

2015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”, Givnd 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)

| | 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 |

光通信はなぜ高速か？

光通信はなぜ高速か？

光の光ファイバ中の伝送速度

$$v_p = \frac{c}{n_{eff}}$$

v_g : 位相速度
 n_{eff} : 等価屈折率

SiO₂の場合、 $n_{eff} = 1.48$ として

$$v_g = \frac{2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.48} = 2.03 \times 10^8 \text{ m/s}$$

電磁波の同軸ケーブル中の伝搬速度

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_s \mu_s}}$$

v_p : 位相速度
 c : 真空中の光速
 ϵ_s : 比誘電率
 μ_s : 比透磁率

ポリエチレン絶縁の同軸ケーブルの場合、
 $\epsilon_s = 2.3, \mu_s = 1$ として

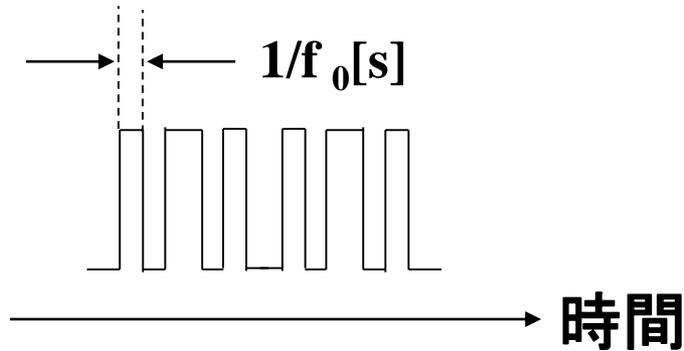
$$v_g = \frac{2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{\sqrt{2.3 \times 1}} = 1.98 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光の伝送速度 ≒ 電磁波の伝搬速度

 光が電気信号よりも速いわけではない

なぜ光通信がいいのか？

伝送の高速化



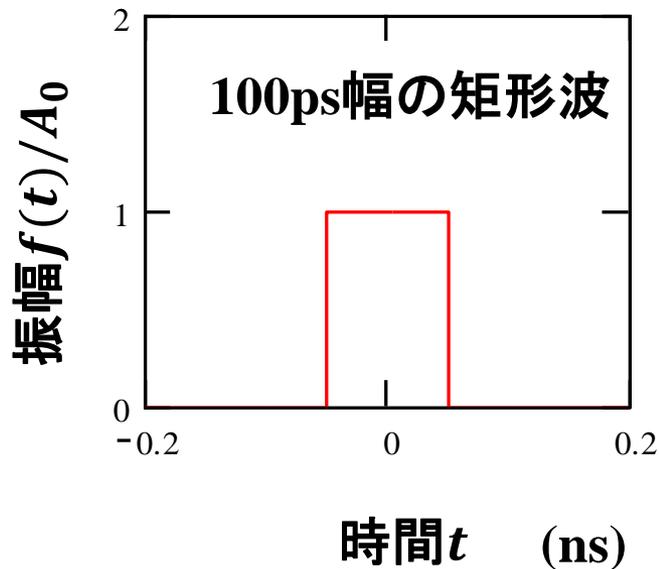
ビットレート f_0 [Gbps]のNRZ信号を考える。

⇒ 簡単化のため1タイムスロットの信号について考える。

$$f(t) = \begin{cases} A_0 & \left(-\frac{1}{2f_0} \leq t \leq \frac{1}{2f_0}\right) \\ 0 & \text{(上記以外)} \end{cases}$$

$$f_0 = 10$$

フーリエ変換により周波数成分を解析

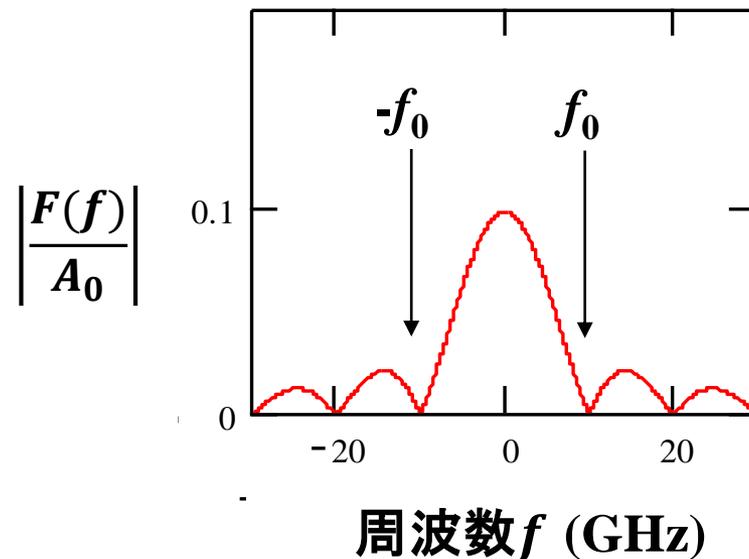


$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-1/2f_0}^{1/2f_0} A_0 e^{-j2\pi ft} dt$$
$$= A_0 \left(\frac{1}{-j2\pi f} \right) [e^{-j2\pi ft}]_{-1/2f_0}^{1/2f_0} = jA_0 \frac{1}{2\pi f} (e^{-j\pi \frac{f}{f_0}} - e^{j\pi \frac{f}{f_0}})$$

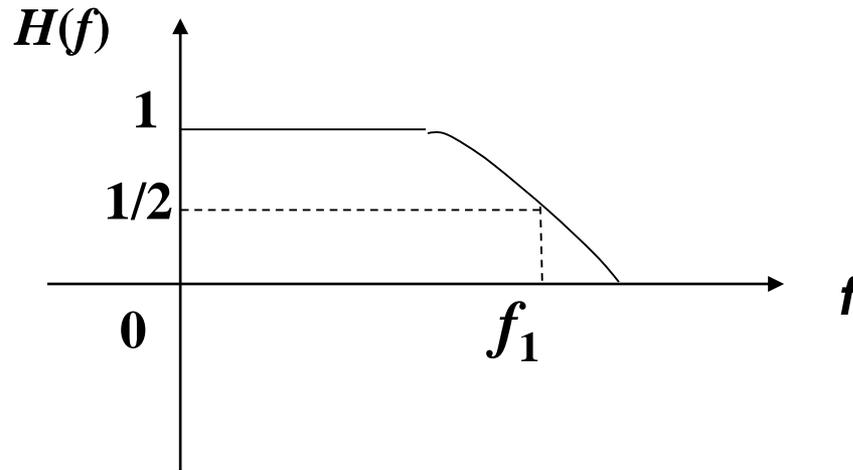
$$= \frac{A_0}{f_0} \frac{\sin(\pi \frac{f}{f_0})}{\pi \frac{f}{f_0}}$$

矩形波のフーリエ・スペクトル



伝送路の周波数特性を重畳

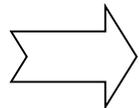
(1) 周波数特性(f 特)の悪い伝送路:メタル線に相当



$$H(f) = \frac{T}{1 + (2\pi f / 2\pi f_1)^2}$$

T : 透過率

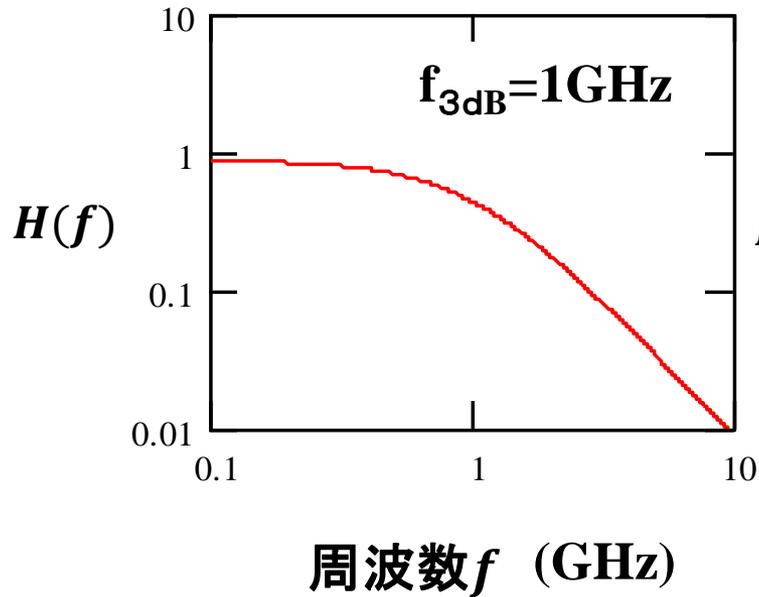
伝送後の波形を計算する。



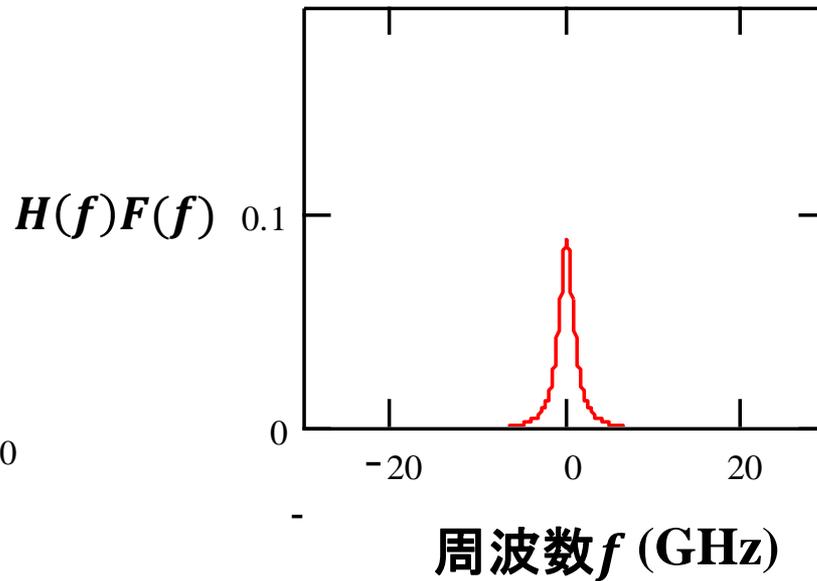
逆フーリエ変換

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)H(f)e^{j2\pi ft} df$$

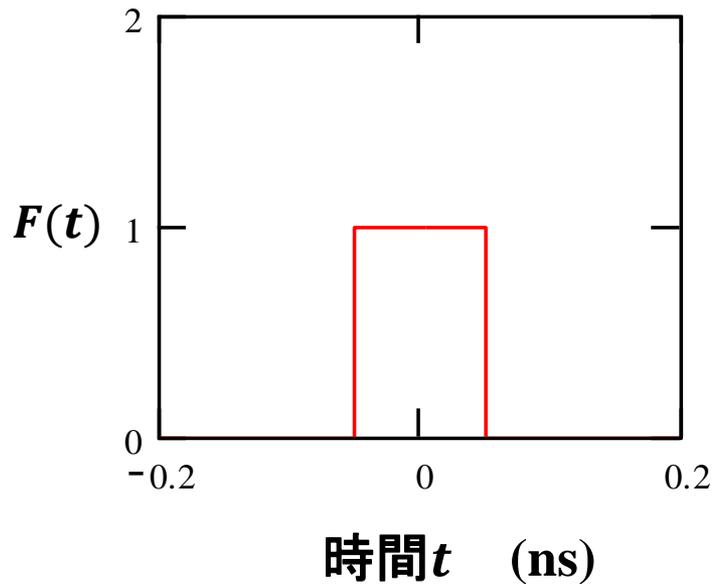
伝送路の損失特性 (f 特)



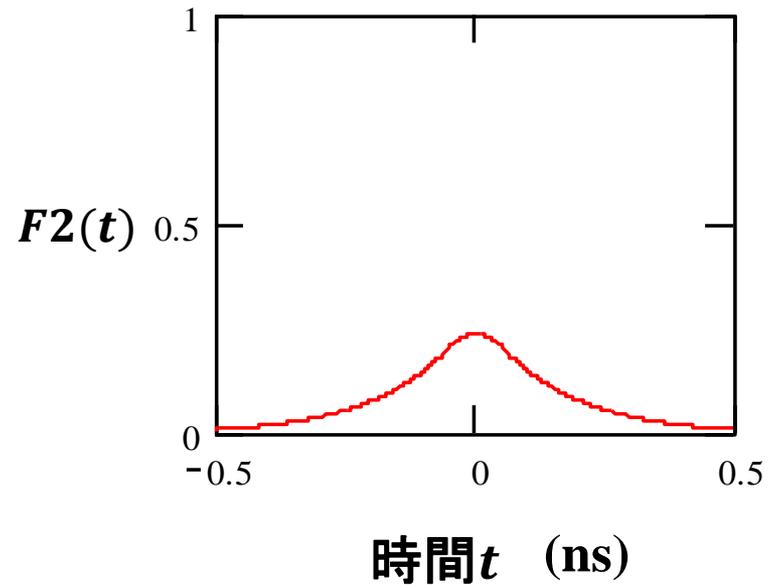
伝送後の f 特



元の矩形波



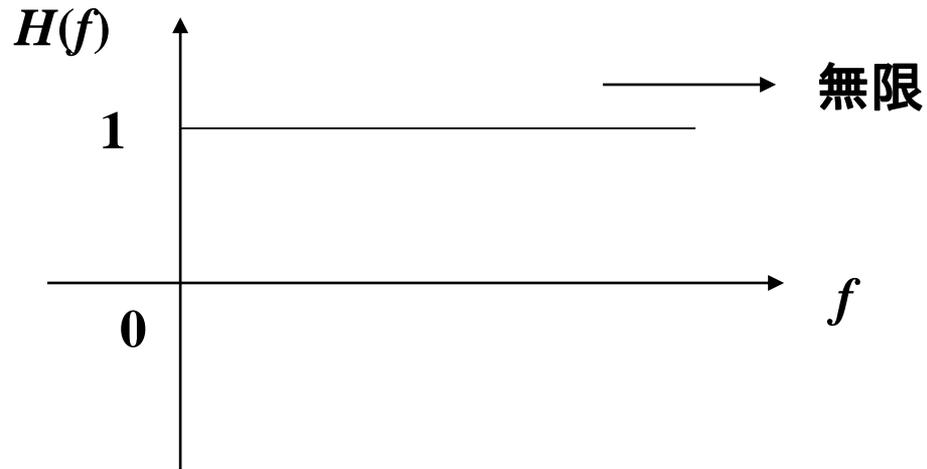
伝送後の波形

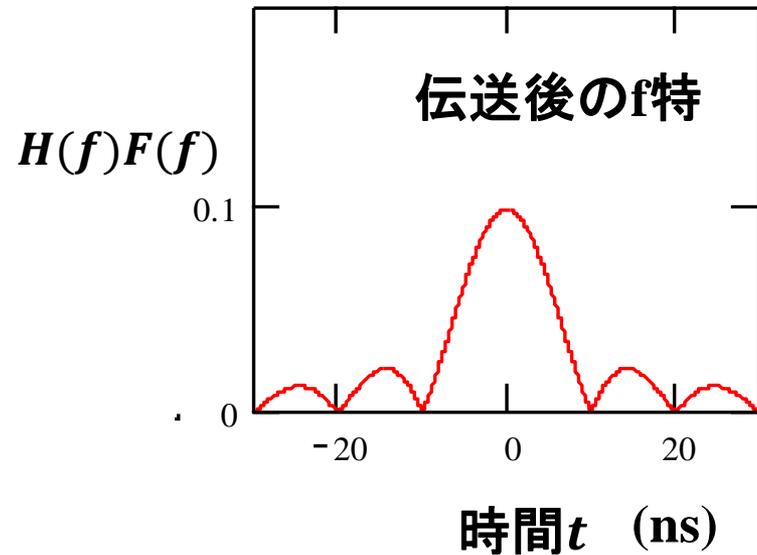
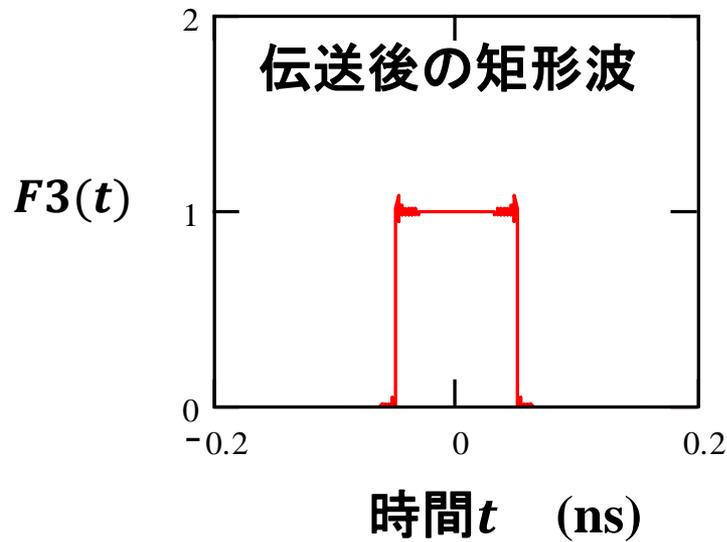
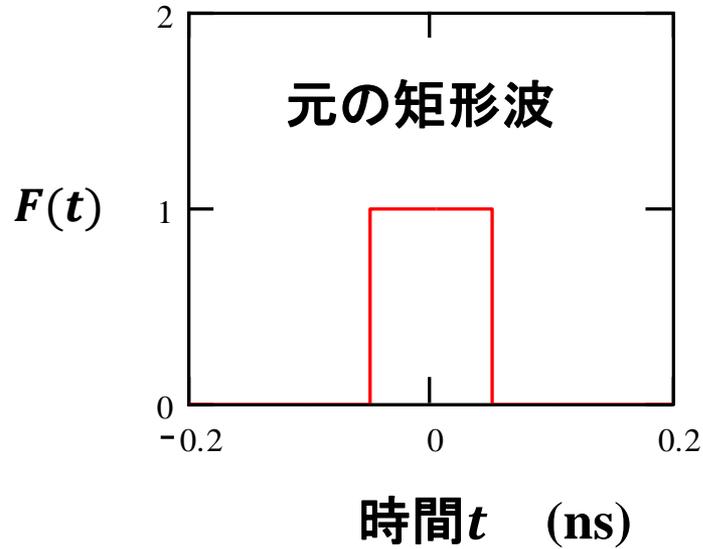


強度の低下とパルス幅の増大

伝送路の周波数特性を重畳

(2) 周波数特性(f 特)の良い(理想的な)伝送路:光ファイバに相当





「光通信の高速性」:メタル線の場合の $L=0$ とすると、

$$H(f) = \left[\frac{1}{1 + (f/f_1)^2} \right]^L \quad \Rightarrow \quad H(f) = 1$$

光ファイバの場合と同じとなる！

すなわち、光ファイバの高速性とは高速な信号を長距離まで伝送できるという意味である。

光による通信のメリットは長距離伝送(広い意味で言えば低損失が成り立つ適用範囲)の場合に発揮される。

● dB, dBmについて

dB: 対象とする量 P_1 が基準値 P_0 に対してどの程度大きい／小さいかを示す相対値

パワー:
$$A[\text{dB}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

電圧:
$$B[\text{dB}] = 20\log_{10}\left(\frac{E_1}{E_0}\right)$$

dBm: パワー P_0 を示す絶対値 (1mWを0dBmとする)

$$C[\text{dB}_m] = 10\log_{10}(P_0)$$

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{2}\right) = -3.0, \quad 10\log_{10}\left(\frac{1}{10}\right) = -10.0$$

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{4}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{1}{2}\right)^2 = -6.0$$

などは良く使う。

少し応用:

$$-6\text{dB} = -3\text{dB} \times 2 = 2 \times 10\log\left(\frac{1}{2}\right) = 10\log\left(\frac{1}{2}\right)^2 = 10\log\left(\frac{1}{4}\right)$$

$$-13\text{dB} = -10\text{dB} - 3\text{dB} = 10\log\left(\frac{1}{10}\right) + 10\log\left(\frac{1}{2}\right) = 10\log\left(\frac{1}{10} \times \frac{1}{2}\right)$$

$$= 10\log\left(\frac{1}{20}\right)$$

光通信システム技術のレビュー

適用光ネットワークの規模・機能性

応用物理学会発展史マップ(フォトニクス)(2010.3)

ネットワーク形態の柔軟化

光パケットネットワーク
メッシュネットワーク
リングネットワーク

WDM伝送

分散マネジメント
伝送路設計
分散補償
偏波モード分散補償

高周波数利用効率

デジタルコヒーレント伝送
多値変調
マルチキャリア伝送

光インターコネクト

アレイ技術 チップ間 チップ内
実装技術

直接増幅中継伝送

Erドープファイバ増幅
器マン増幅

ソリトン伝送

分散マネジメント・
ソリトン

アクセス系

経済化技術
耐環境技術

高受信感度

コヒーレント伝送
位相・偏波ダイバーシティ

長距離系の実用化と進展

0.8 μ m帯伝送 1.3 μ m帯伝送 1.55 μ m帯伝送
高速・大容量化
動的単一モード化

1960 1970 1980 1990 2000 2010

2015年度

光通信システム

光通信デバイス技術レビュー

大規模光集積回路

Siフォトニクス
多波長集積
光電融合集積

応用物理学会発展史マップ(フォトニクス)(2010.3)

光波回路(PLC)

AWG 分散補償器

光スイッチ

全反射型 光ゲート型 TO型 MEMS WSS

マイクロオプティクス

波形整形回路

光ファイバ増幅器

外部変調器

EDFA ラマン増幅 広帯域化

受光器

LiNbO3変調器 EA変調器 EA/MZ-DFB集積化光源

pin型 APD型 導波路型

半導体レーザー

ダブルヘテロ構造 室温CW動作 量子井戸構造導入 歪量子井戸構造導入 無温調化

単一横モード化 単一縦モード化(DFB・DBR・VCSEL) 広帯域波長可変レーザー

光ファイバ

VAD法 低損失化技術 分散制御技術 ホーリーファイバ

適用光ネットワークの規模・機能性

1960

1970

1980

1990

2000

2010

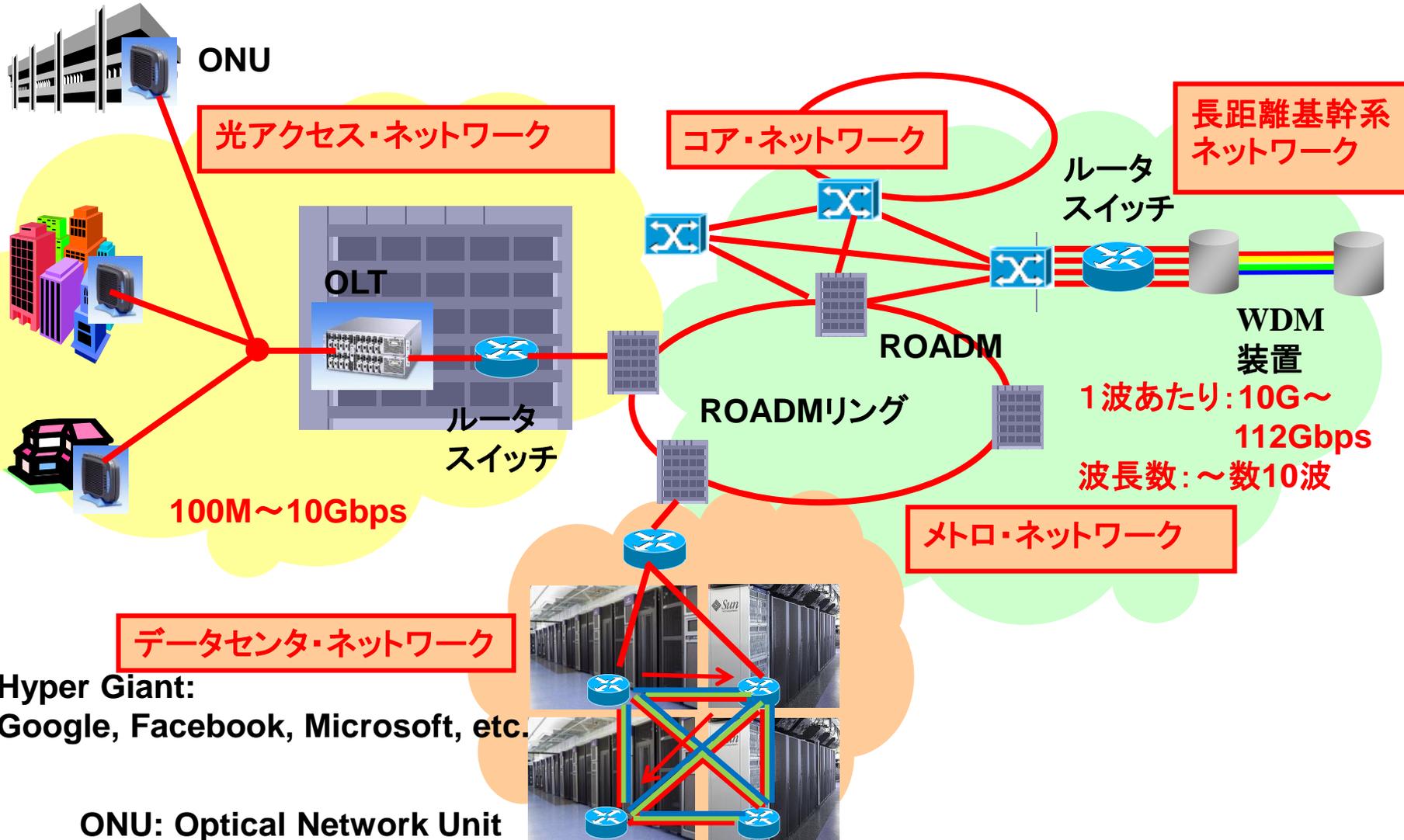
各種 光通信システム

※ 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

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

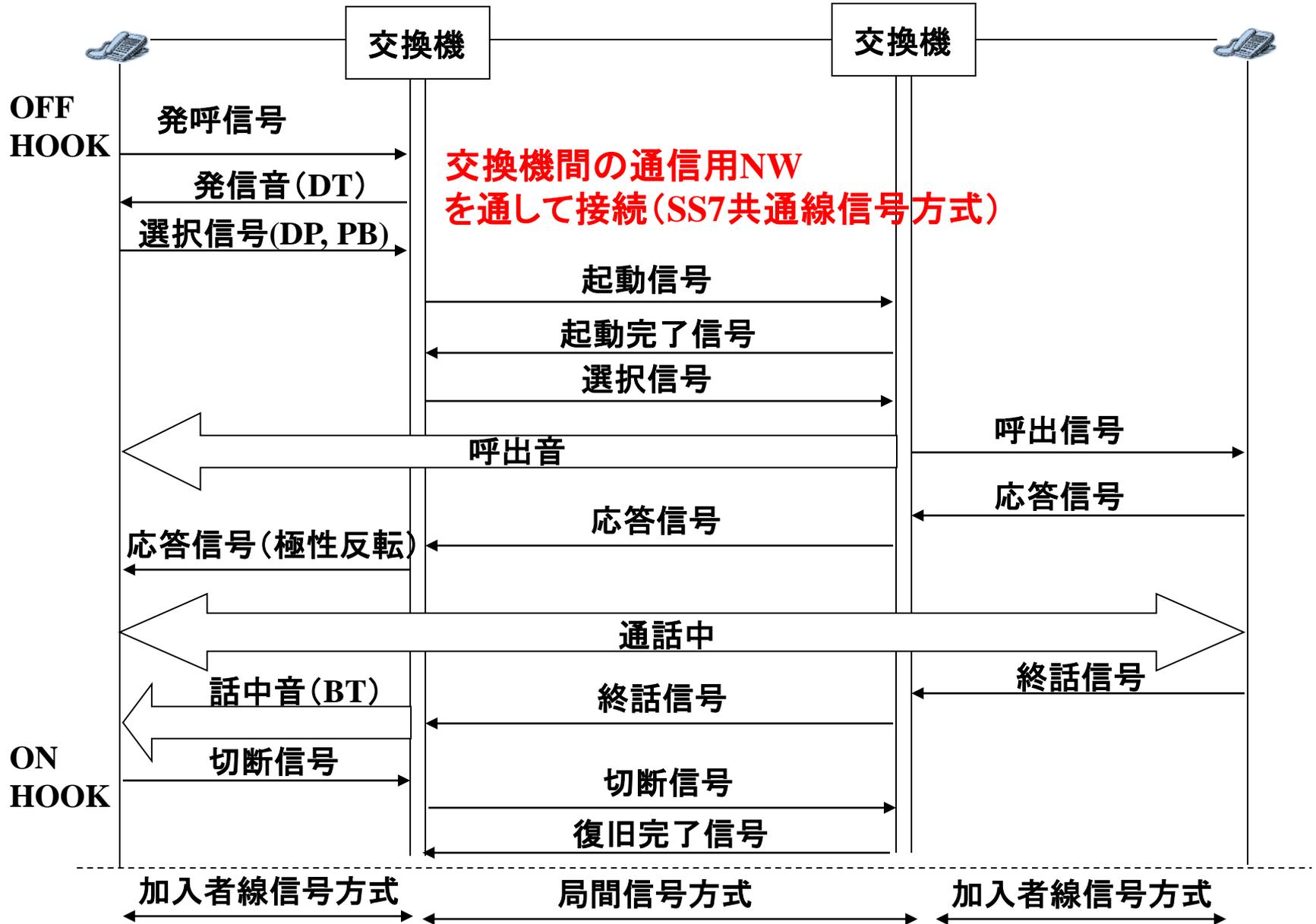


データセンタ・ネットワーク

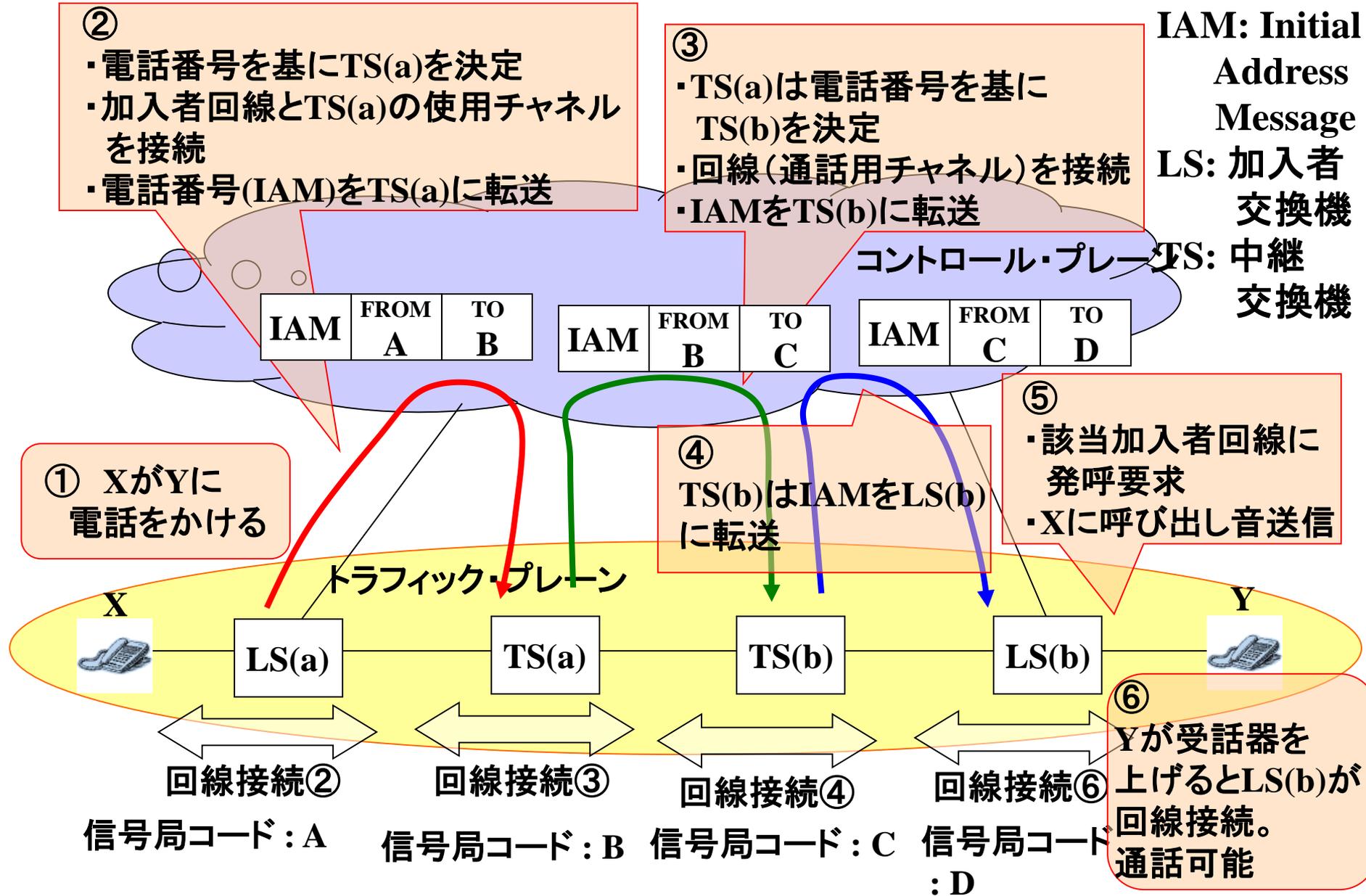
Hyper Giant:
Google, Facebook, Microsoft, etc.

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

長距離通話開始 — 電話網の信号の流れ —

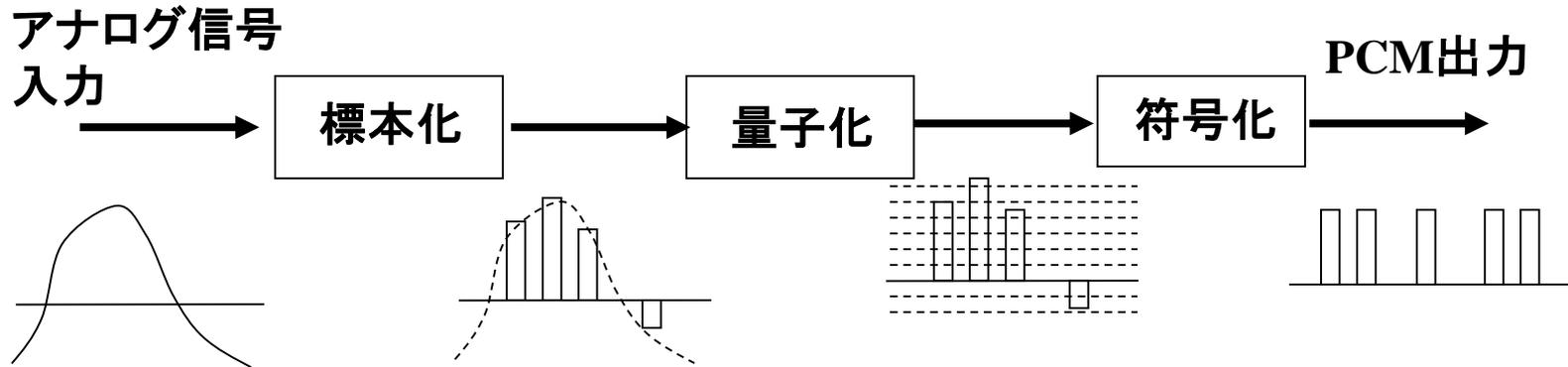


No.7(SS7)共通線信号方式



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

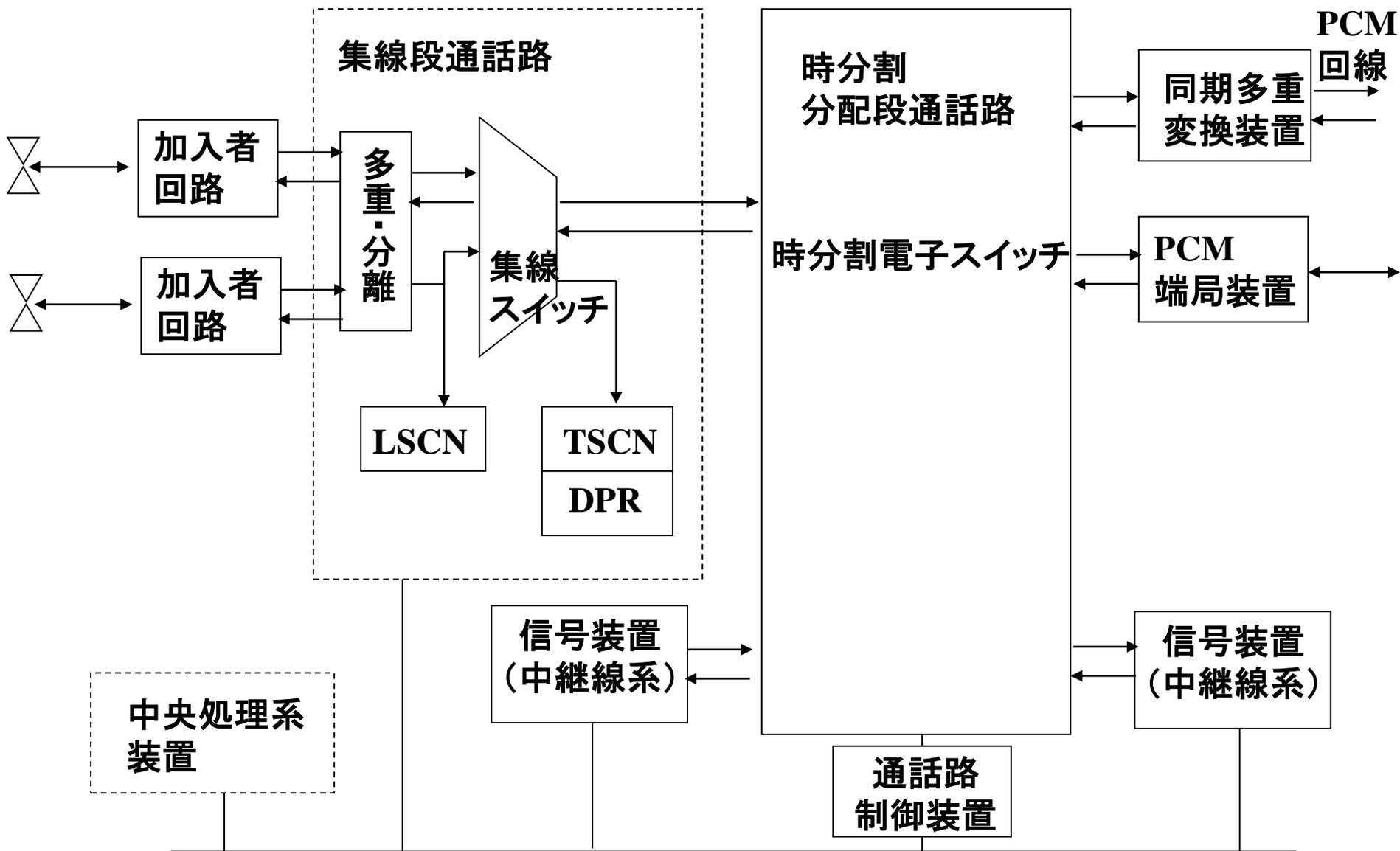
② 量子化 (Quantization)

- ・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
 $20\log 2^8 = 48\text{dB}$

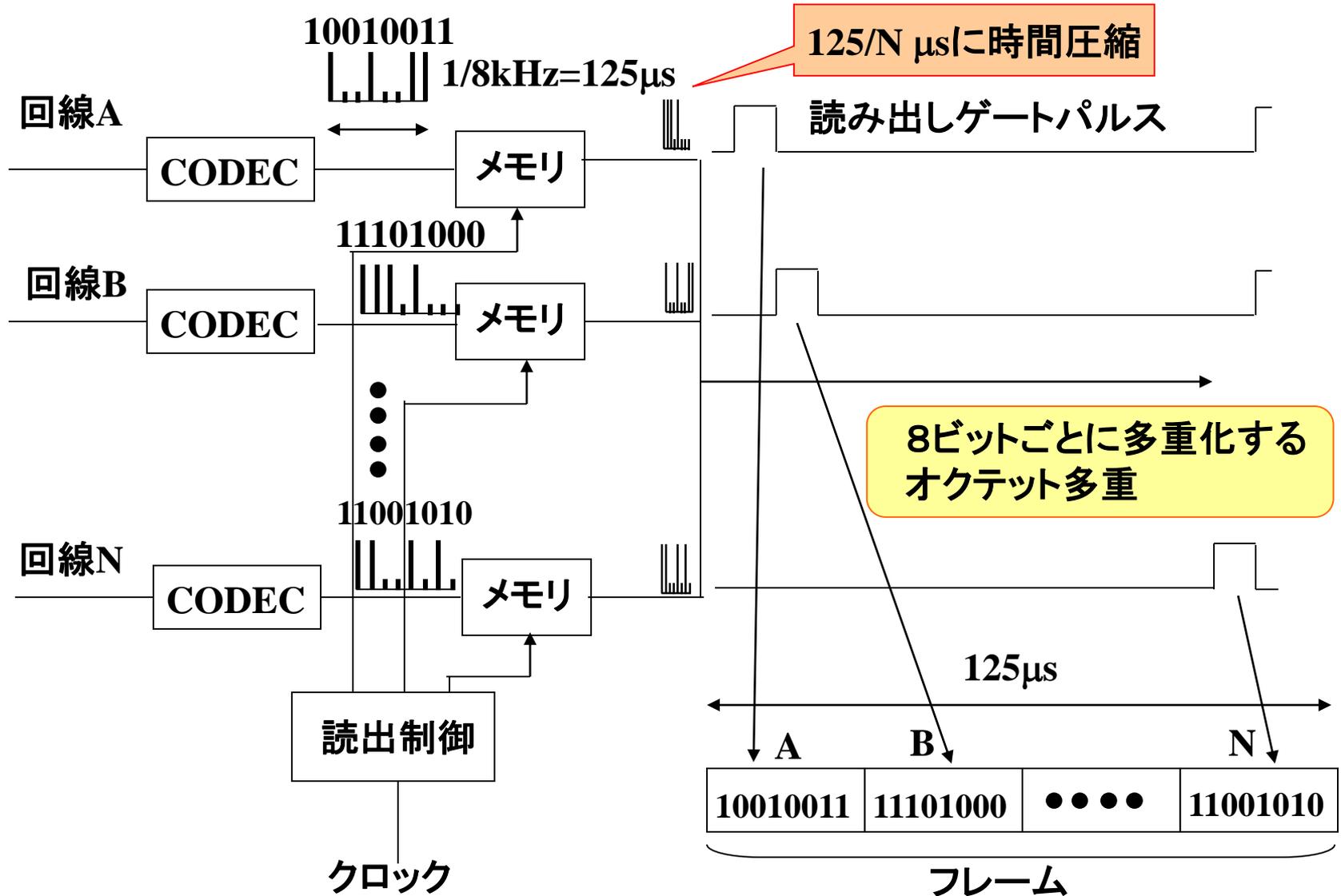
③ 符号化 (PCM)

- ・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

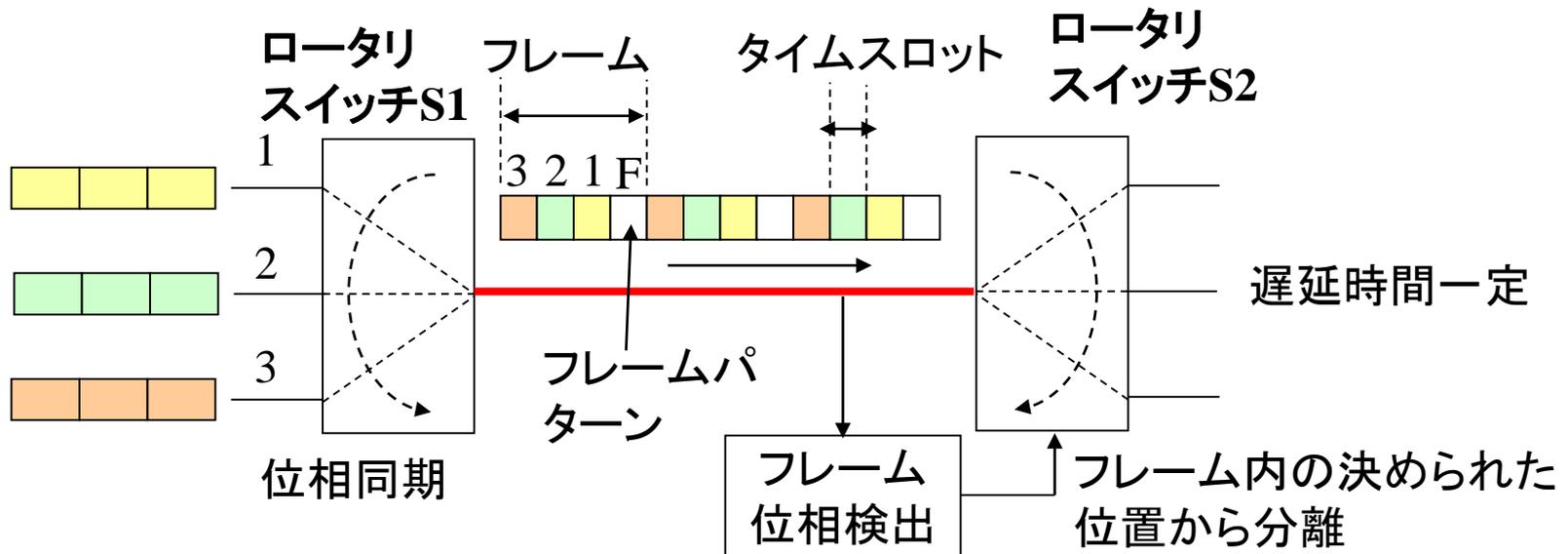


同期化とフレーム同期

- 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）。

$$\text{入力パルス速度} \times \text{ポート数} = \text{ロータリスイッチS1の回転速度}$$

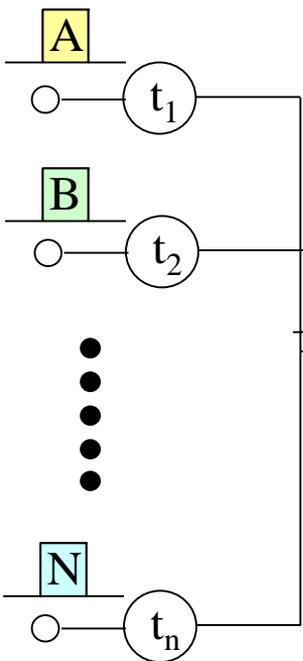
- ② 受信側のロータリスイッチS2がS1と同一速度・位相で回転するよう、回転速度・位相情報を送信側から受信側に転送（フレーム同期）。



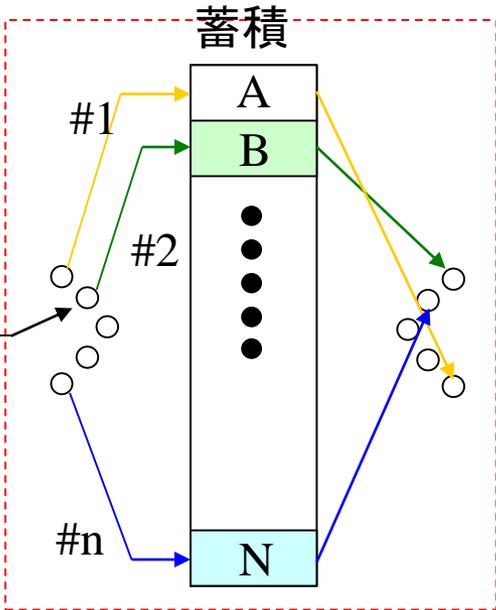
デジタル交換の時分割多重 (位相変換制御)

時分割交換方式

多重化

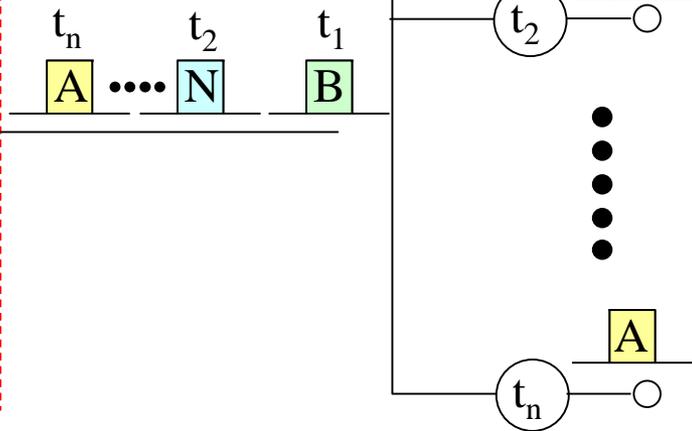


順序入換
(位相変換)



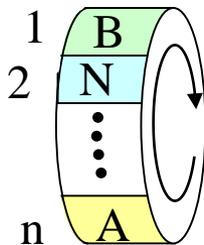
分離

時間スイッチ
(Tスイッチ)



ハイウェイ:
信号が多重化される物理線

制御メモリ

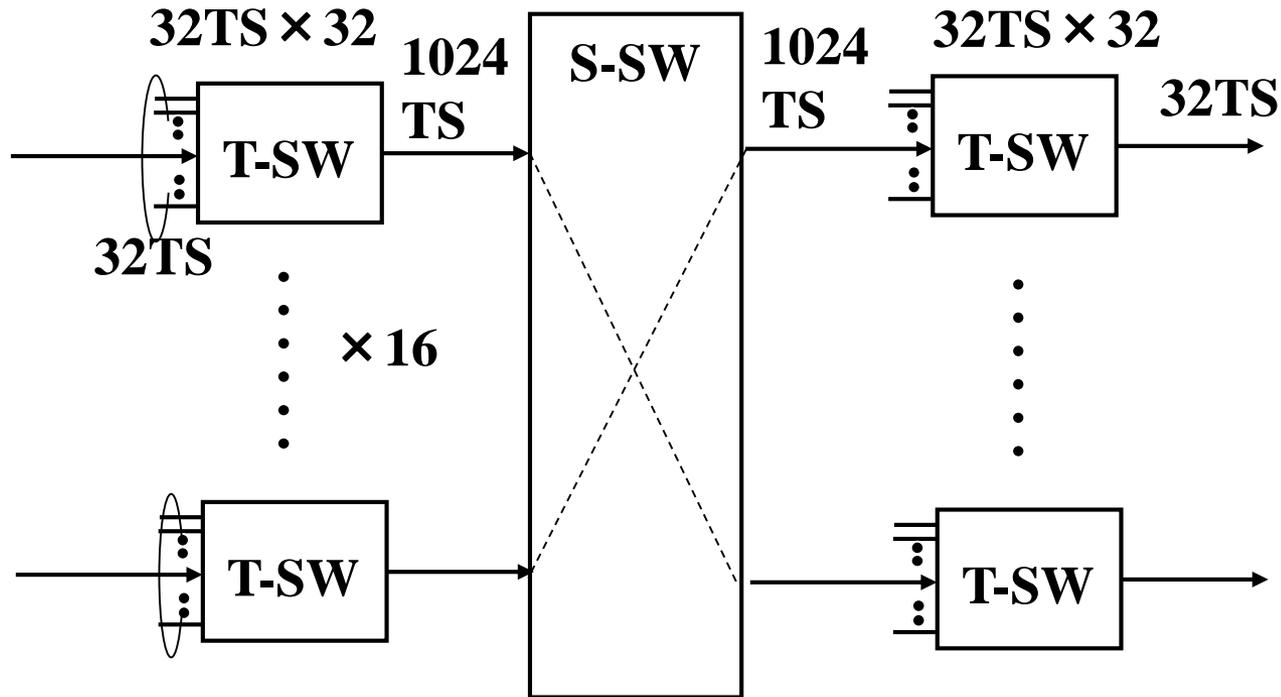


T-Sピラミッド

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

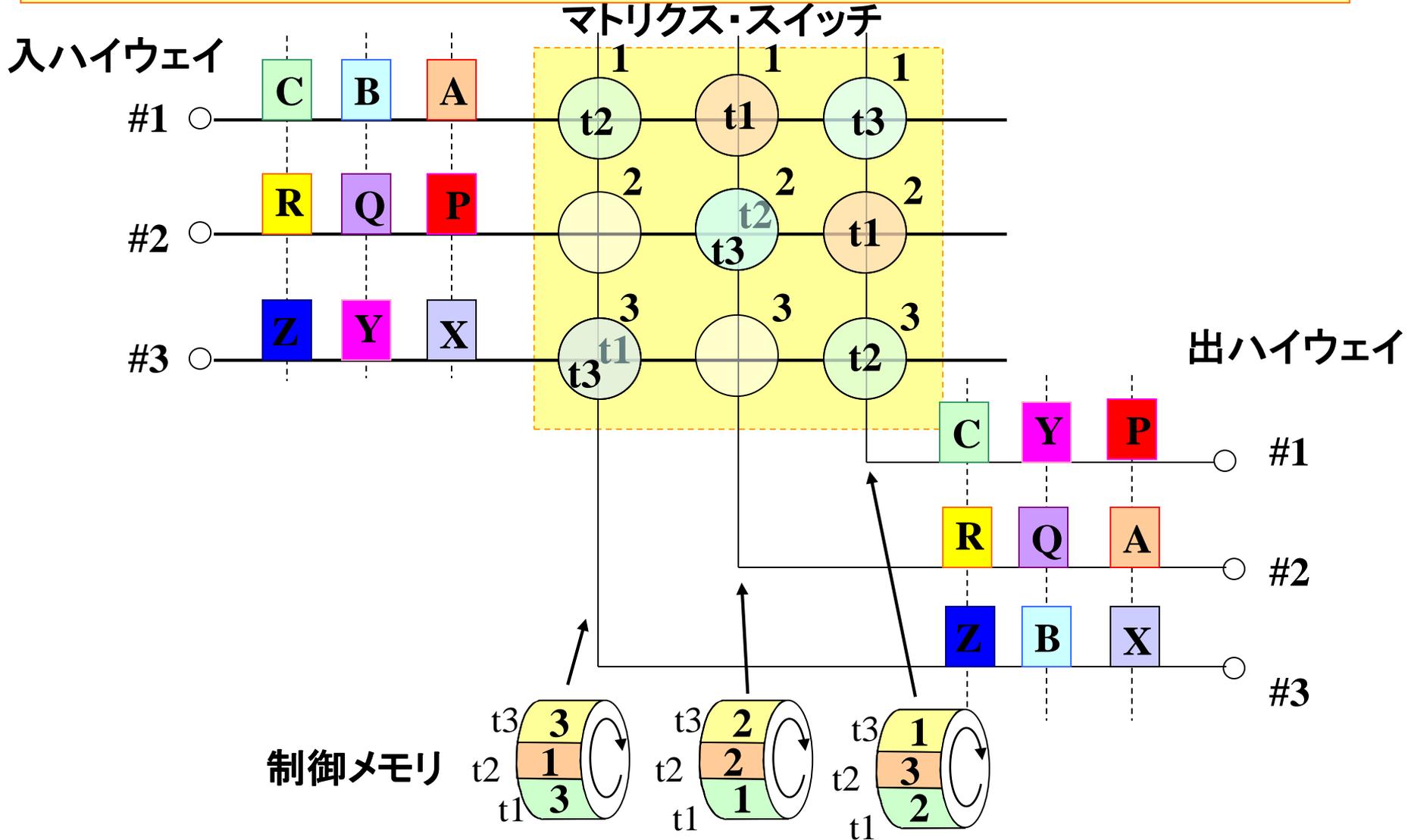
選択経路数の増加度・通話路網の使用能率向上の観点より
T-S-T系列が用いられる。



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)

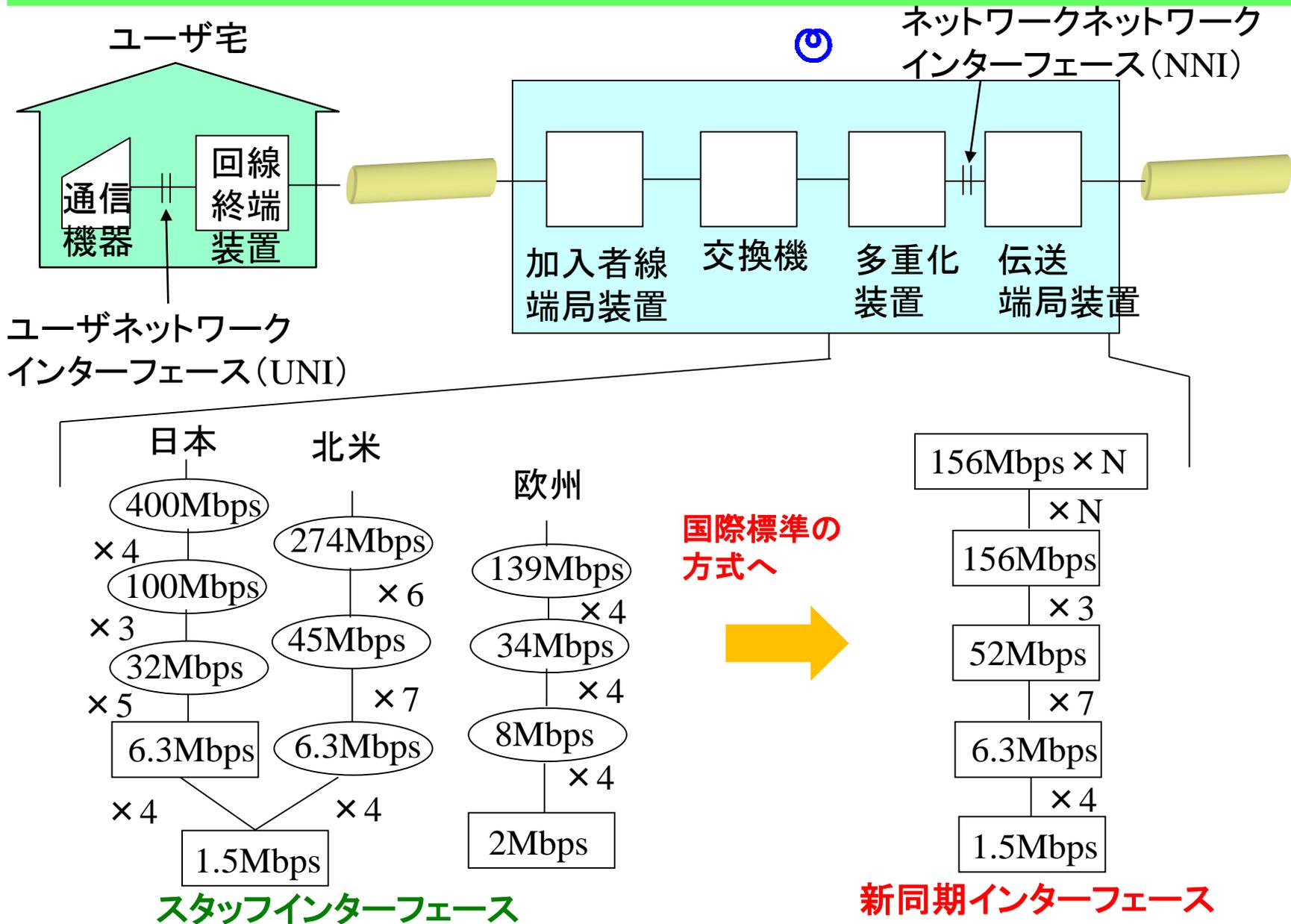
空間スイッチング

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



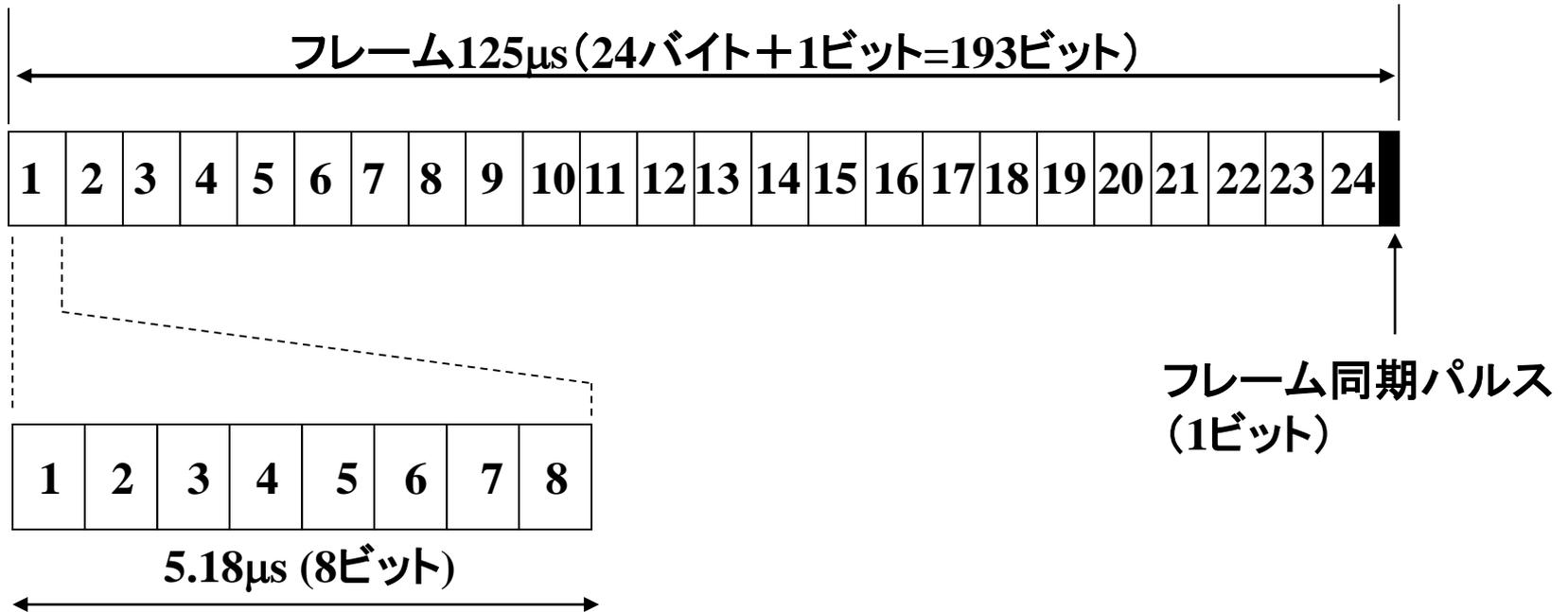
多重方式の基本

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



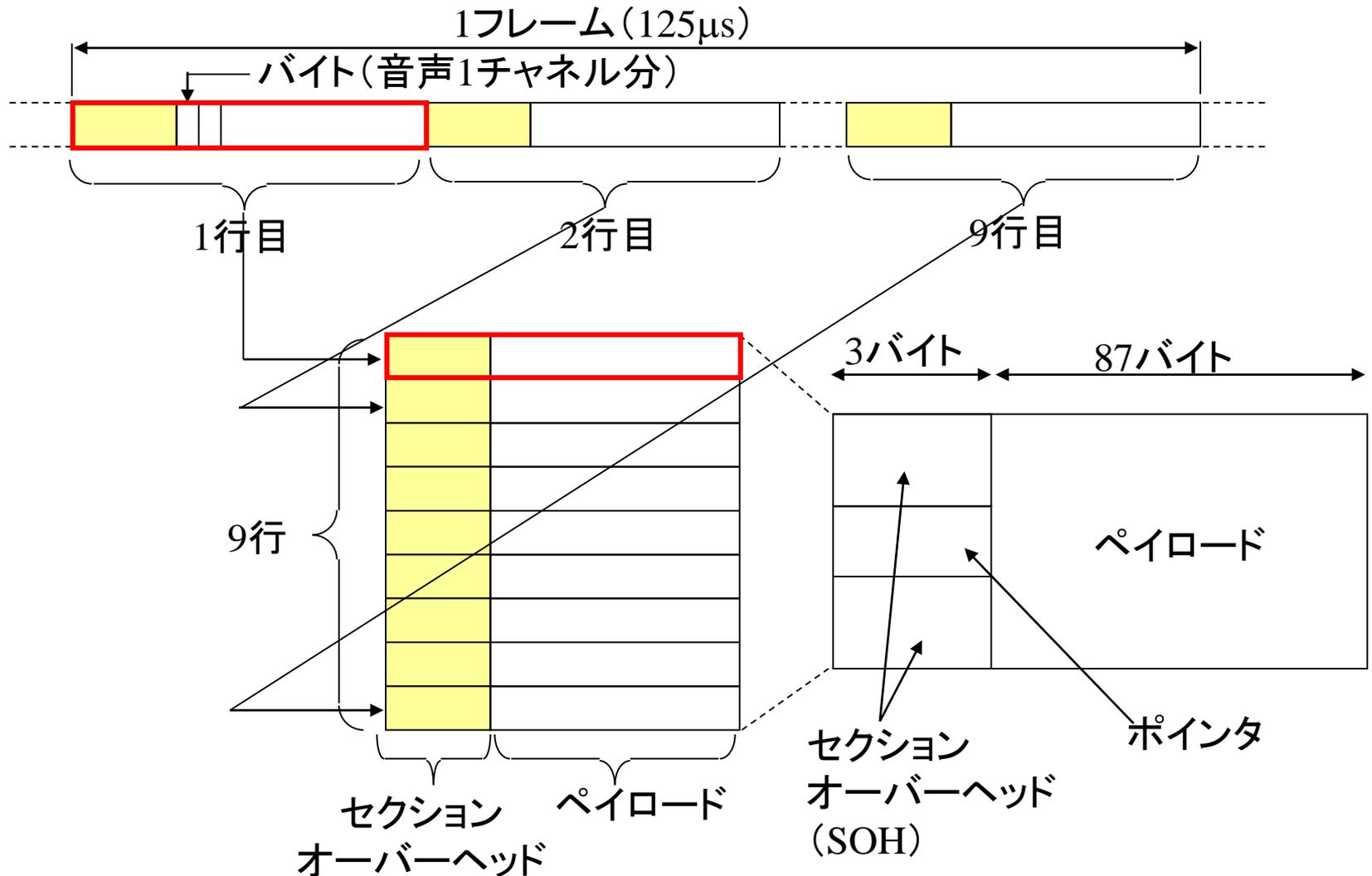
信号のフレーム構成

1.544Mbpsの信号フレーム構成



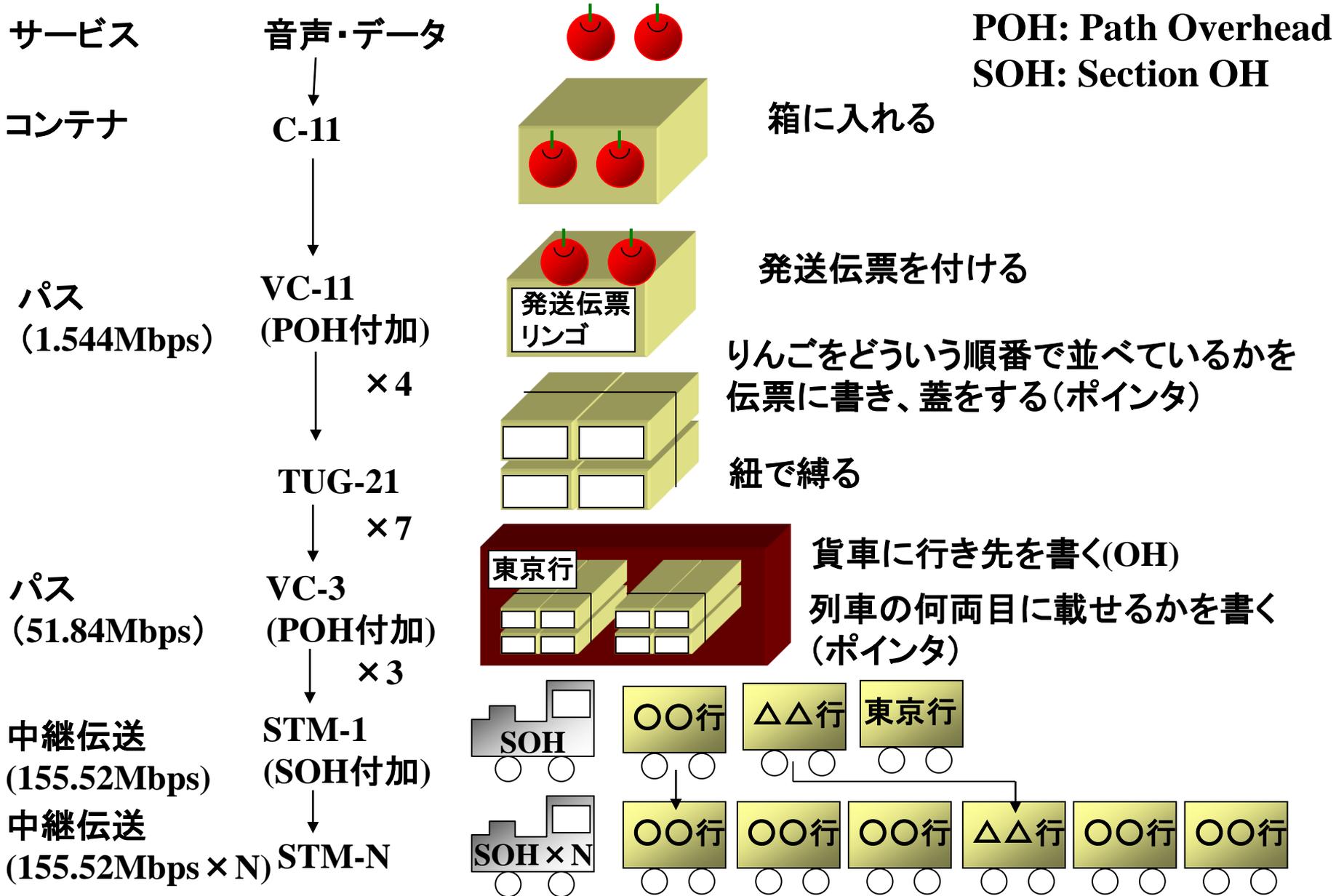
SDHインターフェースの表現方法 (STM-0)

STM-0(51.84Mbps)インターフェースのフレーム構成



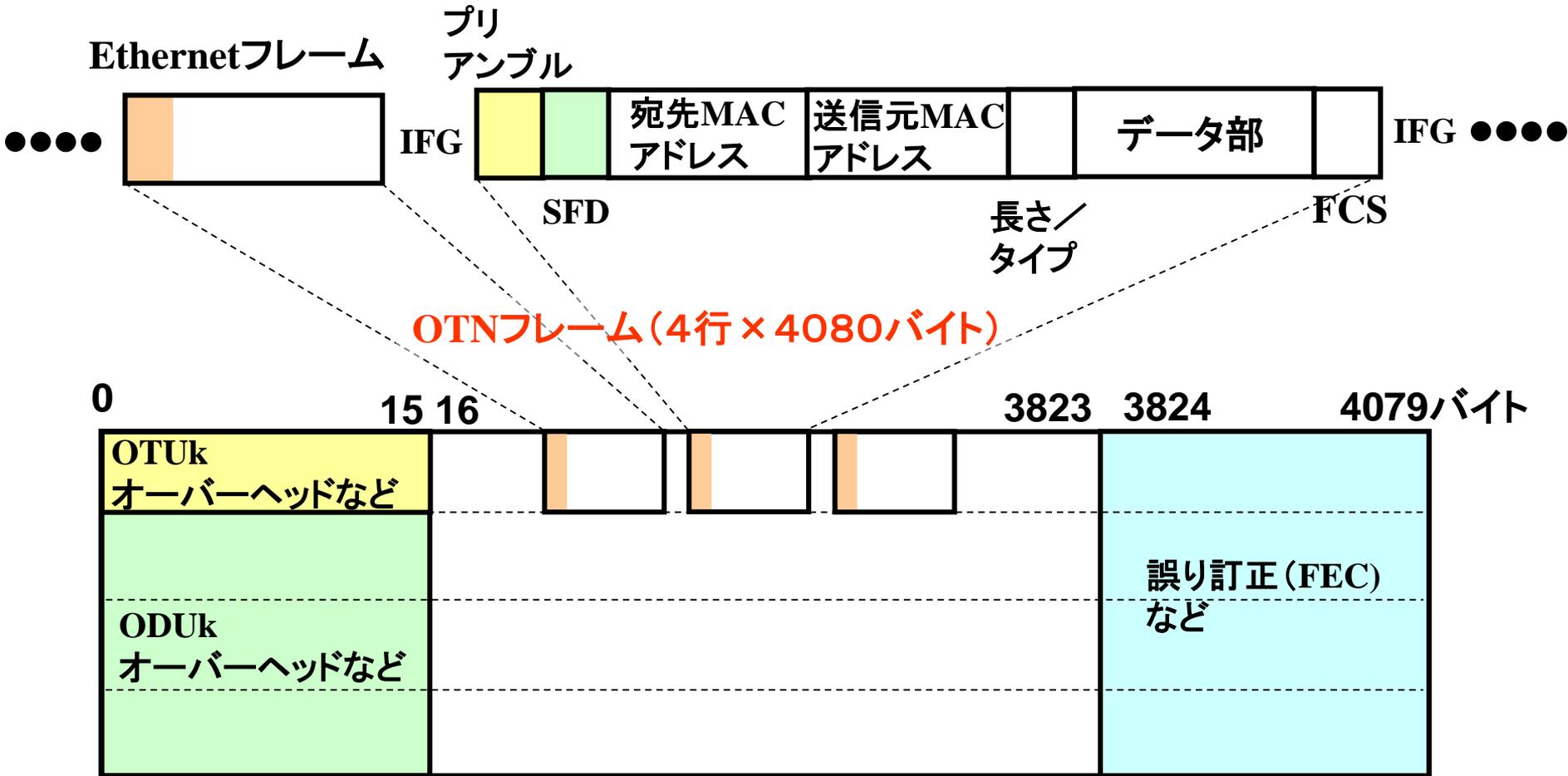
$$90\text{バイト} \times 8\text{ビット} \times 9\text{行} / 125\mu\text{s} = 51.84\text{Mbps}$$

SDHインタフェースへの多重化イメージ



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」



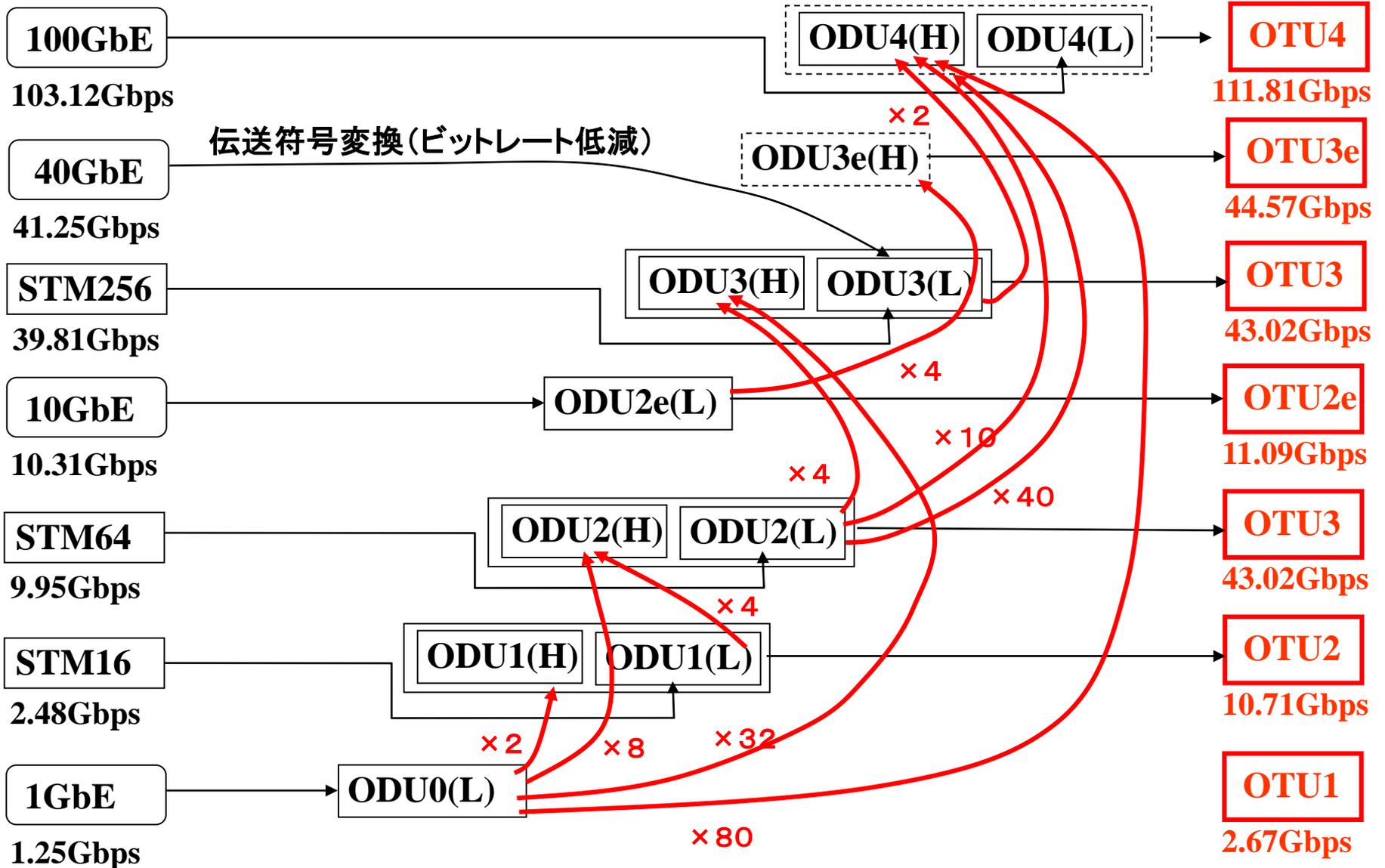
管理用オーバーヘッド

OTUk: Optical Channel Transport unit-k

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

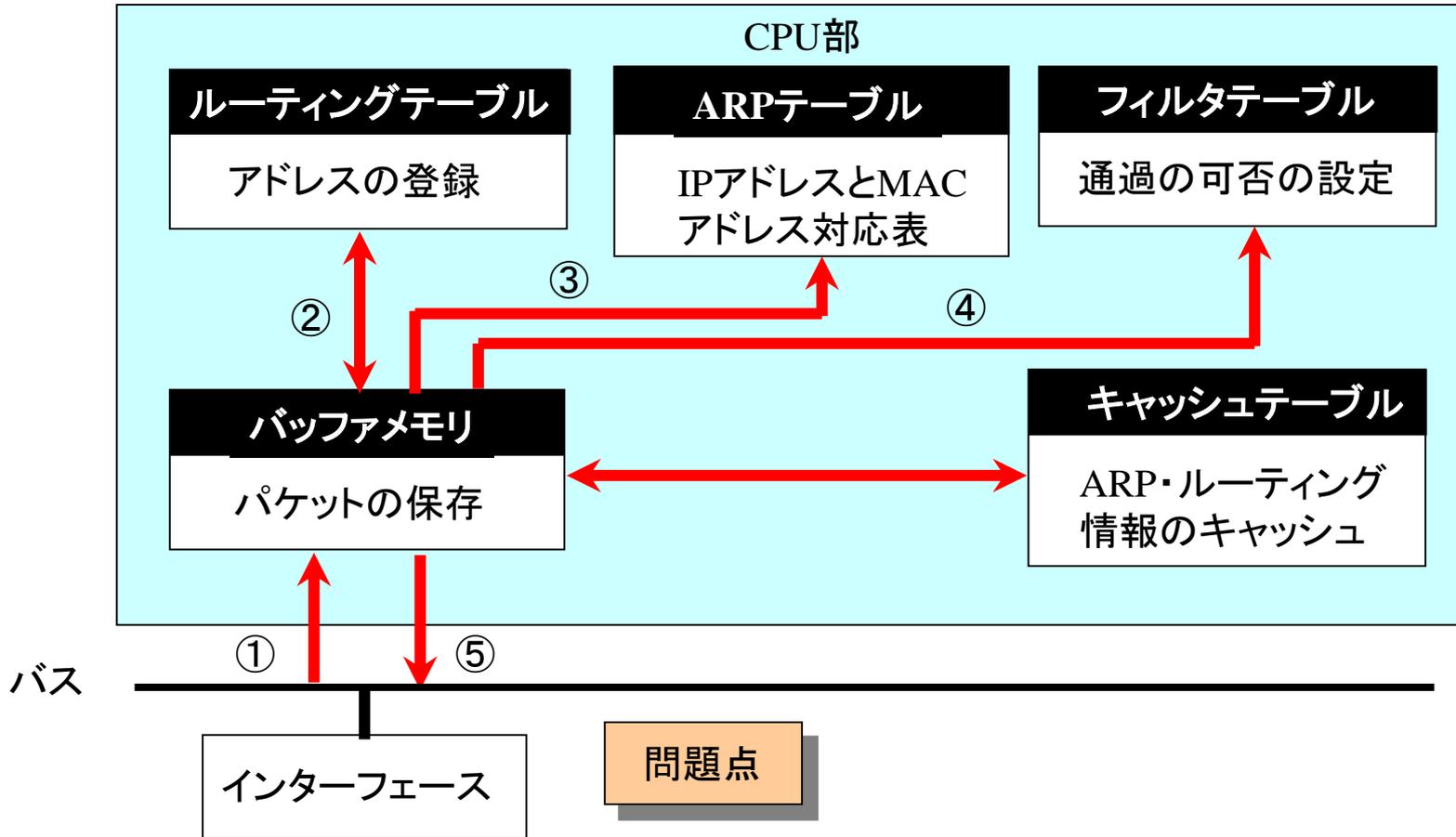
k:ビットレート階梯(k=1: 2.67Gbps, 2: 10.71Gbps, 3: 43.02Gbps, 4: 111.81Gbps)

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 —

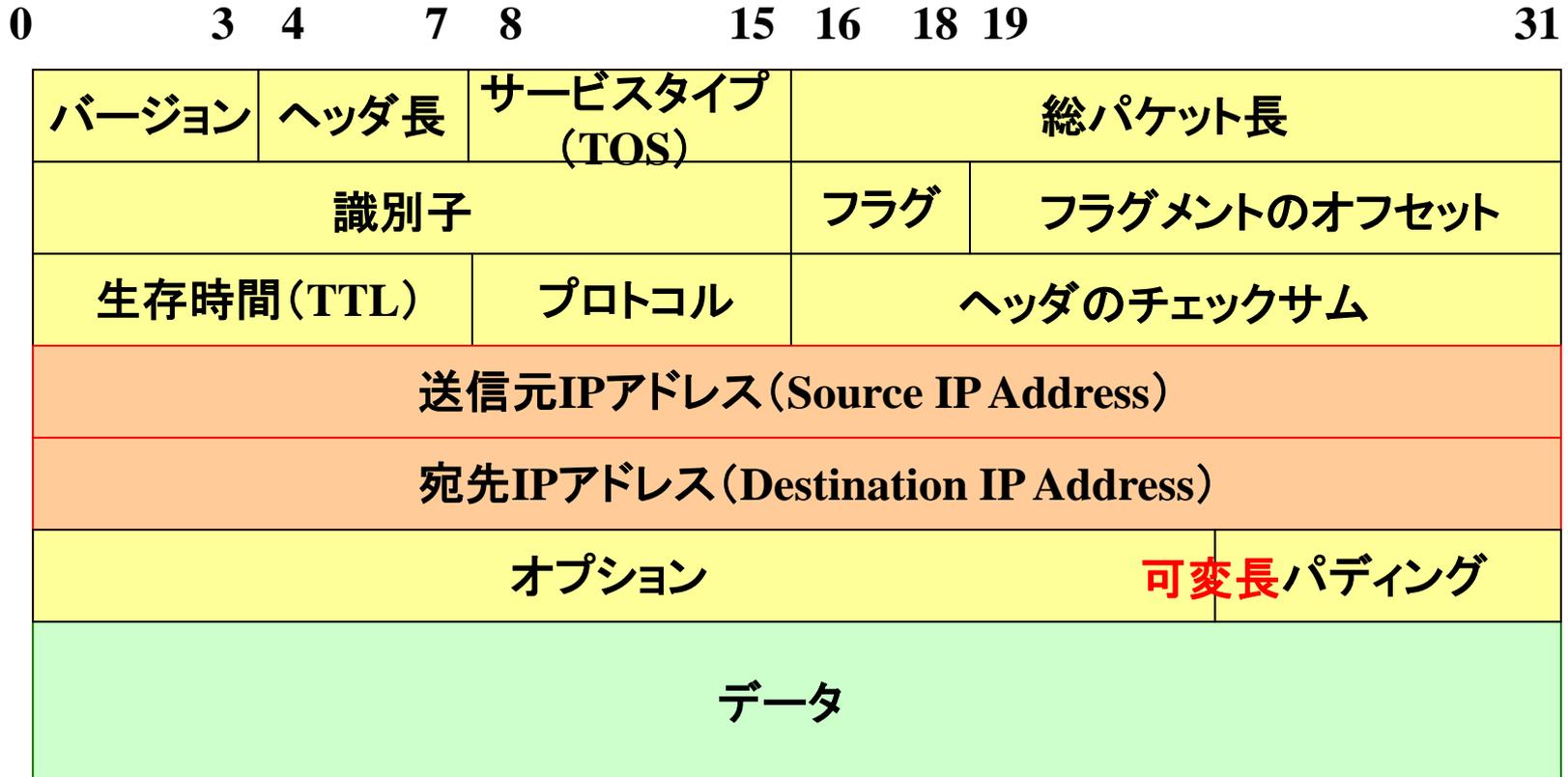
ルータの構造



- CPUや内部バスを共有しており、高負荷時にボトルネック
- ルータ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)

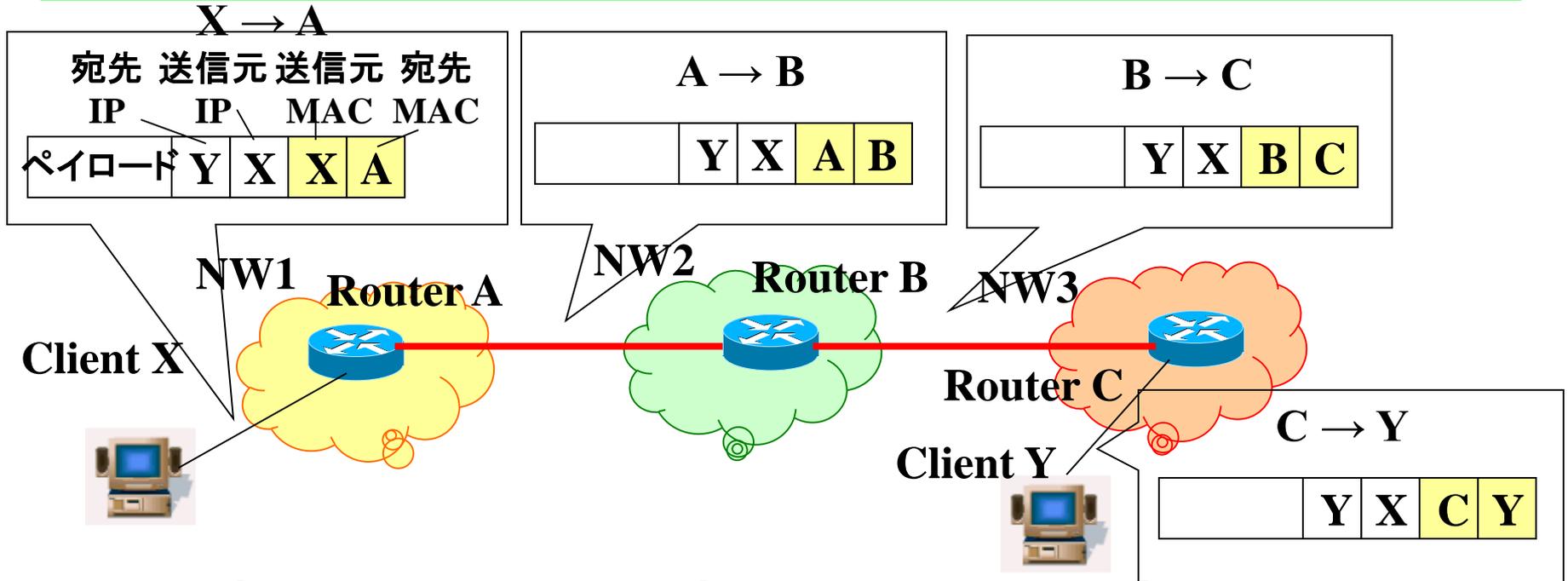
インターネットのパケット構成 (Ethernetフレーム) - IPv4ヘッダの構成 -



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 |

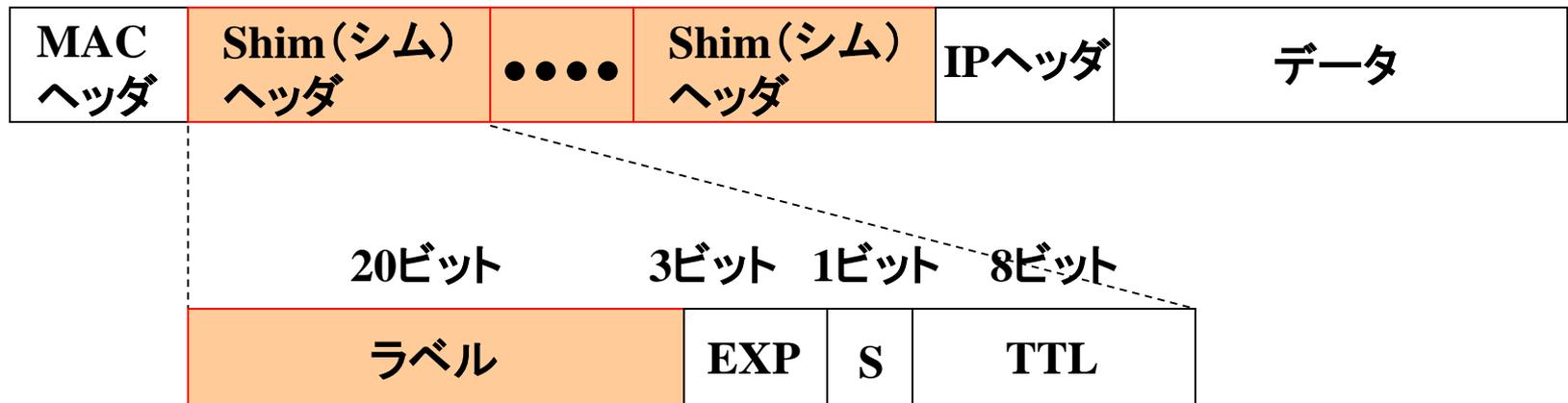
Router Cの
ルーティングテーブル

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

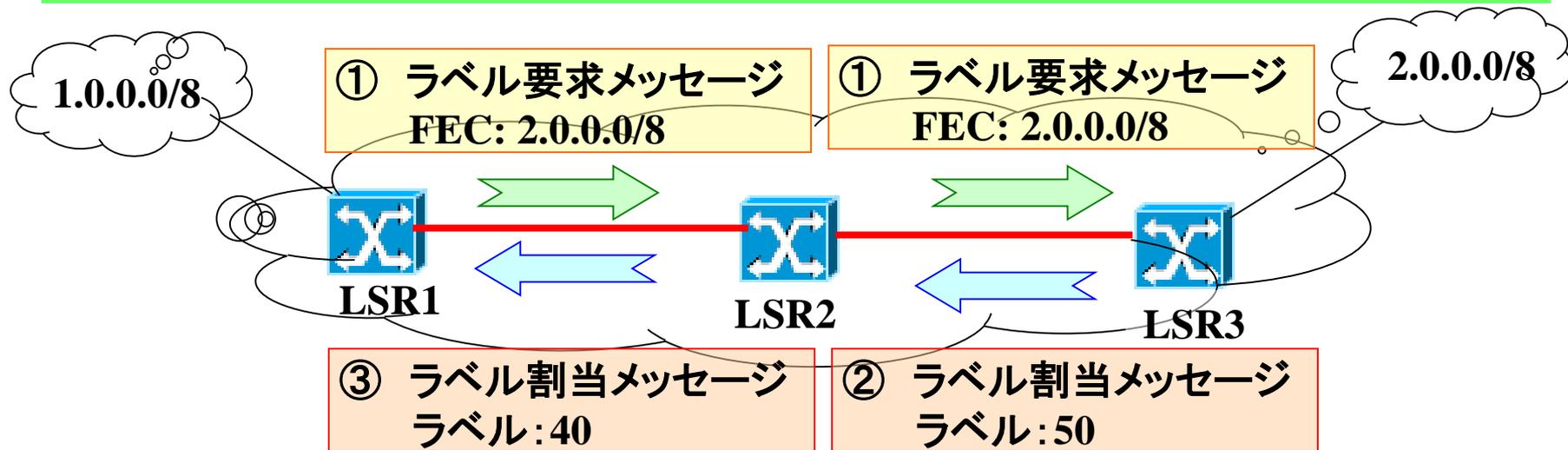
MPLS技術 (Multiprotocol Label Switch)

- ・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

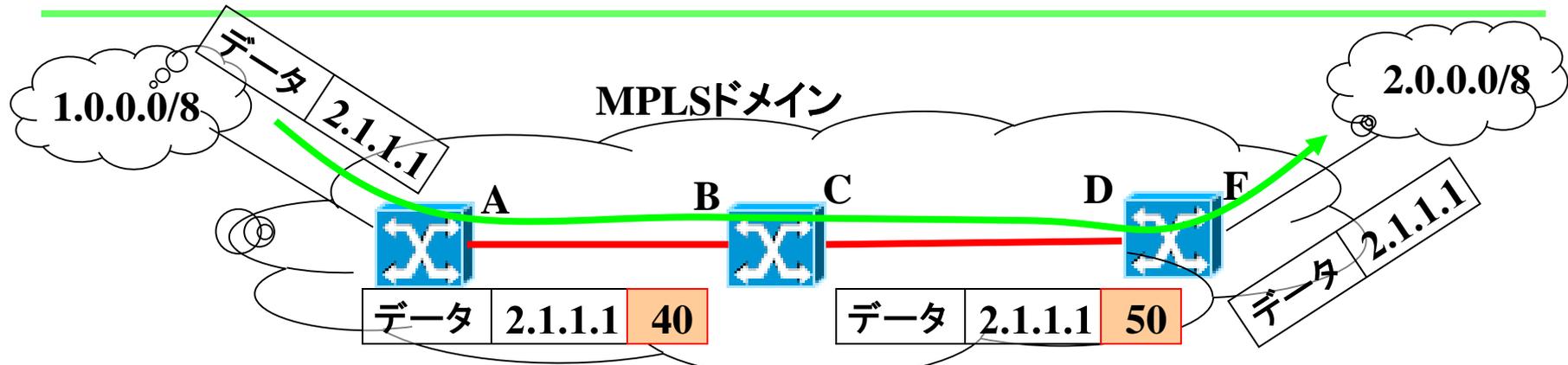
| 入力 IF | FEC | 出力 IF | 出力用 ラベル |
|----------|-----------|----------|------------|
| — | 2.0.0.0/8 | A | 40 |

| 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 |

2.0.0.0/8

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

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

LSR2 MPLS
フォワーディングテーブル

| 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 |

LSR3 MPLS
フォワーディングテーブル

| 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

GMPLS (Generalized MPLS)の位置付け

・IPレイヤにパスの概念を導入したMPLSの技術を、下位層に拡張する技術

MPLS以前

| レイヤ構造 | パスの概念の有無 |
|-------------|----------|
| IP | なし |
| TDM (SONET) | TDMパス |
| WDM/OXC | 波長パス |
| 光ファイバ | 物理伝送経路 |

MPLS

| レイヤ構造 | パス |
|-------------|-----------------|
| IP | LSP ← 設定 |
| TDM (SONET) | TDMパス |
| WDM/OXC | 波長パス |
| 光ファイバ | 物理伝送経路 |

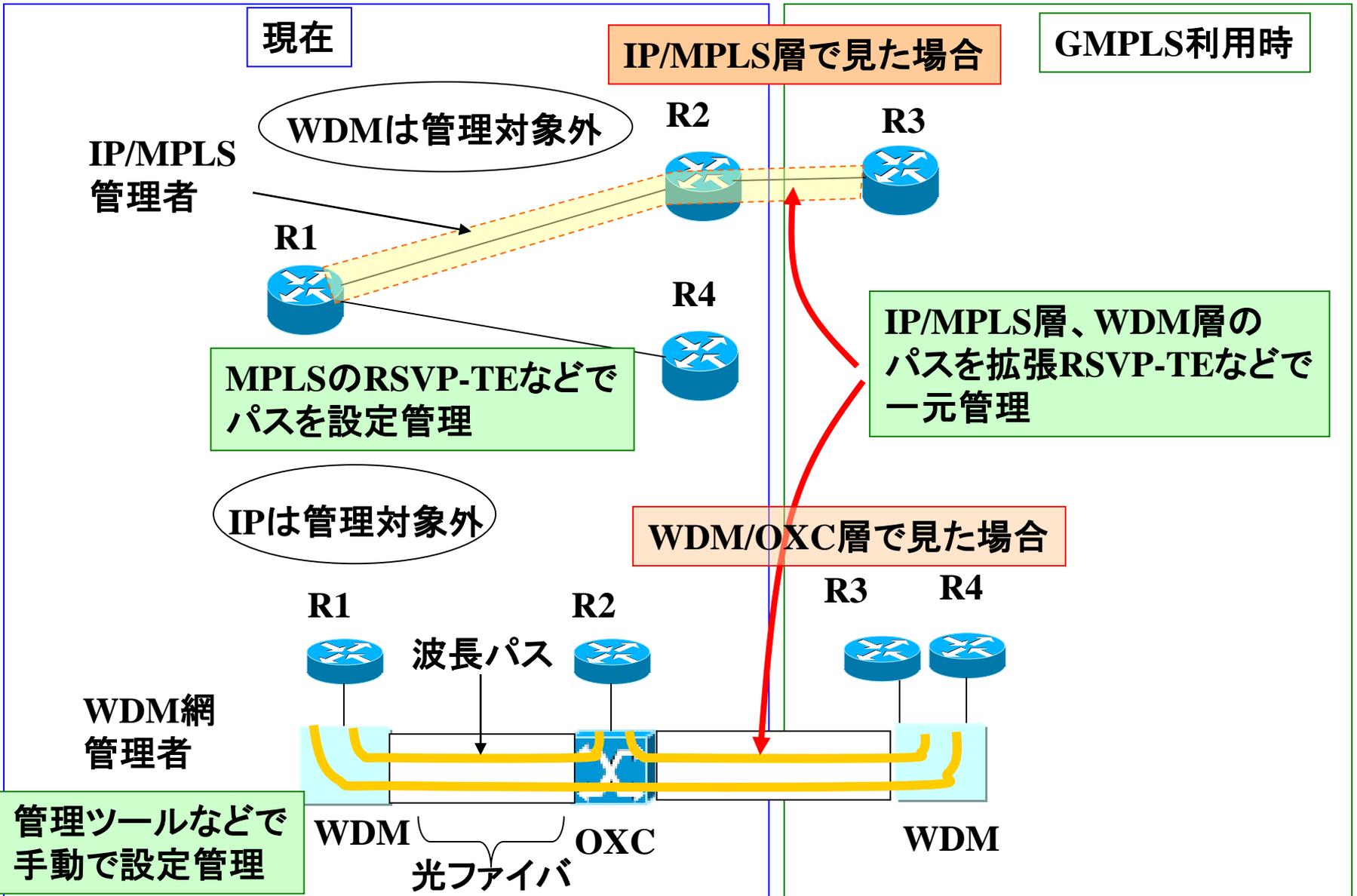
MPLS

GMPLS

| レイヤ構造 | パス |
|-------------|--------------------|
| IP | LSP ← 設定 |
| TDM (SONET) | TDMパス ← 設定 |
| WDM/OXC | 波長パス ← 設定 |
| 光ファイバ | 物理伝送経路 ← 設定 |

GMPLS

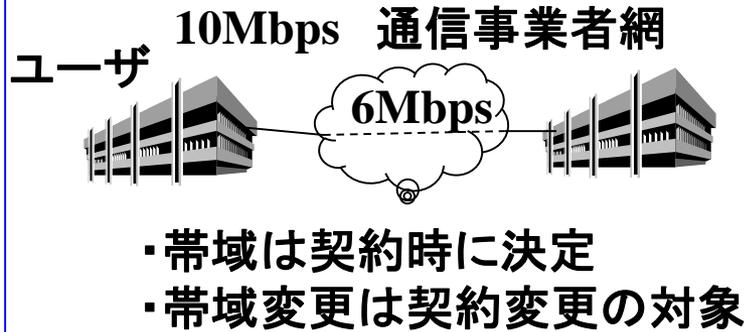
GMPLSによる運用コストの低減



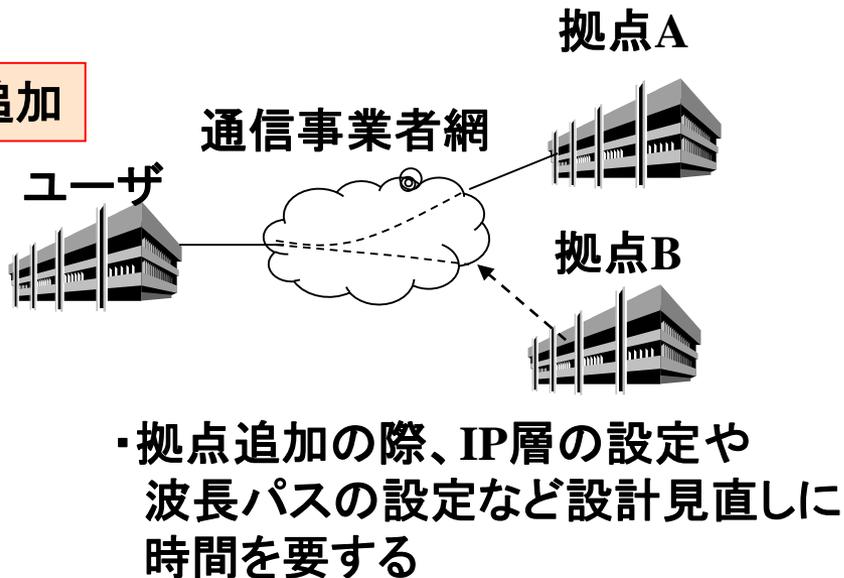
GMPLSによるユーザのメリット

帯域オンデマンド

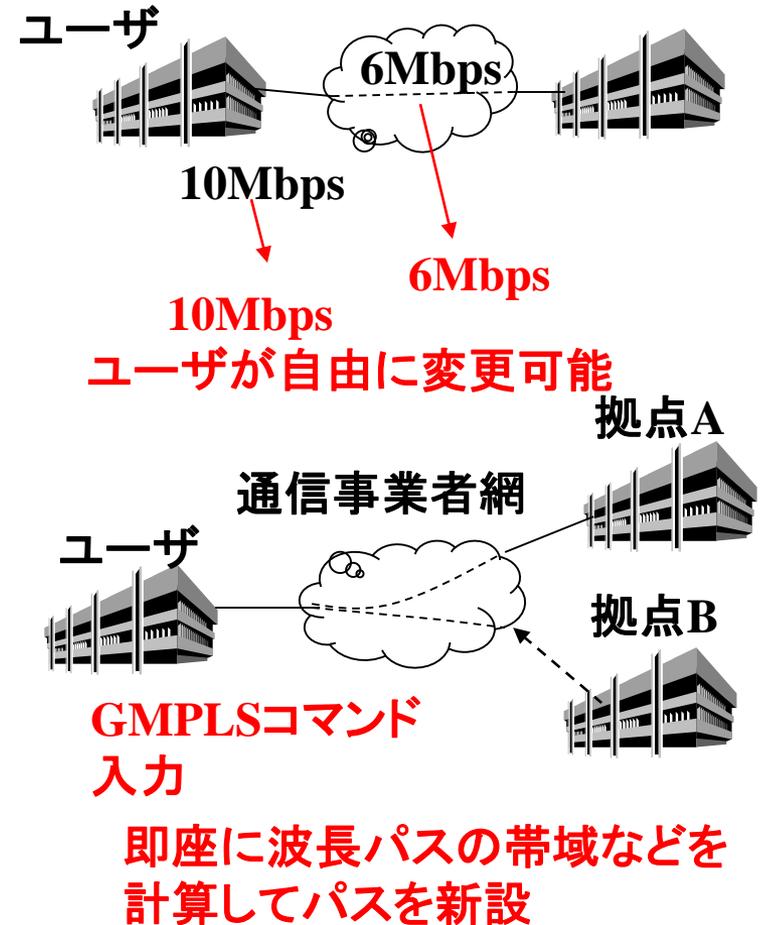
現在



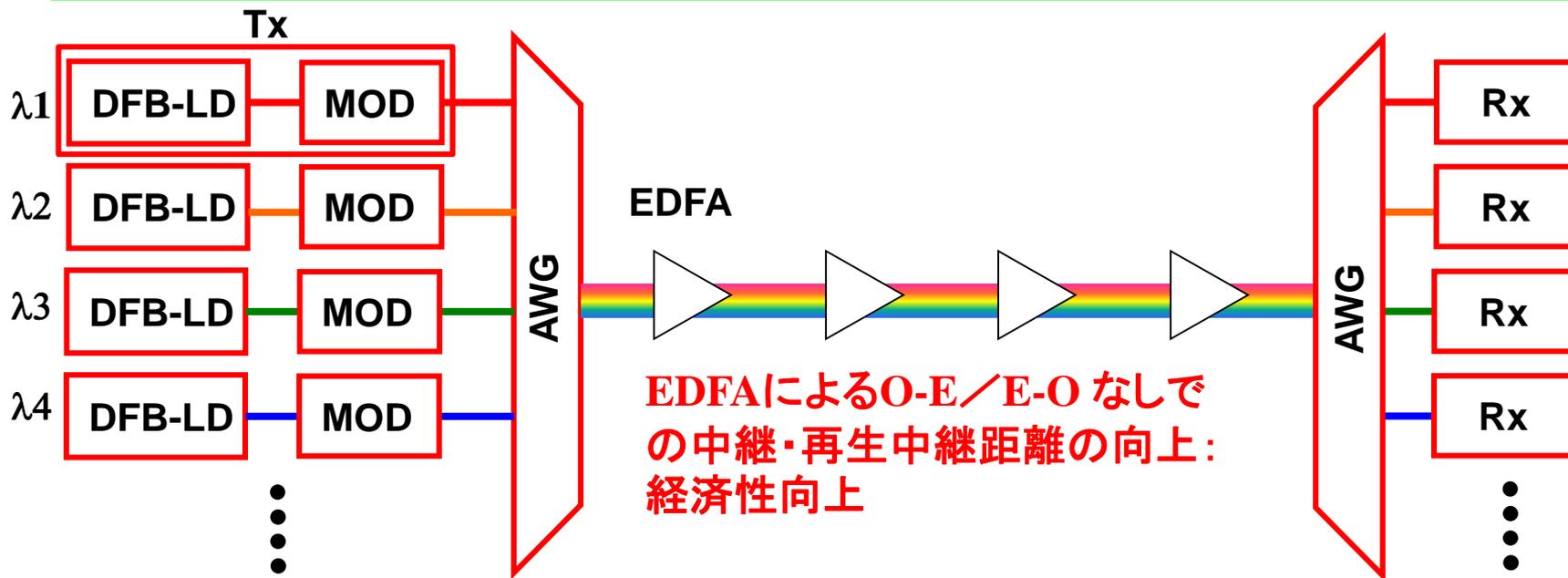
新規追加



GMPLS利用時



長距離基幹系 (バックボーン,コア・ネットワーク)



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

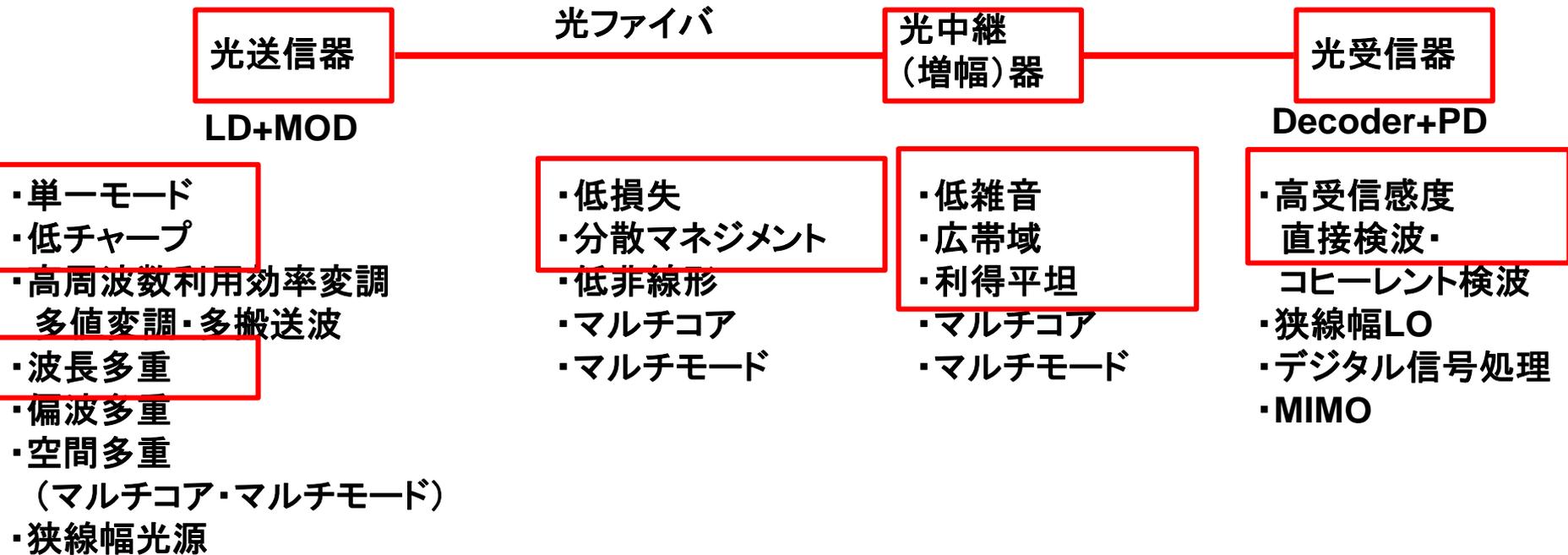
Rx: 光受信器

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

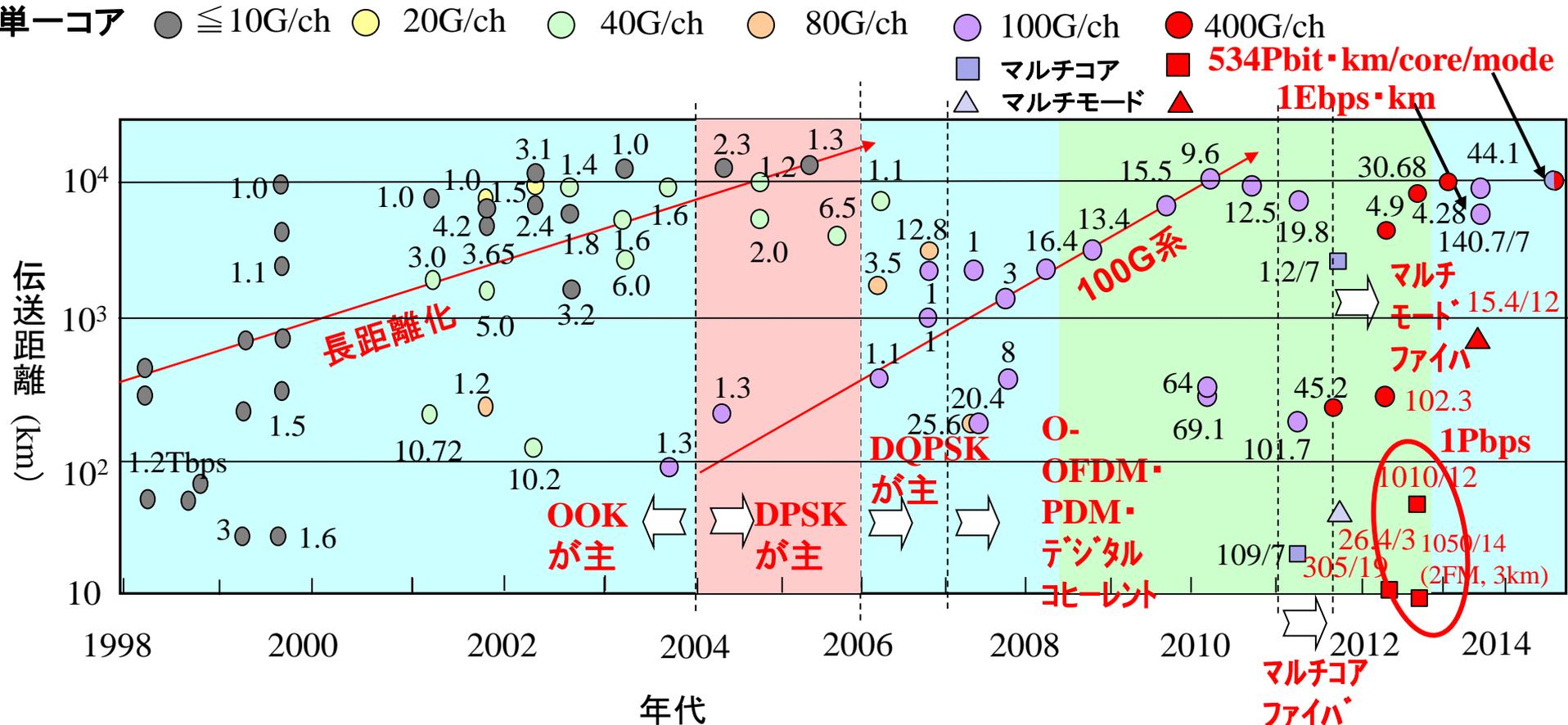
ありとあらゆる手段を用いて大容量化の実現を狙う光通信技術



内は(長距離大容量向けの)従来の手法

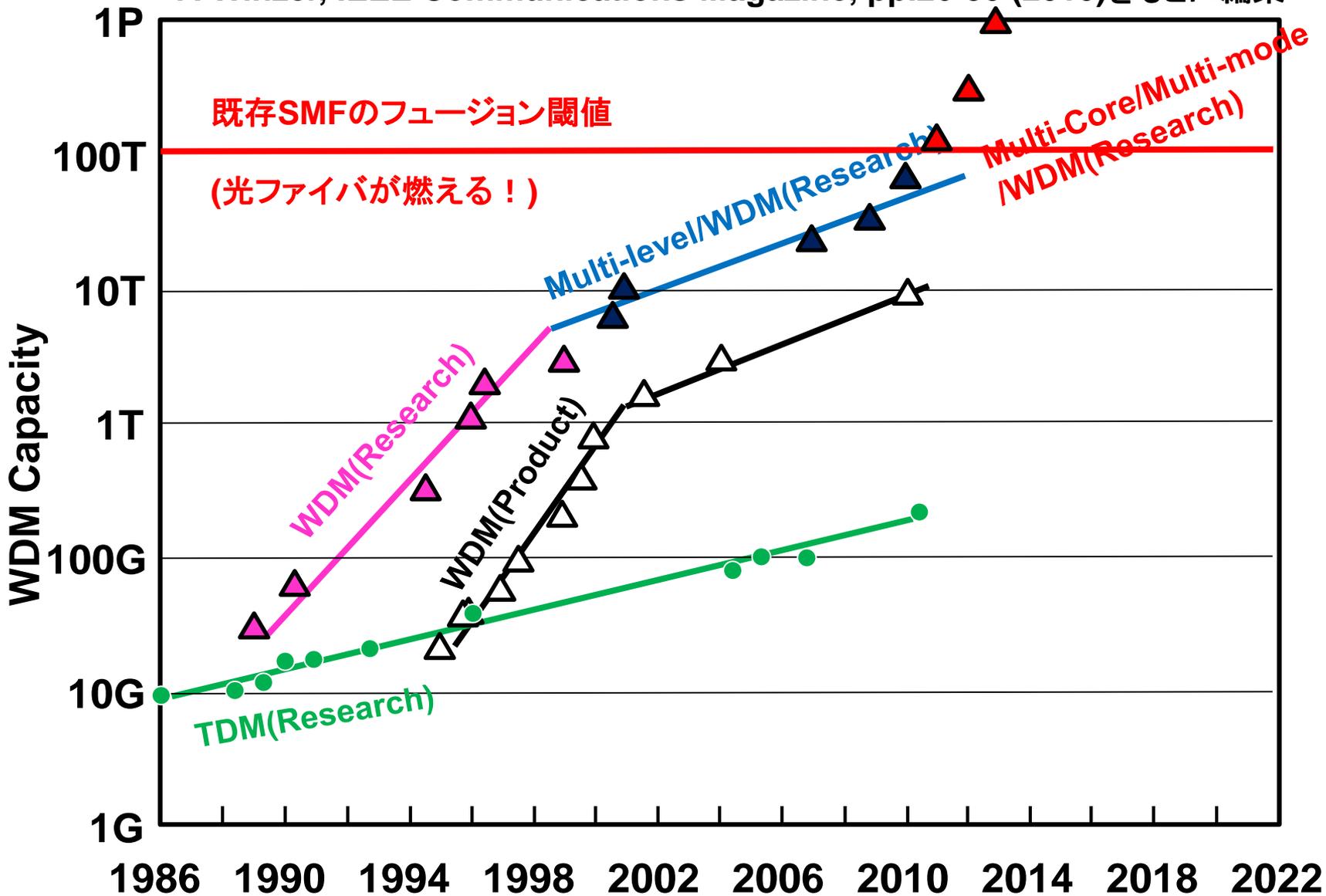
テラビット(Tbps)伝送実験の報告例

速度: 100G超へ
容量: 1P超へ
距離: 9,000km超@100G/ch, 100T/fiber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
変調方式: 多値 and/or 多キャリア方式へ
ファイバ: マルチコア・マルチモードファイバ技術の導入



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



光通信技術のパラダイムシフト (無線通信との類似性)

水落,2009年第1回PN新世代懇談会.



● 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
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) $16=2^4$



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)

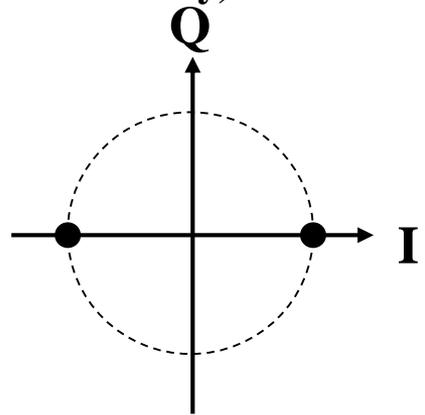
8bit/symbol

(14G symbol/s

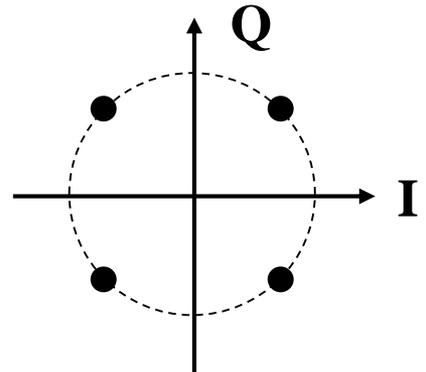
=112Gbps)

ASK, (B, D)PSK

B: Binary, D: Differential, Q: Quadrature

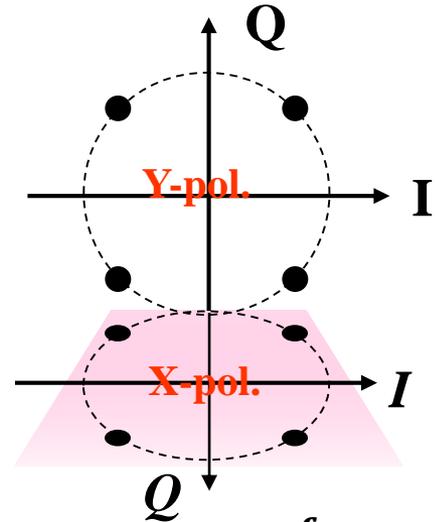


(D)QPSK

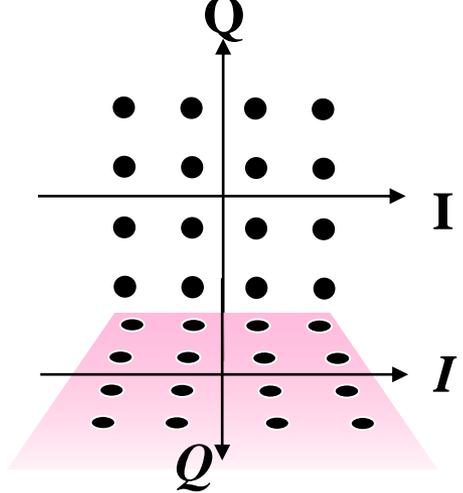


DP-QPSK

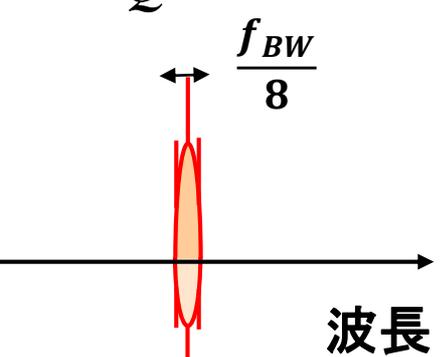
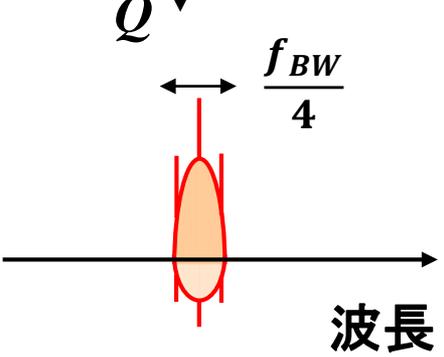
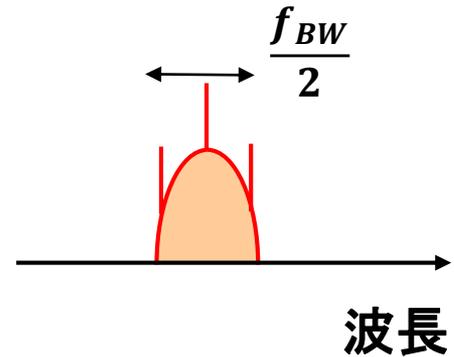
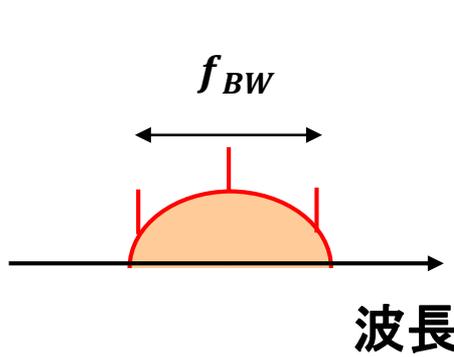
DP: Dual-Polarization



DP-16QAM



I: In-phase, Q: Quadrature-phase

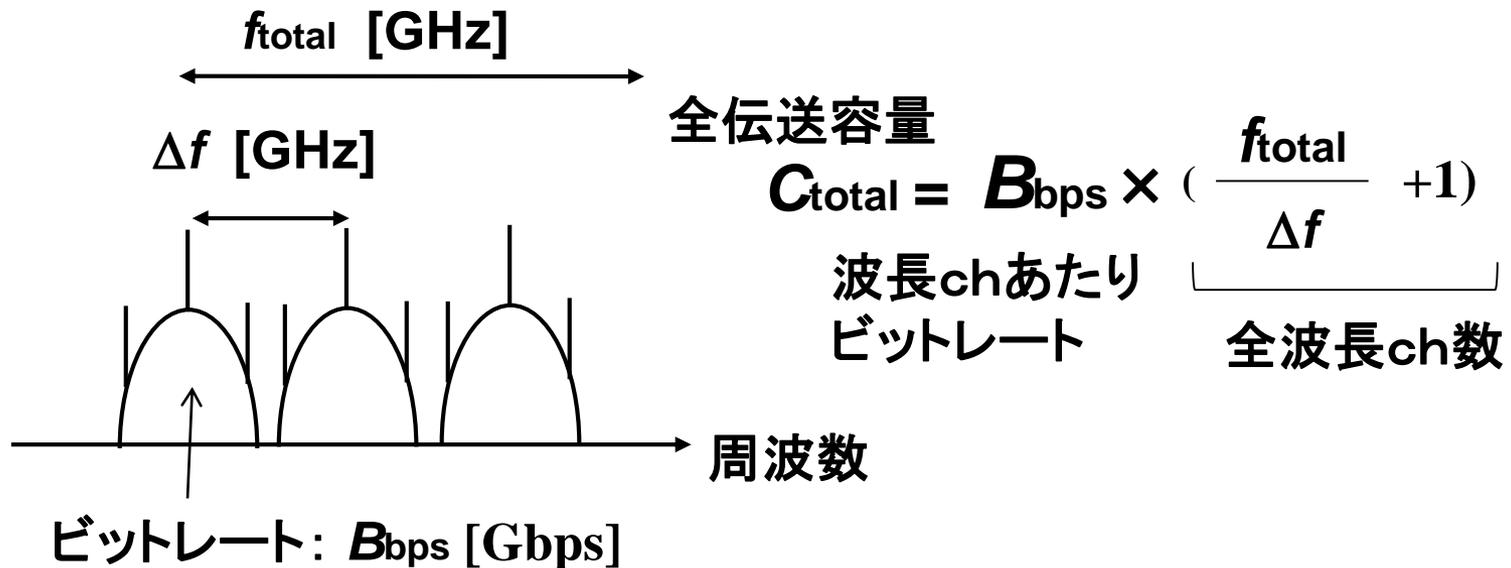


周波数利用効率 (Spectral Efficiency, SE)

WDMのチャンネル間隔: Δf [GHz]

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

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



とうとう到達した100Tbps伝送実験(1) (シングルコア・ファイバ)

D. Qian, M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, Y. Shao, J. Hu, and T. Wang, OFC/NFOEC2011, PDPB5 (2011).

伝送容量: $1\text{Mbps (1subcarrier)} \times 7\text{値多重 (128QAM)} \times 2\text{(偏波多重)} \times 5500\text{(チャンネル数)}$
 $\times 4\text{(コピー)} \times \frac{64}{67} \times 370\lambda\text{(C+Lバンド)} \times 0.93\text{(FEC)} = 294\text{Gbps} \times 370\lambda$
 $= 101.7\text{Tbps}$

スペクトル利用効率: $294\text{Gbps} \div 25\text{GHz/ch} \times 0.93 = 10.9\text{bps/Hz}$

 **しかし、、、**
100Tbps(>数
W/ch)でSMF
が燃えるらしい
(ファイバ・
フューズ)

2015年度
光通信システム

とうとう到達した100Tbps伝送実験(2) (シングルコア・ファイバ)

D. Qian, M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, Y. Shao, J. Hu, and T. Wang, OFC/NFOEC2011, PDPB5 (2011).

とうとう到達した100Tbps伝送実験(3) (マルチコア・ファイバ)

J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, OFC/NFOEC2011, PDPB6 (2011).

伝送容量: $43\text{Gbps} \times 2\text{値多重(QPSK)} \times 2\text{(偏波多重)} \times 97\lambda\text{(C+Lバンド)} \times 7\text{コア} \times 0.93\text{(FEC)}$
 $= 172\text{Gbps} \times 97\lambda \times 7\text{コア} \times 0.93 = 108.6\text{Tbps}$

スペクトル利用効率: $172\text{Gbps} \div 100\text{GHz/ch} \times 7\text{コア} \times 0.93 = 11.2\text{bps/Hz}$

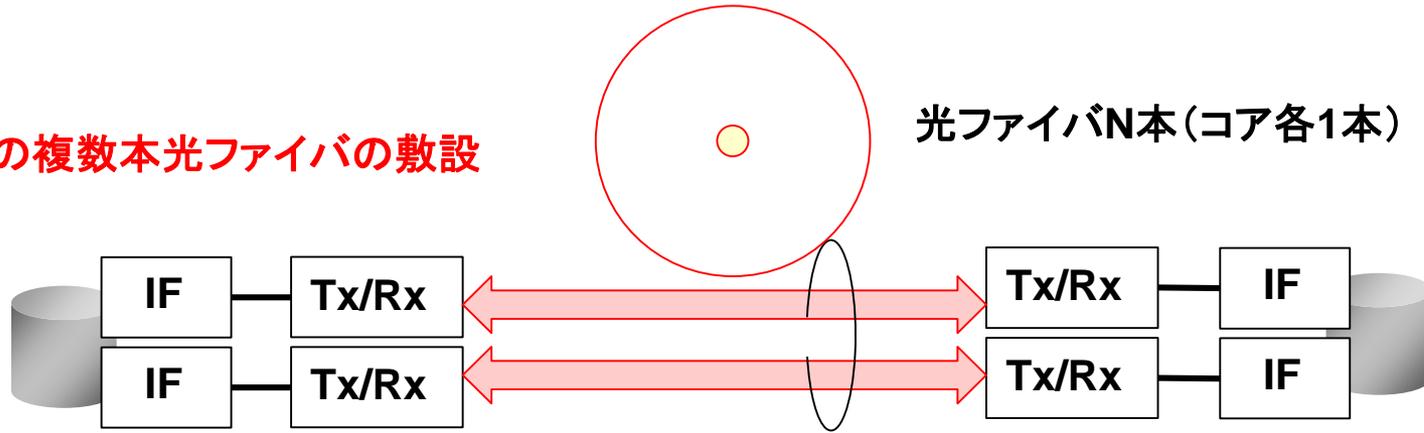
2015年度
光通信システム

とうとう到達した100Tbps伝送実験(4) (マルチコア・ファイバ)

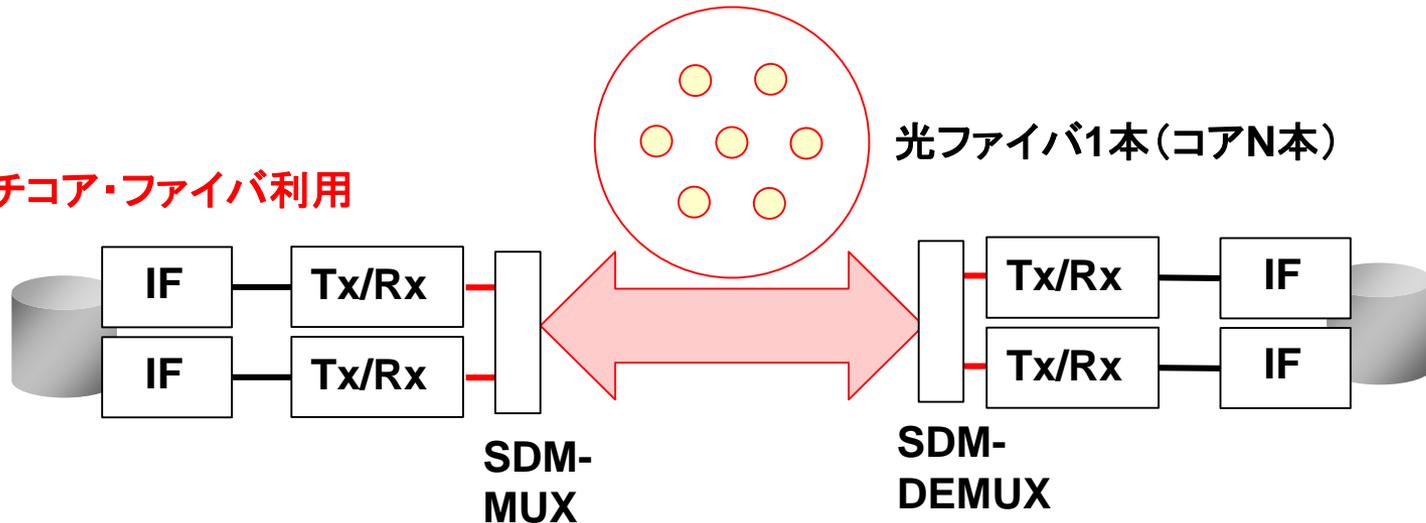
J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, OFC/NFOEC2011, PDPB6 (2011).

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)

とうとう到達した1Pbps超 伝送実験(1) (マルチコア・ファイバ)

H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshihara, and T. Morioka, ECOC2012, Th.3.C.1 (2012).

伝送容量: $5.71\text{Gbaud} \times 8\text{サブキャリア} \times 5\text{値多重}(32\text{QAM}) \times 2(\text{偏波多重})$
 $\times 222\lambda(\text{C+Lバンド}) \times 12\text{コア} \times 0.833(\text{FEC})$
 $= 1.01\text{Pbps}$

スペクトル利用効率: $5.71\text{Gbaud} \times 5\text{値多重}(32\text{QAM}) \times 2(\text{偏波多重}) \times 12\text{コア}$
 $\div 6.25\text{GHz/sub-ch} \times 0.833 = 91.3\text{bps/Hz}$

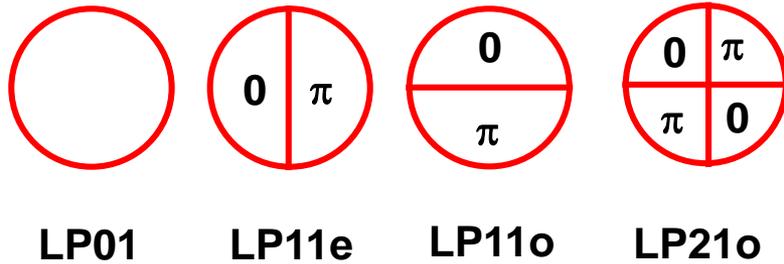
とうとう到達した1Pbps超 伝送実験(2) (マルチコア・ファイバ)

H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshihara, and T. Morioka, ECOC2012, Th.3.C.1 (2012).

高次モードの生成・多重・分離方式

生成

① 位相板

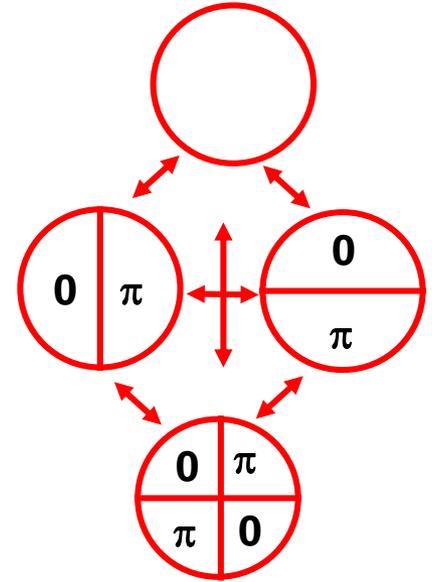


② 長周期ファイバ・グレーティング

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

空間多重伝送は欧米を中心に展開 (マルチモード・ファイバ)

R. Ryf, S. Randel, N.K. Fontaine, M. Montoliu, E. Burrows, S. Corteselli, S. Chandrasekhar, A.H. Gnauck, C. Xie, R.-J. Essiambre, P.J. Winzer, R. Delbue, P. Pupalais, A. Sureka, Y. Sun, L. Grüner-Nielsen, R.V. Jensen, And R. Lingle, Jr., OFC2013, PDP5A.1 (2013).

伝送容量: $20\text{Gbaud} \times 4\text{値多重}(16\text{QAM}) \times 32\lambda \times 12\text{モード}(\text{モード} + \text{偏波}) \times 0.8(\text{FEC})$
 $= 24.6\text{Tbps}$

スペクトル利用効率: $20\text{Gbaud} \times 4\text{値多重}(16\text{QAM}) \times 12\text{モード} \div 25\text{GHz} \times 0.8$
(FEC) = **30.7bps/Hz**

2015年度
光通信システム

シングルモードーマルチモードの Fan-in/Fan-out (FIFO)+EDFA

M. Salsi, R. Ryf, G. Le Cocq, L. Bigot, D. Peyrot, G. Charlet, S. Bigo, N.K. Fontaine, M.A. Mestre, S. Randel, X. Palou, C. Bolle, B. Guan, and Y. Quiquempois, ECOC2012, Th.3.A.6 (2012).