

# 第 1 章

## 序 論

最近の光通信研究を分野別に見ると、信号伝送技術、フォトニックネットワーク技術、インターネットとの融合技術、アクセス系技術、ファイバ設計製造技術、デバイス設計製造技術、等々に専門化し、それぞれ急速な進展を遂げつつある。デジタル伝送技術では、(1) 高密度波長多重 (DWDM) による長距離伝送技術、(2) DWDM による大容量伝送技術、(3) 光時分割多重 (OTDM) による大容量伝送技術、に大別される。

DWDM による長距離伝送技術は国際通信を目的として、1 Tbit/s, 10000 km 程度の伝送を安定に行うための技術開発である<sup>(1)</sup>。チャンネル当りの伝送速度は 10 Gbit/s が主流であるが、20 Gbit/s で 9000 km を越える伝送実験<sup>(2)</sup>や 40 Gbit/s で 4500 km を越える伝送実験<sup>(3)</sup>も最近報告されている。増幅器の低雑音化、ラマン増幅の併用、増幅利得の平坦化、ファイバコアの拡大、分散スロープ補償、誤り訂正技術、等の研究が行われている。当初、光ソリトン波長多重方式も有望と考えられていたが<sup>(4)</sup>、チャンネル間の非線形相互作用の抑制が困難であることが次第に明らかとなり、信号強度の低減、ファイバコアの拡大等、極力、非線形効果を抑制する伝送方式が主流となってきている。

DWDM による大容量伝送技術は、ファイバの伝送帯域を最大限に利用し、10 Tbit/s 以上の伝送を狙った技術開発であり<sup>(5)(6)</sup>、チャンネル当りの伝送速度は 40 Gbit/s でシングルモードファイバ (SMF) または非ゼロ分散シフトファイバ (NZDSF) を用いた伝送が主流である。ラマン増幅による増幅器の広帯域化<sup>(7)</sup>、Duo-Binary<sup>(8)</sup>、光 CDM<sup>(9)</sup> などの変調方式による周波数利用効率の改善、PMD 補償技術<sup>(10)</sup>、等の研究が行われている。

一方、チャンネル当りの伝送速度が 40 Gbit/s を超えると、電気回路の速度限界のため、OTDM 技術が不可欠となる。また信号発生や伝送、信号分離などの各要素において、非線形パルス圧縮、スーパーコンティニューム<sup>(11)</sup>、光ソリトン伝送、非線形ループミラーなど、ファイバやデバイスの非線形性を積極的に利用した技術が研究されている。現在、高密度分散マネージメント技術を用いた 100 Gbit/s, 1000 km ソリトン伝送<sup>(12)</sup>や、フェムト秒パルスを用いた 1 Tbit/s を超える OTDM 伝送実験<sup>(13)</sup>も報告されている状況である。

このように伝送容量が大きくなるほど、各種線路パラメータや伝送パラメータの最適値、許容範囲をより精密に評価しておく必要がある。多くのパラメータの影響を評価するには数値シミュレーション手法が有効であり、今後これらの先端的光通信技術を実線路に適用

していく上で、シミュレーション技術の重要性はますます高まるものと考えられる。

そこで本論文ではQマップ法等<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>をベースとしたシミュレーションによる最適設計手法について検討を行った。周期的分散補償線路のモデリングをおこない、設計における基本的なパラメータを評価するとともに、伝送実験結果との比較検討を行った。

Mathematica 言語による伝送シミュレーションコードを開発し、パラメータ平面上で伝送特性を評価するQマップ法を分散補償光線路設計に適用した。特にファイバの非線形性を利用する光ソリトン線路において、ファイバの平均分散値、分散補償量、信号強度等のパラメータの最適値およびその許容範囲について明らかにし、光ソリトン線路の定量的設計を可能にした。

ま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、 $\pm 30$  ps/nm で一定値となること、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<sup>(16)</sup>。この結果を用いて、40 Gbit/s、640 km 伝送実験<sup>(17)</sup>、80 Gbit/s (40 Gbit/s, 2 PDM)、800 km 伝送実験<sup>(18)</sup>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マップ法による分散補償光ソリトン線路設計の有効性を示した。

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。シングルチャネルでは光ソリトン方式は、SN比が高く、ファイバ特性、増幅器特性への制約が少なく、長距離安定性に優れる等のメリットがあり、線路設計やパルス発生法等の基礎技術が確立されれば、今後広く採用される可能性があると思われる。

一方、非線形シュレディンガー方程式に基づくQマップ法はWDM線路設計に対しても有効である。波長数や波長間隔依存性、最適信号強度の評価等、システム設計上重要なパラメータ決定に適用できることを示した<sup>(19)</sup>。この結果を用いて、基幹系に導入が検討されているテラビット級光線路の設計条件について検討を行った。また実験との比較のため電力会社固有の光ファイバ設備である光ファイバ複合架空地線(OPGW)におけるフィールド伝送実験を実施し、最適伝送条件(信号強度、平均分散値等)が数値シミュレーションと一致することを確かめた<sup>(20)</sup>。

パーソナルコンピュータ(PC)の驚異的な性能向上にともない、インターネットを介してコードを交換することで、計算結果の相互検証が可能となりつつある。その結果シミュレーション研究の信頼性向上が期待できることについて指摘した<sup>(21)</sup>。これは方程式ベースの自然観からプログラムベースの自然観へ拡張する可能性を持っている。今後、実験データとの比較検討と併せて、シミュレーションコード自体の比較検討を実施することで、

数値シミュレーションの精度、信頼性を高めていく努力が不可欠である。

図 1.1 に超高速光通信分野における技術革新と伝送性能について示す<sup>(22)</sup>。過去 25 年間に、速度距離積にして  $10^8$  倍の性能向上が達成された。特に 1990 年代において、光ファイバ増幅器の実用化と波長多重技術の導入により、5 年間に 100 倍のスピードで伝送性能が向上しており、これがインターネット技術と結びつくことで 21 世紀の社会構造を根本的に変革していくことが予想される<sup>(23)</sup>、<sup>(24)</sup>。

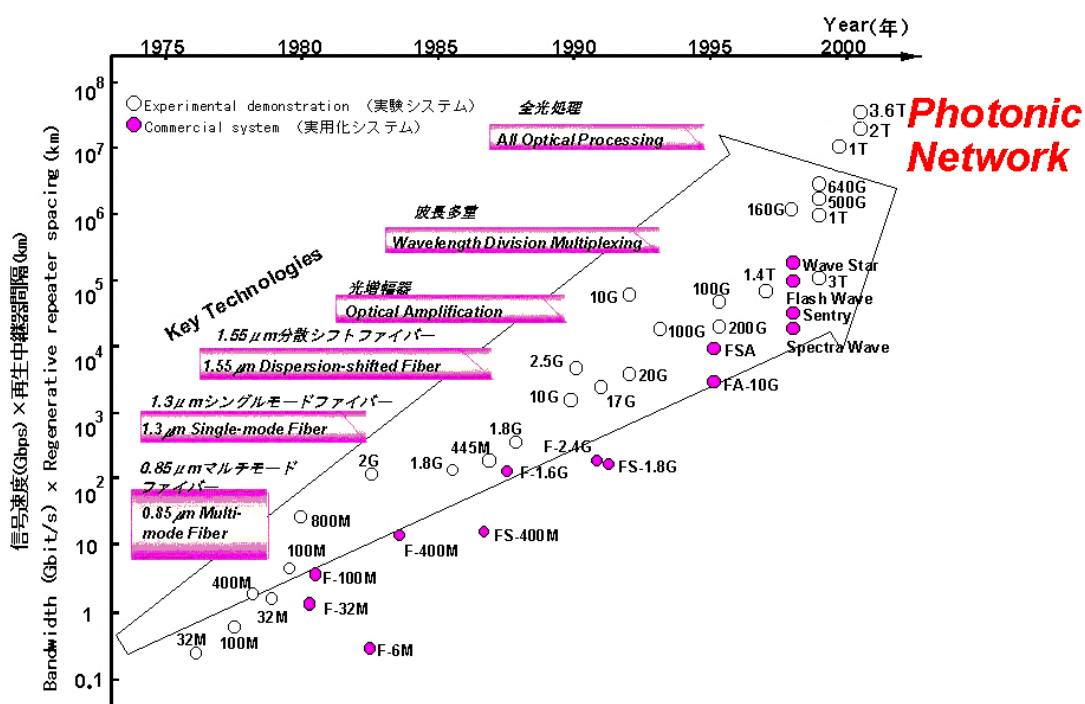


図 1.1 光通信における技術革新と伝送性能の向上<sup>(22)</sup>