第2章（続き）

各種　光通信システム（2）

2011年10月31日（月）

長距離基幹系
（バックボーン,コア・ネットワーク）

2011年度
光通信システム

最近6年間の長距離伝送方式のトレンド

2004～2009年　OFC・ECOCでの変調方式のトレンド（主に>40Gbpsの長距離伝送・変調方式・PDセッションを中心に調査・デジタルコヒーレントかどうかは区別せず）

学会名	OOK	Duo-binary	(D)PSK	(D)QPSK	多値		OFDM
OFC2004	4	0	9	5	2	16QAM ASK×QPSK	0
ECOC2004	7	3	16	3	1	16-Ary	0
OFC2005	6	0	14	7	1	8DPSK	0
ECOC2005	10	1	8	6	0		0
OFC2006	3	0	6	8	1	9QAM 8PSK	0
ECOC2006	1	2	4	14	2	128QAM 16APSK	0
OFC2007	6	0	6	8	5	64QAM 16AQSK	1
ECOC2007	6	0	4	14	4	8DPSK 9QAM	10
OFC2008	1	0	4	16	5	8-sAPSK 32APSK	16
ECOC2008	1	0	3	15	12	128QAM (10bit/s/Hz) 8PSK	8
OFC2009	3	0	6	12	10	64/16QAM	21
ECOC2009	1	0	1	17	7	64/32/16QAM	9

QPSK>BPSKとなった

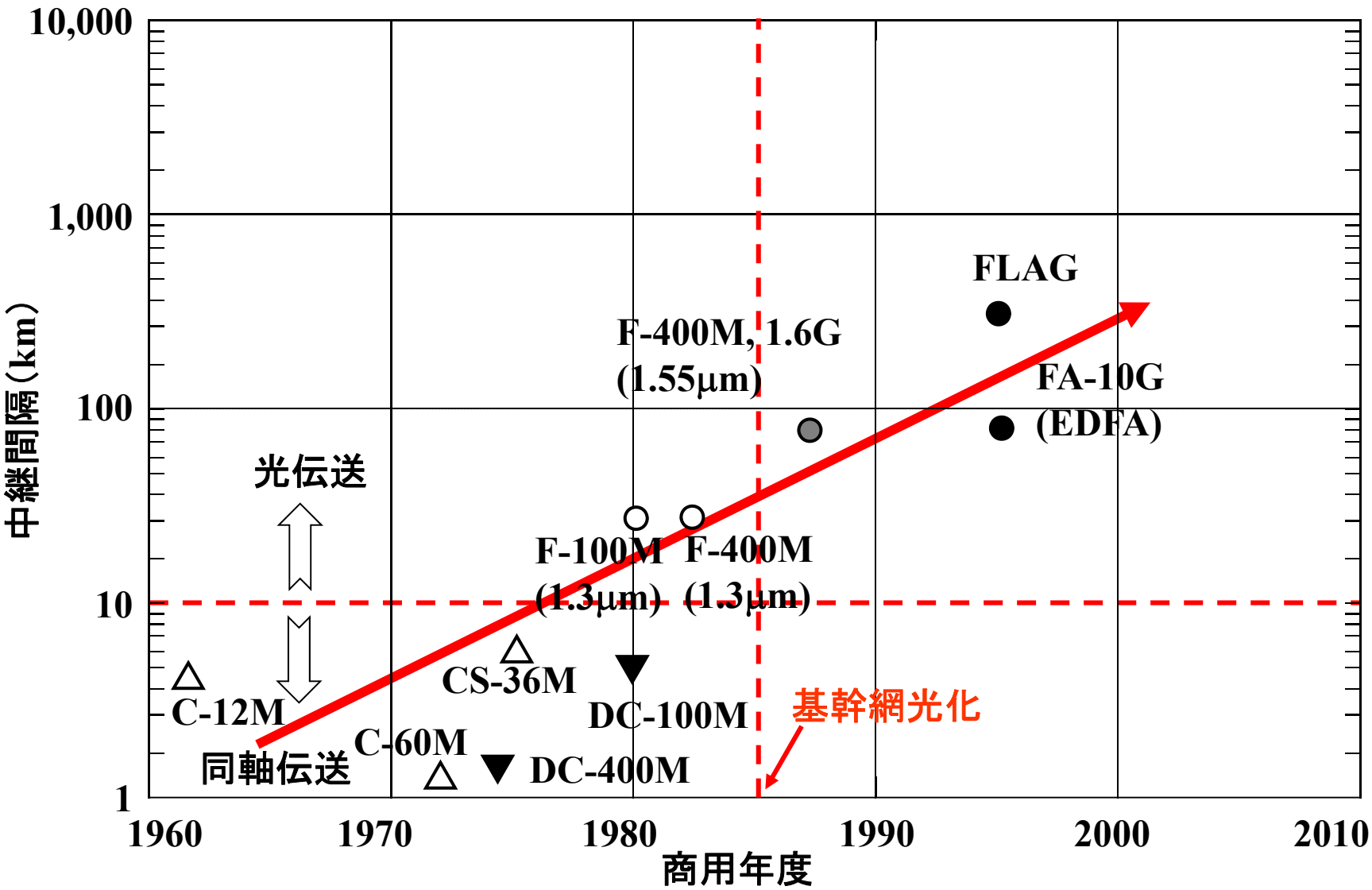
多値が増えた

OFDMの急増

光通信技術のパラダイムシフト
（無線通信との類似性）

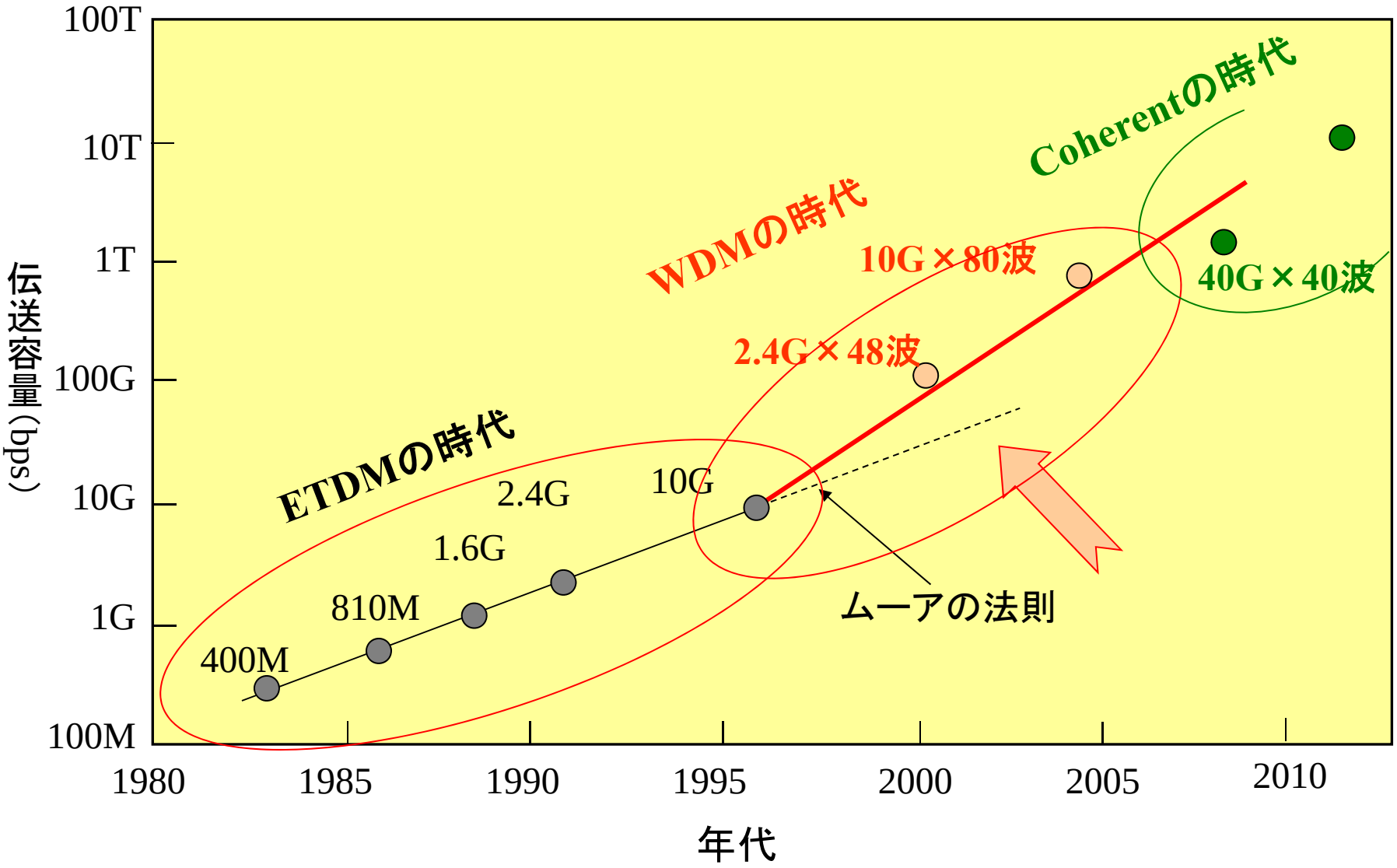
水落,2009年第1回PN新世代懇談会.

有線伝送方式の長距離化と伝送方式の変遷



陸上向け基幹系ネットワークの大容量化（商用）

日経コミュニケーション2009年9月15日号『光ネットワークの最新技術[12]』p.79



光通信等の伝送帯域の進展（研究＋商用）

P. Winzer, IEEE Communications Magazine, pp.26-30 (2010)

商用システムは研究開発から３～５年後に登場

日本周辺の国際海底ケーブル

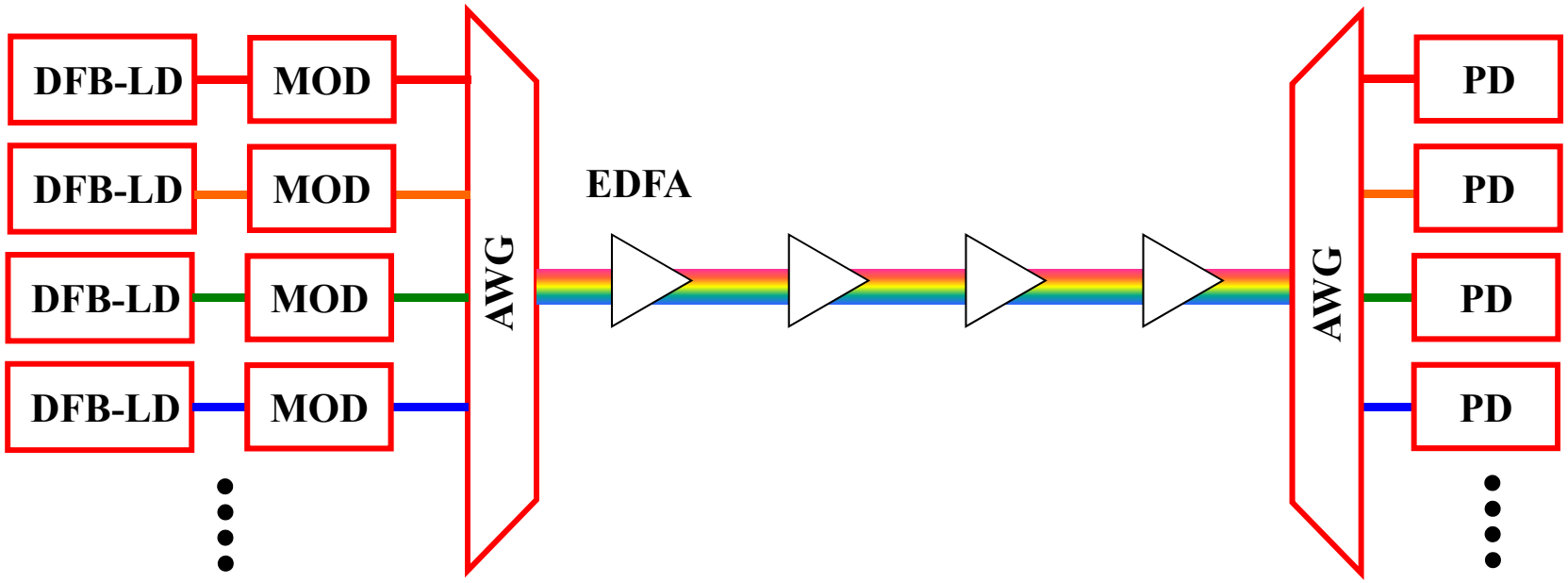
総務省『平成13年度情報通信白書pp.18』より

日本国内の基幹網

総務省『平成13年度情報通信白書pp.17』より

波長多重伝送の構成

Point-to-Point



重要なポイント

- １波の高速化：コスト高のO-E／E-Oでのトラフィック収容効率向上
- EDFAによるO-E／E-O なしでの中継・再生中継距離の向上：経済性向上

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）**

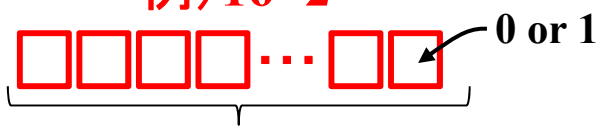
１秒間に送受信するデータ量

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
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）$16=2^4$

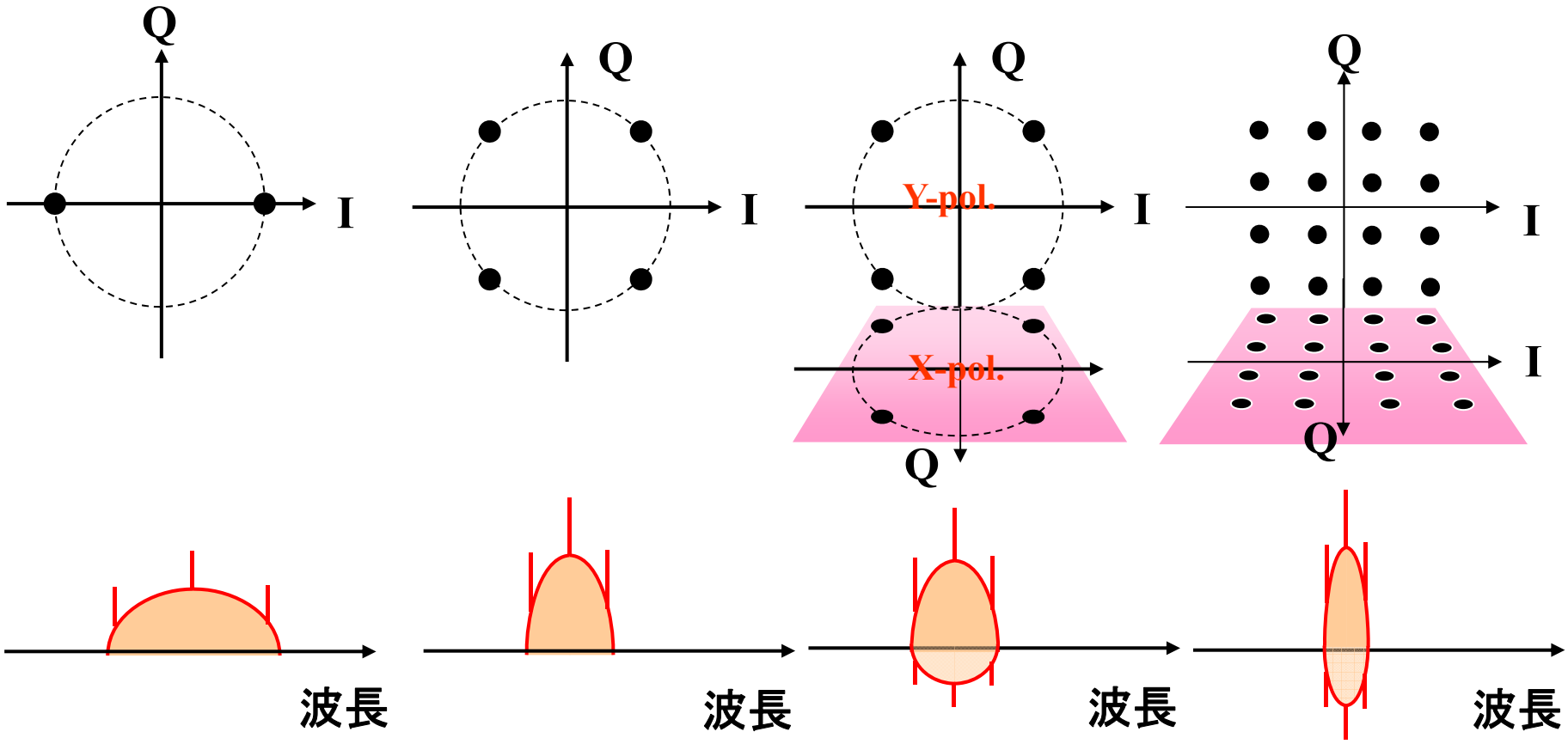


変調信号（多値信号）の信号点配置

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, (D)PSK	(D)QPSK	DP- QPSK	DP-16QAM

DP: Dual-Polarization



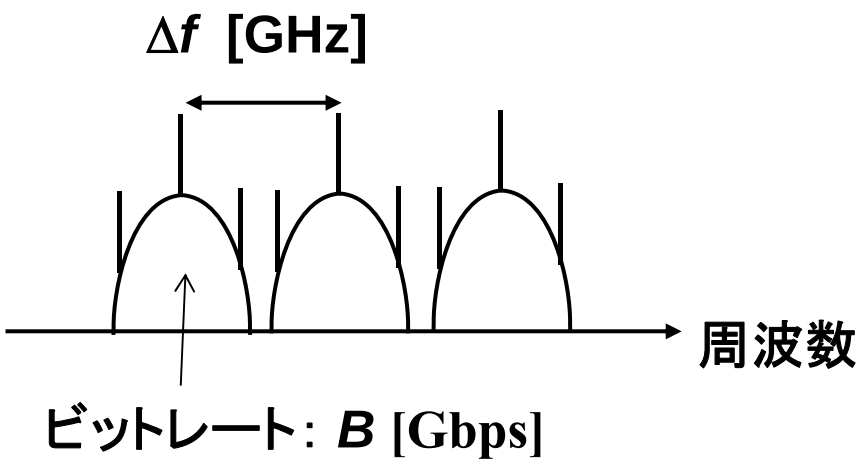
周波数利用効率と変調方式

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 [Gbps]

$$SE = \frac{B}{\Delta f}$$

SEが大きい＝ 一定の周波数で遅れる情報量が多い



10.92Tb/s WDM伝送実験

K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara and T. Ono (NEC), OFC2001, PD24-1, 2001.

伝送容量：40Gbps×273λ=10.92Tbps
スペクトル利用効率：40Gbps÷50GHz=0.8bps/Hz

伝送測定系

光スペクトルとBER特性

K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara and T. Ono (NEC), OFC2001, PD24-1, 2001.

光スペクトル

BER

25.6Tbps伝送実験（1）

A.H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P.J. Winzer, C.R. Doerr, J.C. Centanni, E.C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma, OFC2007, PDP19.

伝送容量：

$$42.7\text{Gbps} \times \frac{40.0}{42.7} \times 4\text{値多重（DQPSK）} \times 2\text{（偏波多重）} \times 80\lambda \times 2\text{（C+Lバンド）} = 25.6\text{Tbps}$$

スペクトル利用効率：

$$40\text{Gbps} \div 50\text{GHz/ch} \times 2\text{（DQPSK）} \times 2\text{（偏波多重）} = 3.2\text{bps/Hz}$$

伝送測定系

25.6Tbps伝送実験（2）

光スペクトル

アイパターン

2011年度
光通信システム

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： 1Mbps（1subcarrier）×7値多重（128QAM）×2（偏波多重）×5500（チャネル数）×4（コピー）× $\frac{64}{67}$ ×370λ（C+Lバンド）×0.93（FEC）＝294Gbps× 370λ ＝101.7Tbps

スペクトル利用効率： 294Gbps÷25GHz/ch×0.93＝10.9bps/Hz

伝送測定系

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).

光スペクトル・BER・コンスタレーション

2011年度
光通信システム

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：43Gbps×2値多重（QPSK）×2（偏波多重）×97λ（C+Lバンド）×7コア×0.93（FEC）
＝172Gbps× 97λ×7コア ×0.93＝108.6Tbps

スペクトル利用効率：172Gbps÷100GHz/ch×7コア×0.93＝11.2bps/Hz

伝送測定系

2011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).

7コアファイバ断面（トレンチアシスト・ファイバ）・コア間クロストーク測定結果

光スペクトル・BER

今後必要となりそうな光ファイバ関連技術（大いに私見を交えて）

- マルチコア・ファイバのクロストーク向上（大容量・長距離用途）

  ➡ データ・センタ内の大容量・省スペースへの展開があるか？
  （クロストークへの仕様は緩和できる）

- マルチコア・ファイバとSMFとの接続技術

  ➡ 現在、以下の試みがなされている。
  - Fiber-based Tapered Multicore Coupler
  - レンズ光学系

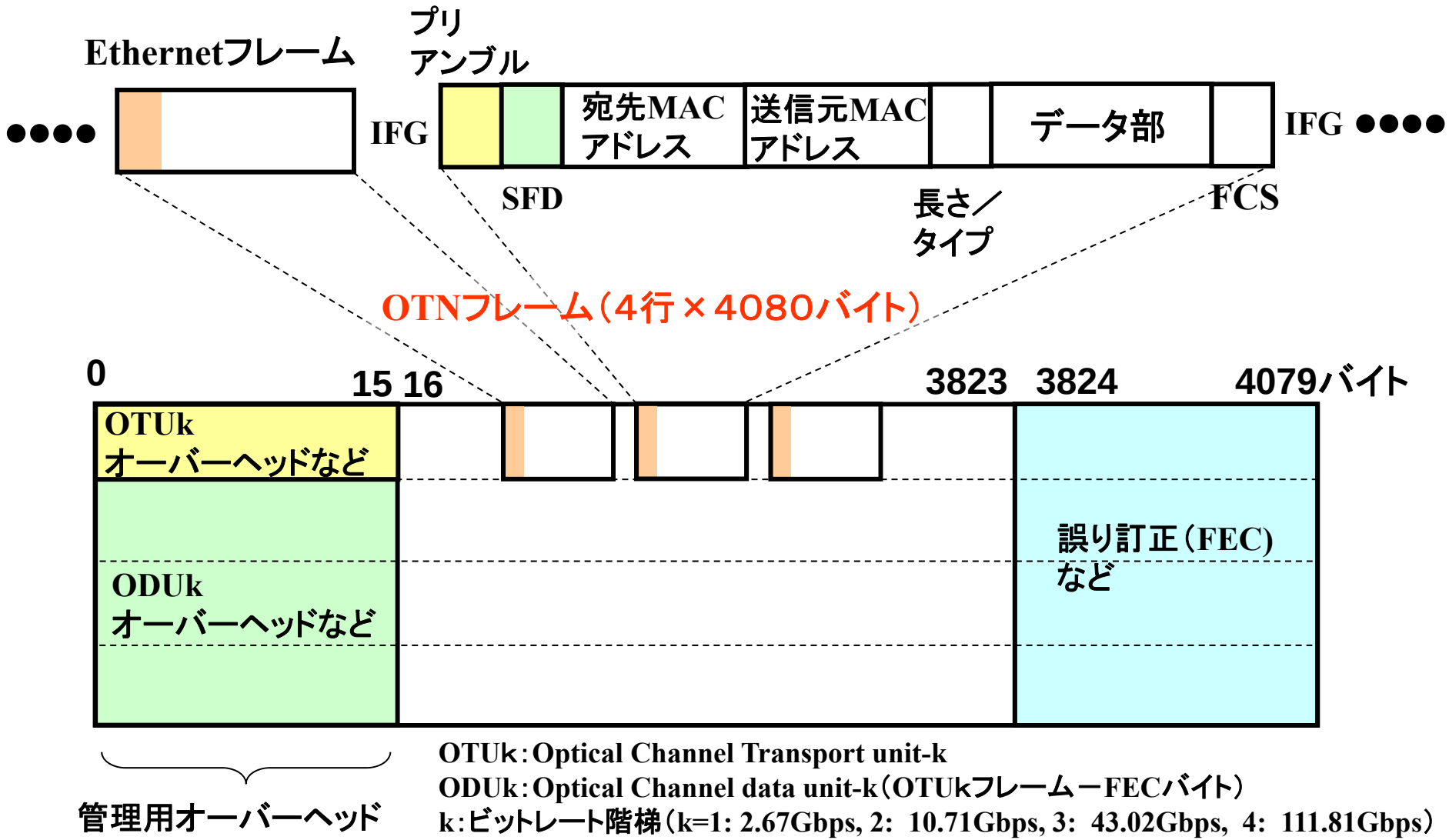
  ➡ ファイバ・コネクタあるいはスターカプラのようなサイズで
  実現できるか？

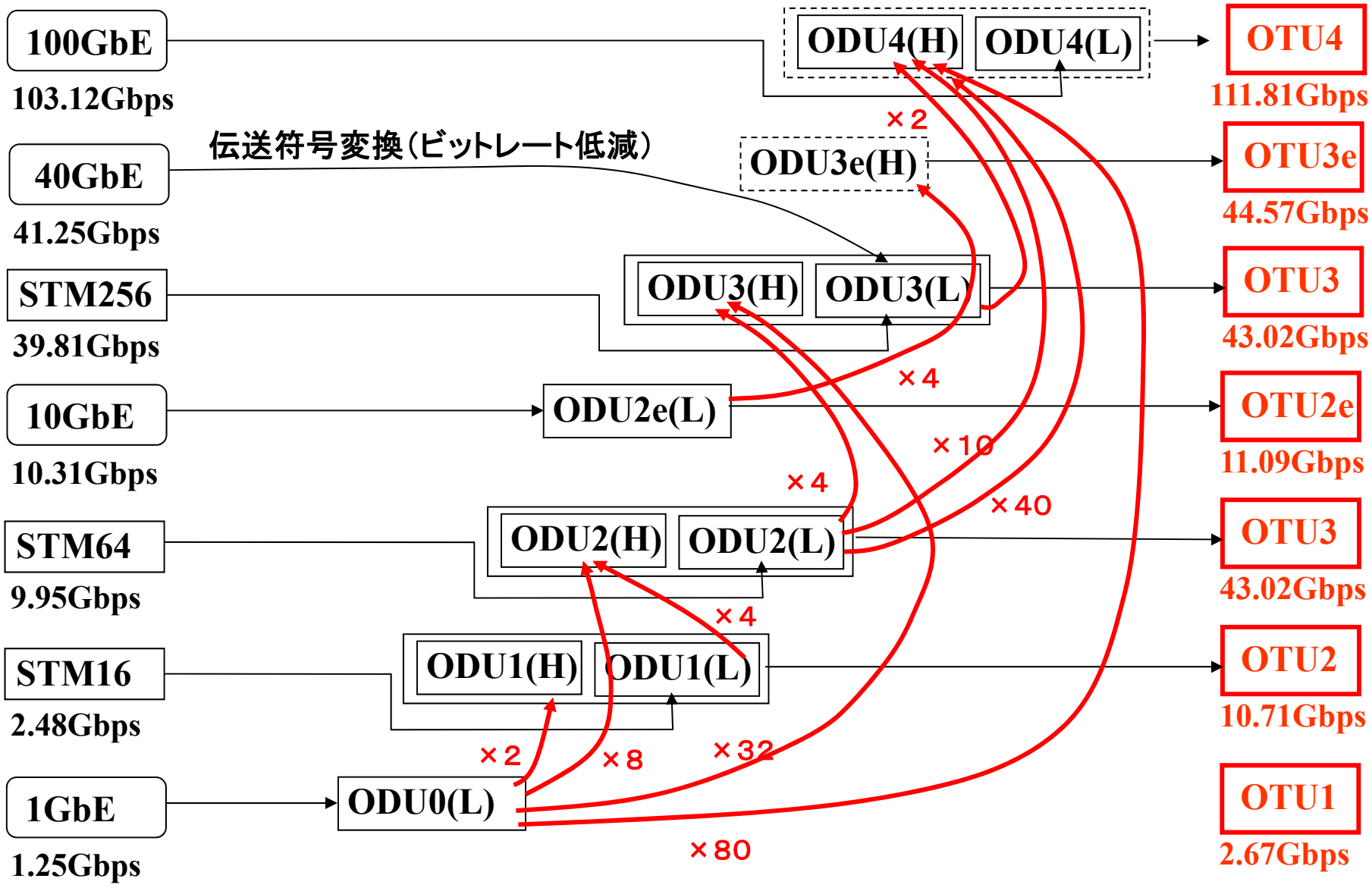
- 高次モード生成・多重・分離の簡易化・伝送時の安定性維持
  - ホログラム（位相マスク）による高次モード生成
  - ラゲール・ガウスモード利用

- マルチコア／モード光増幅器

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」



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