

# テラビット光伝送時代の光ファイバ —波長多重技術を可能とするIP over WDM光通信技術—

波平 宜敬  
(株) KDD 研究所

## ●インターネットの普及にともなう通信需要の急増

最近のインターネット (IP; Internet Protocol) の爆発的な普及, 企業内LAN (Local Area Network) 間接続需要の急増等のデータトラフィックの急速な成長により, 通信の中身は, 音声からデータトラフィックに移行しつつ

ある. 図-1には光海底ケーブルを使った世界的な情報ハイウェイ形成の様子を, また, 図-2には, これまで敷設された太平洋横断光ケーブルの伝送容量増加の変遷と, 利用されるデータトラフィック急増の様子を示す<sup>1)</sup>. 大容量化の手段として波長多重 (WDM; Wavelength Division Multiplexing) 伝送への期待が高まっており, 国際間では太平洋地域で, 伝送容量 640 Gbit/s のPC-1 (Pacific Crossing-1: 16WDM × 10 Gbit/s × 4 Fiber

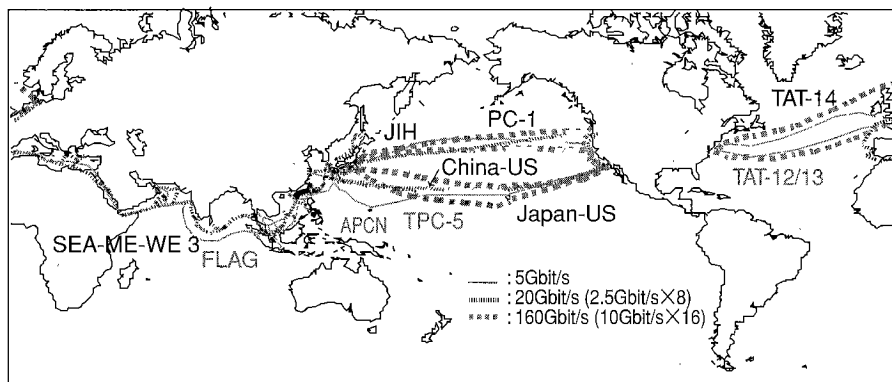


図-1 グローバル情報通信ハイウェイ: 光ケーブルネットワーク

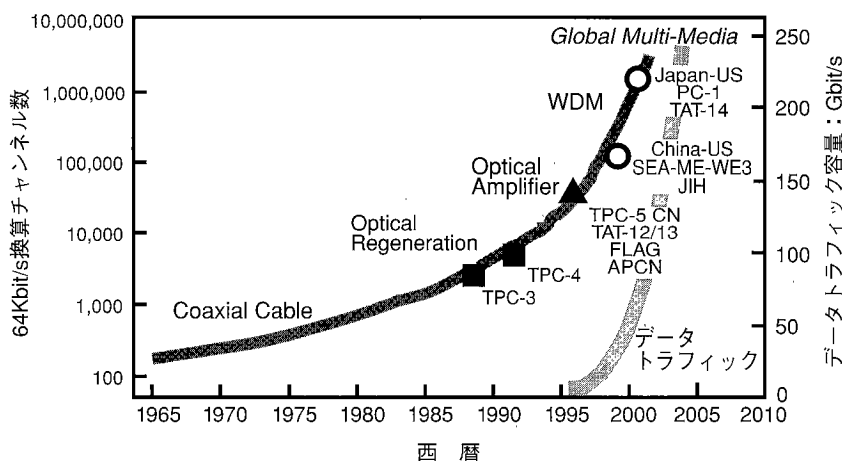


図-2 データトラフィックの増大

Pairs) および Japan-US (16 WDM × 10 Gbit/s × 4 Fiber Pairs) が、同様に大西洋では TAT-14 (16 WDM × 10 Gbit/s × 4 Fiber Pairs) ケーブルネットワークが2000年運用開始予定である。一方、国内では、JIH (Japan Information Highway) が、今年 (1999年) の4月1日からすでに運用を開始している。

### ●IPバックボーン用伝送路

IPバックボーン用伝送路の開発は、トラフィックの集中する大都市間や国際間光海底ケーブルなどでWDMによる広帯域化が顕著となってきている。

図-3に、1999年2月末時点での光ファイバ1本あたりの伝送容量を縦軸に、伝送距離を横軸に示してみた。1万kmの伝送が必要な(日米間の)光海底ケーブルですら、約700 Mbit/sが実現されており、伝送距離の短い陸上光ケーブルネットワークでは、3 Tbit/s (テラビット) が実現されている。図で、(●), (○), (▲), (△) および (□) は、それぞれWDM (NRZ/RZ), WDM (光ソリトン), TDM (NRZ/RZ), TDM (光ソリトン) および TDM/WDMの光信号波形を表している。

ここで、NRZ/RZは、光信号が有る(1)か無い(0)かのデジタルで表すパルス波形である。また光ソリトンとは、光パルスが外側に広がろうとする波(分散)とそれを内側に戻そうとする波(非線形性)とがうまくバランスして進む安定な孤立波で、長距離伝送しても光パルスの波形ひずみが生じない長距離WDM伝送に適した信号方式である。さらに、WDMは、波長を多重化して伝送することであるのに対し、TDM (Time Division Multiplexing) は、時間分割して多重化する通信方式のことを表している。

### ●光ファイバとは？

光ファイバは、人の髪の毛ほどの細さの石英ガラスでできており、いろいろな情報(電話やIPなどのデジタル情報)を乗せた“光”の通り道である。現在一般によく使用されている光ファイバは、図-4に示すように屈折率(その物質の中を光が通る速度)の高い物質(直径1/100~5/100ミリ)とそのまわりの屈折率の低い物質(直径約125/1000ミリ)でできており、光は図に示すように、その境目で全反射を繰り返して進んでいく<sup>2)</sup>。光ファイバは、ガラス容器の中に入れて回転し

ている石英ガラス棒(スート)に、光ファイバの原料となる四塩化ケイ素(SiCl<sub>4</sub>)と四塩化ゲルマニウム(GeCl<sub>4</sub>)を、燃料となる酸素と水素をガスバーナーで同時に送り込む。すべて気体であるが、化学反応により、スートが堆積し長い棒状になる。これを約2000°Cの高温の線引き炉で溶かし、水飴のように線引きすると光ファイバとなる。コアの屈折率は、ゲルマニウム(Ge)の割合によっていろいろな屈折率分布の形状が可能となる<sup>3)</sup>。

### ●WDM伝送にかかわる光ファイバの基本特性

図-5(a)に、光増幅器を用いた光伝送システムの概念図を示す。図で、入射した光パルスが、出口では広がっていくことが分かる。この光パルスの広がりの大きな要因の中に、波長分散(図-5(b))と非線形性(図-5(c))がある。

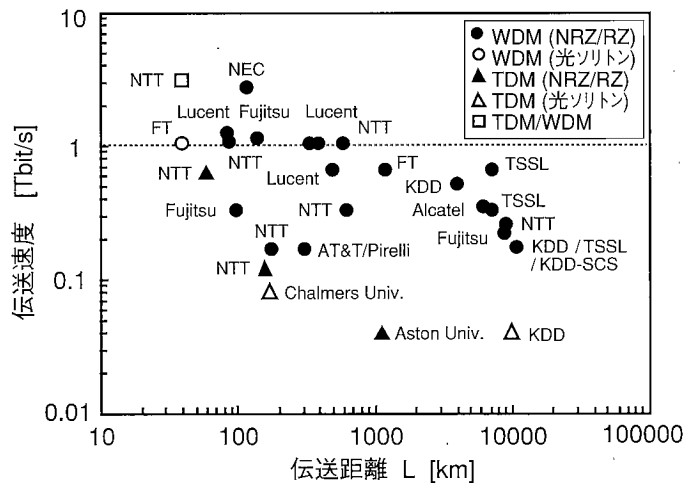


図-3 光伝送路の開発動向

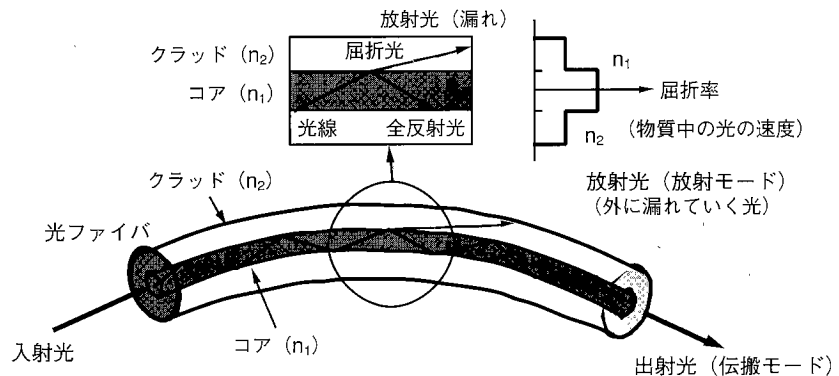


図-4 光が光ファイバを伝わる様子

## 波長分散とは？

雨あがりの水滴に太陽光線が当たると、きれいな虹ができる。波長は色に相当しており、色の光線は、屈折率（光速の媒質中と真空中の比）が異なる媒質に入射すれば、曲げられる（屈折する）<sup>2)</sup>。青色（短い波長）は、赤色（長い波長）よりも屈折率が大きいので、大きく屈折する。それで虹の7色は、上から赤、橙、黄、緑、青、藍、紫の順に並ぶ。これが波長分散（広がり）の基本原理である。

図-5 (b) に、波長分散の原理図を示す。スタートラインに、青、緑、黄、橙、赤、橙、黄、緑、青色の自動車が並んでいるとする。ピストルの号砲の後、自動車レースをしているのを思い浮かべてみると、色によって車の速度が異なり、ゴールでは、赤色の車が速度が速いため（屈折率が小さい）一着でゴールインし、青色は速度が遅いため（屈折率が大きい）ビリで到着する。

このように、色（波長）の違いによって速度（群速度）が異なるため、到着時間が違うことにより光パルスが広がる現象を、波長分散という。

## 非線形性とは？

図-5 (c) に、強力な光パルスを光ファイバに入射したときの非線形現象により光パルスが広がる様子を示す。光パルスを位相（波面）で表すと、図-5 (c) のように、光パルスの先頭部は、赤色（長い波長）に相当し、後頭部は、青色（短い波長）に相当する。光パルスは、光強度変化の大きいところほど、また伝送路が長いほど周波数変動が大きくなる。周波数は波長と逆数の関係にあり、波長が短いほど周波数が高いことを示す。したがって、青色が赤色よりも周波数が高いことになる。

図-5 (c) で、光パルスの先頭部（赤色）は、速度が速いため位相が広がり（レッドシフト）、後頭部（青色）では、速度が遅いため位相が圧縮される（ブルーシフト）。このようにして、入射光パルスの位相（周波数）成分が変動することは自己位相変調（SPM; Self-Phase Modulation）と呼ばれている。このSPMにより、光強度に応じて周波数変動することになり、光パルスが広がる現象を非線形性と呼ぶ<sup>4)</sup>。

## ● WDM（波長多重）を用いた光伝送方式で IP データを伝送するためには？

図-6 に“IP over WDM”が実現できる光ネットワークの概念図を示す<sup>1)</sup>。

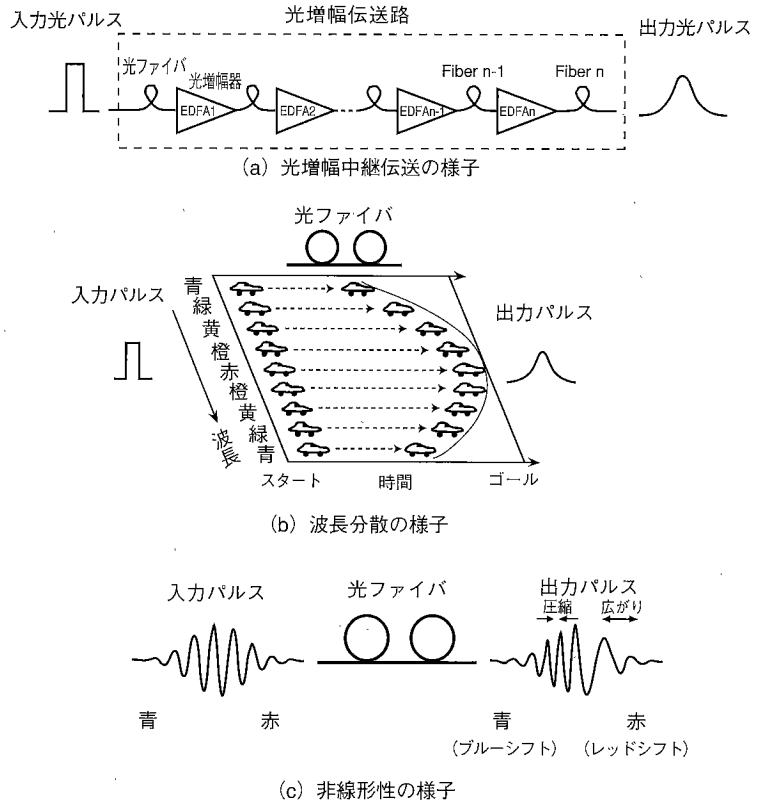


図-5 光増幅中継システムの伝送特性劣化要因

ATM (Asynchronous Transfer Mode) が波長  $\lambda_1$  に、SDH / SONET (Synchronous Digital Hierarchy / Synchronous Optical Network) が波長  $\lambda_2$  に、また IP が直接ルータから  $\lambda_3$  の光の波長（色）に入力され、WDM 端局装置を通して WDM 光伝送路に接続される。WDM の光パルス信号が、光ファイバと光増幅器 (EDFA; Erbium-Doped Fiber Amplifier) を長距離伝送された後も光パルスが広がらないためには、波長分散と非線形性からの悪影響をできるだけ小さくする必要がある。

## IP over WDM 用光ファイバ

図-7 に、通常の分散シフト光ファイバ (DSF; Dispersion Shifted Fiber) と IP over WDM 用  $A_{eff}$  拡大分散シフト光ファイバ (LEDSF; Large Effective Area DSF) の比較の様子を示す。ここで、IP over WDM 用  $A_{eff}$  拡大分散シフト光ファイバは、光ファイバの非線形定数 ( $n_2/A_{eff}$ ) を小さくした光ファイバであり、 $n_2$  は、非線形屈折率と呼ばれ、光のパワーが強くなったときに効果が大きくなるものである<sup>4)</sup>。図-7 (e) に示すように、 $A_{eff}$  は実効断面積と呼ばれ、光パワーが通る実効的な断面積を表しており、これを大きくすれば単位面積あたりの光パワーの影響を小さくできるため、最近、LEDSF の研究が進んでいる<sup>5)</sup>。

ここで、2種類の光ファイバの屈折率分布を図-7 (c) で説明する。その特徴は、DSF では、センターコアが細く

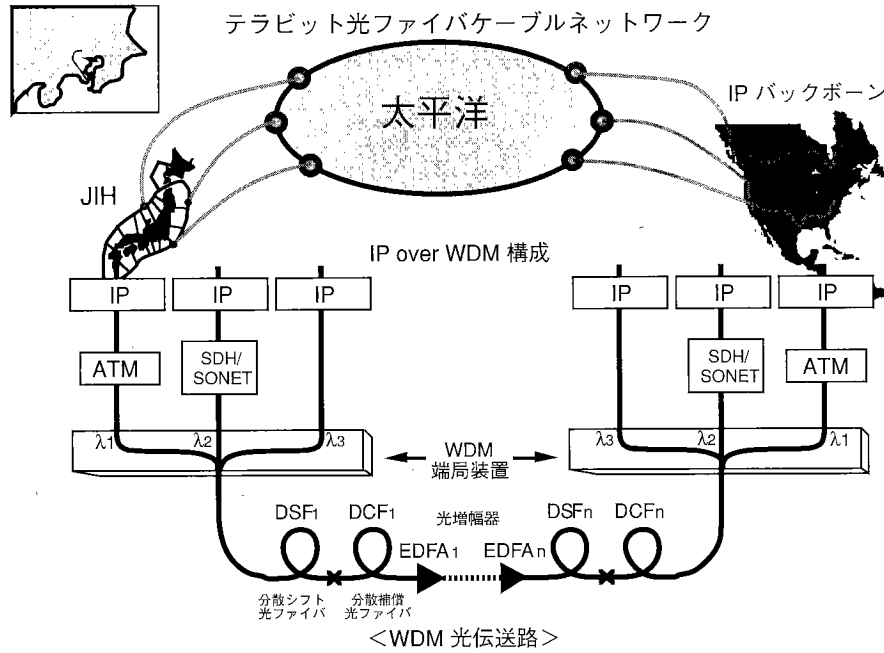


図-6 WDM (波長多重) 光伝送路

て高く、LEDSFでは、センターコアが太くて少し低くサイドリングの外側が少し低い溝を有する構造である<sup>5)</sup>。この外側が少し低い溝は、光のパワーが大きくなっても曲げ損失が大きくなるように、センタ方向に光のパワーを引きつける役目を担っている<sup>5)</sup>。図-7 (d) で示すように、DSFでは、コアが2重のリング状になっているが、LEDSFでは、3重のリング状になっており、光のパワー分布を図-7 (e) のように広げる働きをしていることが分かる。

光ファイバに、図-7 (b) のように2つの光信号を多重化して入射すると、DSFの場合には、図-7 (f) のように、WDM 伝送のときに、四光波混合 (FWM; Four-Wave Mixing) という非線形現象 (2光波間での干渉) が起こるため、2つの光波の隣にそれぞれ1つずつの光波 (サイドローブ) が発生し、光パルス波形が広がり、WDM 伝送ができなくなる。一方、光ファイバの非線形定数 ( $n_2/A_{eff}$ ) を小さくしたLEDSFでは、FWMが発生しないため WDM 伝送が可能であることが分かる。

このように、図-7 (a) に示すように光パルスを2種類の光ファイバに入射すると、DSFでは、図-7 (g) に示すように、出力端で光パルスが広がるため WDM 伝送ができなくなるが、LEDSFでは光パルスが広がらないため WDM 伝送が可能であることが分かる。

したがって、 $A_{eff}$  を拡大した分散シフト光ファイバ (LEDSF) を用いるならば WDM (波長多重) 伝送が可能となる。さらに、このLEDSFを WDM 信号が通る波長域における波長分散の傾き (スロープ) を少し平坦にするように改良した新しい分散スロープ補償形分散シフト光ファイバ

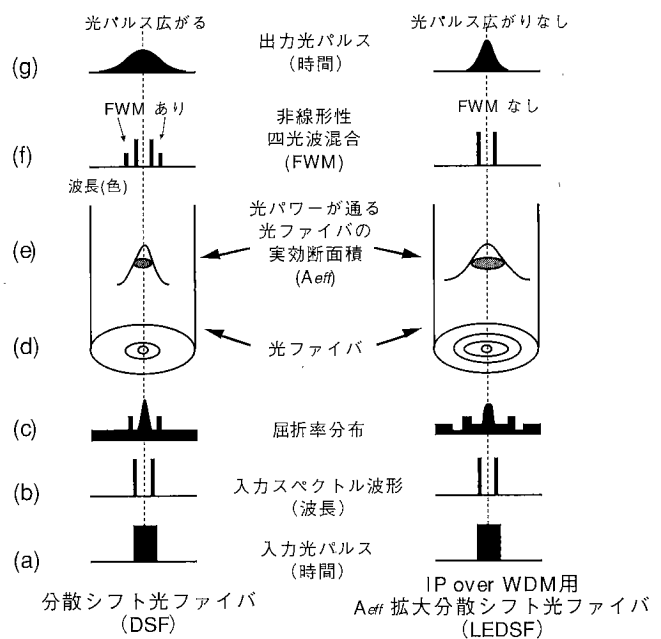


図-7 分散シフト光ファイバ (DSF) と IP over WDM 用  $A_{eff}$  拡大分散シフト光ファイバ (LEDSF) の比較

バを用いるならば、テラビット伝送実現の可能性はさらに高まる。

参考文献

- 1) 秋葉: 超大容量光海底ケーブルネットワークの最新技術動向, 光産業協会マンスリーセミナー, 7月27日 (1999).
- 2) 広田監修: スクイズド光, 第1章「光学の基礎 (波平)」, 森北出版, p.23 (1990).
- 3) 大久保勝彦: ISDN時代の光ファイバ技術, 理工学社 (1989).
- 4) 田幸, 本田編: 光測定器ガイド (増補改訂版), 第2部第6章「非線形光学特性の測定 (波平)」, オプトロニクス社, p.102 (1998).
- 5) 波平他: WDM 光伝送用低非線形光ファイバ, 電子情報通信学会, 技術報告, OCS99-19, p.61 (1999).

(平成11年9月24日受付)