第7回

光ファイバのモード特性(偏波)

講義スケジュール(1)

植之原	日付	教科書	内容
第1回	11/30	OCW-i掲載資料(第1回)の精読と理解	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	12/ 4	OCW-i掲載資料(第2回)の精読と理解	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	12/ 7	OCW-i掲載資料(第3回)の精読・PN符号の説明	光変調符号
第4回	12/11	OCW-i掲載資料(第4回)の精読・信号の数式・スペクトル表現	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	12/14	OCW-i掲載資料(第5回)の精読・機能ブロックの理解	光変復調技術 (デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	12/18	OCW-i掲載資料(第6回)の精読・波動方程式の解法	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	12/21	OCW-i掲載資料(第7回)の精読・モードおよび偏波状態の理解	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/ 25	OCW-i掲載資料(第8回)の精読・分散と帯域の関係式	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)

小山	日付	教科書	内容
第9回	1/11	OCW-i掲載資料(第9回)の精読・分散補償の概念の理解	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	1/15	OCW-i掲載資料(第10回)の精読・動作原理の説明	光増幅器
第11回	1/18	OCW-i掲載資料(第11回)の精読・ビット誤り率の計算	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/22	OCW-i掲載資料(第12回)の精読・ビット誤り率の相対比較	ビット誤り率 (コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/25	OCW-i掲載資料(第13回)の精読・WDMの性能的課題	波長多重(WDM)伝送 (分散マネジメント技術)
第14回	1/29	OCW-i掲載資料(第14回)の精読・WDMの変調方式による性能差の理解	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/ 1	OCW-i掲載資料(第15回)の精読・理解	光スイッチング技術・ 最新の光通信関連技術

偏波

光ファイバ中の偏波状態の変化

- 基本モード（$HE_{1,1}$）は真円コアに対しては中心対称であり偏波状態は縮退する（伝搬定数が等しい）。
- 実際は製造上の非対称性、外部応力により直交偏波間に屈折率差を生ずる（複屈折性）。

⇒ 伝搬とともに直交偏波間に遅延を生じ、偏波面が直線→楕円→直線→楕円→と変化

國分泰雄著 『光波工学』 共立出版 pp. 178図6.10より

偏波の状態の表現方法（1）

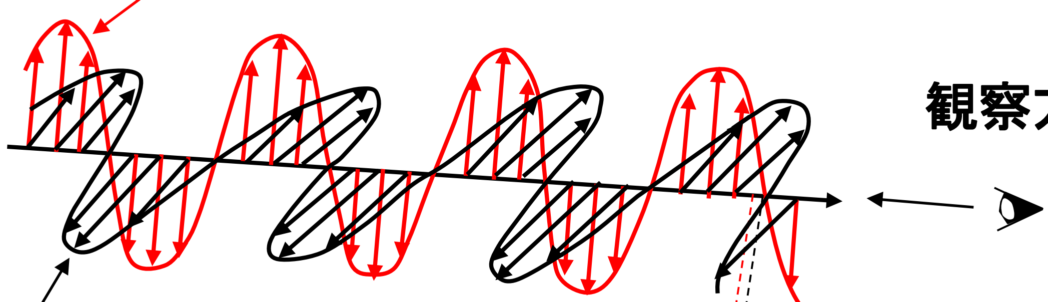
- 直線偏波、円偏波、楕円偏波
- 右回り偏波、左回り偏波

光が進む方向から逆に観察したときに電界の描く軌跡の形状、変化の方向

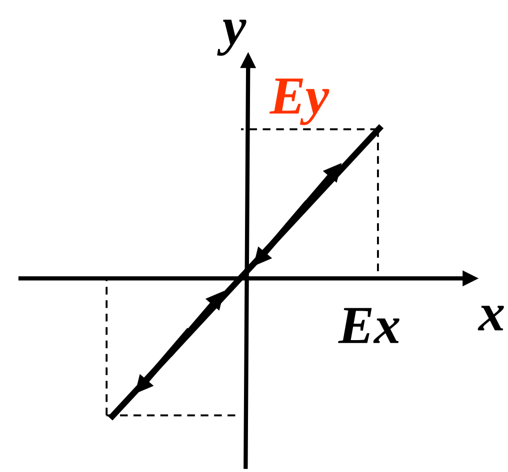
水平偏波・垂直偏波に分解したときの各偏波成分の振幅と位相ずれにより偏波状態が決定される。

直線偏波 $(\delta = 0)$

垂直偏波成分（振幅Ey）



観察方向



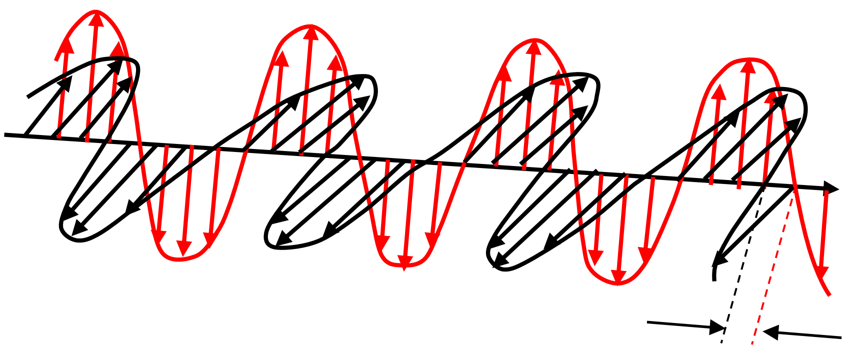
水平偏波成分（振幅Ex）

水平・垂直偏波間の位相ずれδ

偏波の状態の表現方法(2)

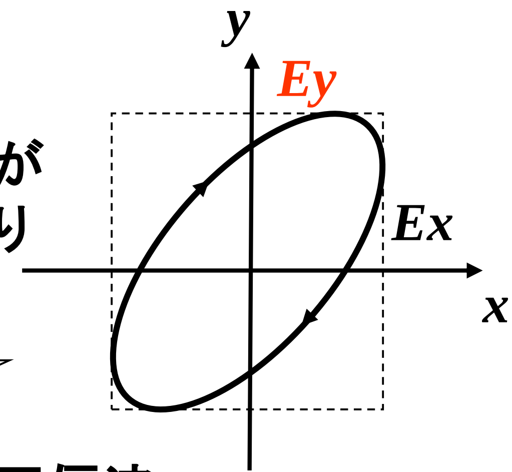
楕円偏波

$0<\delta<\pi$ （垂直偏波の位相が進む）



$\delta=\delta y-\delta x$

軌跡が
右回り



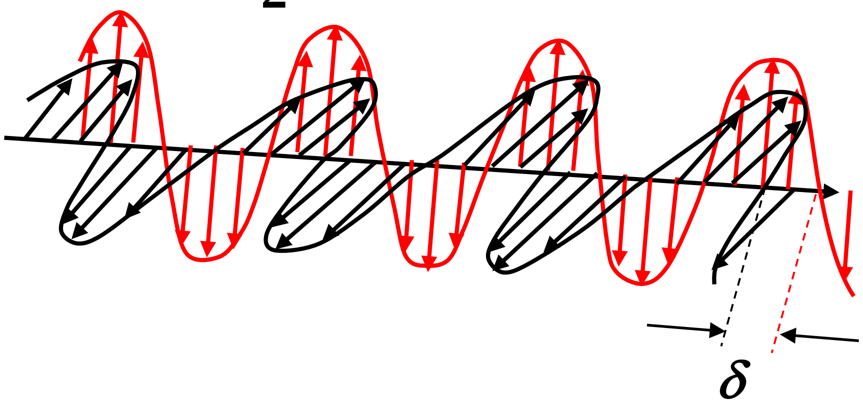
右回り楕円偏波

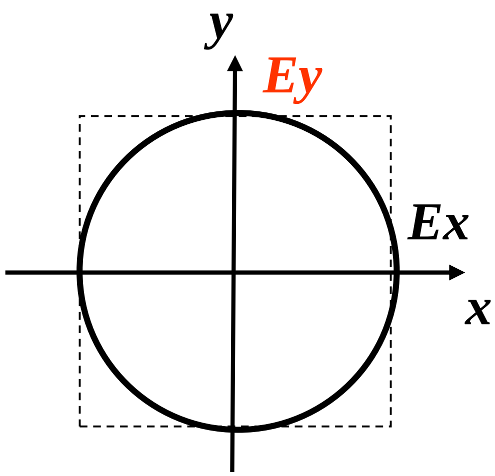
$-\pi<\delta<0$ (垂直偏波の位相が遅れる) :左回り楕円偏波

偏波の状態の表現方法(3)

円偏波

$\delta = \pm\frac{\pi}{2}$　かつ$Ex = Ey$





$\delta = \frac{\pi}{2}$　:右回り円偏波

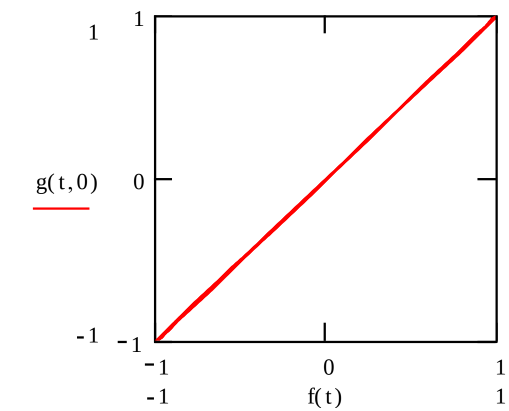
$\delta = -\frac{\pi}{2}$　:左回り円偏波

偏波間の位相ずれと偏波状態

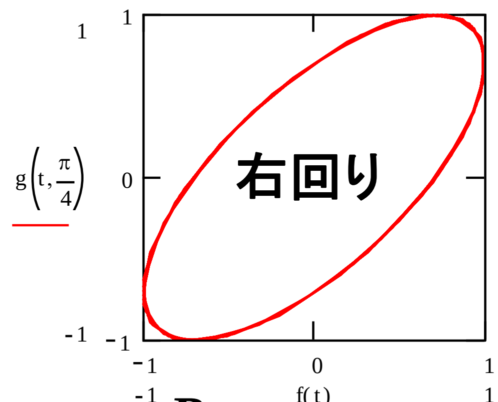
$$f(t) = A\cos\omega t$$
$$g(t) = B\cos(\omega t + \delta)$$

とおき、t を変化させたときの$f(t)$ ー $g(t)$の軌跡を計算

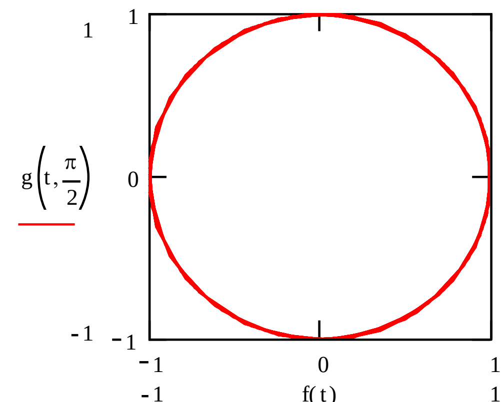
$$\frac{B}{A} = 1, \delta = 0$$



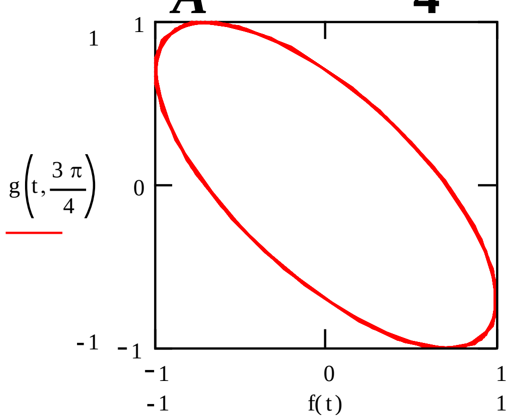
$$\frac{B}{A} = 1, \delta = \frac{\pi}{4}$$



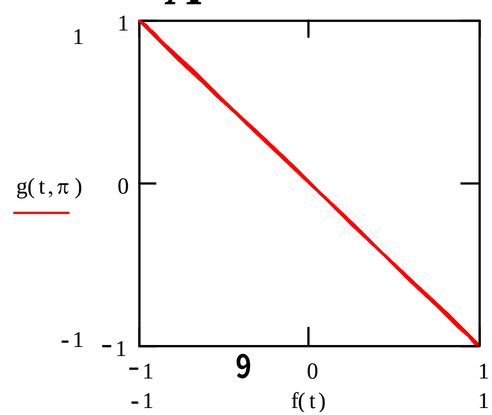
$$\frac{B}{A} = 1, \delta = \frac{\pi}{2}$$



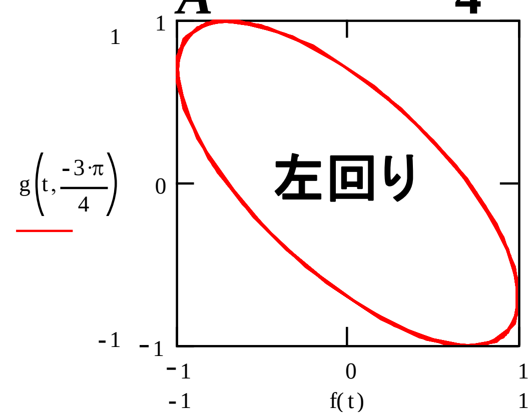
$$\frac{B}{A} = 1, \delta = \frac{3\pi}{4}$$



$$\frac{B}{A} = 1, \delta = \pi$$



$$\frac{B}{A} = 1, \delta = -\frac{3\pi}{4}$$



偏波状態の数式表現(1)

$$Ex = Ax\cos(\omega t - \beta z) \quad (7.1)$$
$$Ey = Ay\cos(\omega t - \beta z + \delta) \quad (7.2)$$

とおく。

式(7.1)より、

$$\cos(\omega t - \beta z) = \frac{Ex}{Ax} \quad (7.3)$$

式(7.2)より、

$$Ey = Ay\{\cos(\omega t - \beta z)\cos\delta - \sin(\omega t - \beta z)\sin\delta\}$$

$$\sin(\omega t - \beta z) = \frac{-\frac{Ey}{Ay} + \cos(\omega t - \beta z)\cos\delta}{\sin\delta} = \frac{-\frac{Ey}{Ay} + \frac{Ex}{Ax}\cos\delta}{\sin\delta} \quad (7.4)$$

$\cos^2(\omega t - \beta z) + \sin^2(\omega t - \beta z) = 1$ に式(7.3)、(7.4)を代入

偏波状態の数式表現(2)

$$\left(\frac{Ex}{Ax}\right)^2+\left(\frac{-\frac{Ey}{Ay}+\frac{Ex}{Ax}\cos\delta}{\sin\delta}\right)^2=1$$

よって、

$$\boxed{\left(\frac{Ex}{Ax}\right)^2+\left(\frac{Ey}{Ay}\right)^2-2\left(\frac{Ex}{Ax}\right)\left(\frac{Ey}{Ay}\right)\cos\delta=\sin^2\delta} \qquad (7.5)$$

楕円の式

$\delta=0$ のとき、

$$\left(\frac{Ex}{Ax}\right)^2+\left(\frac{Ey}{Ay}\right)^2-2\left(\frac{Ex}{Ax}\right)\left(\frac{Ey}{Ay}\right)=0$$

$$\therefore Ey=\frac{Ay}{Ax}Ex$$

直線偏波

$\delta=\pi$ のとき、

$$\left(\frac{Ex}{Ax}\right)^2+\left(\frac{Ey}{Ay}\right)^2+2\left(\frac{Ex}{Ax}\right)\left(\frac{Ey}{Ay}\right)=0$$

$$\therefore Ey=-\frac{Ay}{Ax}Ex$$

直線偏波

偏波状態の数式表現(3)

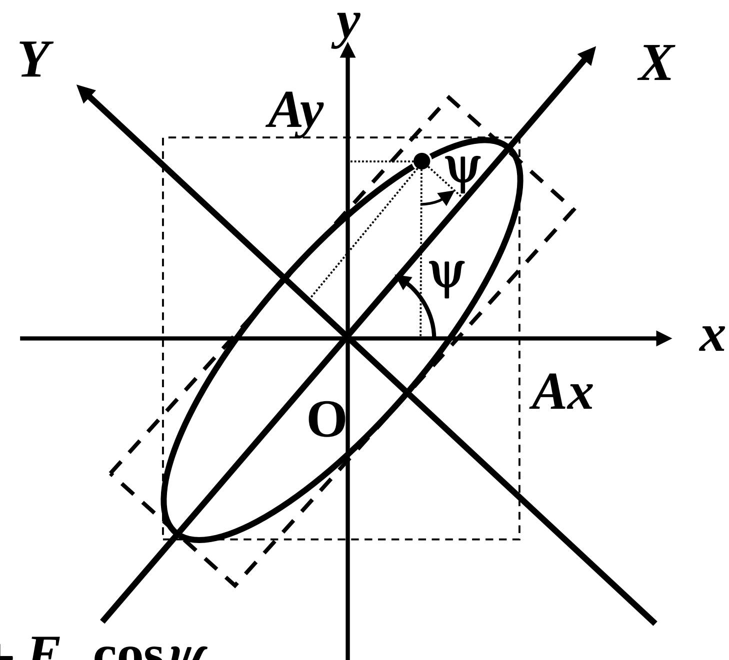
$\delta = \frac{\pi}{2}$ のとき、 $(\frac{Ex}{Ax})^2 + (\frac{Ey}{Ay})^2 = 1$ 　軸が水平・垂直方向を向いた楕円

$\delta = \frac{\pi}{2}, Ax = Ay$ のとき、 $Ex^2 + Ey^2 = Ax^2$ 　円

偏波状態の数式表現(4)

楕円が水平・垂直軸方向を向くように
座標軸を回転させる。

$$\left.\begin{aligned} Ex &= E_X \cos\psi - E_Y \sin\psi \\ Ey &= E_X \sin\psi + E_Y \cos\psi \end{aligned}\right\} \quad (7.6)$$



を式(7.5)に代入する。

$$\left(\frac{E_X \cos\psi - E_Y \sin\psi}{Ax}\right)^2 + \left(\frac{E_X \sin\psi + E_Y \cos\psi}{Ay}\right)^2$$

$$-2\left(\frac{E_X \cos\psi - E_Y \sin\psi}{Ax}\right)\left(\frac{E_X \sin\psi + E_Y \cos\psi}{Ay}\right)\cos\delta = \sin^2\delta$$

$$\left(\frac{\cos^2\psi}{Ax^2} + \frac{\sin^2\psi}{Ay^2} - 2\frac{\sin\psi\cos\psi\cos\delta}{AxAy}\right)E_X{}^2 + \left(\frac{\sin^2\psi}{Ax^2} + \frac{\cos^2\psi}{Ay^2} + 2\frac{\sin\psi\cos\psi\cos\delta}{AxAy}\right)E_Y{}^2$$

$$+2\left\{\left(\frac{-1}{Ax^2} + \frac{1}{Ay^2}\right)\sin\psi\cos\psi + \frac{-\cos^2\psi + \sin^2\psi}{AxAy}\cos\delta\right)E_X E_Y = \sin^2\delta \qquad (7.7)$$

偏波状態の数式表現(5)

座標変換後、$E_X E_Y$成分は0になるので、

$$\left(\frac{-1}{Ax^2}+\frac{1}{Ay^2}\right)\sin\psi\cos\psi+\frac{-\cos^2\psi+\sin^2\psi}{AxAy}\cos\delta=0 \qquad (7.8)$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{Ax^2-Ay^2}{Ax^2Ay^2}\right)\sin 2\psi-\frac{\cos 2\psi}{AxAy}\cos\delta=0$$

$$\tan 2\psi=\frac{\sin 2\psi}{\cos 2\psi}=\frac{2AxAy\cos\delta}{Ax^2-Ay^2}$$

$$\boxed{\therefore \psi=\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2AxAy\cos\delta}{Ax^2-Ay^2}\right)} \qquad (7.9)$$

主にAx, Ayの比率の影響を表す。

偏波状態の数式表現(6)

一方、
$$\left.\begin{aligned} E_X &= a\cos(\omega t - \beta z + \delta_0) \\ E_Y &= \pm b\sin(\omega t - \beta z + \delta_0) \end{aligned}\right\} \quad (7.10)$$

とおく(X-Y軸が楕円の長軸・短軸に平行のため、式(7.5)のδ=π/2に相当し、cos, sinで表現したδは同じとなる)。

式(7.6)より

$$\left.\begin{aligned} E_X &= E_x\cos\psi + E_y\sin\psi \\ E_Y &= -E_x\sin\psi + E_y\cos\psi \end{aligned}\right\} \quad (7.11)$$

なので、式(7.1)、(7.2)、(7.10)、(7.11)より

$$a\cos(\omega t - \beta z + \delta_0) = \{A_x\cos(\omega t - \beta z)\}\cos\psi + A_y\cos(\omega t - \beta z + \delta)\sin\psi$$

$$\begin{aligned} a\cos(\omega t - \beta z)\cos\delta_0 - a\sin(\omega t - \beta z)\sin\delta_0 &= A_x\cos(\omega t - \beta z)\cos\psi + A_y\cos(\omega t - \beta z + \delta)\sin\psi \\ &= A_x\cos(\omega t - \beta z)\cos\psi + A_y\{\cos(\omega t - \beta z)\cos\delta - \sin(\omega t - \beta z)\sin\delta)\}\sin\psi \\ &= (A_x\cos\psi + A_y\sin\psi\cos\delta)\cos(\omega t - \beta z) - A_y\sin\psi\sin\delta\sin(\omega t - \beta z) \end{aligned}$$

任意のωt-βzに対して成立するために、cos(ωt-bz), sin(ωt-bz)の係数が等しいと考える。

偏波状態の数式表現(7)

$$a\cos\delta_0 = A_x\cos\psi + A_y\sin\psi\cos\delta \quad (7.12)$$

$$a\sin\delta_0 = A_y\sin\psi\cos\delta \quad (7.13)$$

また

$$\pm b\sin(\omega t - \beta z + \delta_0) = -A_x\cos(\omega t - \beta z)\sin\psi + A_y\cos(\omega t - \beta z + \delta)\cos\psi$$

$$\pm\left(b\sin(\omega t - \beta z)\cos\delta_0 + b\cos(\omega t - \beta z)\sin\delta_0\right) = -A_x\sin\psi\cos(\omega t - \beta z) + A_y\left\{\cos\delta\cos(\omega t - \beta z) - \sin\delta\sin(\omega t - \beta z)\right\}\cos\psi$$

$$= \left(-A_x\sin\psi + A_y\cos\psi\cos\delta\right)\cos(\omega t - \beta z) - A_y\sin\delta\cos\psi\sin(\omega t - \beta z)$$

cos(ωt-bz), sin(ωt-bz)の係数が等しいと考えて、

$$\pm b\cos\delta_0 = -A_y\sin\delta\cos\psi \quad (7.14)$$

$$\pm b\sin\delta_0 = -A_x\sin\psi + A_y\cos\psi\cos\delta \quad (7.15)$$

$(7.12)^2+(7.13)^2$

$$a^2(\cos^2\delta_0 + \sin^2\delta_0) = \left(A_x\cos\psi + A_y\sin\psi\cos\delta\right)^2 + \left(A_y\sin\psi\sin\delta\right)^2$$

$$a^2 = A_x{}^2\cos^2\psi + A_y{}^2\sin^2\psi + 2A_xA_y\sin\psi\cos\psi\cos\delta \quad (7.16)$$

$(7.14)^2+(7.15)^2$

$$b^2(\cos^2\delta_0 + \sin^2\delta_0) = \left(-A_y\cos\psi\sin\delta\right)^2 + \left(-A_x\sin\psi + A_y\cos\psi\cos\delta\right)^2$$

$$b^2 = A_x{}^2\sin^2\psi + A_y{}^2\cos^2\psi - 2A_xA_y\sin\psi\cos\psi\cos\delta \quad (7.17)$$

偏波状態の数式表現(8)

(7.16)+(7.17)より、

$$a^2+b^2=A_x{}^2+A_y{}^2 \qquad (7.18)$$

(7.12)×(7.14)＋(7.13)×(7.15)

$$\begin{aligned}&\pm ab\left(\cos^2\delta_0+\sin^2\delta_0\right)\\&=\left(A_x\cos\psi+A_y\sin\psi\cos\delta\right)\left(-A_y\sin\delta\cos\psi\right)+\left(A_y\sin\delta\sin\psi\right)\left(-A_x\sin\psi+A_y\cos\psi\cos\delta\right)\\&=-A_xA_y\sin\delta\left(\cos^2\psi+\sin^2\psi\right)\end{aligned}$$

$$\therefore \pm ab=-A_xA_y\sin\delta \qquad (7.19)$$

(7.18)÷(7.19) $\quad \therefore \dfrac{\pm ab}{a^2+b^2}=-\dfrac{A_xA_y}{A_x{}^2+A_y{}^2}\sin\delta$

$\tan\chi=\mp\dfrac{b}{a}$ とおくと(ただし $-\dfrac{\pi}{4}\le\chi\le\dfrac{\pi}{4}$)、

$$\therefore \frac{\mp ab}{a^2+b^2}=\mp\frac{\left(\frac{b}{a}\right)}{1+\left(\frac{b}{a}\right)^2}=\frac{\tan\chi}{1+\tan^2\chi}=\frac{\sin\chi\tan\chi}{\cos\chi}\cos^2\chi$$

$$=\sin\chi\cos\chi$$

偏波状態の数式表現(9)

$$\frac{1}{2}\sin 2\chi = \frac{A_x A_y}{{A_x}^2 + {A_y}^2}\sin\delta$$

$$\chi = \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{2AxAy\sin\delta}{Ax^2 + Ay^2}\right)$$

よって、式(7.5)は以下のようにできる。

$$\boxed{\frac{{E_X}^2}{A^2} + \frac{{E_Y}^2}{B^2} = 1}$$

ただし

$$\left.\begin{aligned} A &= \sqrt{Ax^2 + Ay^2}\cos\chi \\ B &= \sqrt{Ax^2 + Ay^2}\sin\chi \\ \chi &= \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{2AxAy\sin\delta}{Ax^2 + Ay^2}\right) \end{aligned}\right\}$$

主にδの影響を表す。

(7.20)

(参考)『光波工学』 栖原 敏明著 コロナ社

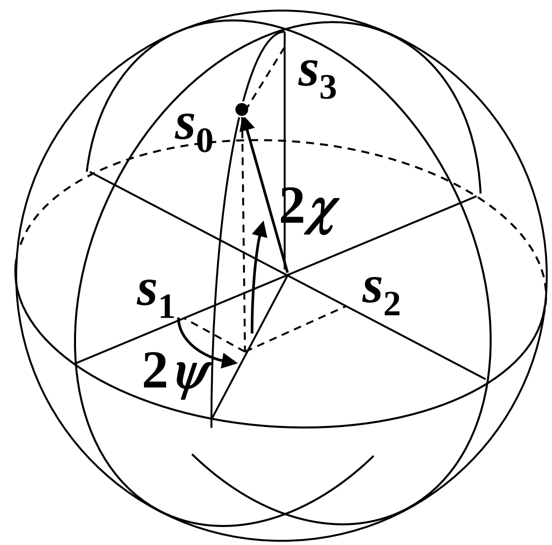
$-\frac{\pi}{4} \le \chi < 0$ のとき $\delta < 0$ (左回り)、 $0 \le \chi \le \frac{\pi}{4}$ のとき $\delta \ge 0$ (右回り)

ストークスパラメータ

偏光状態は3つのパラメータAx, Ay, δで表現されるがδ の直接的な観測が困難。

⇨ 偏光子、波長板などで測定可能な値を用いた間接的な測定

$$\left.\begin{aligned} s_0 &= Ax^2 + Ay^2 \\ s_1 &= Ax^2 - Ay^2 \\ s_2 &= 2AxAy\cos\delta \\ s_3 &= 2AxAy\sin\delta \\ &\text{ただし} s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \end{aligned}\right\} \quad (7.21)$$



式(7.9)、(7.20)、(7.21)より

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= s_0\cos 2\chi\cos 2\psi \\ s_2 &= s_0\cos 2\chi\sin 2\psi \\ s_3 &= s_0\sin 2\chi \end{aligned}\right\} \quad (7.22)$$

s_0：光パワーに比例
2ψ：電界の長短軸の傾き（＝偏光子透過光パワー最大の角度）
2χ：楕円率（＝偏光子透過光パワー最大と最小の比の正接）

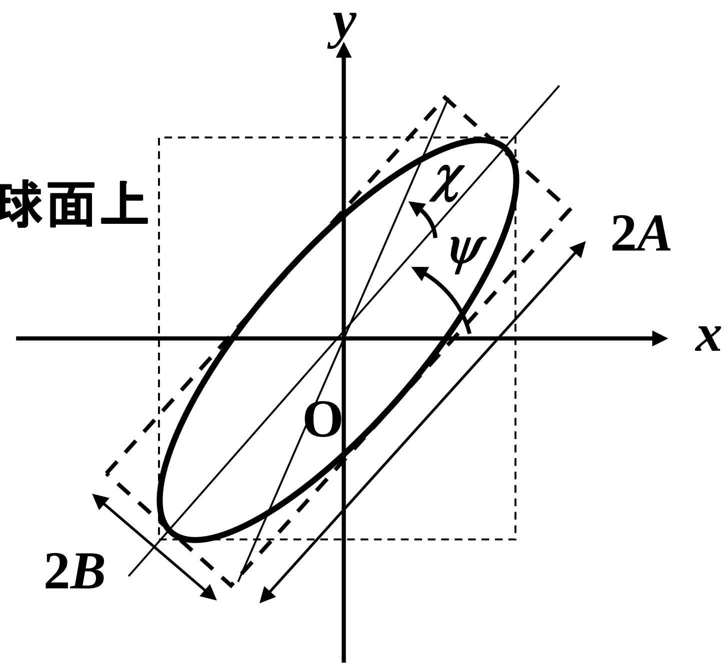
} 観測可能

ポアンカレ球

楕円の主軸が水平軸となす角 ψ と

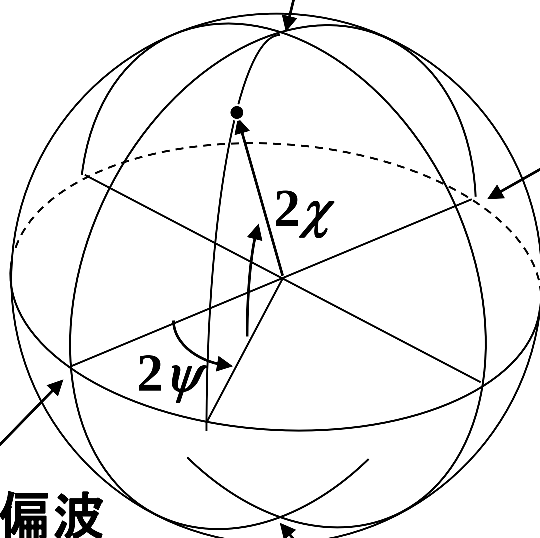
$|\chi| = \tan^{-1}(\frac{B}{A})$ をパラメータとして球面上

に偏波状態を表す。



右回り円偏波

$\chi = 45^\circ, \psi = arb.$



垂直直線偏波

$\chi = 90^\circ, \psi = 90^\circ$

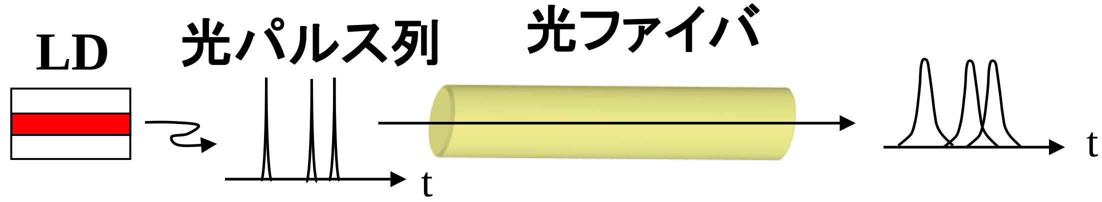
水平直線偏波

$\chi = 0^\circ, \psi = 0^\circ$

左回り円偏波 $\chi = -45^\circ, \psi = arb.$

分散特性

光ファイバ中の信号伝搬（1）



入射光波形

$$E(x,y,0;t)=A(x,y,0;t)e^{j\omega_0 t} \quad \textbf{(7.23)}$$

(以下x, y座標は省略)

フーリエ変換スペクトルは、

$$E_F(0;\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}E(0;t)e^{-j\omega t}dt=\int_{-\infty}^{\infty}A(0;t)e^{-j(\omega-\omega_0)t}dt=A_F(0;\omega-\omega_0) \quad \textbf{(7.24)}$$

距離z伝搬した時、位相変化exp[-jβz]（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、

$$A_F(z;\omega)=A_F(0;\omega-\omega_0)\exp[-j\beta z] \quad \textbf{(7.25)}$$

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、

$$E(z;t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}A_F(z;\omega)e^{j\omega t}d\omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}A_F(0;\omega-\omega_0)\exp[-j\beta z]e^{j\omega t}d\omega \quad \textbf{(7.26)}$$

$\omega-\omega_0=u$と変数変換して

$$E(z;t)=\frac{1}{2\pi}e^{j\omega_0 t}\int_{-\infty}^{\infty}A_F(0;u)\exp[j(ut-\beta(u)z)]du \quad \textbf{(7.27)}$$

βをω_0近傍でテーラー級数展開した式

$$\beta(\omega)=\beta(\omega_0)+\left.\frac{d\beta}{d\omega}\right|_{\omega_0}(\omega-\omega_0)+\frac{1}{2}\left.\frac{d^2\beta}{d\omega^2}\right|_{\omega_0}(\omega-\omega_0)^2+\cdots \quad \textbf{(7.28)}$$

をE(z;t)の式に代入

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

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

$$E(z;t)=\frac{1}{2\pi}e^{j[\omega_0 t-\beta(\omega_0)z]}\int_{-\infty}^{\infty}A_F(0;u)\exp[ju(t-\frac{z}{v_g})-j\frac{\beta''}{2}zu^2]du \quad \textbf{(7.29)}$$

光ファイバの分散の計算(1)

群遅延をテーラー級数展開して、

$$\tau(\omega) = \frac{L}{v_g} = L\frac{d\beta}{d\omega} = L[\frac{d\beta}{d\omega}\Big|_{\omega_0}(\omega-\omega_0) + \frac{d^2\beta}{d\omega^2}\Big|_{\omega_0}(\omega-\omega_0)^2 + \cdots \quad \textbf{(7.30)}$$

(7.30)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、

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{L}{c}\frac{d\beta}{dk} = \frac{L}{c}\frac{[n_2N_2 + (n_1N_1 - n_2N_2)(b + \frac{1}{2}V\frac{db}{dV})]}{[n_2{}^2 + (n_1{}^2 - n_2{}^2)b]^{1/2}} \quad \textbf{(7.31)}$$

ただし、

$$N_i = n_i + k\frac{dn_i}{dk}\Big|_{\omega=\omega_0} = n_i - \lambda\frac{dn_i}{d\lambda}\Big|_{\lambda=\lambda_0} \quad \textbf{(7.32)}$$

(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（Δ<<1）が成り立つ場合、(7.31)は

$$\tau \approx \frac{L}{c}[N_2 + (N_1 - N_2)\frac{d(Vb)}{dV}] \qquad (7.33)$$

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

$$\underbrace{\delta\tau}_{} = L\delta\lambda[\underbrace{(-\frac{1}{c\lambda_0})\{k\frac{dN_2}{dk} + (k\frac{dN_1}{dk} - k\frac{dN_2}{dk})(b + \frac{1}{2}V\frac{db}{dV})\}}_{\sigma_m\text{：材料分散}}$$

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

$$\underbrace{+(-\frac{1}{c\lambda_0})\frac{1}{2}\frac{(n_1N_1 - n_2N_2)^2}{n_2(n_1^2 - n_2^2)}V\frac{d^2(Vb)}{dV^2}}_{\sigma_w\text{：導波路分散}} \qquad (7.34)$$

光ファイバの材料分散

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

$$\Gamma = b + \frac{1}{2}V\frac{db}{dV} = \frac{1}{2}[b + \frac{d(Vb)}{dV}] \quad \textbf{(7.35)}$$

材料分散σ_mは以下で表される。

$$\sigma_m = -\frac{1}{c}[\Gamma\lambda\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} + (1-\Gamma)\lambda\frac{d^2 n_2}{d\lambda^2}]_{\lambda=\lambda_0} \quad \textbf{(7.36)}$$

セルマイヤーの式（Sellmeir's formula）

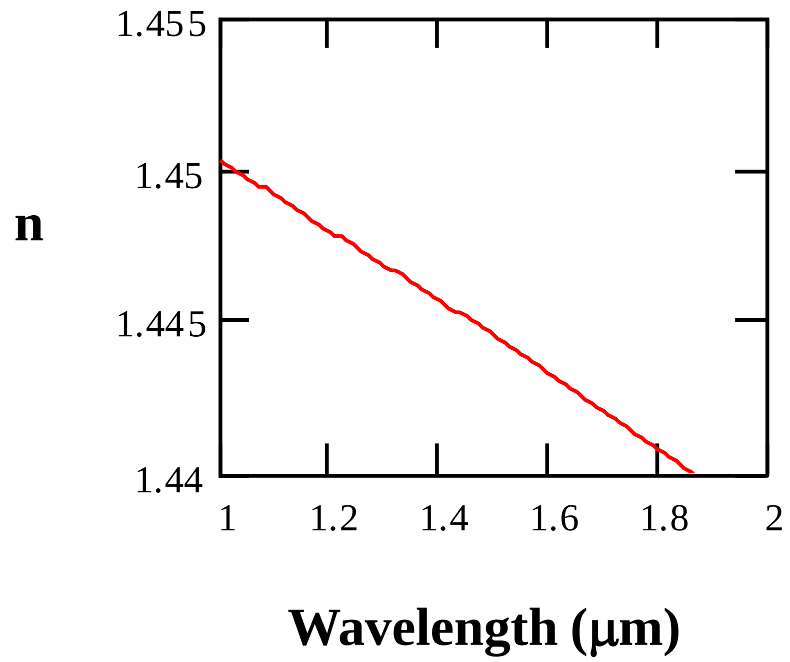
屈折率の波長依存性

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - (l_i)^2}$$

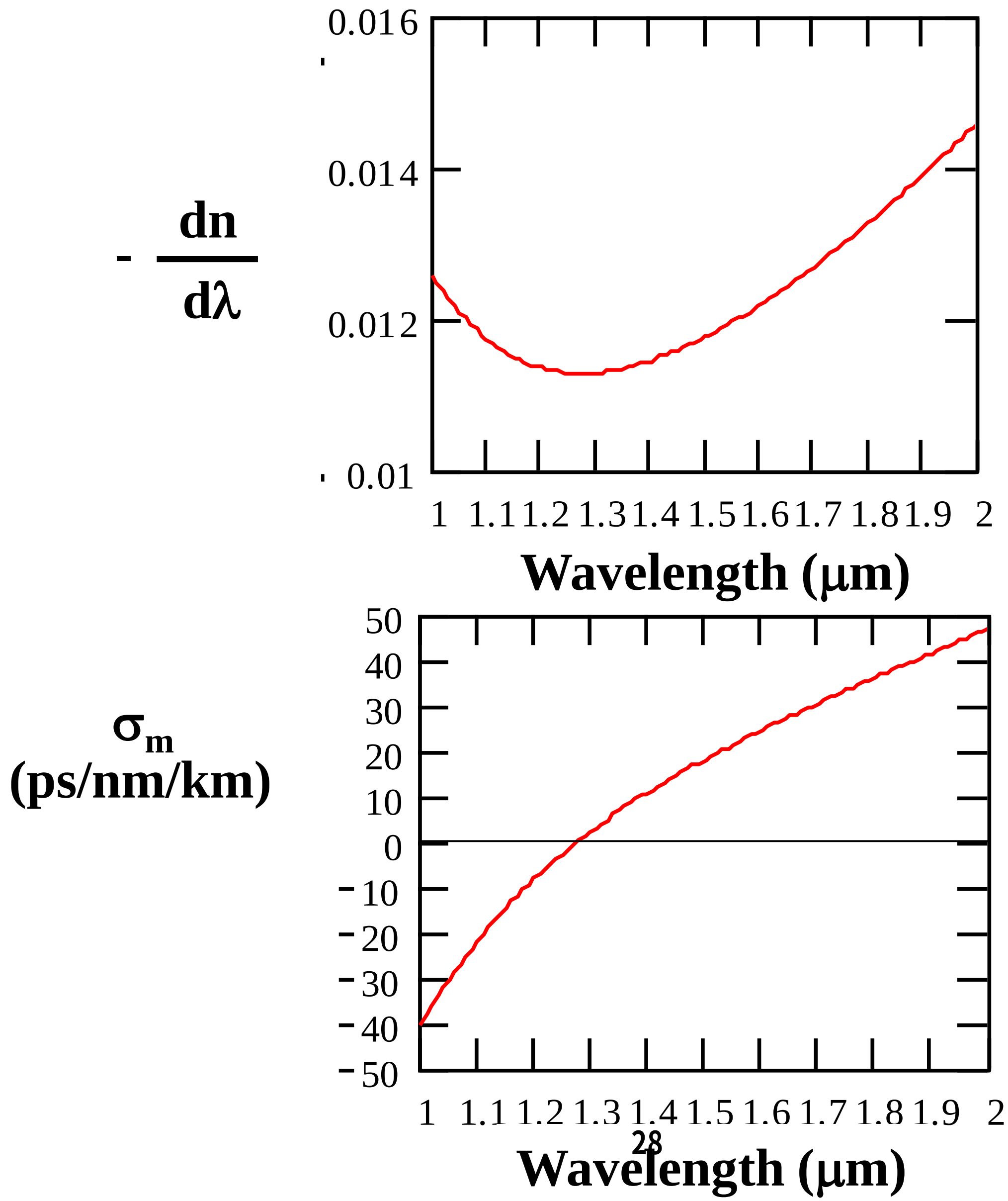
λ: [μm]単位

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



材料分散の計算結果


- dn/dλ
0.016
0.014
0.012
0.01
1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2
Wavelength (μm)
σm
(ps/nm/km)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2
Wavelength (μm)

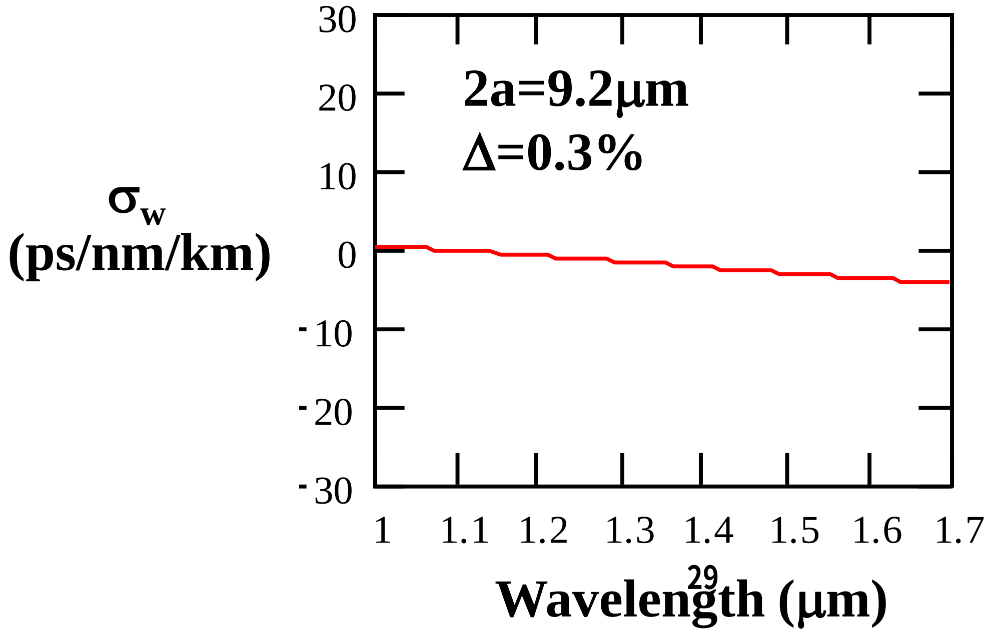
光ファイバの導波路分散

導波路分散σ_wは、

$$\sigma_w = -\frac{1}{c\lambda_0}\frac{1}{2}\frac{(n_1N_1 - n_2N_2)^2}{n_2(n_1^2 - n_2^2)}V\frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad \textbf{(7.37)}$$

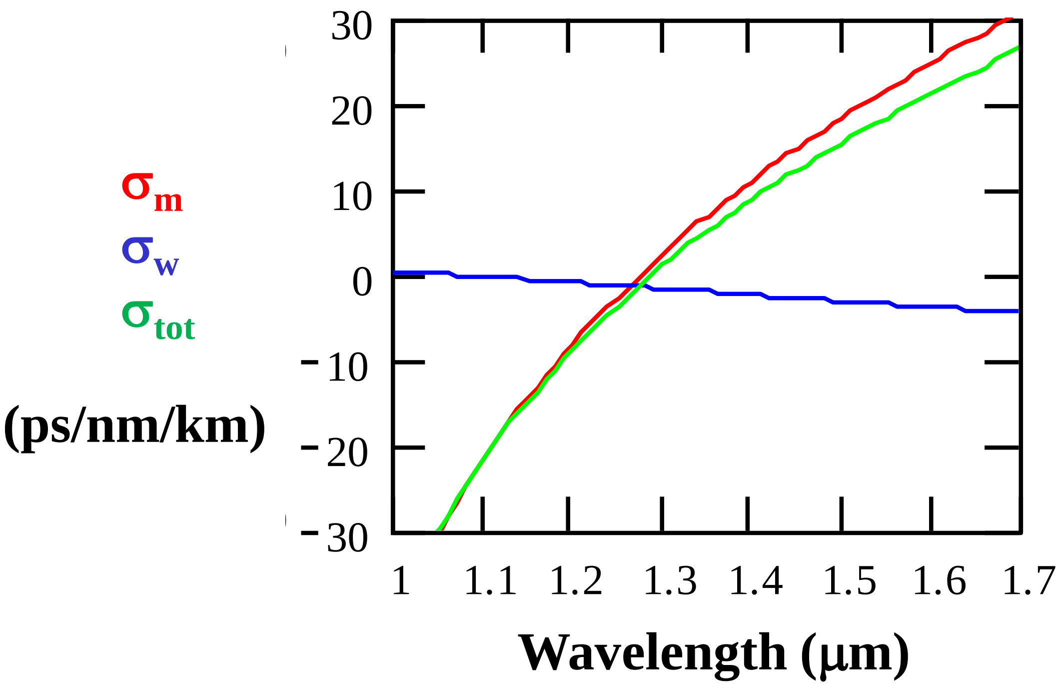
弱導波路近似（Δ<<1）が成り立つ場合は

$$\sigma_w \approx -\frac{1}{c\lambda}(N_1 - N_2)V\frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad \textbf{(7.38)}$$

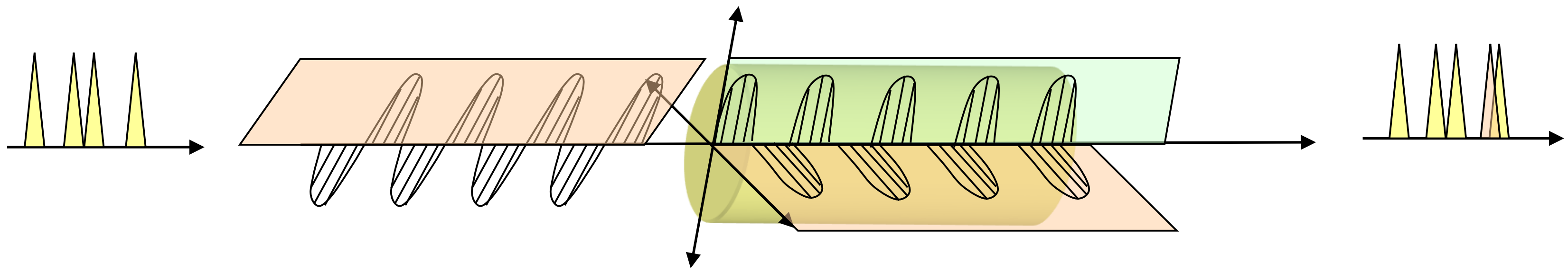


光ファイバの全分散

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



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：0.05ps/√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 → 0.02ps / √km以下が必要 @ 6,000km

PMDによる伝送距離制限

- **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