

第3章

分散補償光ソリトン線路の最適設計

3.1 序言

本章では、Qマップ法を実際の線路設計に適用する手法について述べる。与えられた諸条件（伝送距離、伝送速度、増幅器間隔等）に対して、線路や信号に関するパラメータ（分散補償量、平均分散、信号強度等）を最適化することを目的とする。周期的分散補償線路を用いた光ソリトン伝送の場合、基本的には2種類のQマップを用いて、分散補償量、平均分散値、信号強度の3つのパラメータを最適化すれば良いことがわかった⁽¹⁶⁾。これらのパラメータの大きさはチャンネル当たりの伝送速度に密接に関連しているため、10 Gbit/s から 80 Gbit/s までの伝送計算を行い、伝送速度に対するスケーリング則を導出した。2章で考察したように光ソリトン伝送の最適信号強度は伝送速度や増幅器間隔に基本的に依存しないが、分散補償を行った場合にも成立することがQマップによる解析からわかった。

最近研究が活発になっているチャンネル速度 40 Gbit/s 線路では最適分散補償量が分散補償距離に依存せず、 ± 30 ps/nm 程度で一定値となること、また分散補償素子の設置位置が伝送特性に重要な影響を与えることを示した⁽¹⁶⁾。80 Gbit/s ではファイバの分散スロープや分散ゆらぎの影響を受け、通常の分散シフトファイバを用いた伝送は困難となる。この領域では、分散スロープ補償や高密度分散マネージメント技術が検討されているが^{(12), (51)}、実用的にはファイバのコストが問題となる。また偏波多重技術を併用すれば、通常のファイバを用いた 80 Gbit/s 伝送も可能となる⁽⁵²⁾。

シミュレーション結果と実験結果との比較のため、40 Gbit/s、640 km 室内伝送実験、80 Gbit/s (40 Gbit/s, 2 PDM)、800 km 伝送実験を行い、計算結果との一致を確かめた。これらの結果からQマップ法による光ソリトン伝送システム設計の有効性を実証した。心線数の確保が比較的容易な国内通信においては、ファイバ当たり 40 Gbit/s から 80 Gbit/s 程度の単一波長光ソリトン伝送がコスト的に有利となる可能性があり、ネットワークアーキテクチャーの研究とあわせて検討していく必要がある。

3. 2 Qマップ法による分散補償線路の最適設計

QマップはQ値を2種類のパラメータ平面上で評価した図である。パラメータを変更することにより複数種類のQマップが定義できる。この節ではQマップを用いて最適設計をおこなう手順について具体的に考察する。またチャンネル速度が 10 Gbit/s から 80 Gbit/s の伝送システムに適用して最適パラメータ値を評価するとともに、伝送速度に対するスケールリング則を導出する。

実際の分散補償線路の最適設計の手順は以下ようになる。次節で述べる対象型分散補償を採用した場合、初期チャープはゼロとしてもほぼ最適伝送が得られるので、本節では初期チャープの最適化は行っていない。

- (1) 信号強度を仮定し、平均分散と分散補償量をパラメータとしたQマップを用いて、分散補償量を最適化する。
- (2) (1) で得られた分散補償量に対して、平均分散と信号強度をパラメータとしたQマップを用いて、平均分散、信号強度を最適化する。
- (3) 上記 (1)、(2) を繰り返しさらに最適化する。

3. 2. 1 対称型周期的分散補償線路

2章において周期的分散補償線路のモデル化をおこなった (図 2.4.1)。ここでは、その改良型として図 3.2.1 のモデルを用いる。この分散マップでは、分散補償間隔 $2Nc$ は偶数であり、各分散補償区間において分散マップが対称 (symmetrical) になっている。その結果、分散補償ソリトン安定解との整合性がはかれるとともに、入出力端でのパルス広がりが抑制され伝送特性が改善される。最近の長距離大容量伝送実験においても対称型の分散マップが使われる場合が多い⁽²⁾。

光線路は一様な分散値 D を持つ伝送用ファイバと、分散補償素子 Dc により構成される。伝送用ファイバの分散値としては、負値 (正常分散)、または正值 (異常分散) をとることができる。この時、平均分散: Dav は、次式で与えられる。

$$D_{av} = D + \frac{Dc}{2Nc \cdot La} \quad (3.2.1)$$

ここで、 Nc は分散補償間隔、 La は増幅器間隔である。

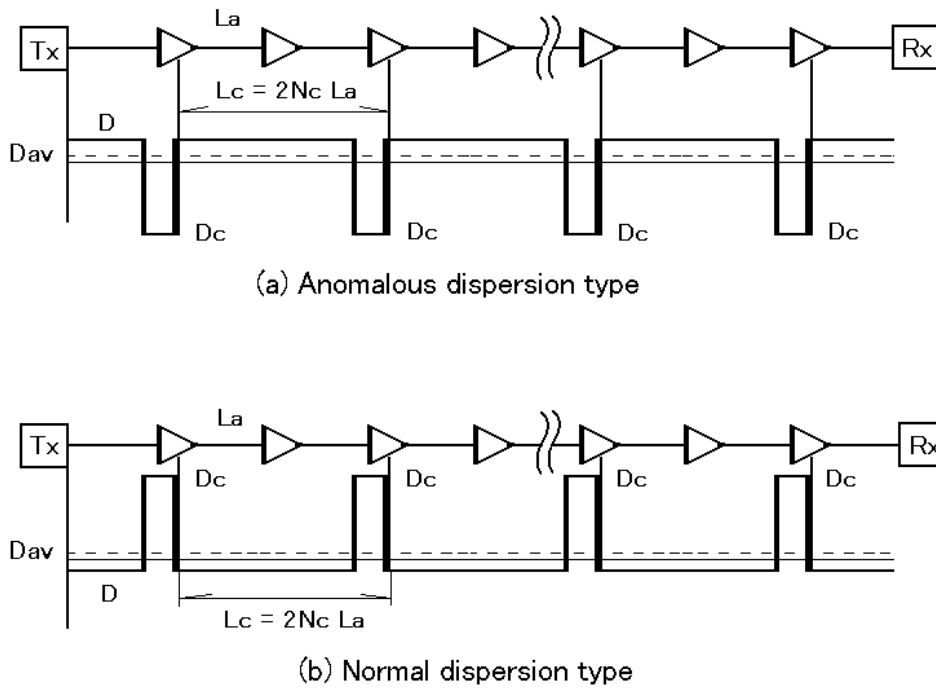


図 3.2.1 周期的分散補償線路のモデル化 (対称型)

図 3.2.2 に 40 Gbit/s の周期的分散補償線路におけるパルス幅の計算例を示す。図 2.4.1 の非対称型線路において、各分散補償素子の出口におけるパルス幅を、全伝送区間でプロットしたものと、伝送中のパルス幅の変化を距離方向に詳しくプロットしたものである。各増幅器において 6 nm のフィルタを使用している。 $D_c = +20$ ps/nm (Normal) および $D_c = -20$ ps/nm (Anomalous) の場合ともにフィルタによりパルスが安定化されていることがわかる。また伝送中のパルス幅については、100 km 毎に挿入された分散補償素子の中間点付近において極小になっていることがわかる (Chirp free point)。また平均的なパルス幅については、正常分散線路の方がやや大きくなる⁽⁵⁰⁾。

図 3.2.3 に 40 Gbit/s 線路において、縦軸に初期パルス幅、横軸に平均分散をとった Q マップを示す。信号強度は +5 dBm で一定とした。周期的分散補償線路に初期パルス幅は、ビットスロット (25 ps) の $30 \pm 5\%$ (7.5 ± 1.25 ps) が最適であることがわかる。以下のシミュレーションにおいて、初期パルス幅 (FWHM) はビットスロットの 30% としている。

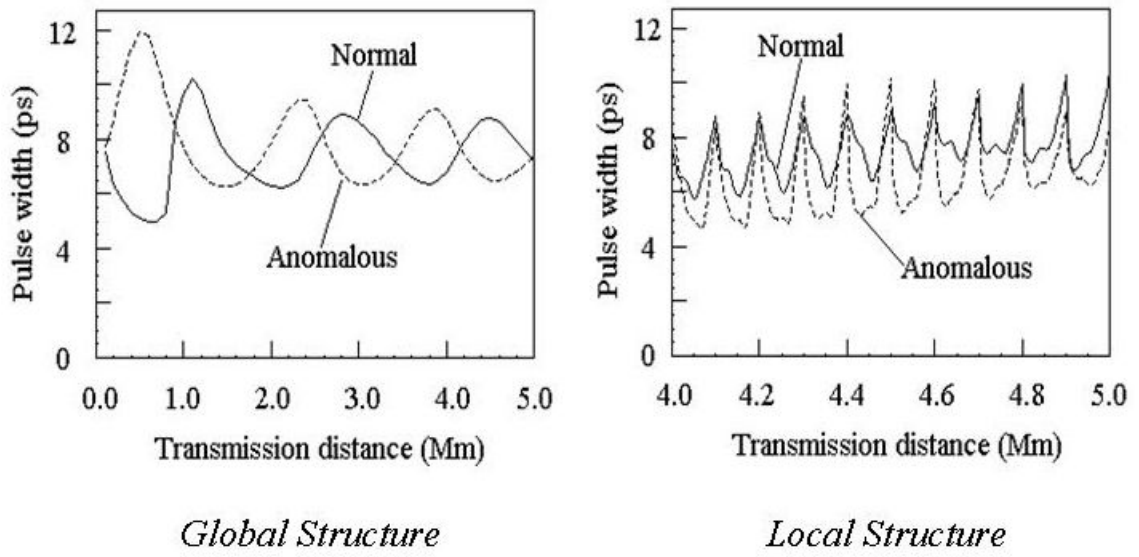


図 3.2.2 周期的分散補償線路におけるパルス幅（非対称型）
 (40 Gbit/s, $P_{av} = +5$ dBm, $L_c = 100$ km, $D_c = \pm 20$ ps/nm, $fw = 6$ nm)

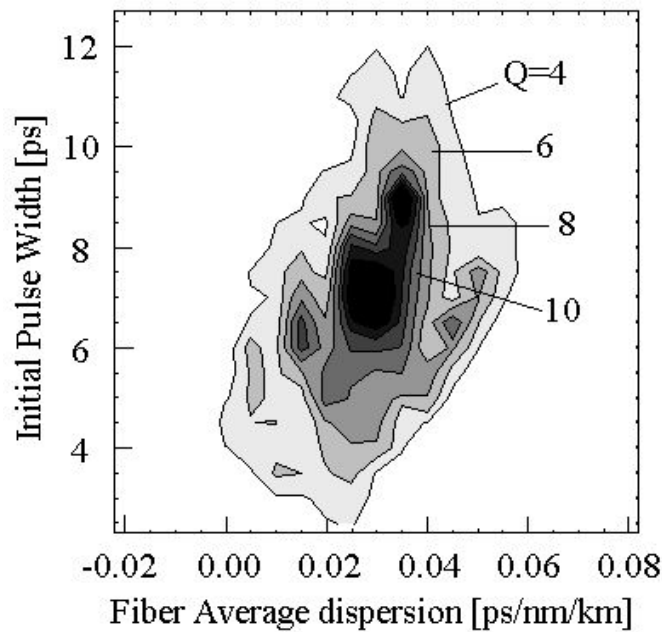


図 3.2.3 周期的分散補償線路における初期パルス幅依存性（対称型）
 (40 Gbit/s, $P_{av} = +5$ dBm, $N_c = 1$, $L_a = 50$ km, $L_t = 3$ Mm, $D_c = +30$ ps/nm)

3. 2. 2 10 Gbit/s 伝送線路の最適化

周期的分散補償線路の特性は2種類のQマップ：平均分散-分散補償 ($D_{av}-D_c$) および、平均分散-信号強度 ($D_{av}-P_{av}$) で特性の概要を把握することが可能である。図 3.2.4 に 10 Gbit/s、10000 km 線路に対するQマップの一例を示す。初期パルス幅を 30 ps とした。ファイバの減衰定数を 0.2 dB/km、増幅器間隔を 50 km とし（ソリトンの安定性を考慮）⁽³³⁾、増幅器雑音は入れていない。各増幅器には 1.5 nm 幅のフィルタを挿入し、増幅器雑音は考慮していない。分散スロープは+0.07 ps/nm²/km としている。

$D_{av}-D_c$ の図では、信号強度は+5 dBm に固定されている。平均分散の値が正（異常分散領域）に伝送領域が2カ所、ほぼ対称な形で存在することがわかる。 $D_{av}-P_{av}$ の図では、分散補償量は+300 ps/nm に固定されている。分散補償間隔 ($L_c=2 N_c L_a$) は 100 km であるので、線路分散は-2.76 ps/nm/km の正常分散である。平均分散の値が大きくなる程、信号強度も強くする必要があることがわかる。これはソリトンが分散性と非線形性のバランスにより維持されているためである。

図 3.2.4 から最適伝送条件を評価すると、次の数値を得る。

- (1) 分散補償量 : $D_c = \pm 300$ ps/nm
- (2) 平均分散 : $D_{av} = +0.24$ ps/nm/km
- (3) 信号強度 : $P_{av} = +5$ dBm

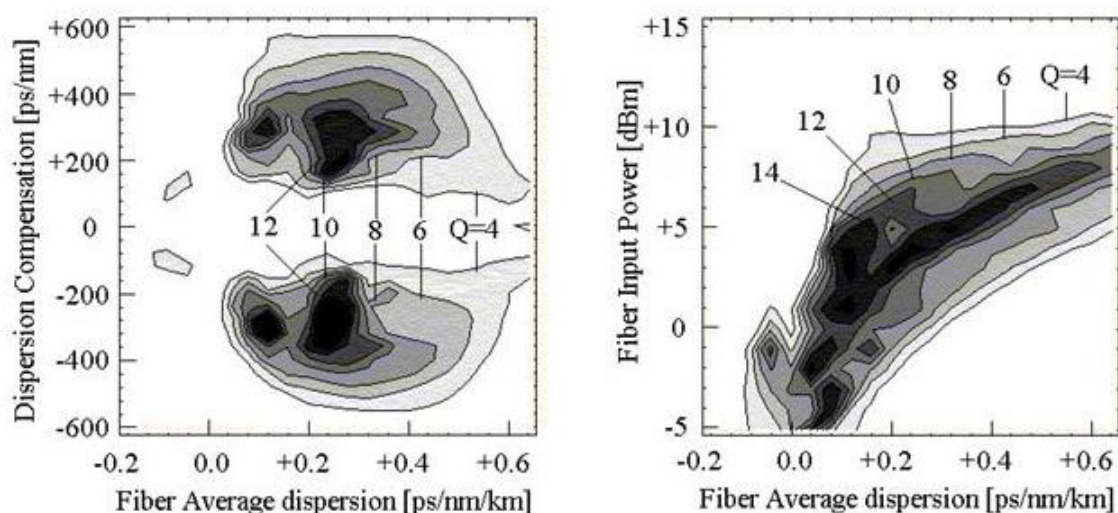


図 3.2.4 10 Gbit/s 線路におけるQマップ

($N_c=1$, $L_a=50$ km, $L_t=10$ Mm, $P_{av}=+5$ dBm, $D_c=+300$ ps/nm, $NF=-100$ dB)

図 3.2.5 に $N_c = 2$ 、および $N_c = 3$ とした場合の平均分散-信号強度の Q マップを示す。分散補償量は $+300$ ps/nm に固定されている。分散補償間隔 ($L_c = 2 N_c L_a$) はそれぞれ 200 km、 300 km であるので、平均分散を $+0.24$ ps/nm/km とした時の線路分散はそれぞれ、 -1.26 ps/nm/km および -0.76 ps/nm/km の正常分散となる。 N_c が大きくなる程、平均分散の大きい所で伝送しにくくなるが、ゼロ分散近傍におけるパワーマージンは拡大している。

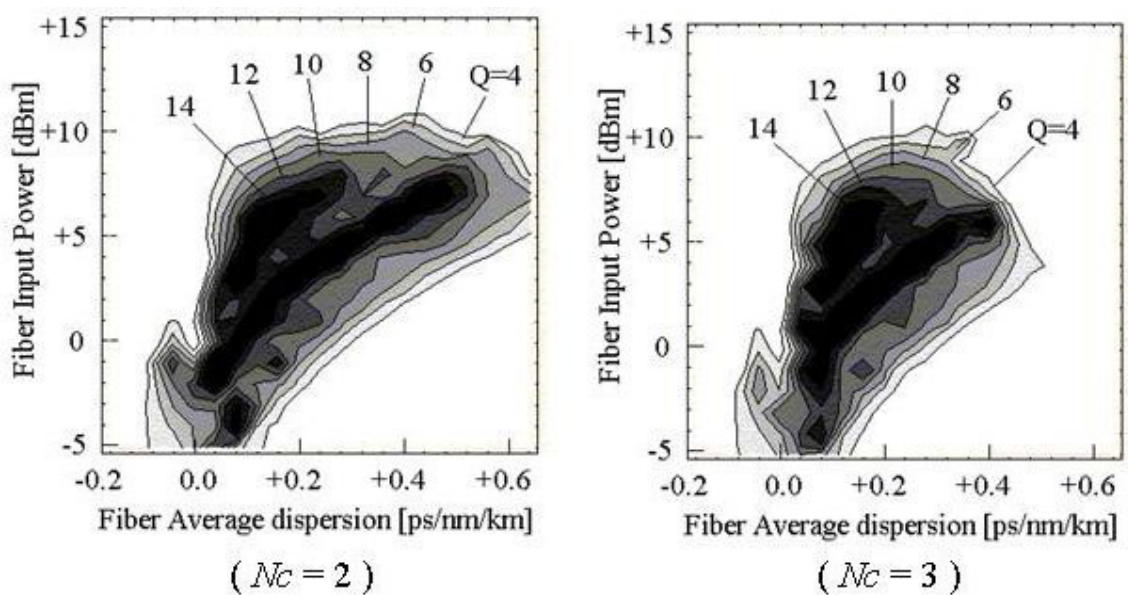


図 3.2.5 10 Gbit/s 線路における Q マップ

($N_c = 2 / N_c = 3$, $L_a = 50$ km, $L_t = 10$ Mm, $D_c = +300$ ps/nm, $NF = -100$ dB)

3. 2. 3 20 Gbit/s 伝送線路の最適化

図 3.2.6 に 20 Gbit/s、6000 km 線路に対する Q マップの一例を示す。初期パルス幅を 15 ps とし、増幅器間隔を 50 km としている。各増幅器には 3 nm 幅のフィルタを挿入し、増幅器雑音は考慮していない。分散スロープは $+0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ としている。

$D_{av}-D_c$ の図では、信号強度は $+5 \text{ dBm}$ に固定されている。平均分散の値が正（異常分散領域）に伝送領域が 2 カ所、ほぼ対称な形で存在することがわかる。 $D_{av}-P_{av}$ の図では、分散補償量は $+80 \text{ ps/nm}$ に固定されている。分散補償間隔 ($L_c=2 N_c L_a$) は 100 km であるので、平均分散を $+0.08 \text{ ps/nm/km}$ とした時の線路分散は -0.72 ps/nm/km の正常分散である。

図 3.2.6 から最適伝送条件を評価すると、次の数値を得る。

- (1) 分散補償量 : $D_c = \pm 80 \text{ ps/nm}$
- (2) 平均分散 : $D_{av} = +0.08 \text{ ps/nm/km}$
- (3) 信号強度 : $P_{av} = +5 \text{ dBm}$

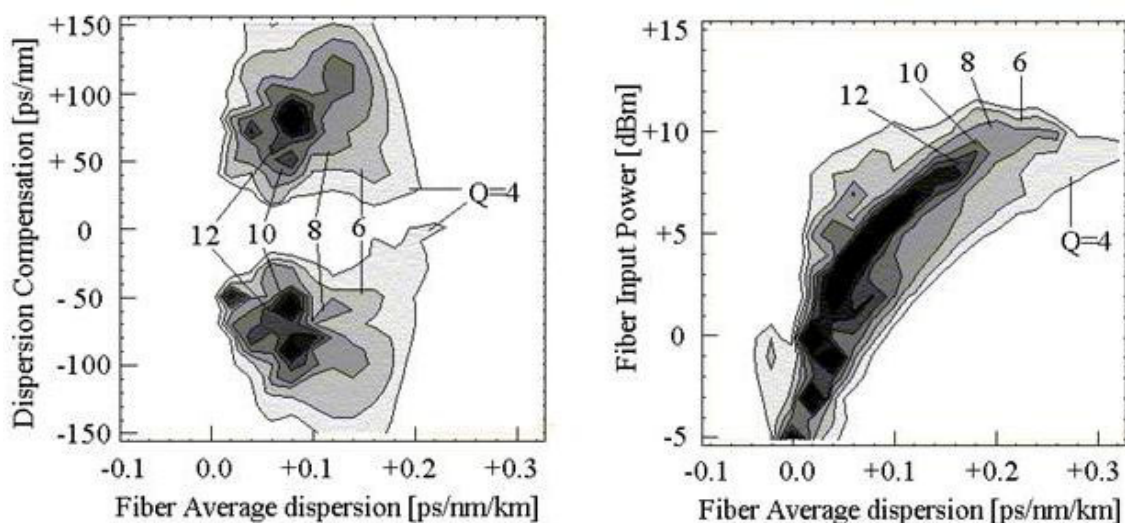


図 3.2.6 20 Gbit/s 線路における Q マップ

($N_c=1$, $L_a=50 \text{ km}$, $L_t=6 \text{ Mm}$, $P_{av}=+5 \text{ dBm}$, $D_c=+80 \text{ ps/nm}$, $NF=-100 \text{ dB}$)

図 3.2.6 と同じ条件で 10000 km 伝送した場合の Q マップを図 3.2.7 に示す。最適伝送条件は 6000 km 伝送の場合とほとんど同じである。最近、20 Gbit/s ベースの波長多重伝送で 9000 km の伝送距離が報告されたが、線形伝送（信号強度 < 0 dBm）の場合は分散マージンが小さく非常に精密な分散管理が必要となることがわかる。

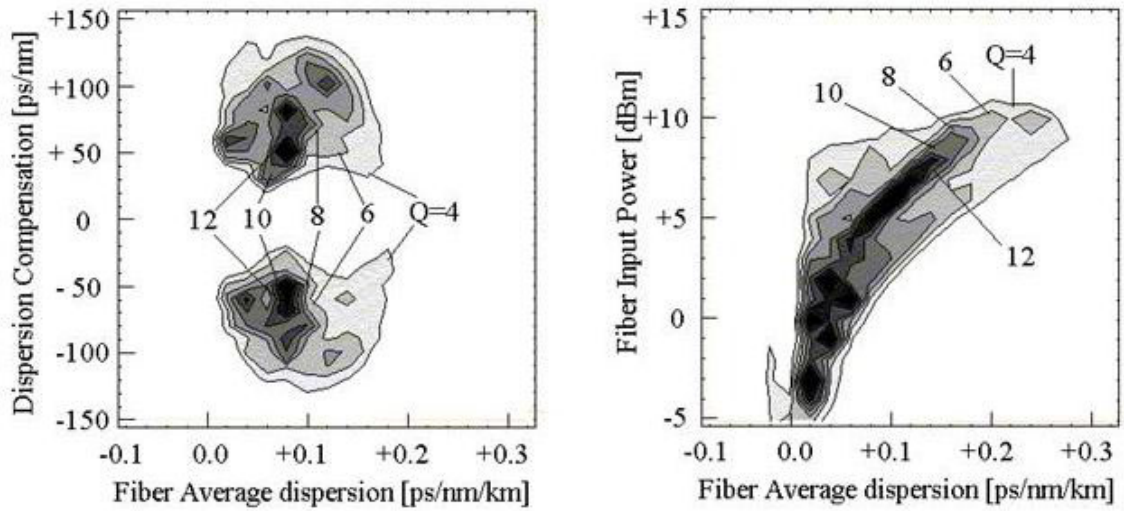


図 3.2.7 20 Gbit/s 線路における Q マップ

($N_c = 1$, $L_a = 50$ km, $L_t = 10$ Mm, $P_{av} = +5$ dBm, $D_c = +80$ ps/nm, $NF = -100$ dB)

3. 2. 4 40 Gbit/s 伝送線路の最適化

図 3.2.8 に 40 Gbit/s、3000 km 線路に対する Q マップの一例を示す。初期パルス幅を 7.5 ps とし、増幅器間隔を 50 km としている。各増幅器には 6 nm 幅のフィルタを挿入し、増幅器雑音は考慮していない。非対称型分散マップの場合（図 2.4.5）と較べて、大幅に特性が改善されていることがわかる。分散スロープは $+0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ としている。40 Gbit/s になると 3 次分散（分散スロープ）によるパルス広がりが無視できず、線形伝送は困難となる。

$D_{av}-D_c$ の図では、信号強度は $+5 \text{ dBm}$ に固定されている。平均分散の値が正（異常分散領域）に伝送領域が 2 カ所、ほぼ対称な形で存在することがわかる。 $D_{av}-P_{av}$ の図では、分散補償量は $+30 \text{ ps/nm}$ に固定されている。分散補償間隔 ($L_c = 2 N_c L_a$) は 100 km であるので、平均分散を $+0.03 \text{ ps/nm/km}$ とした場合の線路分散は -0.27 ps/nm/km の正常分散である。

図 3.2.8 から最適伝送条件を評価すると、次の数値を得る。

- (1) 分散補償量 : $D_c = \pm 30 \text{ ps/nm}$
- (2) 平均分散 : $D_{av} = +0.03 \text{ ps/nm/km}$
- (3) 信号強度 : $P_{av} = +5 \text{ dBm}$

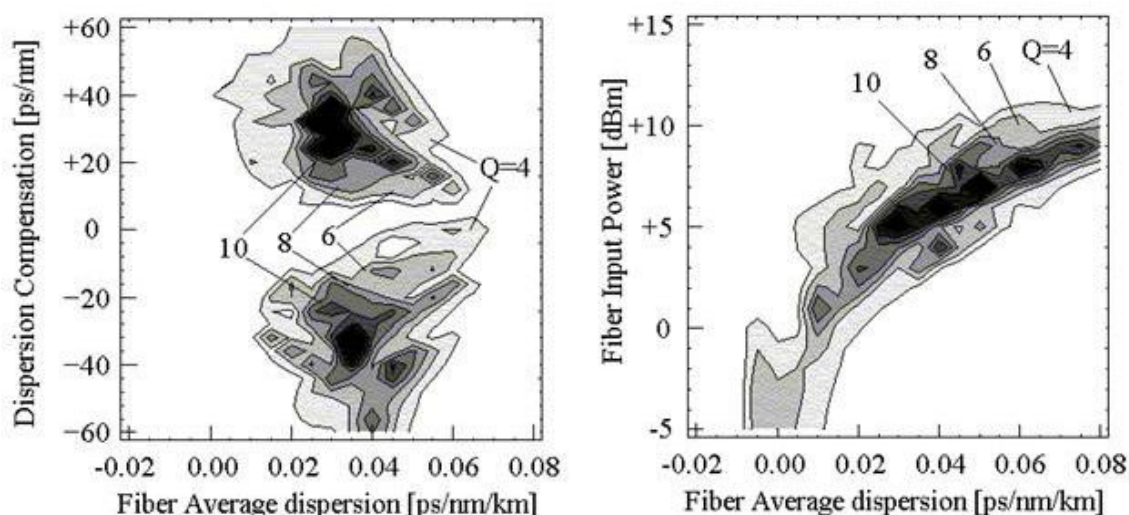


図 3.2.8 40 Gbit/s 線路における Q マップ（対称型分散補償）

($N_c = 1$, $L_a = 50 \text{ km}$, $L_t = 3 \text{ Mm}$, $P_{av} = +5 \text{ dBm}$, $D_c = +30 \text{ ps/nm}$, $NF = -100 \text{ dB}$)

図 3.2.8 と同じ条件で $N_c = 2$ および $N_c = 3$ とした場合の Q マップを図 3.2.9 に示す。平均分散を $+0.03 \text{ ps/nm/km}$ とした場合の線路分散は、それぞれ -0.12 ps/nm/km 、 -0.07

ps/nm/km の正常分散である。最適分散補償量は $Nc = 1$ の場合とほとんど同じであるが、分散補償間隔が長くなるほど線路分散が小さくなり、4 光波混合の影響で Dc の小さい領域における伝送は困難になる。

図 3.2.10 に増幅器間隔を 30 km および 80 km とした場合の Q マップを示す。平均分散の最適値は変化するが、最適分散補償量は余り変化しないことがわかる。

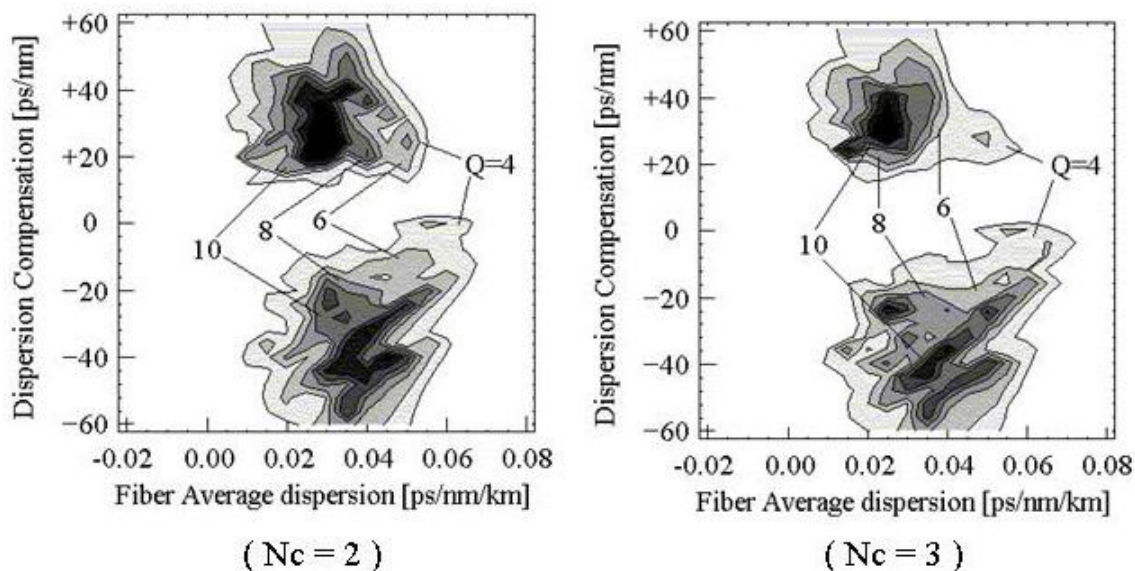


図 3.2.9 40 Gbit/s 線路における Q マップ

($Nc = 2 / Nc = 3$, $La = 50$ km, $Lt = 3$ Mm, $Pav = +5$ dBm)

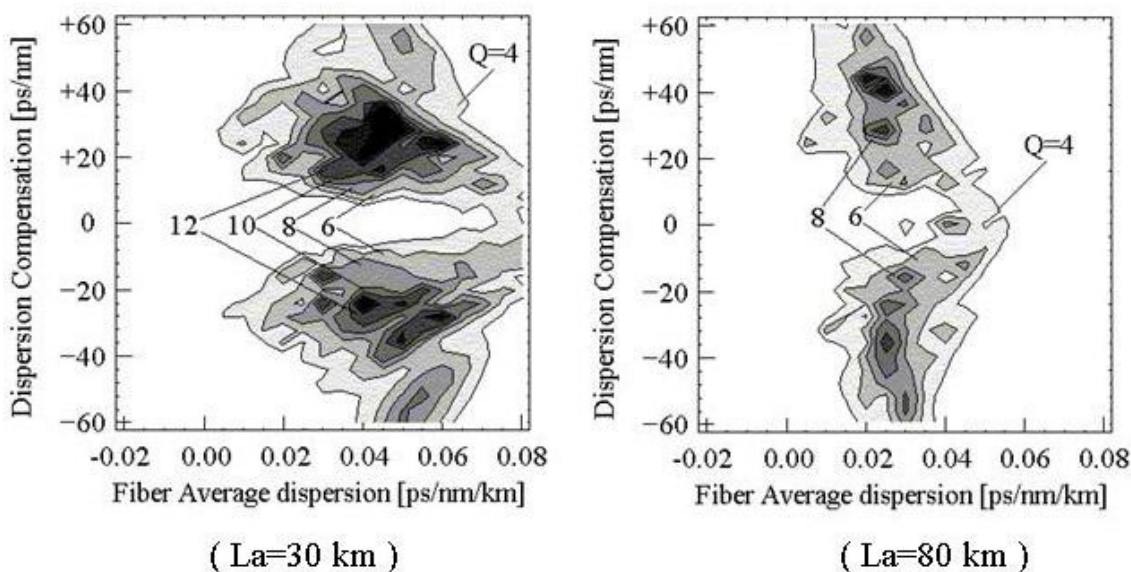


図 3.2.10 40 Gbit/s 線路における Q マップ

($La = 30$ km / $La = 80$ km, $La = 50$ km, $Lt = 3$ Mm, $Pav = +5$ dBm)

図 3.2.11 にそれぞれの場合における平均分散—信号強度のQマップを示す。最適信号強度は増幅器間隔にやや依存することがわかる。図 3.2.12 に $NF=+5$ dB とした場合の計算結果を示す。この場合でも $Q > 6$ の伝送領域があり、3000 km のエラーフリー伝送も可能であると予想される。

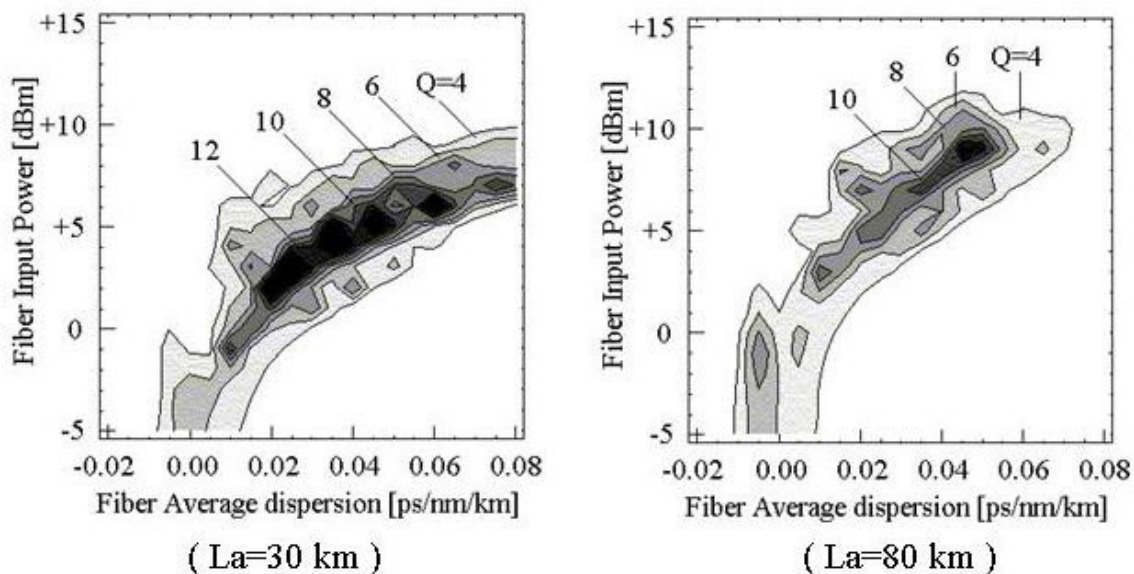


図 3.2.11 40 Gbit/s 線路におけるQマップ

($La= 30$ km / $La= 80$ km, $La= 50$ km, $Lt= 3$ Mm, $Pav= +5$ dBm, $NF= -100$ dB)

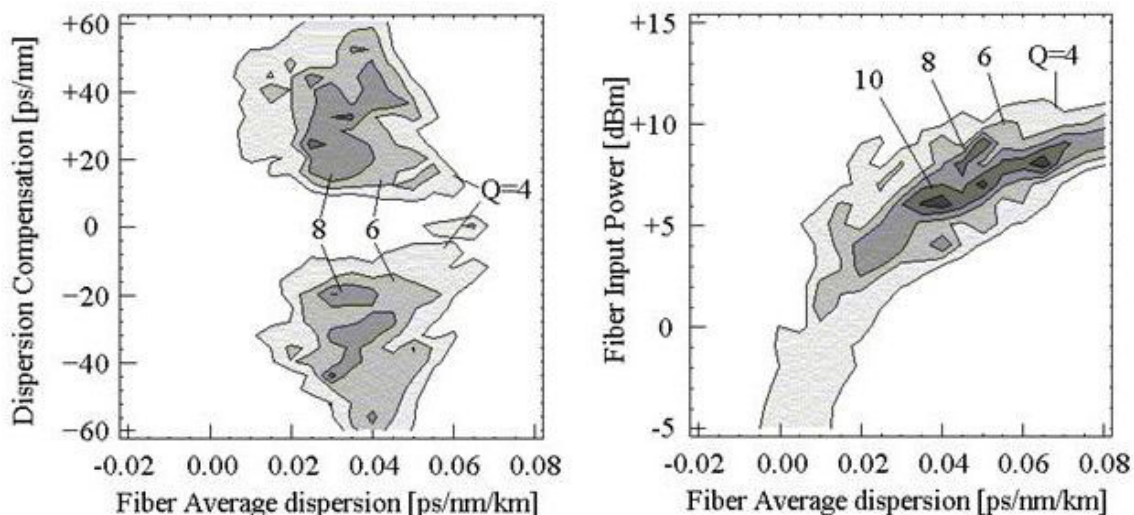


図 3.2.12 40 Gbit/s 線路におけるQマップ

($La= 50$ km, $Lt= 3$ Mm, $Pav= +5$ dBm, $Dc= +30$ ps/nm, $NF= +5$ dB)

3. 2. 5 80 Gbit/s 伝送線路の最適化

損失のある線路において周期的に増幅しながら光ソリトン伝送する場合、パルス拡がりの特性長である分散距離よりも、増幅器間隔を短く設定する必要があることが知られている⁽³⁸⁾。2次と3次の分散に対する分散距離 L_d , L_d' は(3.2.2)および(3.2.3)で計算される。80 Gbit/s になると最小パルス幅が 4 ps 程度となり、分散スロープや分散ゆらぎの影響を強く受ける。また通常の分散シフトファイバ($sl = 0.07$ ps/nm²/km) を用いた伝送は困難となり、分散スロープ補償が不可欠である。

$$L_d [km] = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} = 0.251 \frac{T^2 [ps]}{D [ps/nm/km]} \quad (3.2.2)$$

$$L_d' [km] = \frac{T_0^3}{|\beta_3|} = 0.112 \frac{T^3 [ps]}{sl [ps/nm^2/km]} \quad (3.2.3)$$

ここで、 T [ps] は最小パルス幅、 D [ps/nm/km] は線路分散、 sl [ps/nm²/km] は分散スロープである。図 3.2.13 に分散距離のパルス幅依存性についての計算結果を示す。増幅器間隔を 100 km とすると、分散スロープ 0.07 ps/nm²/km では、パルス幅 4 ps 以上とする必要があることがわかる。

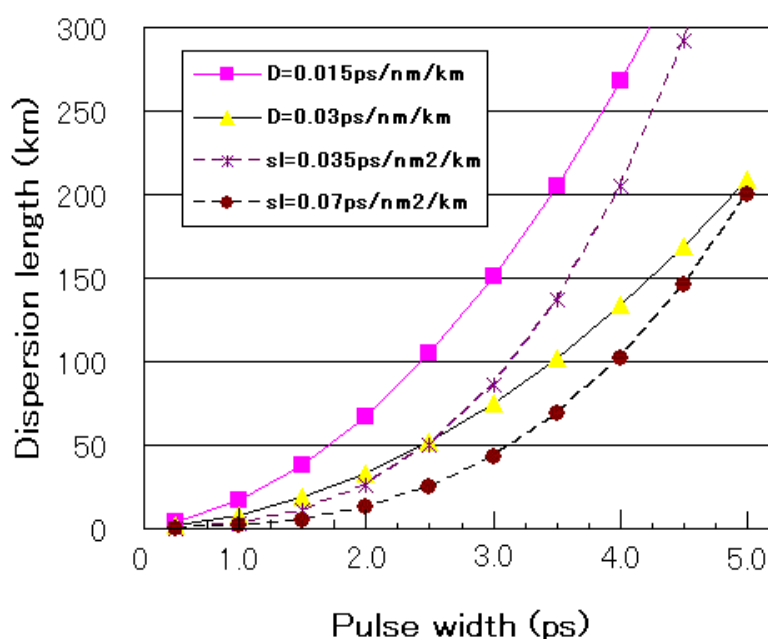


図 3.2.13 分散距離のパルス幅依存性

図 3.2.14 および図 3.2.15 に 80 Gbit/s、2500 km 伝送時の Q マップを示す。分散スロープをそれぞれ、 $0.00 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ および $+0.02 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ としている。最適分散補償量は、分散スロープゼロの場合は $\pm 6 \text{ ps/nm}$ 程度であり、スロープのある場合はそれよりも大きくなる。また分散スロープのある場合は、パルス拡がりの影響で線形伝送は不可能であることがわかる。

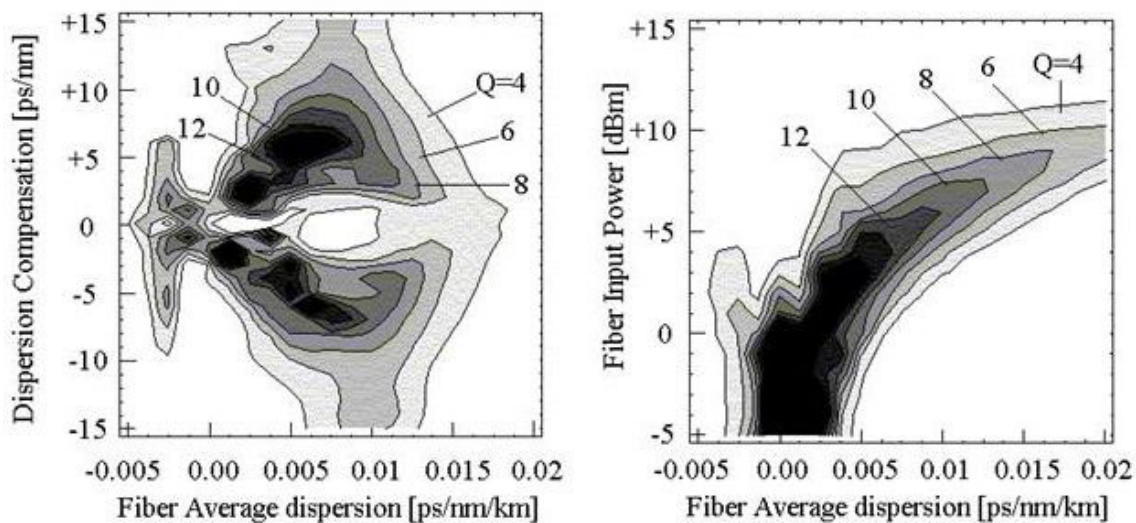


図 3.2.14 80 Gbit/s 線路における Q マップ

($S_1=0.00 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, $L_a=50 \text{ km}$, $L_t=2500 \text{ km}$, $P_{av}=+5 \text{ dBm}$, $D_c=+7.5 \text{ ps/nm}$)

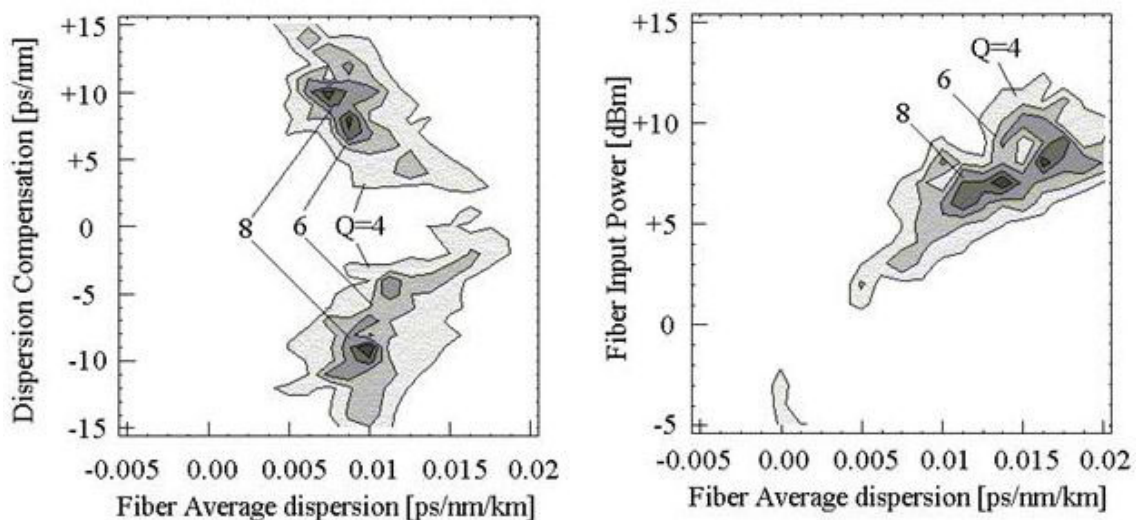


図 3.2.15 80 Gbit/s 線路における Q マップ

($S_1=+0.02 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, $L_a=50 \text{ km}$, $L_t=2500 \text{ km}$, $P_{av}=+5 \text{ dBm}$, $D_c=+6 \text{ ps/nm}$)

図 3.2.14 の $D_{av}-P_{av}$ の図では、分散補償量は $+7.5 \text{ ps/nm}$ に固定されている。分散補償間隔 ($L_c = 2 N_c L_a$) は 100 km であるので、平均分散を $+0.008 \text{ ps/nm/km}$ とした場合の線路分散は -0.067 ps/nm/km となる。線路分散の値が小さくなると 4 光波混合などの非線形性による波形劣化が生ずるので、1 増幅器スパンにおいて複数回の分散補償を行う、高密度分散マネージメントが提案されている⁽⁵¹⁾。また実際にこの技術を用いて 100 Gbit/s で 1000 km を越える伝送実験が報告されている⁽¹²⁾。また 3.3 で述べるように偏波多重技術を併用すれば、通常の D S F を用いて 80 Gbit/s の伝送が可能となる⁽¹⁸⁾。

図 3.2.14 から最適伝送条件を評価すると、次の数値を得る。

- (1) 分散補償量 : $D_c = \pm 6 \text{ ps/nm}$
- (2) 平均分散 : $D_{av} = +0.008 \text{ ps/nm/km}$
- (3) 信号強度 : $P_{av} = +5 \text{ dBm}$

80 Gbit/s クラスでは、偏波モード分散 (PMD) や、ファイバの分散ゆらぎの影響が無視できなくなる。図 3.2.16 に、3.3 節の実験に用いた D S F のゼロ分散波長および減衰定数の分布を示す。ゼロ分散波長は、 $1547.9 \pm 6.1 \text{ nm}$ に分布しており、増幅器間隔を 50 km とすると、 $6.1 \text{ nm} \times 0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km} \times 50 \text{ km} = 21.4 \text{ ps/nm}$ となり、分散ゆらぎの中に分散補償の効果が埋もれてしまう。

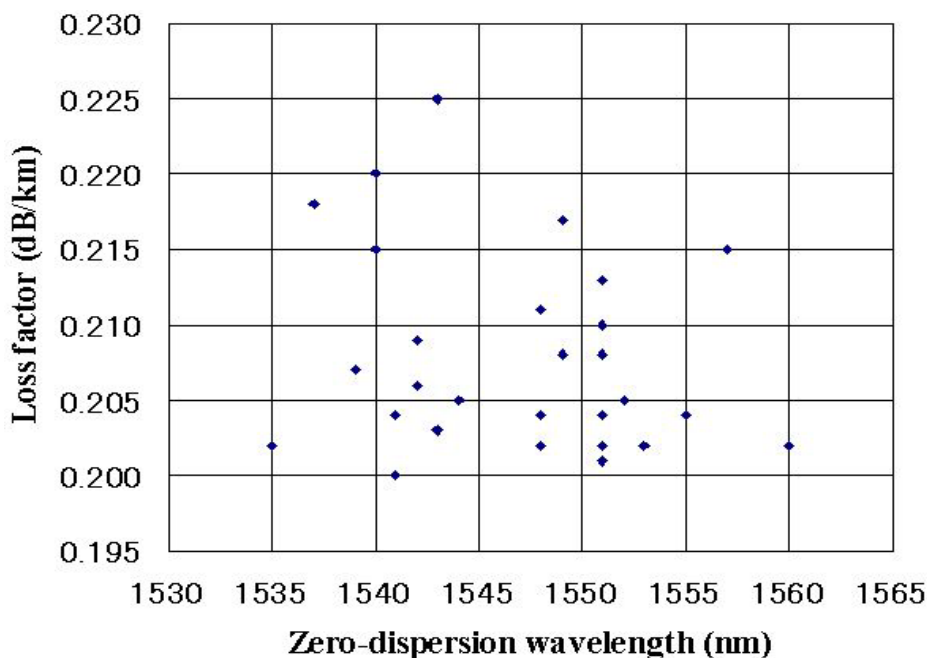


図 3.2.16 分散シフトファイバの分散ゆらぎ実測値

3. 2. 6 伝送速度に対するスケーリング則

周期的分散補償線路において、分散補償量 D_c は、パルス幅で決まる最適値のあることが知られている^{(52), (53), (50)}。これは分散補償の強度を表す S パラメータが 1.65 程度でソリトンパルスからのエネルギー浸み出しが極小となり、分散波による雑音成分の発生が抑制されるためと考えられる。 S パラメータはステップ状の分散マネージメントを行った線路に対して次式で定義される⁽⁵⁴⁾。

$$S = \frac{|\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2|}{T_s^2} \quad (3.2.4)$$

ここで $\beta_{1,2}$ は(2.2.16)で与えられる分散値、 $L_{1,2}$ は区間長、 T_s はパルス幅が極小となるチャープフリー点でのパルス幅である。周期的分散補償を行った場合は、平均分散がゼロ ($\beta_2 L_2 = -\beta_1 L_1$) で近似でき、波長を 1550 nm とすると、 S パラメータは次式で与えられる⁽¹⁶⁾。 S の値は分散補償間隔には依存しない。

$$S = 2.55 \frac{|D_c|}{T_s^2} \quad (3.2.5)$$

図 3.2.17 に、図 3.2.8 と同じ線路条件で、(2.4.14)のエネルギー保存係数 R をマッピングした結果を示す。これは 1 パルスによるものである。分散補償量 $D_c = \pm 30$ ps/nm、平均分散 $D_{av} = +0.03$ ps/nm/km 付近にパルスからのエネルギーの浸み出しが非常に小さくなる領域が存在していることがわかる。

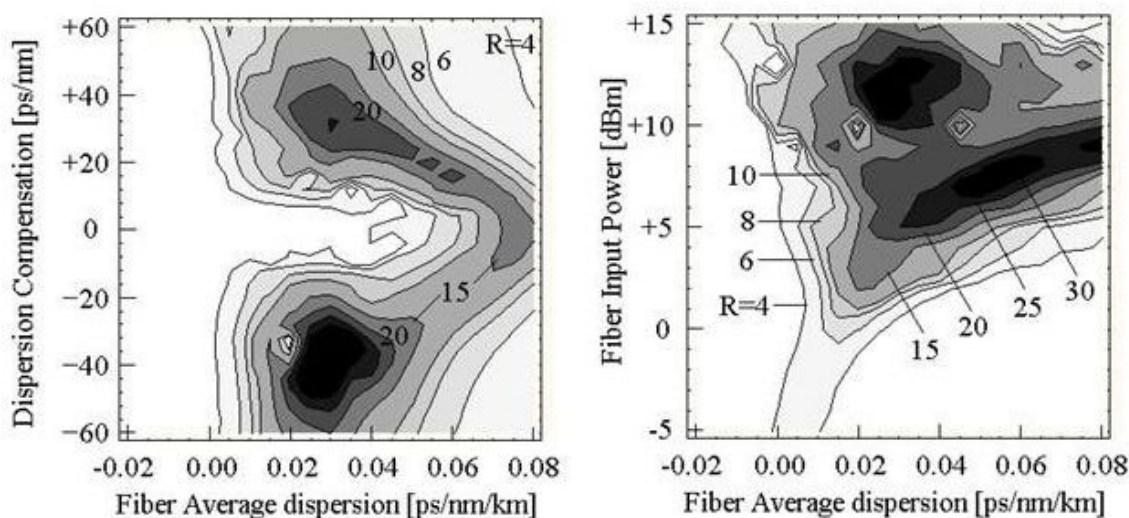


図 3.2.17 40 Gbit/s 線路における R マップ

($N_c = 1$, $L_a = 50$ km, $L_t = 3$ Mm, $T = 7.5$ ps, $P_{av} = +5$ dBm, $D_c = +30$ ps/nm)

T_s は伝送速度に逆比例するので、(3.2.5)より分散補償量 D_c は伝送速度: B [Gbit/s] の2乗に逆比例することが予想されるが、指数関数で補間計算した結果、分散スロープの影響などで -1.86 乗となった (図 3.2.18)。また最適平均分散 D_{av} は -1.65 乗となった (図 3.2.19)。

$$D_c [ps/nm] = 2.20 \times 10^4 B^{-1.86} [Gbit/s] \quad (3.2.6)$$

$$D_{av} [ps/nm/km] = 10.7 B^{-1.65} [Gbit/s] \quad (3.2.7)$$

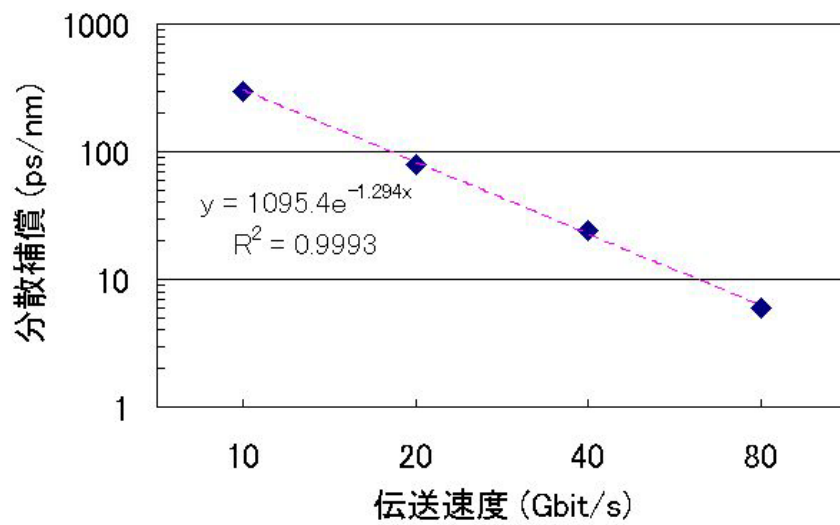


図 3.2.18 分散補償量の伝送速度依存性

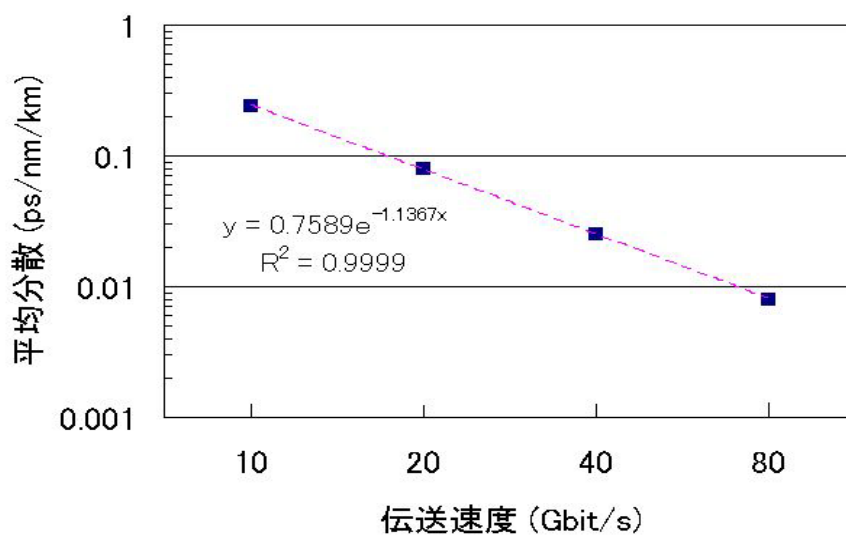


図 3.2.19 平均分散の伝送速度依存性

3. 3 OTDM技術を用いた光ソリトン伝送実験

最近 40 Gbit/s 伝送システムに関する研究が非常に活発となっている。40 Gbit/s になると信号の S/N 比や、ファイバの分散マージンに対する条件が厳しくなり、線形伝送では長距離のネットワークを構成することが困難となる。既設の分散補償ファイバ (DSF) を用いて周期的分散補償線路を構成し、光ソリトン伝送を行うことはコストや信頼性の面で現実的な選択と考えられる。分散補償光ソリトン伝送では分散補償素子の挿入位置により伝送特性が大幅に変化する。挿入位置による伝送特性の違いについて実験的に確かめた。

3. 3. 1 40 Gbit/s 光ソリトン伝送実験^{(16), (17)}

図 3.3.1 に 40 Gbit/s 実験系を示す。モード同期半導体レーザ (MLLD) で繰り返し周期 10 GHz、パルス幅 5.5 ps の光パルスが発生させ、LN変調器で変調した後、PLCを用いた光時分割多重装置 (OTDM) により 40 Gbit/s のパルス信号を得た。MLLDは 1530 nm から 1560 nm の波長範囲で安定したパルス発生が可能である (図 3.3.2、図 3.3.3)。

伝送路はピース長 20 km、零分散波長 1547.9 ± 6.1 nm、平均減衰定数 0.21 dB/km の分散シフトファイバを接続して増幅器間隔を 80 km とし、総伝送距離を 640 km に設定した。途中に -30 ps/nm および -40 ps/nm の分散補償ファイバ (DCF) を 2カ所挿入した。増幅器の NF は +5.0 dB であり、伝送中にフィルタは使用していない。

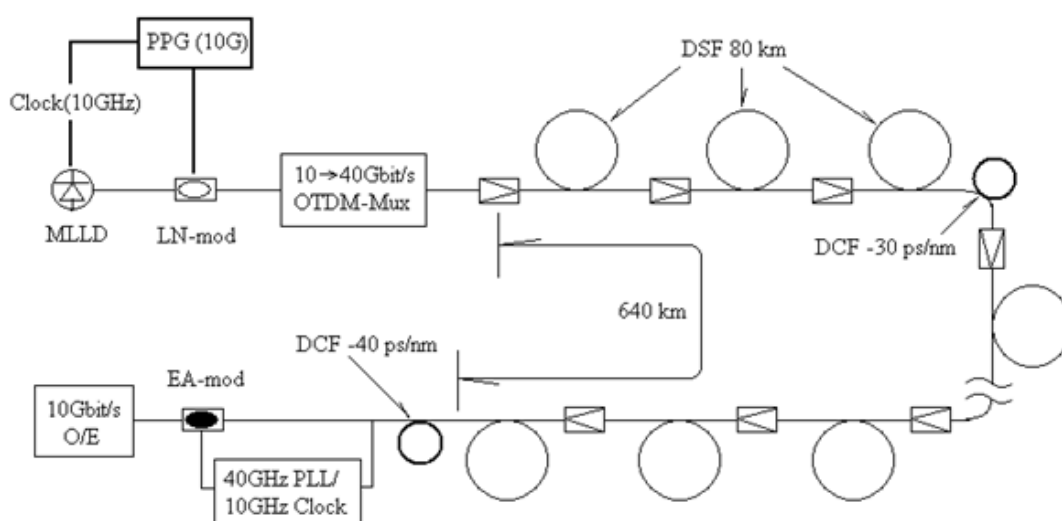


図 3.3.1 40 Gbit/s, 640 km 伝送実験系

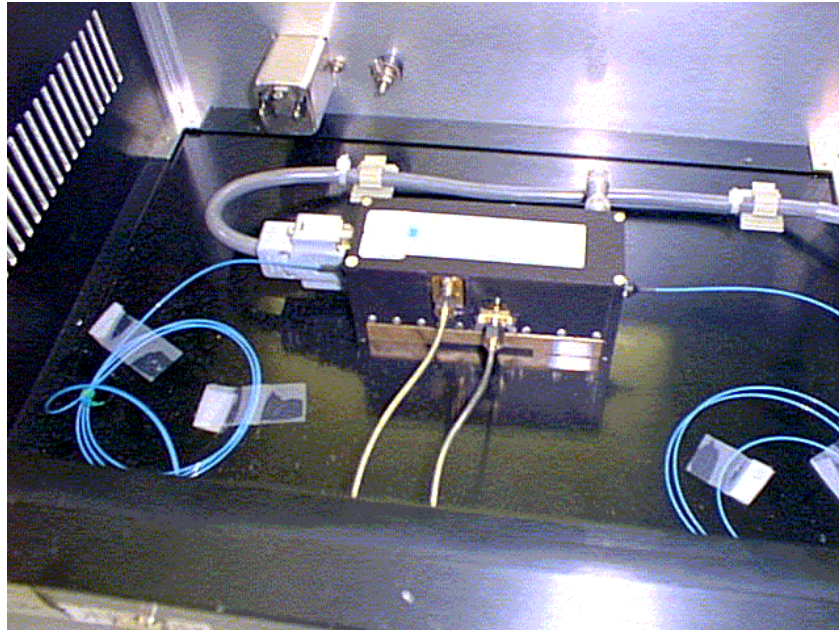


図 3.3.2 モード同期半導体レーザーの外観 (NEC, 応用光電製)

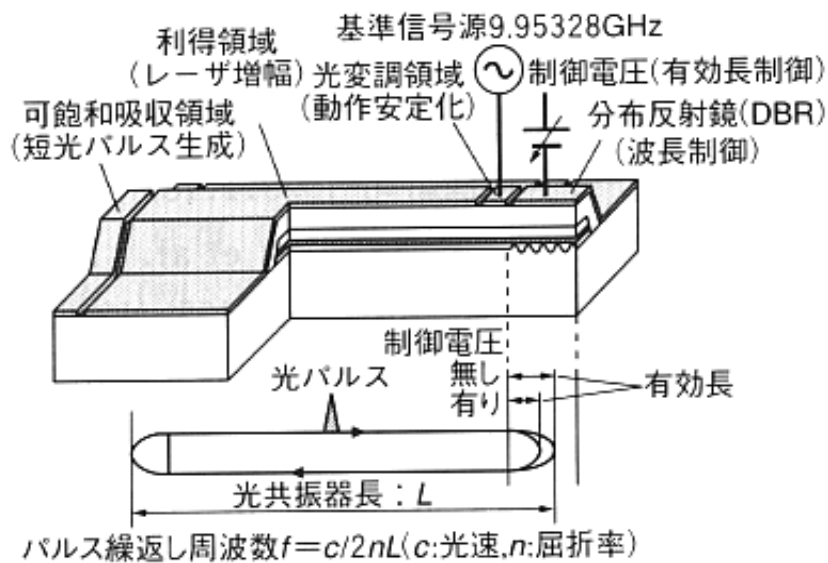


図 3.3.3 モード同期半導体レーザーの構造

MLLDは、モード同期ファイバレーザーと比べて小型で、スペクトル的にも安定した光パルスが発生できる。OTDMによる 40 Gbit/s 信号をストリークカメラで観測した時間波形を図 3.3.4 に、スペクトラムアナライザで観測したスペクトル波形を図 3.3.5 に示す。スペクトル波形はCS-RZのものとなっているが、これはPLCを用いてパルスを時間

多重する時に、隣接パルスとの位相関係が逆位相になったものと考えられる。

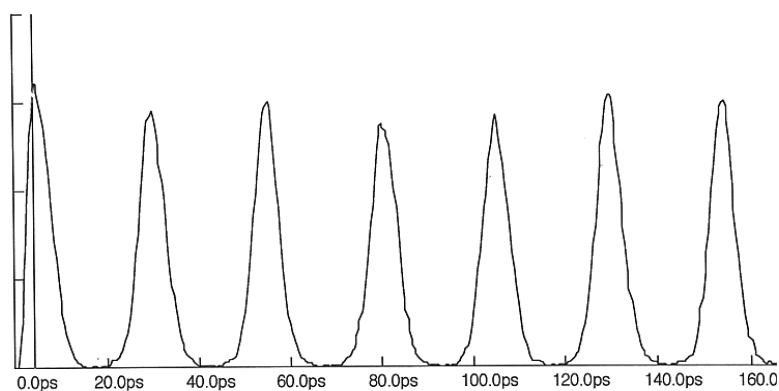


図 3.3.4 OTDMによる 40 Gbit/s 時間波形

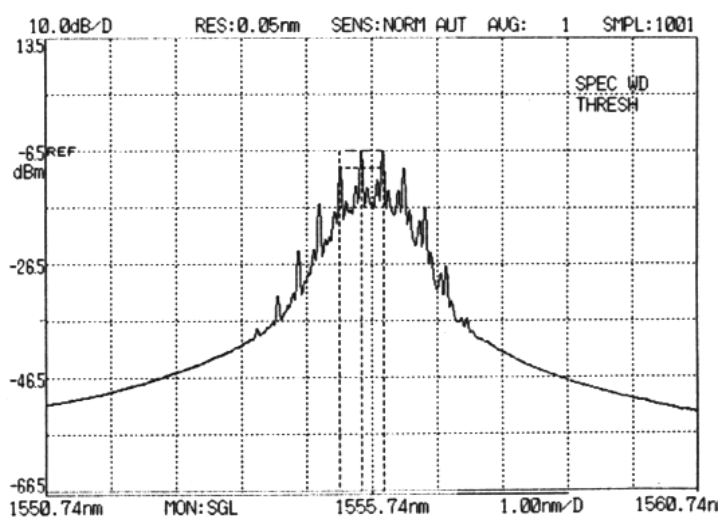


図 3.3.5 OTDMによる 40 Gbit/s スペクトル波形

受信側では、信号光から 40 GHz の PLL 回路で 10 GHz クロック成分を抽出し、EA 変調器を駆動することで 40 Gbit/s から 10 Gbit/s へ分離し、誤り率測定を行った。信号強度を +1 dBm から +9 dBm まで変化させた時の、誤り率測定値の波長依存性を図 3.3.6 に示す。分散補償素子として、320 km と 640 km の 2 箇所それぞれ -30 ps/nm、 -40 ps/nm の DCF が挿入されている。伝送用ファイバの平均零分散波長は 1547.9 nm であるが、DCF を考慮すると伝送路全体の零分散波長は 1549.5 nm 程度となる。信号強度が +7dBm で最適伝送（分散マージン最大）となり、1549.8–1550.2 nm の波長区間で無誤り伝送が観測さ

れた。これは平均分散にして+0.02 ps/nm/km から +0.05 ps/nm/km に相当している。

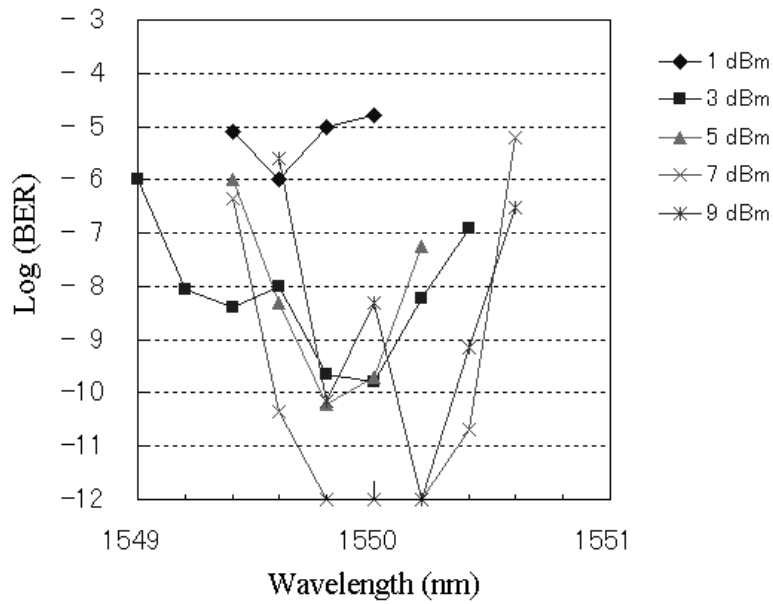


図 3.3.6 信号強度による伝送特性の違い (実験値)

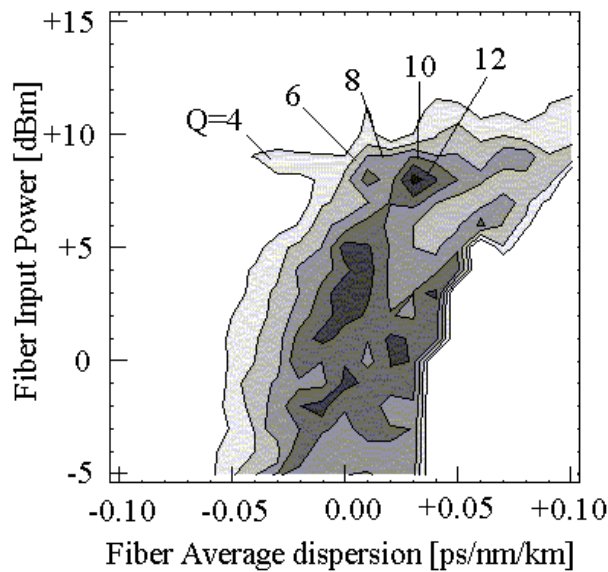
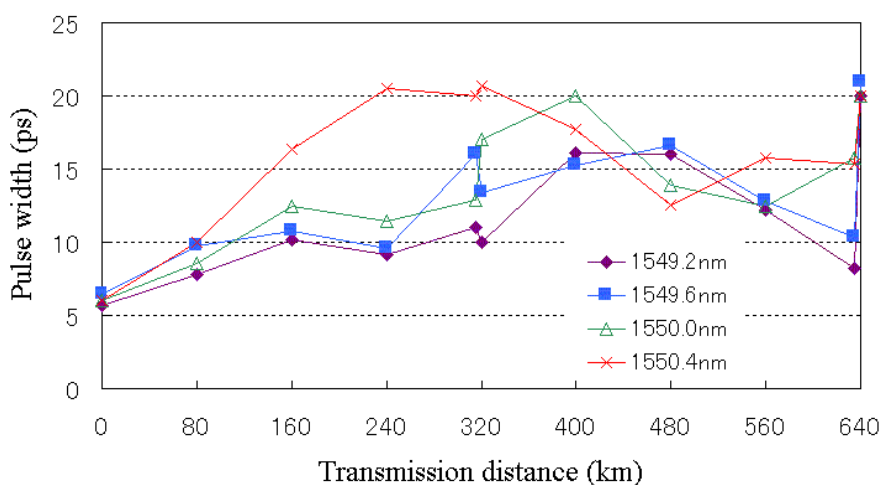


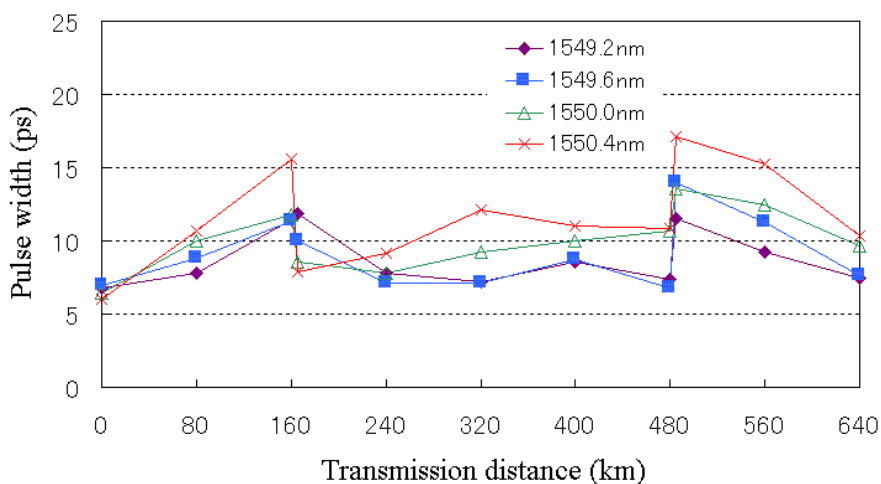
図 3.3.7 DCF: 320 km / 640 km の場合のQマップ (シミュレーション)

図 3.3.7 に、増幅器間隔 80 km で 640 km 伝送した場合の、平均分散と信号強度をパラメータとする Q マップを示す。信号強度 +7 dBm、平均分散 +0.02 ps/nm/km 程度で最適伝送となった。信号強度については実験結果と一致したが、波長についてはややズレが見られた。

DCFの挿入位置を変えて伝送中のパルス幅を測定した結果を図 3.3.8 に示す。2箇所のDCFを (a) 分散補償区間の最後に設置した場合 (320 km, 640 km) および、(b) 分散補償区間の中間点に設置した場合 (160 km, 480 km) を比較した。信号強度は +7 dBm に固定し、パルス幅はストリークカメラで測定した。分散補償素子を中間点に設置することにより、ソリトンの安定解に速やかに移行し、パルス広がり抑制されていることがわかる。1549.2 nm - 1550.4 nm の信号波長に対する受信端における平均パルス幅は、20.2 ps から 8.8 ps に抑制された。



(a) DCF: 320 km / 640 km の場合のパルス幅



(b) DCF: 160 km / 480 km の場合のパルス幅

図 3.3.8 DCF 挿入位置による伝送中のパルス幅の変化 (実験値)

それぞれの場合についての誤り率の測定結果を図 3.3.9 に示す。DCF を分散補償区間の中間点に設置することにより、無誤り伝送の波長範囲は、0.4 nm から 1.2 nm (1549.4 nm - 1550.6 nm) に大幅に改善された。周期的分散補償線路における光ソリトン定常解のパルス幅はDCF 挿入位置の中間点付近において極小となることが知られている。送受信器を極小点に設置することで隣接パルス間の符号間干渉が抑制され、伝送特性が大幅に改善されることが確かめられた。分散スロープ $+0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ を考慮すると、無誤り伝送の分散マージンは、(a) では、 0.028 ps/nm/km 、(b) では、 0.084 ps/nm/km となる。伝送距離 640 km を乗じて累積分散マージンを求めると、(a) で 18 ps/nm 、(b) で 54 ps/nm となる。

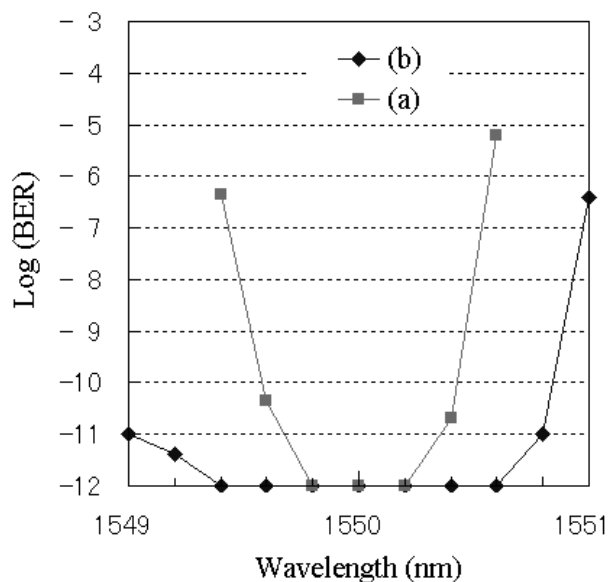
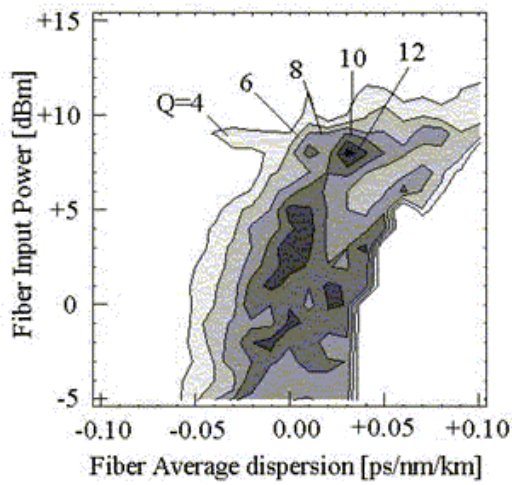


図 3.3.9 DCF 挿入位置による波長 (分散) マージンの拡大 (実験値)

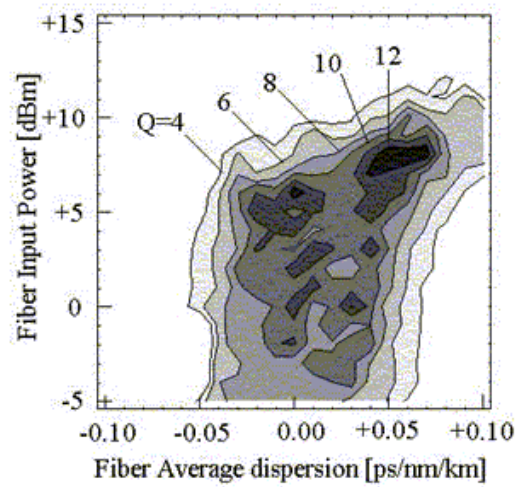
図 3.3.10 にそれぞれの場合のシミュレーション結果を示す。無誤り伝送 ($\text{BER} < 10^{-12}$: $Q > 7$) の波長範囲は (a) では、 0.03 ps/nm/km 、(b) では、 0.09 ps/nm/km 程度であり実験結果と良く一致している。

図 3.3.11 は、横軸をパルスの初期チャープ、縦軸を分散補償量とした場合の Q マップである。(b) では、(a) に比べて初期チャープおよび分散補償量に対するマージンが拡大していることがわかる。また (a) で最適伝送を得るには、正常分散線路 ($D_c > 0$) では down-chirp ($C > 0$)、異常分散線路 ($D_c < 0$) では up-chirp ($C < 0$) が必要であることがわかる。



[DCF: 320/640 km]

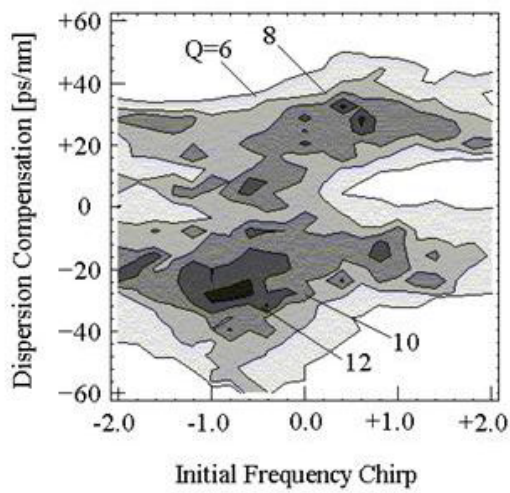
(a) 非対称型分散補償



[DCF: 160/480 km]

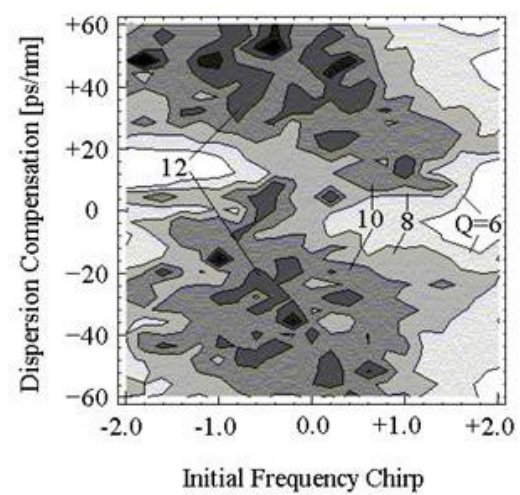
(b) 対称型分散補償

図 3. 3. 10 DCF 挿入位置による波長（分散） マージンの拡大（シミュレーション）



[DCF: 320/640 km]

(a) 非対称型分散補償



[DCF: 160/480 km]

(b) 対称型分散補償

図 3. 3. 11 DCF 挿入位置による波長初期チャープ依存性（シミュレーション）

3. 3. 2 80 Gbit/s 光ソリトン伝送実験⁽¹⁸⁾

3. 2. 5 節で考察したように、通常のファイバを用いて同一偏波で 80 Gbit/s の伝送を行うことは困難であり、分散スロープ（3次分散）補償、高密度分散マネージメントなどの技術が必要となってくる。一方、偏波多重技術を用いると通常のファイバを用いて 80 Gbit/s 伝送（40 Gbit/s、2 PDM）が可能となる。

伝送実験系を図 3.3.12 に示す。モード同期半導体レーザ（MLLD）で 10 GHz、5.5 ps の光パルスを生じさせ、LN 変調器で変調の後 PLC で光時分割多重し 40 Gbit/s の信号を得た。偏波ビームスプリッタ（PBS）で分離の後、偏波、遅延を調整して PBS で偏波方向を直交させて合波し 80 Gbit/s の信号を得た（図 3.3.13）。

伝送はピース長 20 km の通常の DSF（平均ゼロ分散波長：1547.9 nm、標準偏差：6.1 nm）を接続し、増幅器間隔 60 km で 720 km の伝送をおこなった後、さらに 80 km の NZDSF を通して 800 km の伝送を行った。分散補償素子として -30 ps/nm の DCF を奇数スパンの後に挿入している。また、3 nm 幅のフィルタを 3 か所（EDFA5, 10, 14）に挿入して ASE の成長を抑制している。

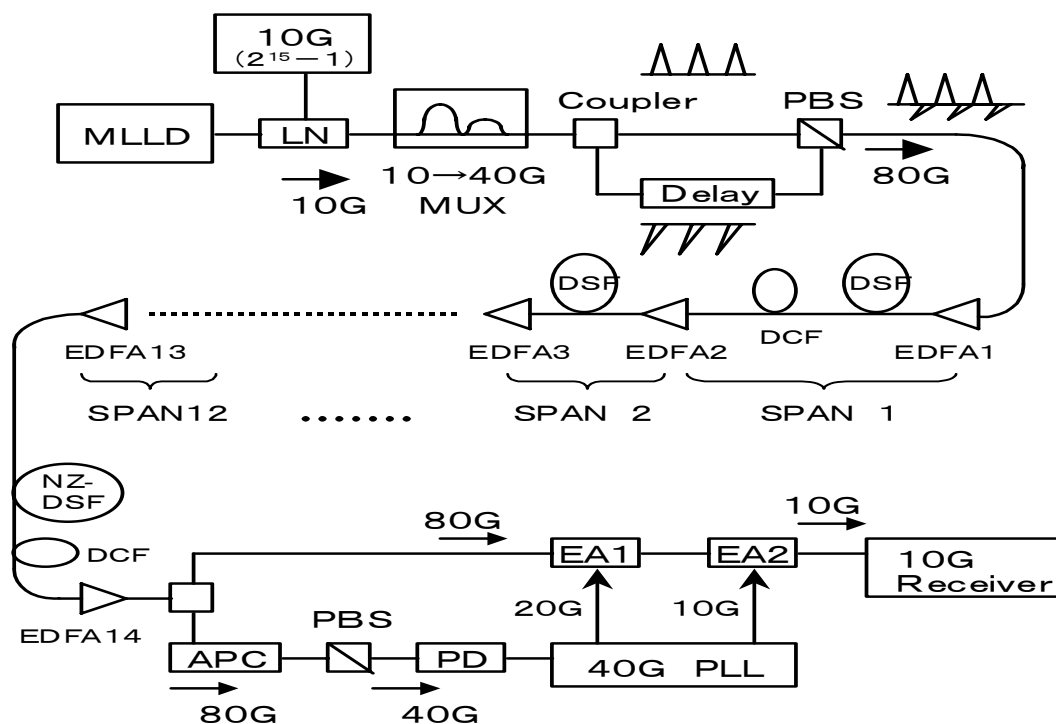


図 3.3.12 80 Gbit/s、800 km 伝送実験系

受信側では自動偏波コントローラで片側偏波を取り出し、40 GHz の PLL 回路を駆動してクロック信号を得た。データ信号については2段のEA変調器(20 GHz、10 GHz)で10 Gbit/s に信号分離(DEMUX)した(図3.3.14)。

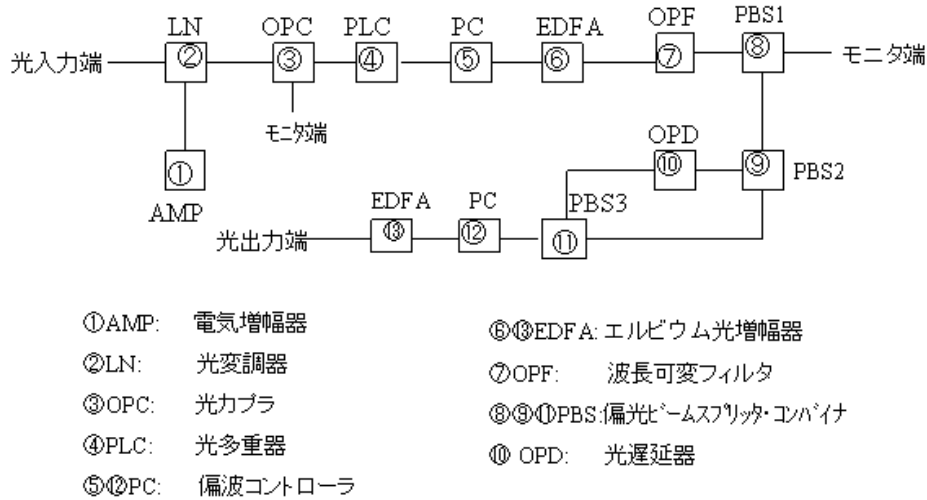


図 3.3.13 80 Gbit/s 光時分割多重装置の構成

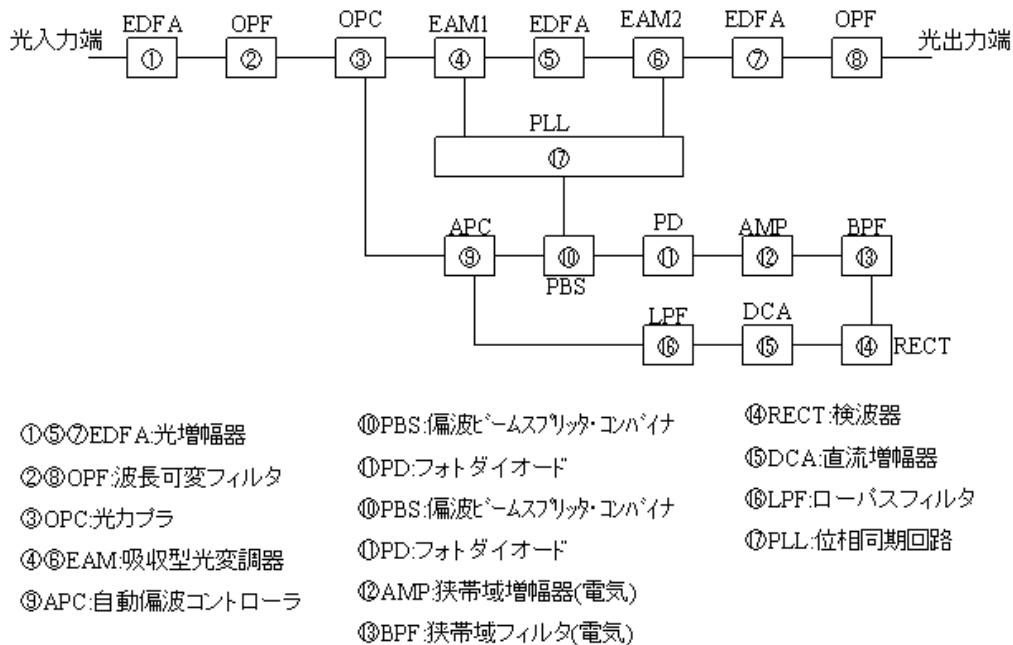


図 3.3.14 80 Gbit/s 光時分割信号分離装置の構成

DEMUX後の各 10 Gbit/s 信号の符号誤り率の測定結果を示す (図 3.3.15)。ファイバ入力強度 +7.5 dBm で最適伝送が得られた。周期的分散補償線路における光パルスは分散補償素子挿入位置の中間点付近においてパルス幅が極小となるため、受信器をパルス幅の極小点 (偶数スパン直後) に設置すれば符号間干渉が抑制され、伝送特性が改善される。偶数スパン直後で観測した分散マージンの測定値を示す (図 3.3.16)。分散マージンは伝送距離に余り依存せず、15 ps/nm 程度の分散耐力が得られた。この値は、40 Gbit/s の場合 (図 3.3.9) と比べると約 1/3 に減少している。原因として、偏波多重伝送ではPMDによる信号劣化が生じているものと推測される。

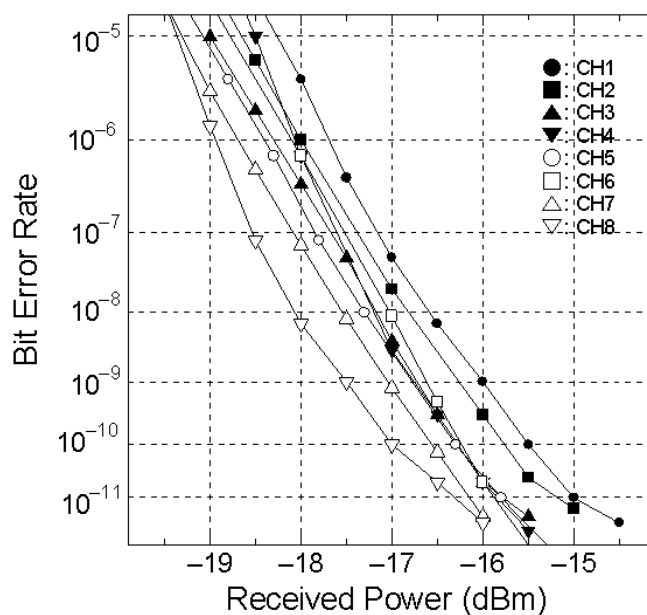


図 3.3.15 800 km 伝送後の符号誤り率測定結果

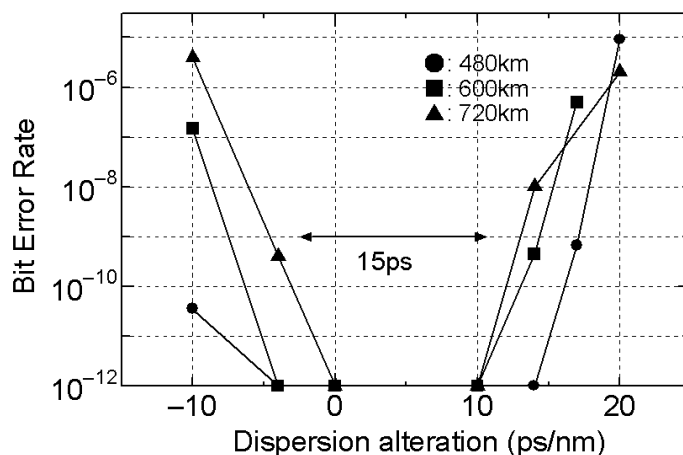


図 3.3.16 偶数スパン後の累積分散マージン測定結果

3. 4 結 言

Qマップによる周期的分散補償線路の最適設計手法について検討を行い、周期的分散補償線路における10 Gbit/s ~ 80 Gbit/s 伝送の最適伝送条件について検討した。最適伝送条件は、2種類のQマップで把握できる。最適分散補償量は分散補償間隔や増幅器間隔には依存せず、40 Gbit/s 伝送の場合は ± 30 ps/nm 程度で一定値となることを示した。1パルス伝送解析の結果から、その条件においてソリトンパルスからのエネルギーの浸みだしが小さくなることがわかった。また分散補償ソリトン線路における、最適分散補償量や、平均分散値の伝送速度に対するスケーリング則を導出した。分散補償を行った場合でも、最適信号強度は伝送速度には余り依存せず、+5 dBm 程度で一定となることを示した。ソリトン伝送では線形伝送と異なり、ファイバの特性で決まる信号強度を常に用いている。

40 Gbit/s をベースとする信号伝送実験を行い、最適信号強度や分散マージンがQマップによるシミュレーション結果とほぼ一致することを確認した。また分散補償素子の挿入位置を分散補償区間の中間点とすることにより（対称型分散補償）、伝送特性が大幅に改善されることを確認した。この結果を応用して80 Gbit/s (40 Gbit/s, 2 PDM)、800 km 伝送実験を実施し、PMDによる分散マージン減少はあるものの、DEMUX後の全チャネルについて無誤り伝送を観測した。これらの結果からQマップ法による分散補償光ソリトン線路設計の有効性を実証した。

国内通信においては心線数の確保が比較的容易であることから、ファイバ当り40 Gbit/s から80 Gbit/s 程度の単一波長伝送がコスト的に有利となる可能性がある。40 Gbit/s ベースの単一波長光ソリトン伝送方式の利点として、

- (1) 光ソリトン効果を利用した伝送であり、長距離線路で有利
- (2) 信号強度が強く、高SN比で誤り訂正等の負担が少ない
- (3) 既設のDSFが使える、分散スロープ補償が不要
- (4) 帯域幅の狭い、安価な増幅器が適用可能
- (5) ASE抑制、信号安定化のためフィルタが使える

等の特徴があり、送受信器の低コスト化が進めば既設のDSFを用いて安価にネットワークの大容量化を実現する方法として期待される。