

# 研究スタッフ

教授： 中沢 正隆

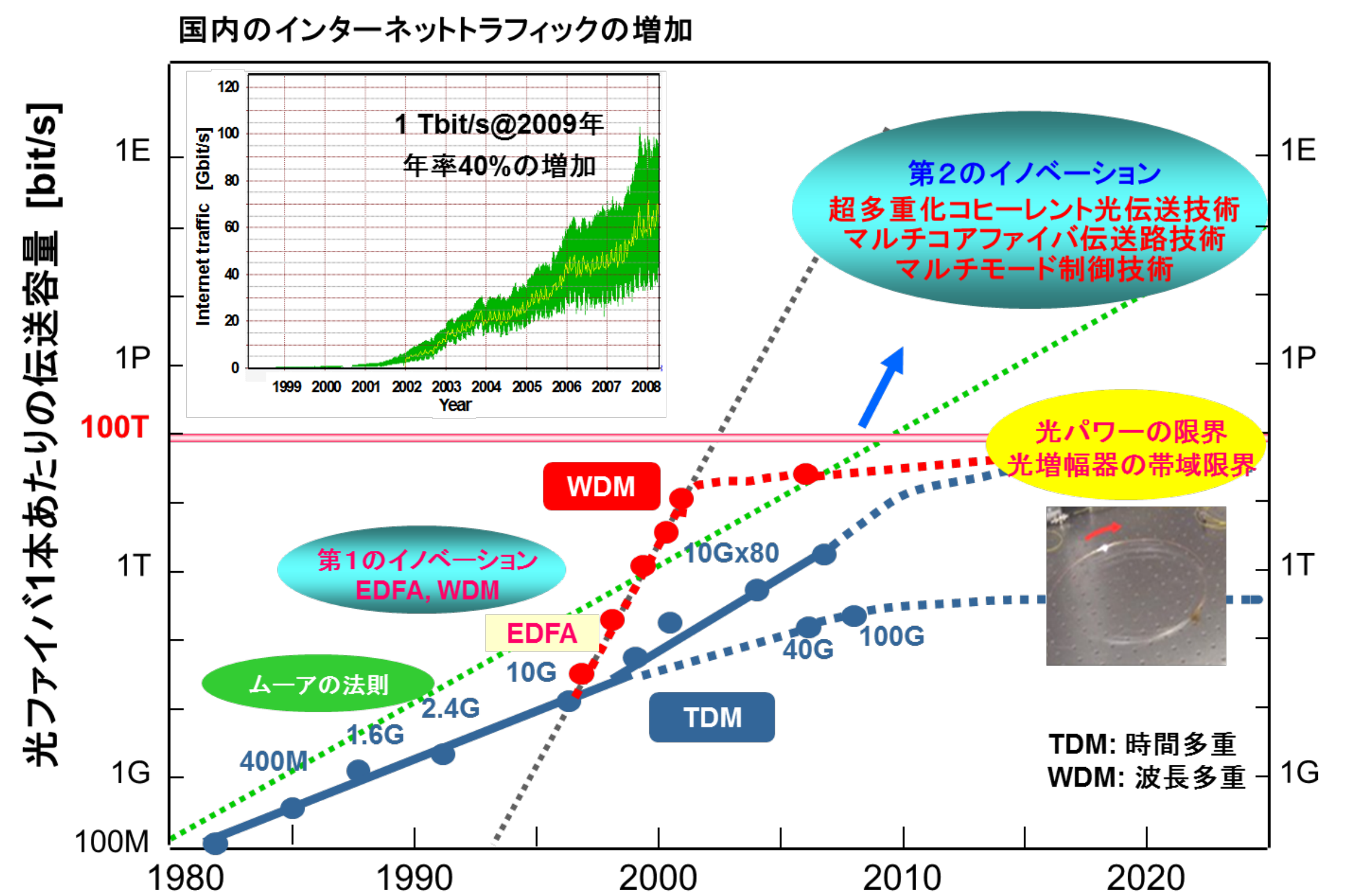
准教授： 廣岡 俊彦

准教授： 吉田 真人

助教： 葛西 恵介

## 研究目的

インターネットトラフィックは年率40%の勢いで増加を続けており、20年後には現在の約1000倍に増大すると予想されています。我々は、ペタ~エクサビット級の大容量光通信インフラを支える革新的な伝送技術として、超高速光ナイキストパルス伝送、超多値コヒーレントQAM光伝送、ならびにその基盤となる高安定なCWおよびモード同期パルスレーザ、マルチコアファイバ等の研究開発に取り組んでいます。



## 主な研究テーマ

### 1. 超高速光伝送技術に関する研究

#### 1-1 超高速・高密度光伝送の実現に向けて

超高速光伝送 OTDM/ETDM(時分割多重)  
OOK, DPSK, DQPSK  
ピコ~フェムト秒  
超短光パルス伝送

ナイキストパルスの時分割多重

光ナイキストパルス伝送<sup>[1]</sup>

QAM

高周波数利用効率伝送 QAM/OFDM  
デジタルコヒーレント伝送

時間 周波数

<ナイキスト多重伝送の特徴>  
・幅の広い光パルスを用いて超高速通信を実現  
・直交性を取り入れた新たな時間多重を実現  
[1] M. Nakazawa et al., Opt. Express, 20, 1129 (2012).

#### 1-2 新たに提案している光ナイキストパルス伝送(科研費特別推進研究)

光ナイキストパルスの周波数スペクトルと時間波形

光ナイキストパルスの時間多重

・光ナイキストパルス: ナイキストフィルタのSinc関数的なインパルス応答と同じ形状を有する光パルス  
・シンボル間隔ごとに強度が常にゼロとなるため、符号間干渉を生じることなく超高速時間多重が可能

$$R(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T} \\ \frac{1-\alpha}{2T} \left[ 1 - \sin \left[ \frac{\pi}{2\alpha} (2T|f| - 1) \right] \right], & \frac{1-\alpha}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T} \\ 0, & |f| \geq \frac{1+\alpha}{2T} \end{cases}$$

$$r(t) = \frac{\sin(\pi t/T) \cos(\alpha \pi t/T)}{\pi/T - (2\alpha t/T)^2}$$

T: シンボル間隔  
α: ローレオフ率

#### 1.3 光ナイキストパルスを用いた超高速・高効率光伝送

10~40G NxT 時分割多重化 Nx(10~40G)

光ファイバ伝送路

光ナイキスト直交多重分離

<光ナイキストパルスの直交性を用いた時分割多重分離<sup>[1]</sup>>

Nyquist OTDM signal:  $u(t) = \sum_n g_n \phi_n(t)$

ナイキストOTDM信号とナイキストLOパルスとを同期させて光検出することにより、その2乗検波特性から  $t = nT$  のデータ  $g_n$  を抽出可能

Nyquist LO pulse  $\phi_n(t)$

$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u(t) + \phi_n(t))$   
 $E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u(t) - \phi_n(t))$

$I_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\omega) H(\omega) e^{-j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(t') \left[ \frac{1}{2} (e^{j\omega(t-t')} + e^{-j\omega(t-t')}) \right] d\omega$   
 $\approx \frac{\Omega}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(t') dt' = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \phi_n(t) dt = g_n$  [1] K. Harako et al., Opt. Express 22, 29456 (2014)

#### 1.4 1.92 Tbit/s/ch 64 QAM-150 kmコヒーレントナイキスト伝送

10 Gbaud, 64 QAM

9.95328 GHz

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> frequency-stabilized fiber laser

EDFA

Comb generator

Pulse shaper

SMF

AWG

10 ~ 160 Gbaud

IQ mod.

OTDM MUX

Pol Mux

PC

2 nm

Narrow band filter

Pilot tone

PC

SLA+IDF 75 km 2 nm 75 km

SLA+IDF 75 km 2 nm 75 km

PC

PBS

160 Gbaud

PC

Prec.

2 nm

90 deg optical hybrid

B-PD A/D

B-PD A/D

DSP

Transmission Line SLA: 19.5 ps/nm/km IDF: -40 ps/nm/km

FBG filter

Pilot tone

LN phase mod.

4f<sub>clock</sub>

CW-LO

Loop filter

OPLL circuit

90 deg optical hybrid

B-PD A/D

B-PD A/D

DSP

符号誤り率測定結果

EVM: 3.7% (Back-to-back)  
EVM: 4.8% (After 150 km transmission)

Back-to-back (X-pol)  
Back-to-back (Y-pol)  
After 150 km (X-pol)  
After 150 km (Y-pol)

FEC limit (2x10<sup>-3</sup>)

4.8 dB

Received Power [dBm]

周波数利用効率 =  $\frac{1.92 \text{ Tbit/s}}{170 \text{ GHz} \times 1.07} = 10.6 \text{ bit/s/Hz}$  (7% FEC)

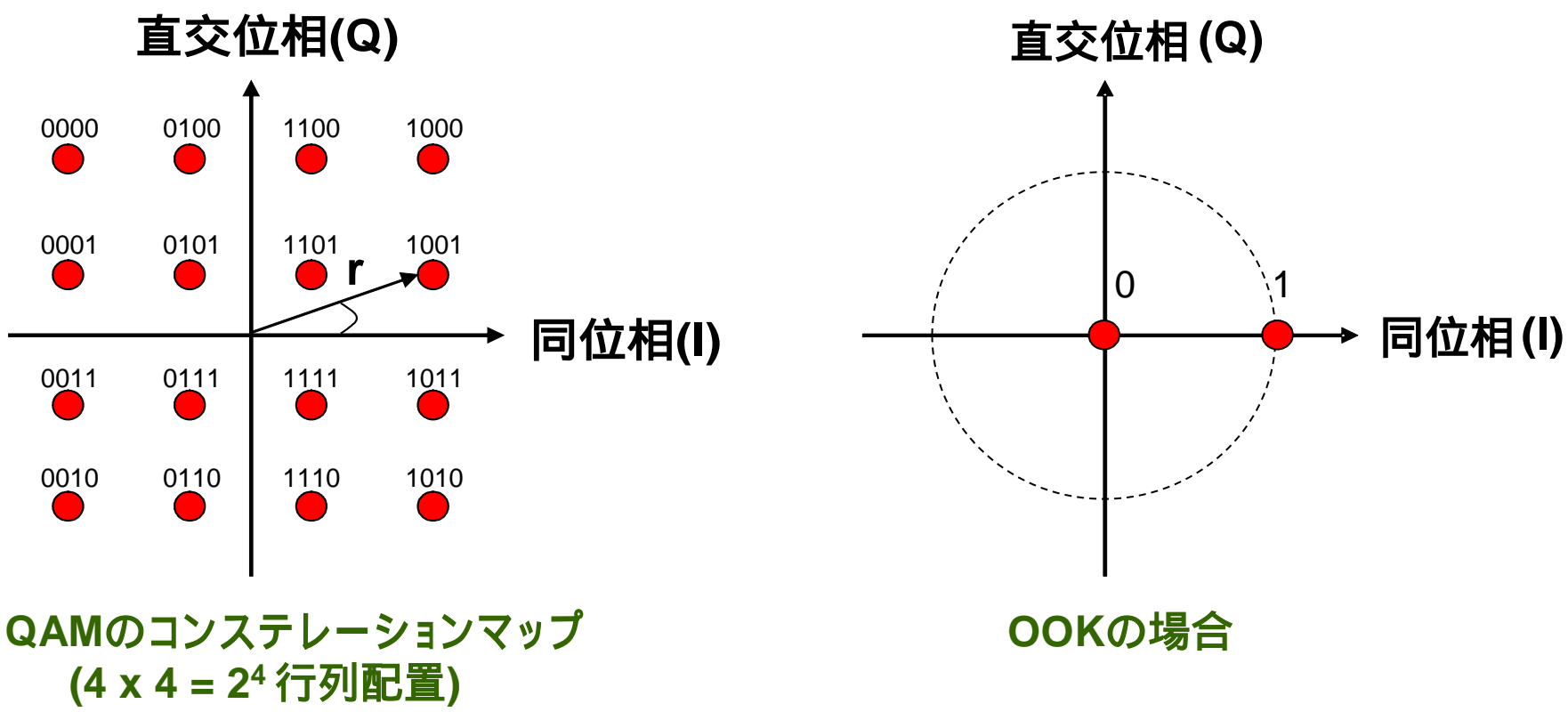
D. O. Otuya et al., OFC 2015, M3G.2.

## 2. コヒーレント光QAM伝送技術に関する研究

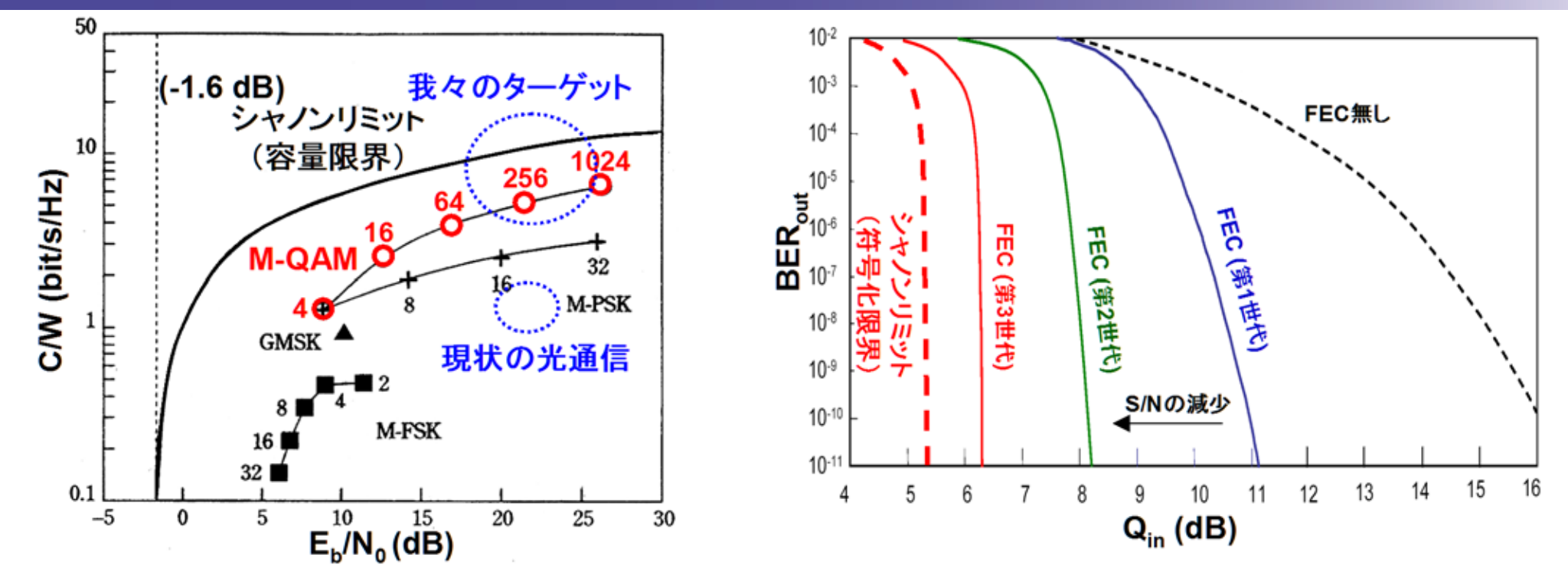
### 2-1 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 伝送とは?

QAM(Quadrature Amplitude Modulation: 直交振幅変調)の特徴:

- 1 位相が90度異なる2つの搬送波の振幅を独立に変調し、振幅と位相の両方に情報をのせて伝送
- 2<sup>N</sup> QAMにより1チャンネルの帯域でNビットを伝送させることが可能であり、OOKに比べて周波数利用効率がN倍向上



### 2.2 シヤノンリミット



シャノン-ハートレーの定理 (Shannon-Hartley Theorem)

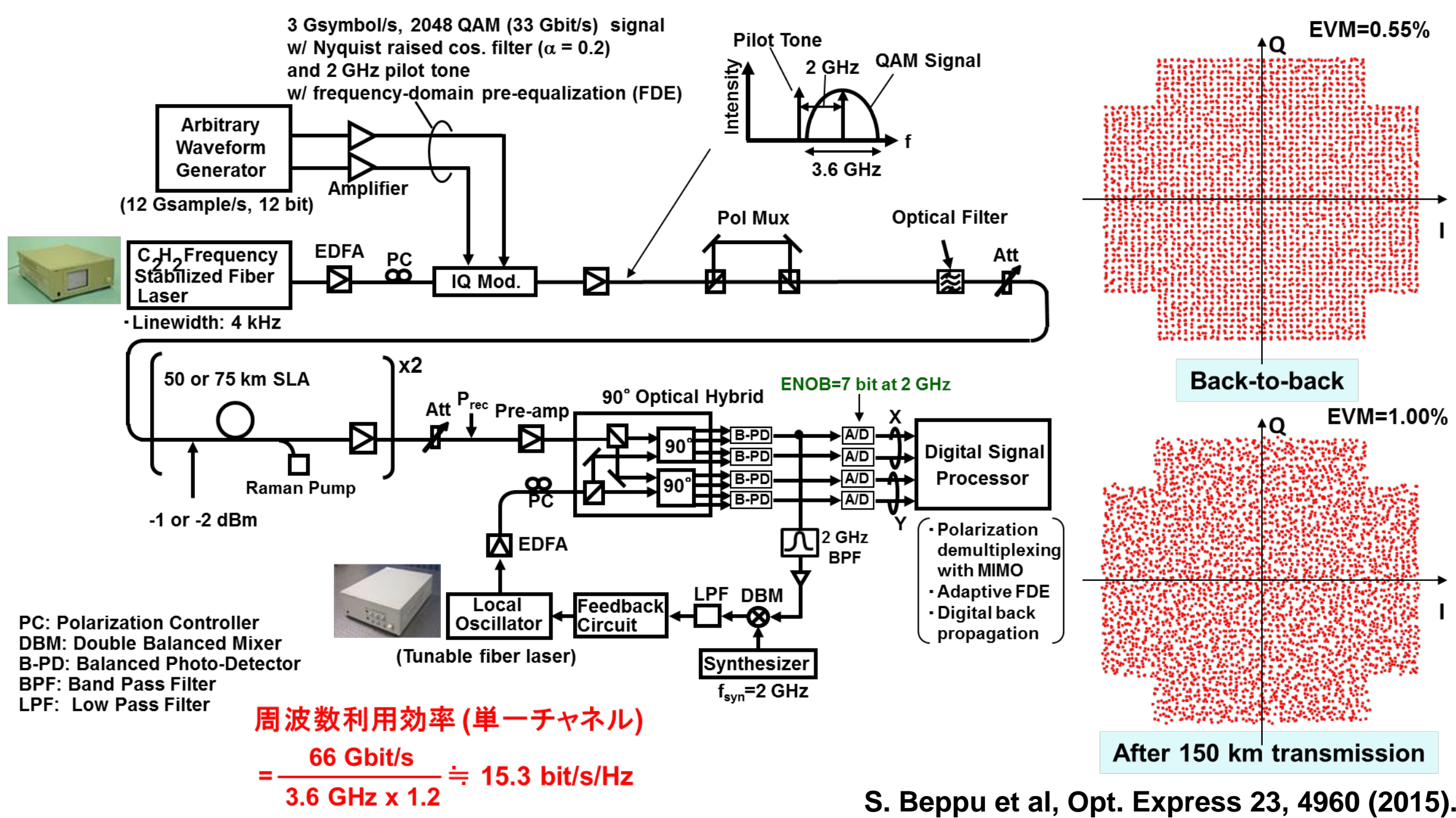
$$\frac{C}{W} = \log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{C}{W} \right)$$

C/W: 周波数利用効率

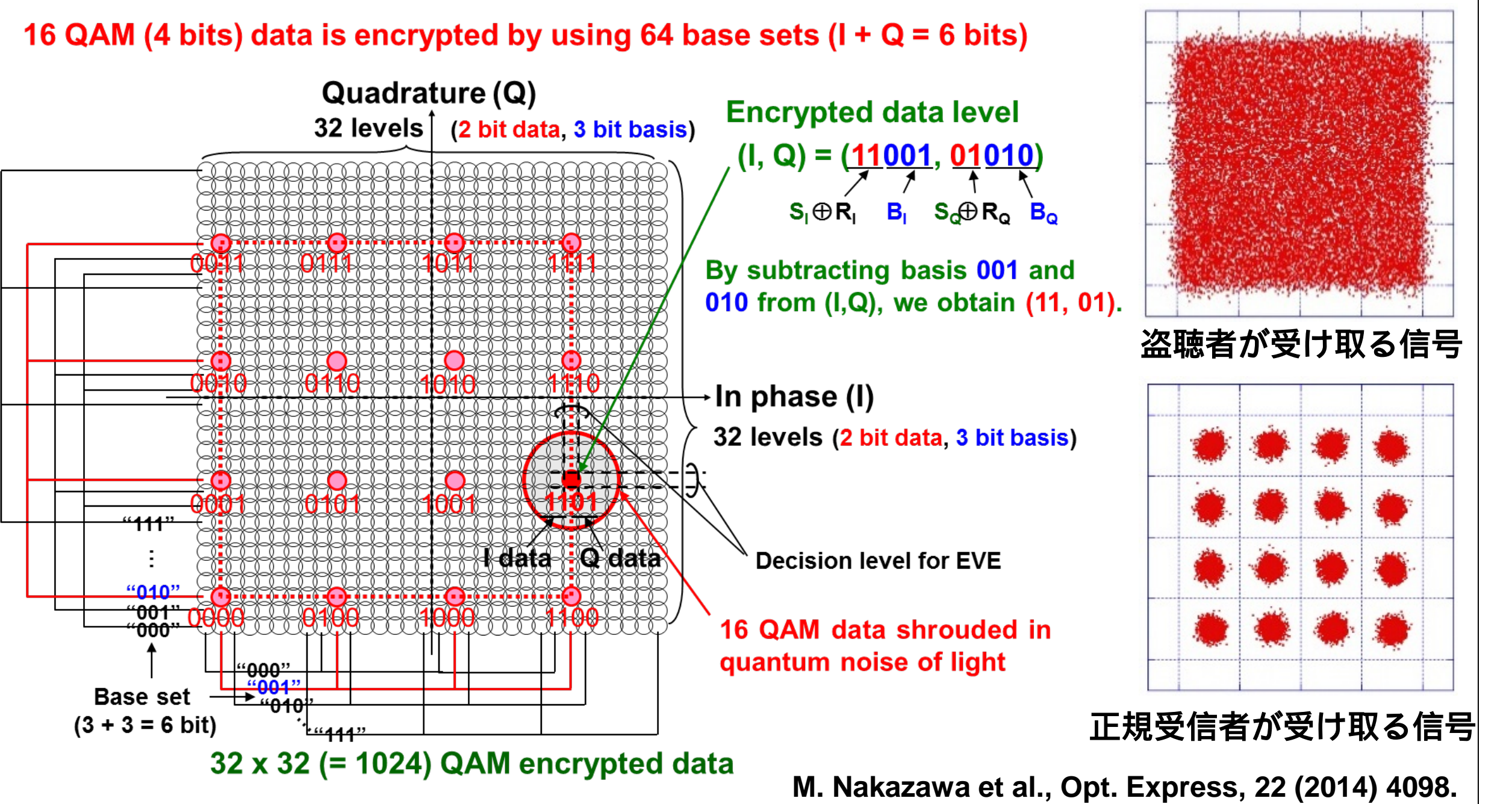
シャノンの通信路符号化定理 (Noisy-channel Coding Theorem)

FEC: Forward Error Correction (誤り訂正符号)  
 BER<sub>out</sub> = 受信部の誤り率  
 $Q_{in}$  = 送信信号のS/N

### 2.3 偏波多重3 Gsymbol/s, 2048 QAM (66 Gbit/s)コヒーレント光伝送

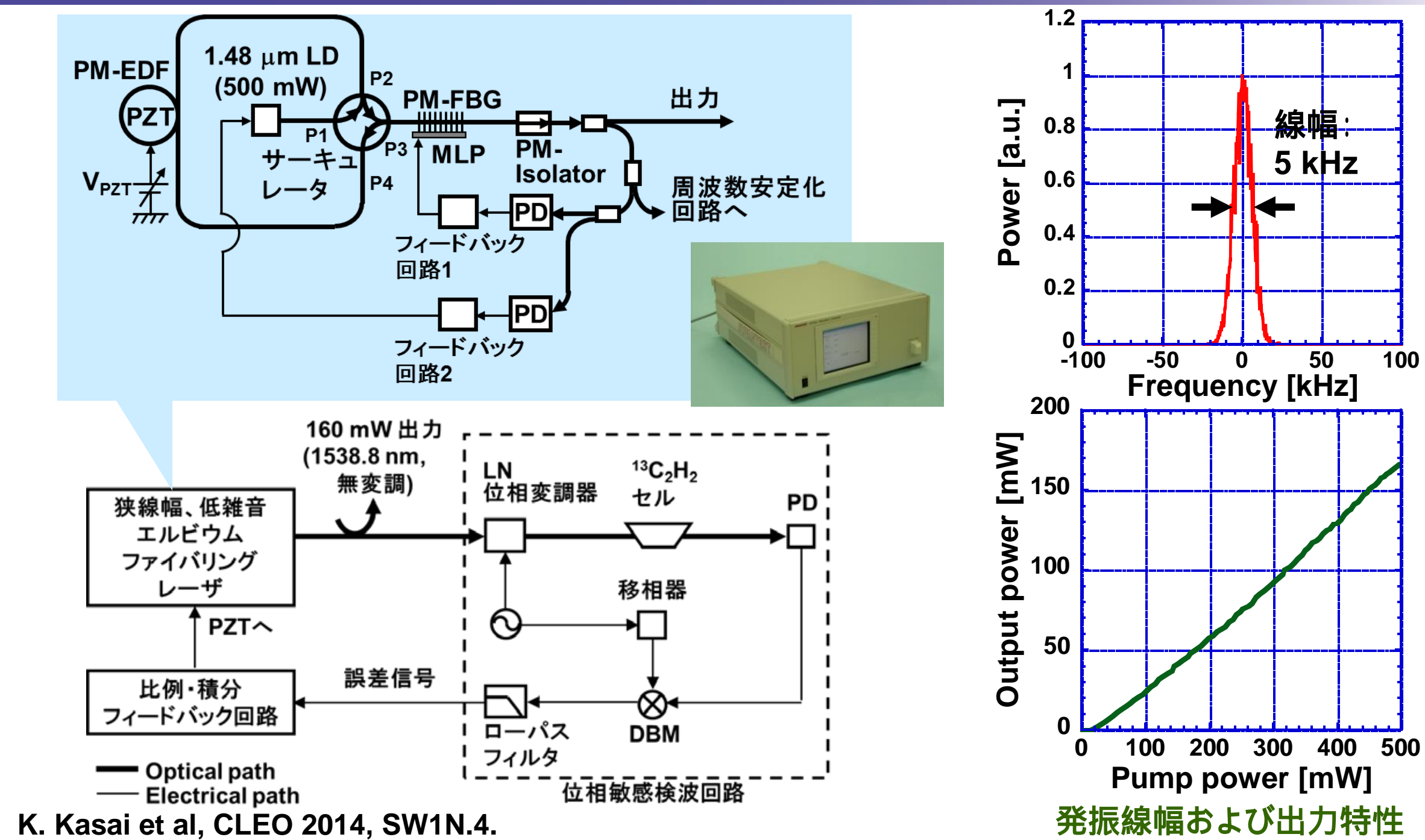


### 2.4 QAMを用いた2次元量子ストリーム暗号

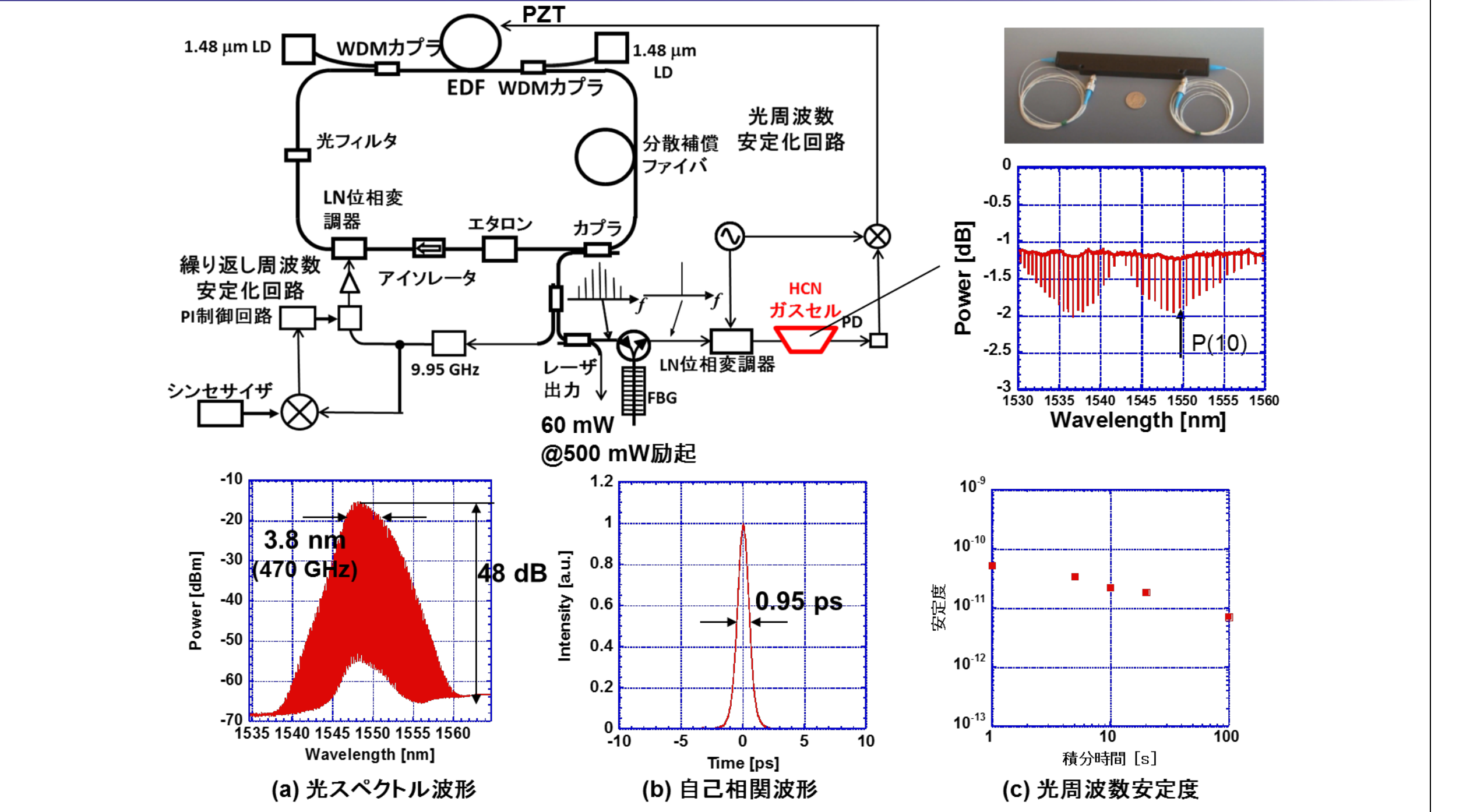


## 3. 高安定・超短パルスレーザーならびにマルチコアファイバに関する研究

### 3.1 1.55 μm C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(アセチレン)周波数安定化ファイバレーザー



### 3.2 10 GHz, 1.55 μm HCN周波数安定化モード同期レーザー



### 3.3 空間多重伝送用マルチコアファイバ

	19	31	36 (3 modes/core)
# of cores	19	31	36 (3 modes/core)
Core pitch	39.0 μm (Inner) 37.6 μm (Outer)	31.6 μm	34 μm
Cladding diameter	220 μm	231 μm	306 μm
Loss	0.285 dB/km	~0.3 dB/km	0.242~0.308 dB/km
Aeff	85 μm <sup>2</sup>	75 μm <sup>2</sup>	74~77 μm <sup>2</sup> (LP <sub>01</sub> )
Crosstalk	-57 dB/km	-49 dB/km	-39 dB/km
Reference	J. Sakaguchi et al. (NICT, Furukawa, Optoquest, OFS), ECOC2013, Th.1.C.6.	Y. Sasaki et al. (Fujikura), ECOC2015, We1.4.4.	J. Sakaguchi et al. (NICT, Sumitomo, Optoquest), OFC2015, Th5C.2.

### 3.4 マルチコアファイバの長手方向におけるモード結合変化の測定

