

第13回

波長多重(WDM)伝送 (分散マネジメント技術)

講義スケジュール(1)

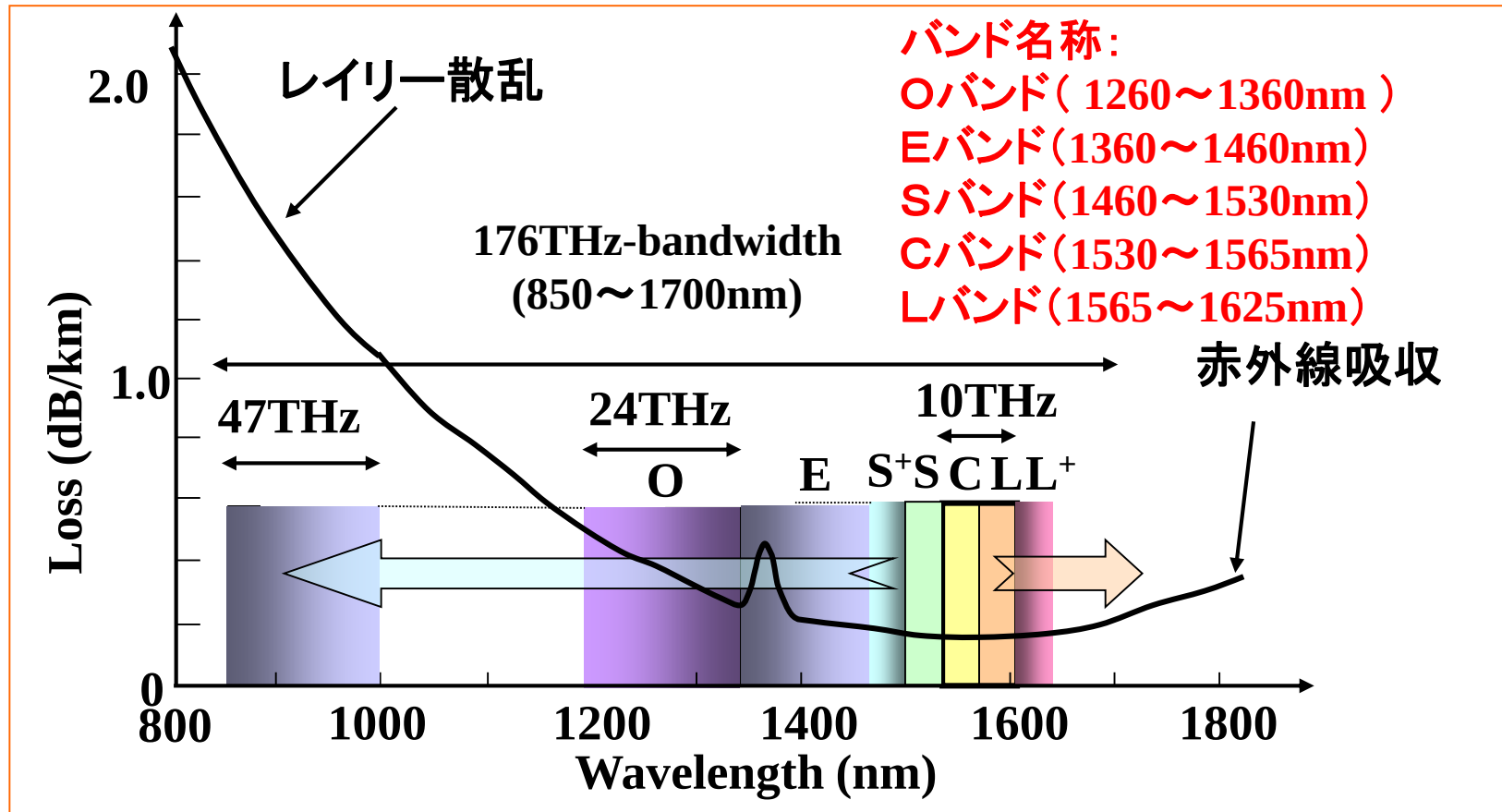
	日付	内容
第1回	10/6	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	10/13	光通信システム(メトロ・アクセス・LAN・インターコネクション)
第3回	10/20	光変調符号
第4回	10/27	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	11/10	光変復調技術(デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	11/17	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	11/24	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/1	ファイバの伝送特性(分散による伝送限界)

講義スケジュール(2)

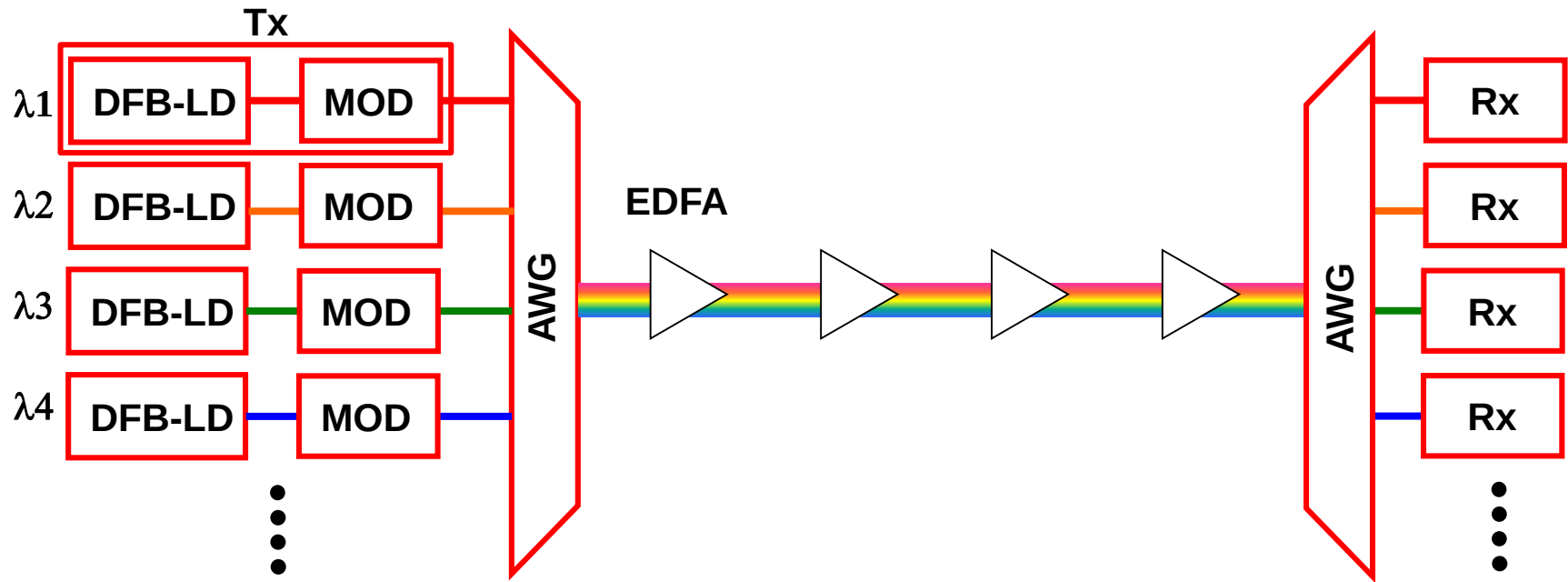
	日付	内容
第9回	12/8	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	12/15	光増幅器
第11回	12/22	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/5	ビット誤り率(コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/19	波長多重(WDM)伝送(分散マネジメント技術)
第14回	1/26	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/2	光スイッチング技術・最新の光通信関連技術

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

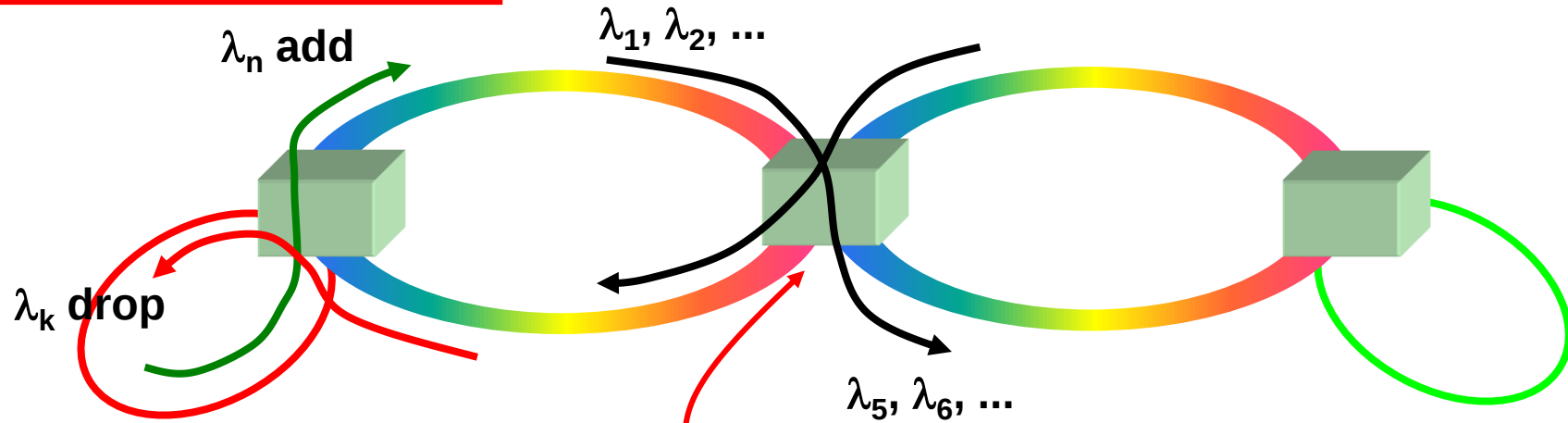
重要なポイント

- 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

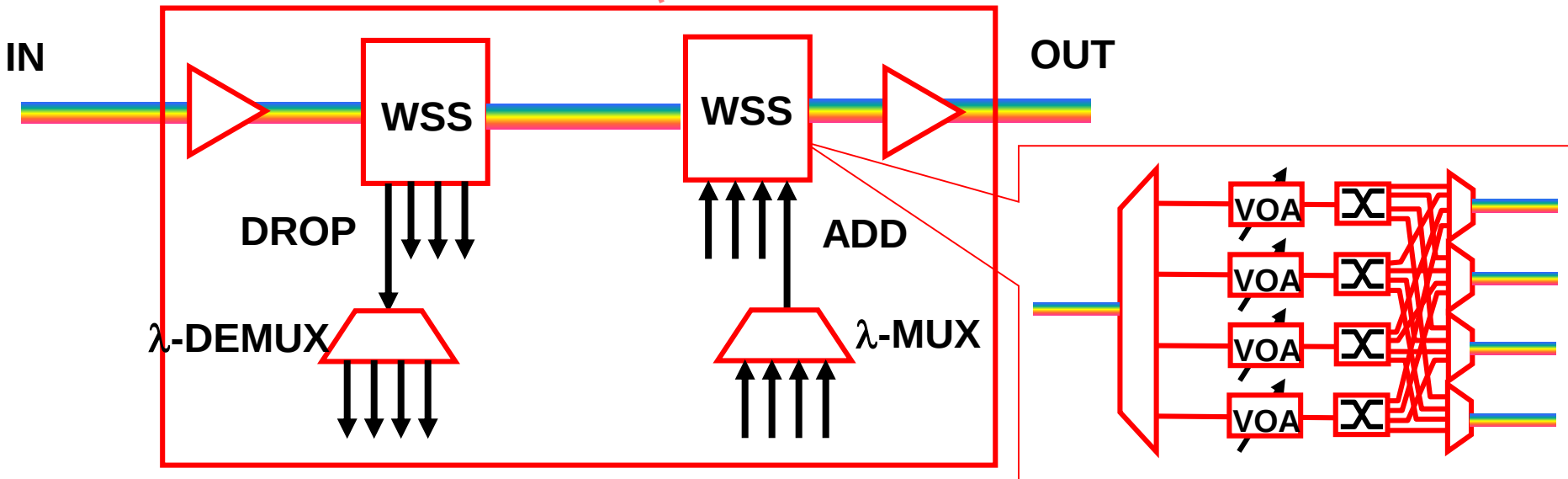
AWGを多段中継するリングネットワーク

多段フィルタ中継構成

Interconnected Ring Network Topology



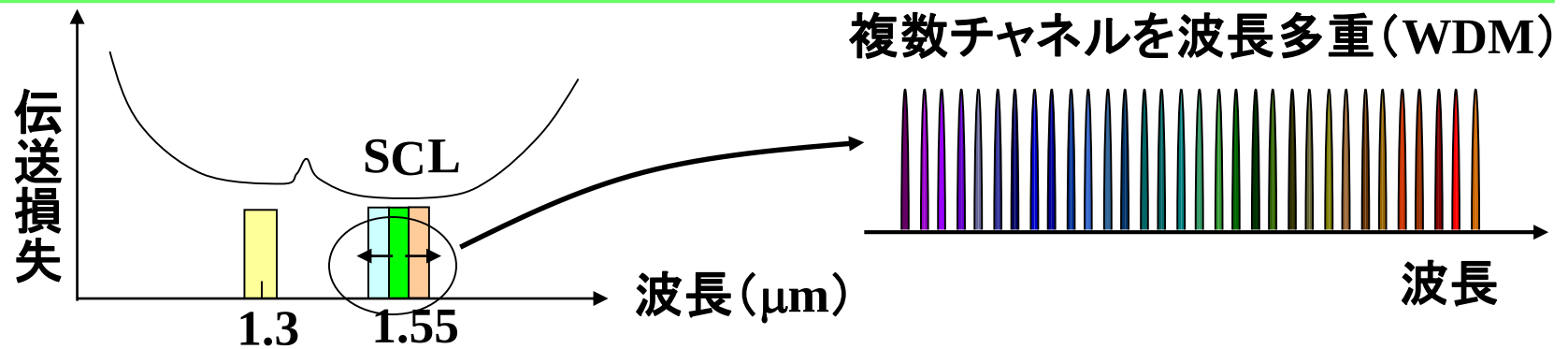
ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer



※ WSS : Wavelength Selective Switch

波長多重(WDM)と分散マネジメント

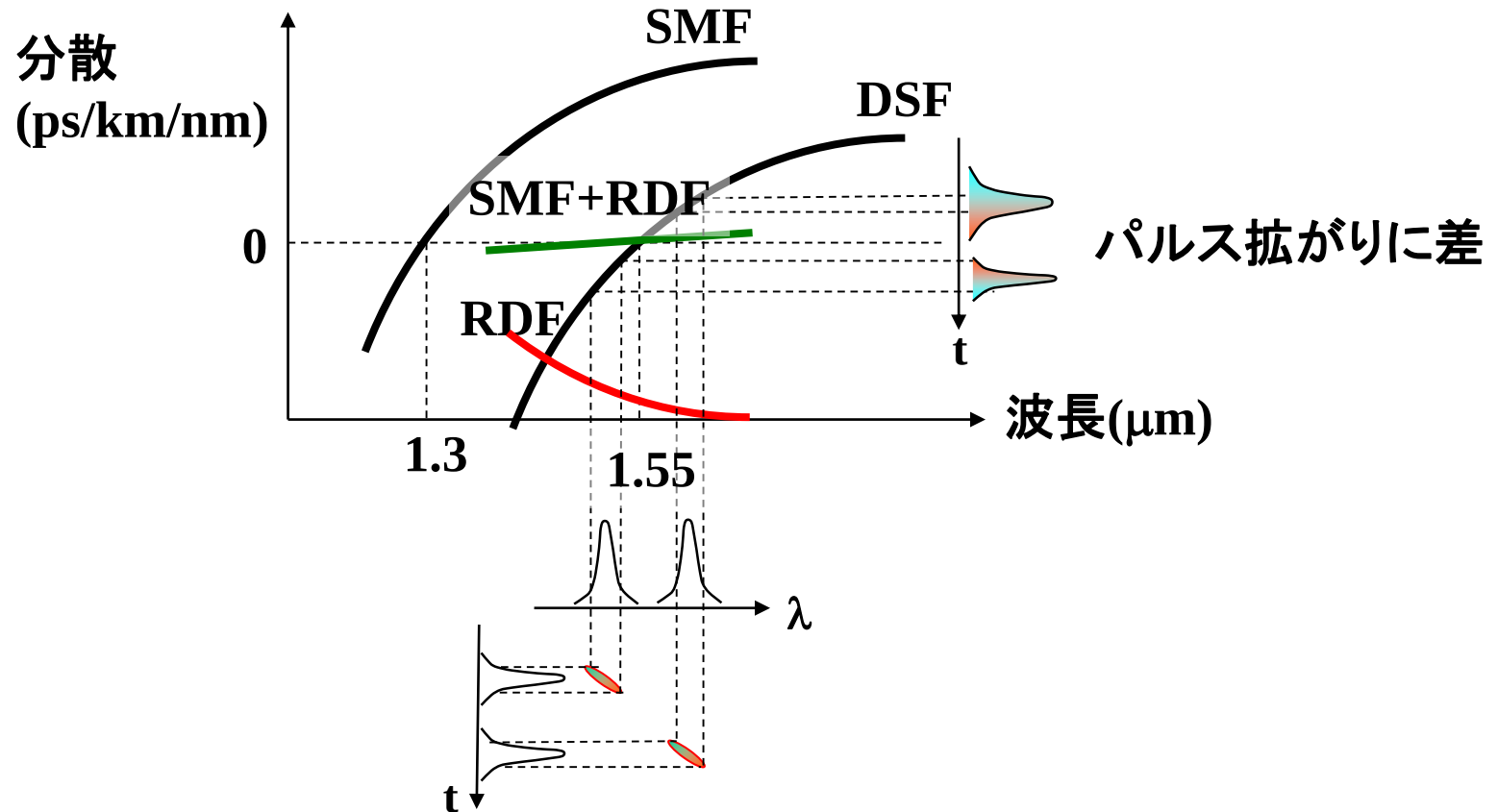
大容量化のための技術的アプローチ



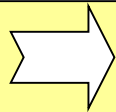
技術要素	現在の状況	課題	検討案
① 1波あたり伝送速度の高速化	10Gbps→40Gbps	高速電子回路の実現	InP系、SiGe系
② 使用波長帯域の広帯域化	S, C, Lバンドの使用 トレードオフ	誘導ラマン散乱によるパワーチャルト	分布ラマン増幅による光強度の補正
③ 多チャネル化	100GHz間隔 →50GHz間隔	変調周波数とのトレードオフ	CS-RZ, DQPSKなど狭帯域変調方式の検討

波長分散による影響

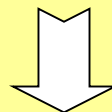
分散スロープによるWDM帯域の制限



WDM使用帯域の拡大



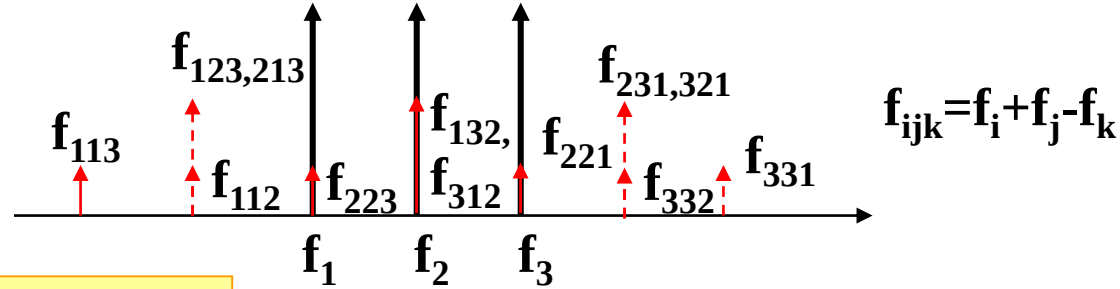
広い波長範囲でトータルの波長分散零の条件を満たしている必要がある。



波長分散の波長依存性(分散スロープ)の低減が重要

分散シフトファイバのWDM適用における課題

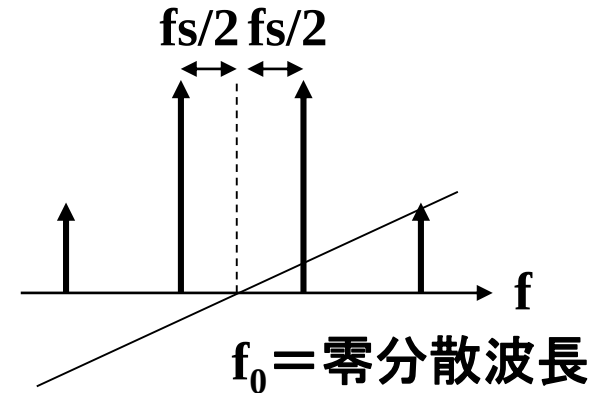
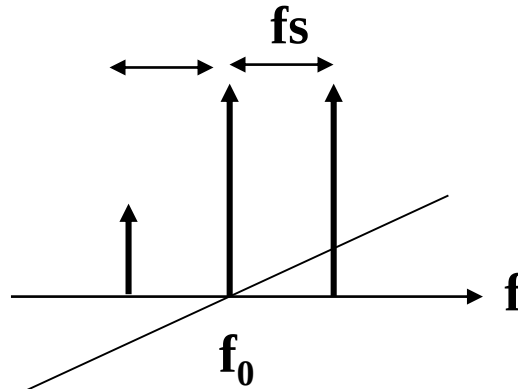
4光波混合の影響



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 B : FWMの縮退係数(ν がすべて異なれば6), $\chi_3[m^2/V^2]$ は3次非線形感受率

$$\kappa = \frac{32\pi^3}{n^2 \lambda \cdot c \cdot \epsilon_0} \left(\frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)$$
$$\eta_{ijk} = \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \right) \left[1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{\{1 - \exp(-\alpha L)\}^2} \right] \text{ (発生効率)}$$

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

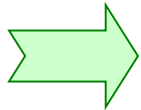
$$= \begin{cases} \frac{2\pi\lambda^2}{c} (\Delta\nu_{eq})^2 D & \text{(零分散波長と一致しない場合)} \\ \frac{\pi\lambda^4}{3c^2} \frac{dD}{d\lambda} \{ (\nu_{ijk} - \nu_0)^3 - (\nu_i - \nu_0)^3 - (\nu_j - \nu_0)^3 + (\nu_k - \nu_0)^3 \} & \text{(零分散波長と一致or近傍の場合)} \end{cases}$$
$$\Delta\nu_{eq} = \sqrt{|(\nu_i -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

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、

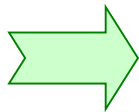
$$\Delta\nu_{\text{eq}} > 50\text{GHz} \text{にて } \eta_{ijk} < 1\%$$



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

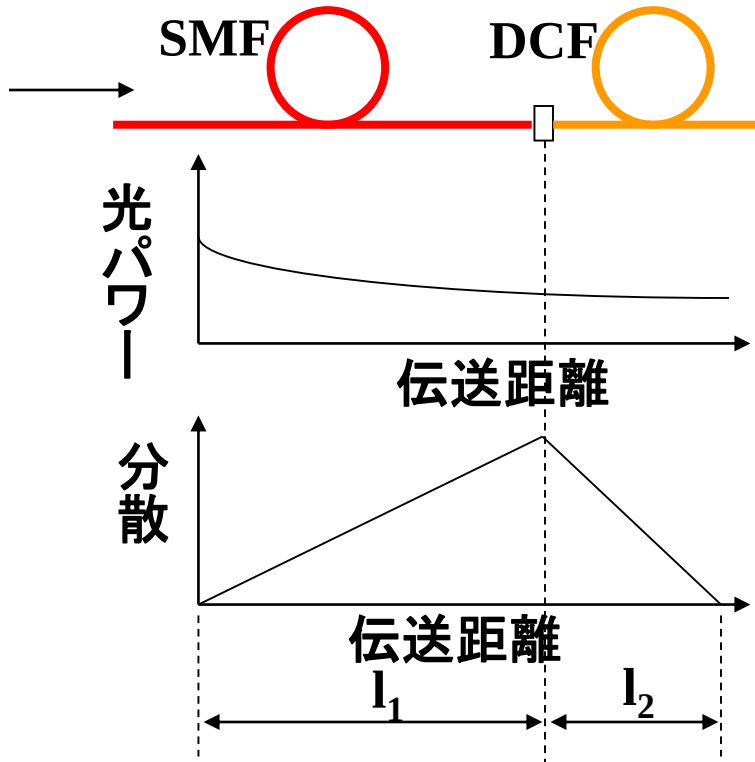
$\Delta\beta = 0$: 位相整合条件 を満たす



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

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)

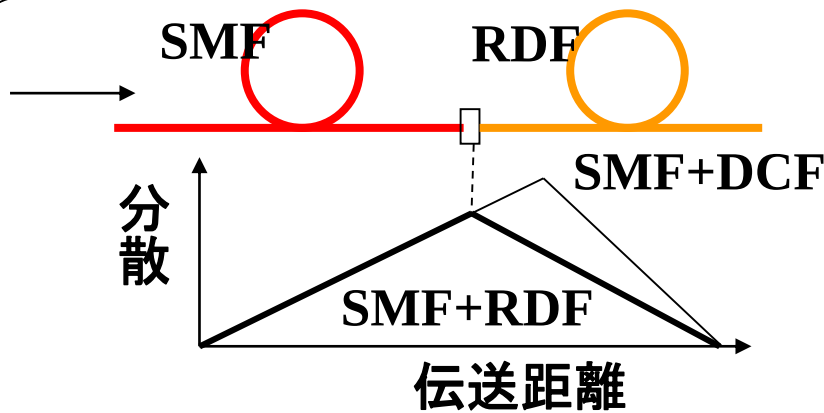


ポイント

- 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

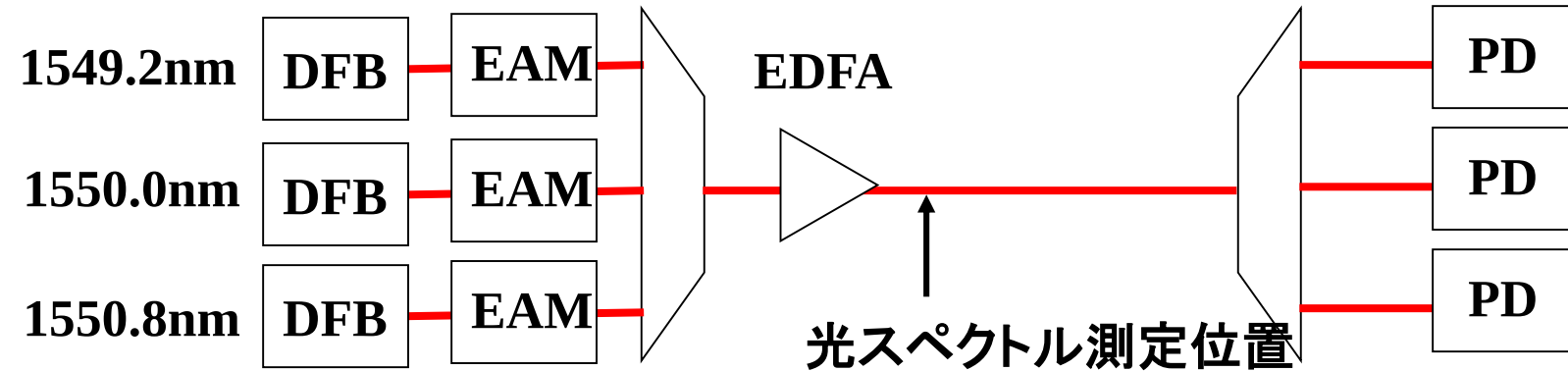
- ① DCFの伝送損失はSMFより大のため 伝送損失の低い純石英コアファイバ (PSCF) を使用し伝送路平均損失を低減



ポイント

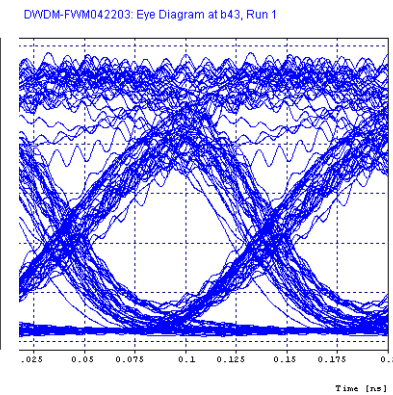
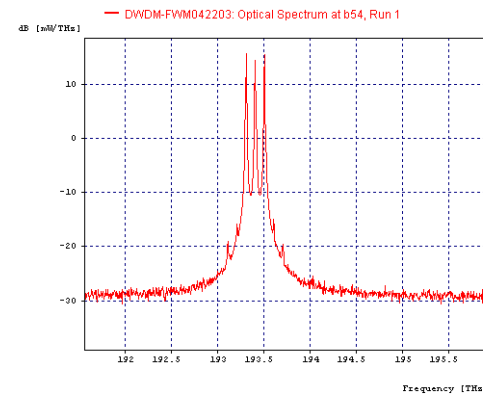
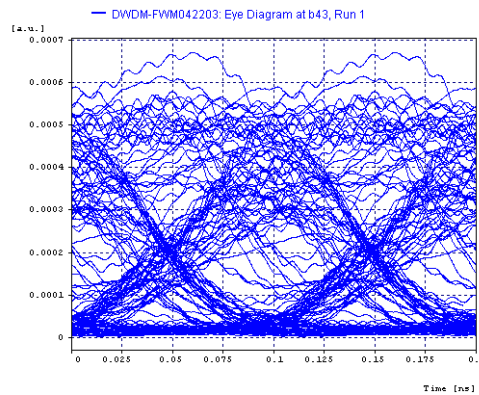
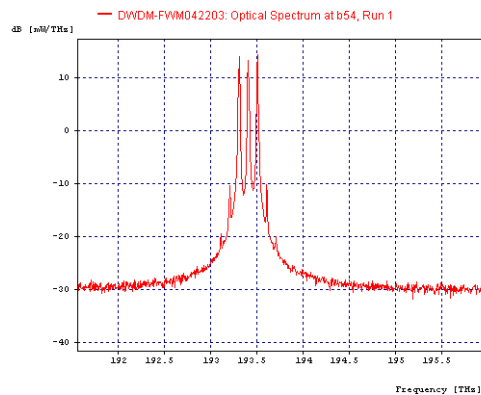
- ① SMF+RDFにより局所分散累積の低減

FWMの影響(解析例)

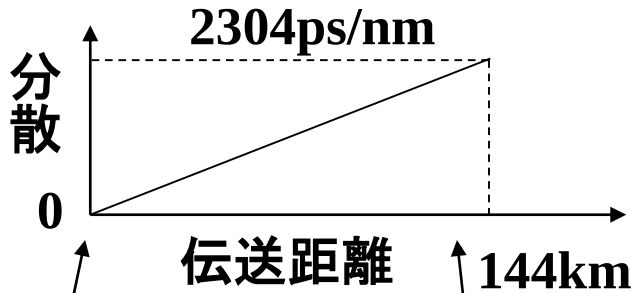


① DSF
(分散2km/nm/km) 88km

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

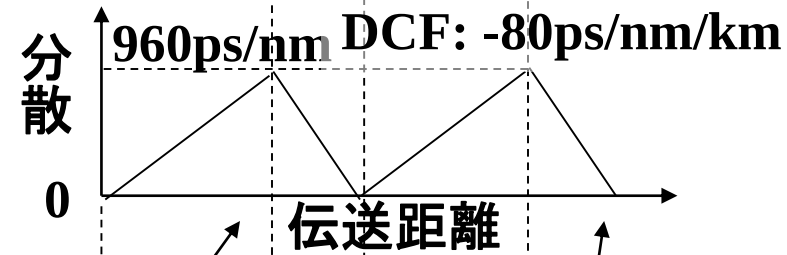
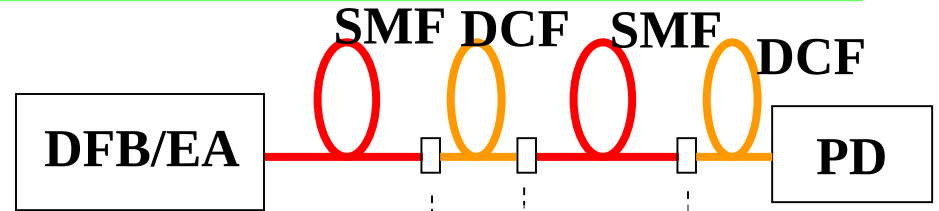
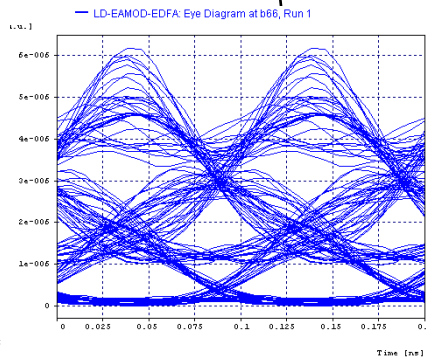
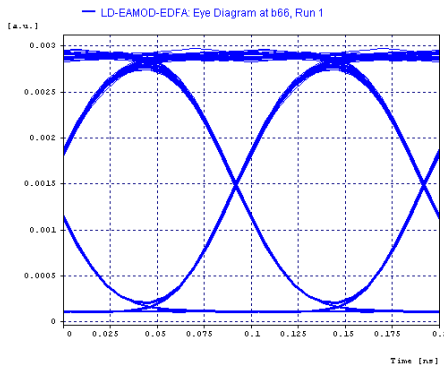


分散マネジメント伝送路の効果(解析例)



0km

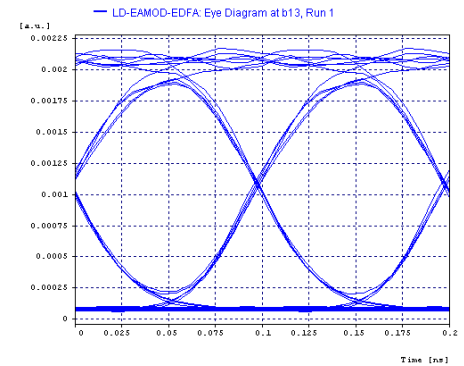
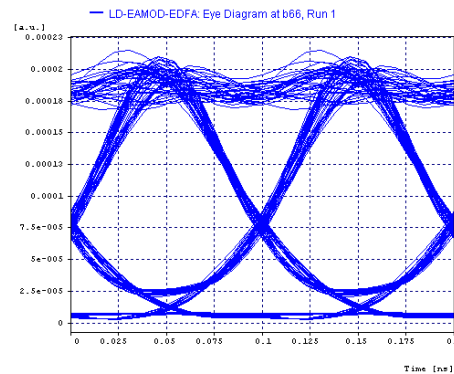
144km



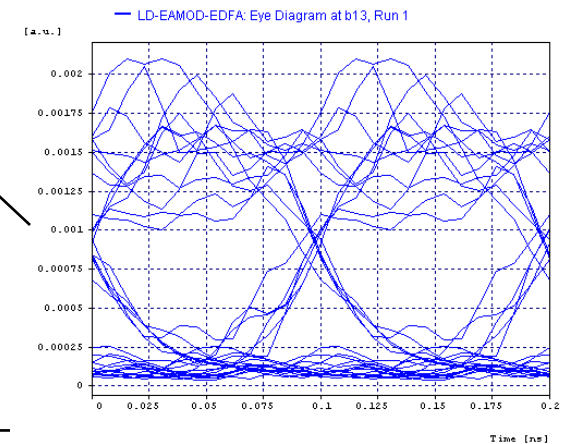
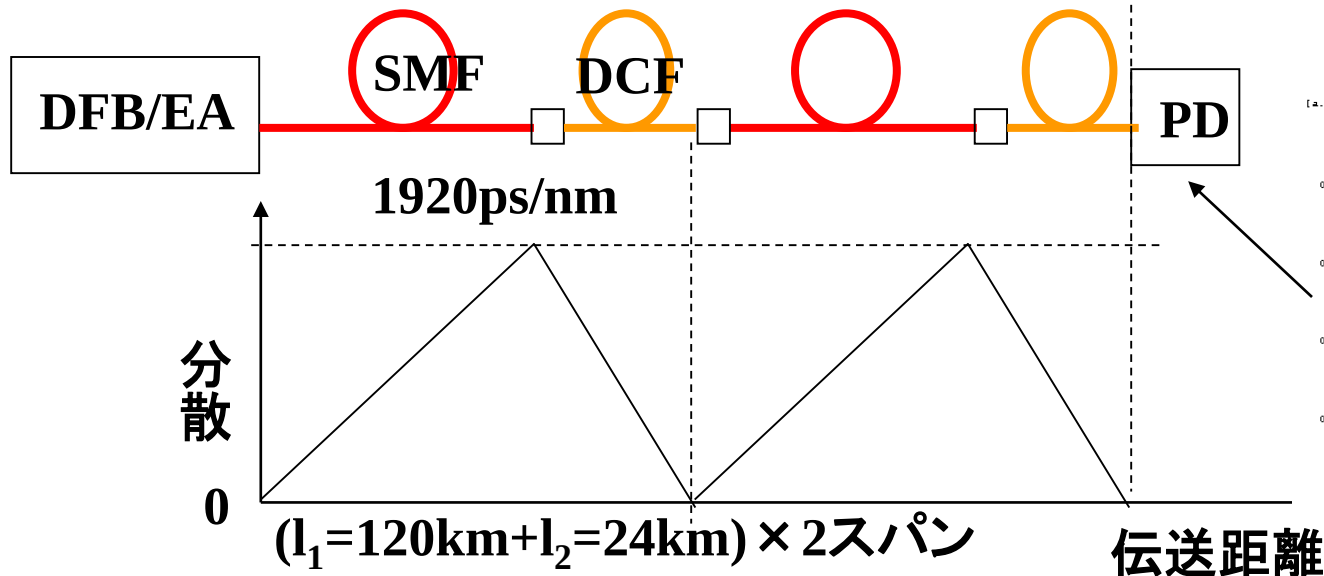
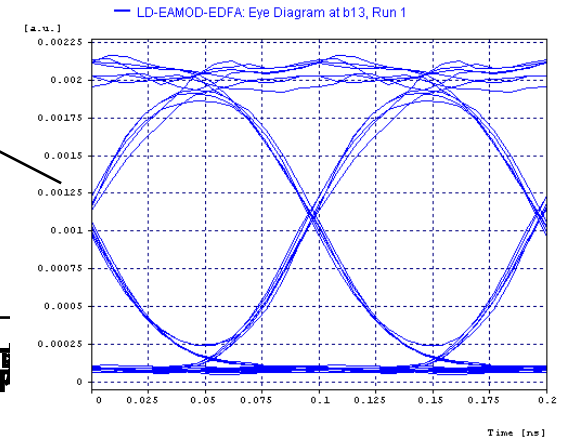
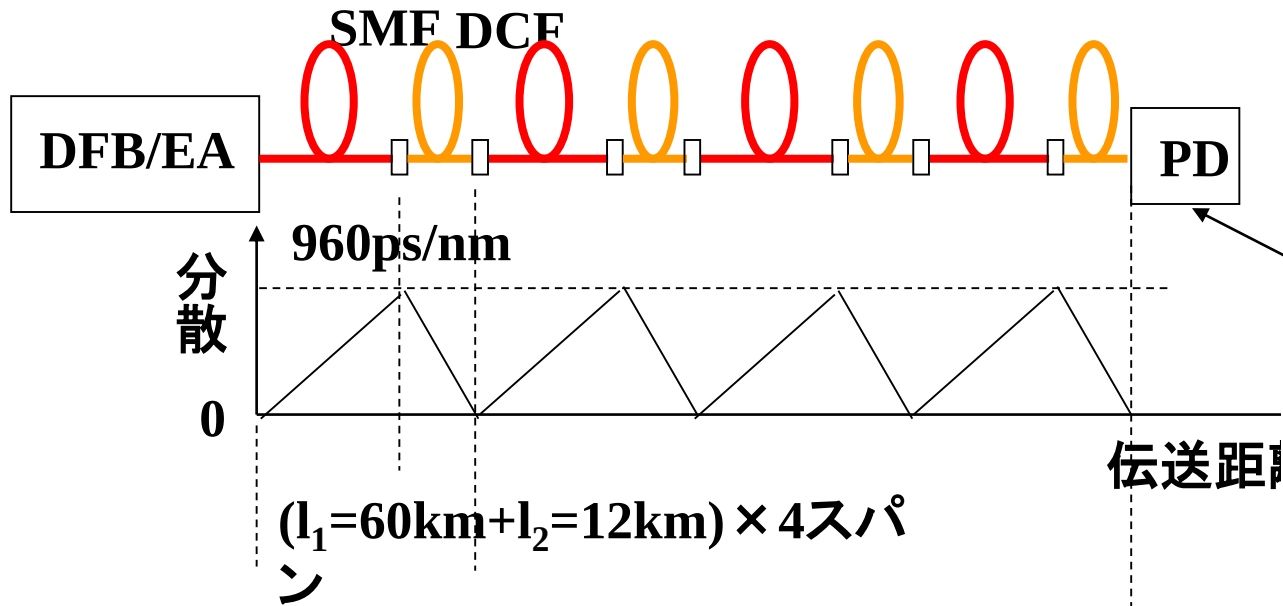
$(l_1=60\text{km}+l_2=12\text{km}) \times 2$ スパン

60km

144km



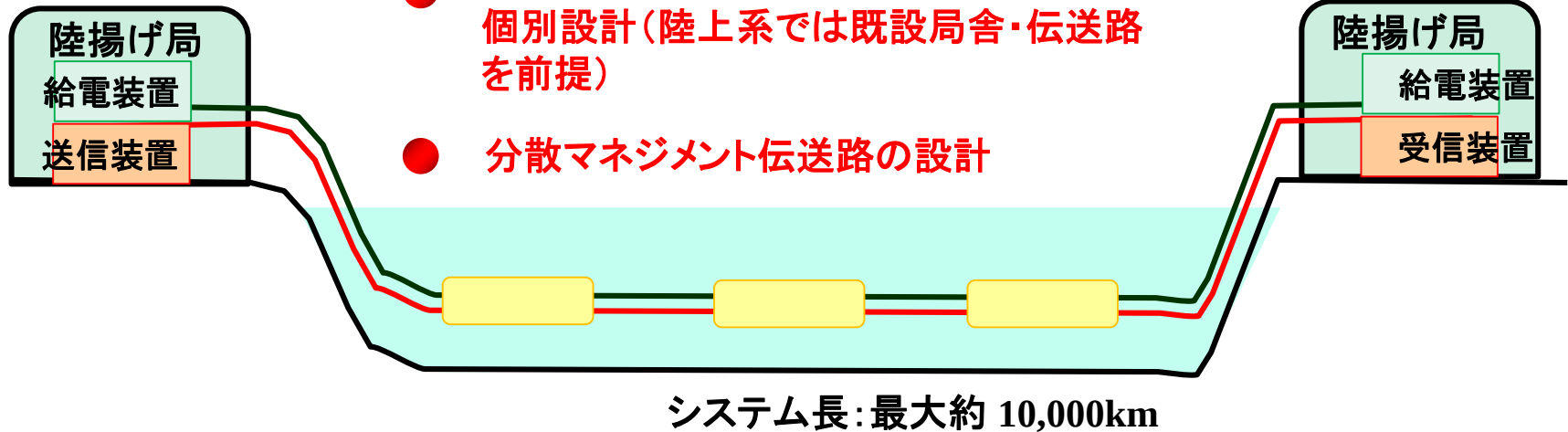
分散マネジメント伝送路における累積分散の影響



分散マネジメント伝送路の応用

海底光伝送システムの基本構成 (分散マネジメント伝送路の実用例)

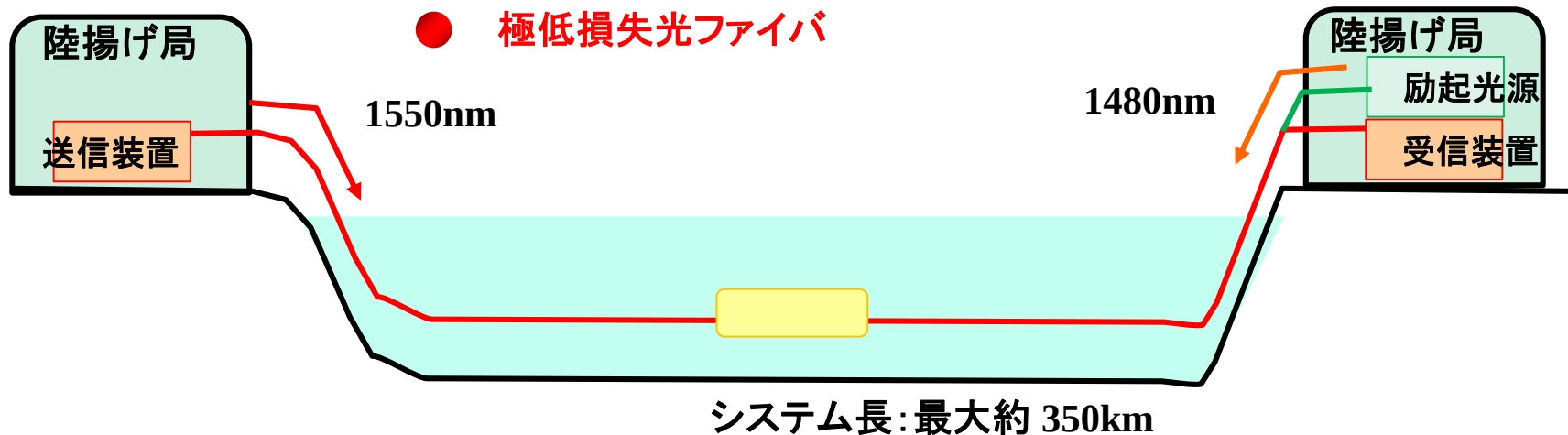
中継伝送システム (光増幅中継)



陸上系と異なる設計手法

- 海底ルートに適した海底中継器・ケーブルを個別設計(陸上系では既設局舎・伝送路を前提)
- 分散マネジメント伝送路の設計

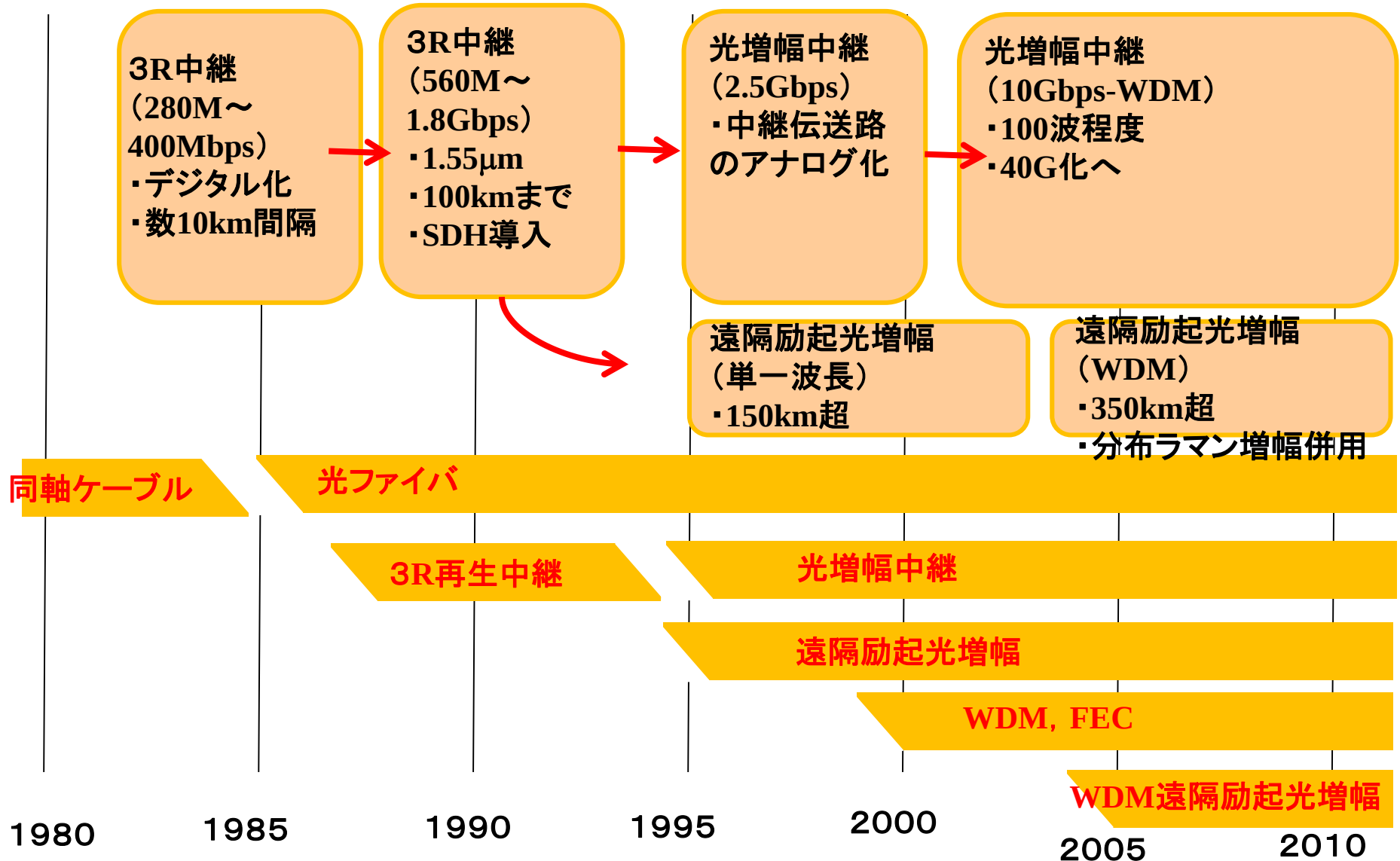
無中継伝送システム (遠隔励起・光増幅中継)



● 極低損失光ファイバ

海底伝送システムの開発史

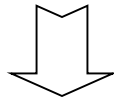
日経コミュニケーション 2010年1月1日号『光ネットワーク最新技術(19) 国際間を結ぶ海底伝送システム』 p.66 図1



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_{eff} : 実効コア断面積

n_2 : 非線形屈折率

α : 伝送損失

D : 波長分散

FWM抑制の条件

- ① 大 A_{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_{eff} 光ファイバ

タイプ	屈折率分布	電界分布	$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$ @ 1550nm	MFD (μm) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm/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
セグメンテッド コア型			70~80	8~9	-5~+5	0.10~0.12
中心ディップ 型(単リング)			80~120	8~10	-5~+5	0.08~0.09
中心ディップ 型(2重リング)			80~150	8~10	-5~+5	0.08~0.09

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

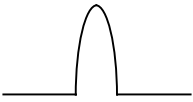
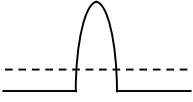
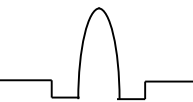
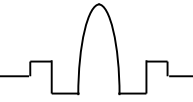
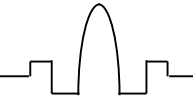
電界分布が中心にディップを持つ $\Rightarrow$ 通常ファイバとの接続損失大 (1dB程度)

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

分散補償ファイバ

屈折率分布	MFD (μm) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm/km) @ 1550nm	性能指数 (ps/nm/dB) @ 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 (dB/km)	n_2 ($\times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$)	A_{eff} (μm^2) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (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

OFC2011の発表内容を元に(1550nmでの値)

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