

## 第4章

# 波長多重光線路の最適設計

### 4.1 序言

本章では、最近研究が活発となっている 40 Gbit/s/ch 波長多重線路の最適化に関して検討を行う。インターネットなど、グローバルなデータ通信需要の増大にともない、高密度波長多重 (DWDM) 技術を用いた長距離大容量通信技術の研究が活発である。DWDM 研究は、国際通信を目的とした、1 Tbit/s, 10000 km 程度の伝送を安定に行うための技術開発と、国内通信を目的とした、10 Tbit/s 以上の伝送をねらった研究が並行して進められている。表 4.1.1 に最近の国際会議等で報告された主な実験データを示す。チャンネルあたりの伝送速度を 10 Gbit/s から 40 Gbit/s とし、波長多重数、伝送距離、使用ファイバ、使用帯域、周波数利用効率、報告者等について示した。

表 4.1.1 最近の主な DWDM 伝送実験データ

チャンネル速度	波長多重数	伝送距離 (km)	使用ファイバ	帯域	効率 (bit/Hz)	報告者等
40G	273	117	SMF + RDF	L+C+S	0.8	NEC (OFC01)
	125	(1200)	NZDSF	L+C	0.64	Alcatel (ECOC01)
	40	(2000)	SMF + RDF	C	0.4	Lucent (ECOC01)
	32	(4500)	SMF + SCF	C	0.29	TyCom (ECOC01)
20G	160	1500	SMF + RDF	L+C	0.8	NEC (信2000秋)
	100	2700	SMF + SCF	C	0.6	KDD (ECOC2k)
	56	(9170)	SMF + SCF	C	0.4	KDD (ECOC01)
10G	365	(6850)	SMF + SCF	L+C	0.45	Alcatel (ECOC01)
	200	(9200)	SMF + SCF	C	0.53	KDD (SubOpt01)
	104	(10127)	SMF + SCF	L+C	0.2	Fujitsu (ECOC99)

伝送距離で( )はFEC使用

最近チャンネル速度 40 Gbit/s の研究が活発であるが、これは1波長当たりの装置コストがチャンネル速度に余り依存せず伝送容量当たりのコストダウンが図れることによるが、反面、伝送条件は非常に厳しくなる。

長距離国際通信では、チャンネル当りの伝送速度は 10 Gbit/s が主流であり、1999 年秋には 1 Tbit/s、10000 km の伝送が報告された<sup>(1)</sup>。最近では 20 Gbit/s で 9000 km を越える伝送実験も報告されている<sup>(2)</sup>。最近の実験では、増幅器の広帯域化、低雑音化のためラマン増幅を併用していること、線路分散分布の最適化(対称型分散マップの採用)、誤り訂正符号の最適化等を図っていることが特徴である。

ファイバは 1.3 $\mu$ m 伝送用ファイバ(SMF)をベースにコアに純粋石英を使い、有効コア断面積の拡大を図った PSCF(Pure Silica Core Fiber)と、分散補償ファイバ(DCF)をベースにスロープ補償型にした SCF(Slope Compensation Fiber)を組み合わせた構成が一般的である。信号強度を 0 dBm/ch(1 mW/ch)以下として、極力ファイバの非線形性の影響を避ける方向で研究が進んでいる。非線形性を利用した波長多重ソリトンの研究も行われているが<sup>(4)</sup>、現時点ではチャンネル間の相互作用を抑制する決定的な方法は見いだされていない。

周波数利用効率は、短距離では 0.8 bit/s/Hz 程度、長距離通信では 0.4 bit/s/Hz 程度まで高められている。周波数利用効率を向上させるため、偏波インターリーブ<sup>(5)</sup>、CS-RZ(Carrier Suppressed RZ)、光CDM<sup>(9)</sup>等の方式が研究されている。図 4.1.1 に周波数帯域の拡大に関する最近の研究例として、NECによる Sバンド伝送のスペクトルを示す。最近、1400 nm 付近の水分子による吸収を抑制して 1300 nm から 1700 nm の帯域で伝送可能としたファイバも開発されており、ラマン増幅との併用により数十 Tbit/s クラスの伝送も視野に入ってきている<sup>(55)</sup>。

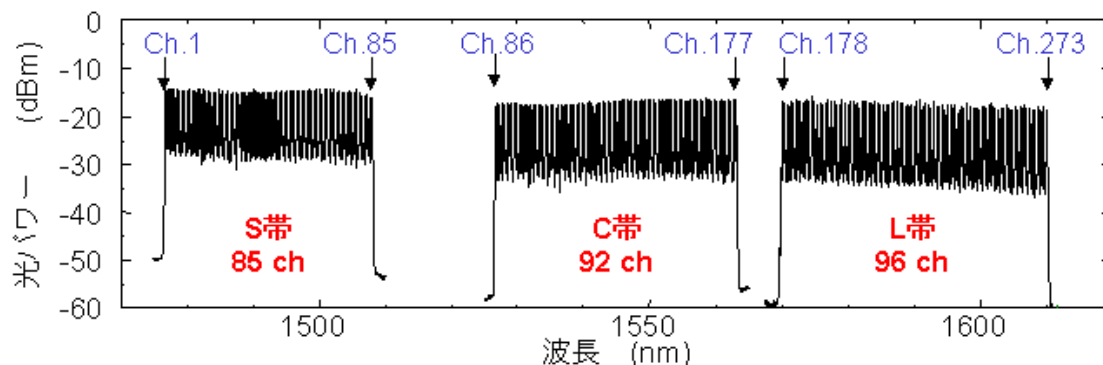


図 4.1.1 周波数帯域拡大の例(Sバンド伝送: NEC)<sup>(5)</sup>

## 4.2 Qマップ法による波長多重線路の最適設計

### 4.2.1 CRZ伝送

本節では、次世代システムの主流と考えられているチャネル速度 40 Gbit/s の伝送システムについて、その伝送特性をシミュレーションにより評価した。SMFを伝送線路に用いた場合、線路の局所分散が非常に大きいため、パルスはただちに広がり、ほとんど線形パルスが伝搬する。このような伝送方式は、ソリトン伝送のように非線形性による波形安定化作用を用いておらずチャープTRZ (CRZ) 伝送と呼ばれている。

初期波形として、ガウス型関数に周波数シフト項を付加したものを考える。

$$\Phi(0, \tau) = \sum_m \phi_m(0, \tau) \cdot \exp[i2\pi m \Delta f \tau] \quad (4.2.1)$$

$$\phi_m(0, \tau) = \sum_l \delta_{lm} \sqrt{\frac{P}{S}} \exp\left[-\frac{(\tau - l\Delta t)^2}{2T_0^2}(1 - iC)\right] \quad (4.2.2)$$

ここで  $\Delta f$  はチャネル間の周波数間隔であり、 $m$  は波長多重数に応じて  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$  等の値をとる。 $\Delta t$  は1ビットの時間幅であり、 $l$  はビット長に応じて  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$  等の値をとる。また  $\delta_{lm}$  は信号系列に応じて  $0$  または  $1$  の値をとる。 $P$  はパルスのピークパワー、 $S$  はファイバのコア断面積、 $C$  はチャープパラメータである。

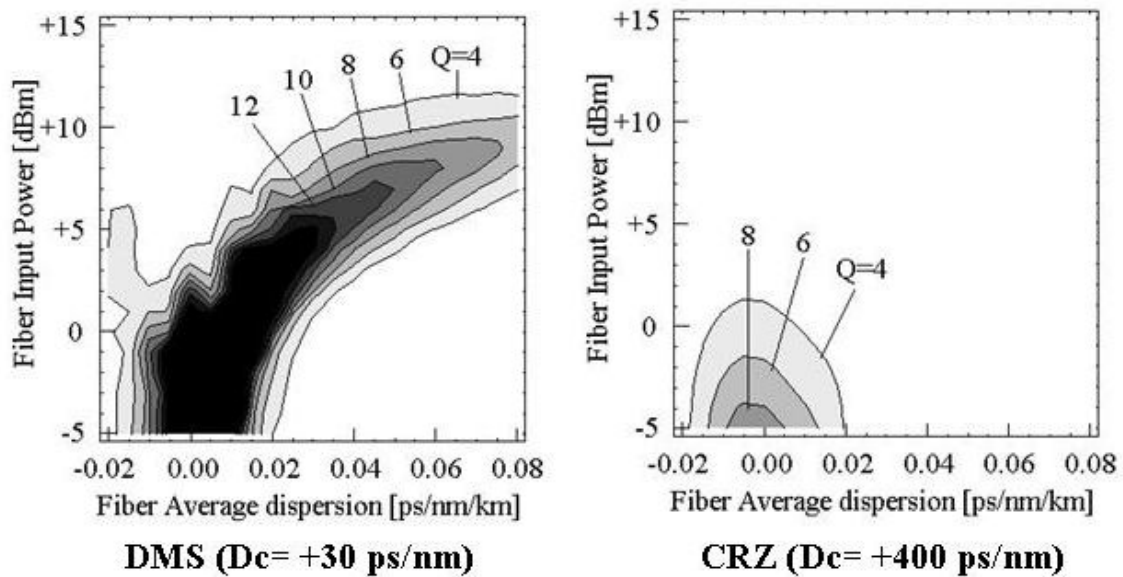


図 4.2.1 ソリトン伝送とCRZ伝送の比較 (single-channel)  
(40 Gbit/s, La= 50 km, Lt= 2000 km)

図 4.2.1 にソリトン伝送 ( DMS ) と C R Z 伝送の伝送領域 ( single-channel ) の比較を示す。分散補償量はソリトンが +30 ps/nm ( $S = 1.65$ )、C R Z が +400 ps/nm ( $S = 22$ ) である。通常 C R Z 伝送では有効コア断面積を 100  $\mu\text{m}^2$  程度に拡大したファイバを使用するが、ここでは比較のため有効コア断面積を 50  $\mu\text{m}^2$  に固定し、分散スロープはゼロとしている。また増幅器雑音は考慮せず、伝送用フィルタも使用していない。

C R Z 伝送の伝送領域は、平均分散ゼロのラインに対してほぼ対称となっており、分散による波形広がりによって伝送距離が制約される線形伝送の特徴を示している。また最適信号強度もソリトンに比べて約 1 桁小さくなり、増幅器雑音の影響を受けやすくなる。

図 4.2.2 に 3 波長多重時のソリトン伝送 ( DMS ) と C R Z 伝送の伝送領域の比較を示す。分散補償量はソリトンが +30 ps/nm ( $S = 1.65$ )、C R Z が +400 ps/nm ( $S = 22$ ) である。ソリトン伝送ではチャンネル間の相互作用により高出力領域が消滅し、C R Z 伝送との違いは小さくなる。C R Z 伝送の伝送領域は 1 波伝送の場合と余り変わっていない。

C R Z の場合でも、信号出力の上限はファイバの非線形性に起因する波形劣化で制約されており、非線形性の影響評価が重要となる。非線形シュレディンガー方程式に基づく Q マップ法は C R Z 伝送系の解析にも適用でき、信号強度や分散マージンの評価等が可能である<sup>(19)</sup>。

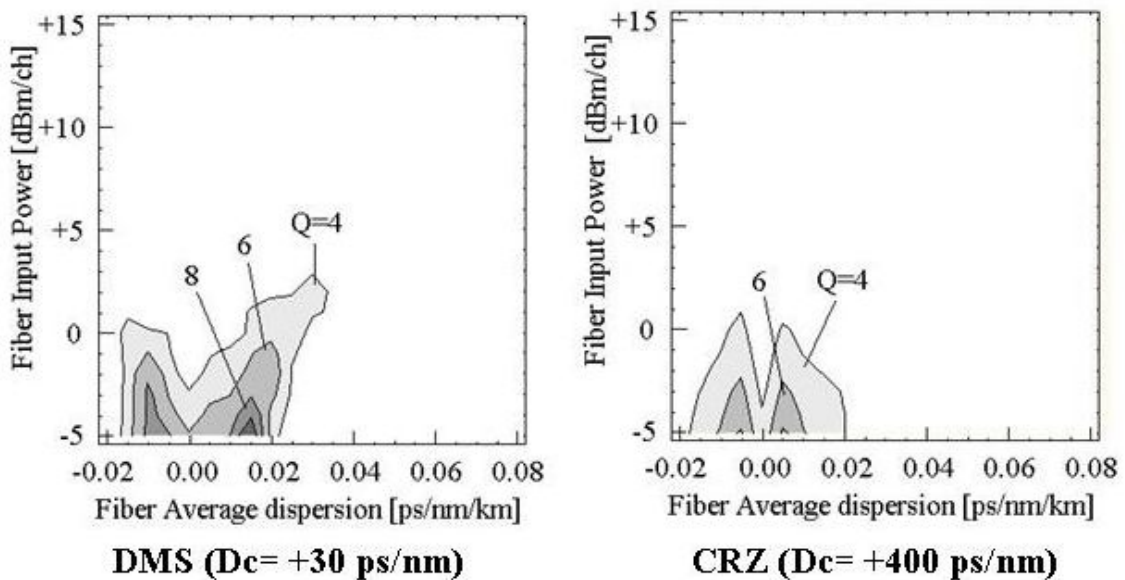


図 4.2.2 ソリトン伝送と C R Z 伝送の比較 ( 3-WDM )

( 40 Gbit/s, 3-WDM,  $d_l=200$  GHz,  $L_a=50$  km,  $L_t=2000$  km )

## 4.2.2 分散補償量の最適化

図 4.2.3 に  $D_{av}$ - $D_c$  平面上における Q マップの計算例を示す。(a) 1 チャンネルおよび (b) 2 チャンネル伝送に対して計算を行った。増幅器間隔を 50 km とし、2000 km の伝送を行った。増幅器雑音は入れていない。信号強度は -5 dBm/ch とし、線形領域であることから平均分散ゼロ近傍に伝送領域が存在する。 $D_c = \pm 400$  ps/nm 付近にも伝送領域が現れている<sup>(19)</sup>。この領域は 1 パルスのシミュレーションでは発生しないことから、同一チャンネルの隣接パルスとの非線形相互作用によるものと考えられる。また  $S$  パラメータは 22 程度であり、波長多重時にも伝送特性が余り劣化しない。

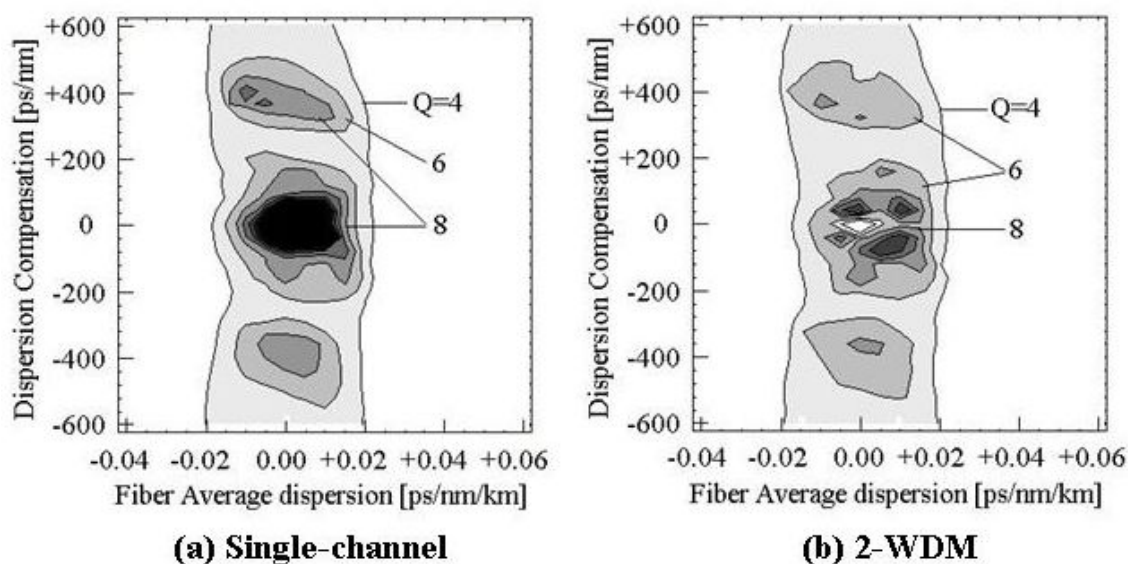


図 4.2.3 CRZ 伝送における分散補償量の最適化

(40 Gbit/s/ch,  $P_{av} = -5$  dBm,  $\Delta f = 200$  GHz,  $L_a = 50$  km,  $L_t = 2000$  km)

CRZ 伝送は、光ソリトン伝送 (DMS) と比較して、次のような特徴があることがわかった。

- (1) 信号強度が約 1 桁低い (DMS : +5 dBm/ch、CRZ : -5 dBm/ch)
- (2) 平均分散値がほとんどゼロである (DMS では +0.03 ps/nm/km 程度の異常分散)
- (3) 分散補償量大きい伝送領域がある (DMS :  $\pm 30$  ps/nm、CRZ :  $\pm 400$  ps/nm)
- (4) 伝送特性は波長数には余り依存せず、各チャンネルとも同等の特性を示す。

## 4.2.3 周波数利用効率の最適化

伝送容量の大容量化において、周波数利用効率の向上が重要となる。表 4.1.1 に見るように最近の実験における周波数利用効率は、短距離伝送では 0.8 bit/s/Hz 程度、長距離伝送では 0.4 bit/s/Hz 程度まで高められている。周波数利用効率を向上させるため、偏波インターリーブ<sup>(5)</sup> (図 4.2.4)、CS-RZ<sup>(3)</sup> (Carrier Suppressed RZ)、Duo-Binary<sup>(8)</sup>、光CDM<sup>(9)</sup>等の方式が研究されている。本節ではQマップを用いて周波数利用効率について検討する。本節のシミュレーション結果は線形領域におけるCRZ伝送である。

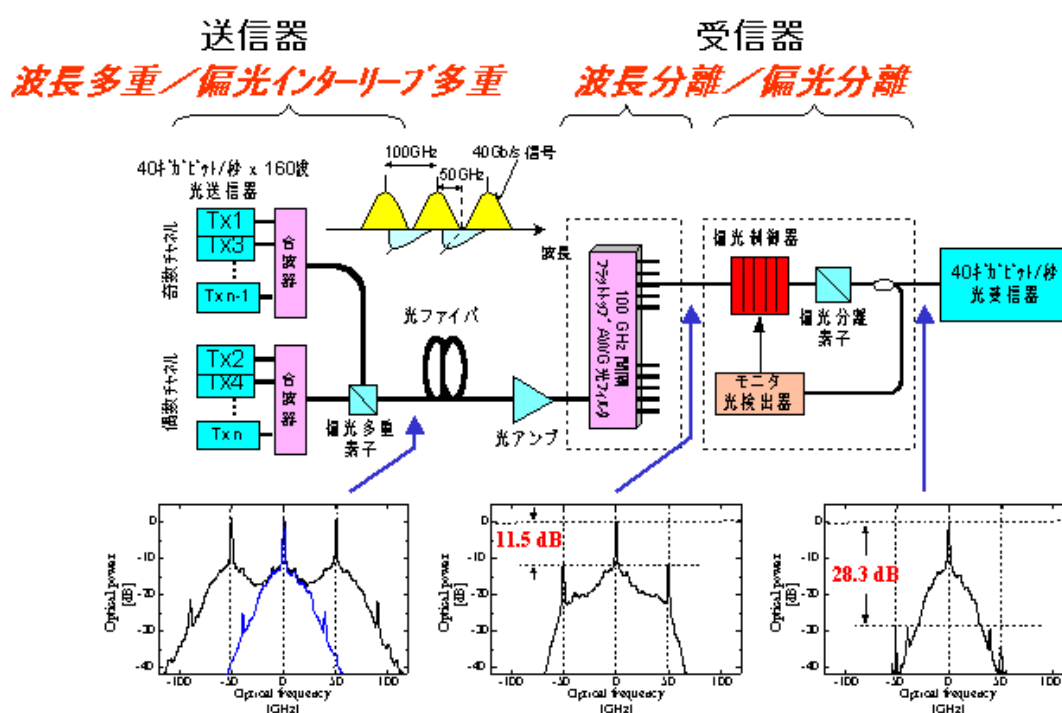


図 4.2.4 周波数利用効率向上の例 (波長 / 偏波多重分離技術 : NEC) <sup>(5)</sup>

図 4.2.5 ~ 図 4.2.8 に 40 Gbit/s/ch、5 波長多重伝送で 1000 km 伝送時の Q マップを示す。隣り合うチャンネルで偏波を直交させて、周波数間隔を 150 GHz、100 GHz、75 GHz、50 GHz としている。増幅器の雑音指数は、NF = +5 dB とした。75 GHz (周波数利用効率 0.53) から劣化が顕著となり、50 GHz (同 0.8) では辛うじて伝送領域が認められる。また、やや異常分散領域 (+0.015 ps/nm<sup>2</sup>/km) の方が、良好な伝送特性を示している。

図 4.2.9、図 4.2.10 に同一偏波面での 5 波長多重伝送で、波長間隔を 150 GHz、100 GHz とした場合の伝送領域を示す。150 GHz (同 0.27) で、直交偏波伝送の 75 GHz 間隔とほぼ同等の伝送特性を示している。

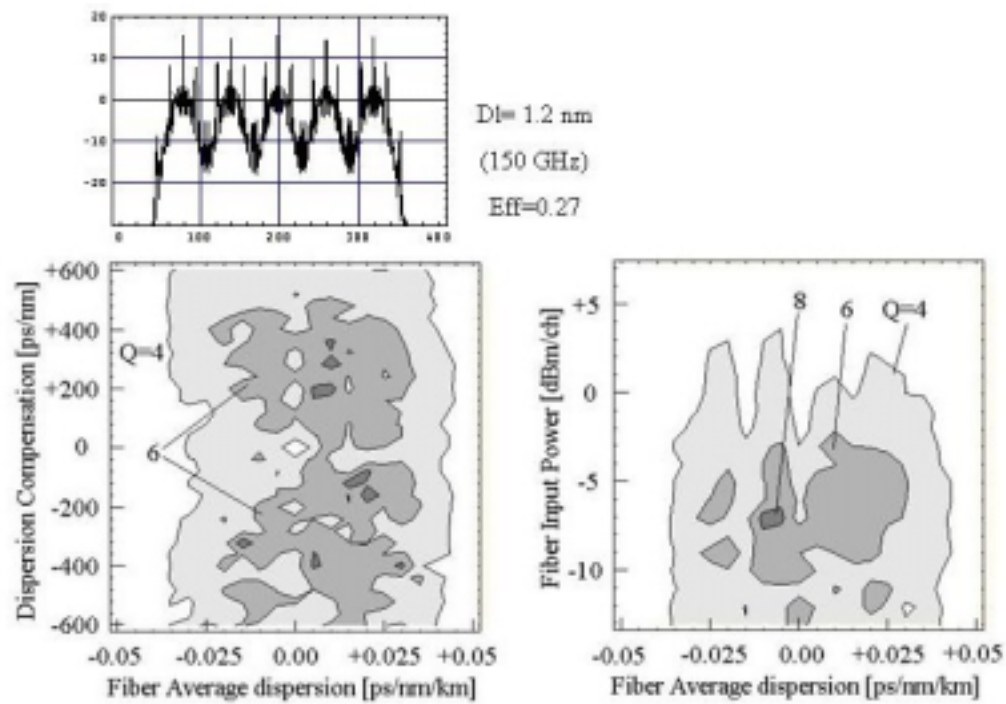


図 4.2.5 波長間隔依存性の評価 (直交偏波)

(  $Dl = 1.2 \text{ nm}$  (150 GHz),  $P_{av} = -5 \text{ dBm/ch}$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$ ,  $L_t = 1000 \text{ km}$  )

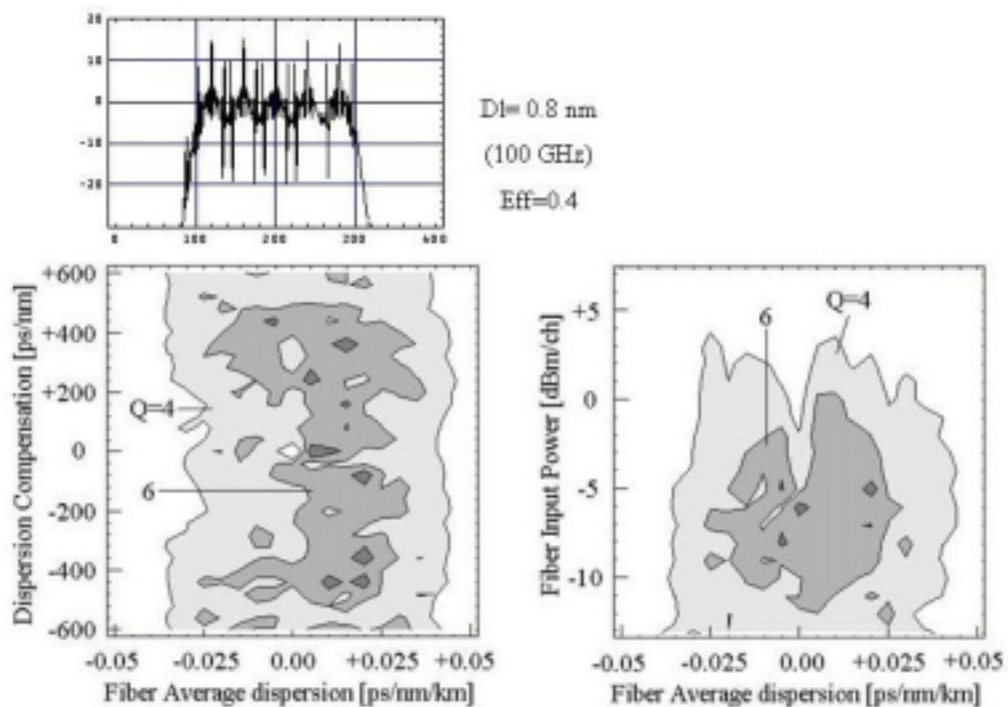


図 4.2.6 波長間隔依存性の評価 (直交偏波)

(  $Dl = 0.8 \text{ nm}$  (100 GHz),  $P_{av} = -5 \text{ dBm/ch}$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$ ,  $L_t = 1000 \text{ km}$  )



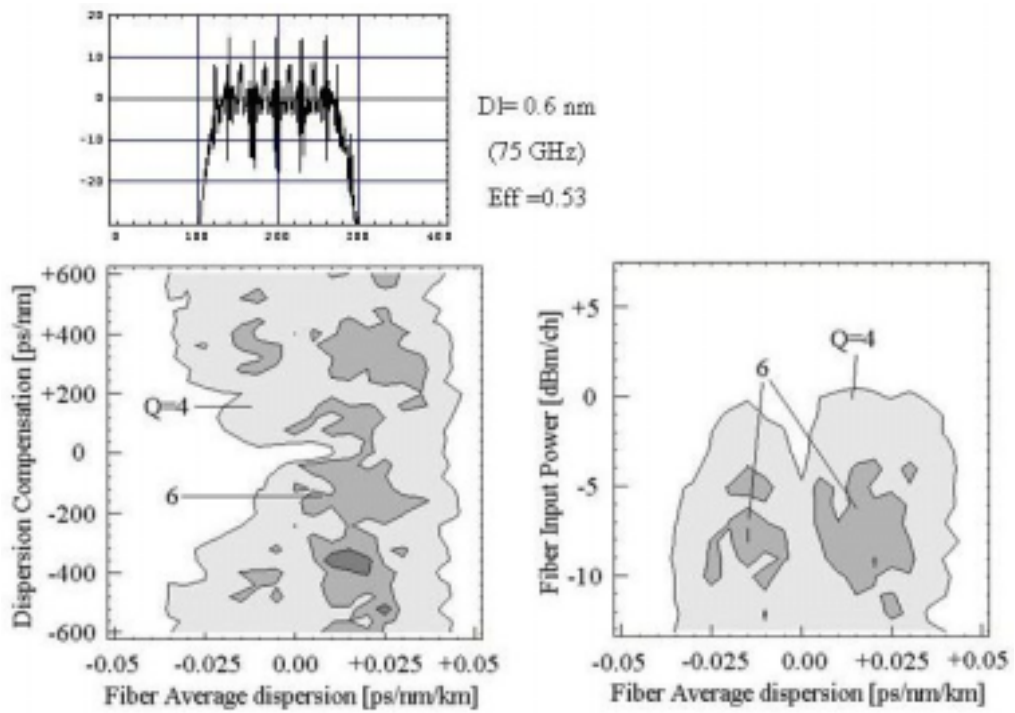


図 4.2.7 波長間隔依存性の評価（直交偏波）

( DI= 0.6 nm (75 GHz),  $P_{av}$ = -5 dBm/ch,  $L_a$ = 50 km,  $L_t$ = 1000 km )

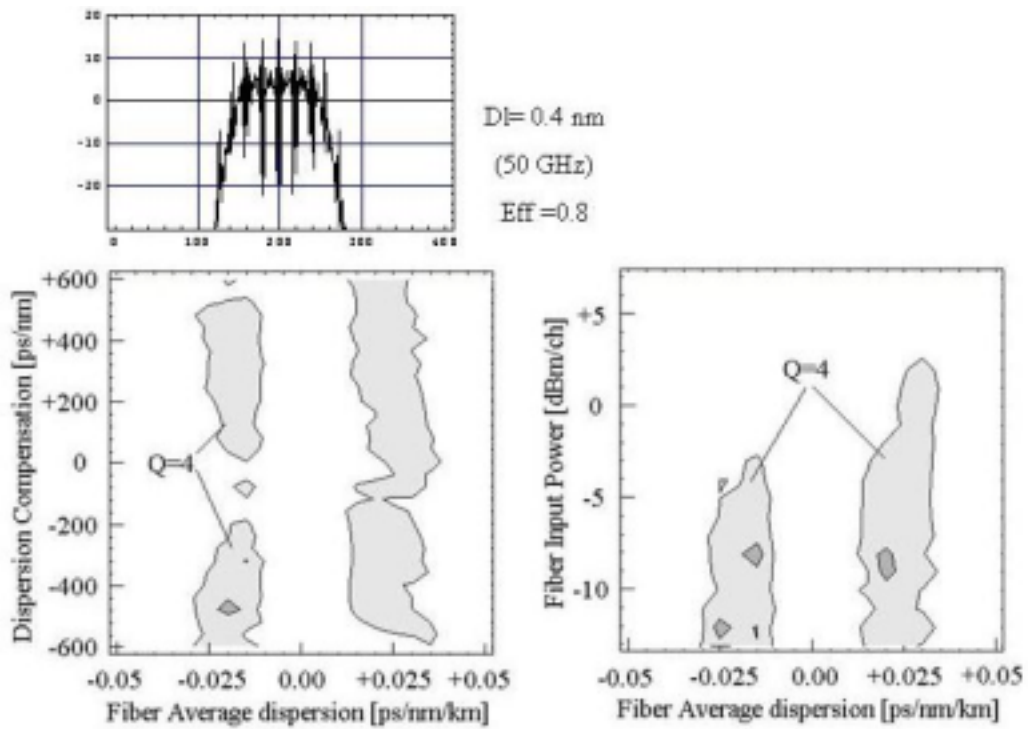


図 4.2.8 波長間隔依存性の評価（直交偏波）

( DI= 0.4 nm (50 GHz),  $P_{av}$ = -5 dBm/ch,  $L_a$ = 50 km,  $L_t$ = 1000 km )



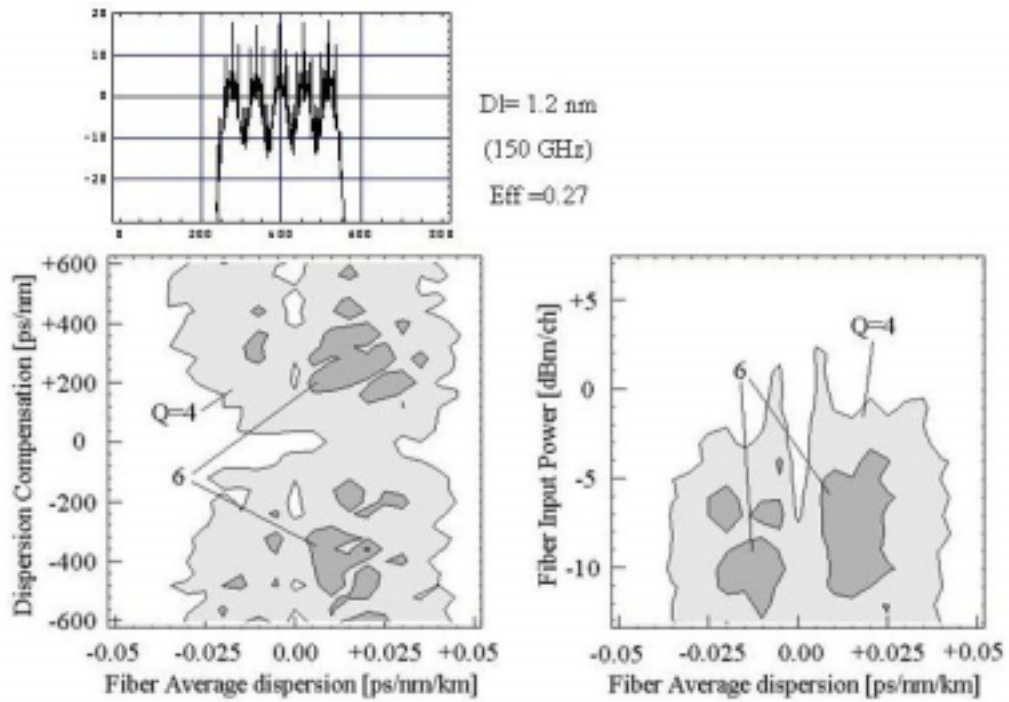


図 4.2.9 波長間隔依存性の評価 (同一偏波)

(  $DI = 1.2 \text{ nm}$  (150 GHz),  $P_{av} = -5 \text{ dBm/ch}$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$ ,  $L_t = 1000 \text{ km}$  )

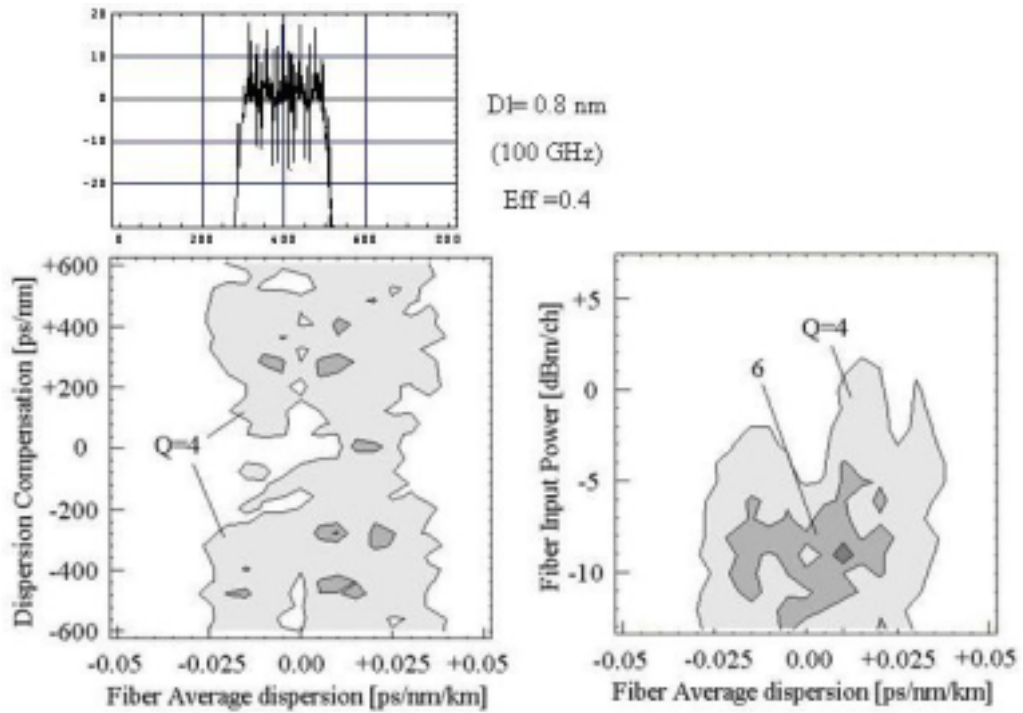


図 4.2.10 波長間隔依存性の評価 (同一偏波)

(  $DI = 0.8 \text{ nm}$  (100 GHz),  $P_{av} = -5 \text{ dBm/ch}$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$ ,  $L_t = 1000 \text{ km}$  )

## 4.2.4 信号強度の最適化

チャンネル速度 40 Gbit/s の場合、テラビット伝送には 25 波長の多重が必要となる。波長数が増えると、チャンネル間の非線形相互作用の影響が大きくなるため、信号強度を低減する必要がある。また信号強度を低減すると増幅器雑音の影響が大きくなる。非線形性と増幅器雑音のトレードオフにより最適な信号強度が決定されている。

200 GHz 間隔（周波数利用効率 0.2）で、1 波～ 9 波を波長多重した場合の伝送領域を図 4.2.11 ~ 図 4.2.15 に示す。増幅器間隔 50 km で 1000 km の伝送を行った。増幅器雑音指数は  $NF = +5$  dB である。5 波長程度までは伝送特性の劣化がみられるが、それ以上多重数を増やしても余り特性は劣化しない。これはチャンネル間相互作用において、相互位相変調等の非線形相互作用は隣接チャンネルからの影響が最も大きいことによる。最適信号強度は波長数に余り依存せず、 $-5$  dBm/ch 程度となった。この計算では有効コア断面積を  $50 \mu\text{m}^2$  としたが、通常 CRZ 伝送では有効コア断面積を  $100 \mu\text{m}^2$  程度に拡大したファイバを使用するため 2 倍の信号強度が可能であり、 $-2$  dBm/ch 程度となる。実際に表 4.1.1 の Tycom の実験 ( $A = 110 \mu\text{m}^2$ ,  $L_a = 51$  km, Raman 無し) では、 $-1.5$  dBm/ch の信号出力が使われている (3)。

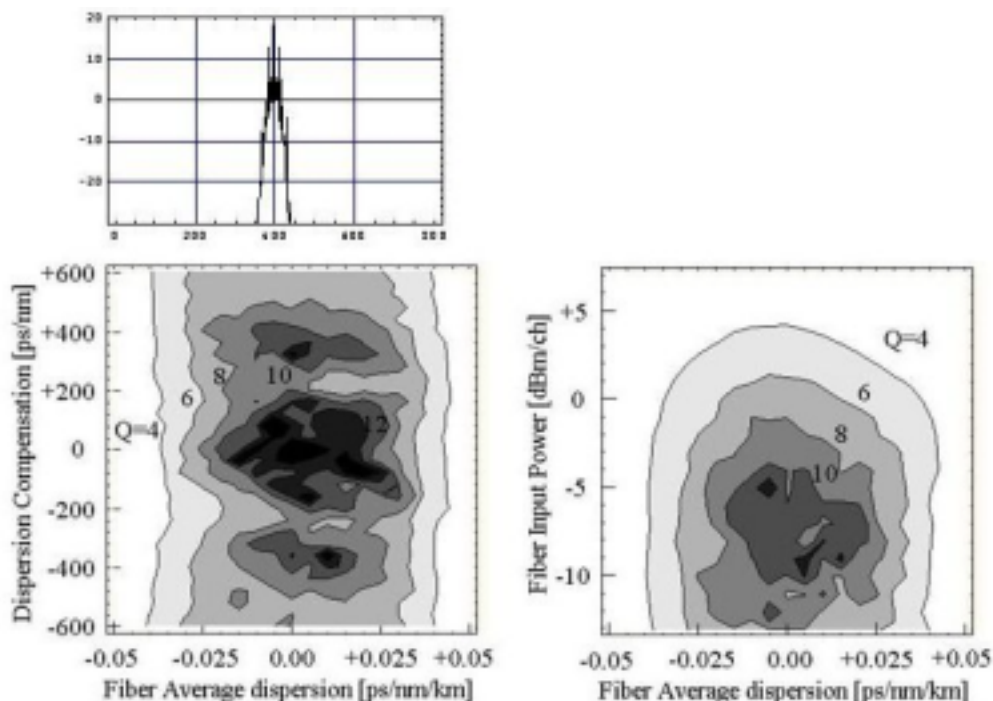


図 4.2.11 波長多重数と最適信号強度の評価（直交偏波）

( Single-channel,  $NF = +5$  dB,  $P_{av} = -5$  dBm/ch,  $D_c = +400$  ps/nm,  $L_a = 50$  km,  $L_t = 1000$  km )

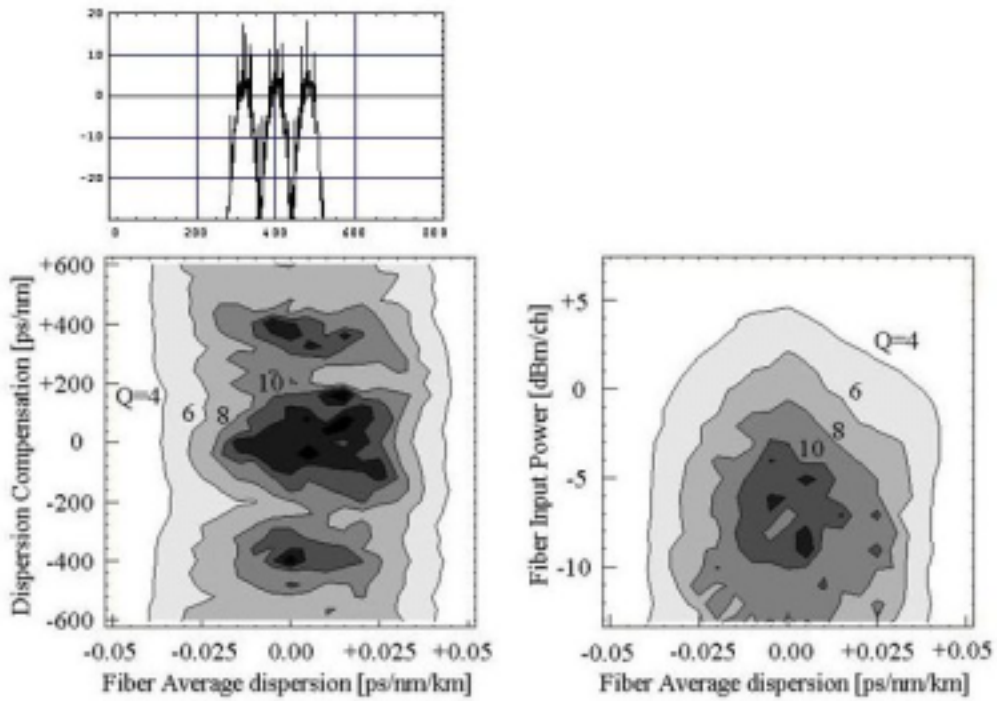


図 4.2.12 波長多重数と最適信号強度の評価 (直交偏波)

( 3-WDM (200GHz), NF= +5 dB, Pav= -5 dBm/ch, Dc= +400 ps/nm, La= 50 km, Lt= 1000 km )

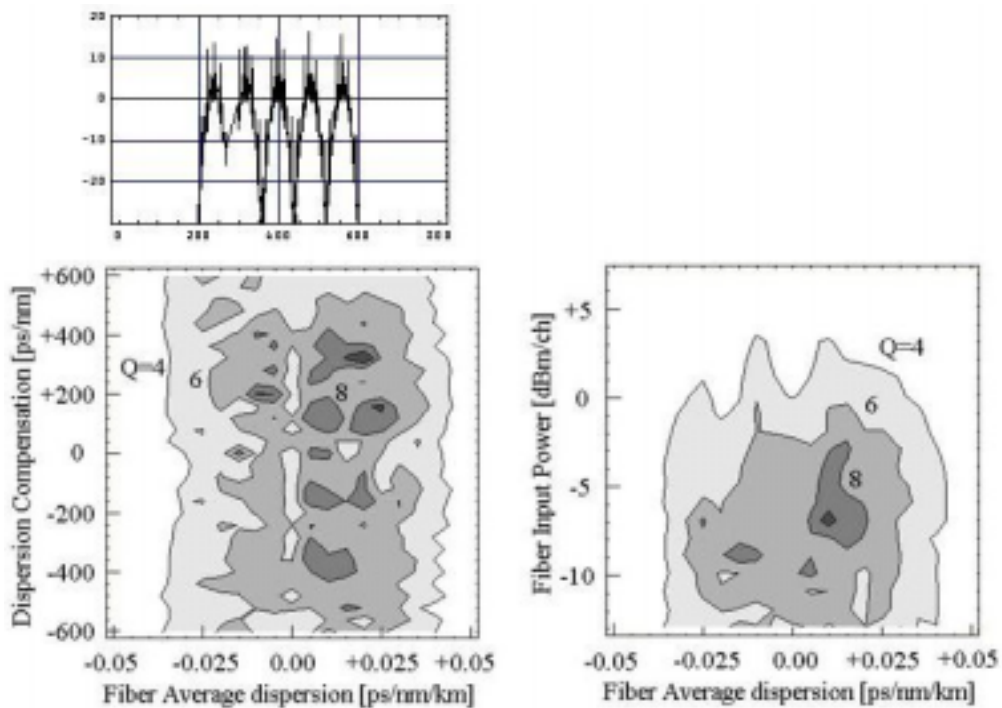


図 4.2.13 波長多重数と最適信号強度の評価 (直交偏波)

( 5-WDM (200GHz), NF= +5 dB, Pav= -5 dBm/ch, Dc= +400 ps/nm, La= 50 km, Lt= 1000 km )

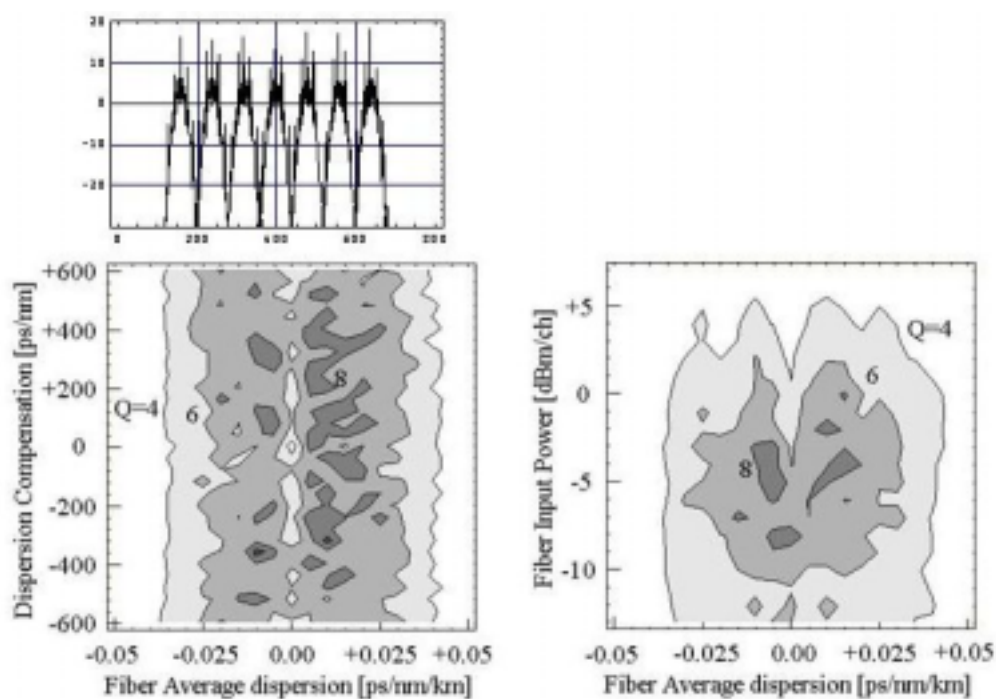


図 4.2.14 波長多重数と最適信号強度の評価 (直交偏波)

( 7-WDM (200GHz), NF= +5 dB, Pav= -5 dBm/ch, Dc= +400 ps/nm, La= 50 km, Lt= 1000 km )

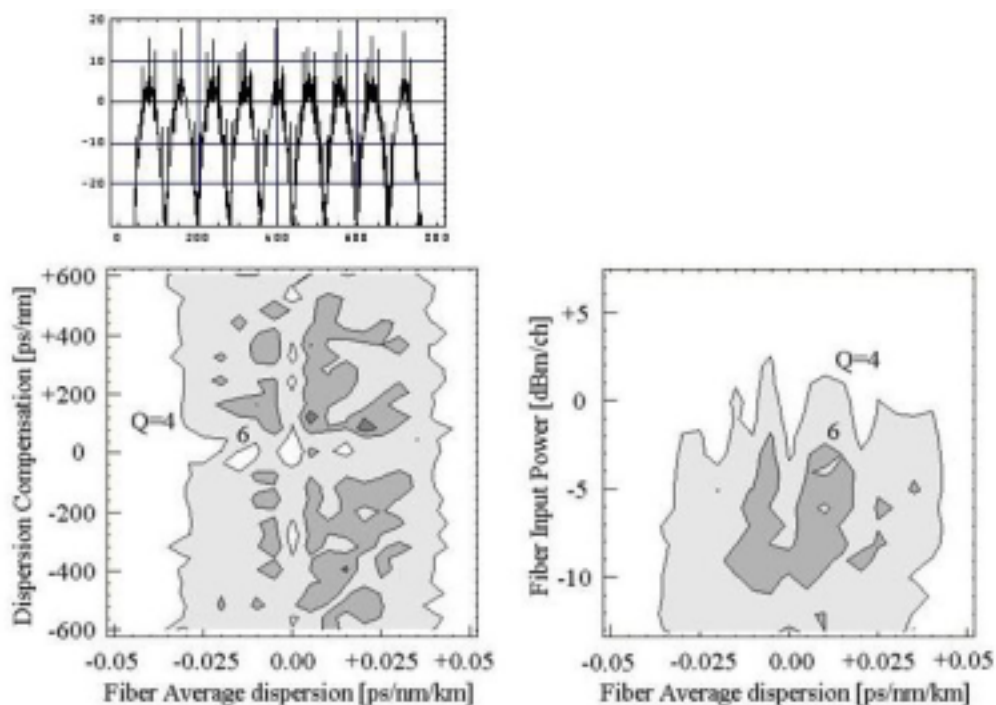


図 4.2.15 波長多重数と最適信号強度の評価 (直交偏波)

( 9-WDM (200GHz), NF= +5 dB, Pav= -5 dBm/ch, Dc= +400 ps/nm, La= 50 km, Lt= 1000 km )

## 4.2.5 ラマン増幅の検討

最近のDWDM長距離伝送実験では、増幅器雑音の低減、伝送帯域の拡大の目的でラマン増幅が用いられる場合が増えている。2001年秋には、Fujitsu からラマン増幅のみによる長距離伝送実験 (2.4 Tbit/s (10 Gbit/s, 240-ch), 7400 km ( $L_a=40$  km)) も報告されている<sup>(56)</sup>。この実験では1536.4 nm から1610.4 nm の74 nm の帯域が使用されており、周波数利用効率は0.27である。また信号強度は-8.3 dBm/chである。

図4.2.16に、9波長多重伝送で、ファイバ損失をゼロ(無損失)とした場合の伝送領域を示す。ラマン増幅を模擬しているが、雑音は考慮していない。図4.2.15と比較すると、伝送可能領域の最大信号強度が、EDFAにより離散的増幅を行った場合よりも4 dB(約1/2.5)程度低くなるが、-8 dBm/chで比較すると、Q値は6から8程度まで改善されている。これはラマン増幅を用いた場合、信号強度がほぼ一定となるため、ファイバ非線形性(SPM)の影響を受けやすくなるが、それ以上に雑音が低減される可能性があるためである<sup>(7)</sup>。

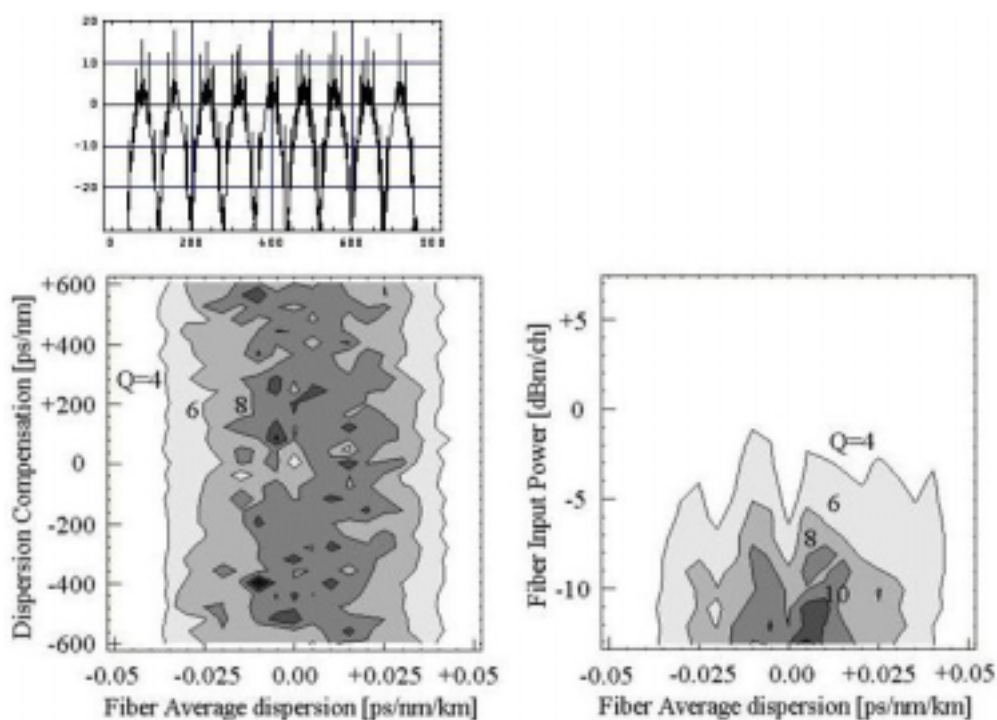


図4.2.16 ラマン増幅の評価(直交偏波)

(40 Gbit/s, 9-WDM, Raman,  $P_{av}=-12$  dBm/ch,  $D_c=+400$  ps/nm,  $L_t=1000$  km)

波長多重ソリトン伝送においてもラマン増幅技術は期待される。当初ソリトンの長距離伝送実験にはラマン増幅が用いられた<sup>(34)</sup>。波長多重ソリトン伝送では、異なるチャンネル間のソリトン衝突に伴う周波数シフトや、4光波混合の成長が問題とされている<sup>(4)</sup>。ラマン増幅で分布的増幅を行い、近似的に無損失ファイバが実現されると、これらの影響が抑制されるはずである。図4.2.17に無損失ファイバを用いた波長多重ソリトンについての計算結果を示す。40 Gbit/s/ch、7.5 ps のパルス列を、周波数間隔 200 GHz、同一偏波で 2000 km 伝送した。線路の分散補償量を +30 ps/nm とし、100 km 間隔で分散補償を行った。ファイバの損失、および分散スロープはゼロとしている。隣接チャンネルとは 104 km 毎に 1 bit ずれる。パルスの衝突距離は 31.3 km である。図4.2.17を1波伝送の場合(図4.2.1)と比較すると明らかに信号劣化が生じている。またEDFAで離散的増幅をおこなった場合(図4.2.2)と比較してもそれ程、特性は改善されていない。

チャンネル間の相互作用を抑制する他の方法として、

(1) ガイディングフィルタによる周波数シフトの抑制<sup>(4)</sup>

(2) 分散マップの工夫による衝突距離の増大とXPMの影響抑制<sup>(19)</sup>

等が提案されておりQマップによる解析を行ったが、どれも現時点では、根本的な解決策とはなっていない。

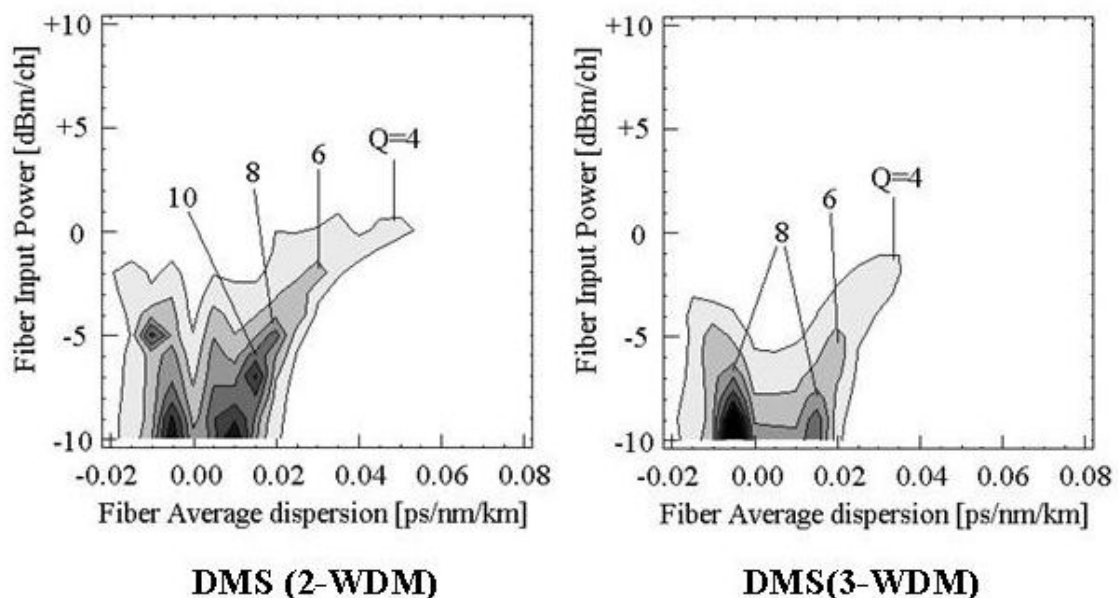


図4.2.17 ラマン増幅の評価(波長多重ソリトン)  
(40 Gbit/s/ch,  $d_l = 200$  GHz,  $D_c = +30$  ps/nm,  $L_t = 2000$  km)



## 4.2.6 テラビット級伝送システムの設計

テラビット級伝送を行う場合、分散スロープ補償が不可欠である。CRZでは線形伝送と同様に累積分散許容量はチャネル速度の2乗に逆比例する。図4.2.11等から評価すると次の実験式を得る。

$$|D_{av}| [ps/nm/km] < 48 B^{-2} L t^{-1} \quad (4.2.2)$$

ここで  $B$  [Gbit/s] はチャネル速度、 $L t$  [Mm] は総伝送距離である。

テラビット伝送に必要な波長帯域幅： $\Omega$  は、1550 nm 帯では 0.8 nm/100 GHz であるため、周波数利用効率を  $\eta$  とすると次式で評価される。

$$\Omega [nm] = \frac{8.0}{\eta} \quad (4.2.3)$$

テラビット伝送に許容される分散スロープマージンは、波長帯域幅内において(4.2.2)を満足する必要があるため、次式で評価される。

$$SI [ps/nm^2/km] < \frac{2|D_{av}|}{\Omega} = 12 \eta B^{-2} L t^{-1} \quad (4.2.4)$$

40 Gbit/s で周波数間隔を 100 GHz (周波数利用効率 0.4 bit/s/Hz) とし、1000 km 伝送する場合、波長帯域幅は 20 nm となる。(4.2.4)式から分散スロープ許容量を評価すると  $\pm 0.003$  ps/nm<sup>2</sup>/km 程度となり、非常に精密なスロープ補償が必要となることがわかる。チャネル速度 20 Gbit/s では、0.012 ps/nm<sup>2</sup>/km、チャネル速度 10 Gbit/s では、0.048 ps/nm<sup>2</sup>/km となり、かなりマージンが拡大する。通常のSMFの分散スロープが +0.06 ps/nm<sup>2</sup>/km 程度であることを考慮すると、10 Gbit/s の場合でも 1 Tbit/s, 1000 km 伝送ではスロープ補償が不可欠であることがわかる。

一般に伝送シミュレーションの計算量は波長多重数の2乗程度で増大し、DWDMシミュレーションでは膨大な時間を要する。特にチャネル間のパルスの衝突距離  $L_{coll}$  が分散距離よりも短くなる場合があり、距離刻みの設定に注意が必要である。

$$L_{coll} [km] = \frac{2 T_{FWHM}}{D \cdot \Delta \lambda} \quad (4.2.5)$$

例えば 40 Gbit/s 信号 ( $T_{FWHM} = 7.5$  ps) を 200 GHz (1.6 nm) 間隔で伝送する場合、 $D = 4$  ps/nm/km とすると、分散距離は約 3.5 km、衝突距離は約 2.3 km となる。幸い前節でみたようにチャネル間相互作用の評価は 5 波長程度でも可能であり、この性質を使ってテラビット級伝送システム設計の計算時間短縮が図られる。

### 4.3 OPGWにおけるフィールド伝送実験<sup>(20)</sup>,<sup>(57)</sup>

OPGW（光ファイバ複合架空地線）は、送電鉄塔最上部に架設された雷対策用の架空地線内部に、8～48心の光ファイバを挿入したものであり、電力会社特有の設備として主に電力保安用に使用されている。今回、大黒部幹線OPGW（城端開閉所（富山県）～市荒川発電所（福井県）：98.2 km）において光ソリトン伝送、波長多重伝送のフィールド実験を実施し、システムの適用性、シミュレーションとの対応等について調べた<sup>(20)</sup>。

図4.3.1に実験実施区間、図4.3.2に実験箇所の状況、図4.3.3にOPGWの構造ならびに敷設状況を示す。この節では、分散測定実験、RZ信号による単一波長伝送実験および4波長多重伝送実験、NRZ信号による8波長伝送実験の実施結果について述べる。

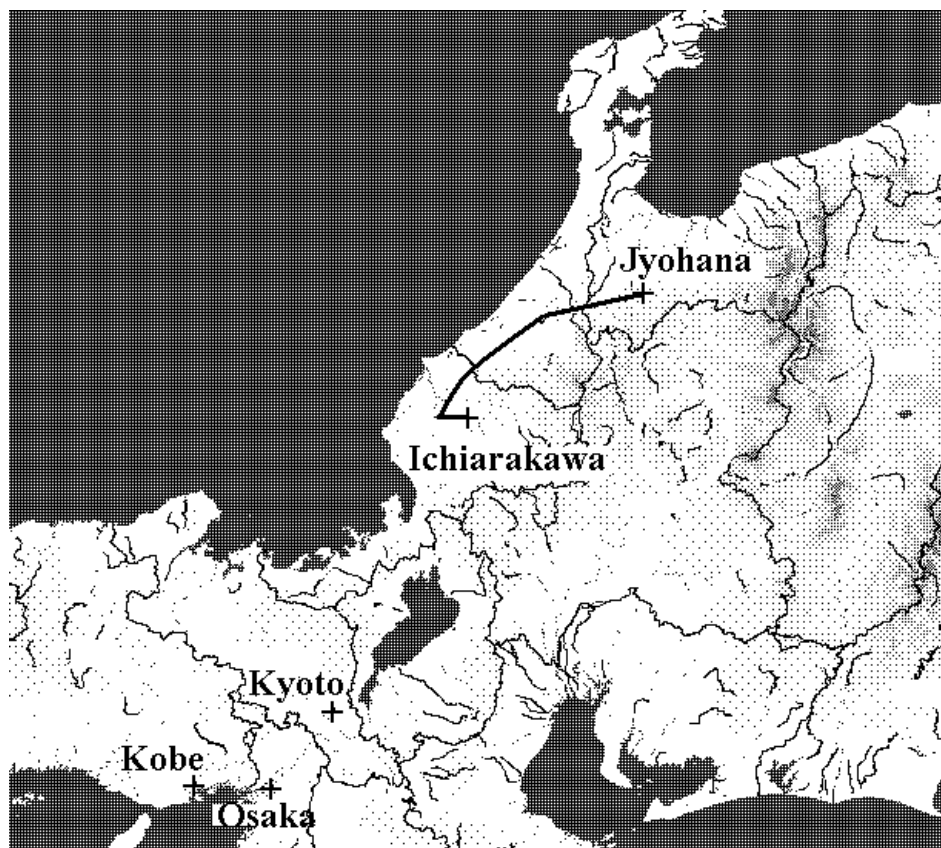


図4.3.1 OPGW伝送フィールド実験実施箇所



図 4.3.2 関西電力城端開閉所（富山県）

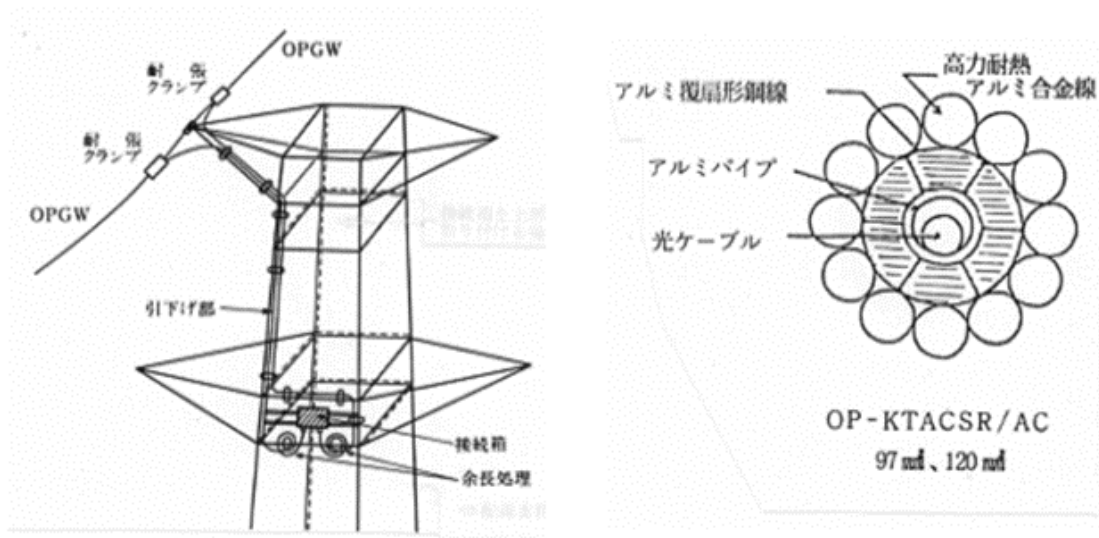


図 4.3.3 光ファイバ複合架空地線（OPGW）の構造

### 4.3.1 線路分散測定実験<sup>(57)</sup>

光ソリトン伝送では、最適な分散値で伝送する必要があるため、線路分散の測定が必要となる。今回パルス法をOPGWに適用し、ゼロ分散波長を0.1 nm、分散値を0.01 ps/nm/km程度の高精度な測定が可能となることを確認した。

ファイバ中の光波の伝搬速度は、ゼロ分散波長： $\lambda_0$ で最大となり、SMFでは1.3  $\mu\text{m}$ 、DSFでは1.55  $\mu\text{m}$ 程度である。ファイバに $\lambda_0$ 近傍の異なる波長の光パルスを伝搬させ到達時間差を測定することで $\lambda_0$ の測定が可能となる。

$\lambda_0$ から $X$  [nm]だけ離れた波長での光速 $c$ を $\lambda_0$ の近傍において2次式で近似する。

$$c = c_0 - k X^2 \quad (4.3.1)$$

ここで $c_0$ は $\lambda_0$ における光速、 $k$ は実測により決定される係数である。

長さ： $L$  [km]のファイバの伝搬時間： $t = L / c$ は、 $\lambda_0$ の光波の伝搬時間に比べて、 $t_d$ だけの時間遅れが発生する。

$$t = L / c = L / c_0 + t_d \quad (4.3.2)$$

ここで $t_d$ は次式で与えられる。

$$t_d = k X^2 L / c_0^2 \quad (4.3.3)$$

$t_d$ を $X$ で微分して時間遅れの波長依存性(分散値)を求めると、

$$\frac{d}{dX} t_d = s l X L = 2 k X L / c_0^2 \quad (4.3.4)$$

ここで $s l$  [ps/nm<sup>2</sup>/km]は分散スロープである。

(4.3.4)から、(4.3.1)の係数： $k$ は $s l$ を用いて次式で表される。

$$k = s l c_0^2 / 2 \quad (4.3.5)$$

これを(4.3.3)に代入すると、

$$t_d = s l X^2 L / 2 \quad (4.3.6)$$

一方、 $t_d$ の実測データを次の2次式で補間する。

$$t_d = a X^2 + b X + c = a \left( X + \frac{b}{2a} \right)^2 + c' \quad (4.3.7)$$

(4.3.6)、(4.3.7)の係数を比較して、ゼロ分散波長： $\lambda_0$  および分散スロープ： $sl$ は、次式で与えられる。

$$\lambda_0 = -\frac{b}{2a} \quad (4.3.8)$$

$$sl = \frac{2a}{L} \quad (4.3.9)$$

今回、大黒部幹線OPGW（城端開閉所 - 市荒川発電所間：98.2 km）の線路分散測定を実施した。測定機器の構成を図4.3.4に示す。城端側で、波長のわずかに異なる2台の光源LD1、LD2の光をEA変調器で同時に変調し、得られた光パルスをOPGWに入射する。市荒川側に到達した光パルスはサーキュレータを用いて同じファイバで城端側に折り返す。この時、光ファイバ増幅器を用いて線路損失を補償する。線路の波長分散によりパルスの伝搬速度がわずかに異なるので、城端側に戻ってきた波長の異なるパルス間に生じる到着時間差をストリークカメラで観測した。

図4.3.5に、一方のレーザ波長（LD1）を固定し、他方（LD2）の波長を変化させながら時間遅れを測定した結果を示す。時間遅れの測定値を2次式で補間し、ゼロ分散波長： $\lambda_0$  および分散スロープ： $sl$ を計算した。

今回、伝送実験に使用したOPGWの10本のファイバ心線について、ゼロ分散波長および分散スロープを測定した結果を、図4.3.6、図4.3.7に示す。この区間は分散シフトファイバ（DSF）を敷設しており、ゼロ分散波長の平均値は1550.0 nm、標準偏差1.4 nmであった。また、この区間は51本のファイバが接続されており、平均ピース長は1.92 kmである。DSFのゼロ分散波長は、通常7 nm程度のバラツキがあるが、このOPGWでは多数のファイバがランダムに接続されており、ゼロ分散の値が中心付近に極限化されていることがわかる。またファイバの分散値がばらついているため、DSFであるにもかかわらず波長多重伝送時の4光波混合の発生が抑制されている（4.3.4節参照）。

分散スロープの平均値は、+0.073 ps/nm<sup>2</sup>/km、標準偏差0.005 ps/nm<sup>2</sup>/kmであった。

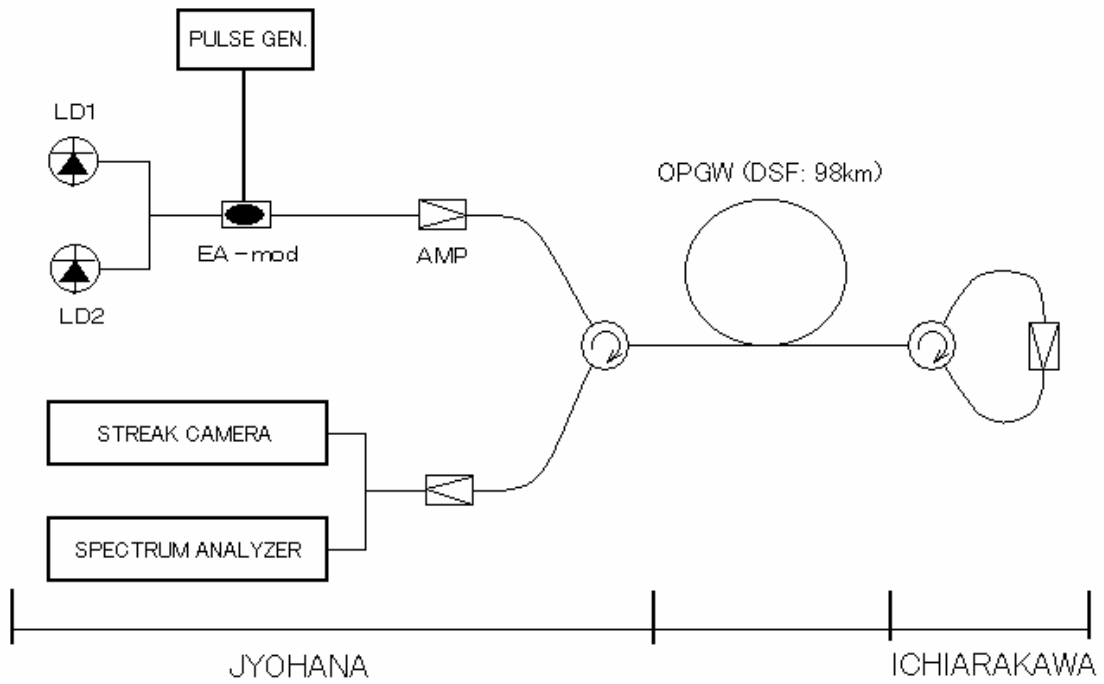


図 4.3.4 線路分散測定実験系

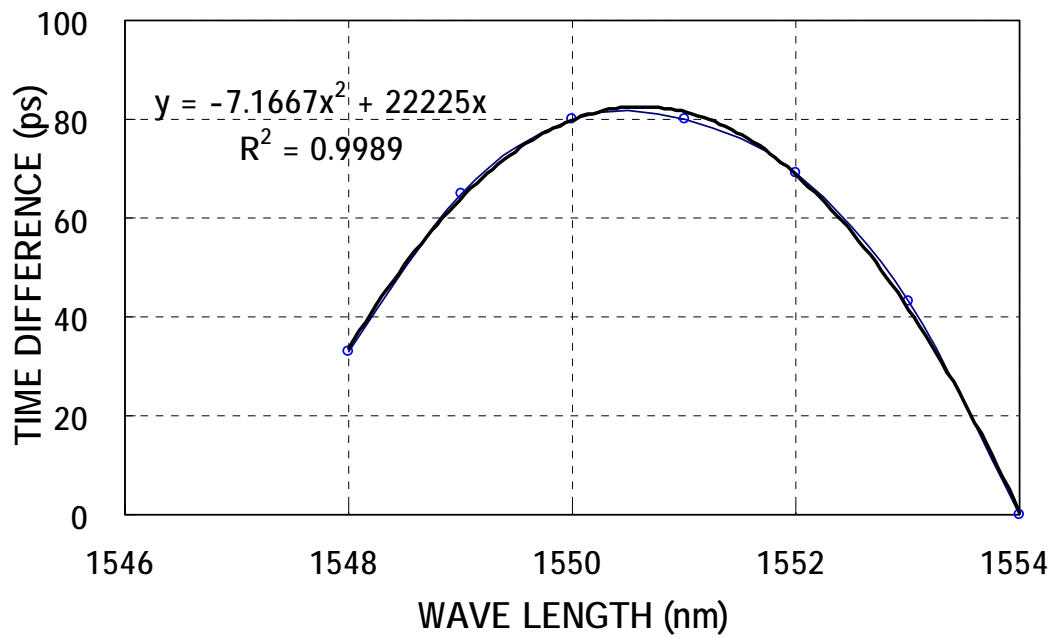


図 4.3.5 パルス法による波長分散測定例



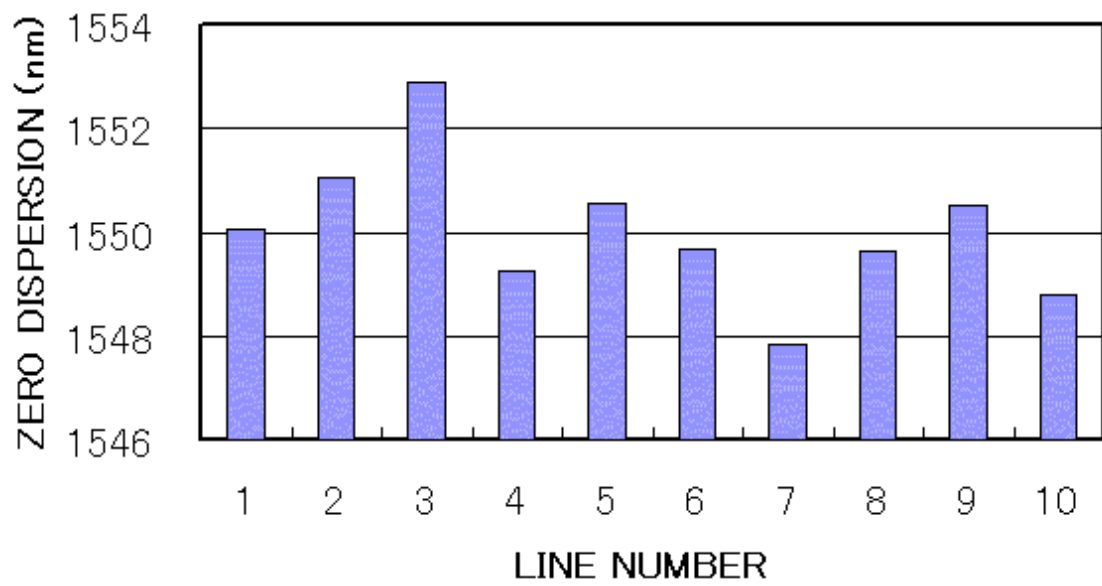


図 4.3.6 ゼロ分散波長の測定結果

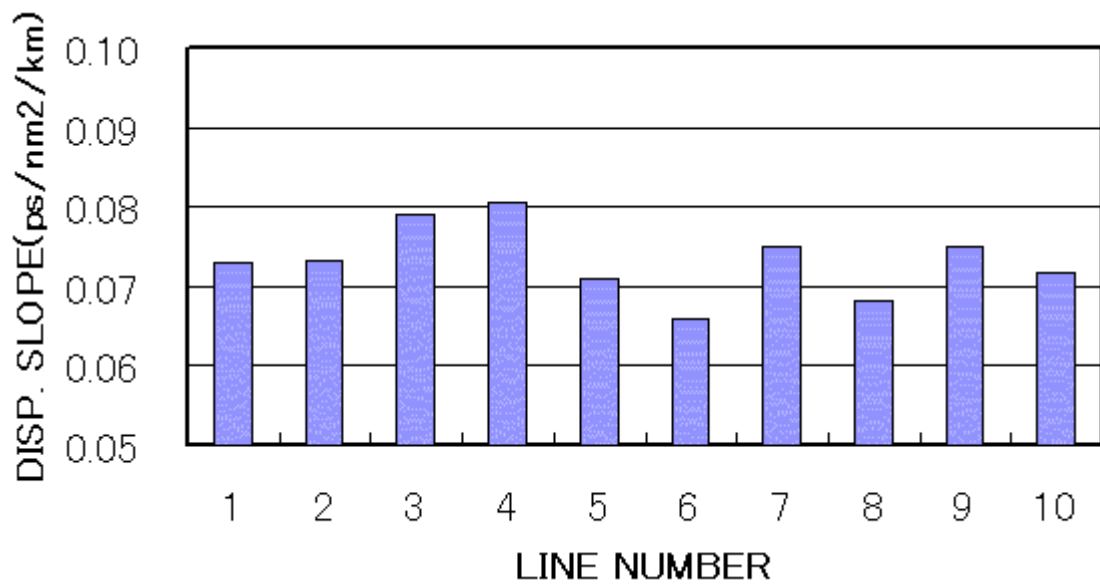


図 4.3.7 分散スロープの測定結果

### 4.3.2 光ファイバ増幅器の開発

線路損失の測定結果を図 4.3.8 に示す。平均 25.4 dB (0.259 dB/km)、標準偏差 0.55 dB であった。この線路損失を補償するため、高利得低雑音の光ファイバ増幅器を開発した(図 4.3.9)。前段を低雑音の 980 nm 励起、後段を高出力の 1480 nm 励起とし、中間に挿入したファイバグレーティングで信号帯域外の ASE をカットする。後段は 2 種類の EDFA を組み合わせて平坦な利得特性が得られるようにした。これにより出力 +17 dBm 以上、雑音指数 5 dB 以下、出力偏差 1 dB 以下 (1546 nm - 1558 nm) を達成した。

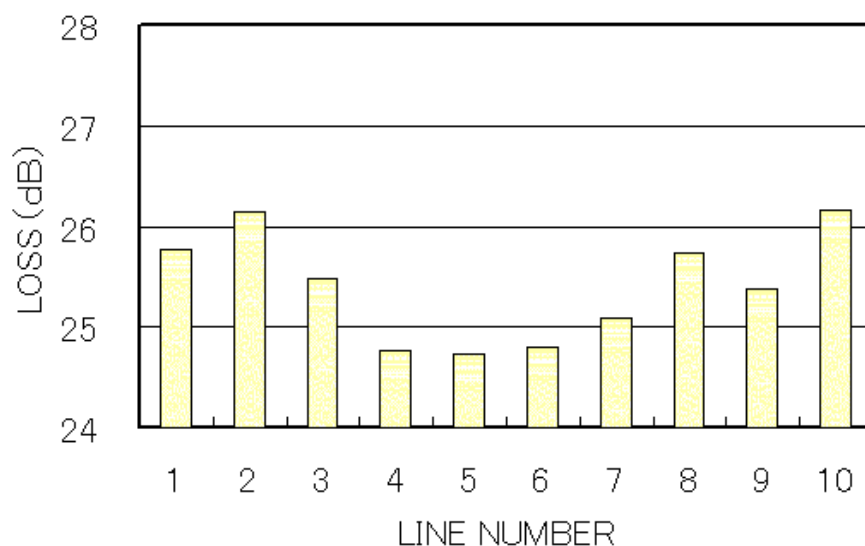


図 4.3.8 線路損失の測定結果

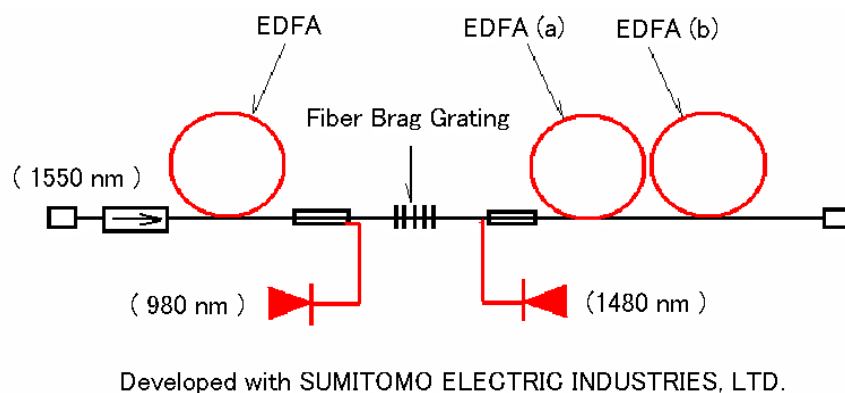


図 4.3.9 開発した光ファイバ増幅器の構造 (住友電気工業製)

開発した光ファイバ増幅器の外観および入出力特性を図 4.3.10、図 4.3.11 に示す。この結果から -26 dB の線路損失がある場合、16 波から 32 波の波長多重伝送が可能である。なお光ファイバ増幅器開発に当たっては、住友電気工業（株）の協力を得た。



図 4.3.10 光ファイバ増幅器の外観（4 系統 × 2 台）

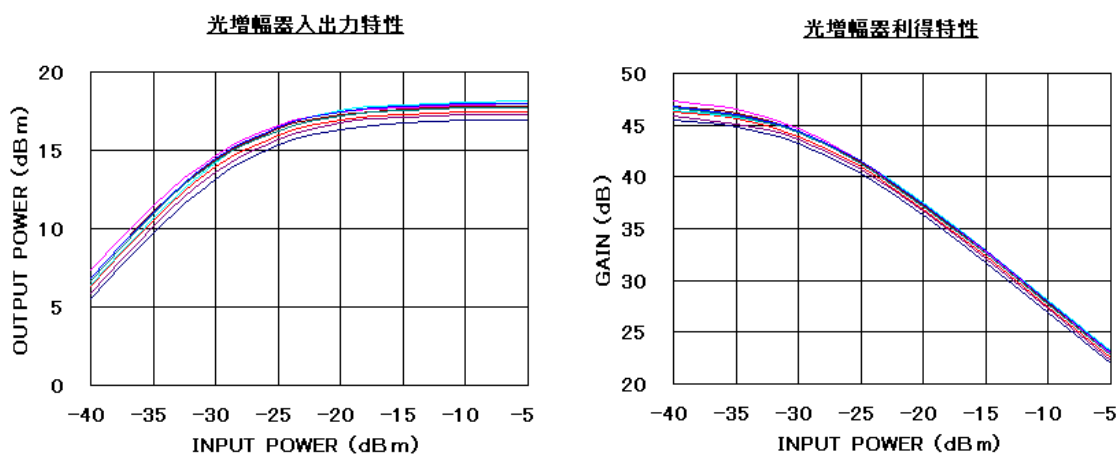


図 4.3.11 光ファイバ増幅器の入出力特性、利得特性（8 系統）

### 4.3.3 1波長伝送実験<sup>(20)</sup>

RZ信号による1波長伝送の実験系を図4.3.12に示す。城端開閉所側に送信器、受信器を設置し、市荒川発電所側で信号を折り返すことにより、長距離伝送を行った。増幅器間隔は、98.2 kmである。送信器においてLN変調器で変調を行った後にEA変調器でパルス整形を行い、波形をRZ化した。変調速度は10 Gbit/s、初期パルス幅は約15 psであった。また最適なファイバ入力パワーは+2 dBm（ピークパワー +13 dBm）であった。受信側では信号波形からクロック抽出をおこない、符号誤り率測定を行った。

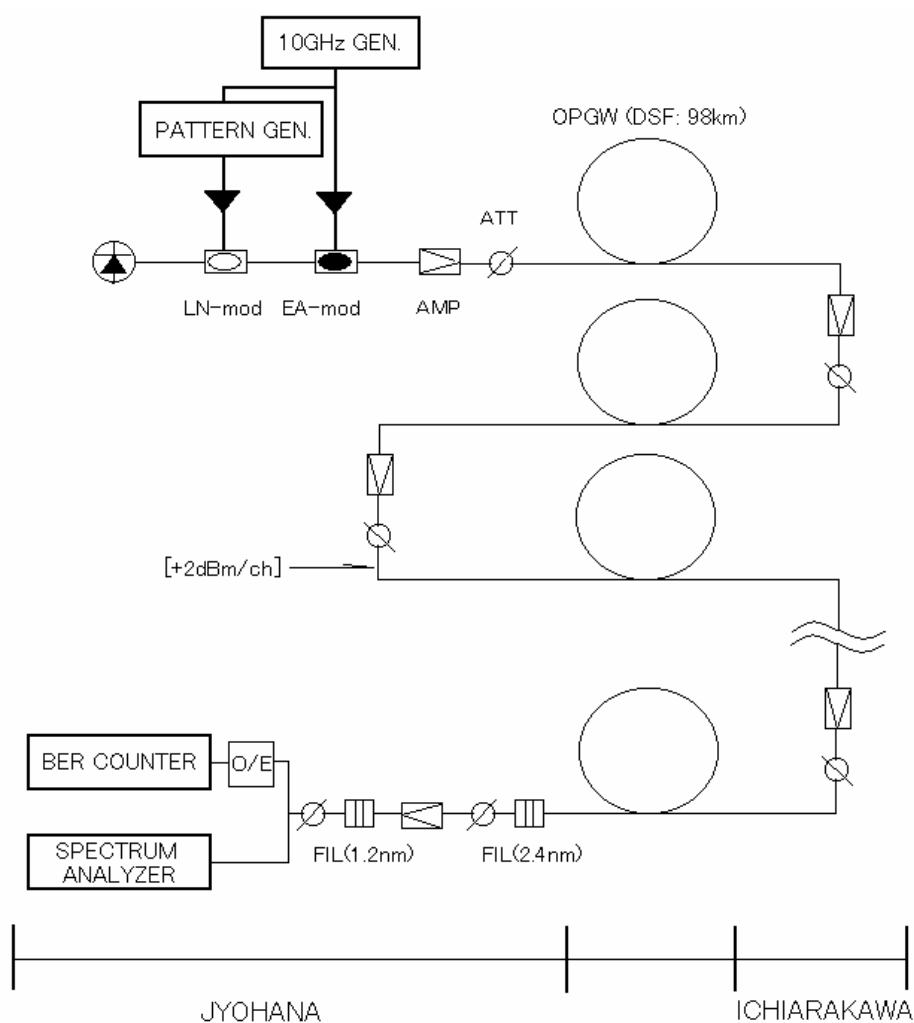


図 4.3.12 1波長伝送フィールド実験系



図 4.3.13 城端開閉所での送受信器の設置状況

図 4.3.13 に城端開閉所構内での送受信器、光ファイバ増幅器、観測装置類の設置状況を示す。伝送特性の波長依存性を調べるため、ファイバ入力を +2 dBm に固定して波長を変化させて伝送特性を調べた。分散スロープが +0.073 ps/nm<sup>2</sup>/km であるので、波長を変えることにより平均分散が変化する。1550 nm ~ 1557.5 nm の 6 種類の波長に対する 8 スパン、784 km 伝送時の符号誤り率特性 (BER) の測定結果を図 4.3.14 に示す。横軸はプリアンプ入力パワーをとっており、ノイズによるフロア傾向が出ている。波長 1556 nm (平均分散 +0.44 ps/nm/km) で最適な伝送特性が得られた。

図 4.3.15 に実験条件に対する Q マップによるシミュレーション結果を示す。ファイバ入力 +2 dBm はピークパワー +13 dBm に相当し、分散値 +0.4 ps/nm/km で最適伝送となっており、実験結果と良く一致していることを確認した。また異常分散側で良い特性が得られることから、増幅器間隔は 98.2 km と長いものの、光ソリトンの性質が現れていることを確認した。

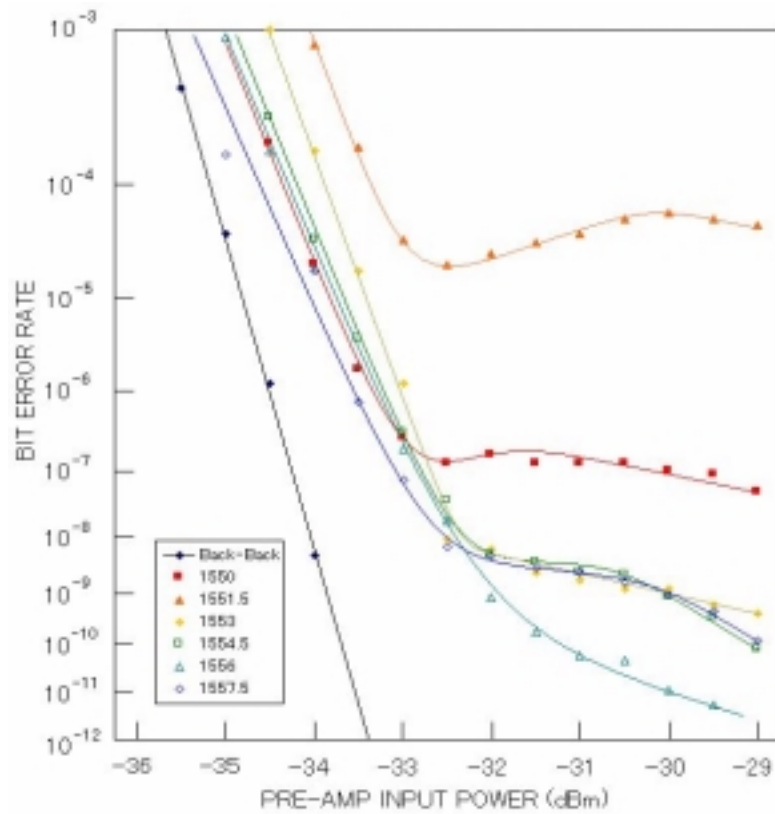


图 4.3.14 1 波長伝送実結果 (RZ, 10 Gbit/s, 784 km, +2 dBm)

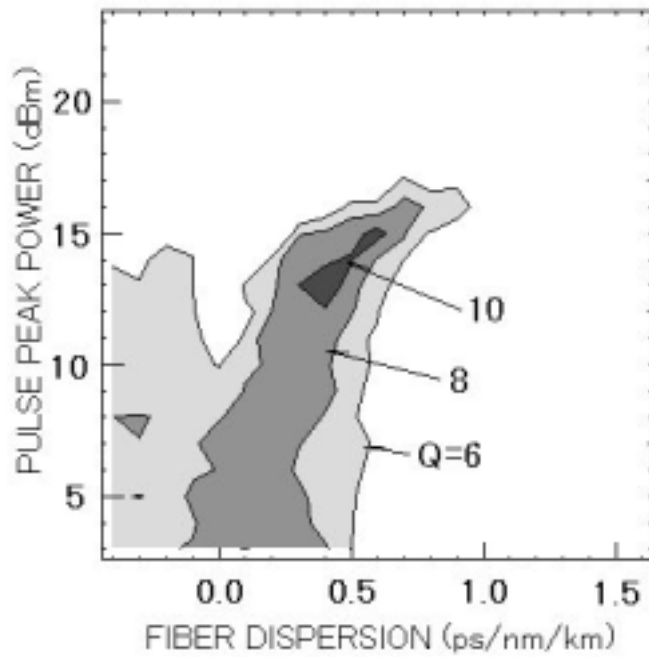


图 4.3.15 1 波長伝送シミュレーション結果 (10 Gbit/s, 784 km)



### 4.3.4 波長多重伝送実験<sup>(20)</sup>

次に、RZ信号による波長多重伝送実験を実施した。波長は1553.0 nmから1557.5 nmまで、1.5 nm間隔で均等配置し、40 Gbit/s (10 Gbit/s、4 WDM)の信号を4スパン、392 km伝送した。アンプ出力は+2 dBm/ch (ピーク強度 +13 dBm)である。

伝送前後のスペクトル測定結果を図4.3.16に示す。RZ変調後のスペクトル幅はNRZに対して約2倍となっており10 GHzのラインが認められる。信号強度が非線形領域にあるにもかかわらず4光波混合(FWM)の発生は認められない。これはOPGWが分散値の異なる多数のファイバで構成されており、FWMの成長が抑制されたと考えられる。

392 km伝送後の各チャンネルのBER測定結果を図4.3.17に示す。各波長は+0.22 ps/nm/km ~ +0.55 ps/nm/kmの異常分散領域にあるが、各チャンネルともほぼ同等の特性を示した。これはチャンネル間の非線形相互作用が支配的であるためと考えられる。

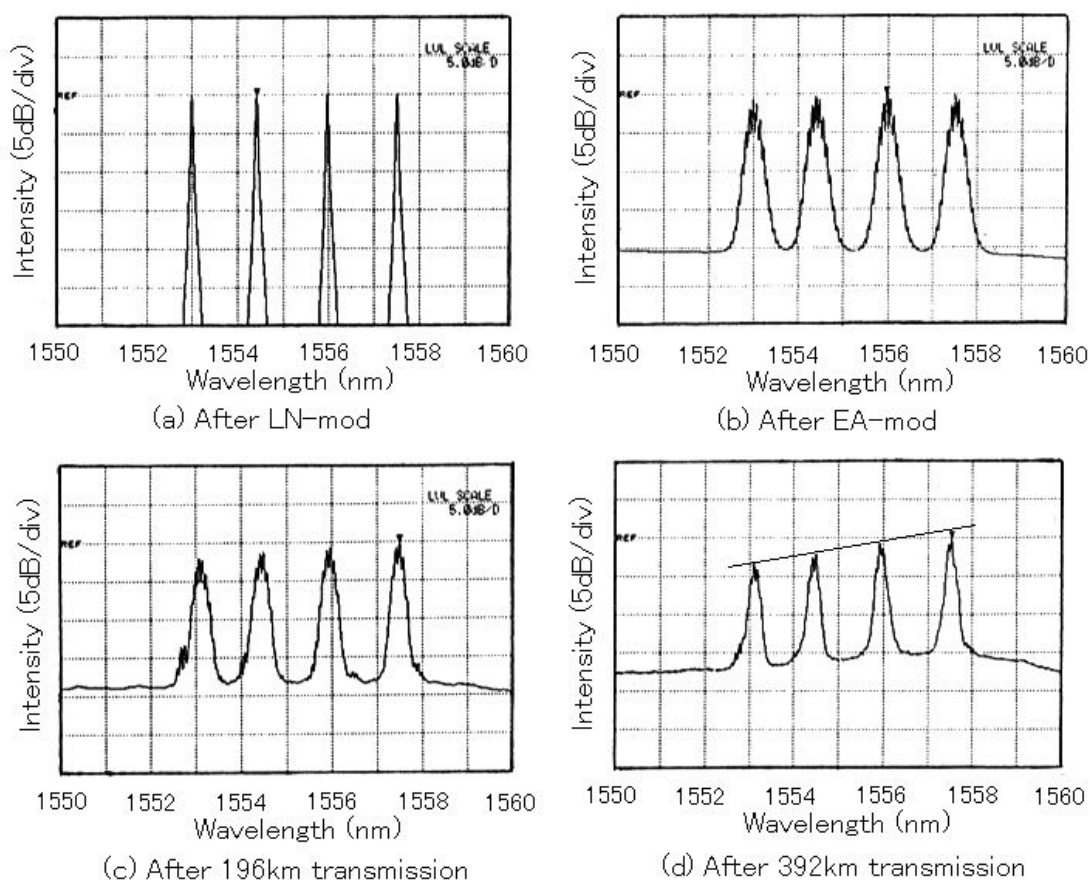


図4.3.16 4波長伝送におけるスペクトル測定結果 (RZ, +2 dBm/ch)

(a) LN変調後、(b) RZ波形整形後、(c)196 km伝送後、(d)392 km伝送後

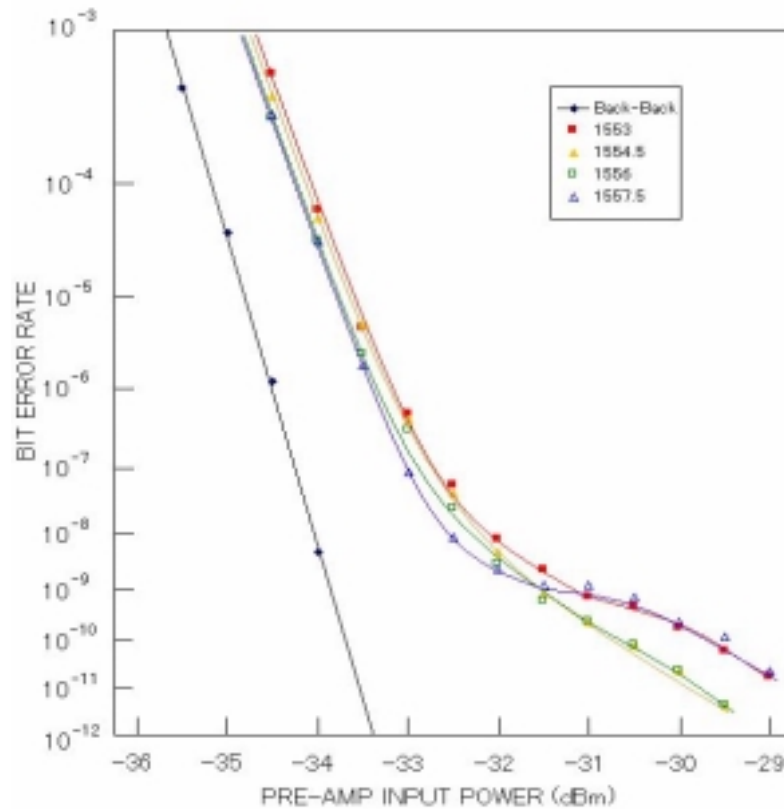


図 4.3.17 4 波長多重伝送実験結果 (RZ, 40 Gbit/s, 392 km, +2 dBm/ch)

次にNRZ信号による波長多重伝送の実験結果を示す<sup>(58)</sup>。波長は1547.5 nm から1559.0 nm まで8波長を1.5 nm 間隔(一部2.5 nm)で配置した。実験系を図4.3.18に、588 km 伝送後の誤り率測定結果を図4.3.19に示す。信号強度はRZ伝送と同じく+2 dBm/ch、8波長で+11 dBmであった。

線形伝送領域ではNRZ信号の方がRZ信号よりもスペクトル幅が狭い分、分散や増幅器雑音の影響を受けにくくなり、伝送特性が改善されたものと考えられる。またNRZ信号の場合でもRZ信号の場合と同様、4光波混合の発生はほとんど見られなかった。

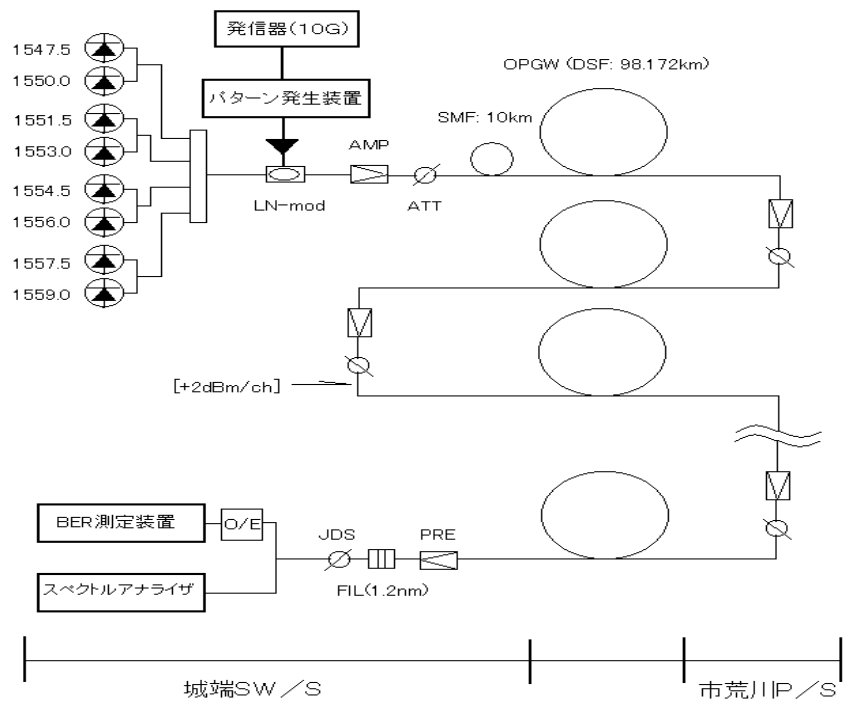


図 4.3.18 8 波長多重伝送実験系 (NRZ)

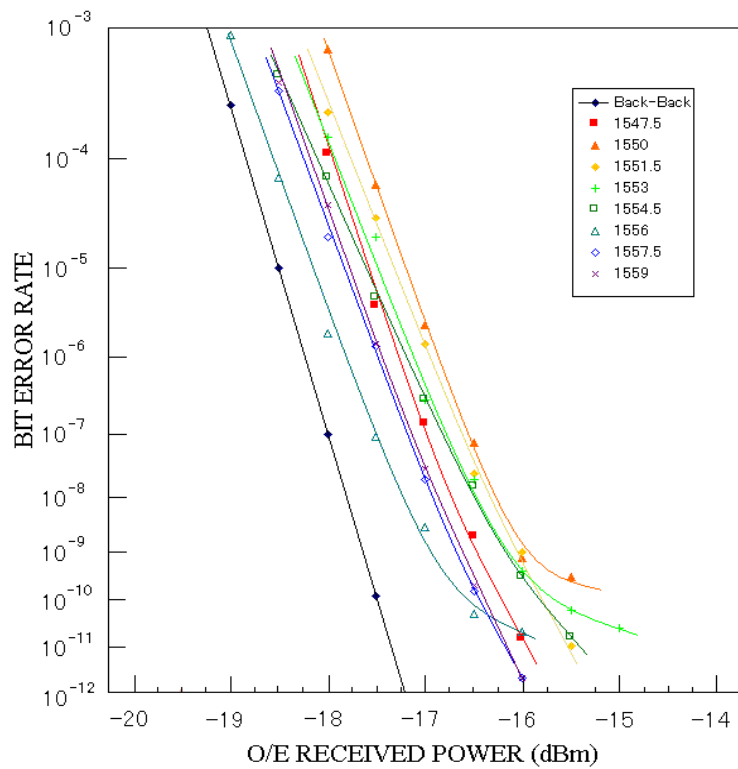


図 4.3.19 8 波長多重伝送実験結果 (NRZ, 80 Gbit/s, 588 km, +2 dBm/ch)

OPGWにおける波長多重伝送フィールド実験の結果は以下の通りである。

- (1) OPGWを用いた光ソリトン伝送フィールド実験を初めて実施し、10 Gbit/s、784 km (中継間隔 98.2 km) の信号伝送に成功した。+0.44 ps/nm/km 程度の異常分散領域で最適な伝送特性が得られ、ソリトンによる伝送特性改善効果が確認された。
- (2) 光ソリトンを安定して長距離伝送するためには信号強度の変動比を 10 : 1 程度以下に抑えることが望ましく、ファイバ減衰定数を 0.2 dB/km とすると増幅器間隔を 50 km 以下にする必要がある。今回の実験では増幅器間隔が 98.2 km、線路損失が平均 26 dB であったので振幅の変動が大きく線形伝送に近い特性となるが、ソリトン効果による異常分散側での特性改善効果は観測できた。
- (3) 増幅器出力 +2 dBm で波長を変えて分散値を変化させた場合、+0.44 ps/nm/km 程度の異常分散領域で最適な伝送特性が得られた。この値は計算機シミュレーションによる予測値と良く一致した。
- (4) また RZ 信号による 40 Gbit/s (10 Gbit/s、4 WDM) で 392 km (中継間隔 98.2 km) の伝送に成功した。この場合、各チャネルは +0.22 ps/nm/km ~ +0.55 ps/nm/km の異常分散領域にあるが、各チャネルともほぼ同等の伝送特性を示した。また単一波長伝送と較べて伝送距離は約 1/2 に低下した。これは波長多重伝送では、増幅器雑音や分散よりも、チャネル間の非線形相互作用の影響が支配的であるためと考えられる。
- (5) NRZ 信号を用いた波長多重伝送では、80 Gbit/s (10 Gbit/s、8-ch)、588 km (中継間隔 98.2 km) の伝送において、各チャネルとも  $10^{-9}$  以下の誤り率を観測した。今回のように線形伝送に近い条件ではスペクトル幅の狭い NRZの方が分散マージンや増幅器雑音の点で有利であったと考えられる。
- (6) DSFを用いた波長多重伝送であったにもかかわらず、4 光波混合 (FWM) の発生がほとんど見られなかった。これは今回用いた OPGW が、51 本 (平均ピース長 1.92 km) のファイバがランダムに接続されており、位相整合条件が各ファイバで異なるため FWM の成長が抑制されたものと考えられる。
- (7) 符号誤り率特性 (BER) にフロア傾向が出ているが、1 チャネル 784 km 伝送では 4 時間のエラーフリーを観測しており、偏波変動等による特性劣化等は観測されなかった。フロア傾向の原因のとして、プリアンプの雑音によるものと考えられる。

## 4.4 結 言

波長多重伝送システムにおいても、信号出力の上限はファイバの非線形性による波形劣化で決まっており、Qマップ法はこのような伝送系の解析にも有効であり、最適信号強度、周波数間隔、分散マージンの評価等に適用可能である。Qマップを用いた 40 Gbit/s ベースの波長多重伝送シミュレーションにより、以下のことがわかった。

- (1) CRZ伝送では、チャンネルあたりの最適信号強度はソリトン伝送と比較して 1/10 程度に低下する。その結果、増幅器雑音の抑制や誤り訂正技術等の重要性が高くなる。(図 4.2.1)
- (2)  $D_c = \pm 400$  ps/nm ( $S = 22$ ) 付近にも伝送領域が現れる。これは 1 パルスのシミュレーションでは発生しないことから、同一チャンネルの隣接パルスとの非線形相互作用によるものと考えられる。(図 4.2.3)
- (3) 波長間隔は隣接チャンネルで偏波面を直交させる場合は、100 GHz (0.4 bit/s/Hz) 程度離すことが望ましい。また同一偏波面で伝送する場合は、200 GHz 間隔(0.2 bit/s/Hz)程度離すことが望ましい。この結果は最近の実験データと一致している。(図 4.2.6)
- (4) 波長多重数は 5 波長程度までは伝送特性が劣化するが、それ以上多重しても余り劣化しない。これは、隣接チャンネルからの非線形相互作用の影響が最も大きいためである。またこの性質を利用して計算量低減が可能である。(図 4.2.13)
- (5) ラマン増幅では増幅器雑音の低減効果により、いくらか伝送特性の改善が期待できる。波長多重ソリトン伝送での相互作用抑制効果は小さい。最適信号強度は 4 dB 程度低下する。周波数帯域幅の拡大の点でもラマン増幅は重要である。(図 4.2.16) (図 4.2.17)
- (6) 1 Tbit/s (40 Gbit/s、25-ch、0.4 bit/s/Hz)、1000 km 伝送では、分散スロープ許容量が  $\pm 0.003$  ps/nm<sup>2</sup>/km 程度となり、極めて精密な分散スロープ補償が必要となる。チャンネル速度 10 Gbit/s の場合は、25 GHz 間隔 (0.4 bit/s/Hz) として、伝送距離 800 km 程度までは分散スロープ補償無しでテラビット伝送が可能となる。(4.2.6 節)

最近の研究動向として、ファイバ非線形性の影響を極力抑制し、線形伝送を指向する方向で研究が進んでいる。具体的には以下のような方策がとられている。

- (1) 有効コア断面積の拡大によるパワー密度の低減

- ( 2 ) 低雑音増幅器や低損失ファイバによる信号強度の低減
- ( 3 ) 高分散ファイバによる分散マネージメント強度の増大

もしチャンネル間の非線形相互作用を抑制する有効な手段が発見されれば、波長多重ソリトン伝送も有望と考えられる。特にソリトン衝突時の相互位相変調 ( X P M ) による周波数シフトが問題となる。以下のような提案がなされており Q マップによる解析を行ったが、現在の所、どれも根本的な解決策とはなっていない。

- ( 1 ) ガイディングフィルタによる周波数シフトの抑制
- ( 2 ) 分散マップの工夫による衝突距離の増大と X P M の影響抑制
- ( 3 ) ラマン増幅による衝突中の振幅変化の抑制

表 4.4.1 にソリトン伝送 ( D M S ) とチャープト R Z 伝送 ( C R Z ) との比較を示す。それぞれに特徴があり、適用箇所に応じて使い分けることが望ましいと考えられる。特に 40 Gbit/s で波長多重化が不要な場合は、ソリトン伝送の方がコスト、信頼性等の面で有利であると思われる。今後はネットワークアーキテクチャーとの整合性なども検討していく必要がある。

表 4.4.1 D M S 伝送と C R Z 伝送の比較 ( 40 Gbit/s/ch )

	D M S	C R Z
分散補償 : $D_c$	$\pm 30$ ps/nm ( S= 1.65 )	$\pm 400$ ps/nm ( S= 22 )
平均分散 : $D_{av}$	+ 0.03 ps/nm/km	+ 0.015 ps/nm/km
分散スロープ : $ s/ $	< 0.1 ps/nm <sup>2</sup> /km	< 0.003 ps/nm <sup>2</sup> /km
信号強度 : $P_{av}$	+ 5 dBm/ch	- 5 dBm/ch ( + 9 dBm ( 25ch ) )
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 偏波多重技術併用により 80 Gbit/s まで有利であるが WDM が困難でテラビット伝送には適さない。</li> <li>・ 高信号強度で S N 比有利、ソリトン効果により 1000km を越える伝送可能。</li> <li>・ 低コストファイバ ( 分散スロープ補償不要 ) 低コスト増幅器適用可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ WDM 伝送時も特性の大幅な劣化なし。テラビット伝送可能。</li> <li>・ 低信号強度で S N 比不利、500km までの近中距離伝送に適する。</li> <li>・ 高コストファイバ ( コア断面積拡大、分散スロープ補償 ) 高コスト増幅器 ( 広帯域、低雑音 ) 必要。</li> </ul>



