第２回

光通信システム
(長距離海底系, コア・メトロ系)

講義スケジュール（1）

植之原	日付	教科書	内容
第1回	11/29	OCW-i掲載資料（第1回）の精読と理解	光通信システム(基礎的なこと)
第2回	12/ 3	OCW-i掲載資料（第2回）の精読と理解	光通信システム (長距離海底系, コア・メトロ系)
第3回	12/ 6	OCW-i掲載資料（第3回）の精読と理解	光通信システム (アクセス系・データセンタネットワーク系)
第4回	12/10	OCW-i掲載資料（第4回）の精読・PN符号の説明	光変調符号
第5回	12/13	OCW-i掲載資料（第5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6回	12/17	OCW-i掲載資料（第6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7回	12/20	OCW-i掲載資料（第7回）の精読・波動方程式の解法・モードの理解	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第8回	12/24	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・分散伝送限界)

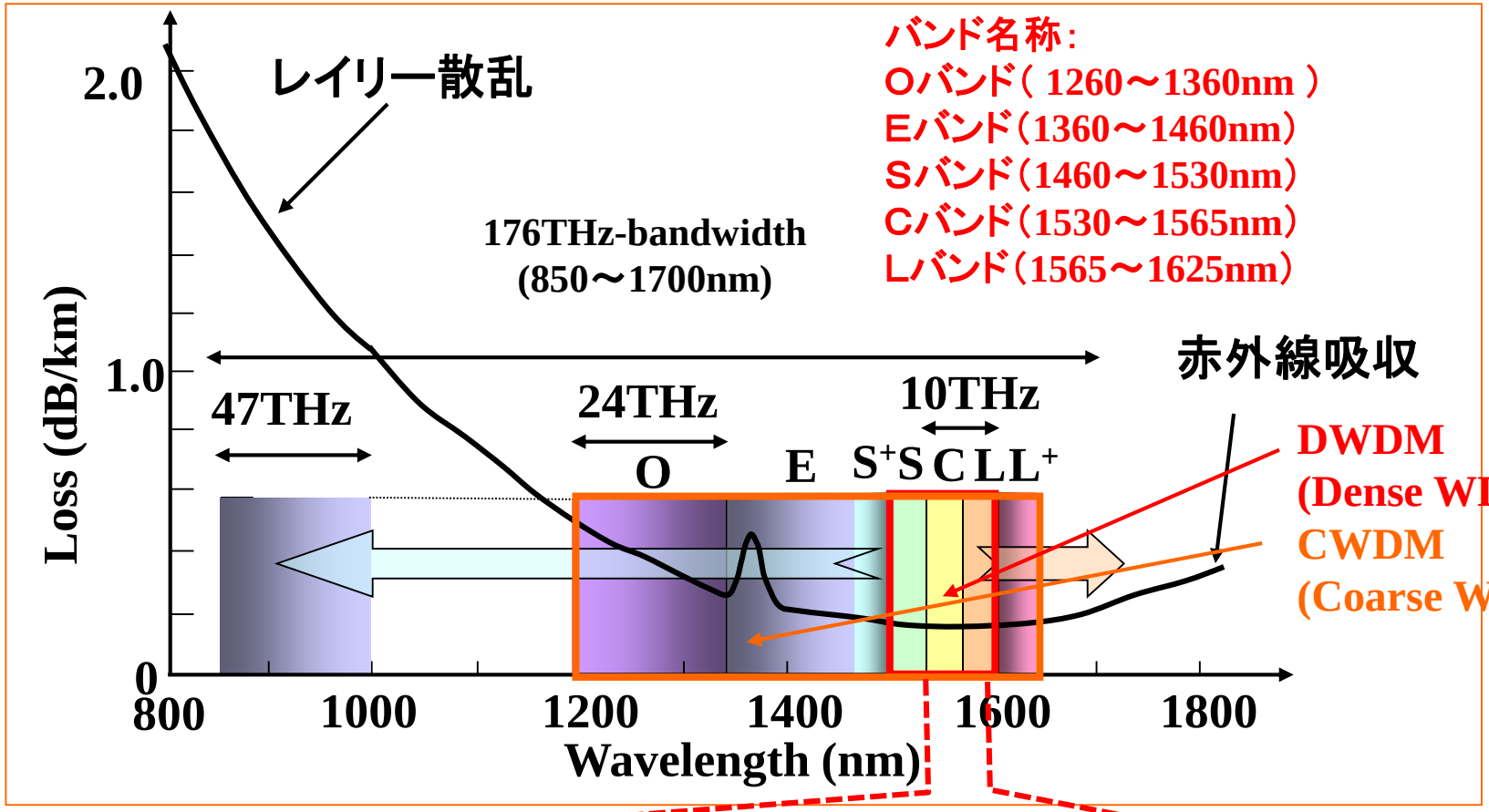
講義スケジュール（2）

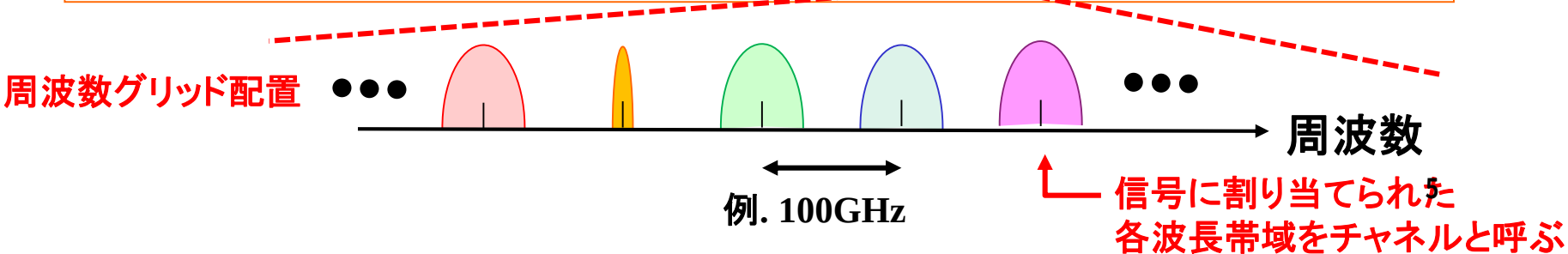
小山	日付	教科書	内容
第9回	1/ 7	OCW-i掲載資料（第9回）の精読・分散補償の概念の理解	ファイバの伝送特性(分散補償技術）
第10回	1/10	OCW-i掲載資料（第10回）の精読・動作原理の説明	光増幅器
第11回	1/17	OCW-i掲載資料（第11回）の精読・ビット誤り率の計算	ビット誤り率（強度変調・直接検波）
第12回	1/21	OCW-i掲載資料（第12回）の精読・ビット誤り率の相対比較	ビット誤り率 （コヒーレント、多値変調、光増幅）
第13回	1/24	OCW-i掲載資料（第13回）の精読・WDMの性能的課題	波長多重（WDM）伝送 (分散マネジメント技術)
第14回	1/28	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	1/31	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

長距離海底系

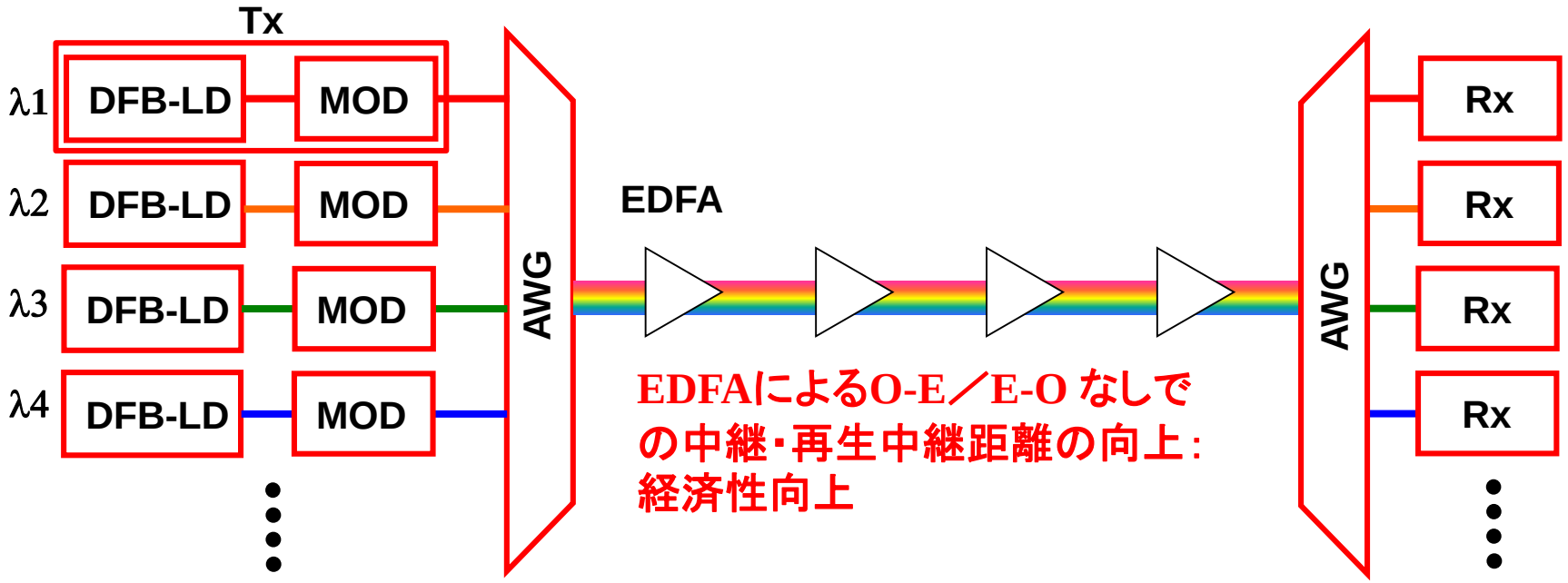
低損失・広帯域光ファイバ

メタル線（同軸線5C-FV）：300dB/km @ 2GHz, 光ファイバ：<0.2dB/km @ > 10GHz





波長多重伝送の大容量化を進めるための技術



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
  （ボーレートの高速化は漸増）
- **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

ファイバ当たりの伝送容量増大の手法

ありとあらゆる手段を用いて大容量化の実現を狙う光通信技術

光送信器 — 光ファイバ — 光中継（増幅）器 — 光受信器

光送信器

LD+MOD

- 単一モード
- 低チャープ
- 高周波数利用効率変調
  多値変調・多搬送波
- Probabilistic/Geometric Shaping（符号技術）
- 波長多重
- 偏波多重
- 空間多重
  （マルチコア・マルチモード）
- 狭線幅光源

光ファイバ

- 低損失
- 分散マネジメント
- 低非線形
- マルチコア
- マルチモード

光中継（増幅）器

- 低雑音
- 広帯域
- 利得平坦
- マルチコア
- マルチモード

光受信器

Decoder+PD

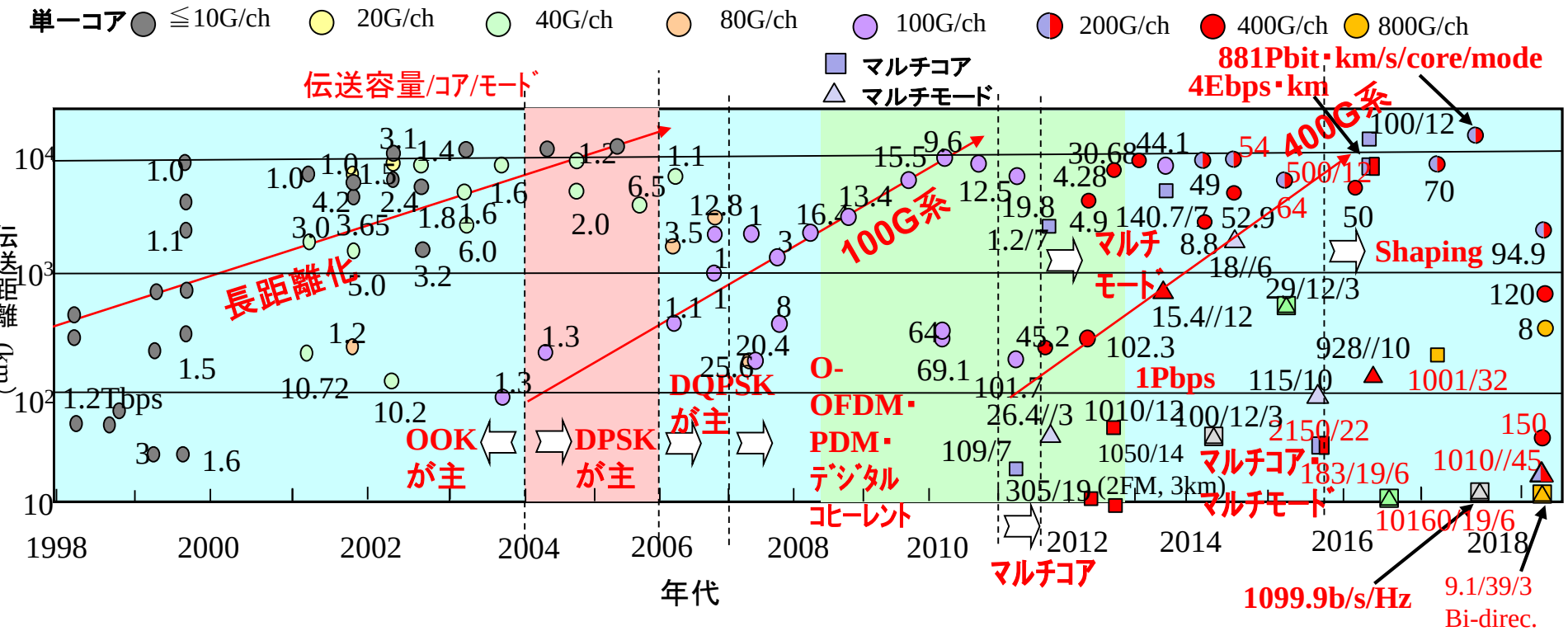
- 高受信感度
  直接検波・
  コヒーレント検波
- 狭線幅LO
- デジタル信号処理
- MIMO

□ 内は（長距離大容量向けの）従来の手法

2018年度
光通信システム

テラビット（Tbps）伝送実験の報告例

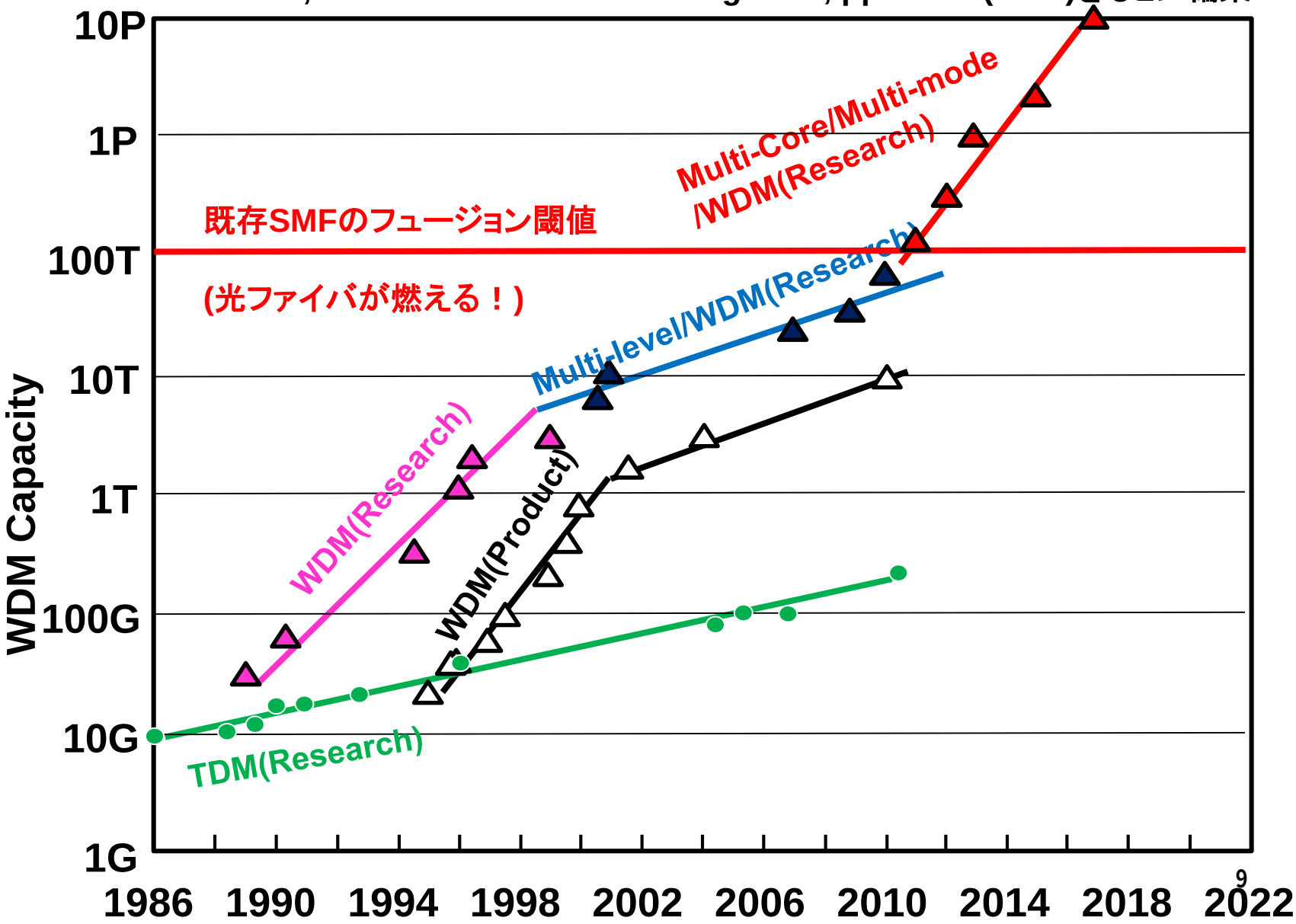
速度：400G/channel超へ
容量：10Pbps/fiber超へ
距離：6,000km超@400G/chへ
検波方式：デジタル技術によるコヒーレント検波の実用化・分散マネジメントの変化（+D/-D →+Dのみ）
変調方式：多値 and/or 多キャリア方式へ
符号方式： Probabilistic / Geometric shapingの導入
ファイバ：マルチコア・マルチモード・マルチコア/マルチモードファイバ技術の導入



『Interface』（2001年9月号を基に追記）

光通信等の伝送帯域の進展と限界
（ファイバ1本で伝送できる容量の観点から）

P. Winzer, IEEE Communications Magazine, pp.26-30 (2010)をもとに編集



Baud Rate（またはSymbol per Rate）とBit Rate

- **Baud Rate（ボーレート）**

１秒間に変復調する回数（ボー：人名，シンボル＝符号）

２値・４値。。。に係らず変復調の回数が同じであれば同じ数値
シンボルレートと基本は同じ
単位：[Baud], [symbol/s]

- **Bit Rate（ビットレート）**

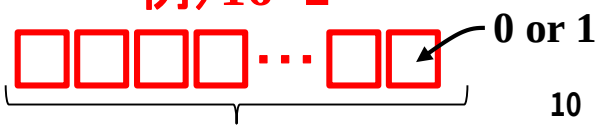
１秒間に送受信するデータ量

２値・４値。。。に応じて、同じボーレートでも送受信データ量は変化

２値変調（2ASK、BPSK）：ビットレート＝ボーレート
2^M値変調（2^MPSK, 2^MQAM）:ビットレート＝ボーレート×M
偏波直交では更に2倍となる。

単位：[bps], [bit/s]

1シンボル2^M種類の符号
→ Mビットの符号に対応
例）$16=2^4$



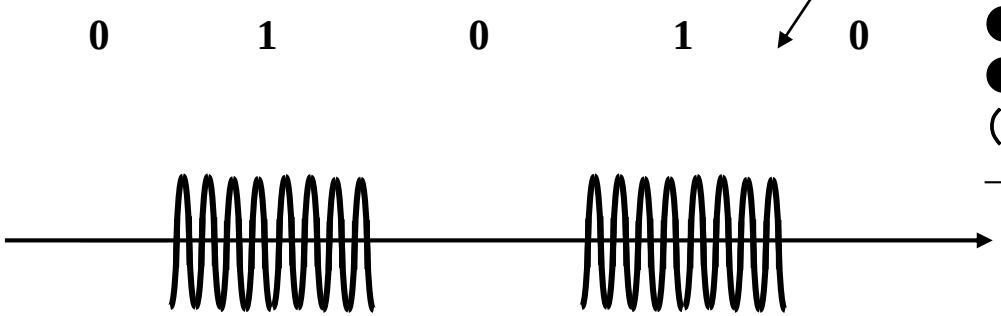
ASK: Amplitude Shift Keying
PSK: Phase Shift Keying
QAM: Quadrature Amplitude Modulation

強度変調と位相変調

強度変調

ASK (Amplitude Shift Keying)
OOK (On-Off Keying)とも呼ばれる

振動波形は光の波長レベルでの振動



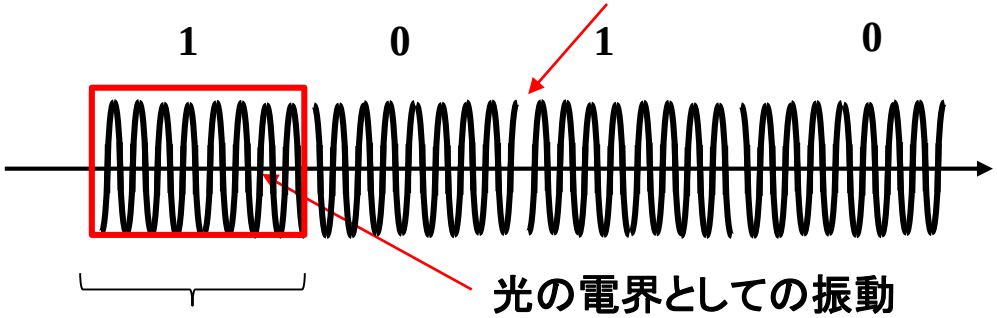
- 振幅の有無にビットを対応
- 振幅の大きさで多値化

（4ASK：4値の場合
→ 2^2なので2ビット1シンボル）

位相変調

PSK (Phase Shift Keying)

光の位相を切り替える



- ビットごとに位相を対応
- 位相の位置で多値化

（QPSK：0, π/2, π, 3/2π）

変調信号の数式表現(1)

変調信号(電界成分)の一般的表記:

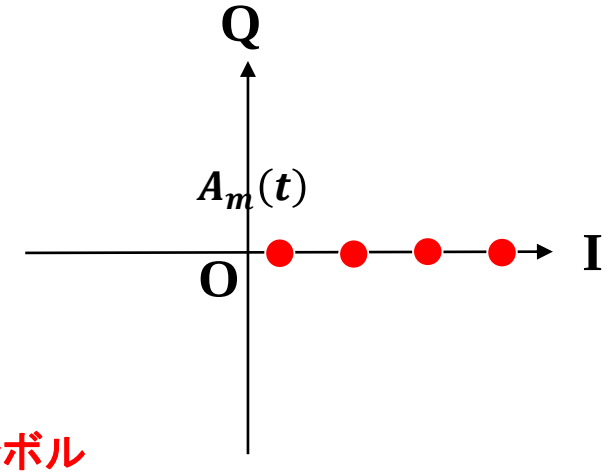
$$s(t) = A_m(t)\cos[2\pi f_c t + \theta_m(t)]$$

$A_m(t)$: 電界振幅

f_c: 搬送波周波数

$\theta_m(t)$: 位相

コンスタレーション



強度変調(MASK, PAMM):

M値($\log_2 M$ビット)／シンボル

$A_m(t)$: 可変, $\theta_m(t)$: 定数

たとえば、

$$A_m(t) = 1 + A_m\cos[2\pi f_m t] \Rightarrow 1 - A_m \sim 1 + A_m$$

の範囲で周期f_mで
正弦波状に変化(アナログ)

$$A_m(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \boxed{A_i}\, g(t - iT_m)$$

ここに1, 0などのビット系列(振幅)が入る

i はビット位置を表す変数。
$g(t)$はt=0~ $T_m = 1/f_m$
で振幅1, それ以外では0の
矩形波(デジタル)

変調信号の数式表現(2)

位相変調(MPSK):

M値／シンボル

$$s(t) = A_m(t)cos[2\pi f_c t + \theta_m(t)]$$

$A_m(t)$: 定数, $\theta_m(t)$: 可変

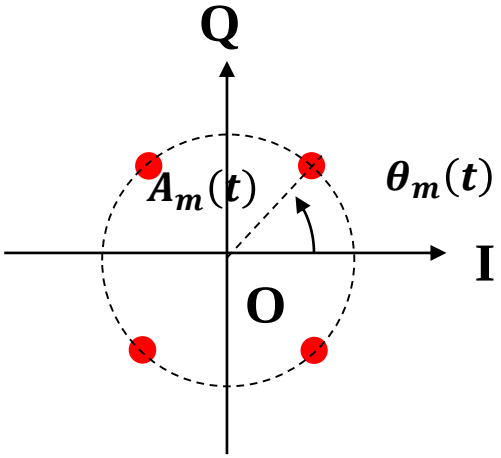
たとえば、

$$\theta_m(t) = A_m cos[2\pi f_m t]$$

$-A_m \sim A_m$

の範囲で周期f_mで
正弦波状に変化(アナログ)

コンスタレーション



$$\theta_m(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \boxed{A_i}\, g(t - iT_m)$$

ここに位相の値(0, πなど)
の数値列が入る

i はビット位置を表す変数。
$g(t)$はt=0~ $T_m = 1/f_m$
で振幅1, それ以外では0の
矩形波

変調信号の数式表現(3)

直交振幅変調
(Quadrature Amplitude Modulation, *M*QAM):

*M*値／シンボル

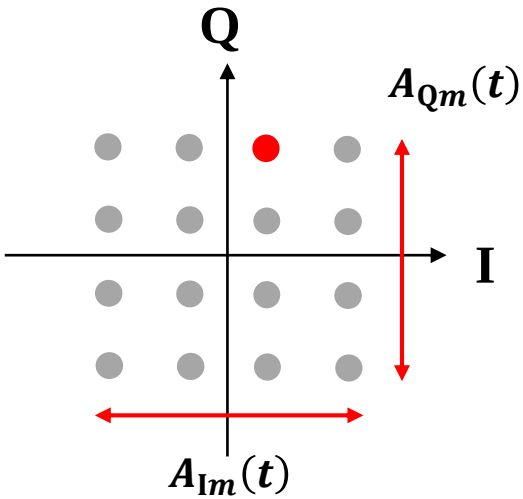
水平(同相)・垂直(直交位相)成分での表示

$$s(t) = A_{\mathrm{I}m}(t)cos[2\pi f_c t] + A_{\mathrm{Q}m}(t)sin[2\pi f_c t]$$

$$= \sqrt{\left(A_{\mathrm{I}m}(t)\right)^2 + \left(A_{\mathrm{Q}m}(t)\right)^2}\, cos[2\pi f_c t - \varphi(t)]$$

$$\varphi(t) = tan^{-1}\left[\frac{A_{\mathrm{Q}m}(t)}{A_{\mathrm{I}m}(t)}\right]$$

コンスタレーション



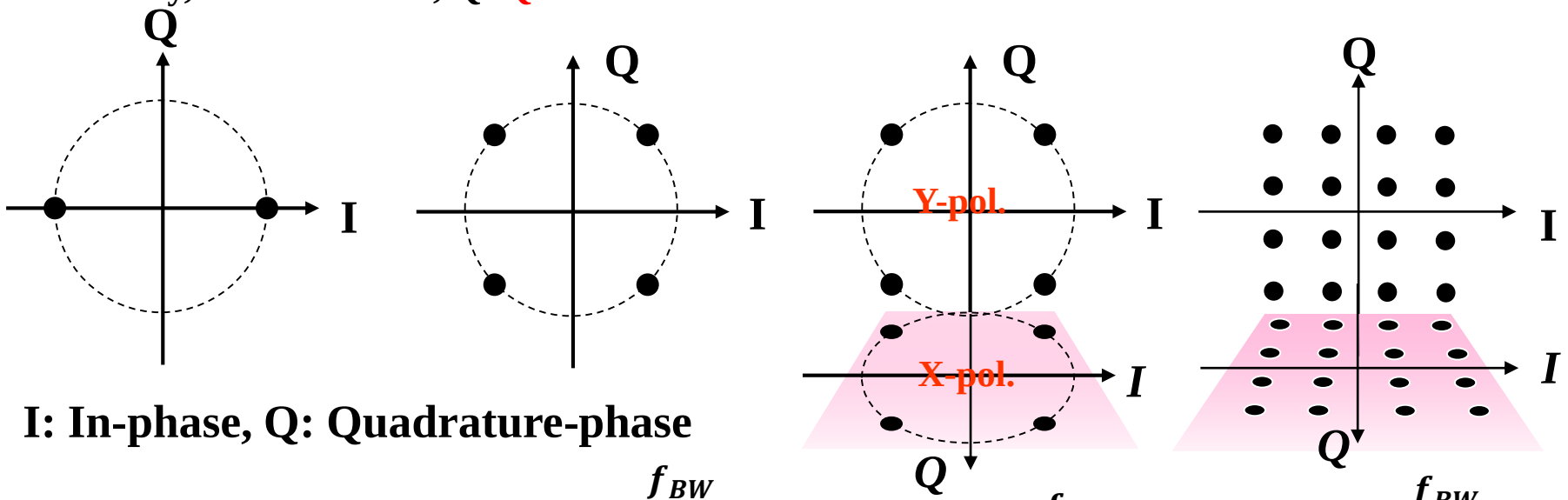
変調信号（多値信号）の信号点配置

多値度

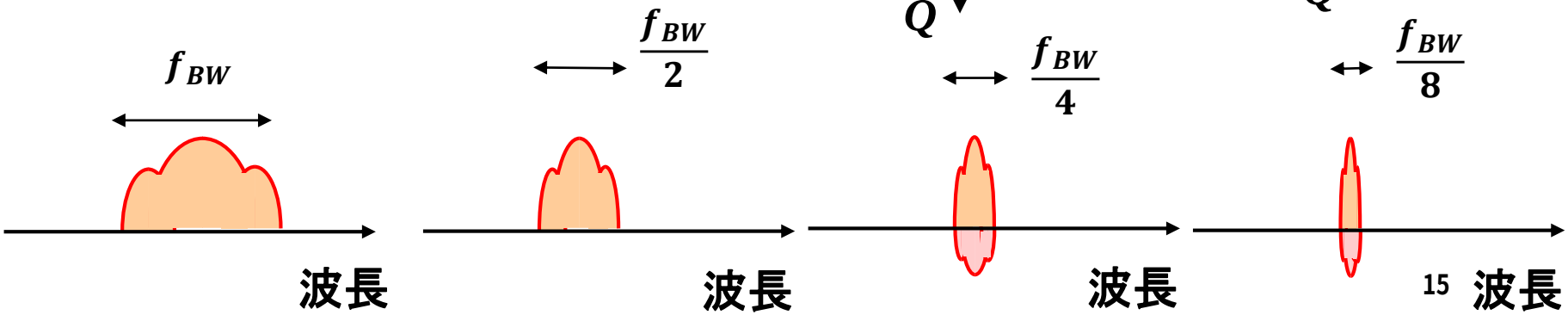
1bit/symbol (112G symbol/s =112Gbps)	2bit/symbol (56G symbol/s =112Gbps)	4bit/symbol (28G symbol/s =112Gbps)	8bit/symbol (14G symbol/s =112Gbps)
ASK, (B, D)PSK	(D)QPSK	DP- QPSK	DP-16QAM

B: Binary, D: Differential, Q: Quadrature

DP: Dual-Polarization



I: In-phase, Q: Quadrature-phase



周波数利用効率と変調方式

周波数利用効率（Spectral Efficiency, SE）

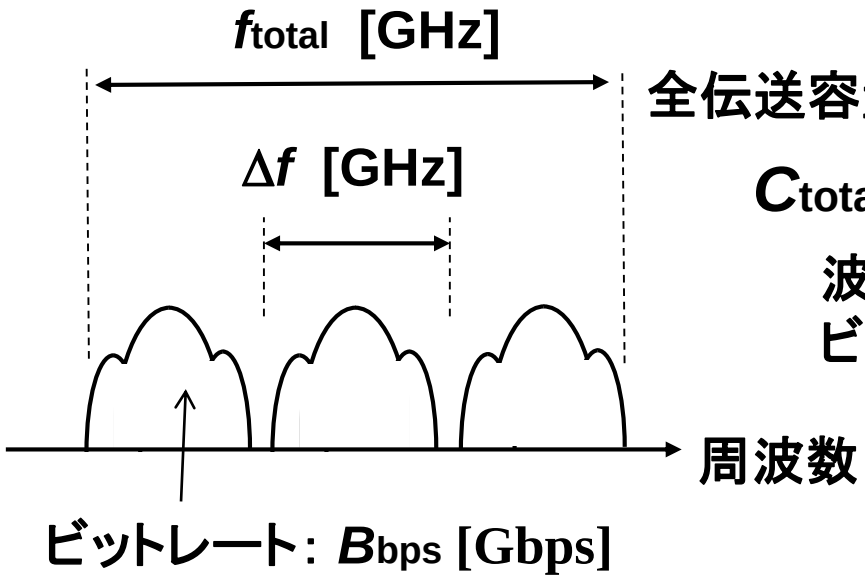
WDMのチャネル間隔: Δf [GHz]

ビットレート: B_{bps} [Gbps] = B_{baud} [Gbaud] × M値多重 × 偏波多重度 × 空間多重度

（波長チャネルあたり）

$$SE = \frac{B_{bps}}{\Delta f}$$

SEが大きい＝ 一定の周波数で送れる情報量が多い



全伝送容量

$$C_{total} = B_{bps} \times \frac{f_{total}}{\Delta f}$$

波長chあたりビットレート

全波長ch数

単一チャネルの高速化

現在の実用化仕様（最高速）

112Gbps = 28Gbaud × QPSK × 偏波多重

2　　2

次世代の高速化仕様

448Gbps = 28Gbaud × 16QAM × 偏波多重 × デュアルキャリア

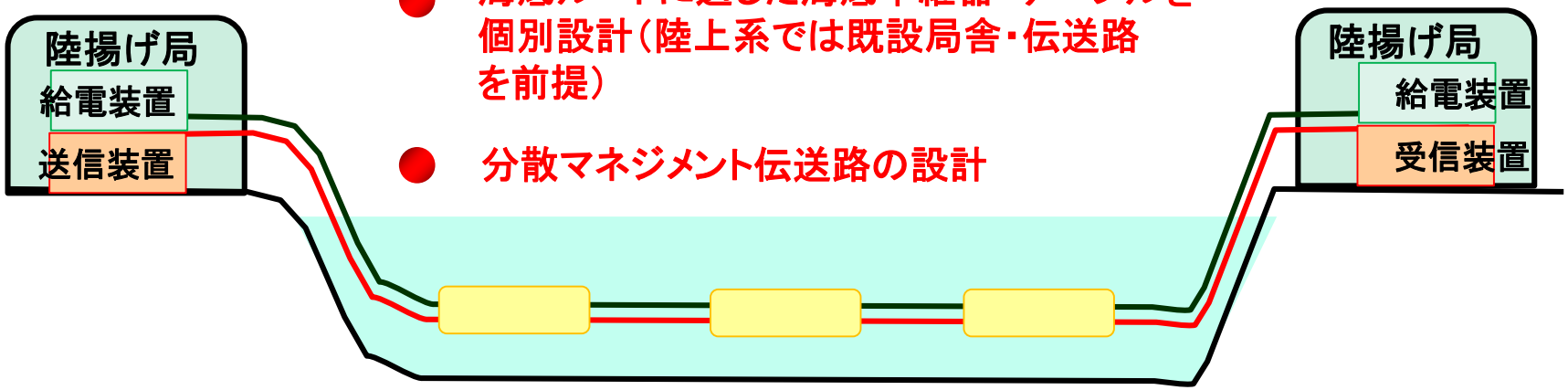
4　　2　　2

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

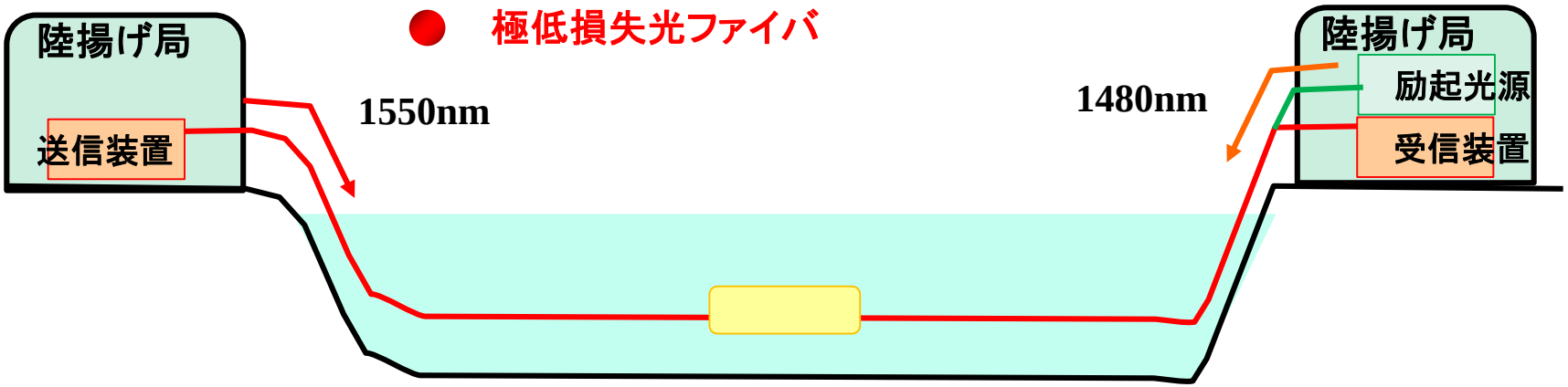
- 海底ルートに適した海底中継器・ケーブルを個別設計（陸上系では既設局舎・伝送路を前提）
- 分散マネジメント伝送路の設計



システム長：最大約 10,000km

無中継伝送システム
（遠隔励起・光増幅中継）

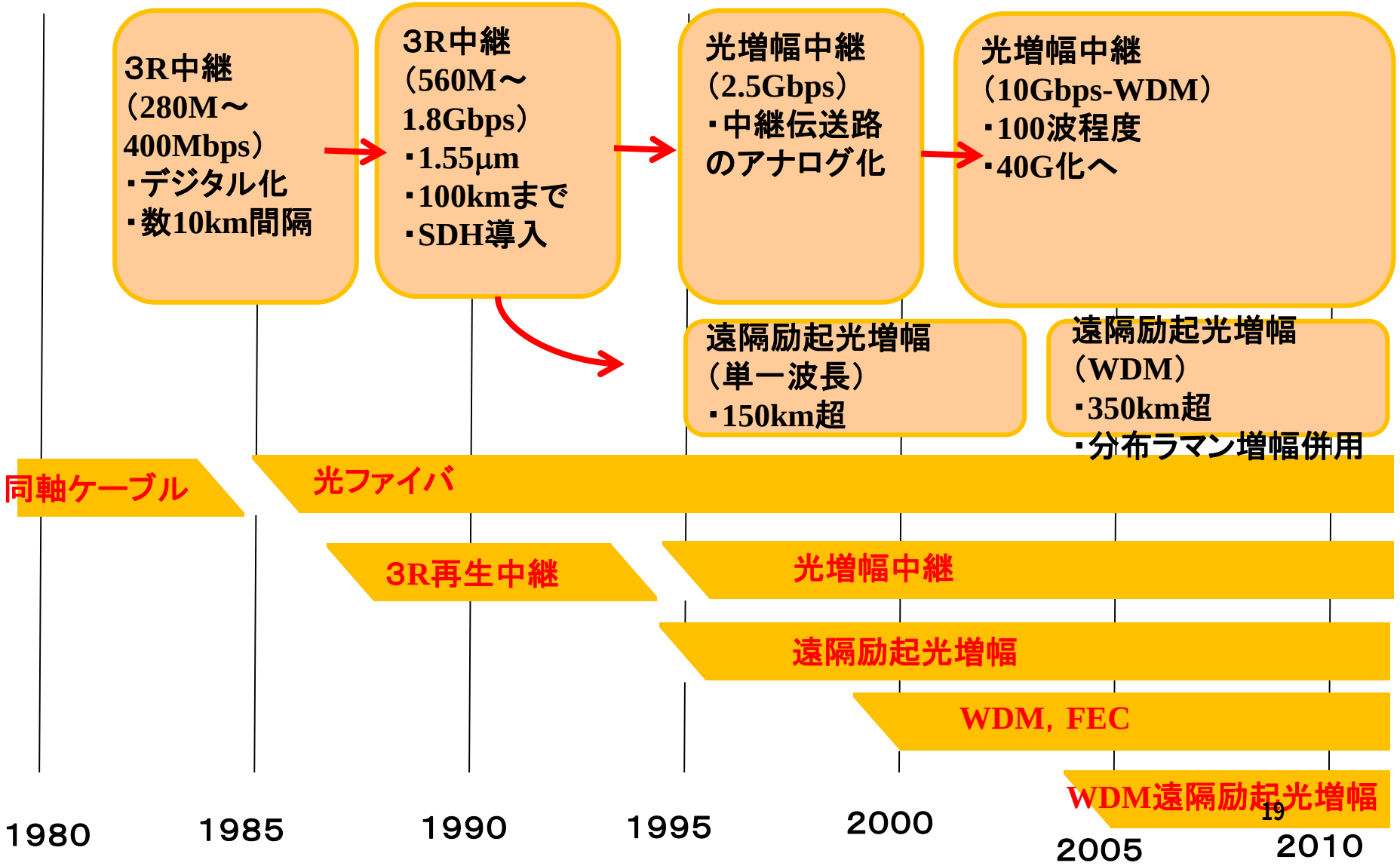
- 極低損失光ファイバ



システム長：最大約 350km

海底伝送システムの開発史

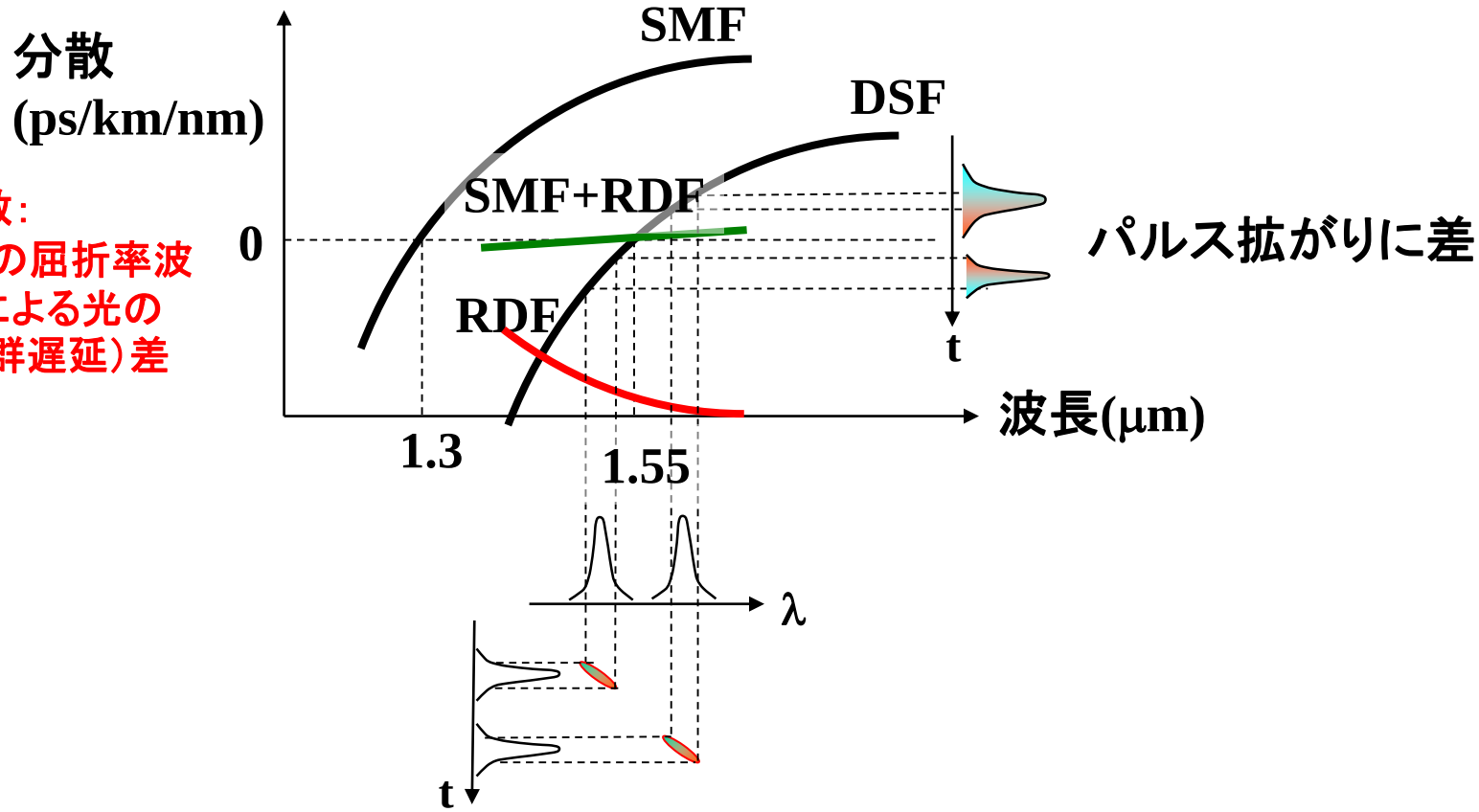
日経コミュニケーション　2010年1月1日号『光ネットワーク最新技術（19）　国際間を結ぶ海底伝送システム』 p.66 図1



波長多重（WDM）と分散マネジメント

波長分散による影響
分散スロープによるWDM帯域の制限

※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

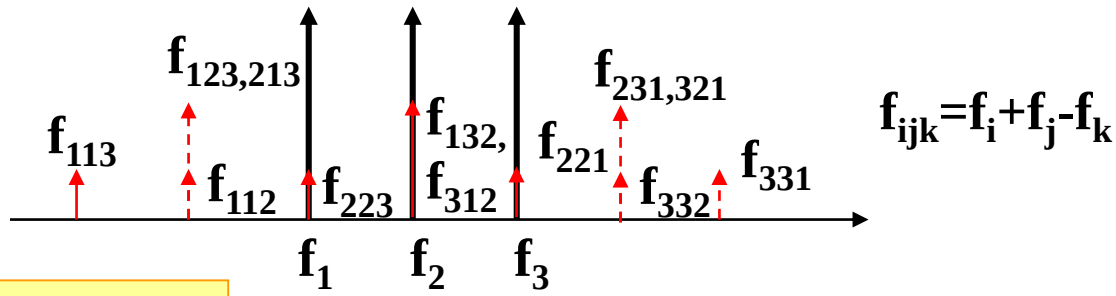


WDM使用帯域の拡大 ⇒ 広い波長範囲でトータルの波長分散零の条件を満たしている必要がある。

⇓

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

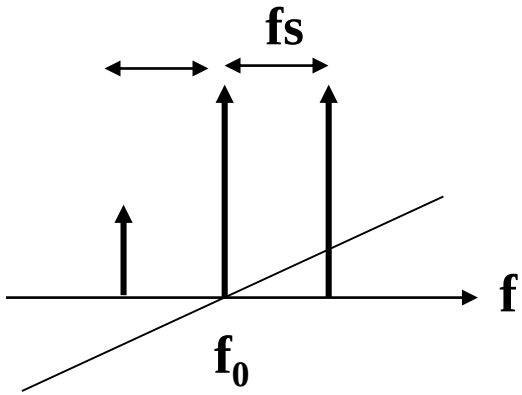


光ファイバの3次非線形効果

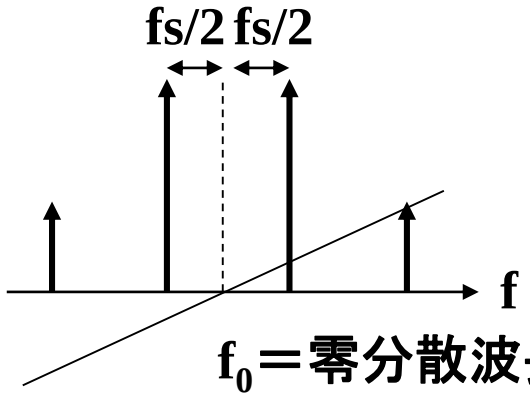
$f_{ijk}=f_i+f_j-f_k$ を満足する波長の発生効率は位相整合条件

$\Delta\beta=\beta(f_i)+\beta(f_j)-\beta(f_k)-\beta(f_{ijk})=0$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

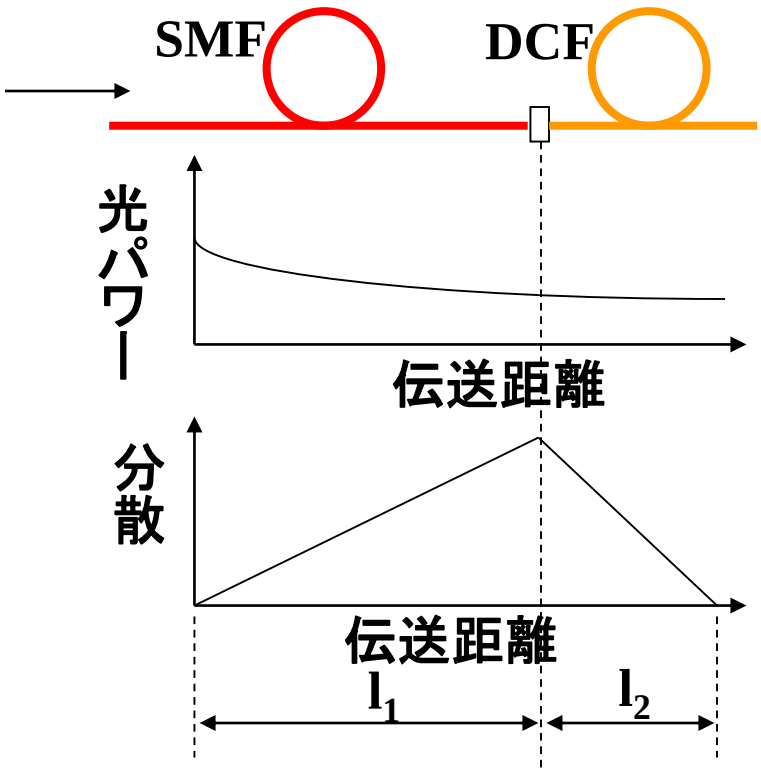


② 零分散波長をはさんで等間隔



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

分散マネジメント伝送（SMF+DCF/SMF+RDFなど）

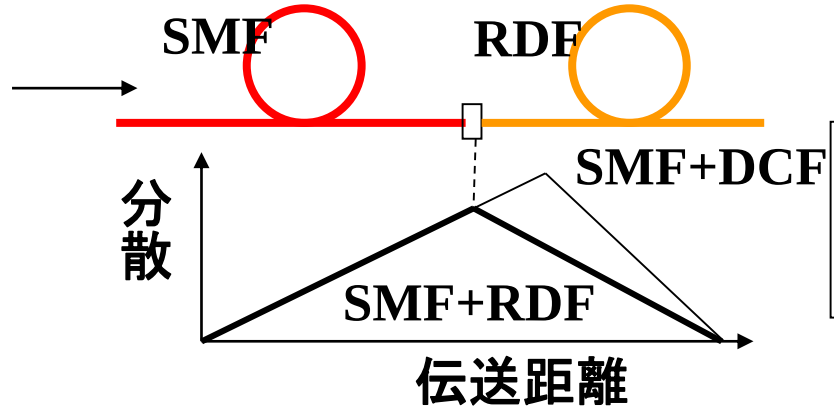


ポイント

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



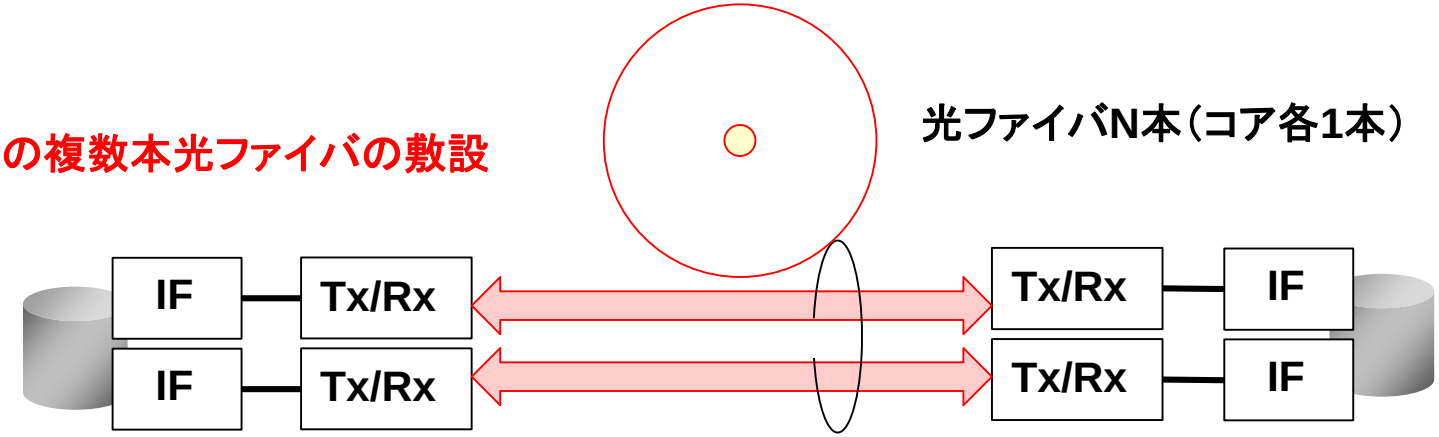
ポイント

① SMF+RDFにより局所分散累積の低減

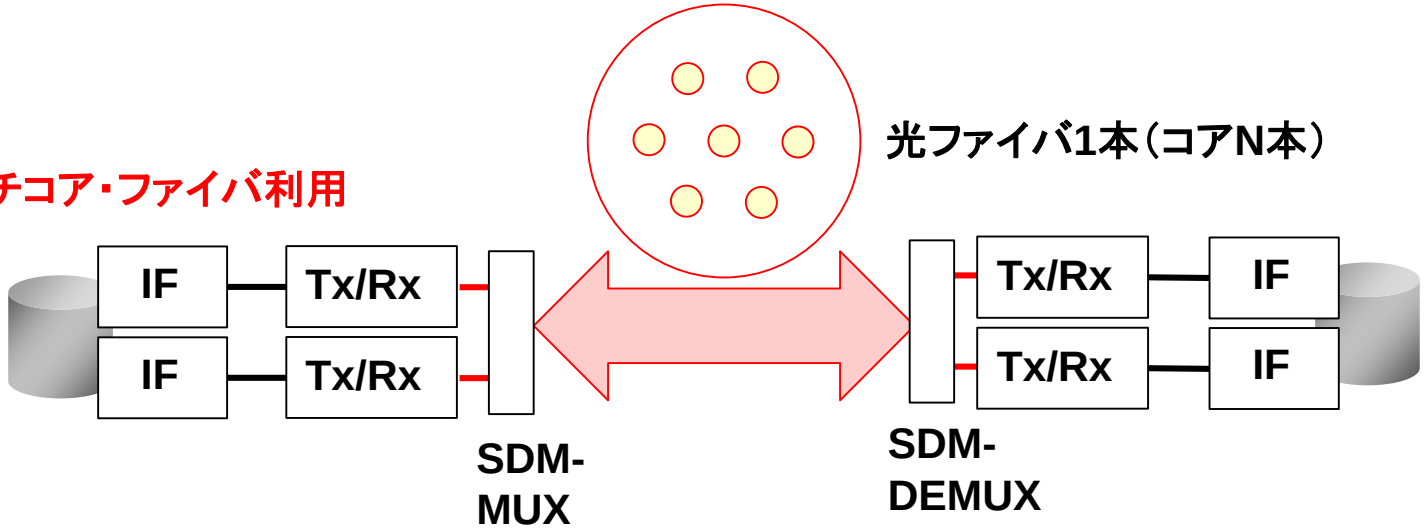
更なる大容量化：空間分割多重
（マルチコア、マルチモード）

伝送路の新時代：マルチ・コアファイバ

既存の複数本光ファイバの敷設



マルチコア・ファイバ利用



ファイバ本数の削減

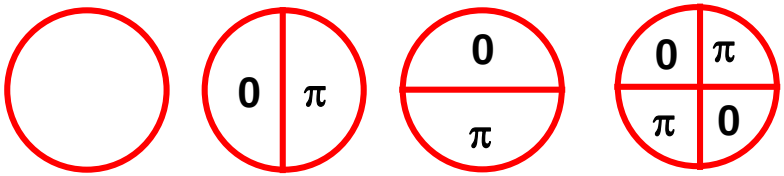
- SMF ⇔ MCF間接続方法：自由空間系・ファイバ融着型が主（今後の課題）

伝送路の新時代：マルチ・モードファイバ

高次モードの生成・多重・分離方式

生成

① 位相板



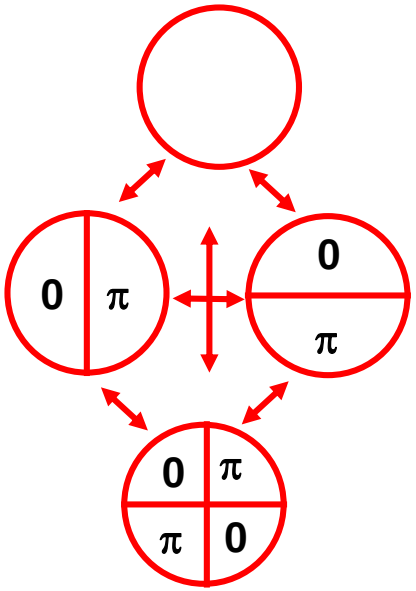
LP01　LP11e　LP11o　LP21o

② 長周期ファイバ・グレーティング

③ 方向性結合器

多重・分離

- 自由空間系
- 方向性結合器
- 平面導波路



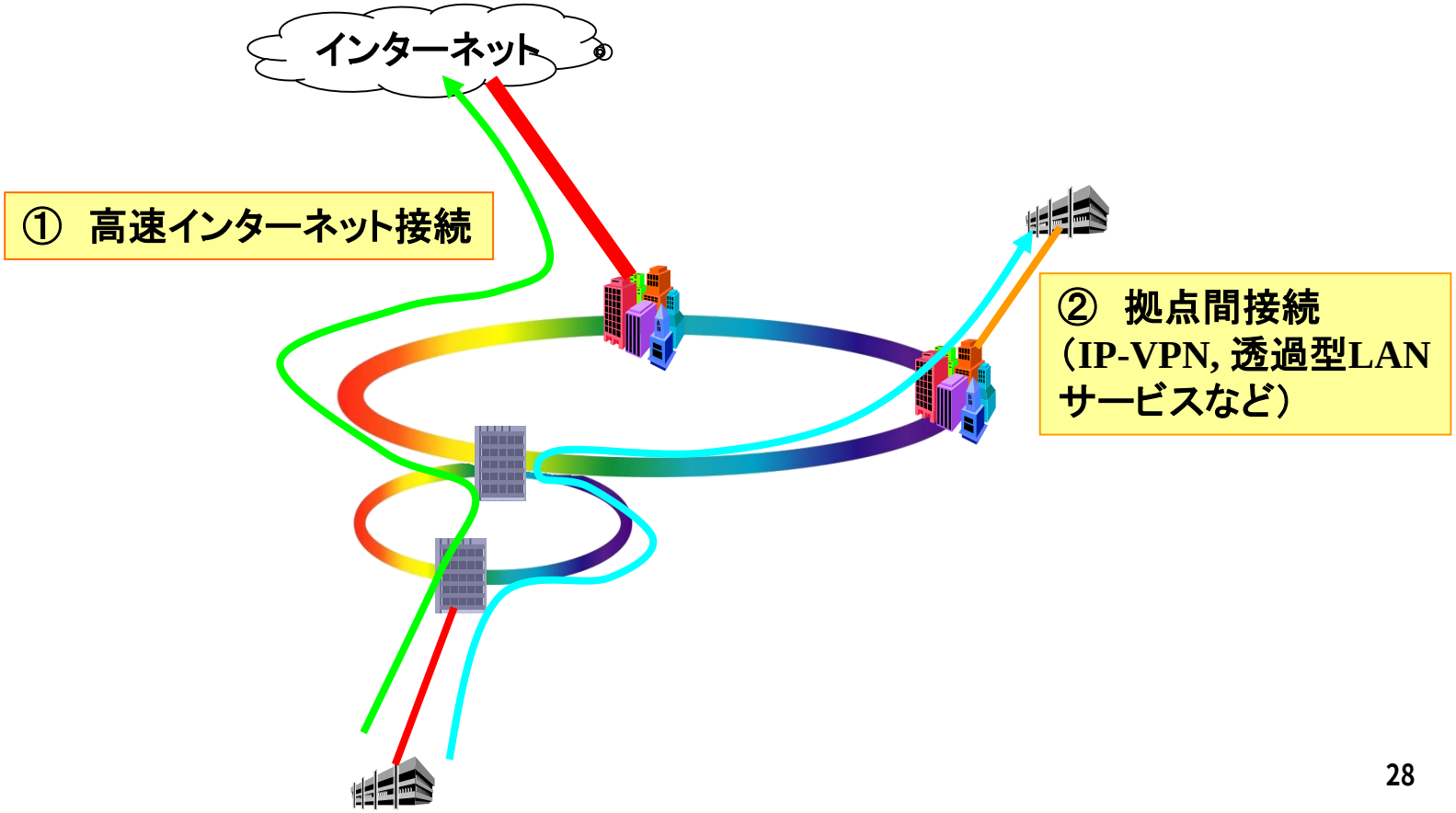
※この段階の分離信号には、伝送途中でのモード変換成分が線形に混合
→ 分離・再生が必要
→ Multiple-Input/Multiple-Output (MIMO) 行列の特異値分解演算を利用

メトロ・コア系ネットワーク

メトロ・ネットワークの特徴と用途

特徴

- ダーク・ファイバを用いて都市部に構築
- L3SWやWDM装置を使い安価なサービスを提供
- イーサネット・インタフェースで1～10Gbpsまでの高速サービスを提供



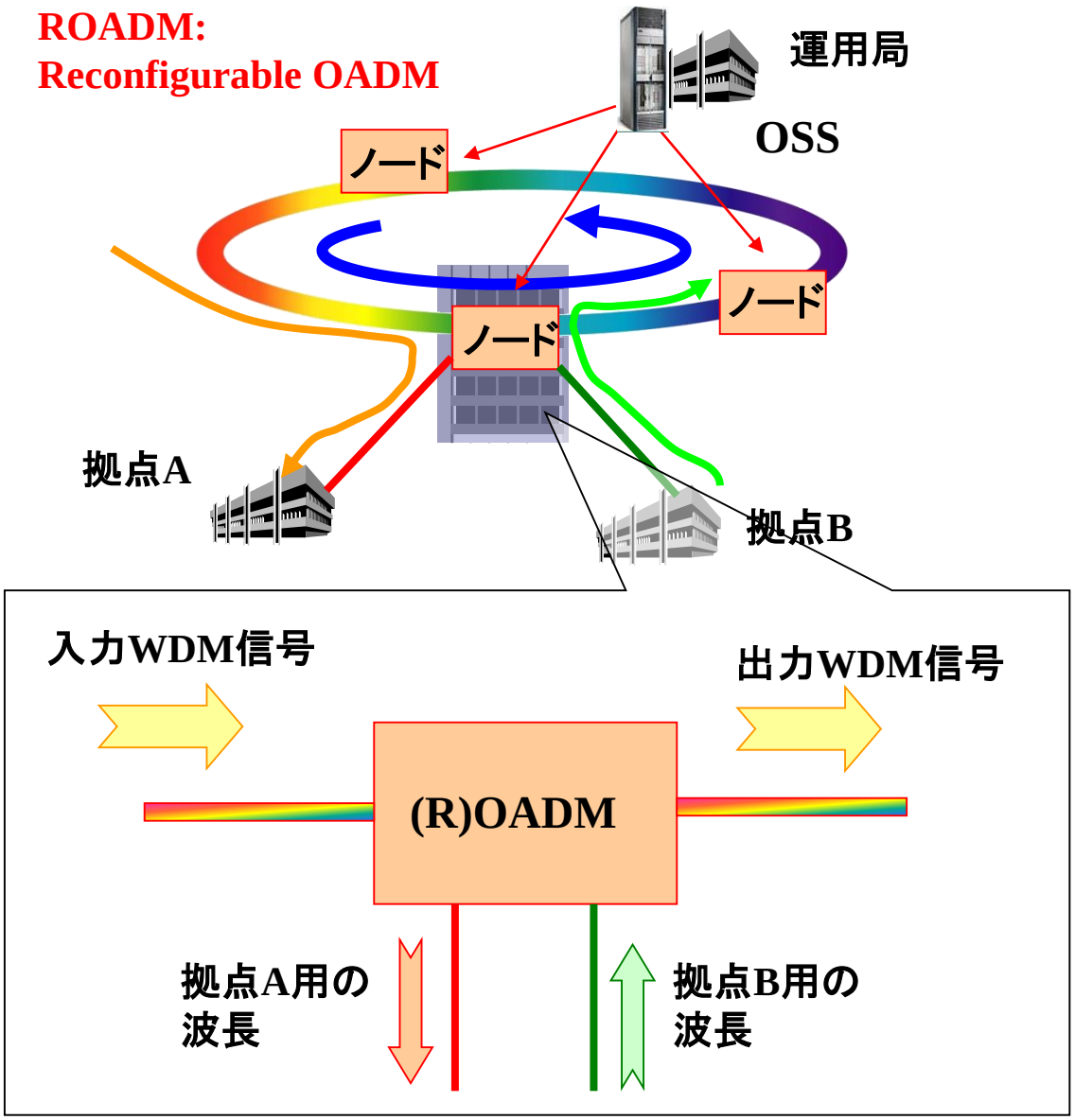
メトロ・ネットワークの要求条件

① トランスペアレントなネットワークの実現
・多様なサービスの収容（VPN, SAN, CDN, 波長貸し，FTTH,.....）
・多様なインタフェースの収容（Ethernet, SONET, ...）

② 低コストかつ高信頼度の光ネットワークの実現

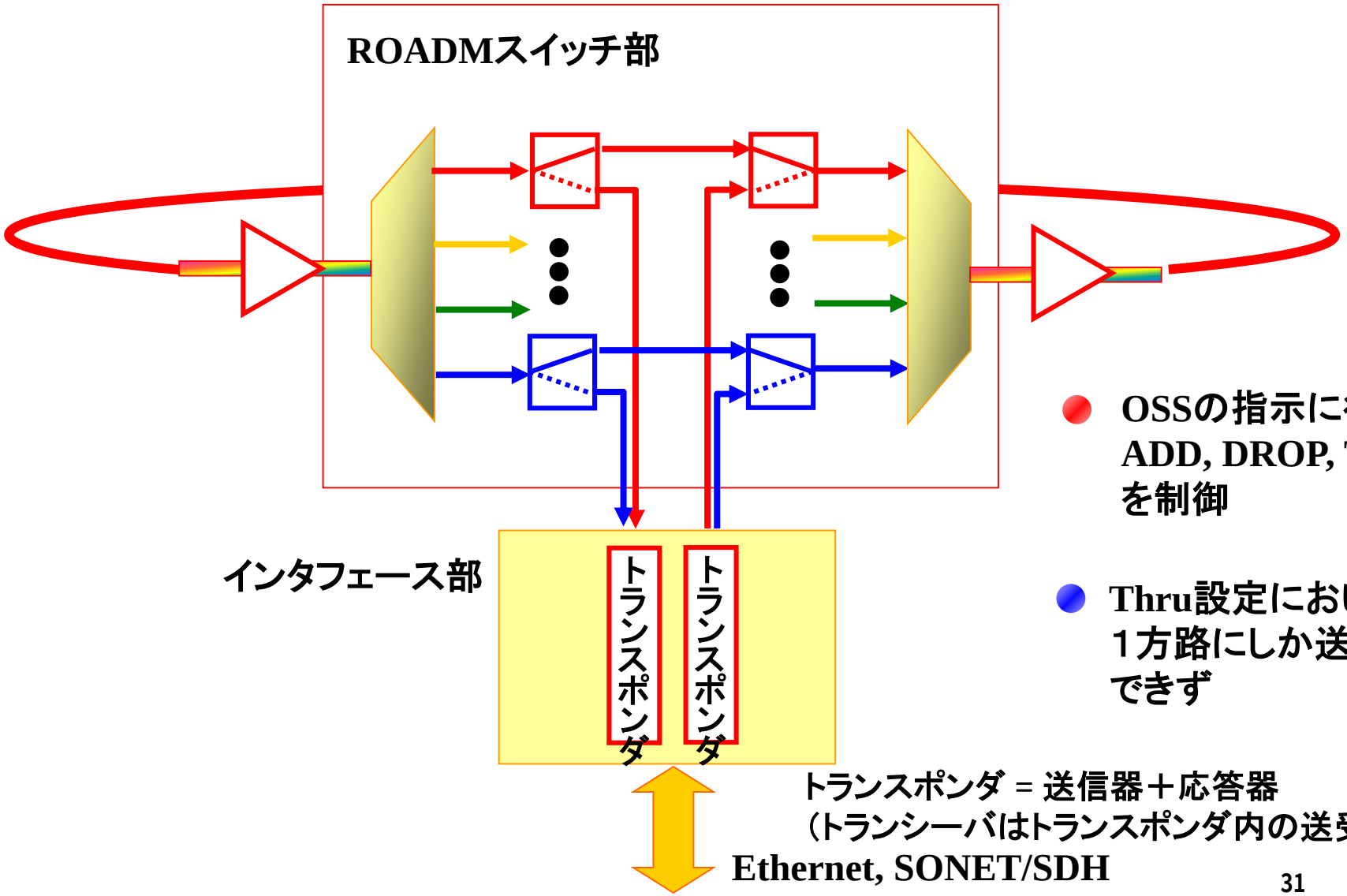
③ 要求に応じた迅速な波長パス設定のクリック＆プロビジョニングでの実現

重要度の増すOptical Add Drop Multiplexer (OADM)



- ADD(挿入）:
  データのリングへの挿入
  DROP（分岐）:
  目的データの取得
  Thru（通過）:
  ノードを通過
- 従来のOADMでは光パス（1波長による光信号経路）開通に現場作業が必要
  → 急な需要に対応困難
- ROADMにより遠隔作業可（GMPLSは国際標準の管理プロトコル）
- OSS（Operation Support System）:
  各ノードのADD, DROP, Thruを管理・制御するシステム

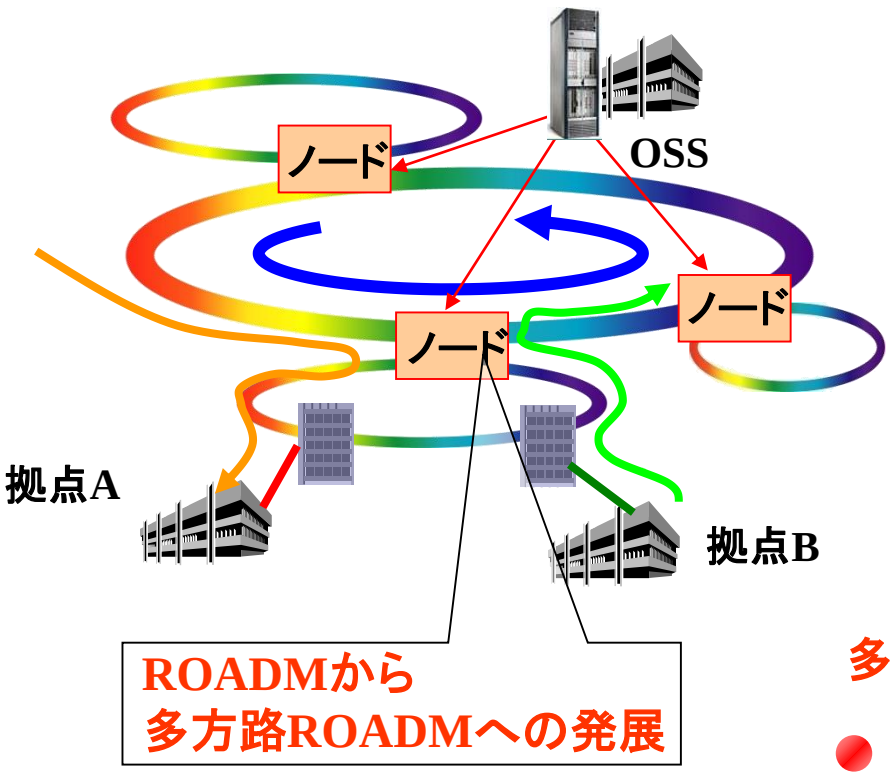
ROADMシステム



- OSSの指示に従い ADD, DROP, Thru を制御
- Thru設定において１方路にしか送出できず

トランスポンダ = 送信器＋応答器
（トランシーバはトランスポンダ内の送受信器）

マルチ・リングシステム



ROADMノードの課題

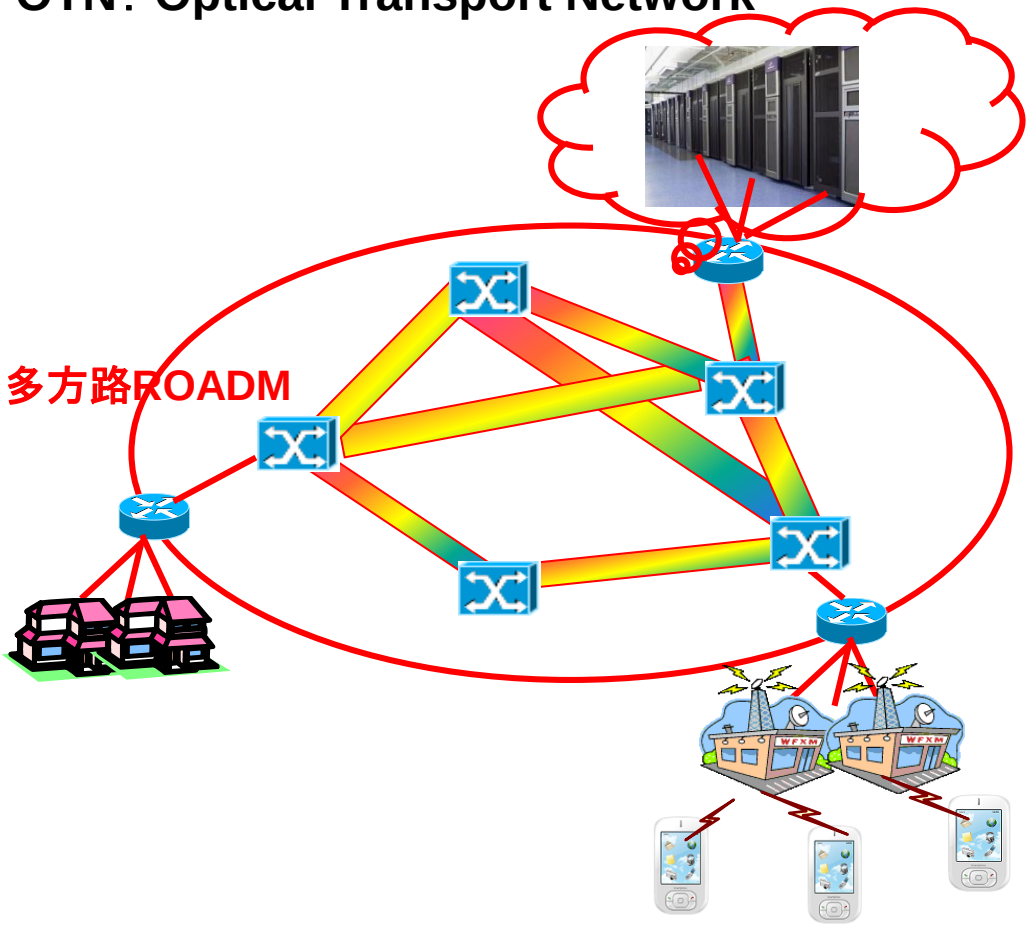
- 複数リングの接続の際には
  リング・システムごとに光パスを
  設定
- 中継インタフェースを接続して
  転送が必要

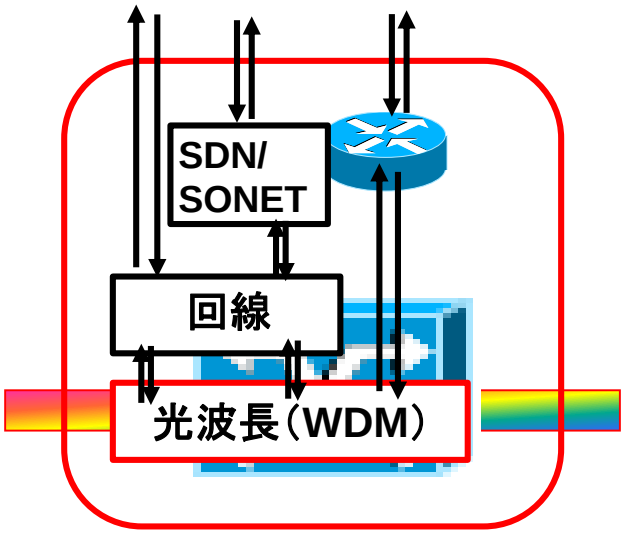
多方路ROADMノードのメリット

- 複数のリングを束ねることにより、
  光パスの設定が1回で済み、開通・廃止
  作業の大幅な削減
- リング間の中継インタフェース不要

トランスポート・ネットワークの進展

OTN: Optical Transport Network

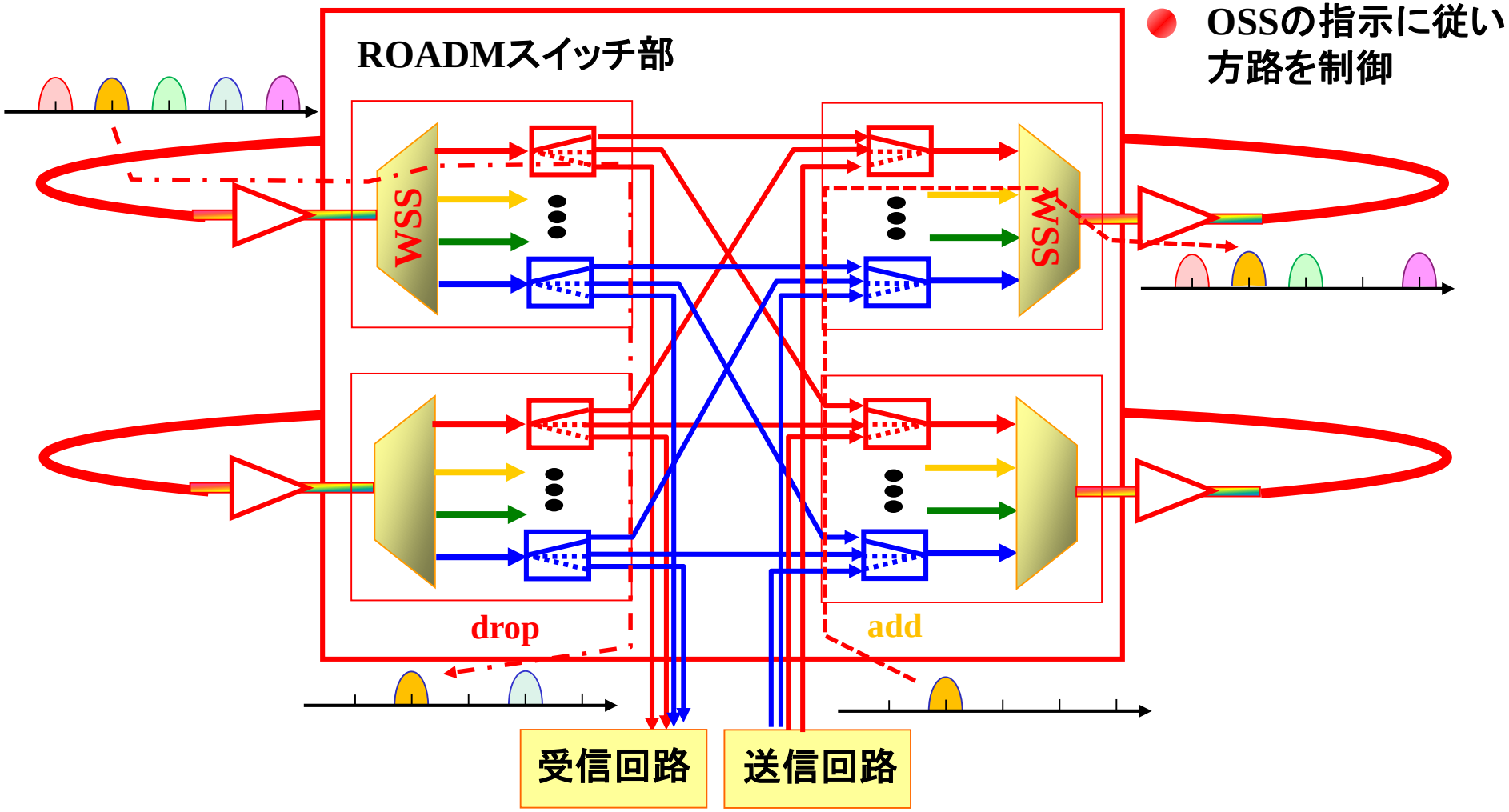




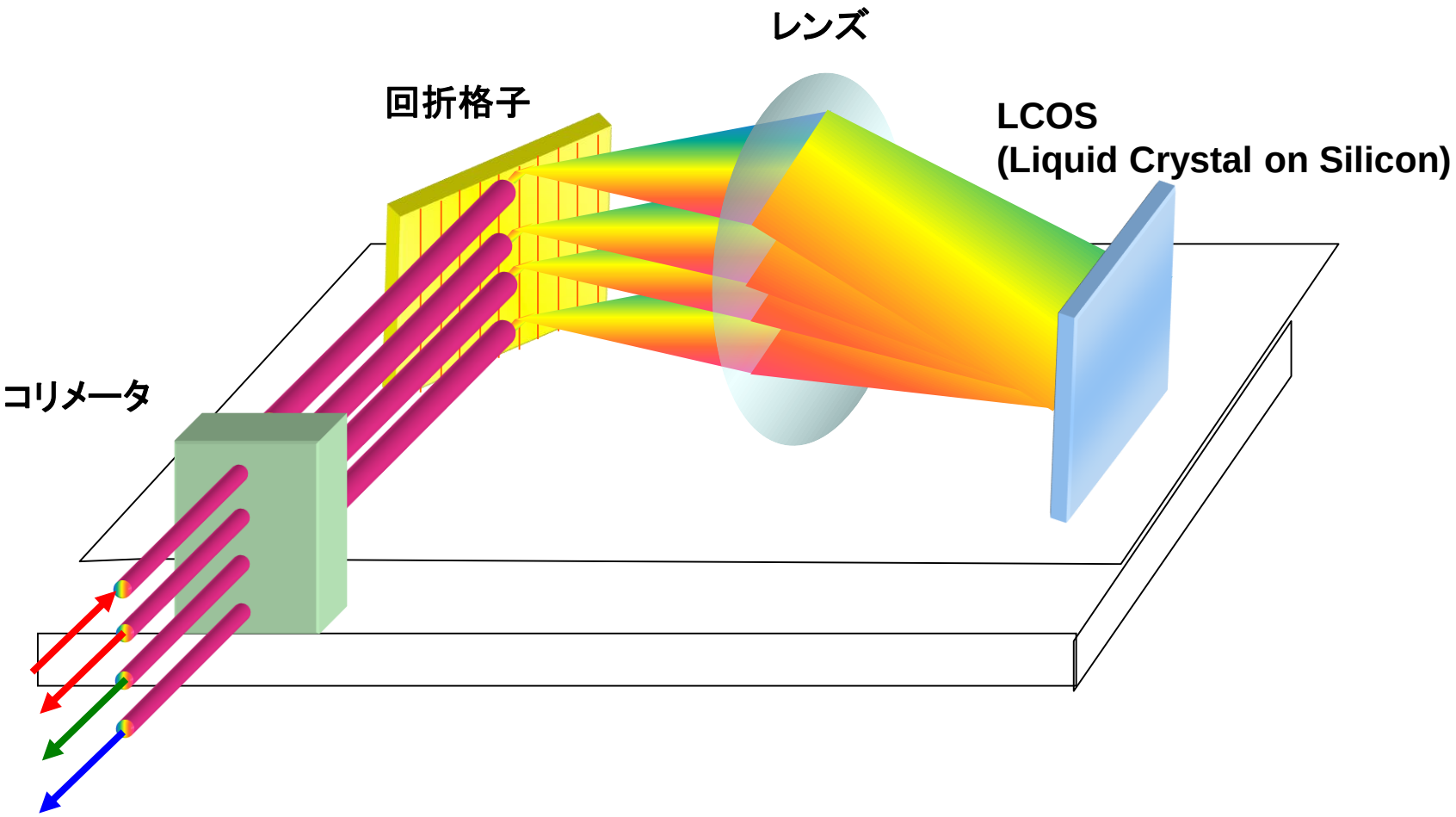
- 異なる3階層のネットワーク技術から構成（パケット・回線・光波長ネットワーク）
  大容量データを効率よく転送するための技術
- 2009年末の改定（第3世代OTN）より、point-to-pointからネットワーキングへ

多方路ROADMの基本構成
（Colorless, Directionless, Contentionless:CDC）

WSS: Wavelength Selective Switch

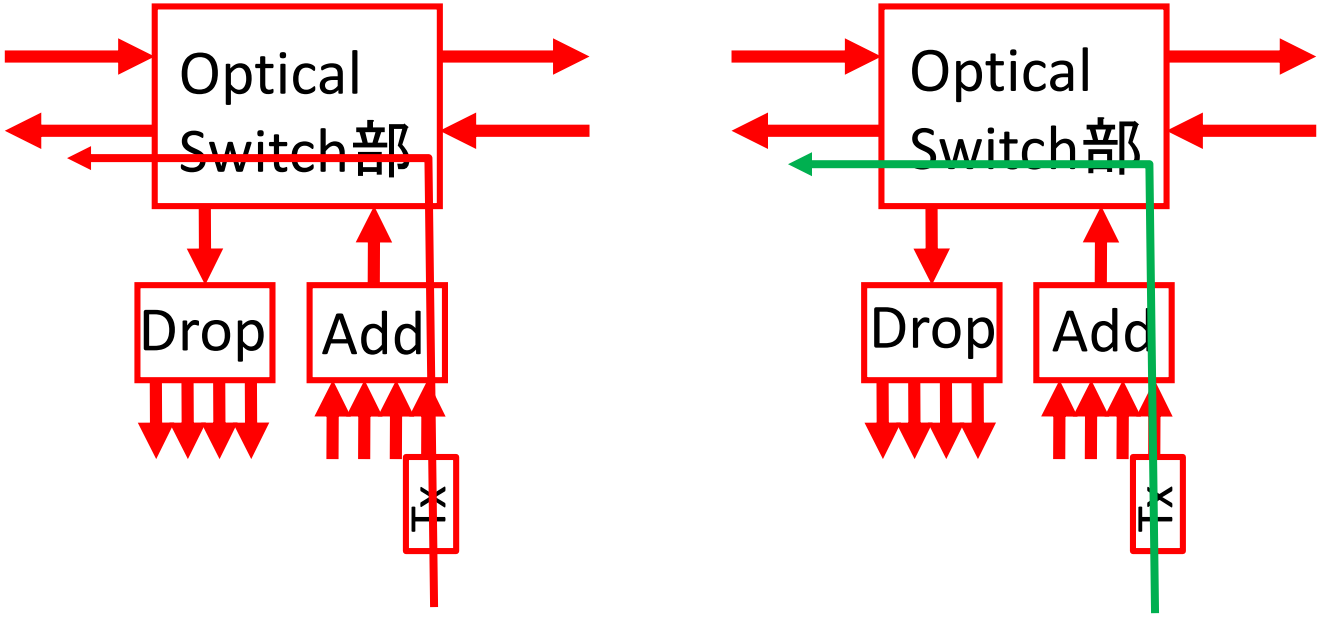


波長選択スイッチ
（Wavelength Selective Switch, WSS)



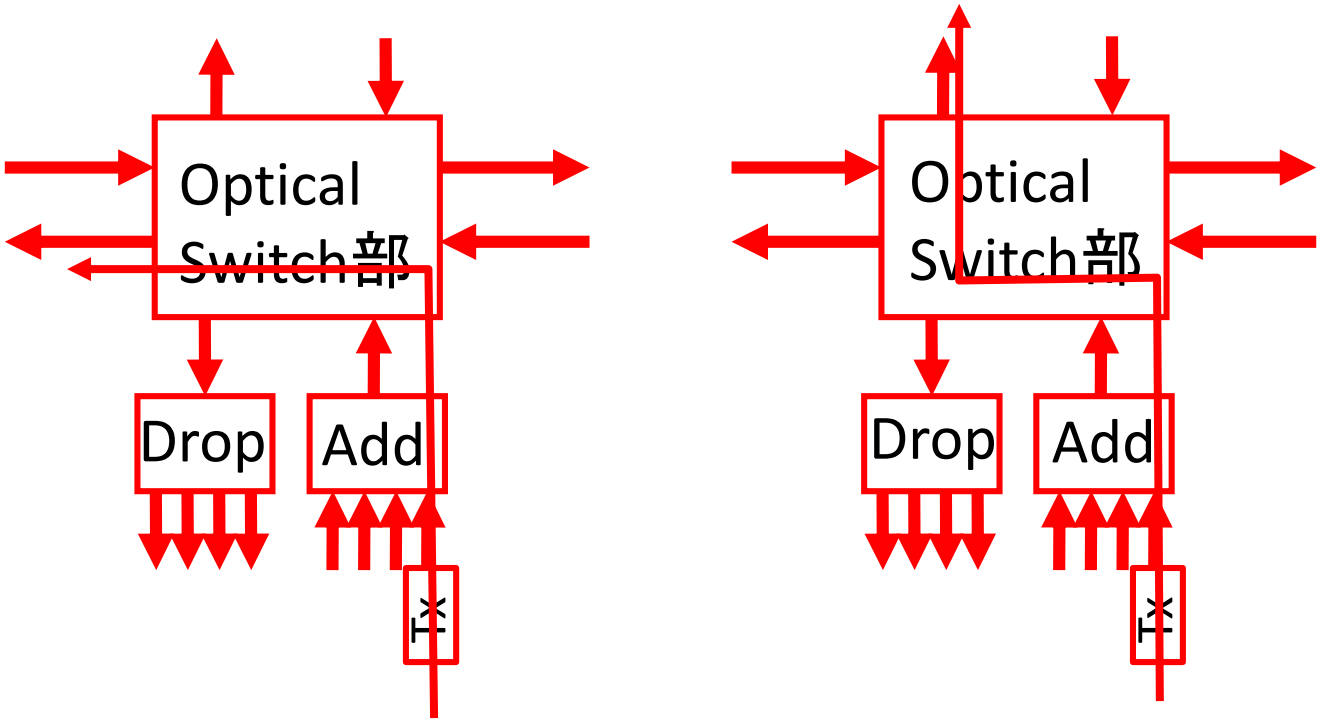
ROADMのいろいろな機能（Colorless）

同じ送信器から同じ方路に任意の波長を追加可能



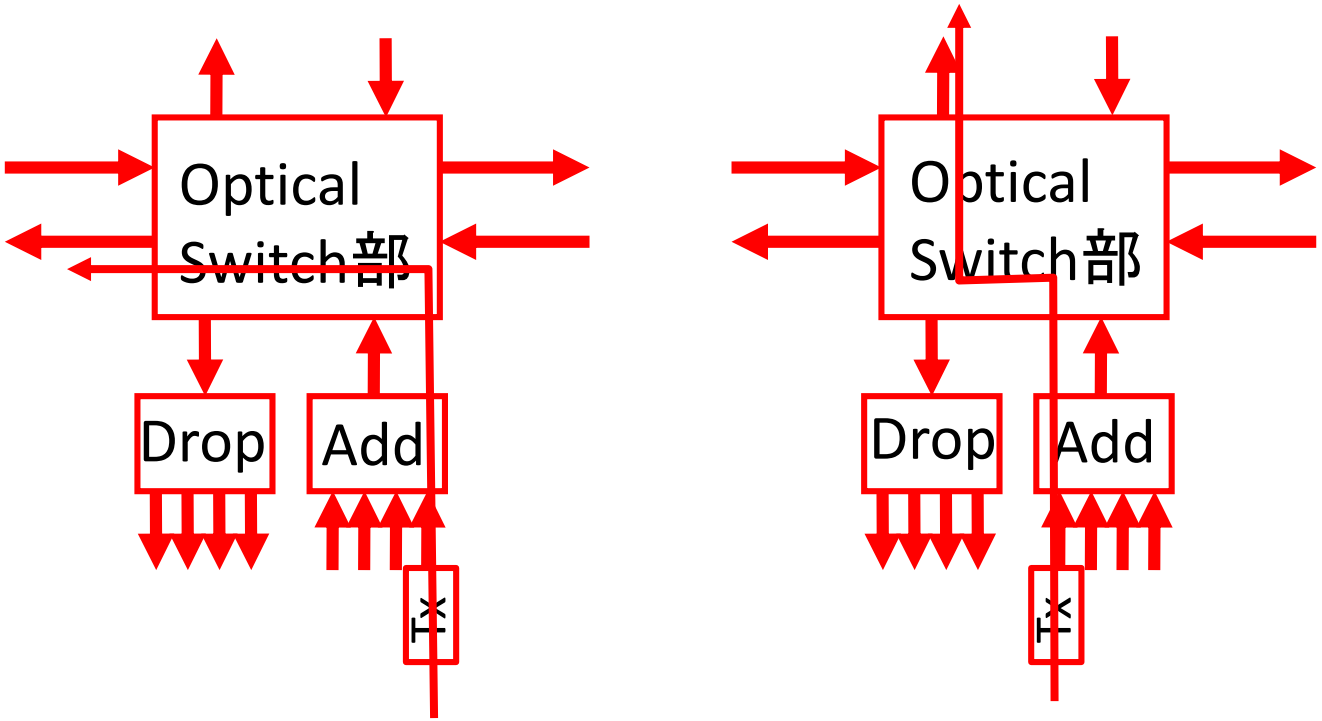
ROADMのいろいろな機能（Directionless）

同じ送信器から任意の方路に追加可能



ROADMのいろいろな機能（Contentionless）

異なる送信器から任意の方路に同じ波長を追加可能



Software Defined Network (SDN) & Elastic Network

SDNとElastic Networkとは？

- Software Defined Network (SDN)

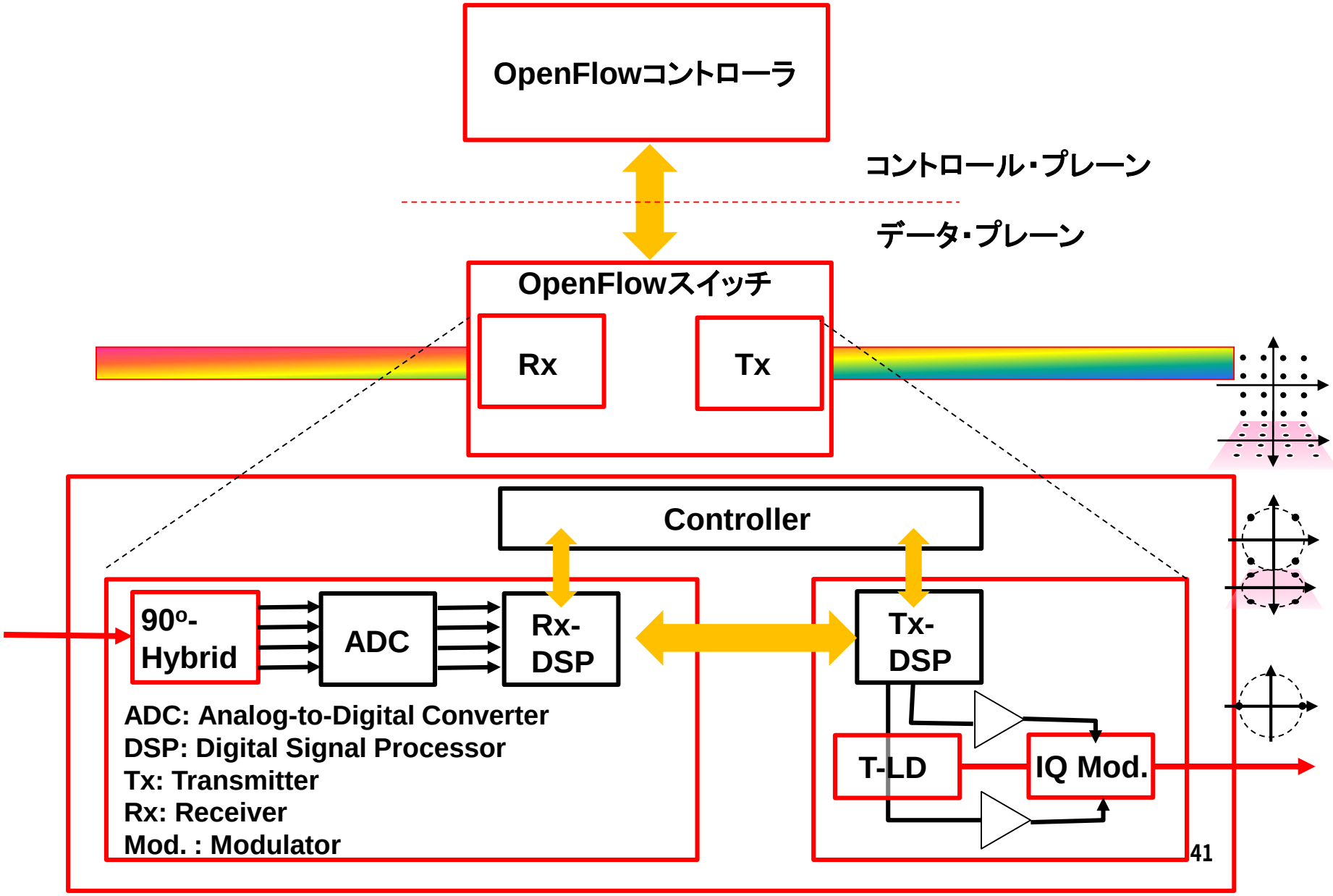
・ネットワーク資源（送受信方式やトポロジーなど）を仮想化し、要求される帯域や機能に応じてソフトベースで再構築可能とするネットワーク。

・OpenFlow技術：
データ・プレーンとコントロール・プレーンを分離し、ネットワーク管理者が制御部（OpenFlowコントローラ）を設計・実装。

- Elastic Network

・ユーザから要求される帯域に応じて／ネットワークの信号対雑音比の状況に応じて　送受信の変調方式を適応的（Adaptive）に再構築するネットワーク方式。

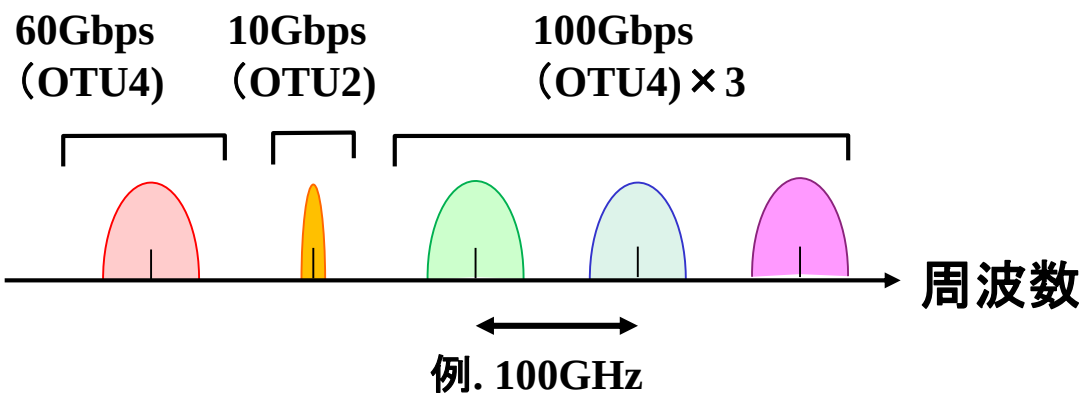
Software Defined Tranceiver



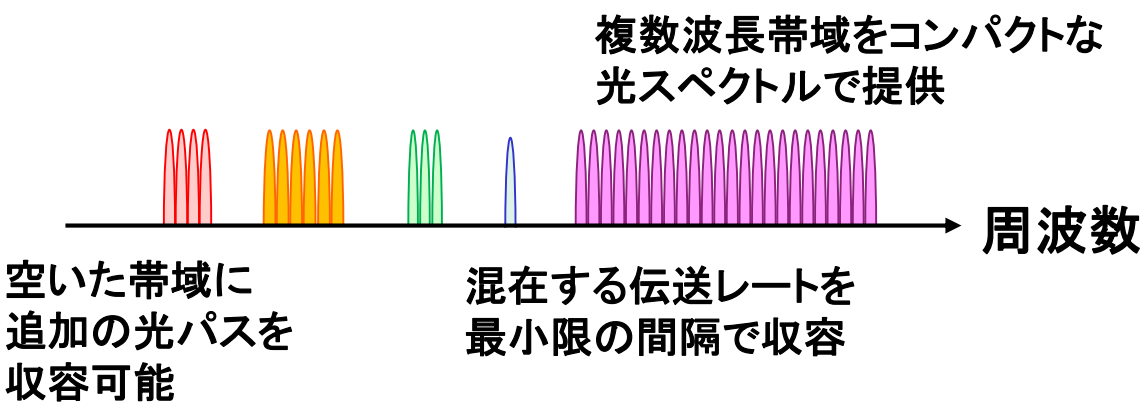
エラスティック光パス・ネットワークのコンセプト

エラスティックあるいはグリッドレス

既存（周波数グリッドに基づく光パス配置）

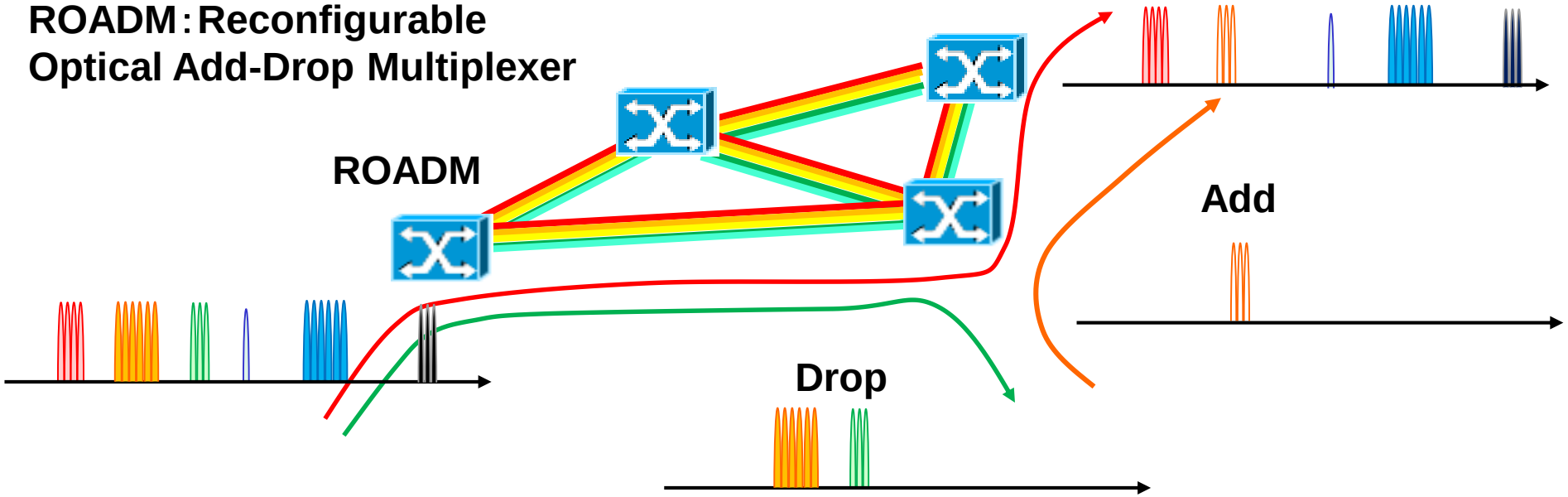


エラスティック光パス配置



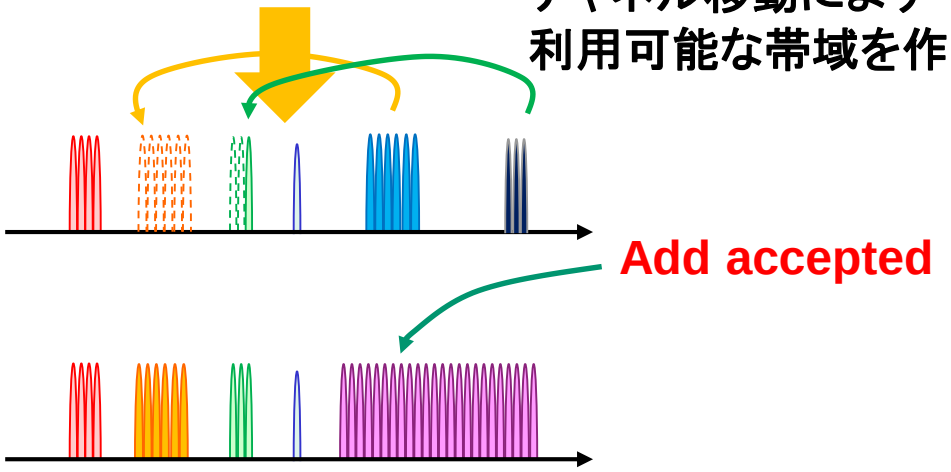
メトロ／コアネットワークにおける光スイッチを介した光信号の挿抜・帯域有効活用

ROADM：Reconfigurable
Optical Add-Drop Multiplexer



デフラグメンテーション技術

チャネル移動により
利用可能な帯域を作る



- OE変換 → 復調 → 歪補償 → 誤り訂正→ 符号化→ EO変換（波長変換）の複雑さの回避
- 波長分波・光スイッチ（波面制御）を利用