

2013年度『光通信システム』開講

資料中、著作権にかかわる資料は意図的に
削除しておりますことをご承知置きください。

参考文献は明記しておりますのでご参照ください。

第1回

各種光通信システム(1)

2013年10月8日(火)

- ・『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0章 光通信概観(第1回)

第1章 各種 光通信システム(第1・2回)

第2章 光変復調技術(第3・4回)

第3章 光ファイバのモード特性(第5・6回)

第4章 光ファイバ伝送特性(第7・8回)

第5章 ビット誤り率(第9・10回)

第6章 光増幅技術(第11回)

第7章 WDM伝送技術(第12・13回)

第8章 光スイッチング技術(第14回)

第9章 最新光通信技術(第15回)(復習も兼ねて)

第0章(光通信概観)

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

$$v_p = \frac{c}{n_{eff}} \quad \begin{array}{l} v_g : \text{位相速度} \\ n_{eff} : \text{等価屈折率} \end{array}$$

SiO_2 の場合、 $n_{eff} = 1.48$ として

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

電磁波の同軸ケーブル中の伝搬速度

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_s \mu_s}} \quad \begin{array}{l} v_p : \text{位相速度} \\ c : \text{真空中の光速} \\ \epsilon_s : \text{比誘電率} \\ \mu_s : \text{比透磁率} \end{array}$$

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

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

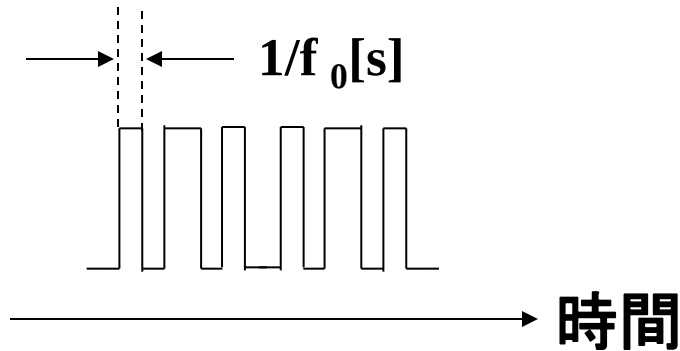
光の伝送速度 $\doteq$ 電磁波の伝搬速度



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 $f_0[\text{Gbps}]$ のNRZ信号を考える。

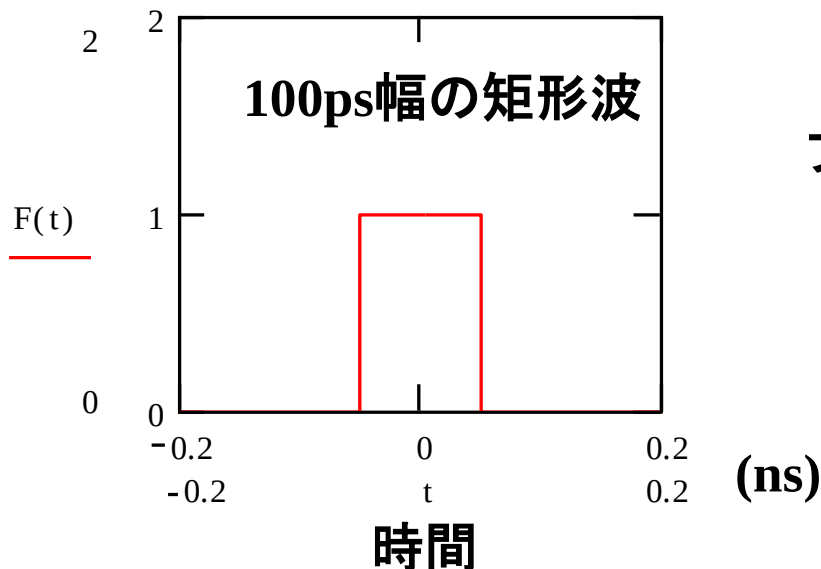
⇒ 簡単化のため1タイムスロットの信号について考える。

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

$$f_0 = 10$$

フーリエ変換により周波数成分を解析

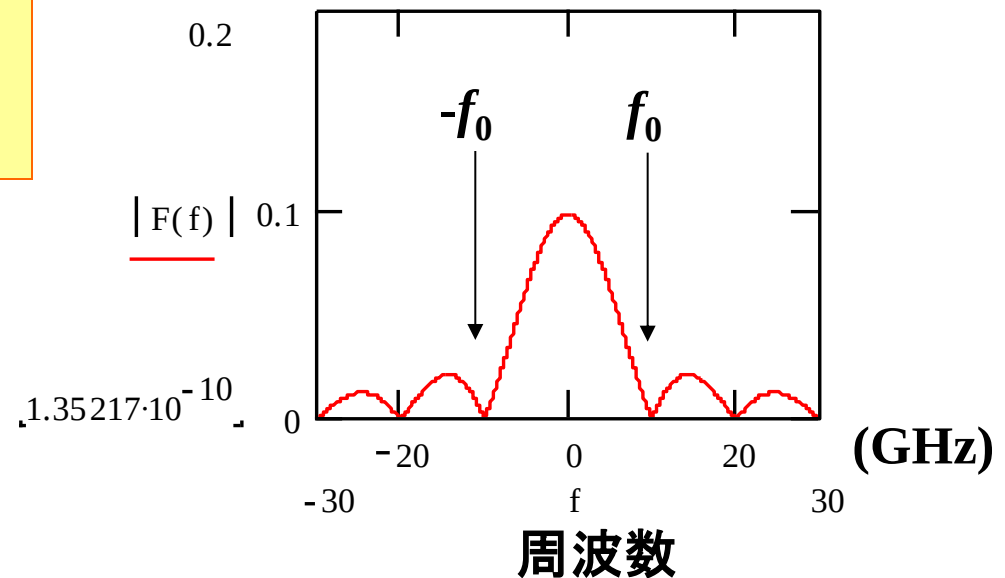
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$



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

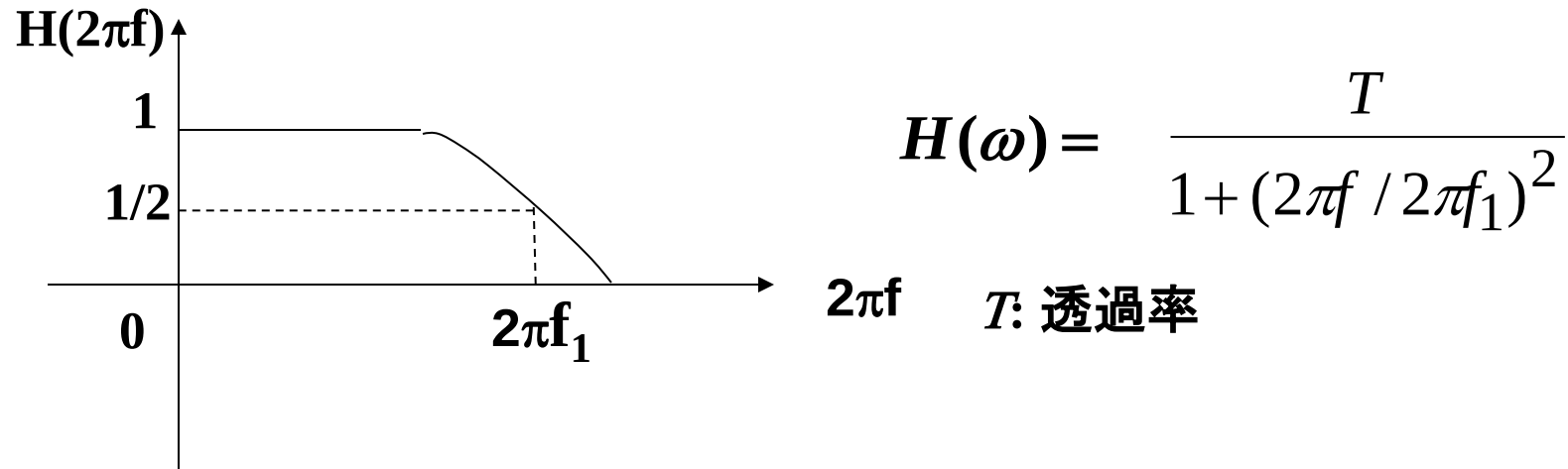
$$= \frac{A_0}{f_0} \frac{\sin(\pi \frac{f}{f_0})}{\pi \frac{f}{f_0}}$$

矩形波のフーリエ・スペクトル

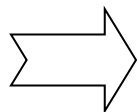


伝送路の周波数特性を重畳

(1) 周波数特性(f特)の悪い伝送路: メタル線に相当



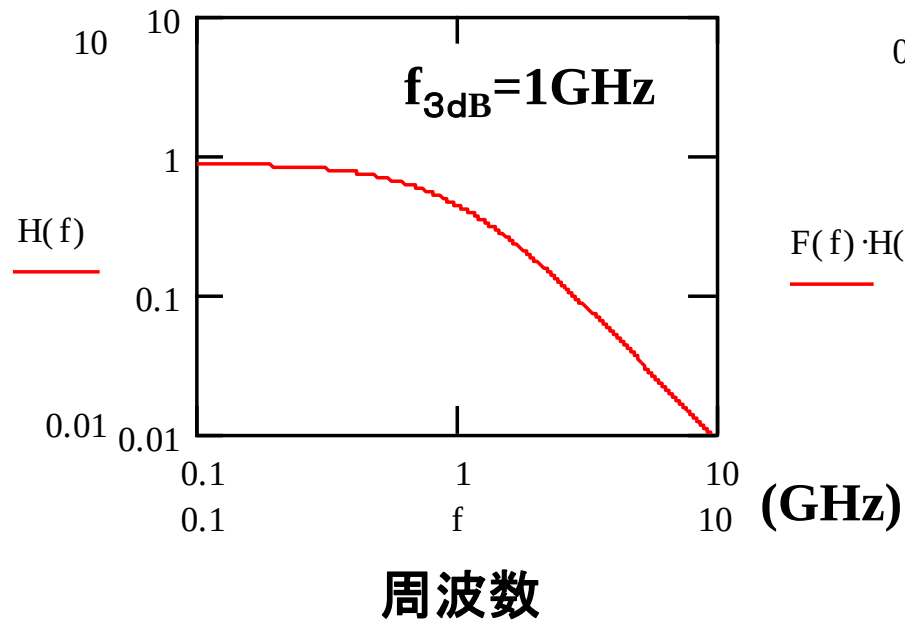
伝送後の波形を計算する。



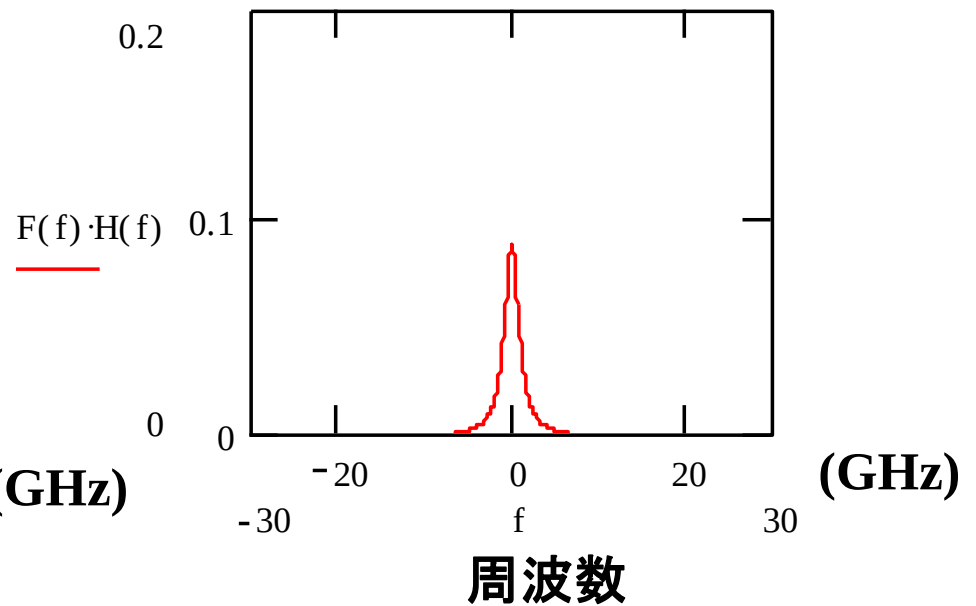
逆フーリエ変換

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) H(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

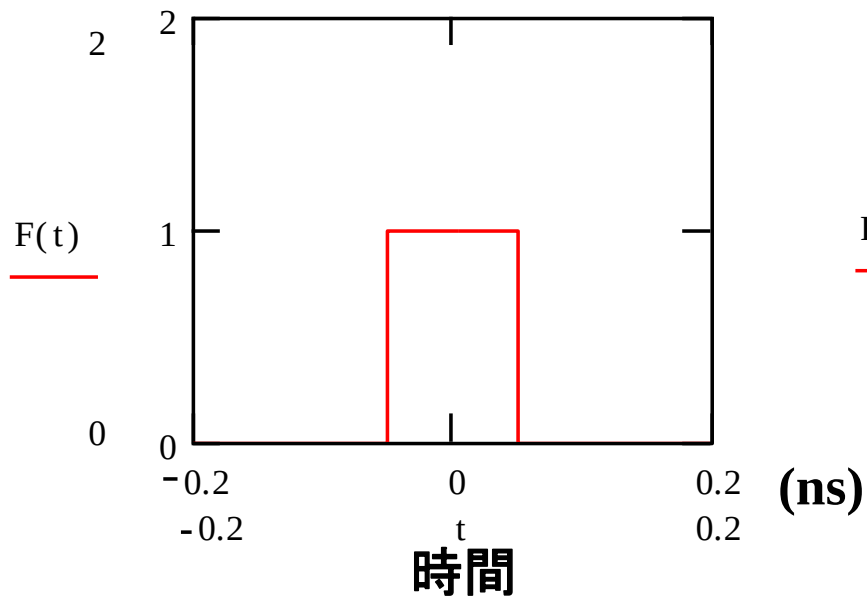
伝送路の損失特性
(f 特)



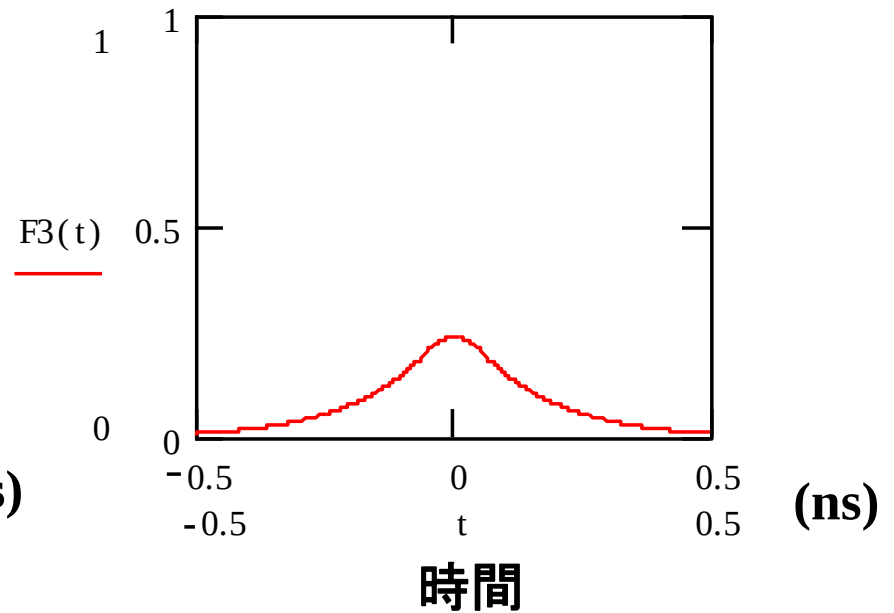
伝送後の f 特



元の矩形波



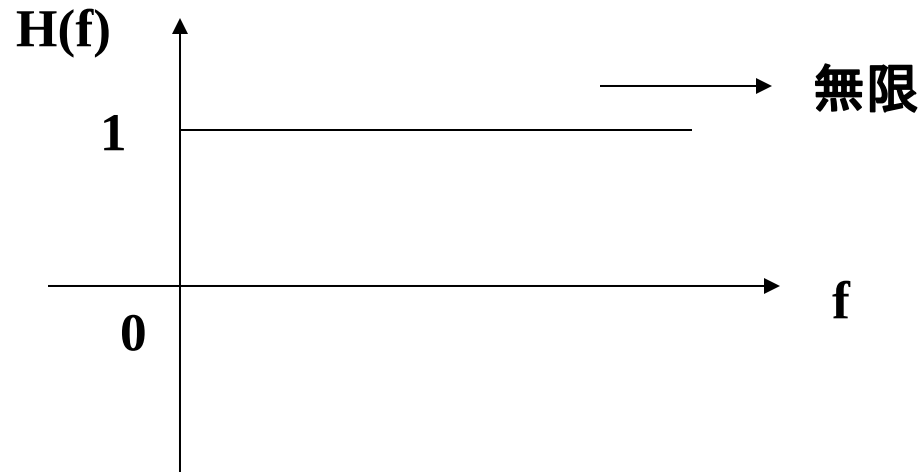
伝送後の波形

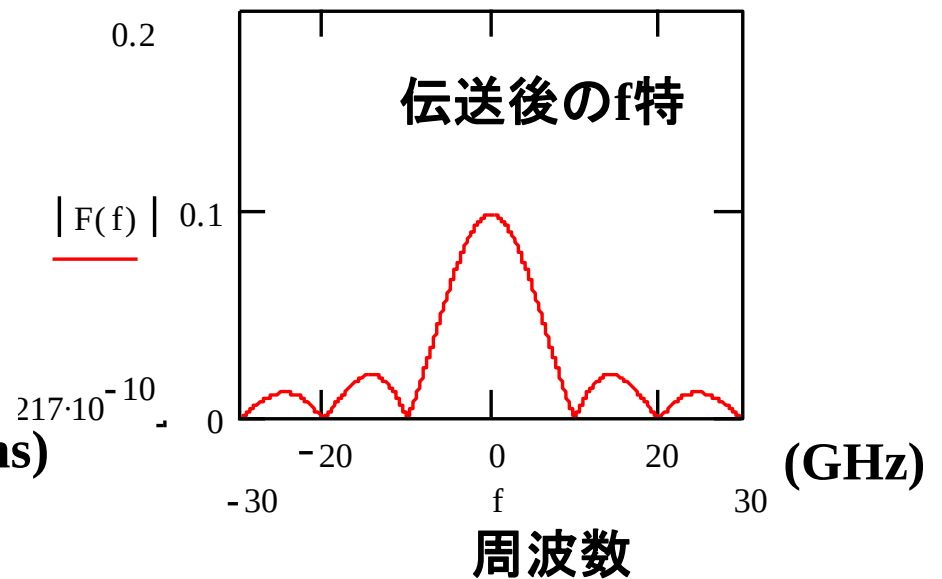
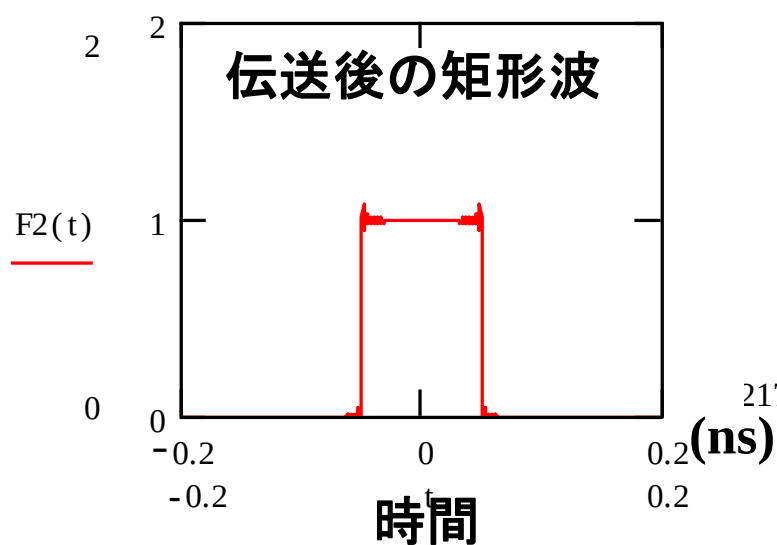
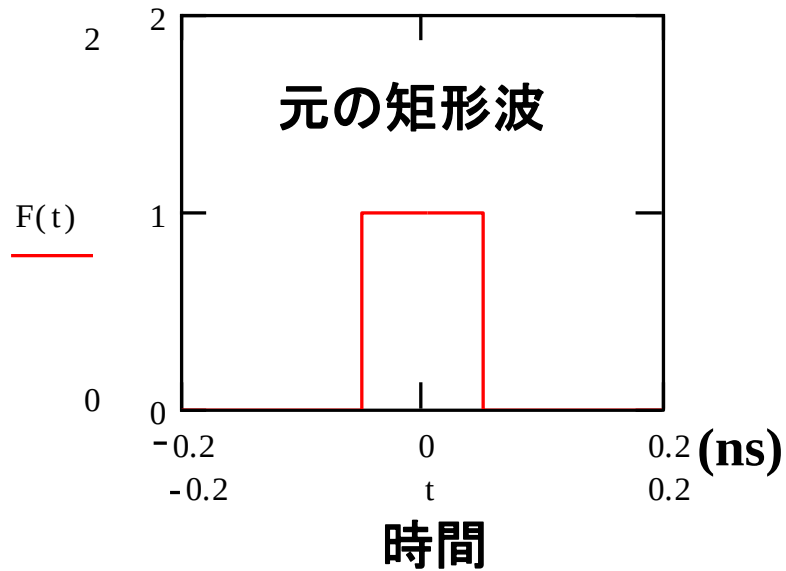


強度の低下とパルス幅の増大

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

第1章

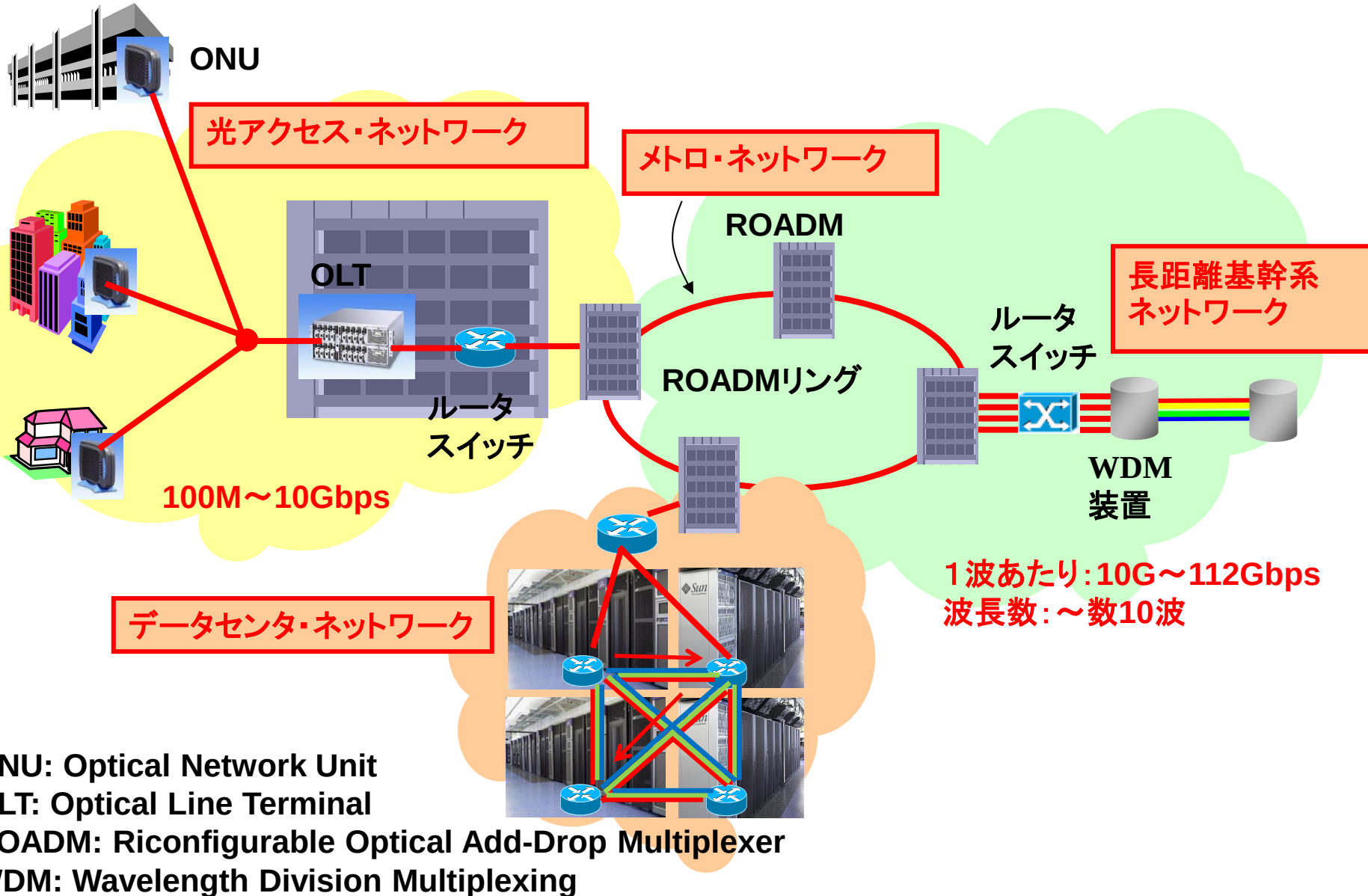
各種 光通信システム

※ 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

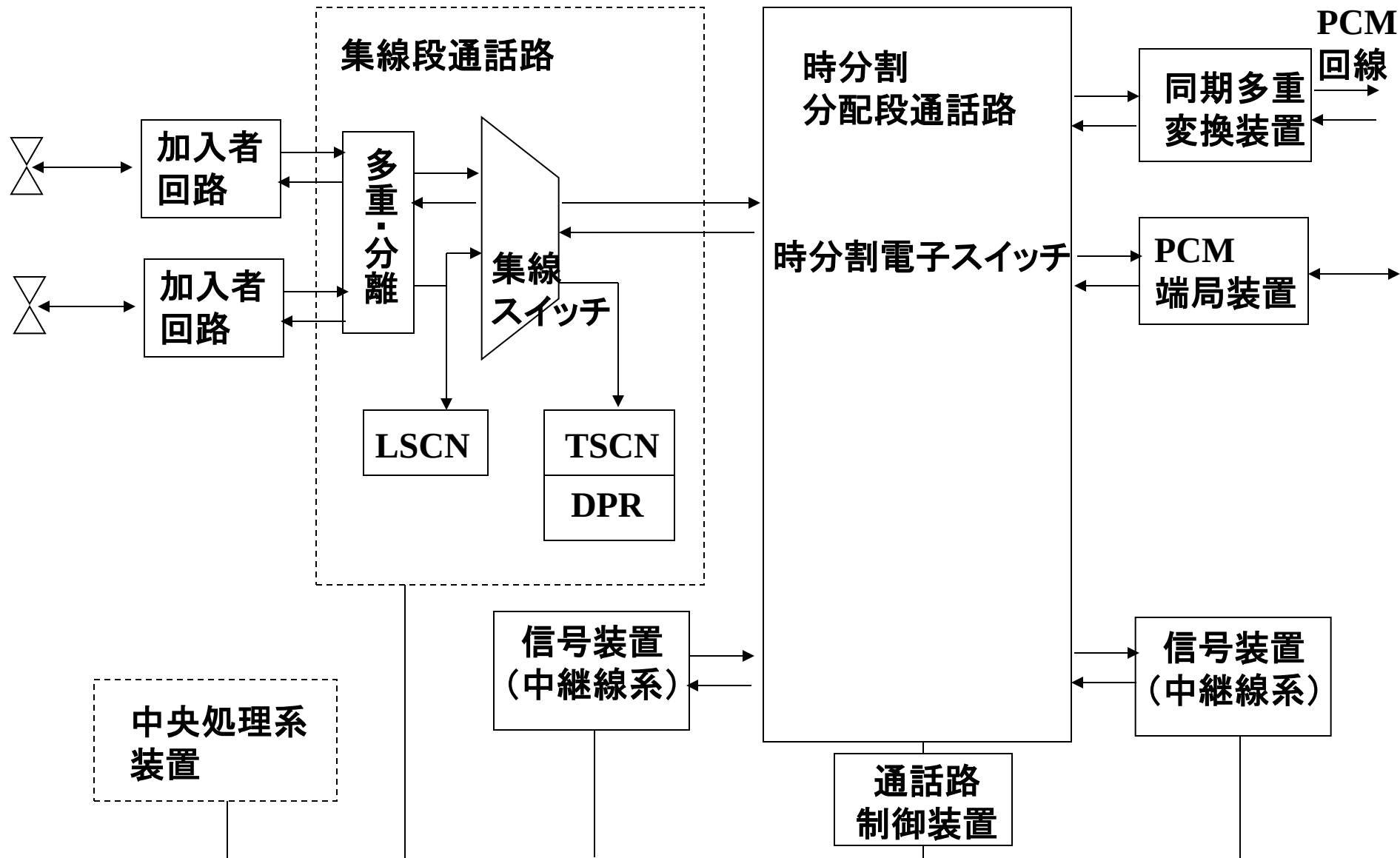


ビットレート：10Gbps → 40/100Gbps → 400/1000Gbps
(国際標準化検討開始)

長距離通信事始め ー電話網の信号の流れー

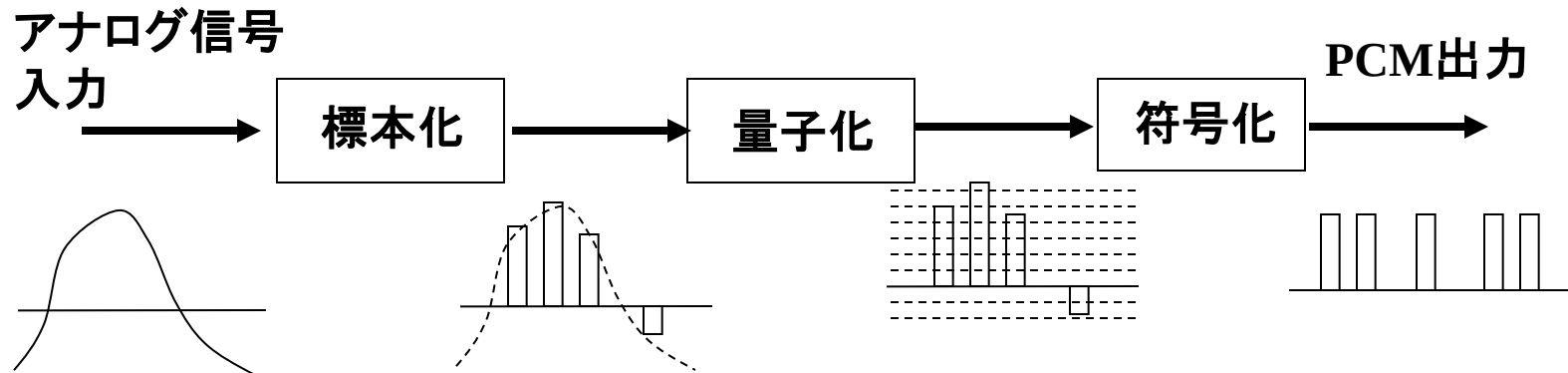


デジタル交換機の基本構成



デジタル信号のビットレートの開始点 ー音声信号のデジタル化ー

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

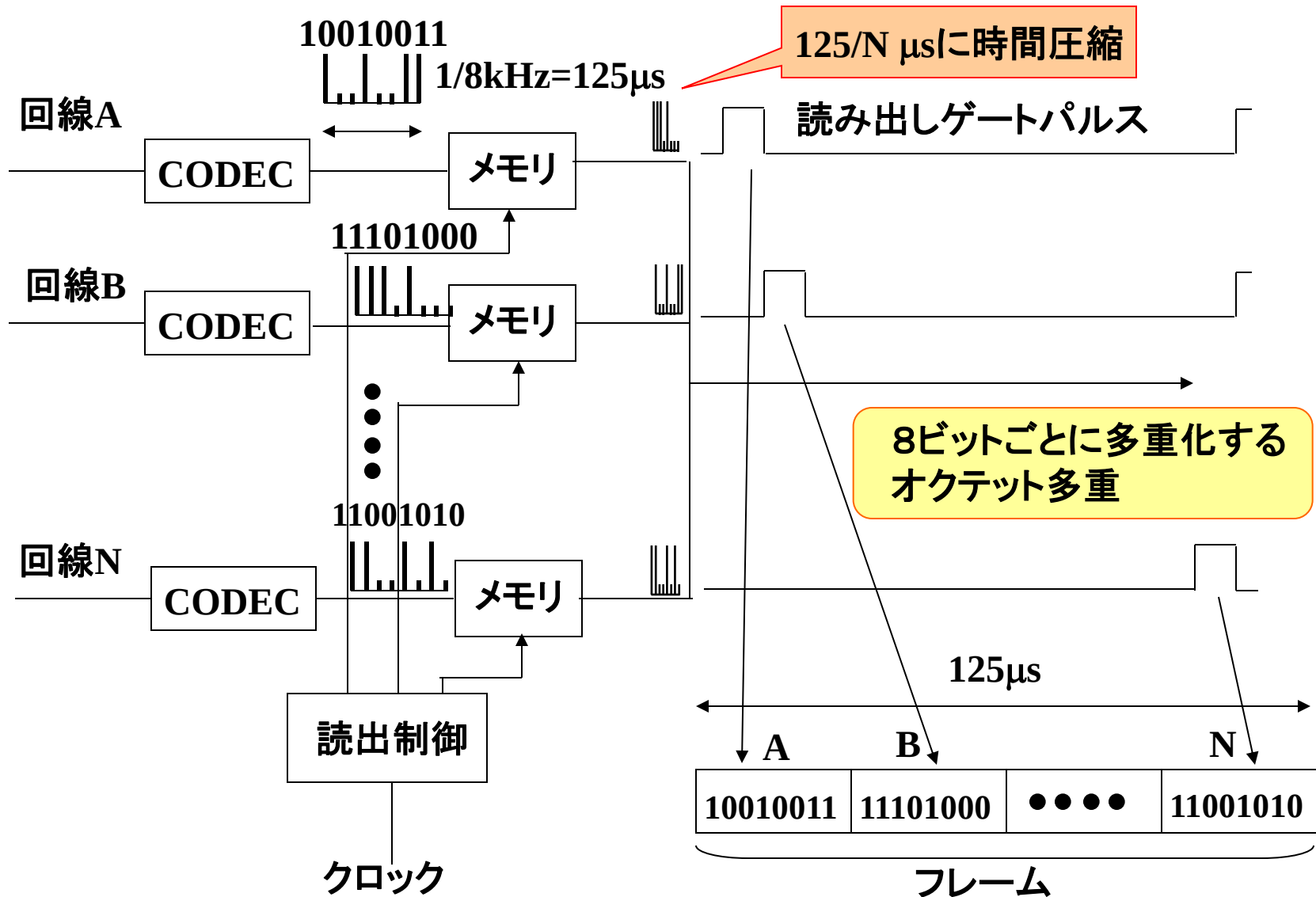
② 量子化(Quantization)

- ・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)

信号の多重化

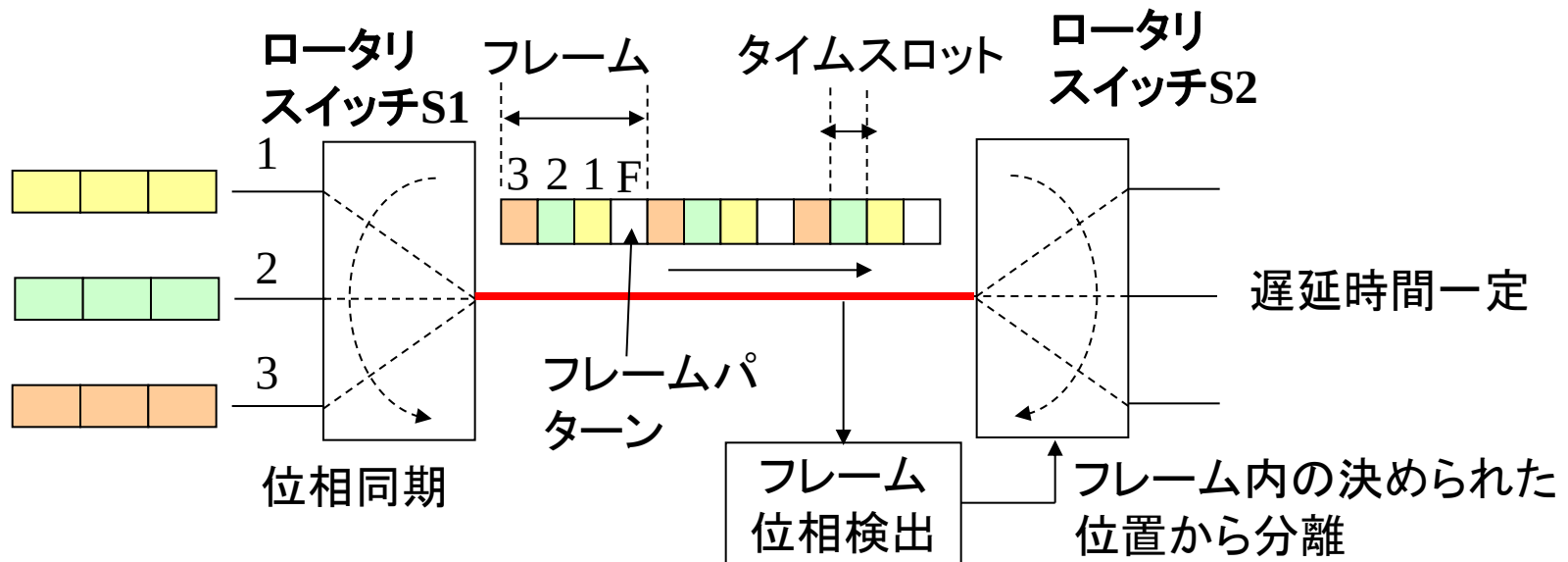


同期化とフレーム同期

- 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）。

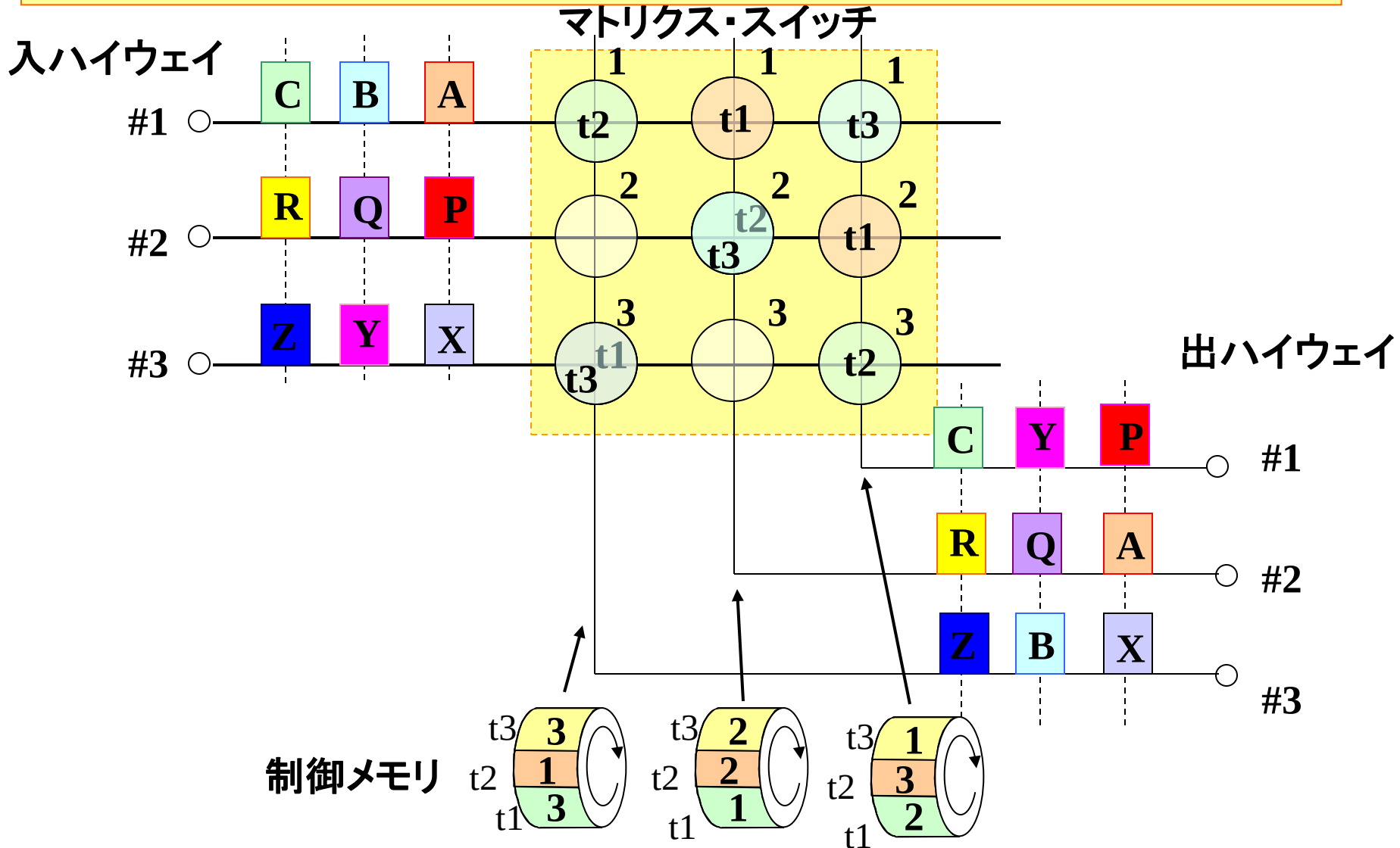
入力パルス速度 × ポート数 = ロータリスイッチS1の回転速度

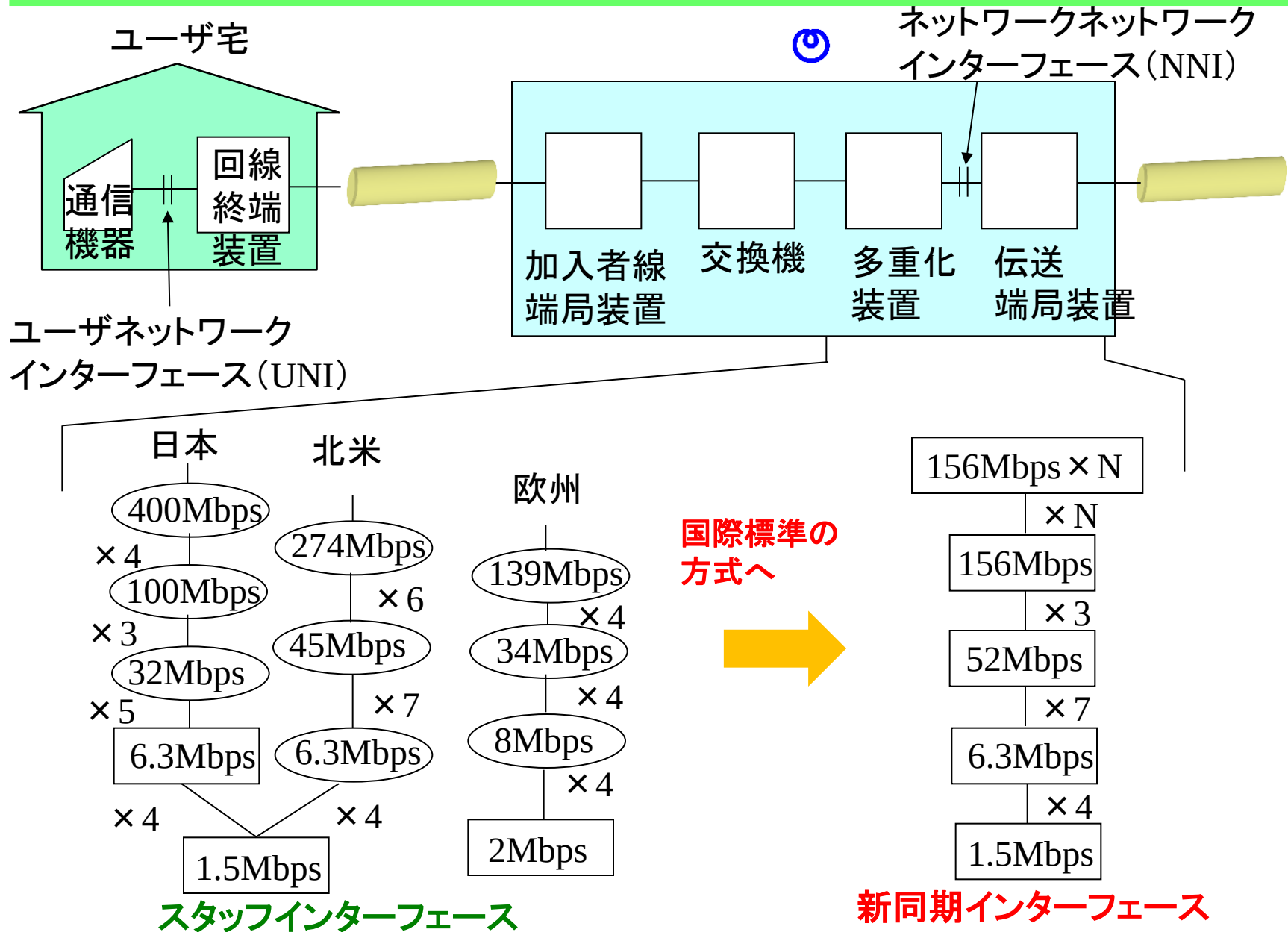
- ② 受信側のロータリスイッチS2がS1と同一速度・位相で回転するように、回転速度・位相情報を送信側から受信側に転送（フレーム同期）。



空間スイッチング

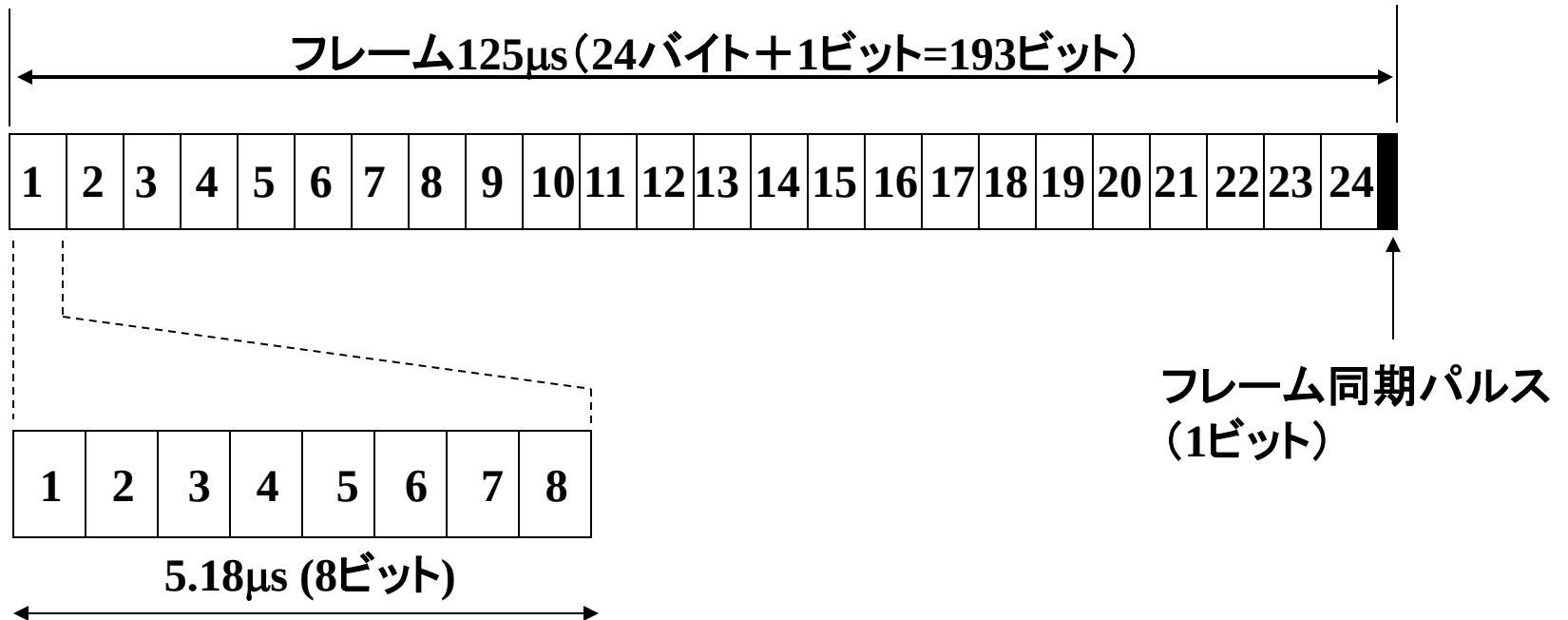
スイッチ拡張時のメモリサイズ・速度の限界により**空間スイッチ(Sスイッチ)**を組み合わせて拡張





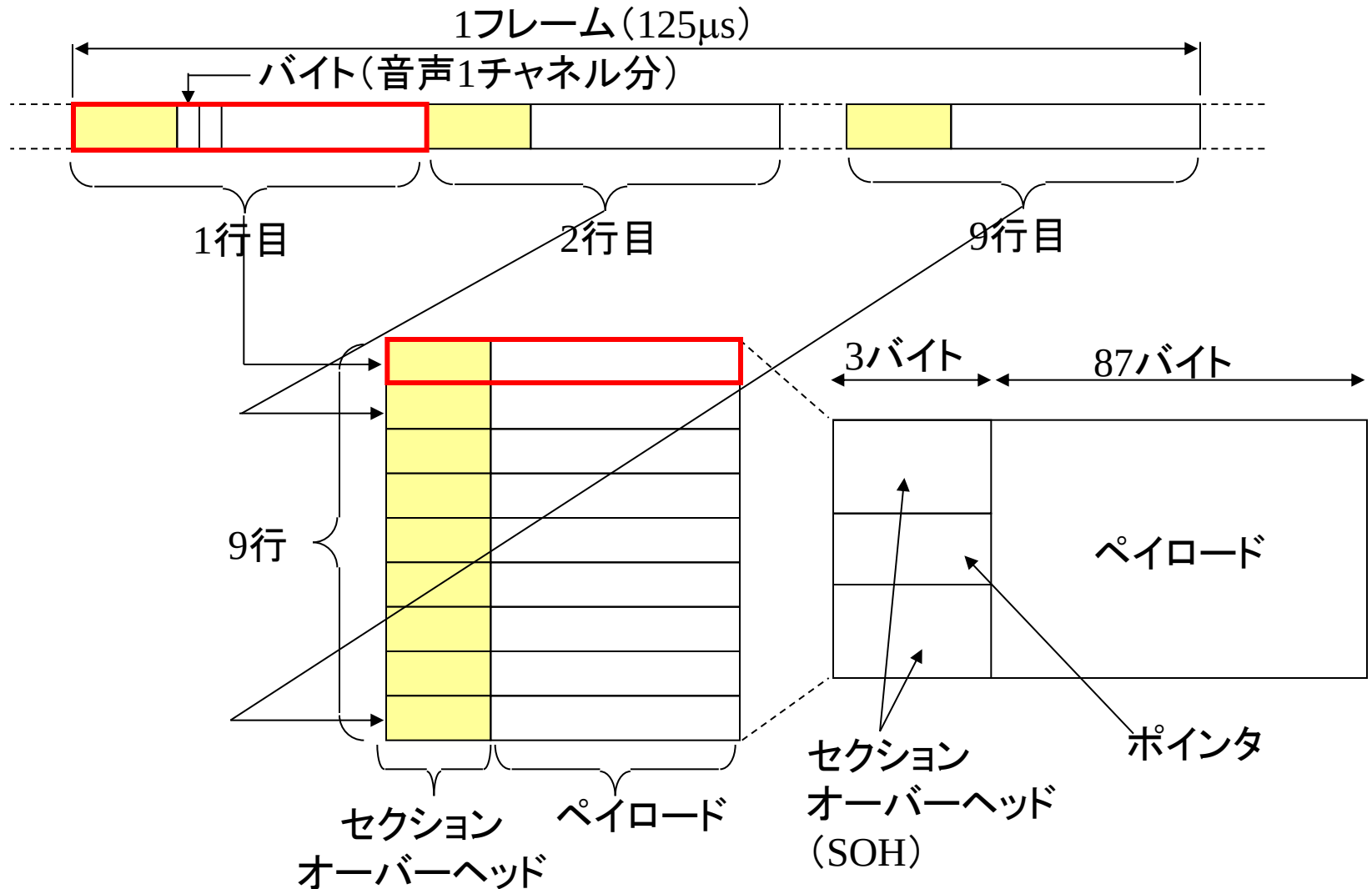
信号のフレーム構成

1.544Mbpsの信号フレーム構成



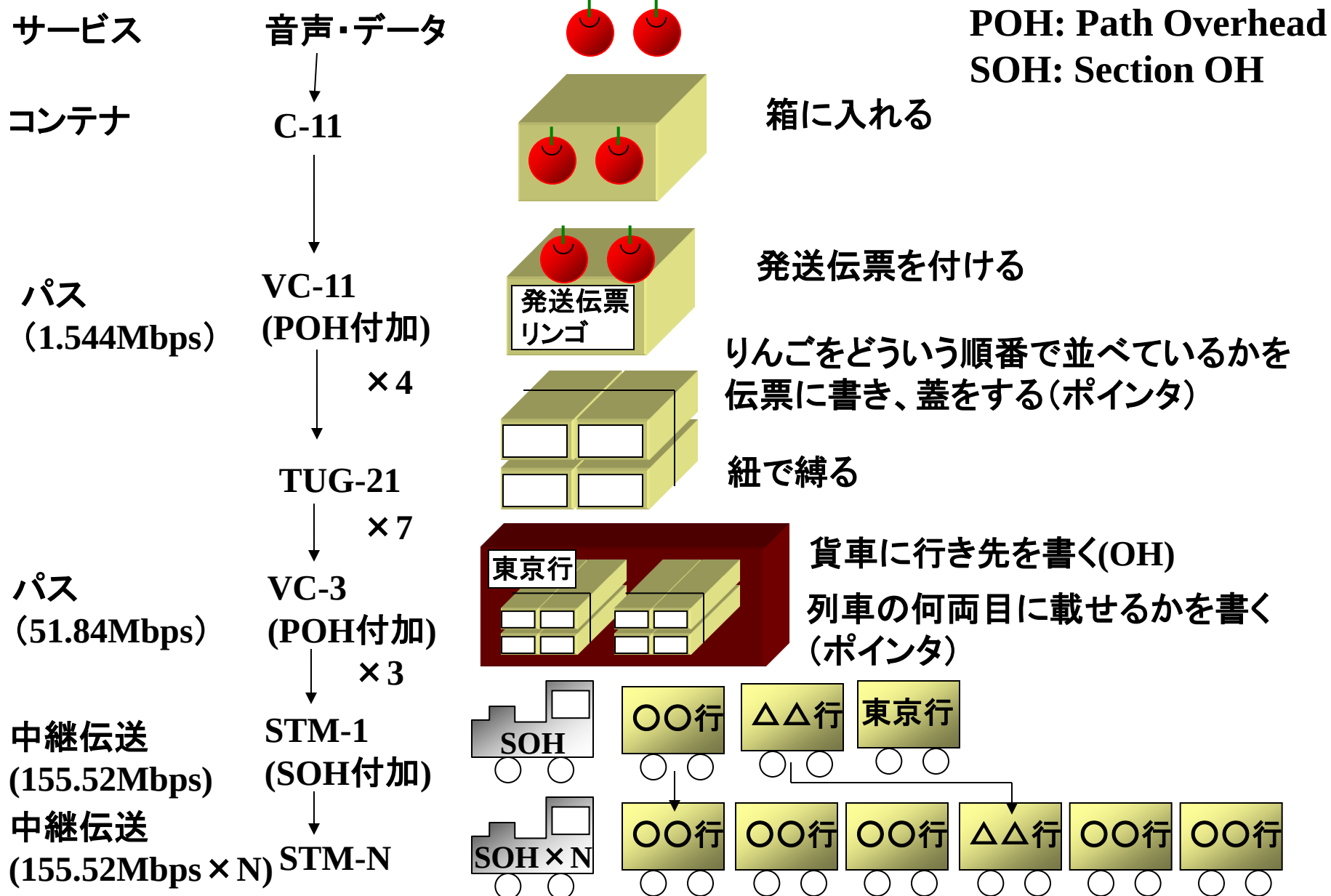
SDHインターフェースの表現方法 (STM-0)

STM-0(51.84Mbps)インターフェースのフレーム構成



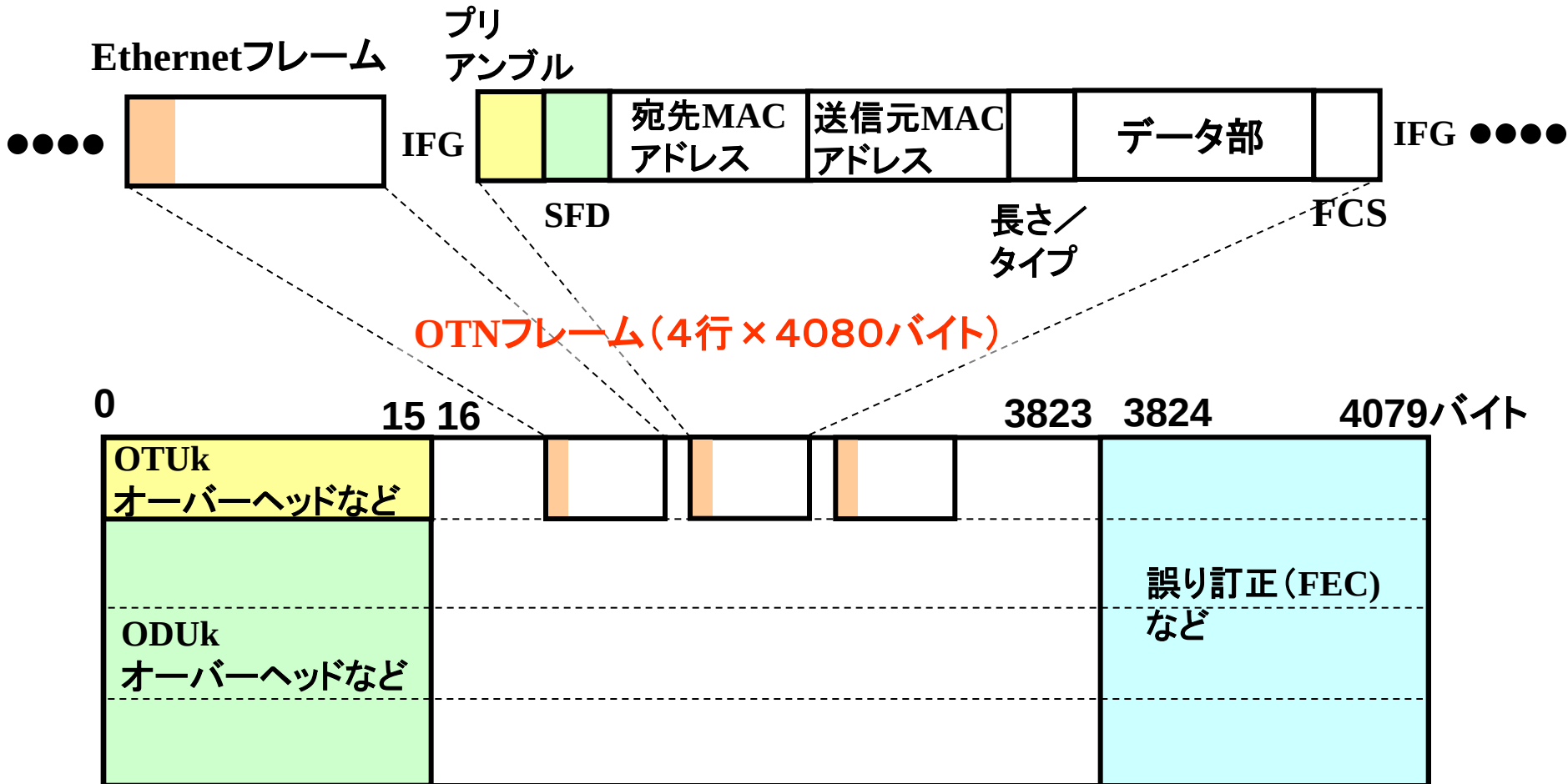
$$90\text{バイト} \times 8\text{ビット} \times 9\text{行} / 125\mu\text{s} = 51.84\text{Mbps}$$

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包み込んで運ぶ「デジタル・ラッピング」



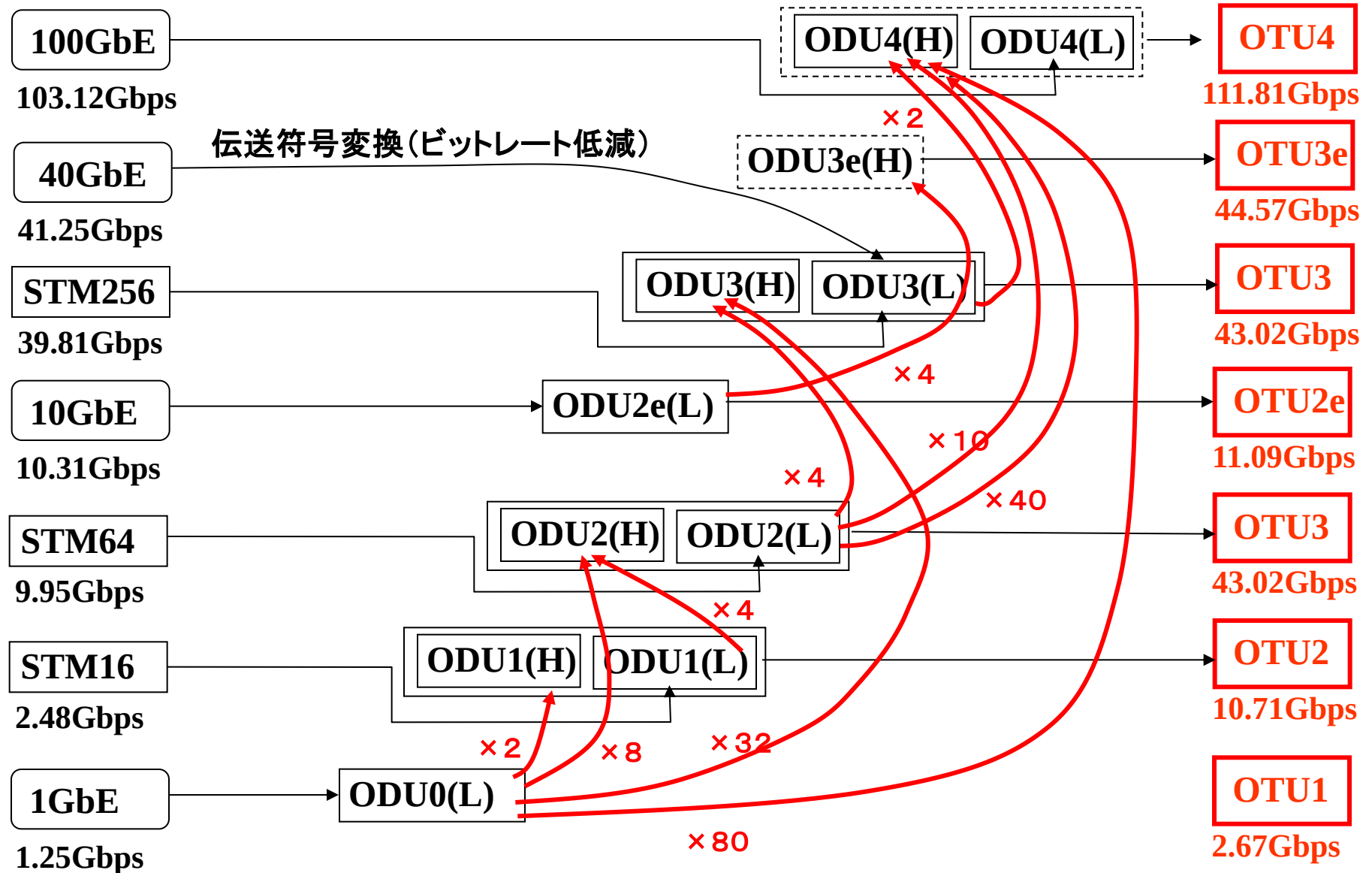
管理用オーバーヘッド

OTUk: Optical Channel Transport unit-k

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

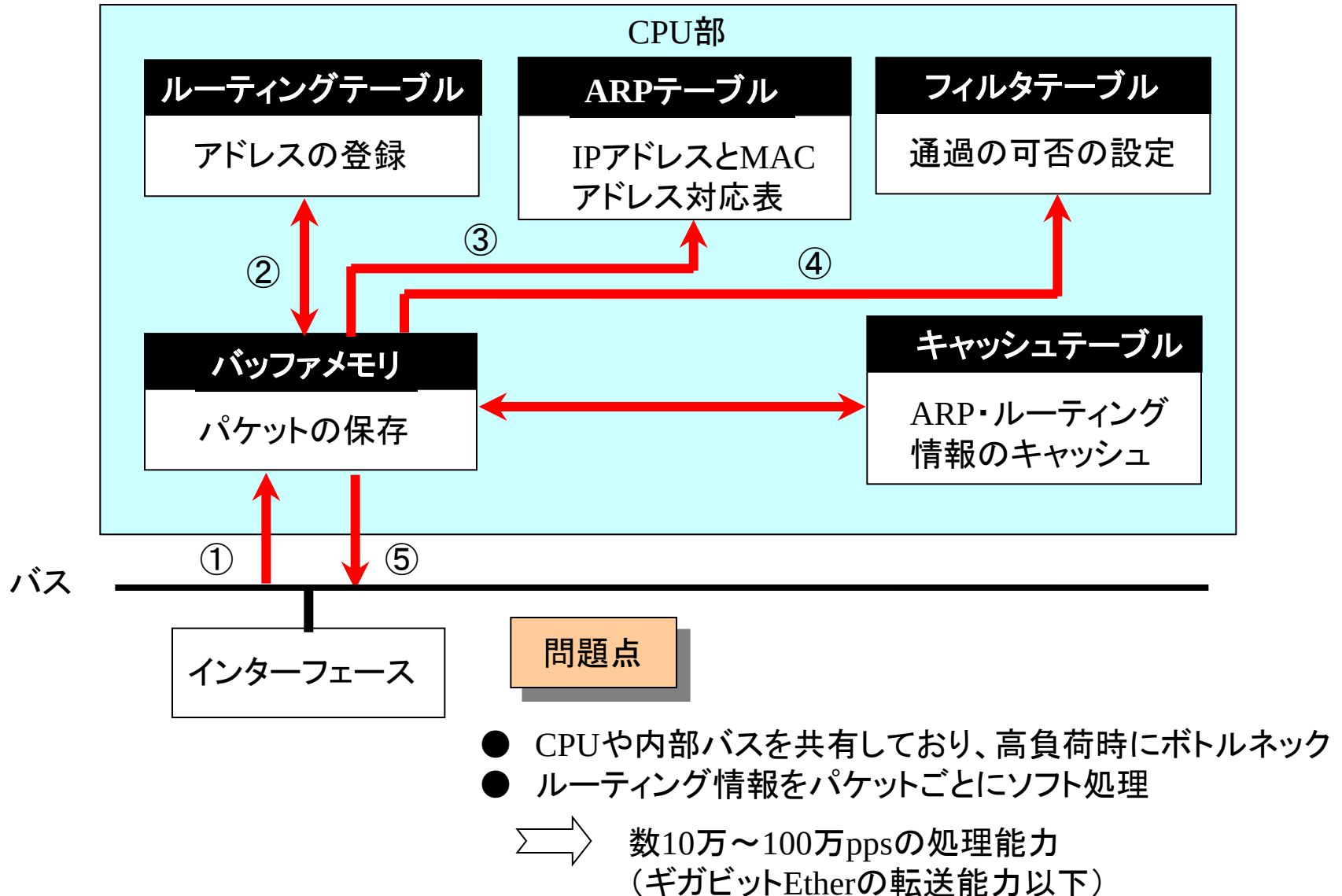
k: ビットレート階梯(k=1: 2.67Gbps, 2: 10.71Gbps, 3: 43.02Gbps, 4: 111.81Gbps)

OTNの階梯構造と多重化の関係

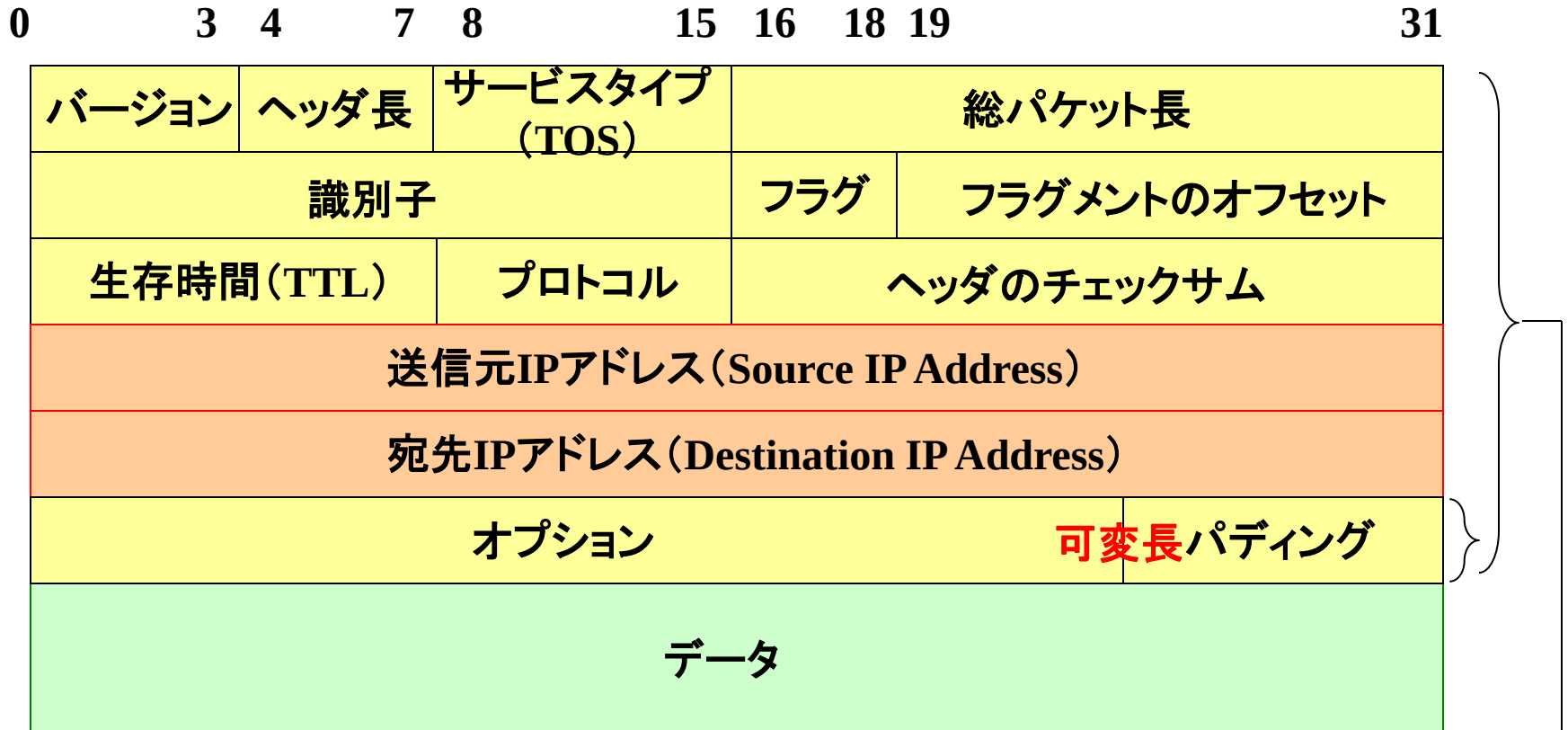


インターネットの packet 交換の担い手 — ルータの構成 —

ルータの構造

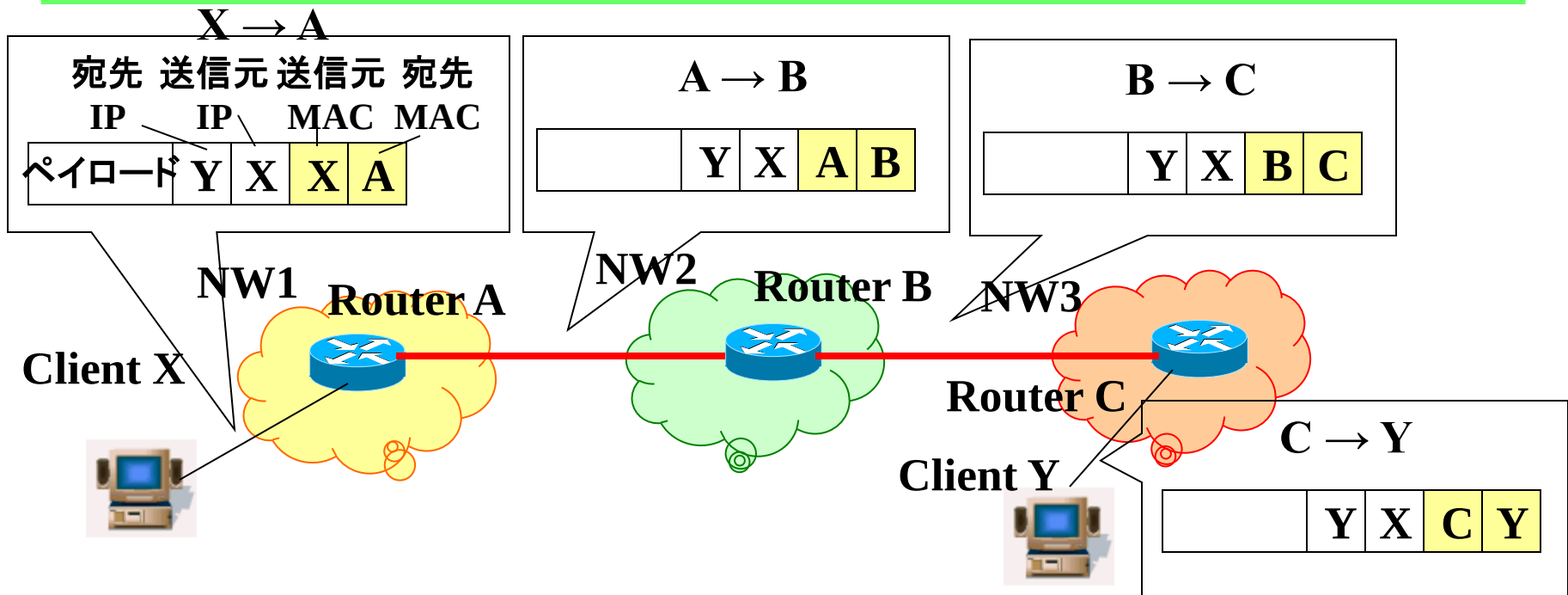


インターネットのパケット構成 (Ethernetフレーム) ーIPv4ヘッダの構成ー



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

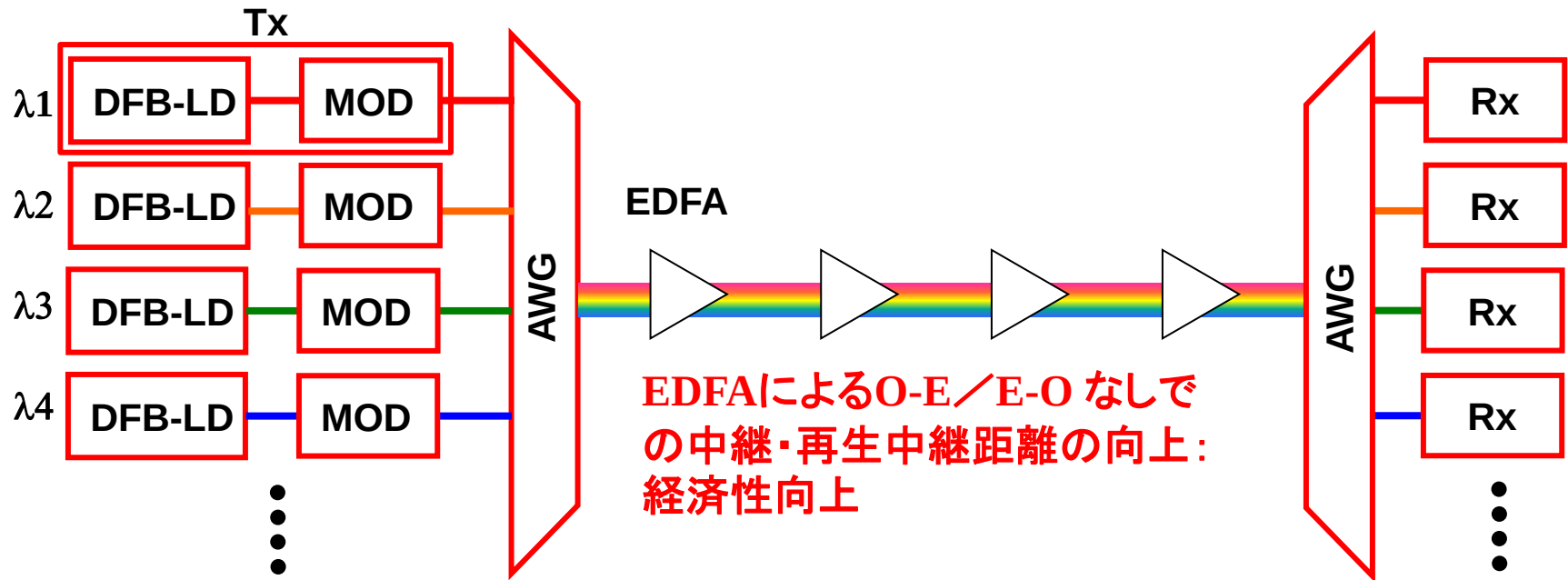
Router Bの
ルーティングテーブル

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

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

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

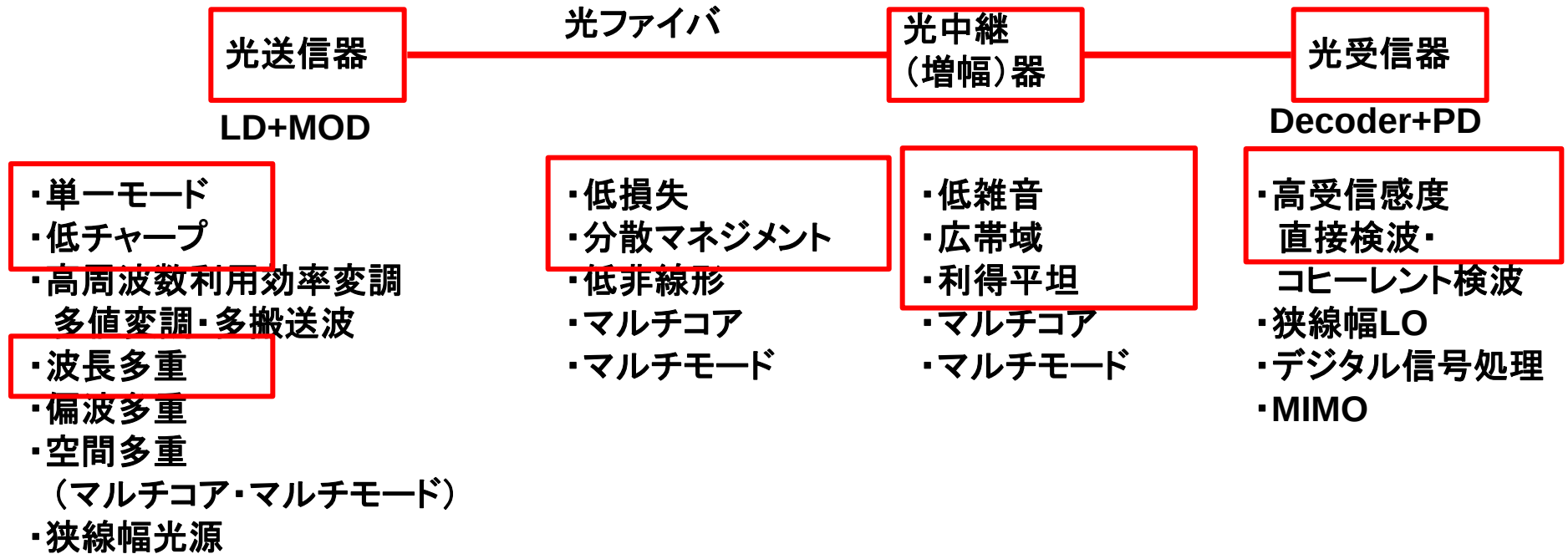
Rx: 光受信器

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

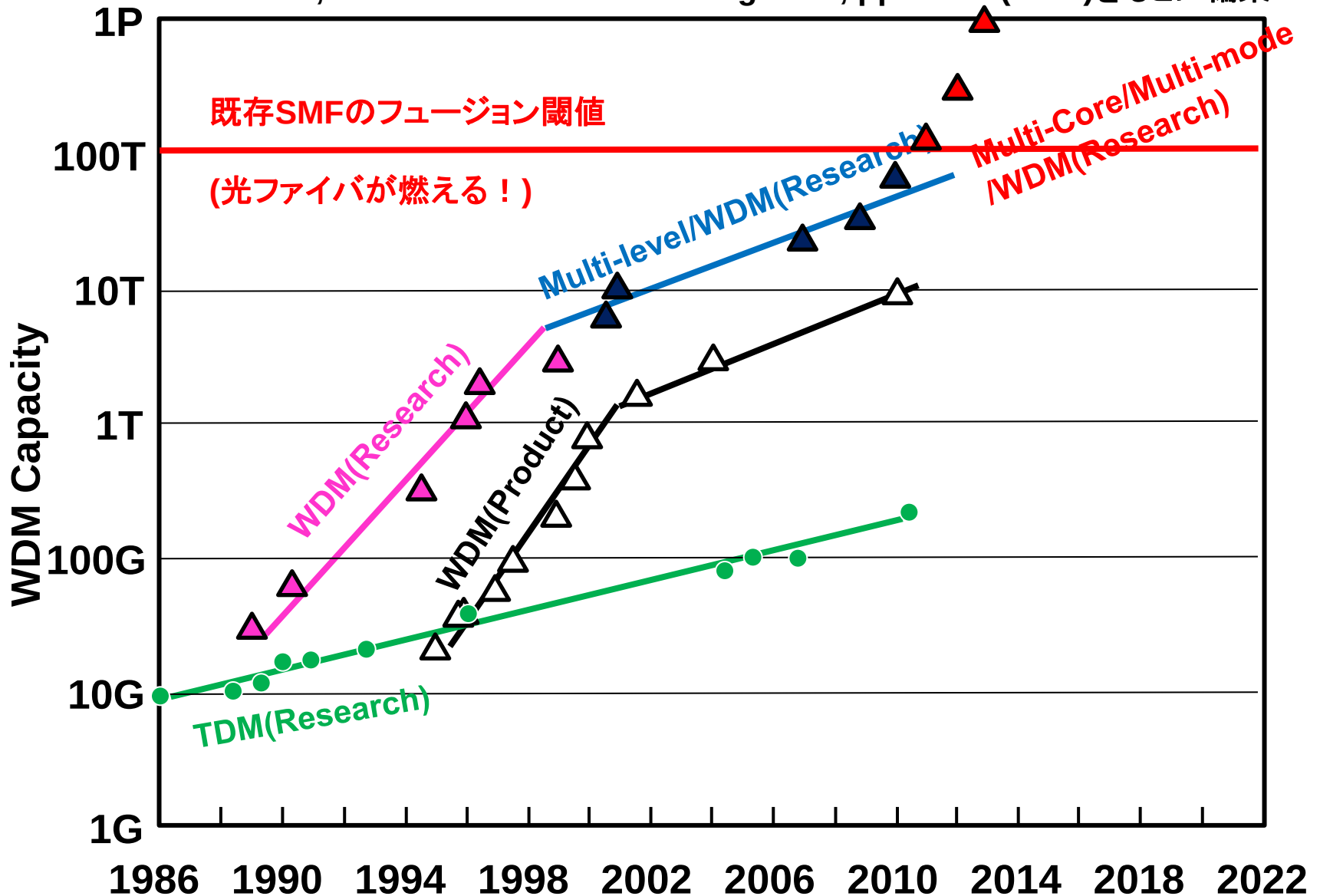
ありとあらゆる手段を用いて大容量化の実現を狙う光通信技術



内は(長距離大容量向けの)従来の手法

光通信等の伝送帯域の進展と限界

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



The graph illustrates the exponential growth of optical communication capacity over time. The y-axis represents capacity in Gbit/s on a logarithmic scale, with major ticks at 100, 10, and 1. The x-axis represents the year from 1974 to 2010. A blue line indicates a constant growth rate of $\times 10$ every 4 years. Various technologies are plotted as curves, showing their contribution to the overall capacity growth. The graph is divided into eras: MEGA, GIGA, TERA, PETA, and EXA. A red arrow points to a projected capacity of 10^9 Gbit/s by 2010.

Year	Capacity (Gbit/s)	Technology
1974	~100	0.8 μ m MMF
1978	~10	1.3 μ m SMF
1982	~1	1.5 μ m DSF
1986	~0.1	coherent
1990	~0.01	EDFA
1994	~0.001	WDM
1998	~0.0001	DM, C+L
2002	~0.00001	FEC
2006	~0.000001	Raman
2010	~0.0000001	POL-MUX, QPSK, 8QAM

● 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 $\times M$

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)

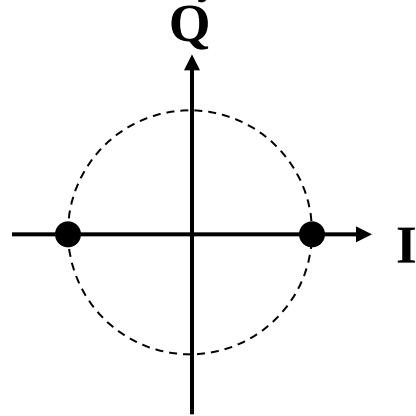
2bit/symbol
(56G symbol/s
=112Gbps)

4bit/symbol
(28G symbol/s
=112Gbps)

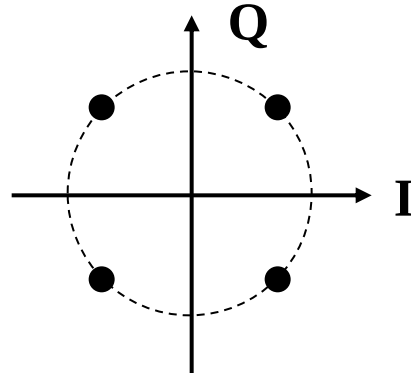
8bit/symbol
(14G symbol/s
=112Gbps)

ASK, (B, D)PSK

B: **B**inary, D: **D**ifferential, Q: **Q**uadrature



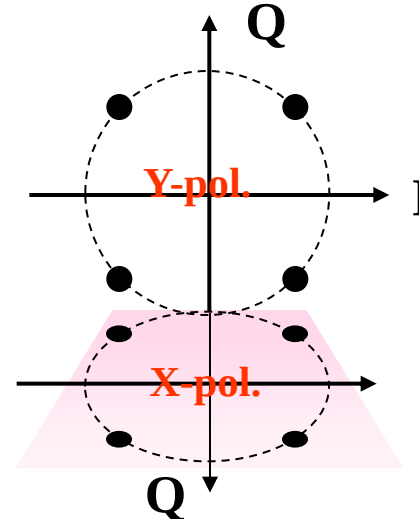
(D)QPSK



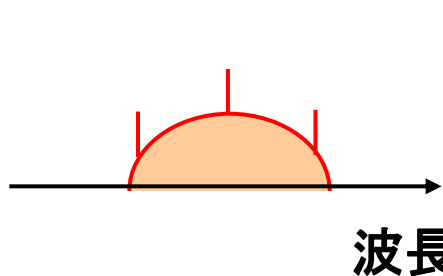
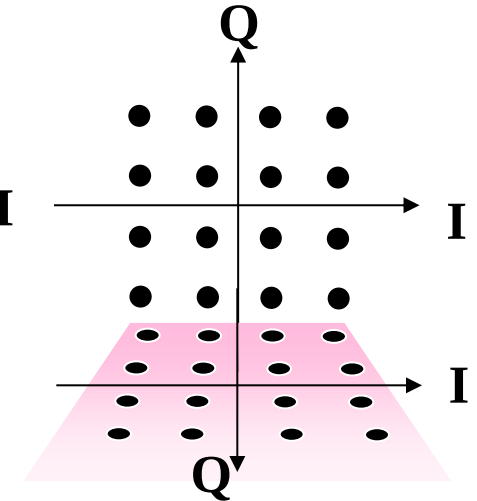
I: In-phase, Q: Quadrature-phase

DP-QPSK

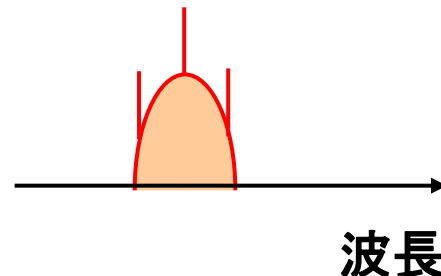
DP: Dual-Polarization



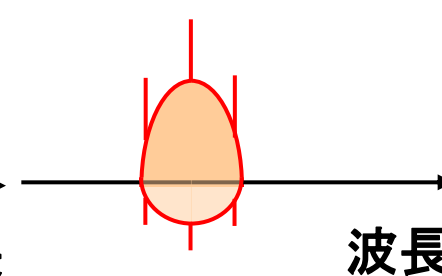
DP-16QAM



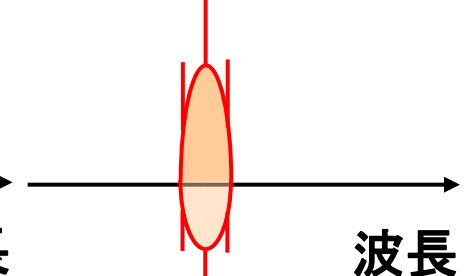
波長



波長



波長



波長

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 [Gbps]

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

