\beta'' < 0 (\sigma_T > 0)$$

→ 時間

→ 時間

→ 時間

σ_T : 後に出てくる光ファイバの波長分散

光ファイバ中の信号伝搬(7)

入射パルスが初めからチャープしている場合: $A(0;t) = A_1 \exp\left[-(1 + \boxed{jC_p}) \frac{t^2}{\tau_0^2}\right]$

位相の時間変化 (8.29)

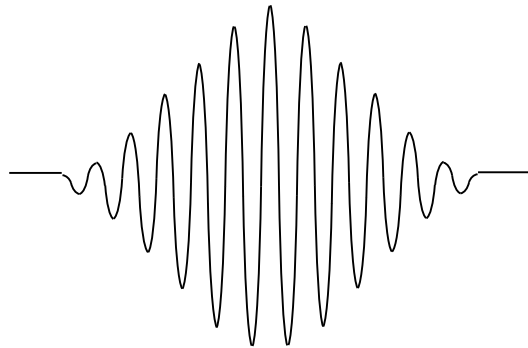
$$E(0;t) = A(0;t)e^{j\omega_0 t} = A_1 \underbrace{\exp\left[-\frac{t^2}{\tau_0^2}\right]}_{\text{ガウス関数の強度}} \underbrace{\exp\left[j\left(\omega_0 t - C_p \frac{t^2}{\tau_0^2}\right)\right]}_{\text{ガウス関数の位相変化}}$$

ガウス関数の強度

ガウス関数の位相変化

$$C_p = 0$$

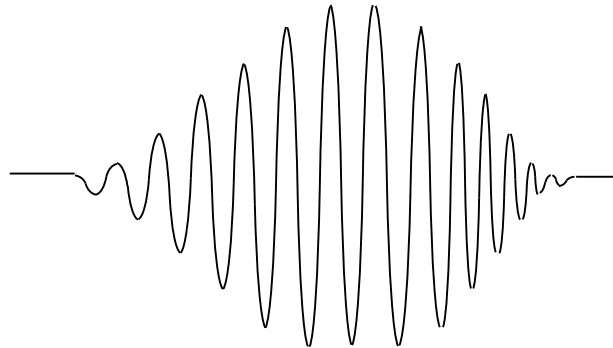
チャープ無し



→ 時間

$$C_p < 0 \text{ (位相進み)}$$

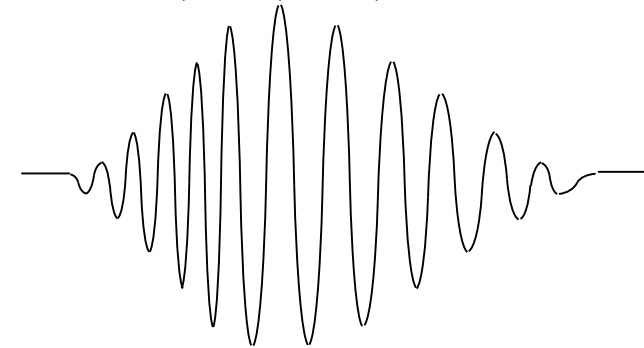
ブルーチャープに相当
(長波長→短波長シフト)



→ 時間

$$C_p > 0 \text{ (位相遅れ)}$$

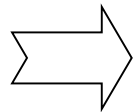
レッドチャープに相当
(短波長→長波長シフト)



→ 時間

距離 z 伝搬された後の半値全幅 T_{FWHM} は

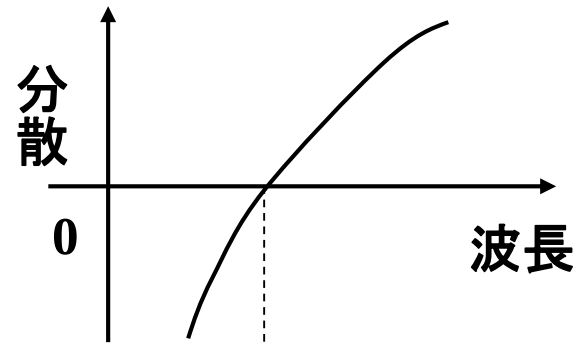
$$T_{FWHM} = T_0 \sqrt{\left(1 - 4(\ln 2) \frac{\beta'' C_p z}{T_0^2}\right)^2 + \left(4(\ln 2) \frac{\beta'' z}{T_0^2}\right)^2} \quad (8.30)$$



チャープの符号と大きさによりパルス幅の拡がり方が異なる。

$$\begin{cases} \beta'' C_p > 0 & : T_{FWHM} \text{ は一旦減少し、極小値を経て拡大} \\ \beta'' C_p < 0 & : T_{FWHM} \text{ は単調増加} \end{cases}$$

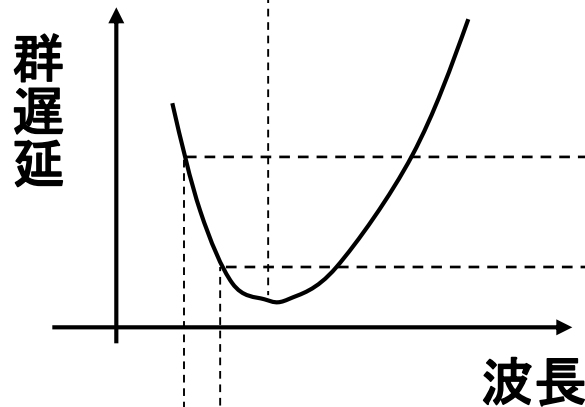
波形拡がりとチャージングとの関係の解釈 (Transform-limited pulseの場合(1))



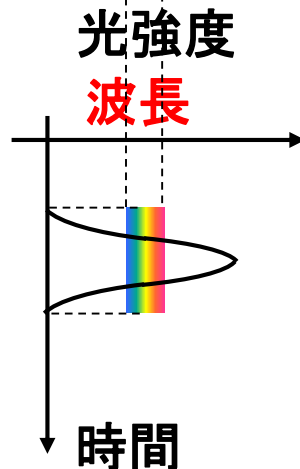
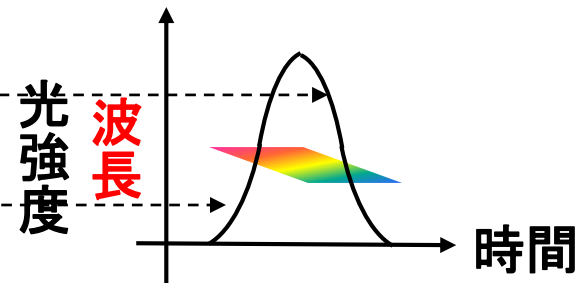
$$\beta'' > 0, C_p = 0$$

(後に示すように $\beta'' = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \sigma_T$ のため

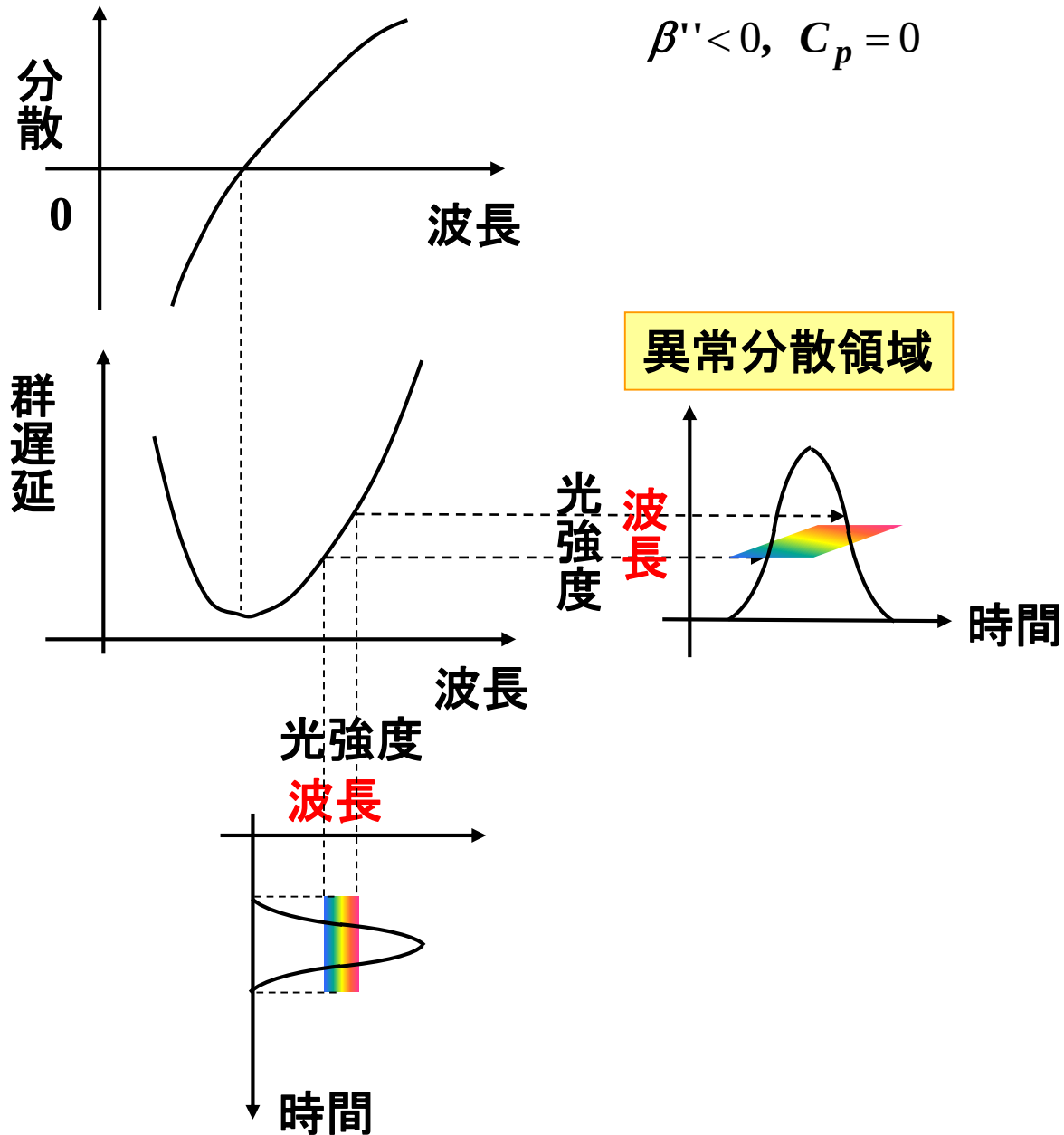
符号関係が全分散 σ_T と逆になる)



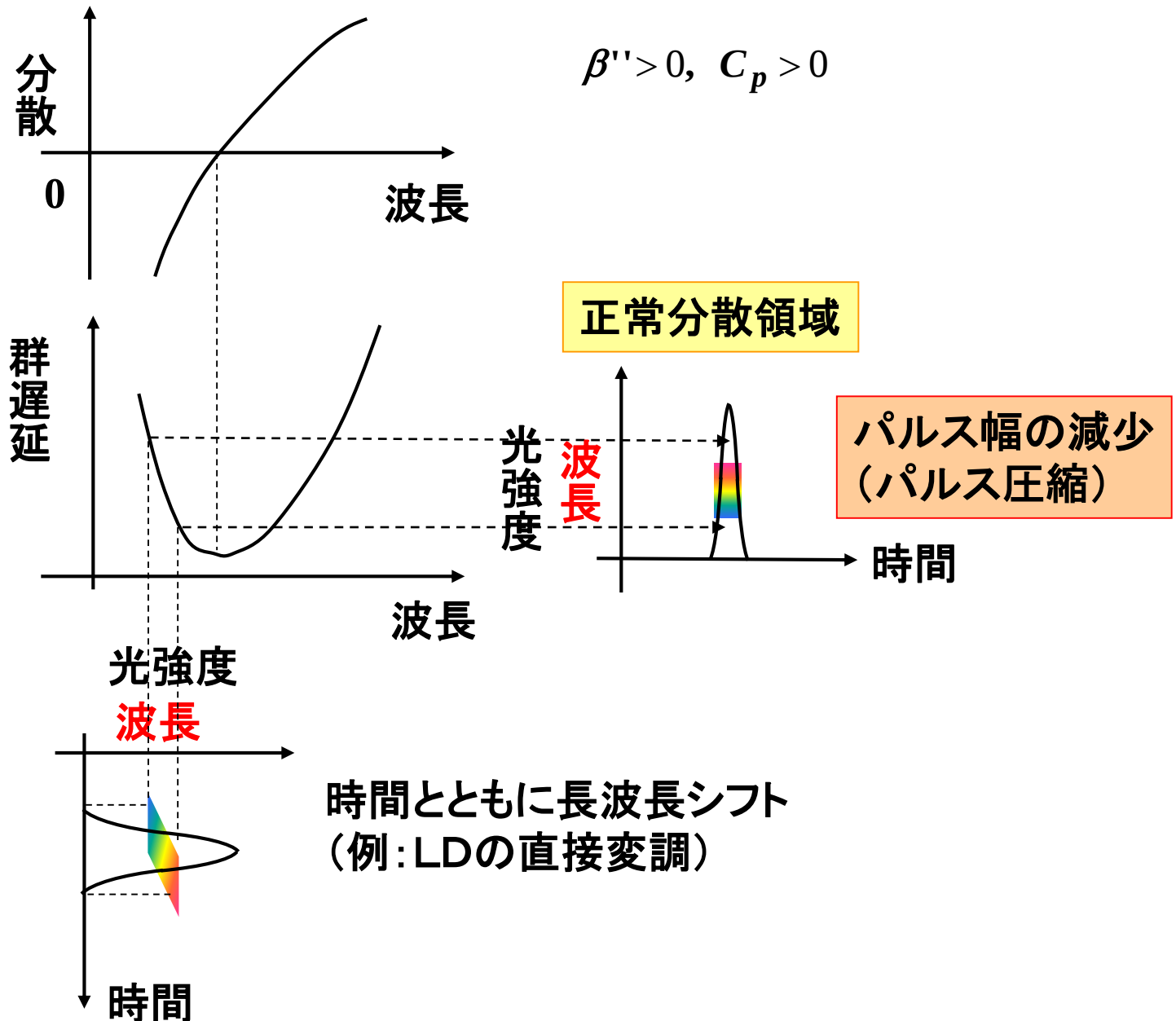
正常分散領域



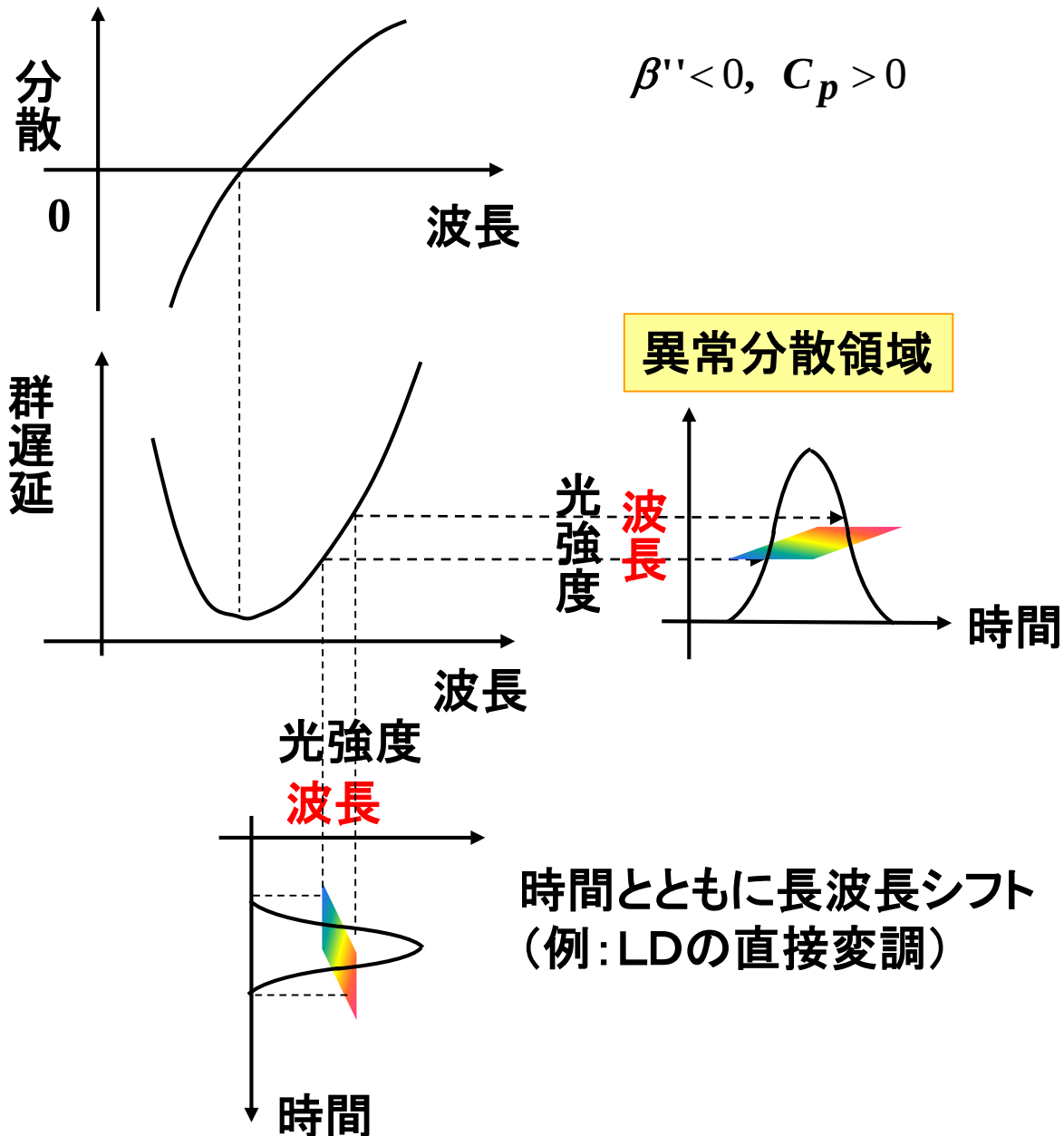
波形拡がりとチャープニングとの関係の解釈 (Transform-limited pulseの場合(2))



波形拡がりとチャープの関係の解釈 (チャープのあるパルスの場合(1))



波形拡がりとチャープピングの関係の解釈 (チャープのあるパルスの場合(2))



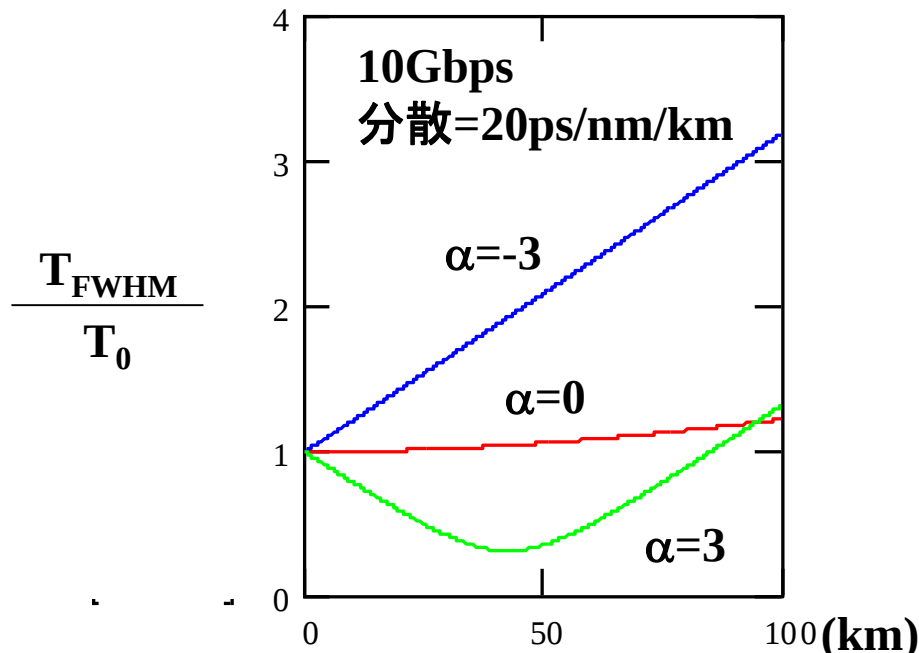
光ファイバ中の信号伝搬(9)

(参考)

K. no and K. Aida, J. Lightwave Technol., vol.6, No.11, pp.1678-1685 (1988).

$$\Delta t^2 = \left(\Delta t_i - \alpha \cdot \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta t_i} \frac{\lambda^2}{c} \cdot m \cdot L \right)^2 + \left(\frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta t_i} \frac{\lambda^2}{c} \cdot m \cdot L \right)^2$$

(Δt_i : 初期状態のパルス幅、 α : α パラメータ、 m : 分散(ps/nm/km単位)、 L : 伝送距離)



(8.27)において $4 \ln 2 \frac{\beta'' z}{T_0^2} \gg 1$ のとき、

$$T_{FWHM} \approx \frac{4(\ln 2)\beta'' z}{T_0} = \beta'' z \Delta\omega = 2\pi\beta'' z \Delta\nu \quad (8.31)$$

➡ $T_{FWHM} = \delta\tau$, $z = L$, $2\pi\Delta\nu = \Delta\omega$ において、

$$\delta\tau = L \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \left(\omega \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right)_{\omega=\omega_0} = -\frac{L}{c} \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \left(k \frac{d^2\beta}{dk^2} \right)_{\lambda=\lambda_0} \quad (8.32)$$

(波長分散の計算の時に使用する式)

(8.11)(ガウス型パルスの伝送前のフーリエ変換)と(8.24)のフーリエ変換(ガウス型パルスの伝送後のフーリエ変換)を比較して、変調信号の伝達関数を求める。

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{\tau_0} \sqrt{\tau_0^2 + \frac{(2\beta''z)^2}{\tau_0^2}} \exp \left[-2 \left(\frac{2\beta''z}{\tau_0} \right)^2 \omega^2 \right] \quad (8.33)$$

(8.31)を代入

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{\tau_0} \sqrt{\tau_0^2 + \frac{(2\beta''z)^2}{\tau_0^2}} \exp \left[-\frac{\delta\tau^2}{\ln 2} \omega^2 \right] \quad (8.34)$$

(8.34)の伝達関数の値が $\omega=0$ の1/2(-3dB)になる周波数 $\Delta\nu$ (3dB帯域B)は、

$$B = \Delta\nu = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{\ln 2}{2\pi|\delta\tau|} \quad (8.35)$$

単一モード光ファイバの伝送帯域(分散制限)(2)

(8.35)をレーザの周波数幅 Δf_0 と変調周波数帯域 B の相対関係に対して場合分けして考える。

(1) 光源の周波数幅が変調周波数帯域より狭い場合 ($\Delta f_0 \ll B$: DFB-LD)

(8.35)の $\delta\tau$ は(8.31)の T_{FWHM} に等しいので、
(8.31)を(8.35)に代入して、

$$B\sqrt{L} = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{|\beta''|}} \quad (8.36)$$

(8.31)、(8.19)より β'' を求めると、

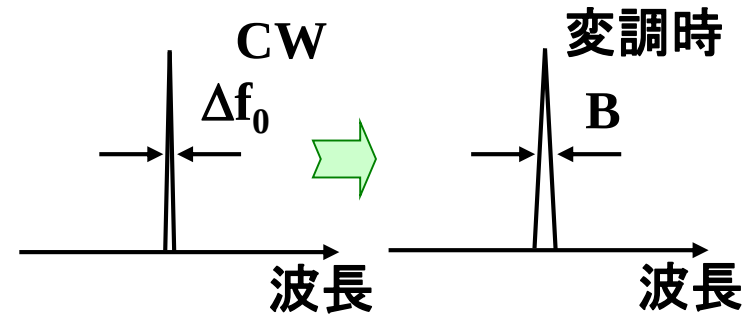
$$\beta'' = \frac{1}{2\pi L} \frac{\delta\tau}{\Delta\nu} = \frac{1}{2\pi L} \delta\tau \left(-\frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda} \right) = \frac{1}{2\pi L} L\Delta\lambda\sigma_T \left(-\frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda} \right) = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \sigma_T \quad (8.37)$$

(8.37)を(8.36)に代入して、

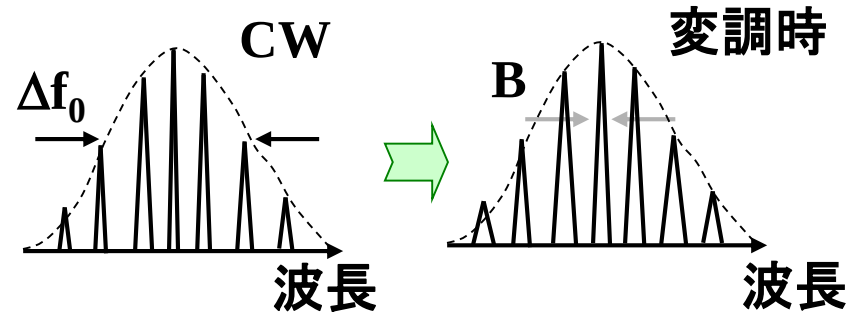
$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} [\text{GHz} \cdot \sqrt{\text{km}}] \quad (8.38)$$

➡ 距離の平方根に帯域が制限される

λ [μm],
 σ_T [ps/nm/km] 単位



(2) 光源の周波数幅が変調周波数帯域より広い場合 ($\Delta f_0 > B$: FP-LD)

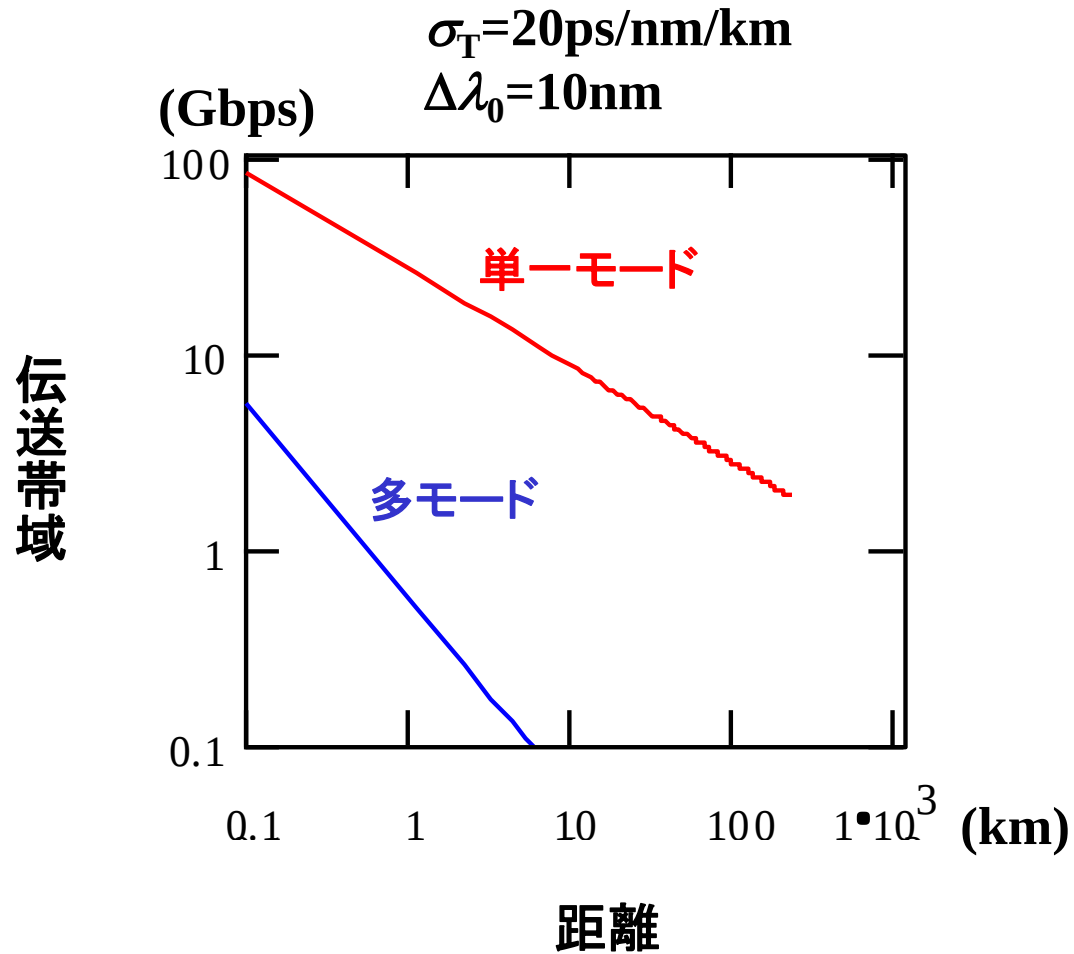


(8.37)の $\delta\lambda$ は光源のスペクトル幅 $\Delta\lambda_0$ となるので、

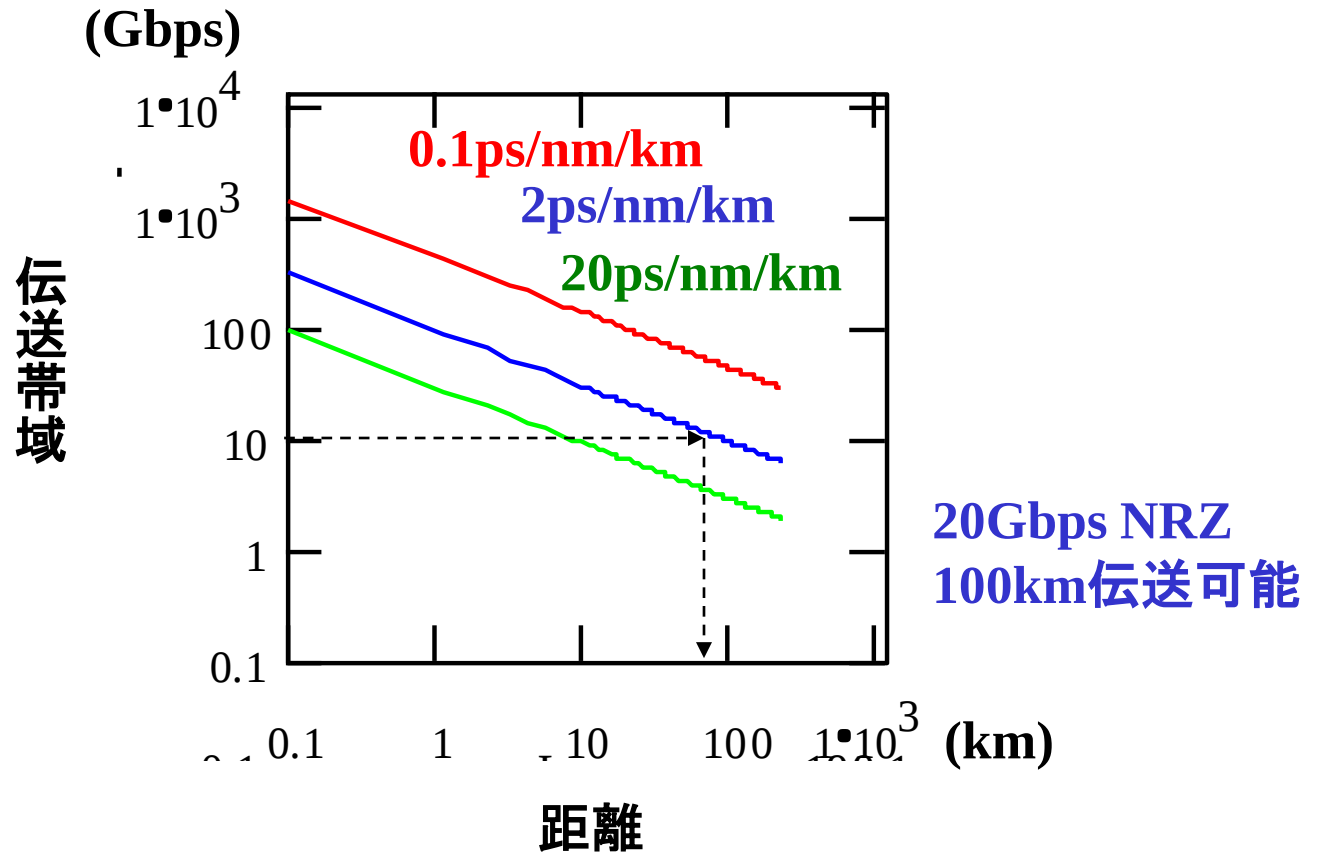
$$BL = \frac{\ln 2}{2\pi\Delta\lambda_0|\sigma_T|} = \frac{110.3}{\Delta\lambda_0|\sigma_T|} \quad [\text{GHz} \cdot \text{km}] \quad (8.39)$$

$\Delta\lambda_0$ [nm],
 σ_T [ps/nm/km]単位

単一モードと多モード(LD縦モード)の伝送特性比較



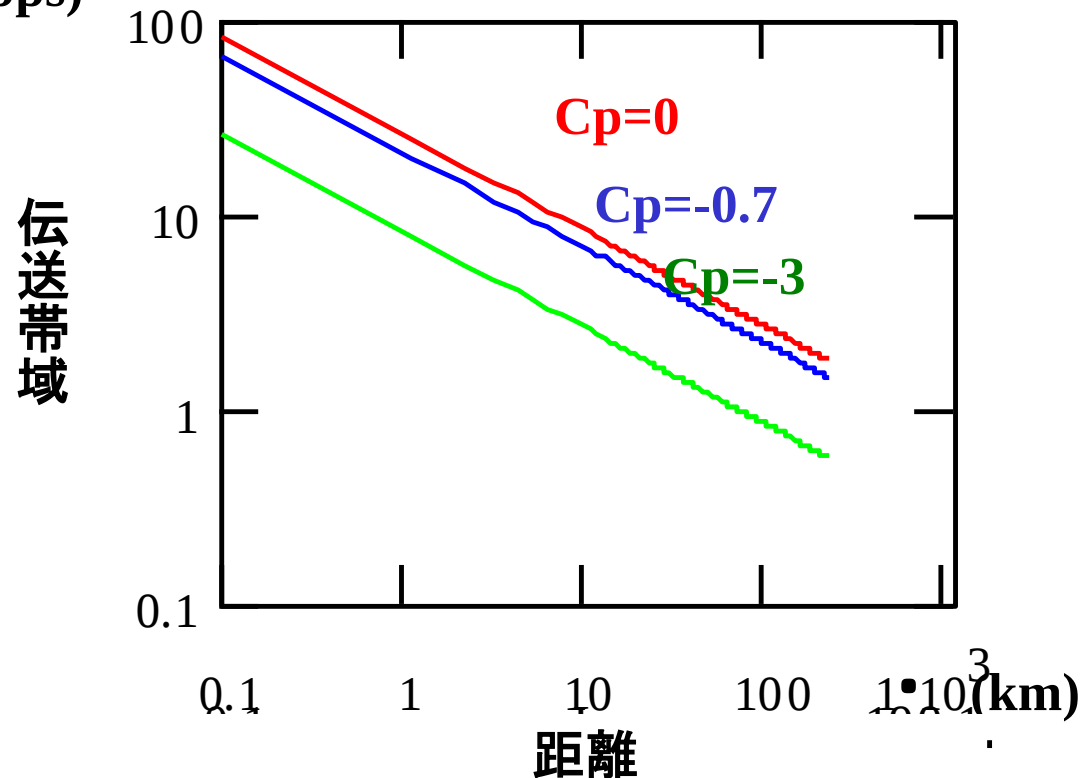
ファイバの分散依存性の解析結果



チャープによる帯域制限

信号のチャープ量依存性の解析結果

式(8.21)よりパルス幅はほぼチャープなしの場合の $\sqrt{1+C_p^2}$ 倍
(帯域は $\sqrt{1+C_p^2}$ 分の1)
(Gbps)



チャープによるパルス拡がりの解析例 (直接変調)

DFB

チャープ量: 20GHz(レッドシフト)

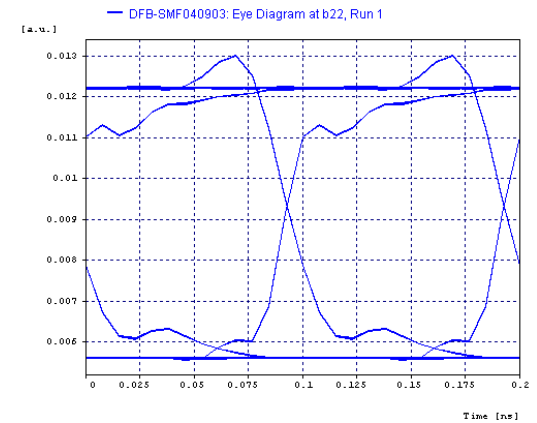
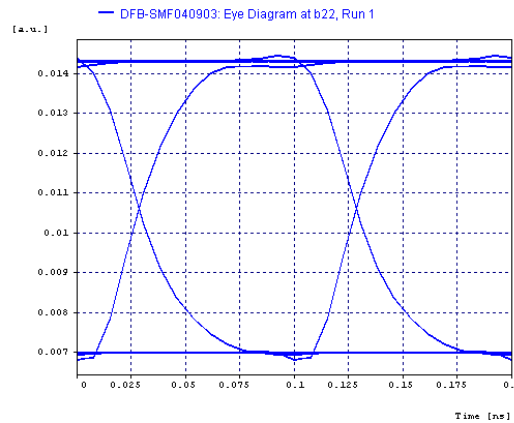
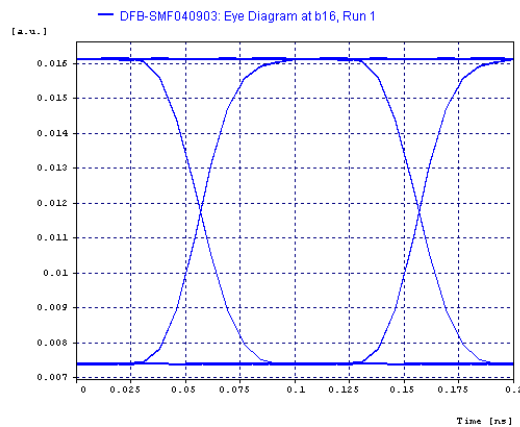
SMF (分散16ps/nm/km @ 1550nm)

PD

10Gbps
Back-to-Back

2km

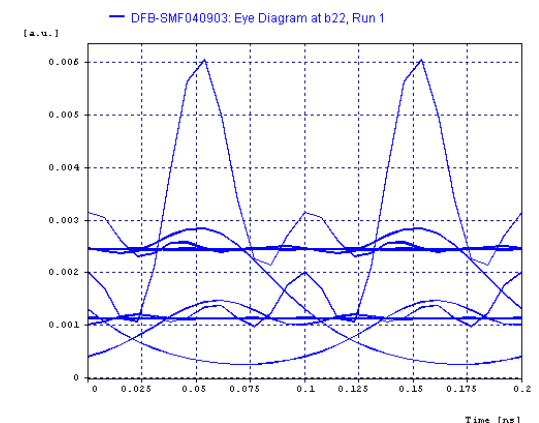
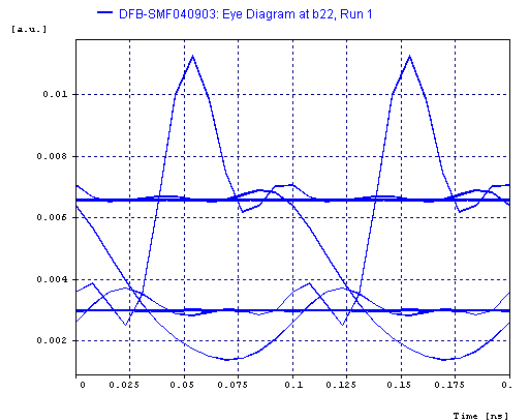
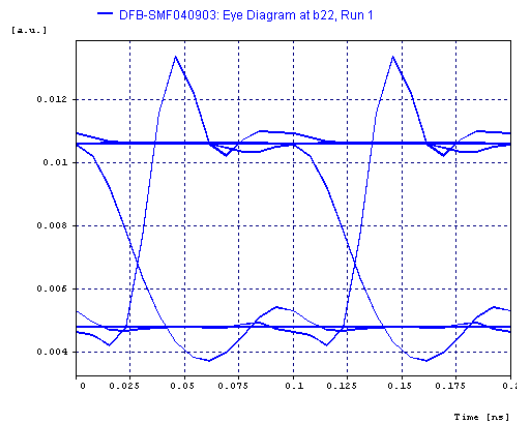
5km



10km

20km

40km



チャープによるパルス拡がりの解析例 (外部変調)

DFB

EAM

チャープ量: 4GHz(ブルーシフト)

PD

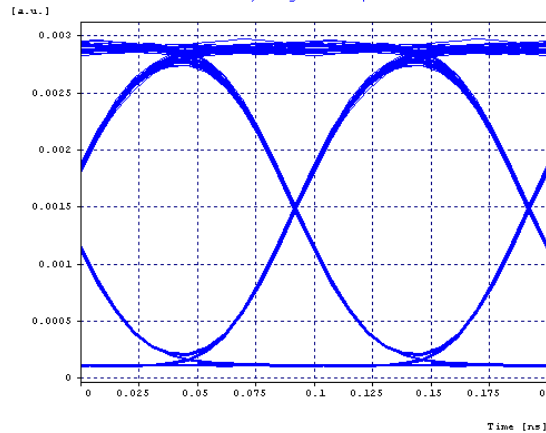
SMF (分散16ps/nm/km @ 1550nm)

10Gbps
Back-to-Back

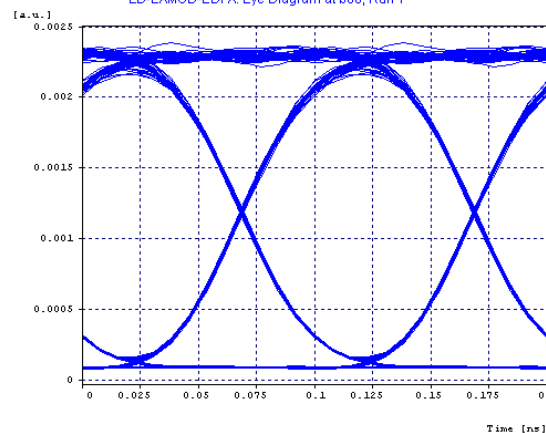
5km

10km

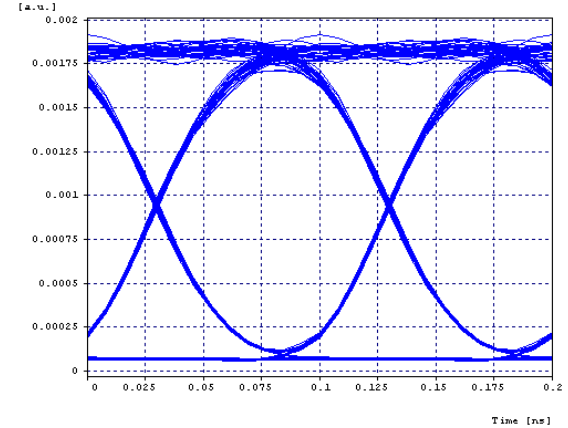
— LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1



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



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

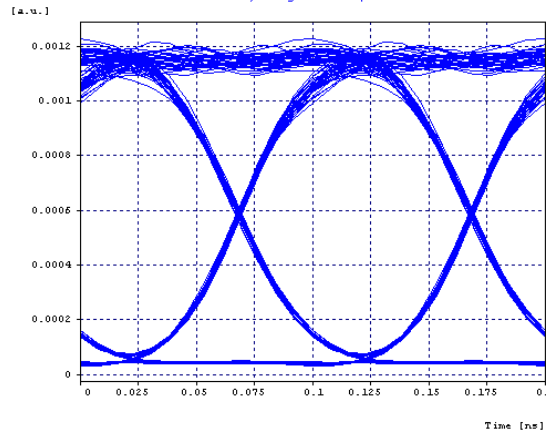


20km

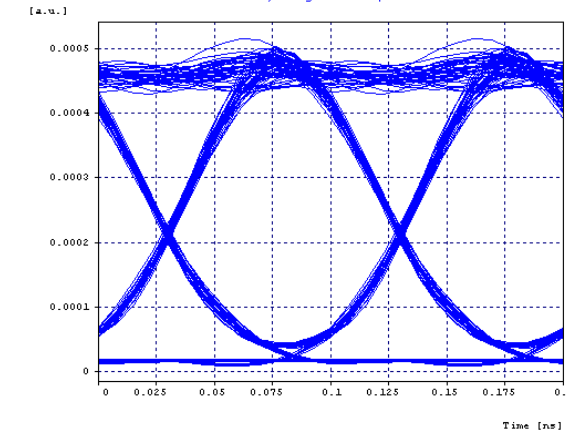
40km

80km

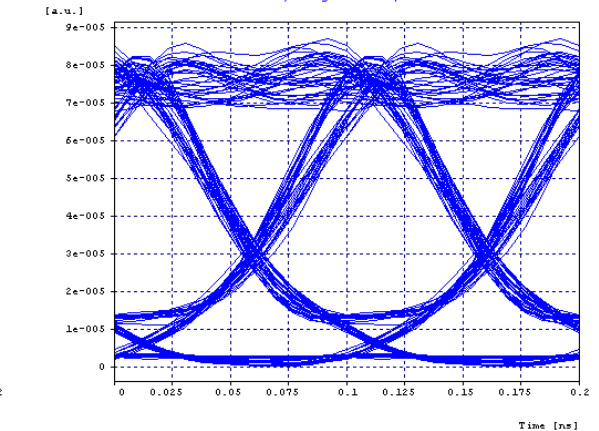
— LD-EAMOD-EDFA: Eye Diagram at b66, Run 1



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



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



分散シフトファイバによる波形広がり抑制効果

DFB/EA

DSF (分散-2ps/nm/km)

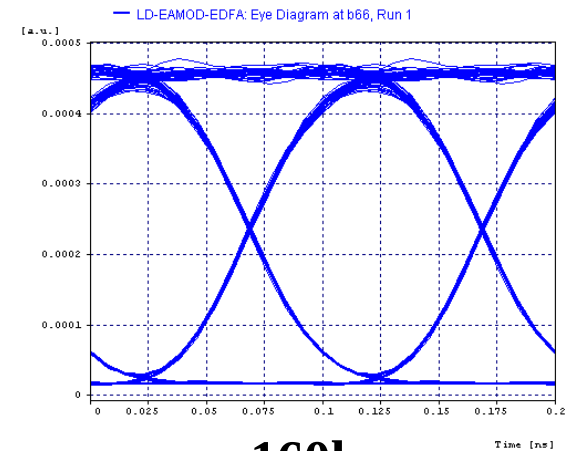
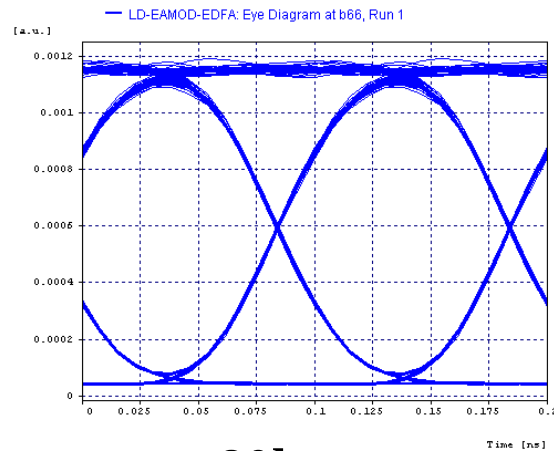
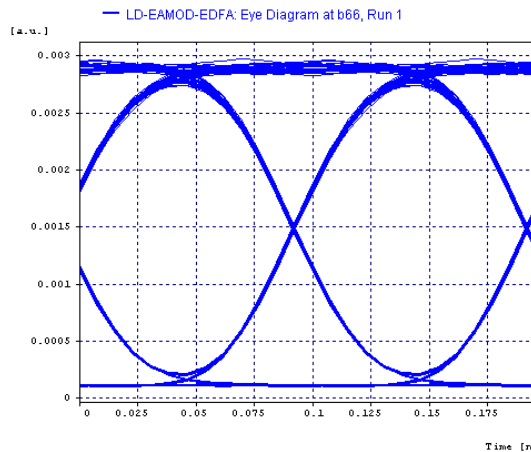
PD

チャープ量: 4GHz (ブルーシフト)

Back-to-Back

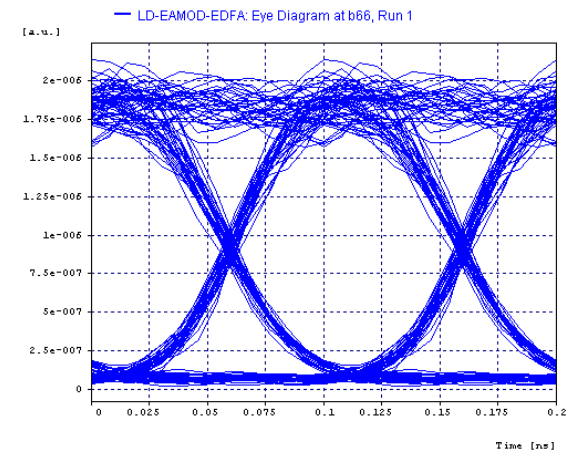
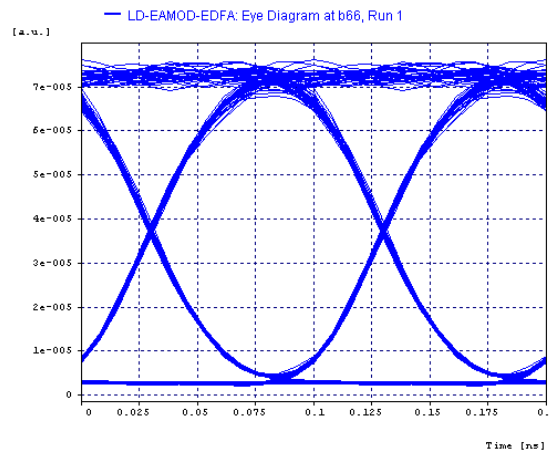
20km

40km

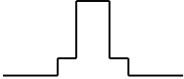


80km

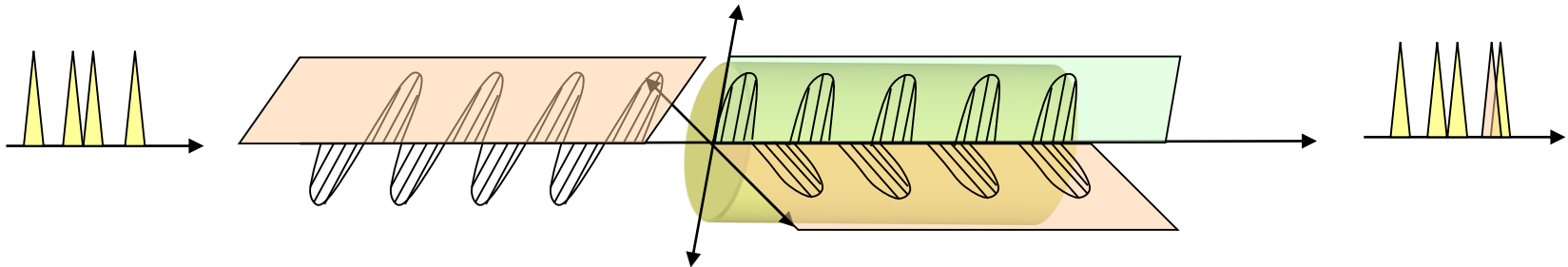
160km



分散シフトファイバ仕様

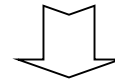
タイプ	屈折率分布	電界分布	$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$ @ 1550nm	MFD (μm) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm ² /km) @ 1550nm
標準SMF			80~85	10	+17	0.06
階段型 DSF			40~50	7.5~8.5	-5~+5	0.07~0.1

偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion, PMD)



- ・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

● PMD制限
バイナリ・コード

bit rate	PMD制限距離
20Gbps	520km
40Gbps	130km
100Gbps	21km

PMDの面では、伝送帯域40Gbps以上は厳しい

● 波形歪の原因

① 波長分散

$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$

② 偏波モード分散

PMDによる波形歪は距離のルートに比例（比例定数をCとおく）

➡ 1タイムスロットの一定割合（kとおく）以内が伝送制限とすると、

$$\frac{k}{B} \geq C\sqrt{L}$$

$$B\sqrt{L} \leq \frac{k}{C} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$