

# 2017年度『光通信システム』開講

- ・『光波工学』 國分 泰雄 著 共立出版
- ・『光通信工学』(1)(2) 羽鳥 光俊・青山 友紀 監修 コロナ社
- ・『超高速ネットワーク技術』 河内 正夫 監修 電気通信協会
- ・『やさしいデジタル伝送』 山下 孚 編著 電気通信協会
- ・『やさしいデジタル交換』 愛澤 慎一・清水 博 編著  
電気通信協会
- ・『やさしい光アクセスシステム』 由木 泰紀・三浦 秀利 編著  
電気通信協会
- ・『光導波路の基礎』 岡本 勝就 著 コロナ社
- ・『半導体フォトニクス工学』 池上 徹彦 監修 コロナ社
- ・『光増幅器とその応用』 石尾 秀樹 監修 オーム社
- ・“Fiber Optic Communication Systems”, Govind P. Agrawal,  
Wiley-Interscience

# 第1回

## 光通信システム (基礎・長距離基幹系)

## 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)

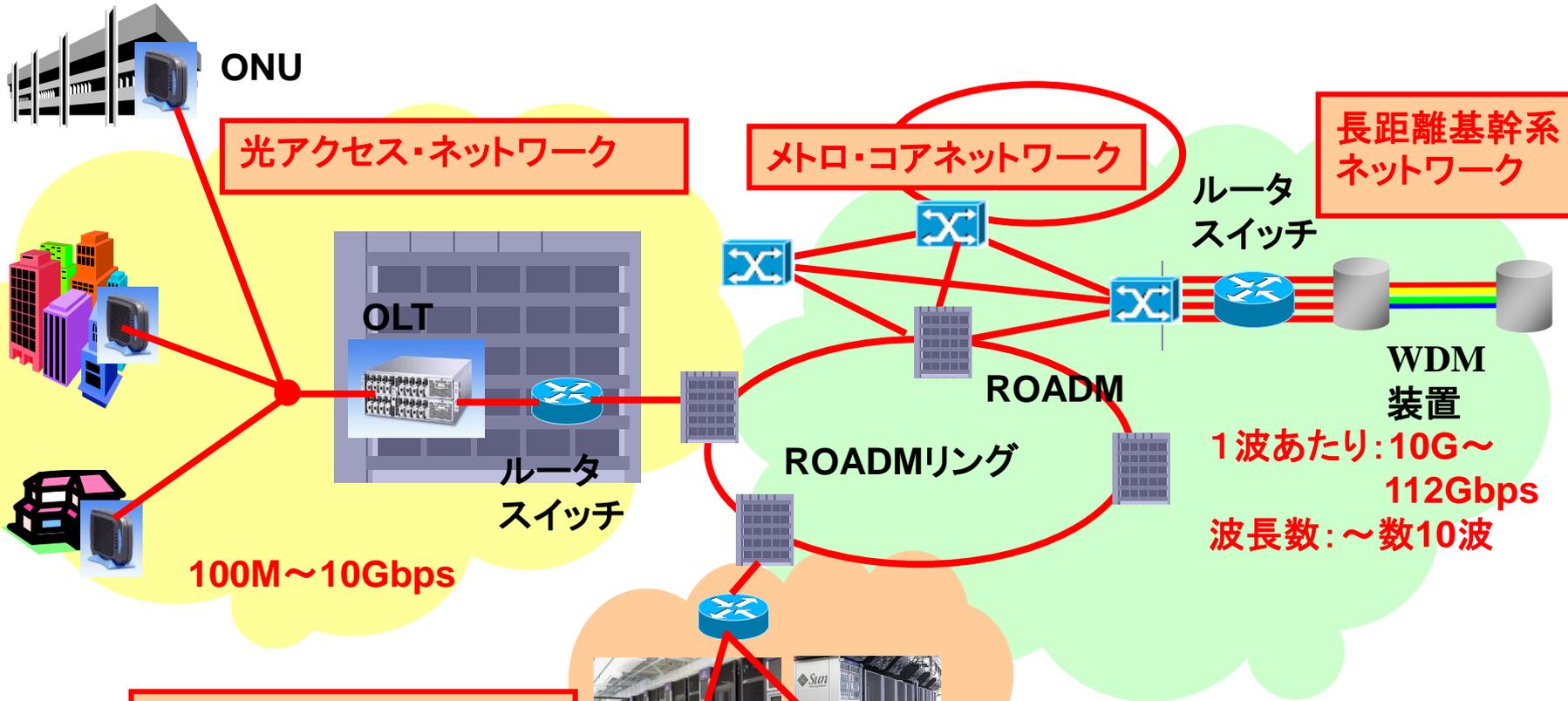
小山	日付	教科書	内容
第9回	1/11	OCW-i掲載資料(第9回)の精読・分散補償の概念の理解	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	1/15	OCW-i掲載資料(第10回)の精読・動作原理の説明	光増幅器
第11回	1/18	OCW-i掲載資料(第11回)の精読・ビット誤り率の計算	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/22	OCW-i掲載資料(第12回)の精読・ビット誤り率の相対比較	ビット誤り率 (コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/25	OCW-i掲載資料(第13回)の精読・WDMの性能的課題	波長多重(WDM)伝送 (分散マネジメント技術)
第14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

# まずは基本から

---

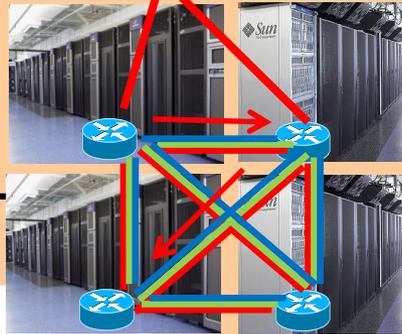
- 光ネットワークの構成
- 最近の研究開発トレンド
- 信号の制御の流れ
- 信号多重・スイッチング
- フレーム構成
- 電話由来ネットワークとインターネットの違い

# 光通信ネットワークの構成



データセンタ・ネットワーク

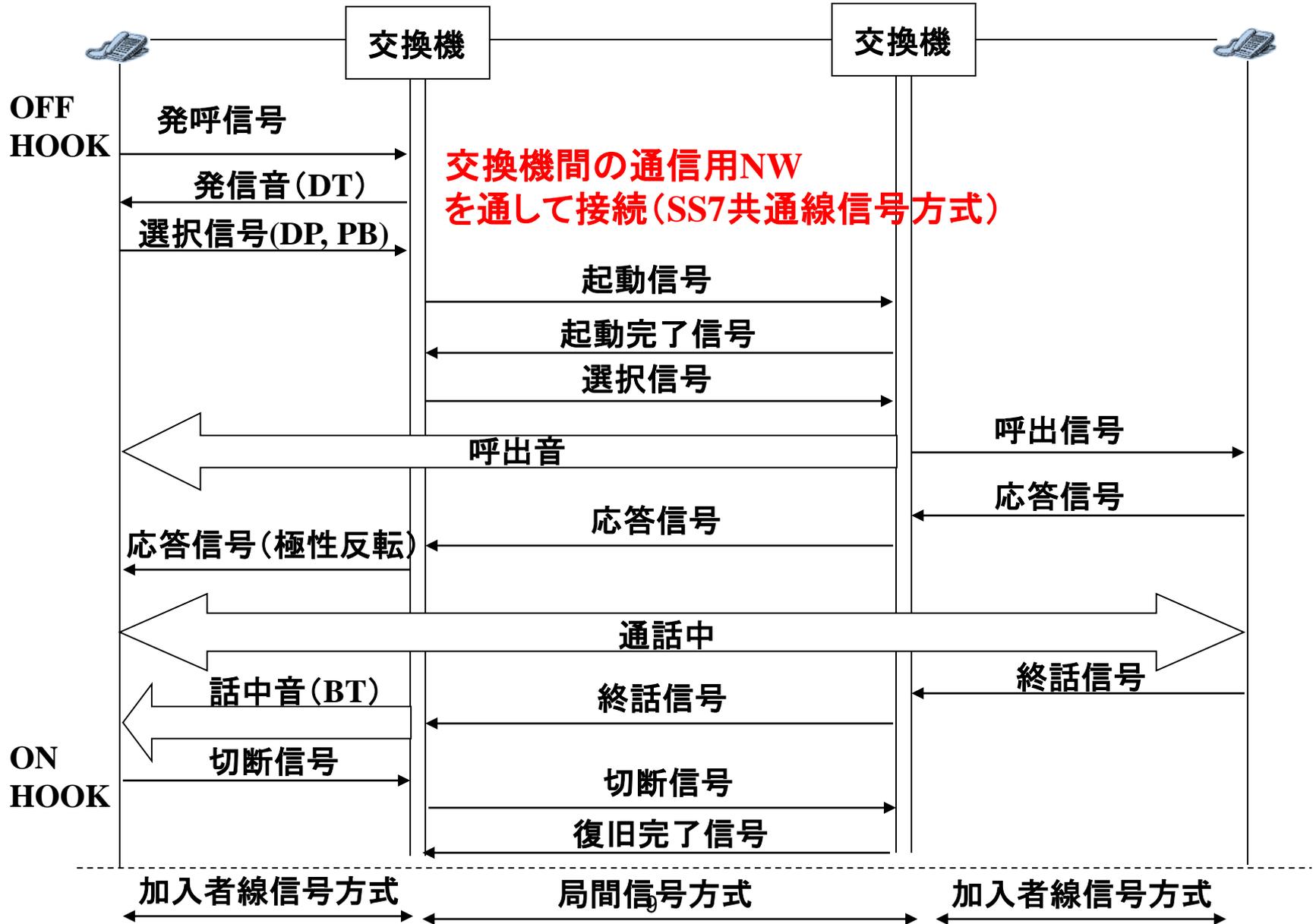
Hyper Giant:  
Google, Facebook, Microsoft, etc.



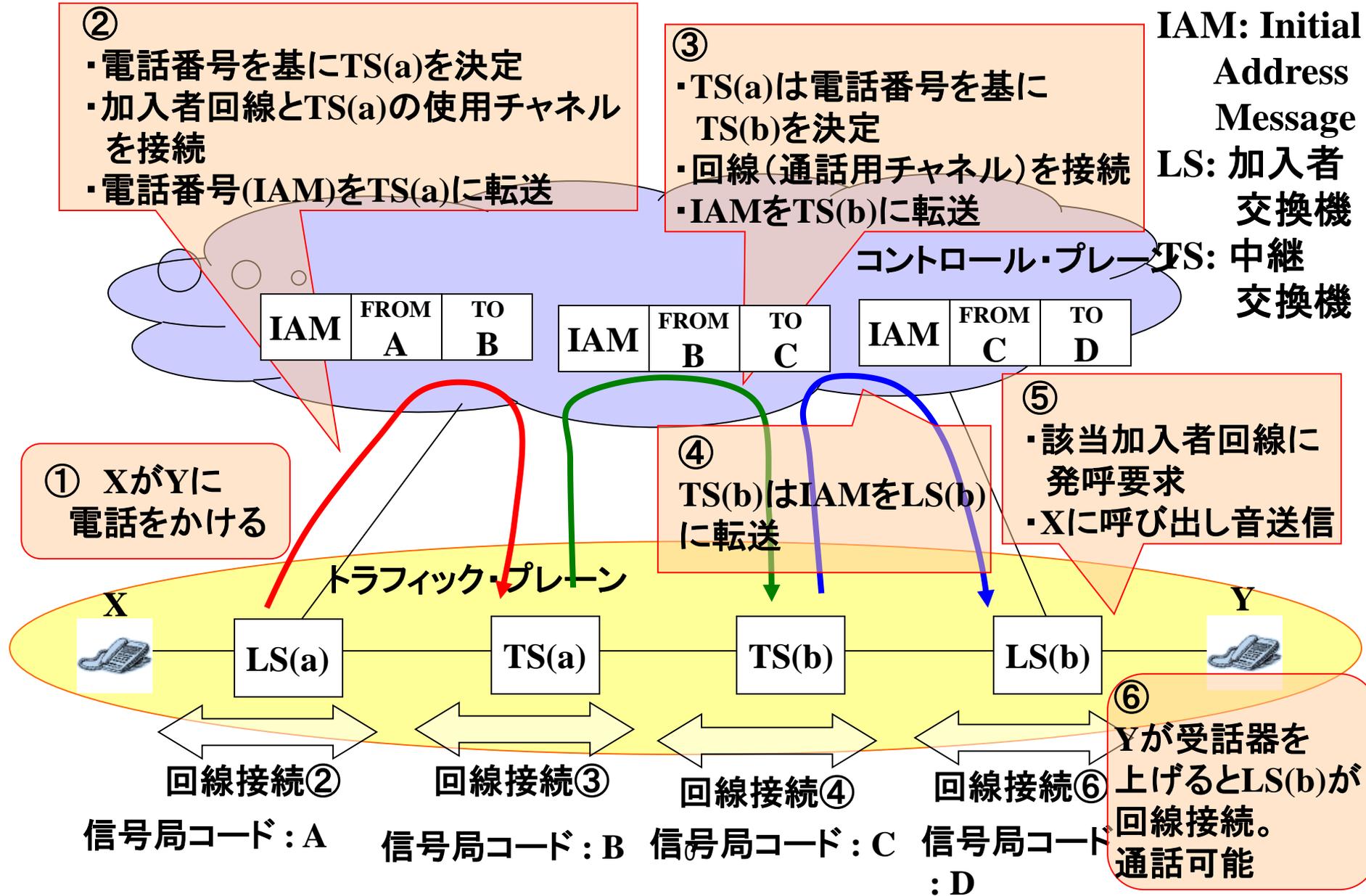
ONU: Optical Network Unit  
OLT: Optical Line Terminal  
ROADM: Riconfigurabile Optical Add-Drop Multiplexer  
WDM: Wavelength Division Multiplexing



# 長距離通話開始 — 電話網の信号の流れ —

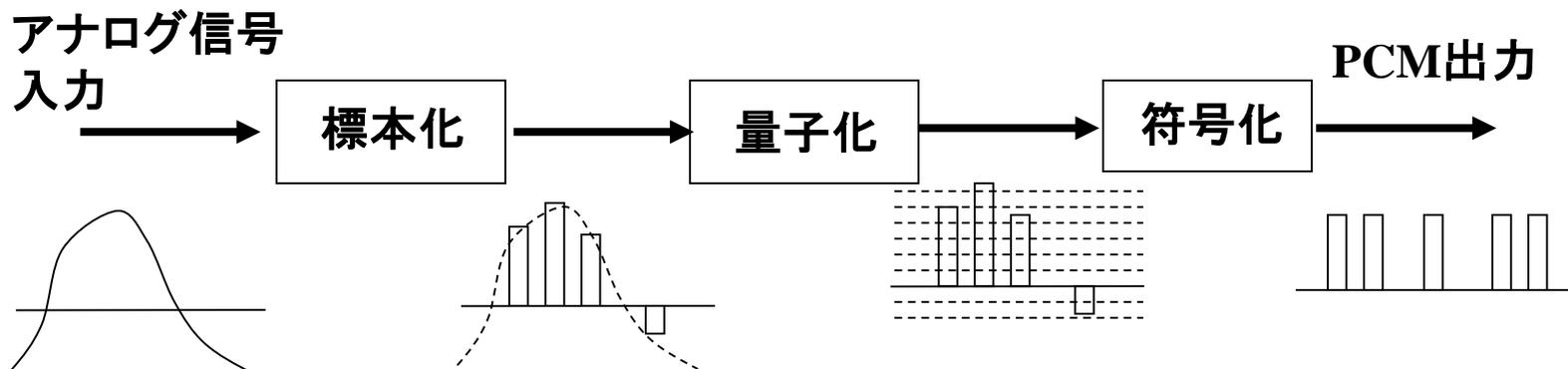


# No.7(SS7)共通線信号方式



# デジタル信号のビットレートの開始点 — 音声信号のデジタル化 —

## PCM変調 (Pulse Coded Modulation)



### ① 標本化 (Sampling)

- ・シャノンの標本化定理により、原信号の最高周波数の2倍以上の速度で標本化を行えば、再生可能。
- ・音声信号帯域(可聴周波数範囲)は0.3~3.4kHzであるため、8kHzでサンプリング

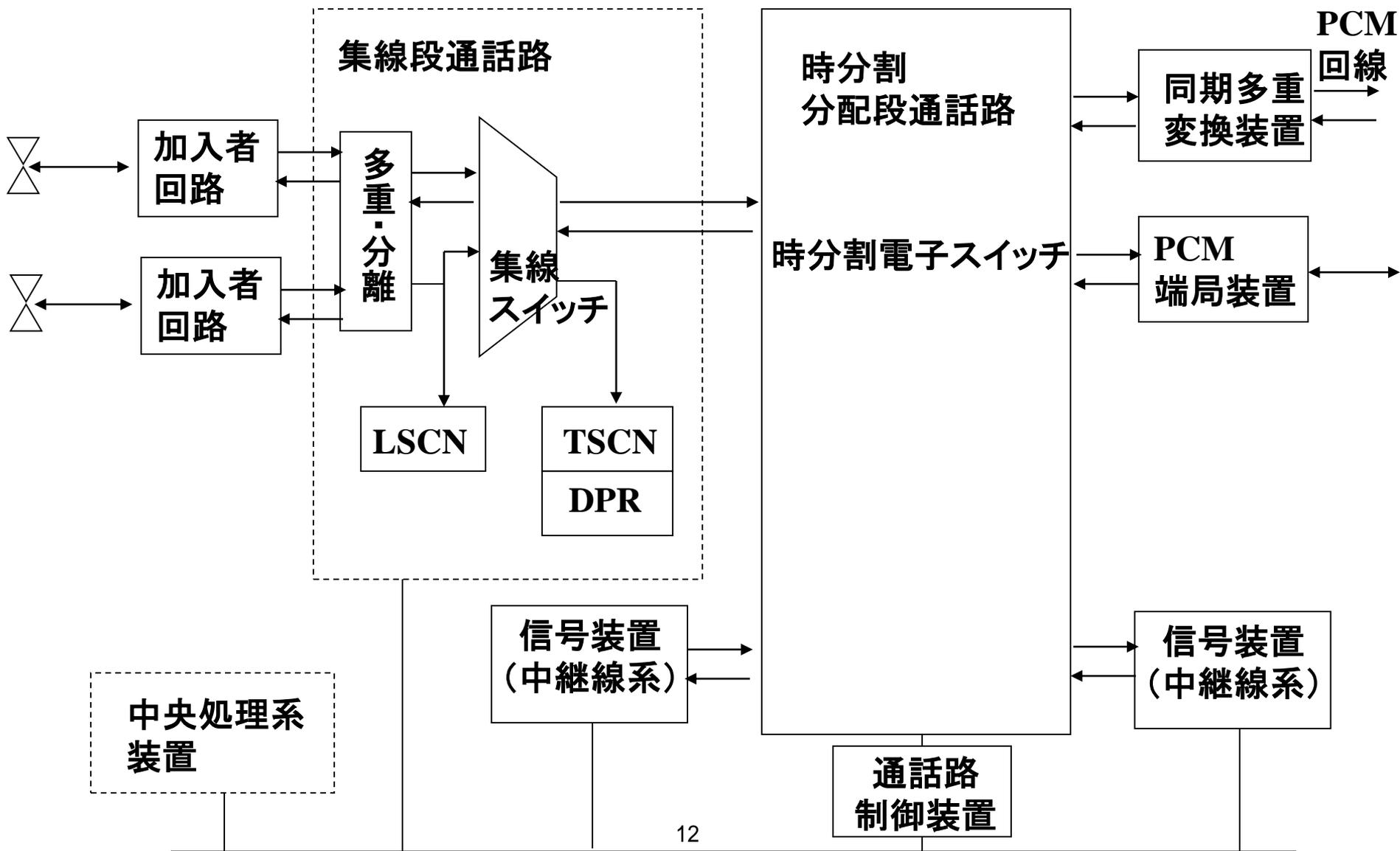
### ② 量子化 (Quantization)

- ・8ビット量子化により、 $2^8=256$ 階層の振幅値を使用
- ・ダイナミックレンジは  $20\log 2^8 = 48\text{dB}$

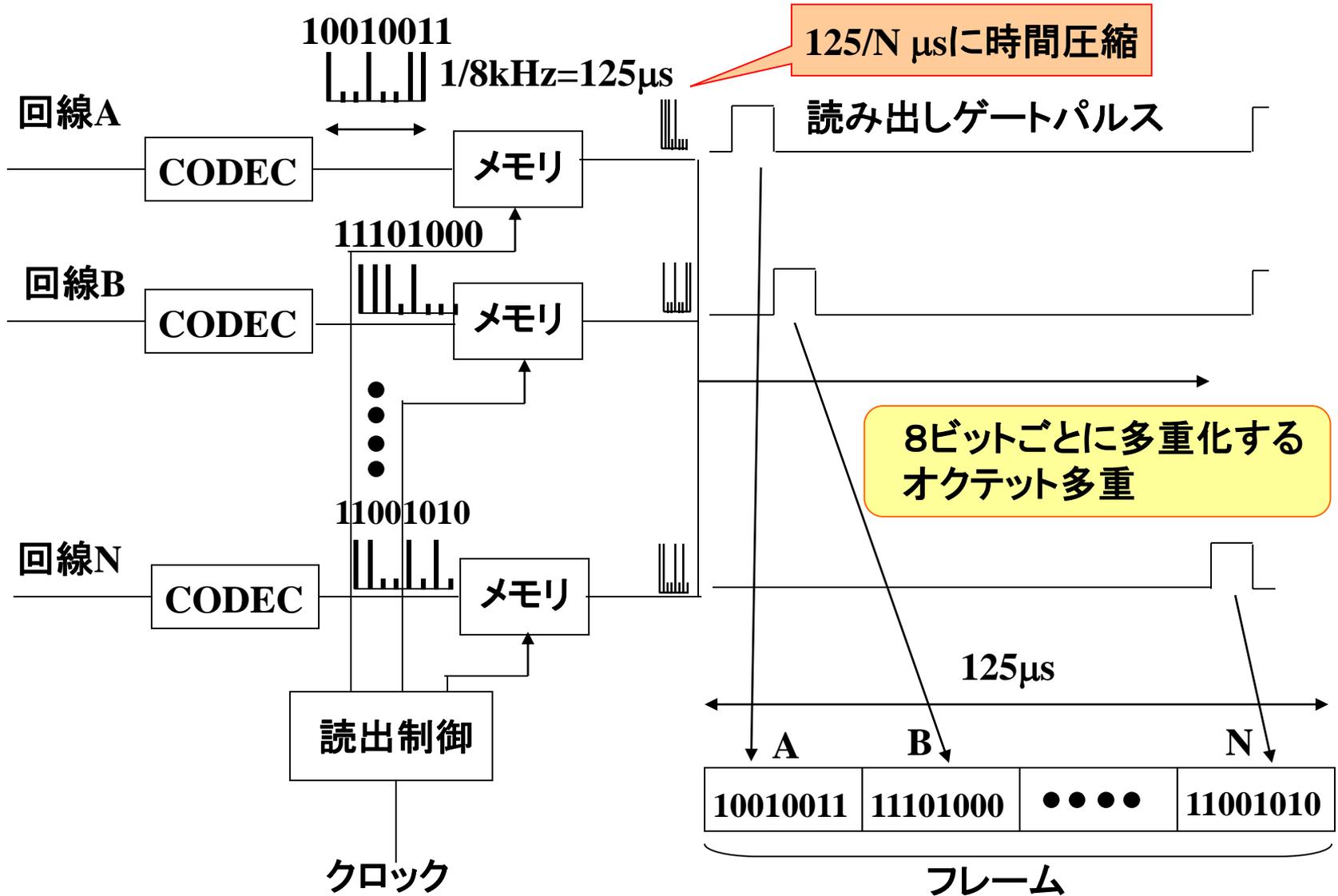
### ③ 符号化 (PCM)

- ・音声1チャネルの伝送速度は、 $8\text{kHz} \times 8\text{ビット} = 64\text{kHz}$  (-> Bチャネル帯域)

# デジタル交換機の基本構成



# 信号の多重化

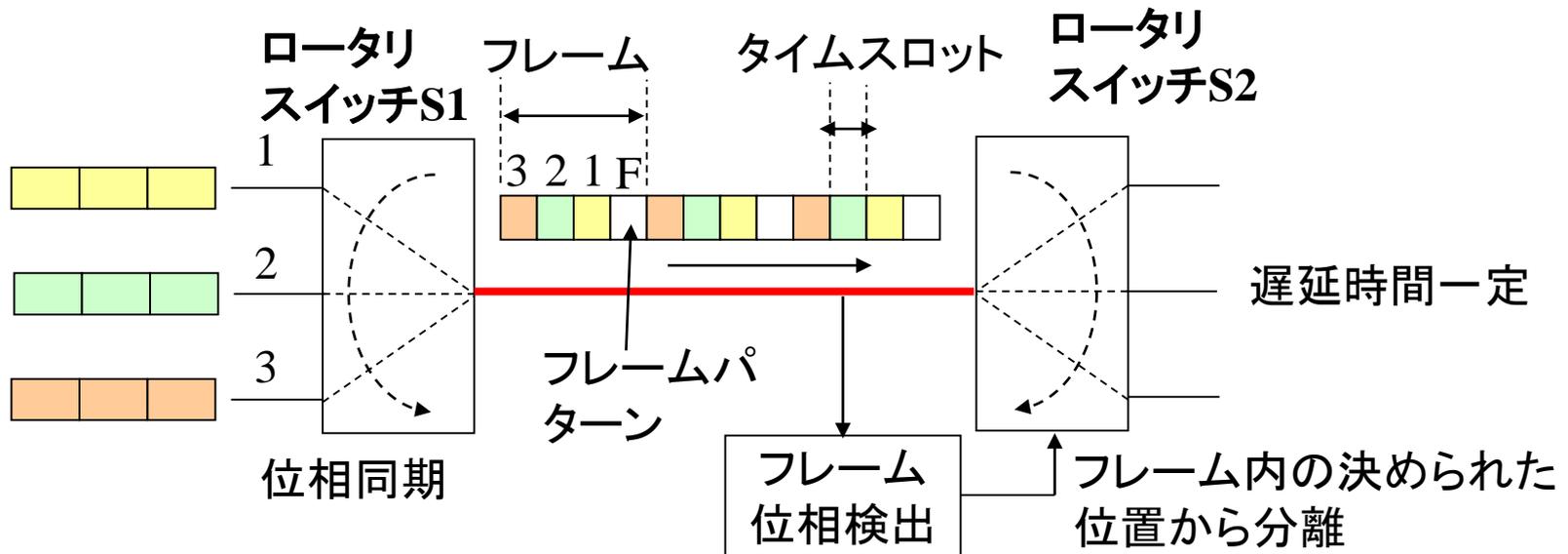


## 同期化とフレーム同期

- ① 送信側の各入力ポートのメモリに入力されるパルス速度はすべて等しく、ロータリスイッチS1の回転速度と一定の関係を保つ（同期化）。

入力パルス速度 × ポート数 = ロータリスイッチS1の回転速度

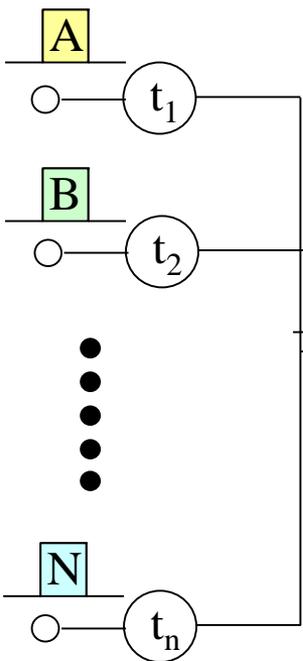
- ② 受信側のロータリスイッチS2がS1と同一速度・位相で回転するよう、回転速度・位相情報を送信側から受信側に転送（フレーム同期）。



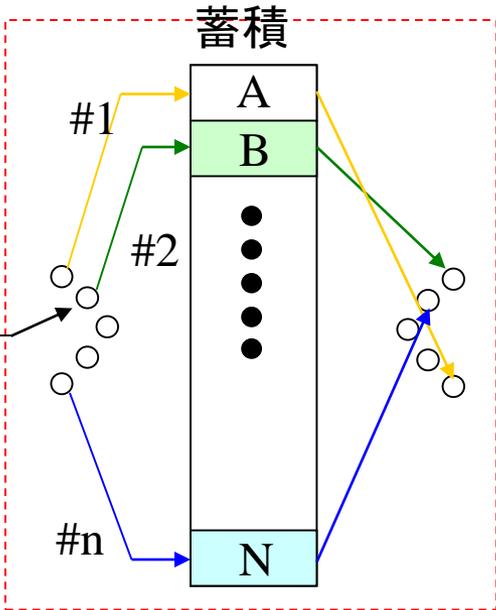
# デジタル交換の時分割多重 (位相変換制御)

## 時分割交換方式

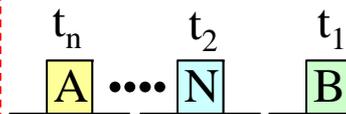
多重化



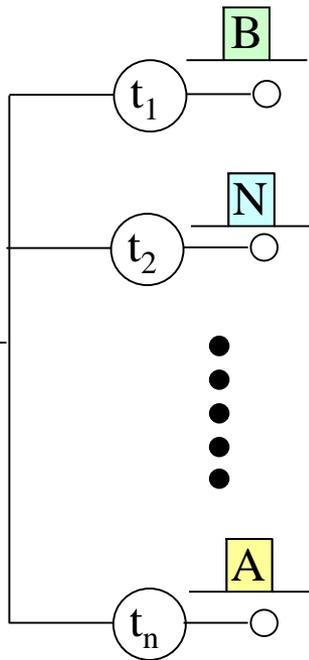
順序入換  
(位相変換)



時間スイッチ  
(Tスイッチ)

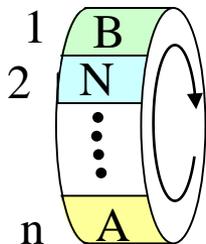


分離



ハイウェイ:  
信号が多重化される物理線

制御メモリ

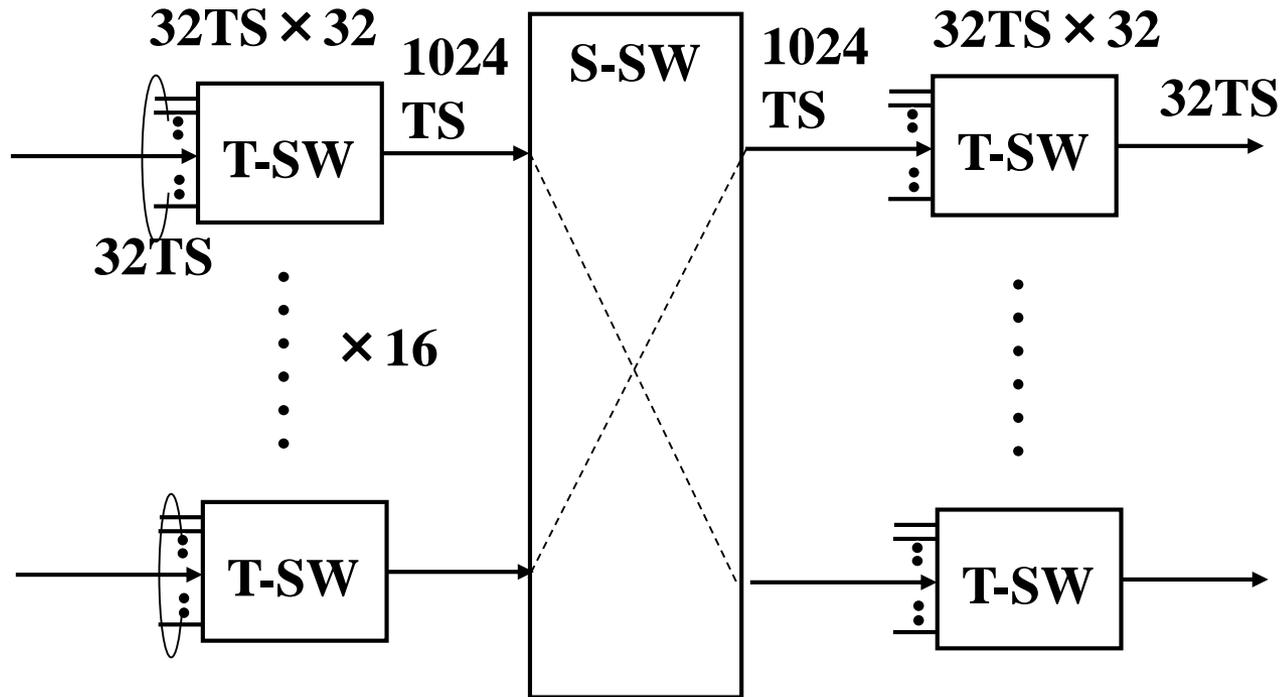


# T-Sピラミッド

## T-Sピラミッド:

スイッチ規模を拡張する時のTスイッチ・Sスイッチの組み合わせ

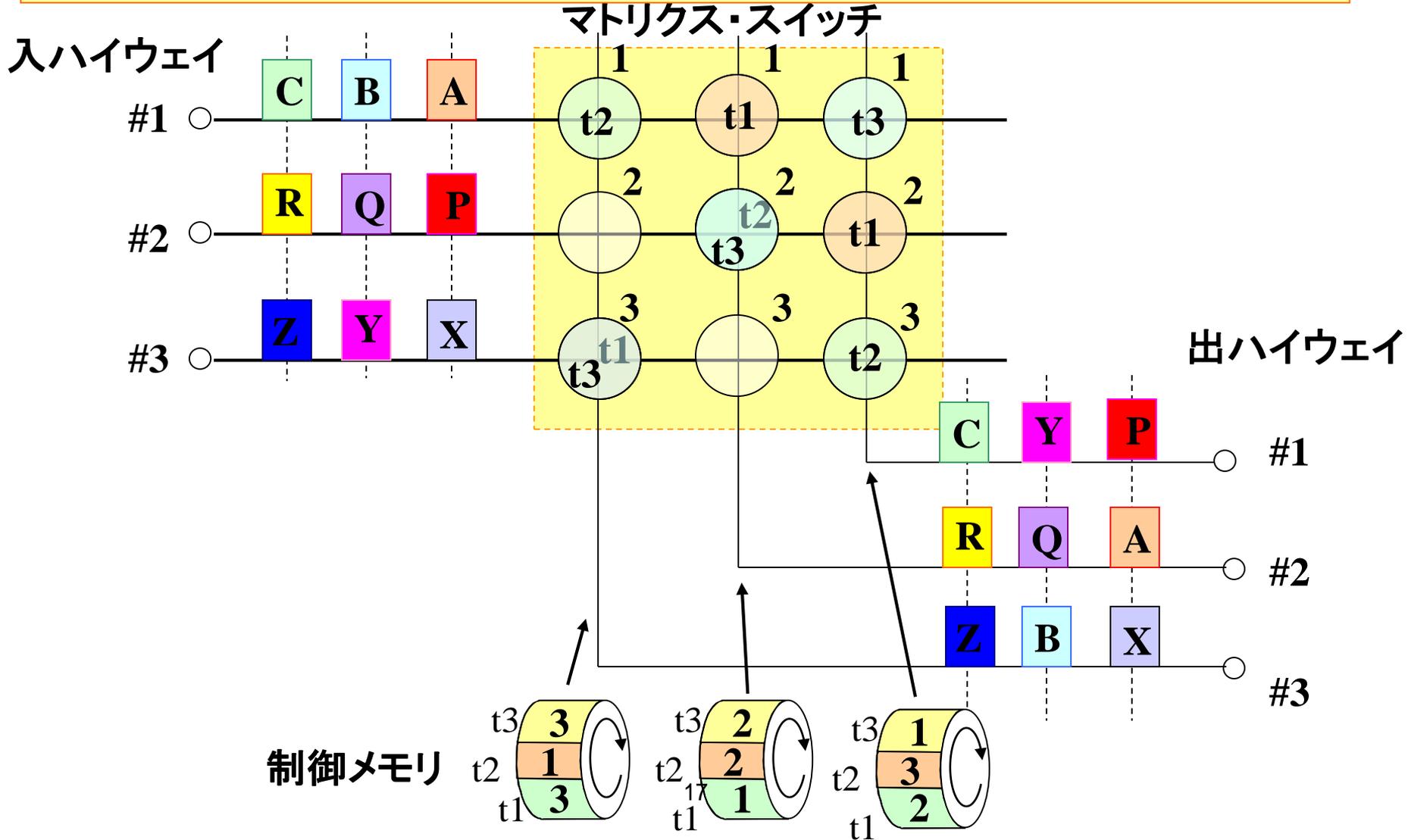
選択経路数の増加度・通話路網の使用能率向上の観点より  
T-S-T系列が用いられる。



TS : Time Slot (多重・分離の単位となっている1組のビット列の時間領域)

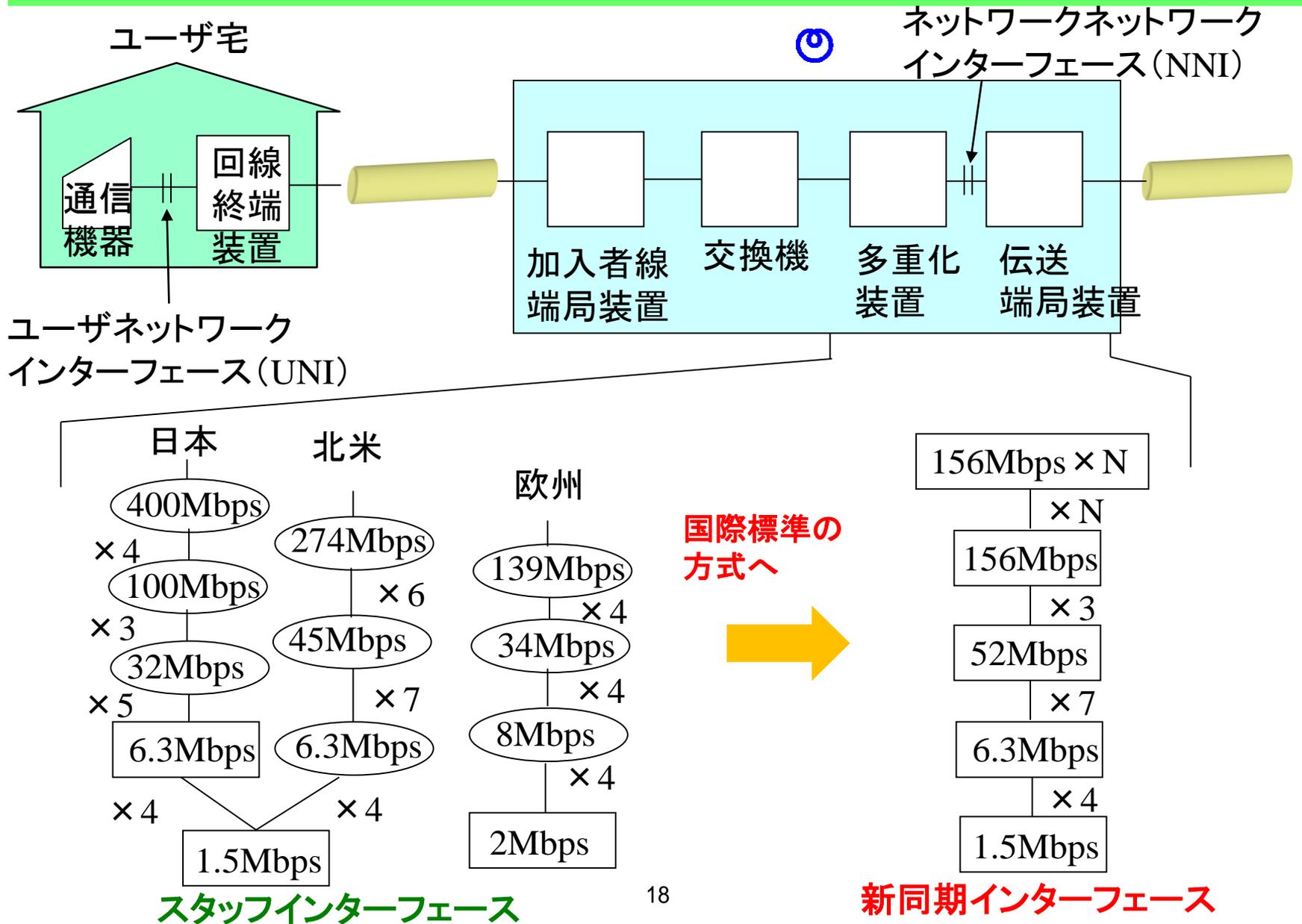
# 空間スイッチング

スイッチ拡張時のメモリサイズ・速度の限界により**空間スイッチ(Sスイッチ)**を組み合わせて拡張



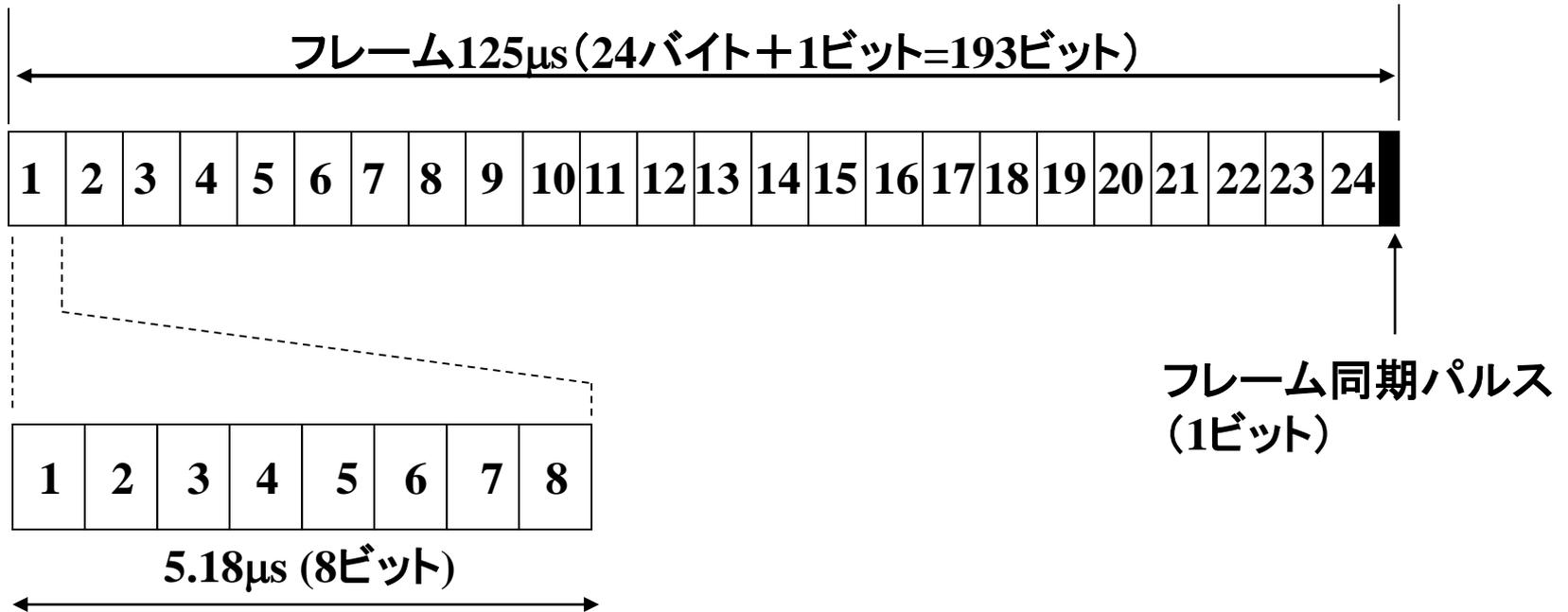
# 多重方式の基本

## —新同期網 (Synchronous Digital Hierarchy : SDH) —



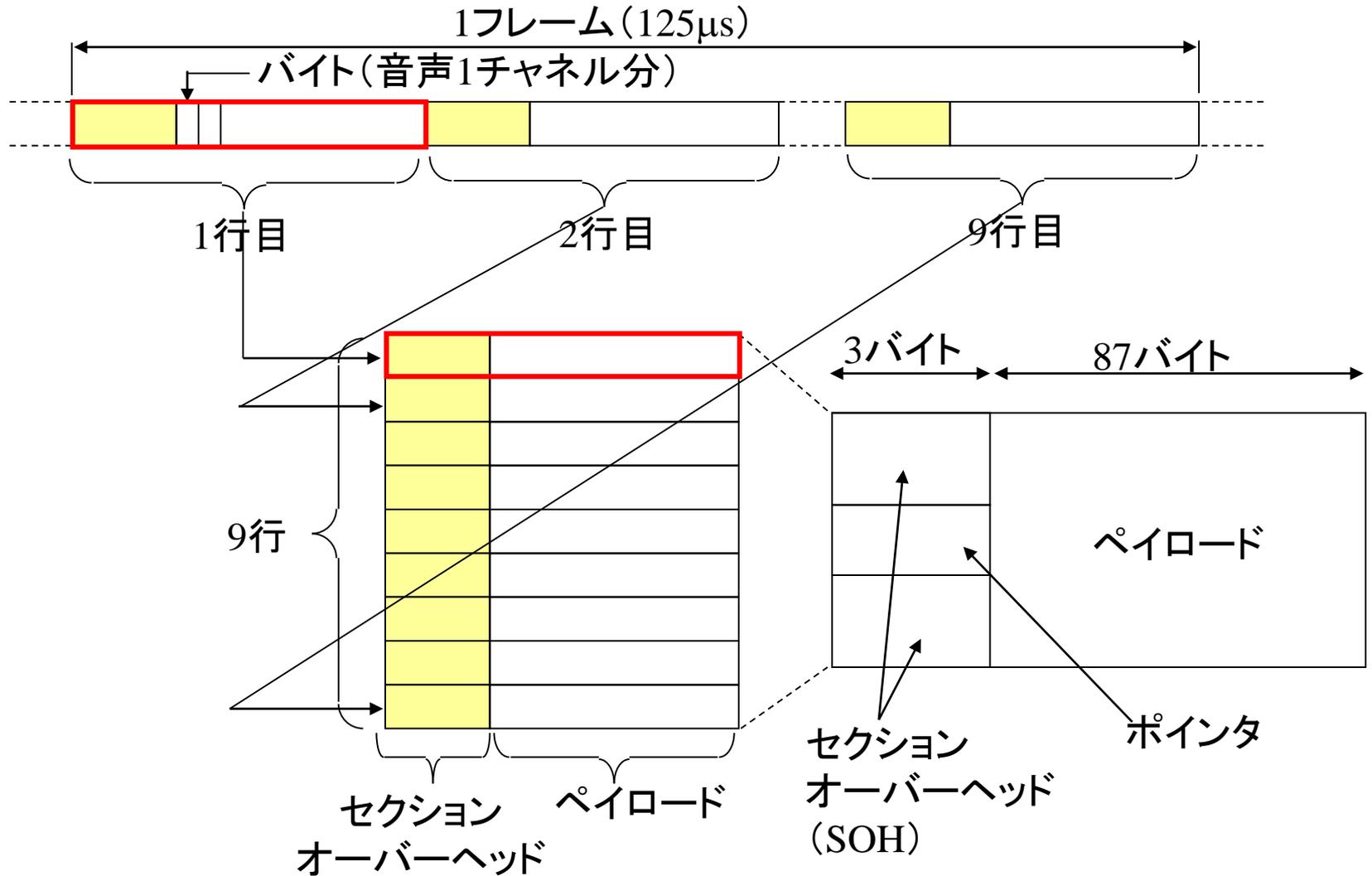
# 信号のフレーム構成

## 1.544Mbpsの信号フレーム構成



# SDHインターフェースの表現方法 (STM-0)

## STM-0(51.84Mbps)インターフェースのフレーム構成

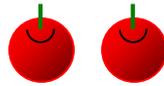


$$90\text{バイト} \times 8\text{ビット} \times 9\text{行} / 125\mu\text{s} = 51.84\text{Mbps}$$

# SDHインタフェースへの多重化イメージ

サービス

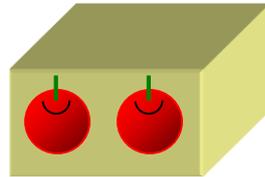
音声・データ



POH: Path Overhead  
SOH: Section OH

テナ

C-11

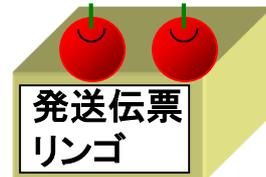


箱に入れる

パス

(1.544Mbps)

VC-11  
(POH付加)

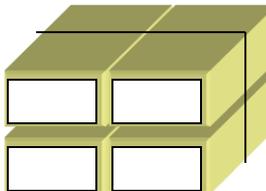


発送伝票を付ける

りんごをどういう順番で並べているかを  
伝票に書き、蓋をする(ポイント)

× 4

TUG-21

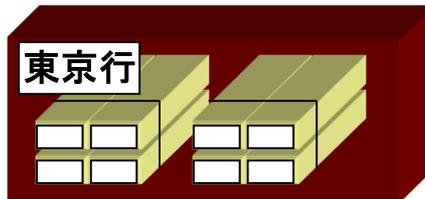


紐で縛る

パス

(51.84Mbps)

VC-3  
(POH付加)



貨車に行き先を書く(OH)

列車の何両目に載せるかを書く  
(ポイント)

× 3

STM-1  
(SOH付加)



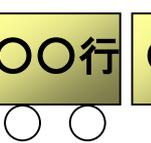
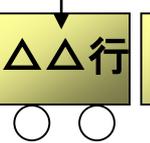
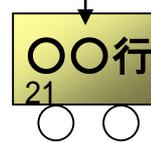
中継伝送

(155.52Mbps)

中継伝送

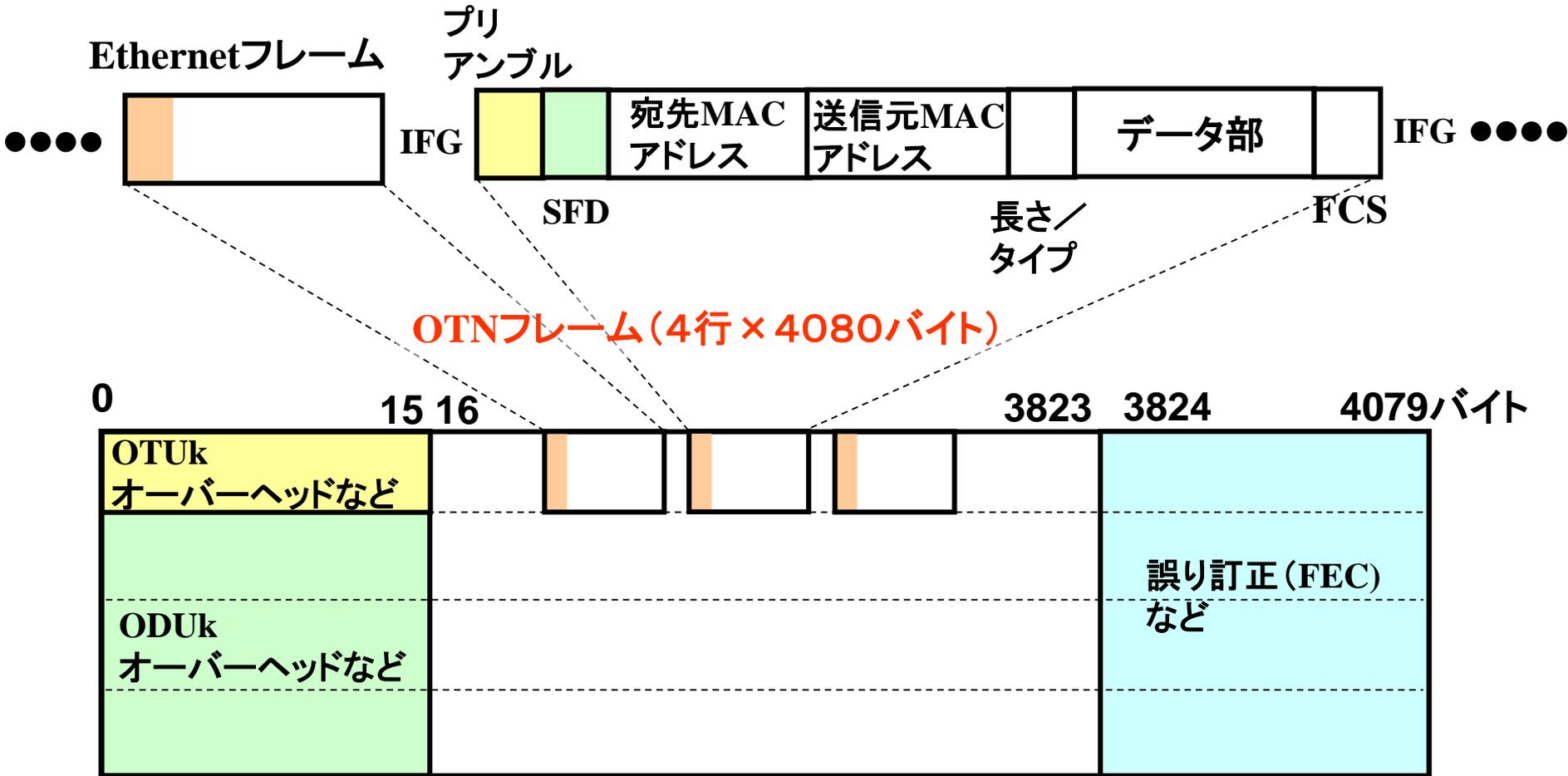
(155.52Mbps × N)

STM-N

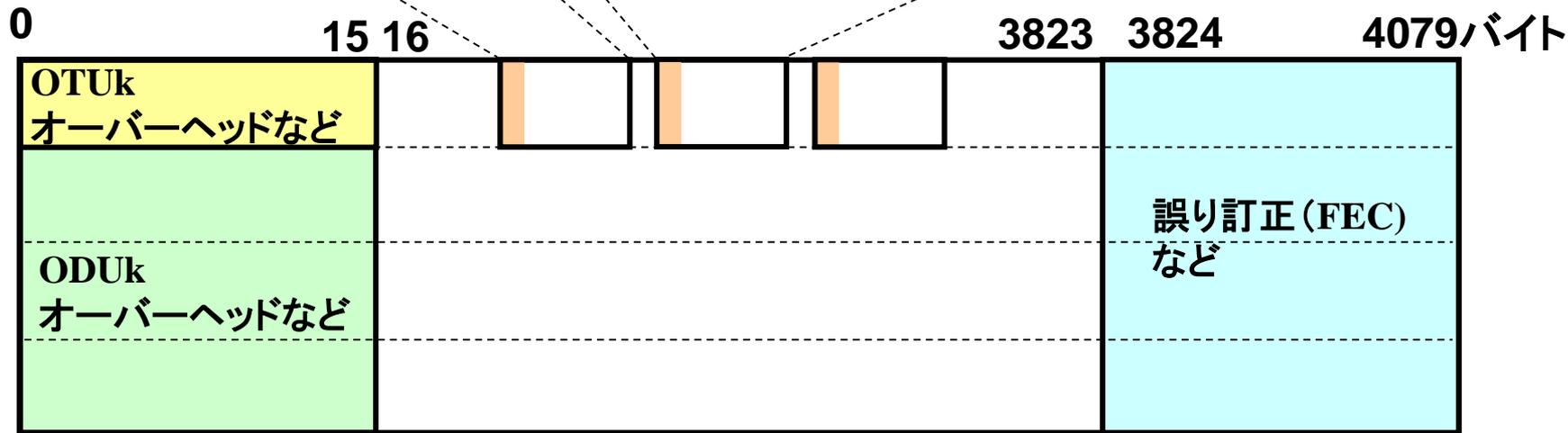


# 全サービスを収容するOTN (Optical Transport Network)

- 電話を基準にするSDHに対し、IP・Ethernetも統一的に扱える国際標準のフレーム
- ユーザデータを丸ごと組み込んで運ぶ「デジタル・ラッピング」



OTNフレーム(4行×4080バイト)



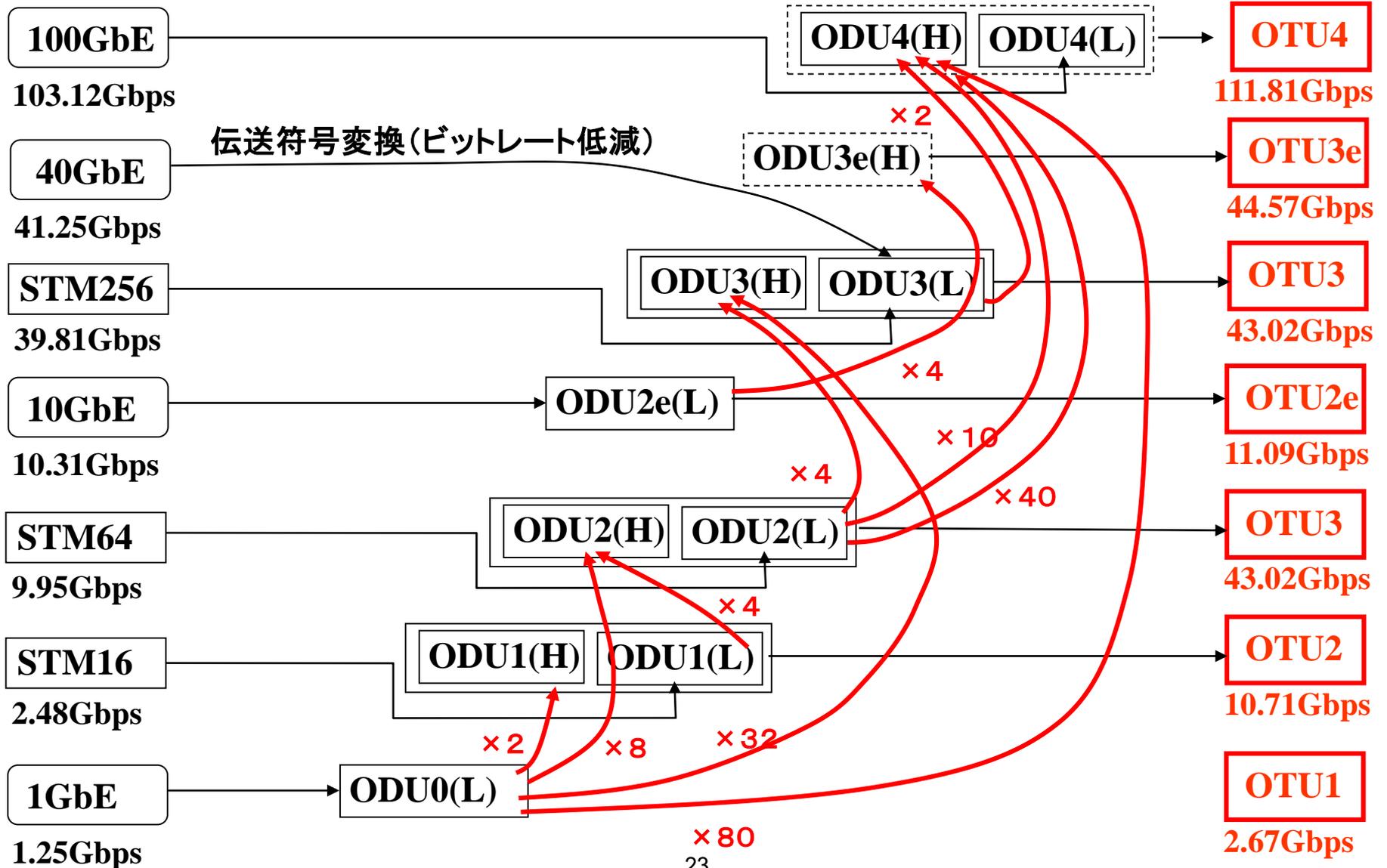
管理用オーバーヘッド

OTUk: Optical Channel Transport unit-k

ODUk: Optical Channel data unit-k (OTUkフレーム - FECバイト)

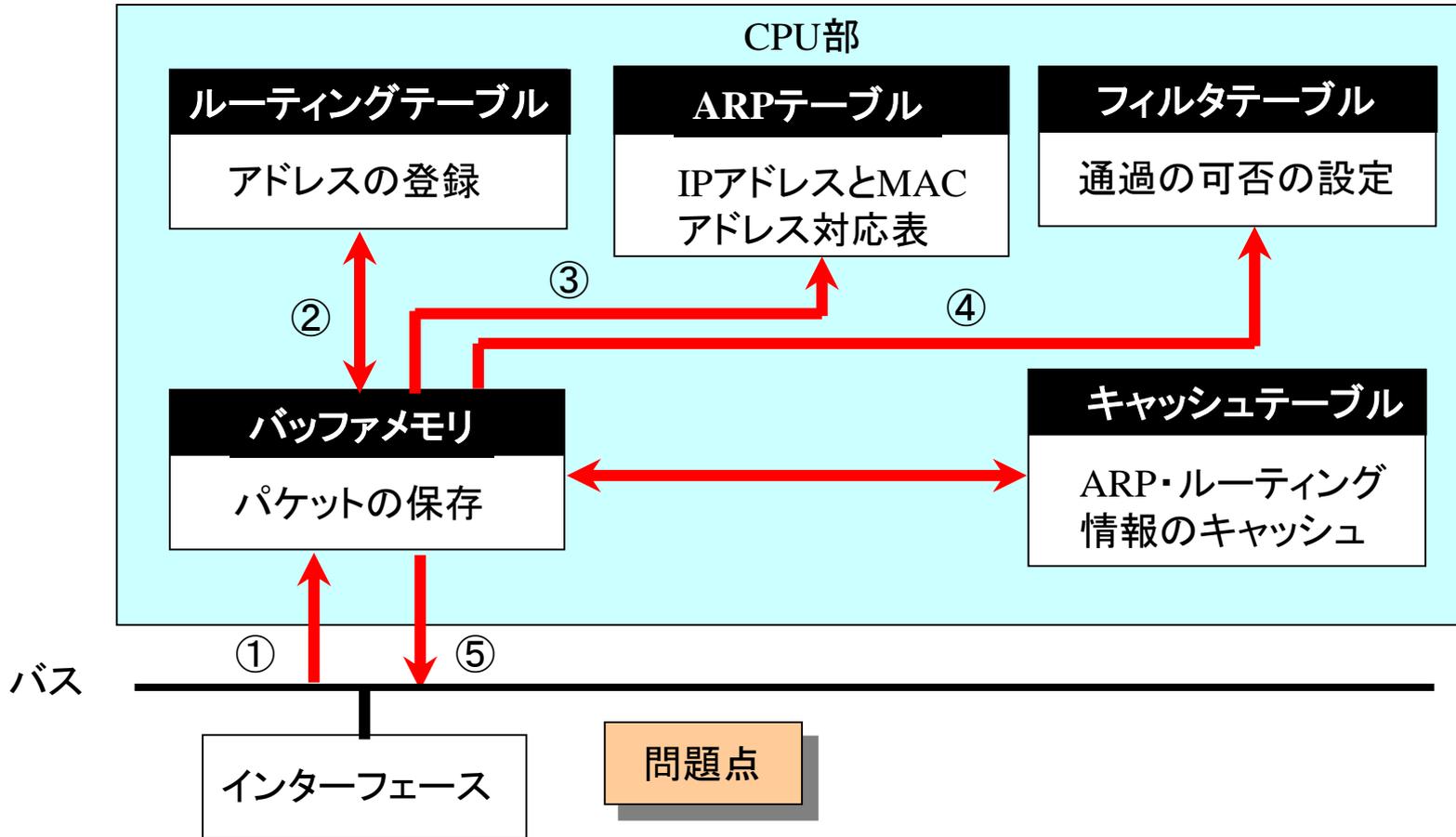
k: ビットレート階梯 (k=1: 2.67Gbps, 2: 10.71Gbps, 3: 43.02Gbps, 4: 111.81Gbps)

# OTNの階梯構造と多重化の関係

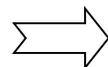


# インターネットの packets 交換の担い手 — ルータの構成 —

ルータの構造

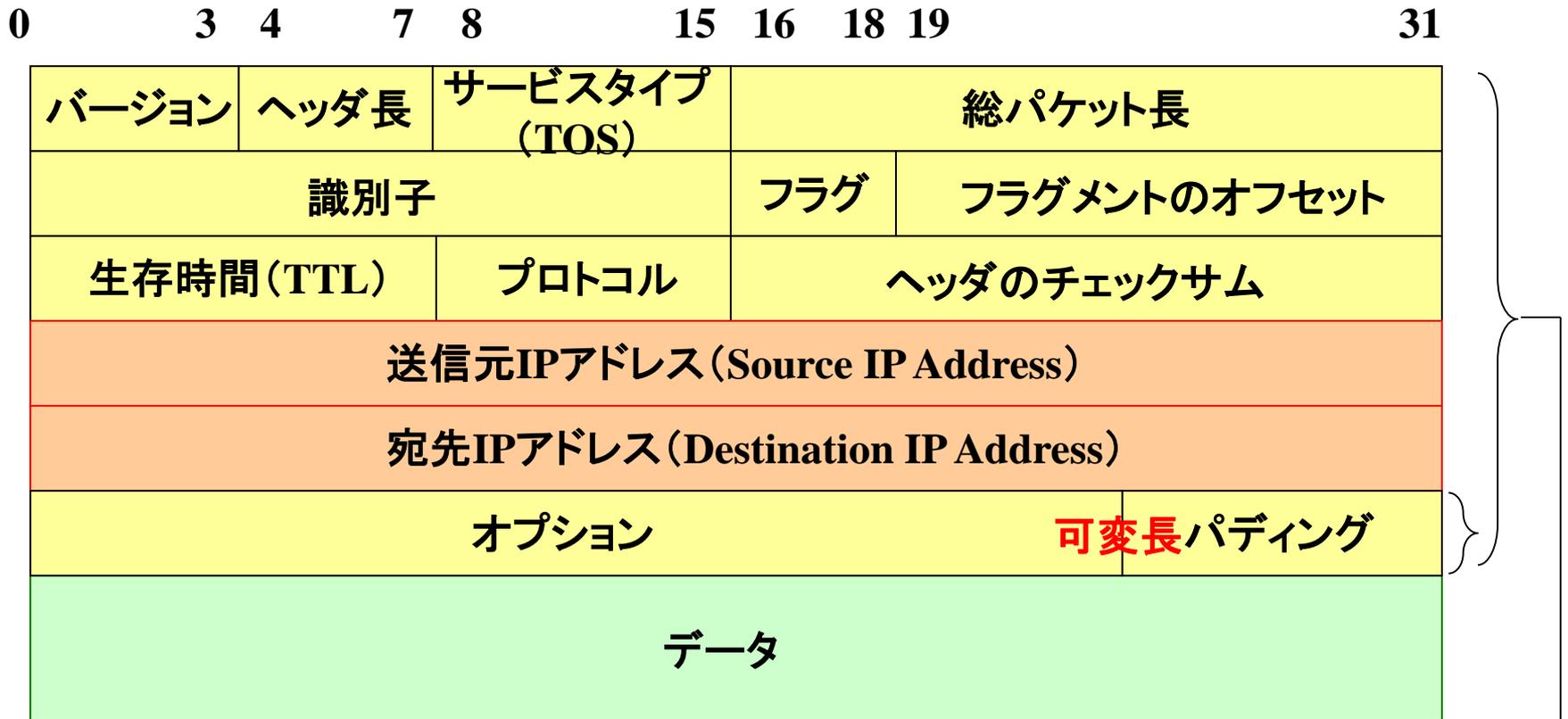


- CPUや内部バスを共有しており、高負荷時にボトルネック
- ルーティング情報をパケットごとにソフト処理



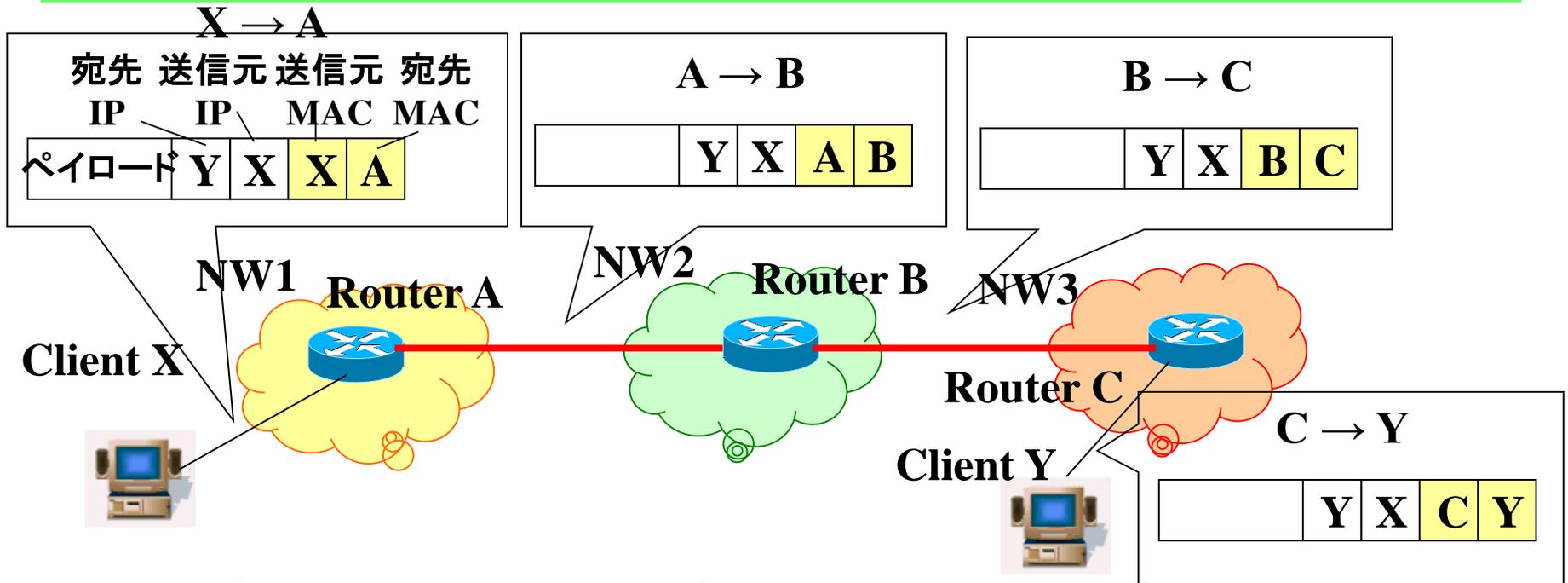
数10万～100万ppsの処理能力  
(ギガビットEtherの転送能力以下)

# インターネットのパケット構成 (Ethernetフレーム) - IPv4ヘッダの構成 -



32ビット(4バイト) × (5+オプション分) ←

# IPパケット転送の手順



Router Aの  
ルーティングテーブル

宛先	ネクスト ホップ
NW1	Router A
NW2	Router B
NW3	Router B

Router Bの  
ルーティングテーブル

宛先	ネクスト ホップ
NW1	Router A
NW2	Router B
NW3	Router C

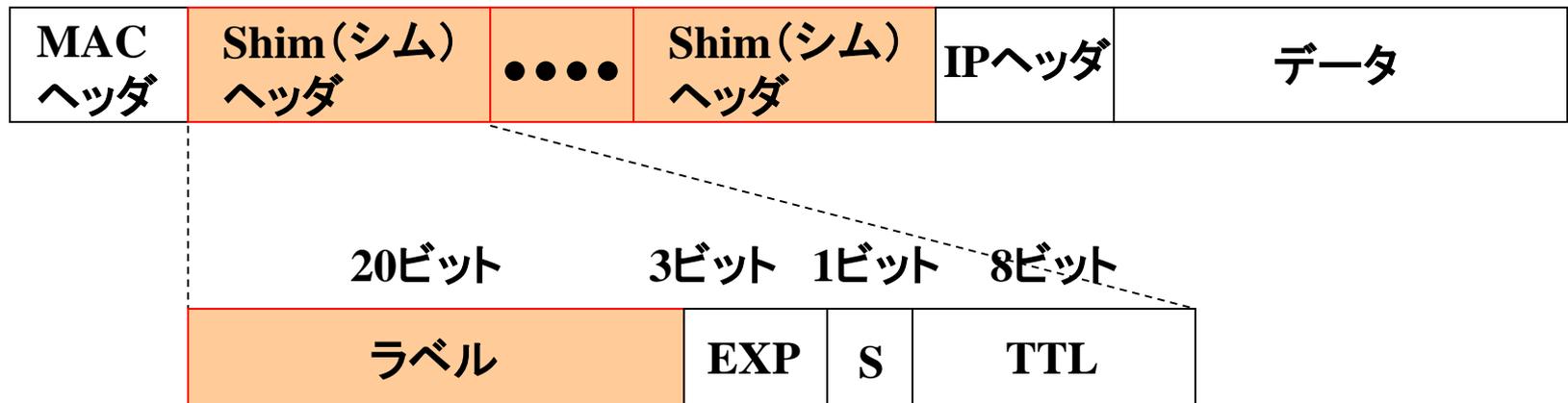
Router Cの  
ルーティングテーブル

宛先	ネクスト ホップ
NW1	Router B
NW2	Router B
NW3	Router C

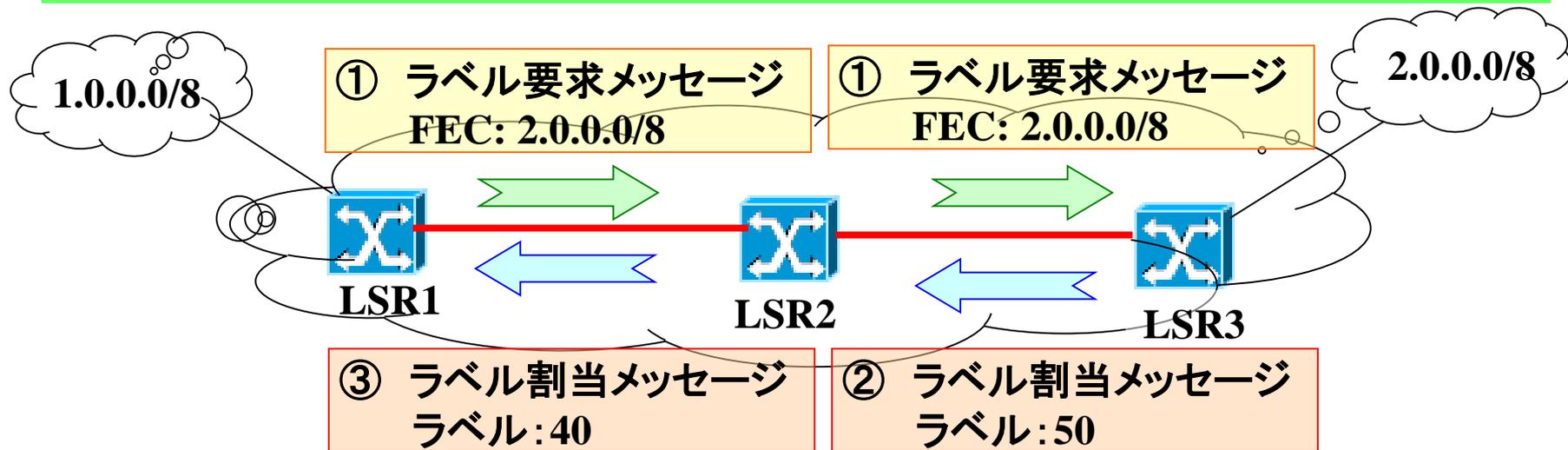
# MPLS技術 (Multiprotocol Label Switch)

- ・ネットワークアドレスに相当するアドレスをラベルとして付加し、そのラベル参照を行いIPアドレス解析を不要とすることで高速転送を可能とする技術
- ・IPアドレスなどを元に同じ転送先のパケットをクラス分け (Forwarding Equivalence Class: FEC) し、同じ分類のパケットに対しては逐次ヘッダ解析を行わずに転送し、高効率転送を可能とする。
- ・ラベル要求・割当のためのシグナリング
- ・ラベルに基づくパケット転送

## MPLSのラベル構成



# MPLSのラベル・スイッチ・パスの確立



LSR1ルーティング・テーブル

LSR2ルーティング・テーブル

LSR3ルーティング・テーブル

宛先	ネクスト ホップ	コスト	出力 IF
2.0.0.0/8	LSR2	3	A

宛先	ネクスト ホップ	コスト	出力 IF
2.0.0.0/8	LSR3	2	C

宛先	ネクスト ホップ	コスト	出力 IF
2.0.0.0/8	LSR2	1	E

LSR1 MPLS  
フォワーディングテーブル

LSR2 MPLS  
フォワーディングテーブル

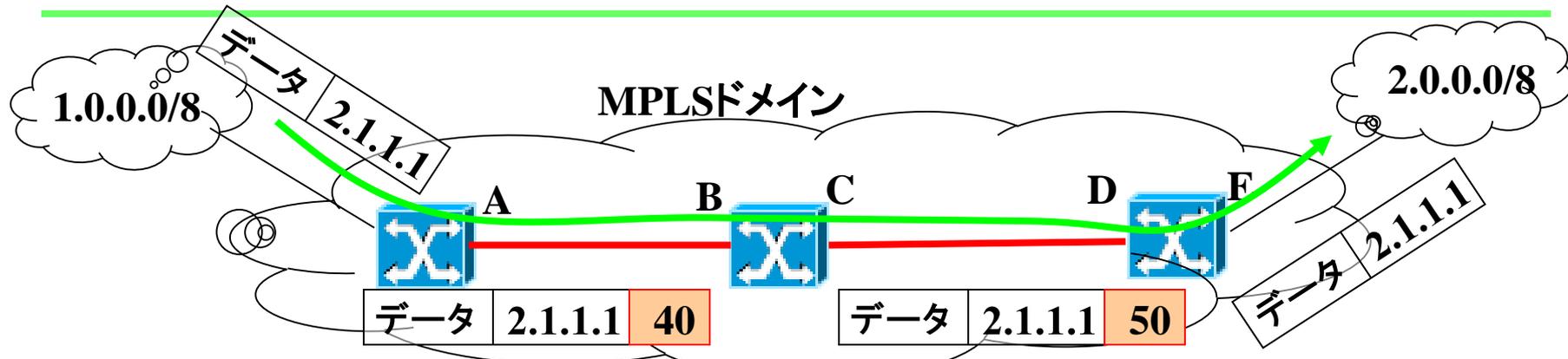
LSR3 MPLS  
フォワーディングテーブル

入力 IF	FEC	出力 IF	出力用 ラベル
—	2.0.0.0/8	A	40

入力 IF	入力用 ラベル	FEC	出力 IF	出力用 ラベル
B	40		C	50

入力 IF	出力用 ラベル	FEC	出力 IF
D	50	2.0.0.0/8	E

# MPLSにおけるラベル・スイッチングの動作



LSR1 MPLS  
フォワーディングテーブル

LSR2 MPLS  
フォワーディングテーブル

LSR3 MPLS  
フォワーディングテーブル

入力 IF	FEC	出力 IF	出力用ラベル
—	2.0.0.0/8	A	40

入力 IF	入力用ラベル	FEC	出力 IF	出力用ラベル
B	40	2.0.0.0/8	C	50

入力 IF	出力用ラベル	FEC	出力 IF
D	50	2.0.0.0/8	E

## LSR1の処理手順

- ① ラベルなしパケット受信
- ② FECの識別
- ③ FECに対応するNHLFEをFTNにより選択
- ④ 出力ラベル追加・転送

## LSR2の処理手順

- ① ラベル・パケット受信
- ② ラベル値に対応するNHLFE内の出力情報をILMにより選択
- ③ NHLFEに従ったラベル変更・転送

## LSR3の処理手順

- ① ラベル・パケット受信
- ② ラベル値に対応するNHLFE内の出力情報をILMにより選択
- ③ ラベル削除・転送

FEC: Forwarding Equivalence Class, NHLFE: Next Hop Label Forwarding Entry  
FTN: FEC to NHLFE Map, ILM: Incoming Label Map

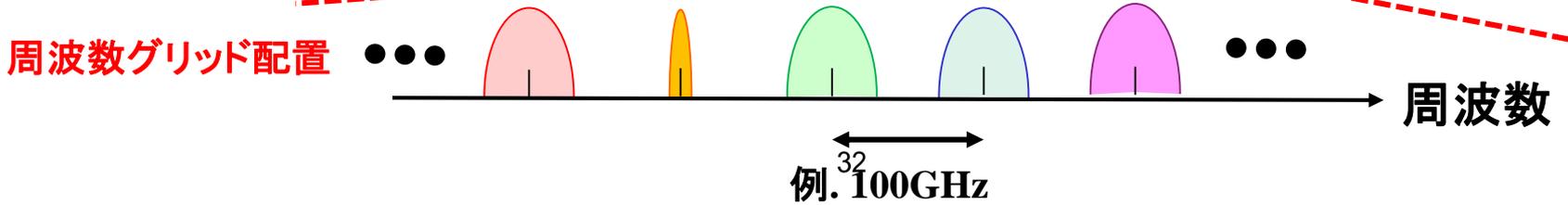
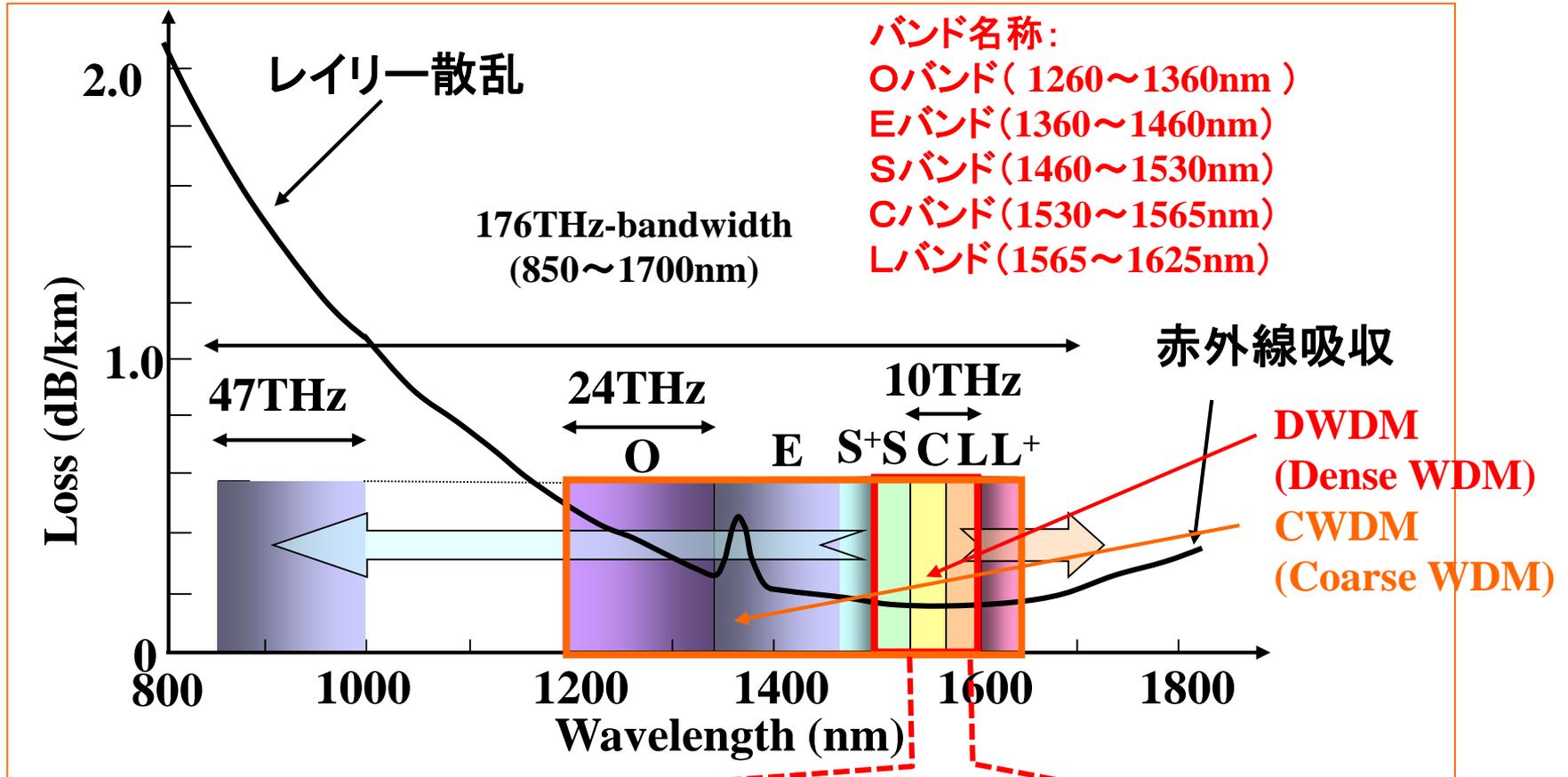
# 各種 光通信システム

※ 一部、日経コミュニケーション2009年度『光ネットワークの最新技術』を参照

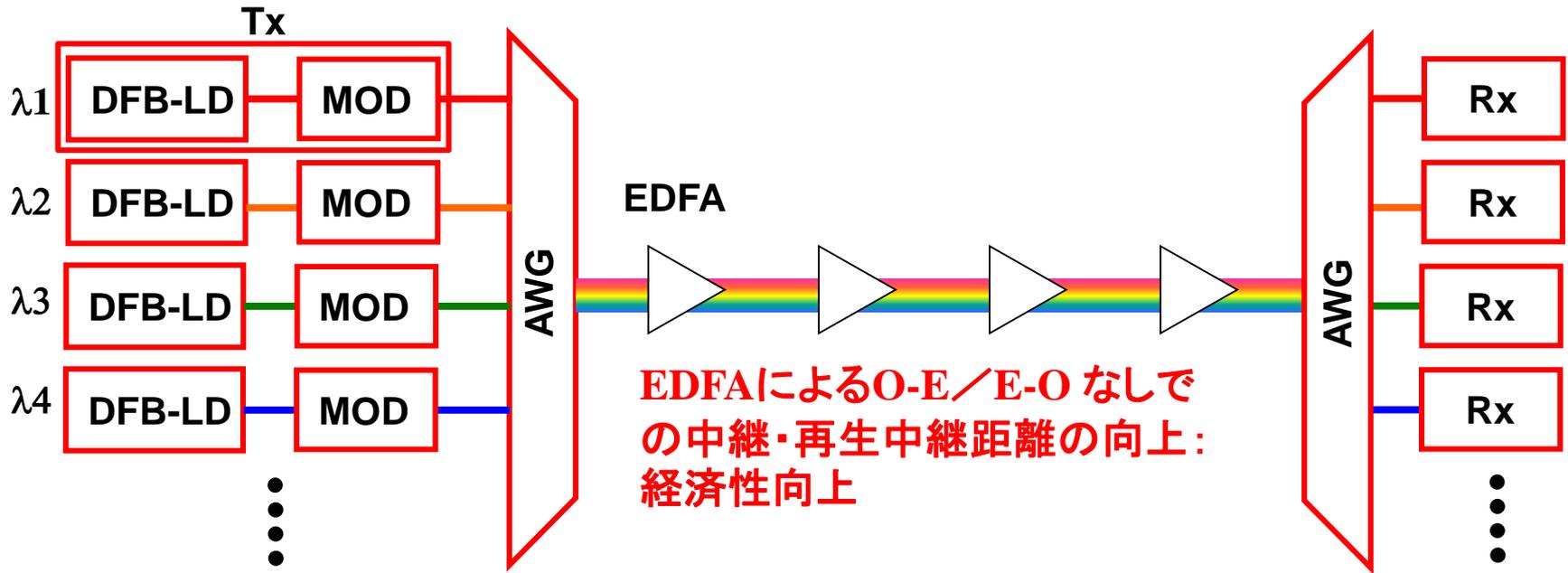
# 長距離海底系

# 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ー

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

# 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

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
- ・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

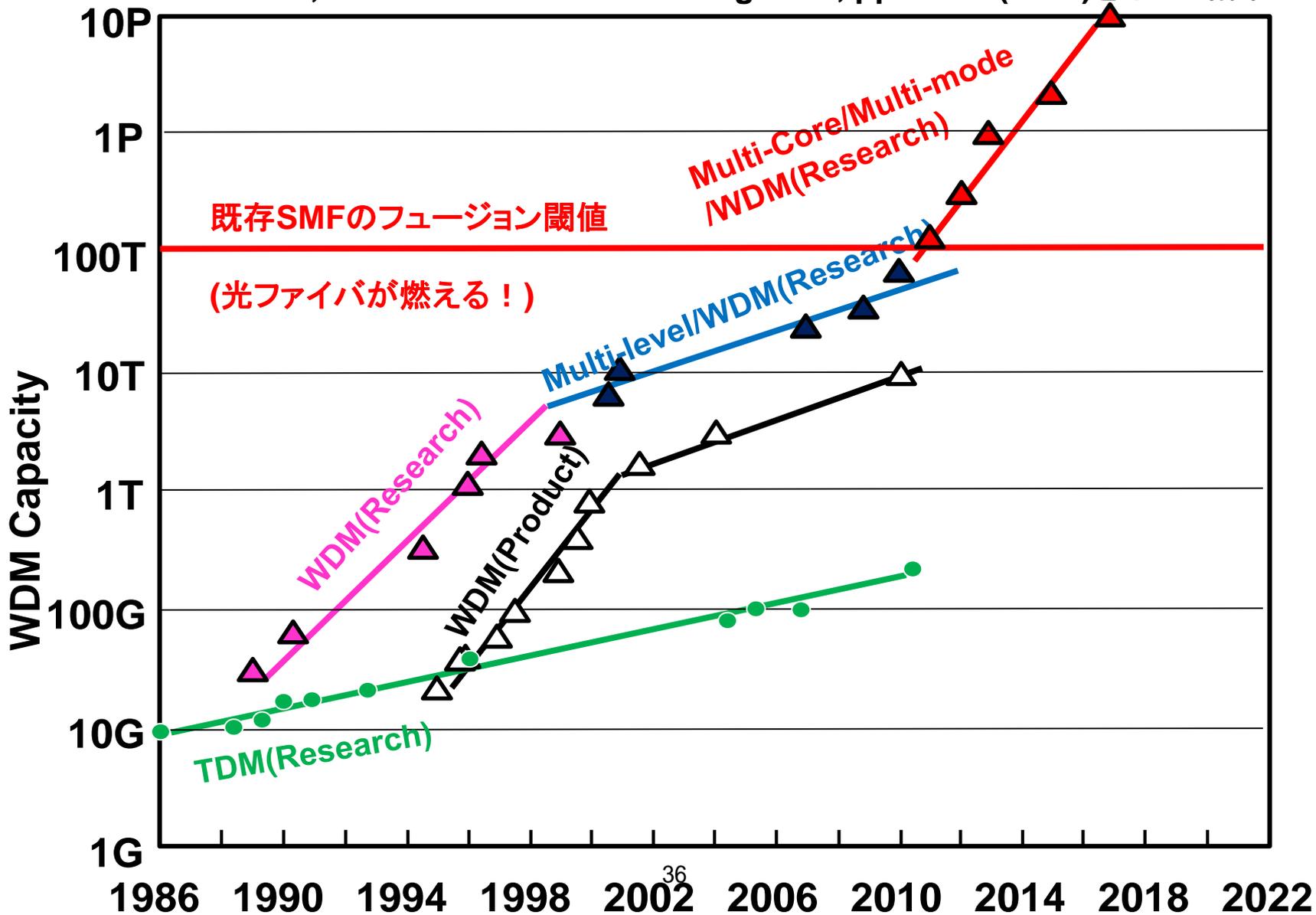


内は(長距離大容量向けの)従来の手法



# 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(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( $2^M$ PSK,  $2^M$ QAM):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]

ASK: **A**mplitude **S**hift **K**eying

PSK: **P**hase **S**hift **K**eying

QAM: **Q**uadrature **A**mplitude **M**odulation

1シンボル **$2^M$** 種類の符号  
→ Mビットの符号に対応  
例)  $16=2^4$



# 強度変調と位相変調

## 強度変調

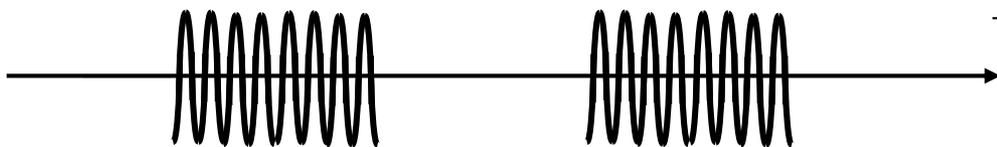
ASK (Amplitude Shift Keying)

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

0 1 0 1 0

- 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)

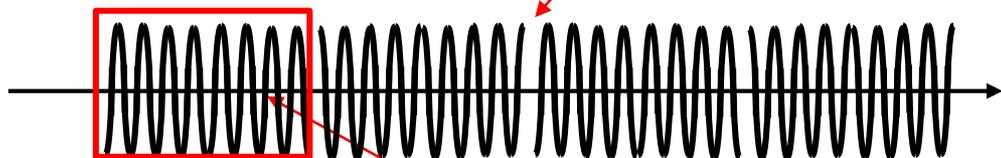


## 位相変調

PSK (Phase Shift Keying)

光の位相を切り替える

1 0 1 0



- ビットごとに位相を対応
- 位相の位置で多値化  
(QPSK :  $0, \pi/2, \pi, 3/2\pi$ )

光の電界としての振動

1シンボル(最小変調単位的时间幅)

# 変調信号の数式表現(1)

変調信号(電界成分)の一般的表記:

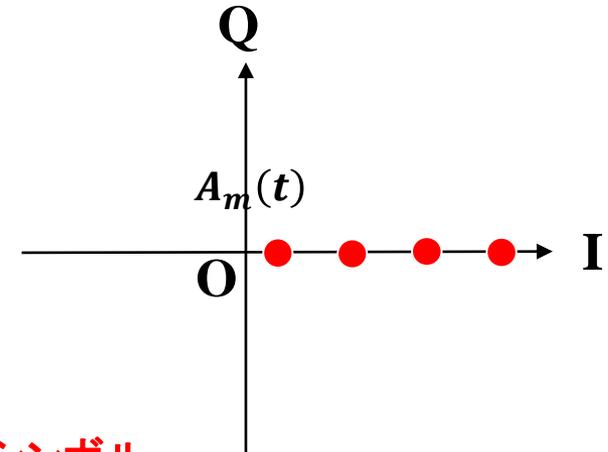
$$s(t) = A_m(t) \cos[2\pi f_c t + \theta_m(t)]$$

$A_m(t)$ : 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):



$A_m(t)$ : 可変,  $\theta_m(t)$ : 定数

たとえば、

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

➡  $1 - A_m \sim 1 + A_m$

の範囲で周期 $f_m$ で  
正弦波状に変化(アナログ)

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

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

ここに1, 0などのビット系列(振幅)が入る

## 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

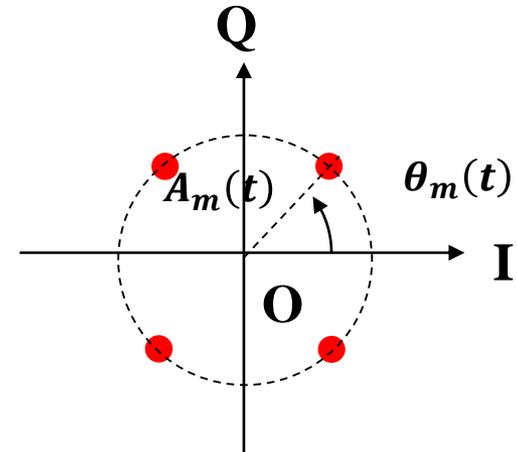
たとえば、

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

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

ここに位相の値(0,  $\pi$ など)  
の数値列が入る

コンスタレーション



$-A_m \sim A_m$

の範囲で周期 $f_m$ で  
正弦波状に変化(アナログ)



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

## 直交振幅変調

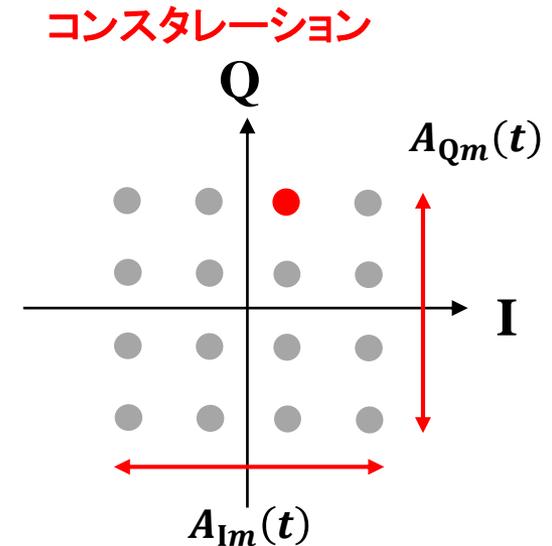
(Quadrature Amplitude Modulation, MQAM):

└─ M値/シンボル

水平(同相)・垂直(直交位相)成分での表示

$$s(t) = A_{Im}(t)\cos[2\pi f_c t] + A_{Qm}(t)\sin[2\pi f_c t]$$
$$= \sqrt{(A_{Im}(t))^2 + (A_{Qm}(t))^2} \cos[2\pi f_c t - \varphi(t)]$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{A_{Qm}(t)}{A_{Im}(t)} \right]$$



# 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

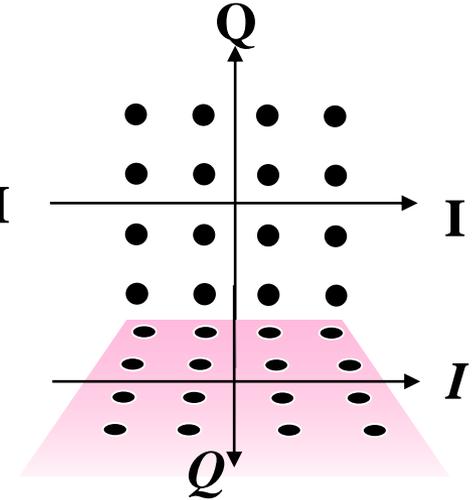
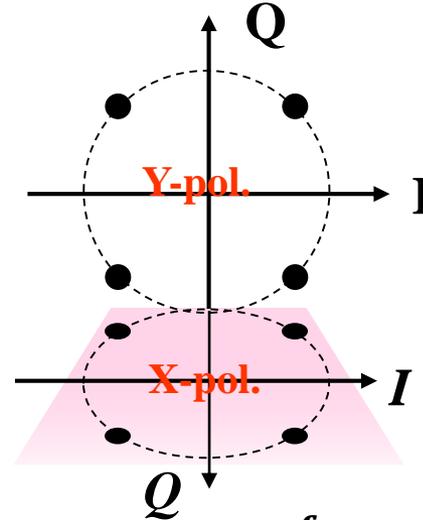
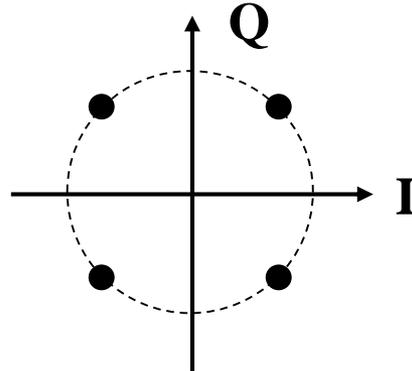
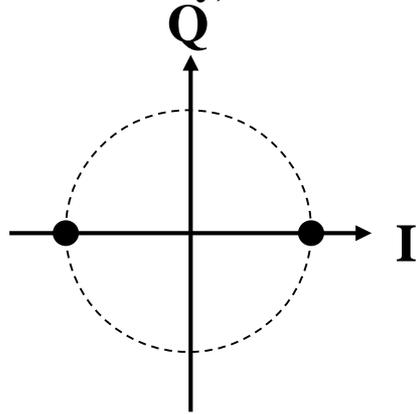
B: Binary, D: Differential, Q: Quadrature

(D)QPSK

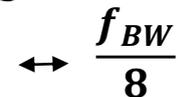
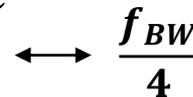
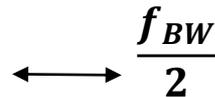
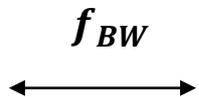
DP-QPSK

DP: Dual-Polarization

DP-16QAM



I: In-phase, Q: Quadrature-phase



波長

波長<sup>2</sup>

波長

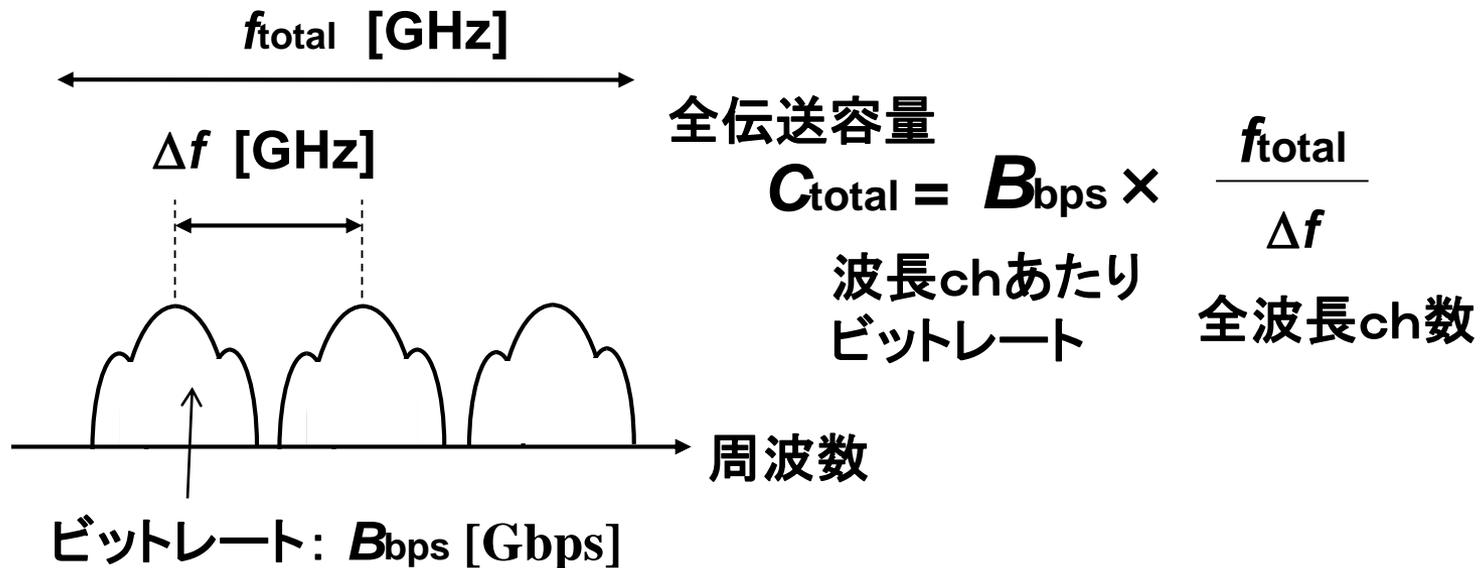
波長

## 周波数利用効率 (Spectral Efficiency, SE)

WDMのチャンネル間隔:  $\Delta f$  [GHz]

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

$$SE = \frac{B}{\Delta f} \quad \rightarrow \quad \text{SEが大きい} = \text{一定の周波数で遅れる情報量が多い}$$



## 単一チャネルの高速化

---

### 現在の実用化仕様(最高速)

$$112\text{Gbps} = 28\text{Gbaud} \times \underset{2}{\text{QPSK}} \times \underset{2}{\text{偏波多重}}$$

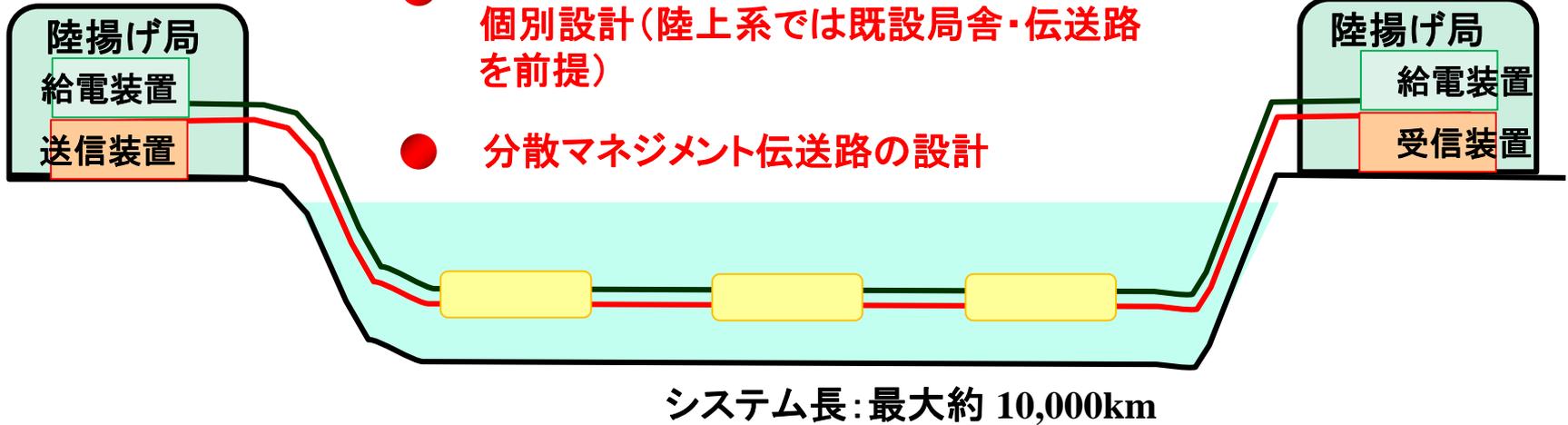


### 次世代の高速化仕様

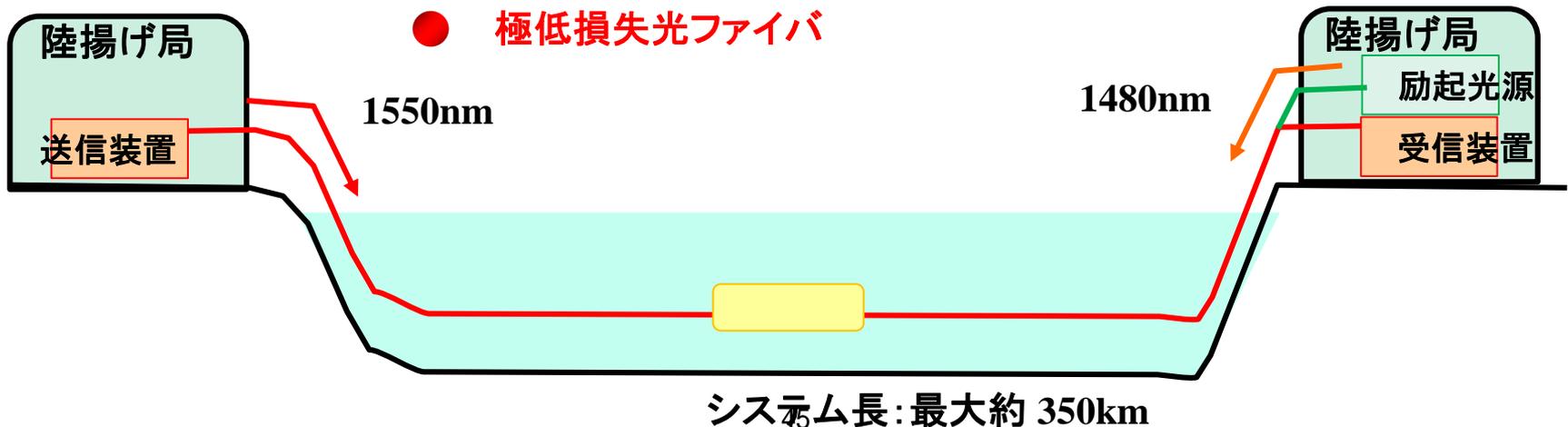
$$448\text{Gbps} = 28\text{Gbaud} \times \underset{4}{16\text{QAM}} \times \underset{2}{\text{偏波多重}} \times \underset{2}{\text{デュアルキャリア}}$$

# 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)

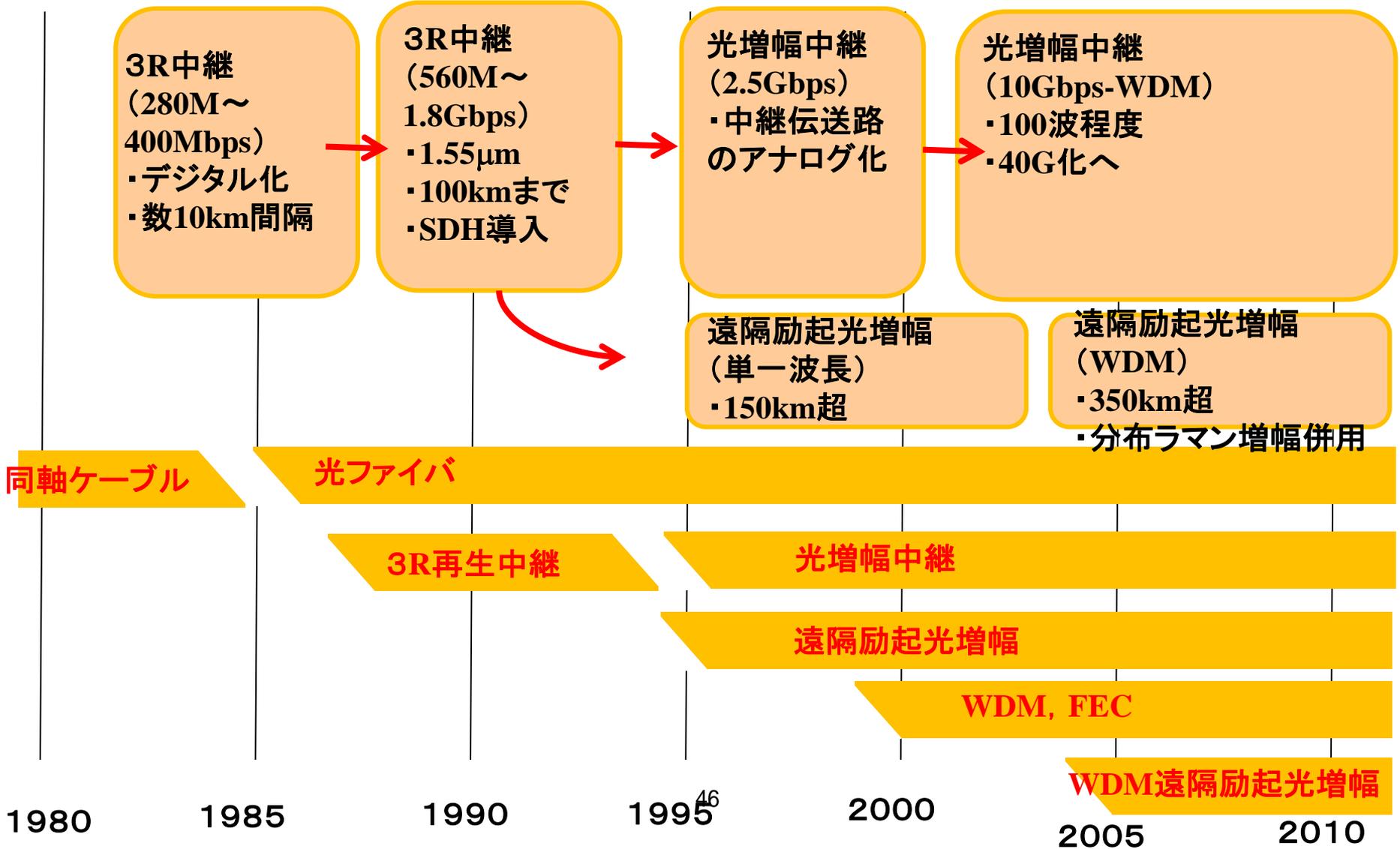


## 無中継伝送システム (遠隔励起・光増幅中継)



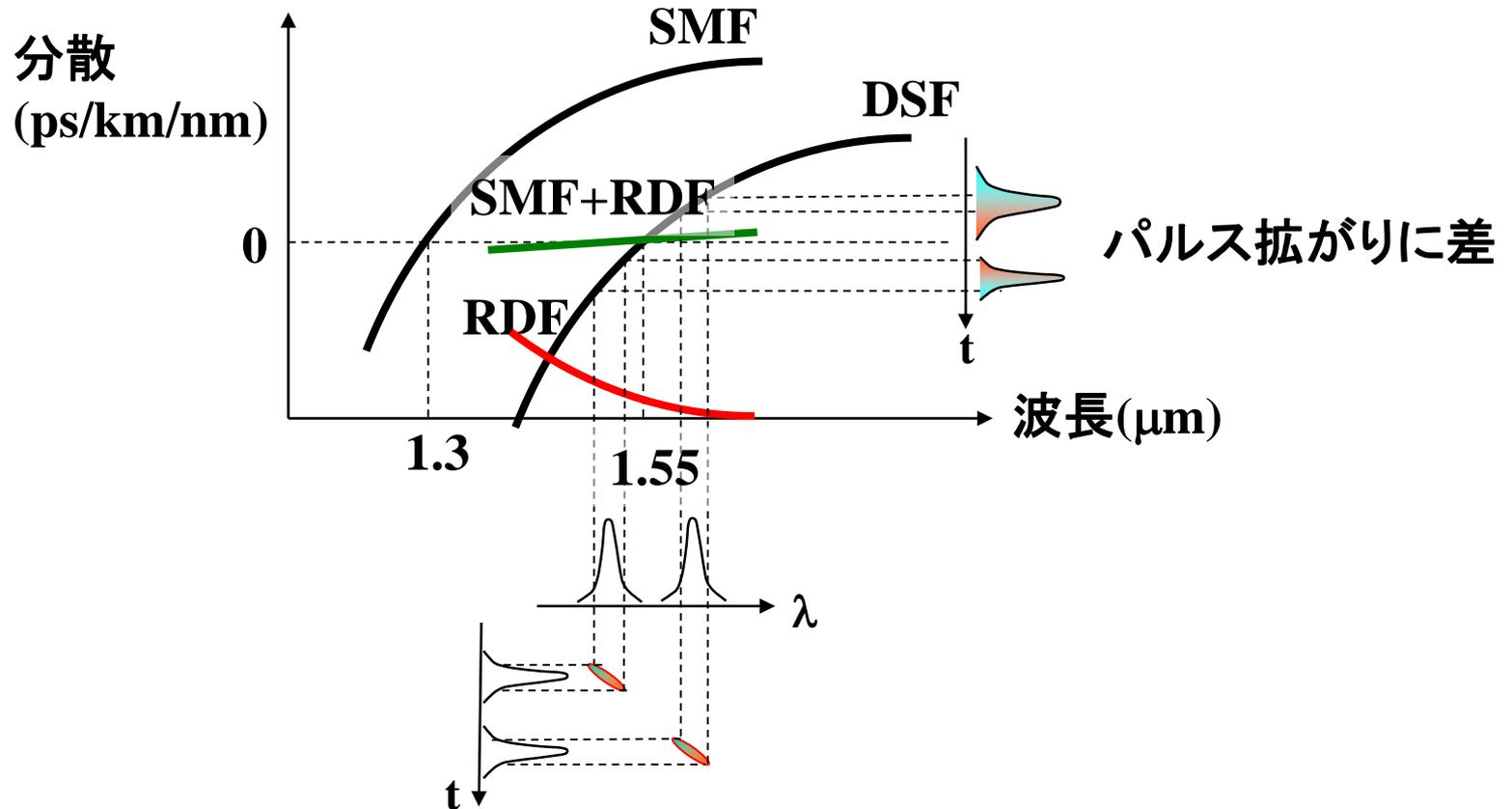
# 海底伝送システムの開発史

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

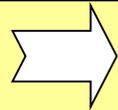


# 波長多重(WDM)と分散マネジメント

# 波長分散による影響 分散スロープによるWDM帯域の制限



WDM使用帯域の拡大



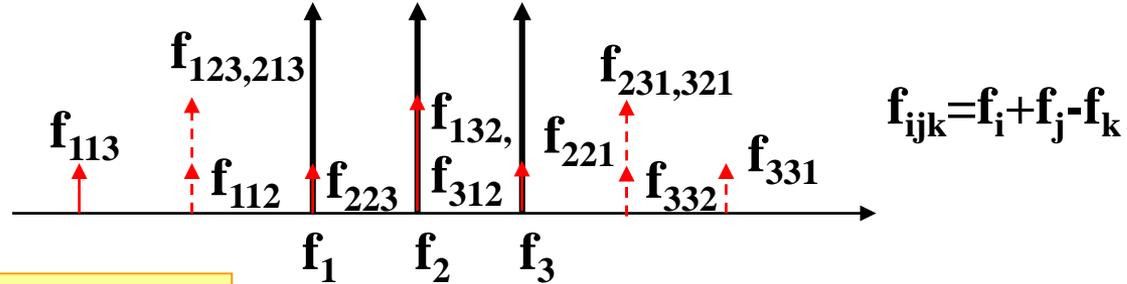
広い波長範囲でトータルの波長分散零の条件を満たしている必要がある。



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

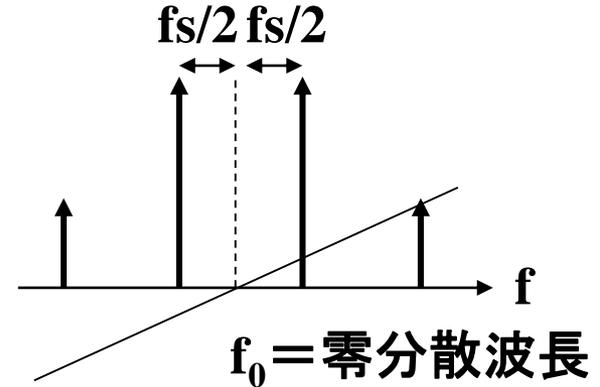
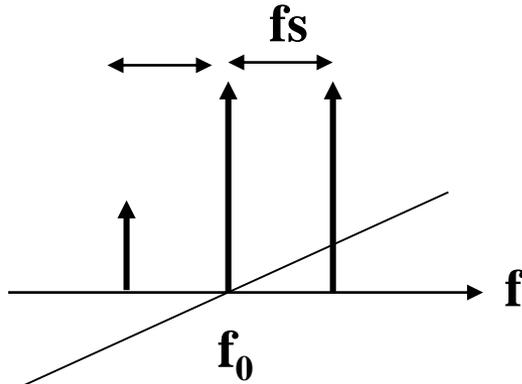
## 4光波混合の影響



### 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

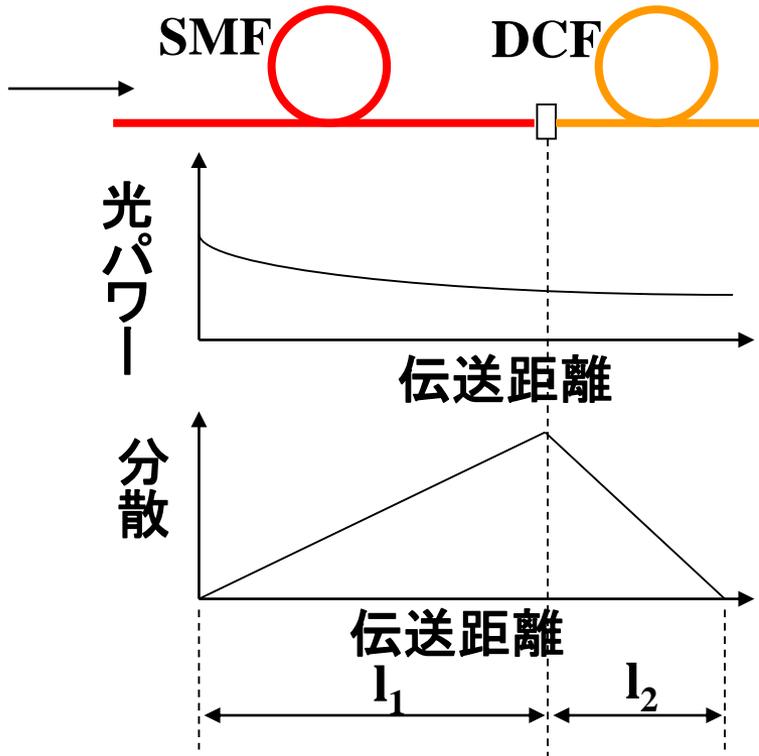


4光波混合光のクロストークによる  
信号伝送特性劣化



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)

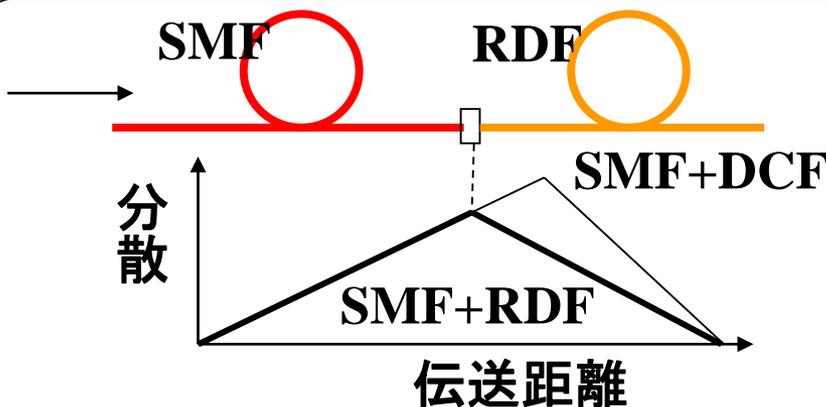


## ポイント

- 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



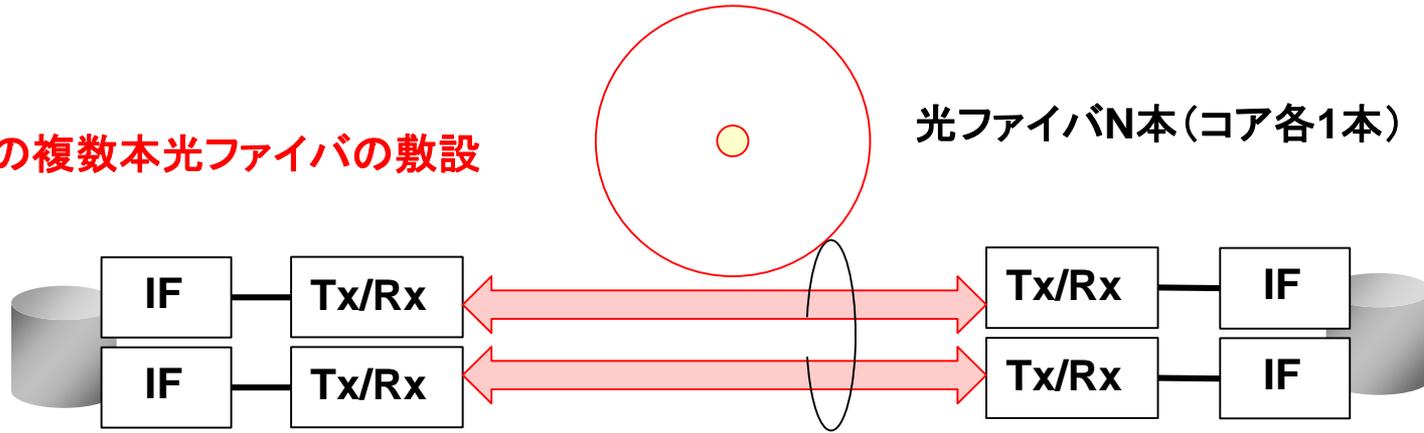
## ポイント

- ① SMF+RDFにより局所分散累積の低減

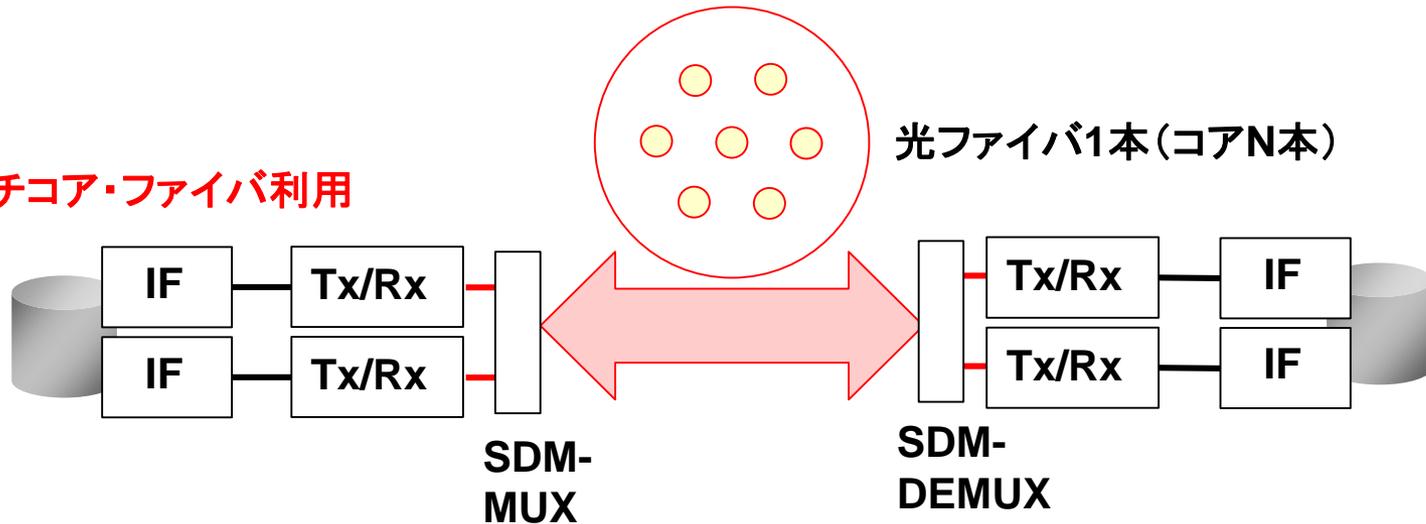
# 更なる大容量化：空間分割多重 (マルチコア、マルチモード)

# 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



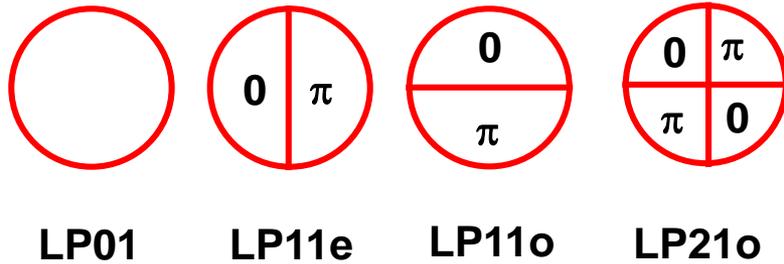
ファイバ本数の削減

- 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)

## 高次モードの生成・多重・分離方式

### 生成

#### ① 位相板

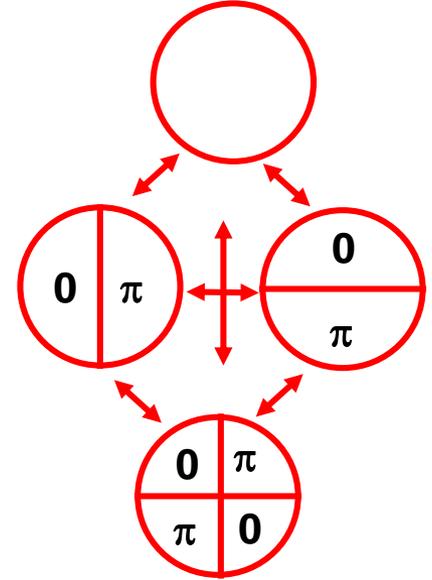


#### ② 長周期ファイバ・グレーティング

#### 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