

高密度波長多重通信に向けて

佐藤 健一・鳥羽 弘

デジタル伝送技術の発展を語る上で、光ファイバー伝送技術はそのインパクトの大きさの点で、比類のない革新といえる。1966年のKaoらによる石英ガラスを用いた低損失光ファイバーの可能性の指摘と1970年のコーニング社による20 dB/kmの低損失光ファイバーの実証以降、光ファイバー伝送システムの実用化競争が世界的に繰り広げられ、日本の技術はそれを牽引した¹⁾。1981年からは、本格的な光通信システムとして、F-32 M/F-100 M方式が、近距離区間に導入された(図1参照)。それ以降、長波長レーザーとの組み合わせによる単一モードファイバー伝送の実用化が加速されるとともに、零分散波長が光ファイバーの最低損失波長である $1.55\ \mu\text{m}$ となるように設計された分散シフトファイバー(dispersion-shifted fiber: DSF)が実用化され(1988年)、また、同期デジタルハイアラキー(synchronous digital hierarchy: SDH)の国際標準化に伴い、1989年からはSDHに対応した新しい方式が開発され導入されてきた。また、ビットレートや信号形式に依存せず、波長多重(WDM)信号の一括増幅も可能な光ファイバー増幅器の光通信へのインパクトが、1989年の伝送実験により実証され、その後、光ファイバー増幅器を用いたFA-2.4 G、FA-10 G等の超高速光増幅中継伝送方式がNTTにおいて世界に先駆けて実用化され、陸上、海底を含め中継伝送コストを大幅に低減させてきた¹⁾。

近年、波長合/分波器などの光部品技術の進展を背景に、時分割多重(TDM)伝送技術に加えてWDM(または「高密度波長多重(dense WDM)」とも呼ぶ)伝送技術が実用化されるに至った。WDMは1996年頃から北米の長距離系を中心に本格的な導入が開始された。トラフィック

の急増に対する伝送容量の拡大要求に際し、当時北米に敷設されていた $1.3\ \mu\text{m}$ 帯に零分散波長をもつSMF(single-mode fiber)は、偏波モード分散やファイバーコネクタからの反射が大きく、10 Gbit/sへの拡張が困難な区間が相当数あった。このことが高速TDMではなく $2.5\ \text{Gbit/s} \times n$ のWDM伝送の導入を加速する大きな要因となった。現在WDMのチャンネル当たりの速度は2.5 Gbit/sが主流であり、多重数としては16波以下が多く用いられている。また多重数が30~40波またはチャンネル速度が10 Gbit/sのシステムの導入、あるいは、多重数が100波以上のシステムの研究開発が世界的に進められている。また、光ファイバーの超大容量性の追求の観点からは、超高速伝送技術とWDM技術の組み合わせにより、1996年にはテラビット光伝送の検証が行われ、さらに1999年には、3 Tbit/sの伝送実験が報告されるに至っている²⁾。

WDMを用いた超大容量の伝送システムの導入を加速する要因は、インターネットに代表されるデータトラフィックの急増である。2000年代の初頭には、全トラフィックの半分以上がインターネットトラフィックとなることが予測されている。インターネットを支えるIP(internet protocol)ルーター技術も急速に進展しており、2.5 Gbit/sのインターフェース速度を有するスループット数十Gbit/s以上のルーターが導入され始めている。現在、超高速のIPルーターと大容量WDM伝送を組み合わせることにより、従来と比べて大幅に低コストなデータ転送網の実現やIP電話の提供に向けた技術開発が進展している。このようにネットワークのトラフィックが従来のコネクション型の電話中心からコネクションレス型のデータ中心へと移行する中で、IP技術の進展と光技術の進展に支えられネットワークのパラダイムは大きく変化することが

NTT 未来ねっと研究所(〒239-0847 横須賀市光の丘1-1)
E-mail: kenichi@exa.onlab.ntt.co.jp

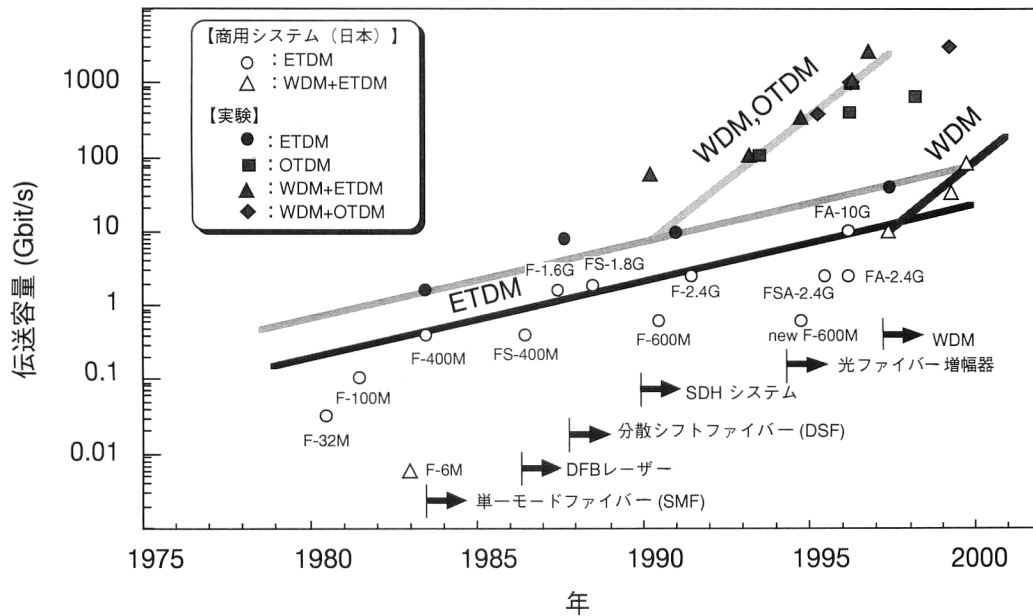
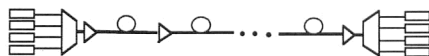


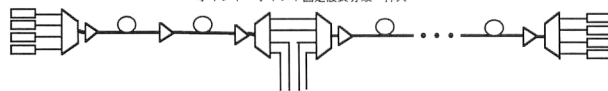
図1 光ファイバー伝送大容量化の進展。

● ポイントツーポイントWDM技術

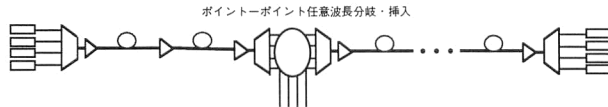


ポイント-ポイント固定波長分岐・挿入

現在導入されている
ほとんどのシステム

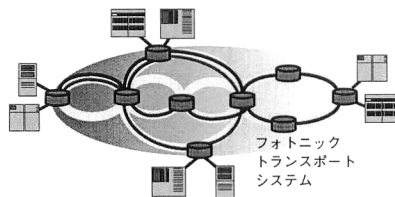


現在一部で導入され
ているシステム



開発中

● フォトニックネットワーク技術 (波長ルーティング)



フォトニック
トランスポート
システム

研究・開発中

図2 WDM 技術の進展。

予想される。それを実現する上で、上で述べたポイント-ポイントの WDM 伝送に加え、光レベルでルーティングを行うフォトニックネットワーク技術を用いたフレキシブルで大容量な伝達網の実現が重要な課題であり、各国で研究が進められている。この光技術を最大限に活かしたフォトニックネットワークは、将来のネットワークを経済的に実現する上で重要な技術であり、情報社会の基盤を構築する上で大きなインパクトをもつものと考えられる。本論ではこれら WDM をベースとする通信技術の概要を紹介する。

1. WDM 伝送技術

WDM 伝送システムとしては現在、主としてポイント-ポイントのシステムが世界的に導入されている (図2)。また、単純に2地点間を結ぶ伝送に加え、途中のノードであらかじめ決められた波長を分岐・挿入するシステムも一部導入され、さらに任意の波長を自由に分岐・挿入するシステムの導入も現在検討されている。

本節では、ポイント-ポイントの WDM 伝送技術の発展を概説する。

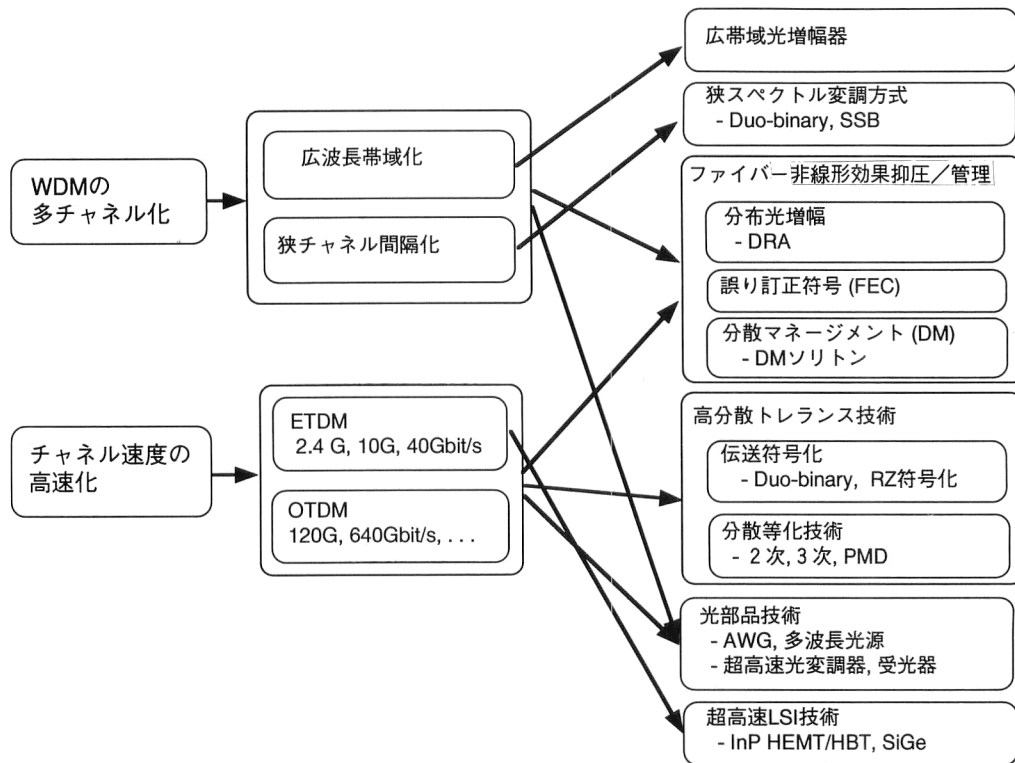


図3 大容量光伝送技術の課題。

1.1 WDM 伝送における技術課題

光伝送システムの大容量化へのアプローチとして、チャンネル伝送速度の高速化と WDM の多チャンネル化がある。光増幅器の開発により、WDM 信号を一括して増幅中継することによるシステムの低コスト化が可能となり、WDM 伝送システムが導入されるようになった。WDM 伝送システムは送受信端に光合分波器を配置しておけば、需要に応じて多重波長数を追加していけばよいので、拡張性に優れ、需要予測の不透明な状況での経済的なシステム構築に適している。一方、インターネットに代表されるようなデータトラフィックの急激な増加は、今後光中継伝送システムの大容量化を加速するものと考えられるが、WDM の多チャンネル化を進めていくと、管理する装置が伝送容量に比例して増加していき、装置およびネットワークのマネージメントが煩雑になる。たとえば、テラビット級の伝送システムを構築する場合、2.5 Gbit/s では 400 チャンネル以上、10 Gbit/s では 100 チャンネル以上の多重数が必要となる。このため、光システムの大容量化を進めるには、WDM のチャンネル数の増大とともに、チャンネル伝送速度の高速化が必須である。

図3に大容量光伝送を行うための技術課題を示す。WDM の多チャンネル化を行う場合、占有波長帯域の広帯域化とともに、狭チャンネル間隔化（または周波数利用効率

の向上）が必要である。広波長帯域化を実現するためには、光増幅器の増幅帯域の拡大が必須である。また、狭チャンネル化を実現するためには、狭スペクトル幅を有する信号変調方式とともに、狭チャンネル間隔を有する光合分波器が必要となる。光デュオバイナリ符号は周波数占有帯域幅が信号伝送速度とほぼ等しく、従来の NRZ (non return-to-zero) 符号と比較して約半分となっており、周波数利用効率を向上するのに有利である³⁾。光デュオバイナリ符号を用いて 20 Gbit/s において 0.6 bit/s/Hz の効率が報告されている⁴⁾。狭チャンネル間隔の光合分波器では、石英系 PLC (planar lightwave circuit) により 25 GHz 間隔で 128 チャンネルの AWG (arrayed waveguide grating) 型合分波器が実現されている⁵⁾。一方、チャンネル数の増加とともに光ファイバーへの入力パワーが増大し、四光波混合 (four wave mixing: FWM) や相互位相変調 (cross phase modulation: XPM) 等のファイバー非線形効果が伝送特性に影響を与える。また、チャンネル伝送速度が増大すると、受信器の受信感度が伝送速度に応じて劣化するため、一定の伝送距離を確保するためには光ファイバーへの入力パワーを増大する必要があり、結果として自己位相変調 (self phase modulation: SPM) 等の非線形効果の影響を受ける。これらの影響を低減するため、分散マネージメント^{6,7)} や分布ラマン増幅技術^{8,9)} が適用され、高密

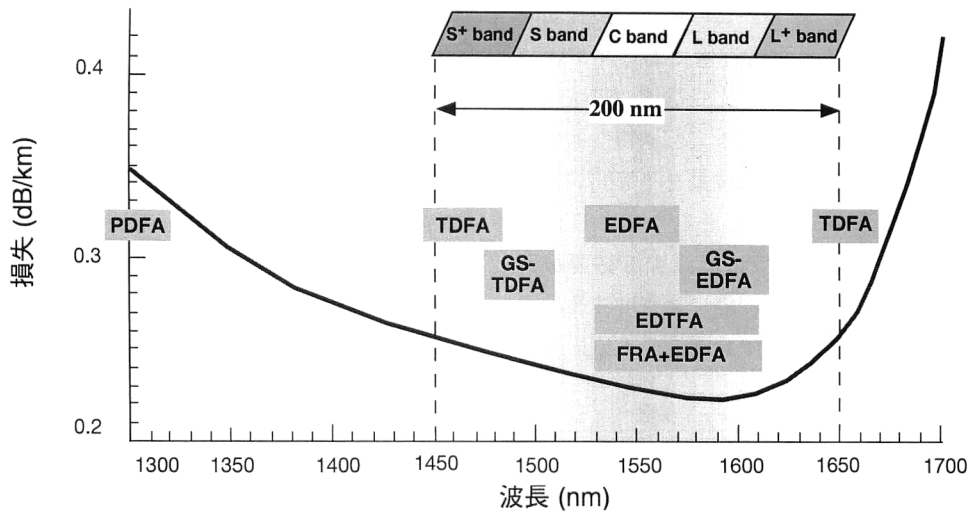


図4 広帯域光増幅技術. TDFA: thulium-doped fiber amplifier, GS-TDFA: gain-shifted TDFA, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, GS-EDFA: gain-shifted EDFA, EDTFA: tellurite-based EDFA, FRA+EDFA: fiber Raman amplifier and EDFA.

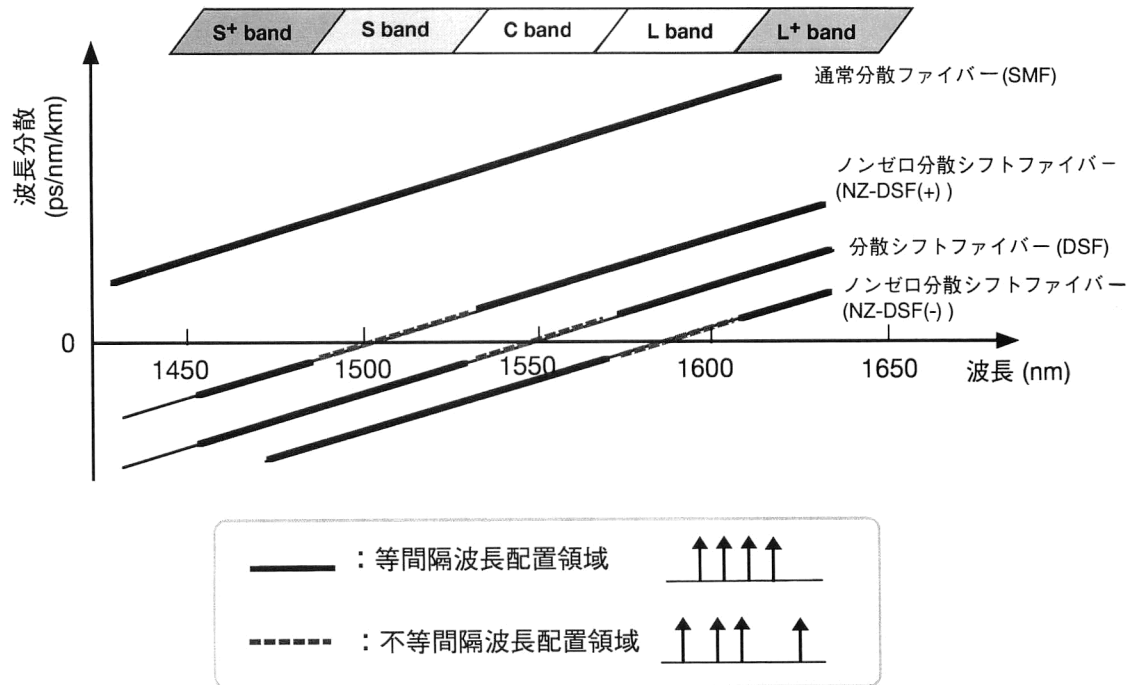


図5 各種光ファイバーの分散特性と波長配置.

度大容量 WDM 伝送が進められている。

チャンネル速度の高速化を行う場合、分散ばらつきおよびその変動に対して十分に高いトレランスが必要になる。分散トレランスは信号伝送速度の2乗に反比例して厳しくなる。分散トレランスを十分に確保するために、スペクトル帯域幅の狭い変調方式を採用するとともに、分散等化技術が重要である。また、超高速光伝送を支えるための光部品技術、超高速 LSI 技術の開発が必要である。

前述のように WDM の大容量化のためには広い増幅波

長帯域幅が必要である。図4に種々の光ファイバー増幅器の利得帯域幅を示す¹⁰⁻¹⁶⁾。各種増幅技術を組み合わせることにより、ファイバーの低損失波長域である1450～1610 nm (20 THz) をほぼカバーすることが可能となっている。

WDM 伝送を行う場合、光ファイバーの分散特性と波長配置の関係を配慮する必要がある。図5に各種光ファイバーの波長分散特性と信号波長配置の関係を示す。零分散波長域ではファイバー伝送時にチャンネル間の位相整合がと

れ、FWM 光の発生効率が高くなる。この場合、波長間隔を等間隔に配置すると、信号光波長近傍において FWM 光が発生し、信号光とのビート成分が光受信機の帯域内に生じるコヒーレントクロストークによって伝送特性劣化が起る。このため、この波長領域では波長を不等間隔に配置して FWM 光が信号光波長近傍に発生しないようにするか、もしくは信号光レベルを十分に低減する必要がある。信号光レベルを低く設定して等間隔に高密度波長配置する場合には、前述のように分布ラマン増幅や FEC (for-

ward error correction) による信号 SN 劣化を補償する方式の併用もなされている。

1.2 WDM 伝送実験

1470 nm 帯 (S⁺バンド)、1550 nm 帯 (Cバンド)、1580 nm 帯 (Lバンド) 光増幅器をハイブリッド構成により組み合わせ、DSF を伝送路とした、3 波長帯 WDM 伝送実験が報告されている¹⁷⁾。図 6 にこの 3 波長帯中継伝送実験の構成と WDM スペクトルを示す。複数の波長帯を用いた WDM 伝送を行う場合には、波長帯間で生じるファイ

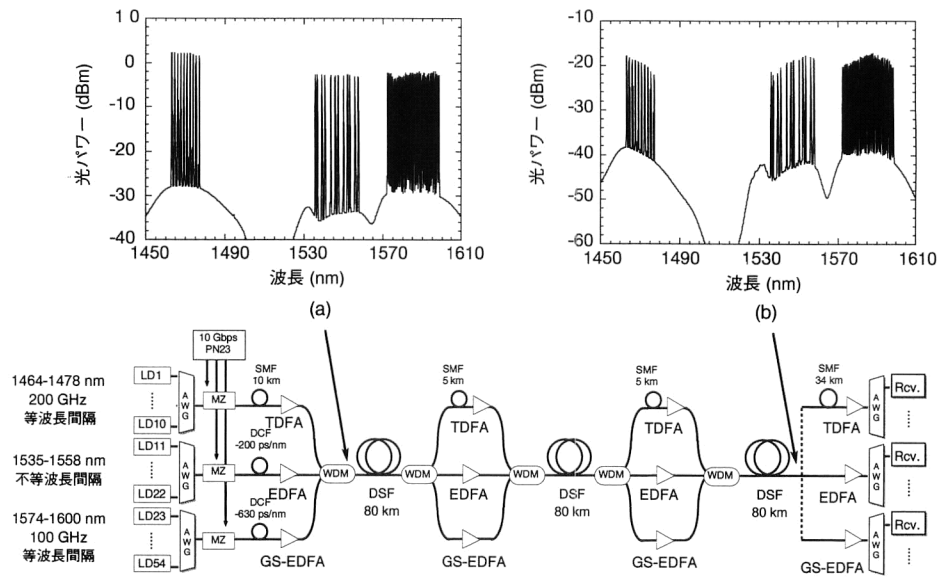


図 6 3 波長帯を用いた WDM 伝送実験。

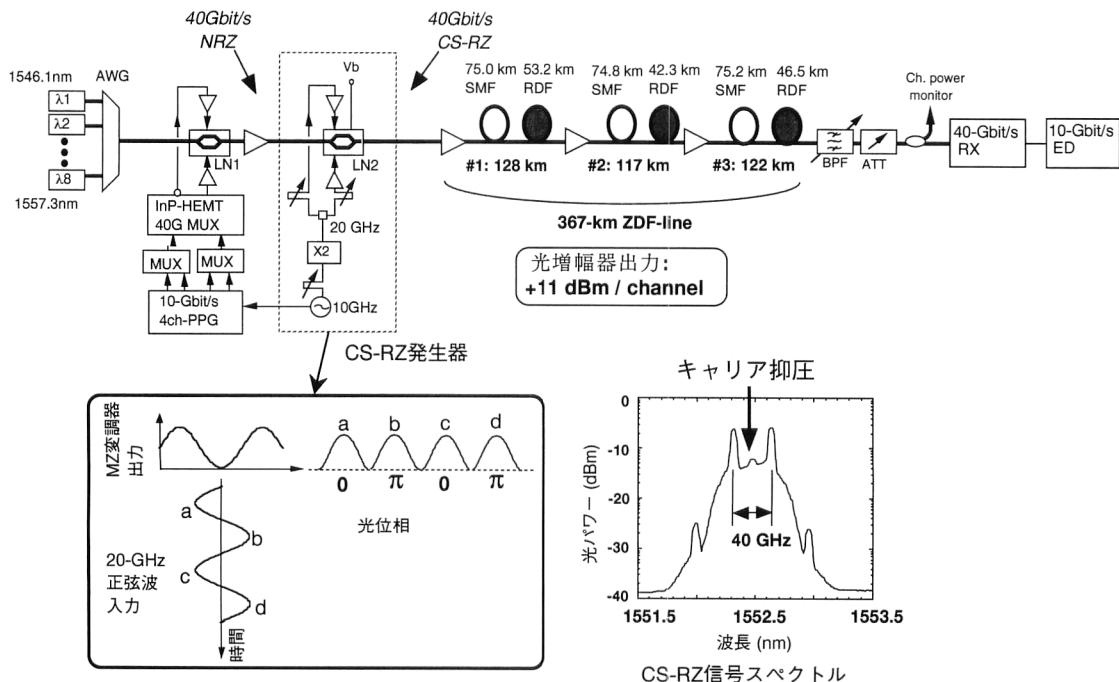
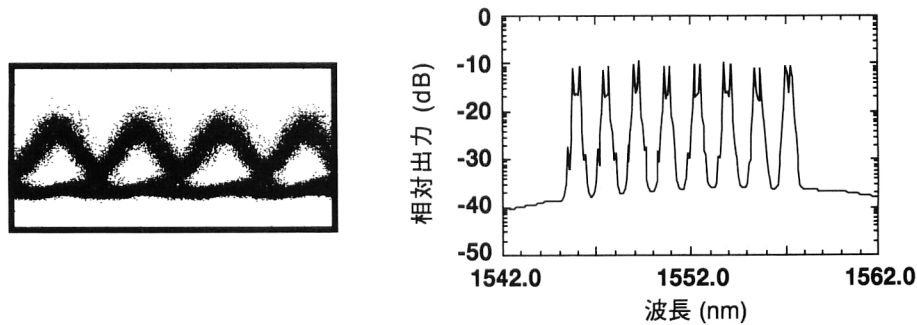


図 7 ZDF 伝送路を用いた CS-RZ 符号 40 Gbit/s WDM 伝送実験。RDF: reverse dispersion fiber, ZDF: zero dispersion flattened fiber transmission line, BPF: 0.9-nm optical bandpass filter, ED: error detector.

非線形効果を考慮した波長帯配置設計が必要である。上記実験においては、DSFの波長分散特性を考慮して波長帯間で群遅延の差が大きく、ウォークオフが互いに大きくとれるような波長帯配置を取ることで、波長帯間での四光波混合、相互位相変調、誘導ラマン散乱の影響を受けにくくすることができる。具体的には、S⁺バンド、Lバンドにそれぞれ10チャンネル、32チャンネルを等間隔に、Cバンドに12チャンネルを不等間隔配置で波長配置を行い、トータルで1460~1600 nmの波長帯に54波長のWDMを行っている。各中継段で波長帯ごとにT DFA (thulium-doped fiber amplifier), EDFA (erbium-doped fiber amplifier), GS (gain shifted)-EDFAで増幅するハイブリッド光増幅を行っている。10 Gbit/s×54 WDM信号をDSF 240 km (80 km×3中継) 伝送し、良好な伝送特性が得られている。

チャンネル伝送速度が上昇すると、1チャンネル当たりの信号光パワーが上昇しファイバー非線形特性の影響も受けやすくなるため、数百 kmの中継伝送系では非線形耐力が高く、かつ分散トレランスが大きな伝送符号を選択することが重要である。図7にキャリア抑圧RZ (carrier suppressed return-to-zero: CS-RZ) 符号を用いた40 Gbit/s×8チャンネル WDM伝送実験の例を示す¹⁸⁾。CS-RZ符号は1ビットごとにパルスの位相が反転する特徴をもったRZ符号であり、そのスペクトルはキャリア成分が抑圧され、スペクトル広がりが3 B (B:伝送速度)程度と、通常のRZ符号 (4 B程度) よりもコンパクトで分散トレランスが高いことが予想される。CS-RZ符号の発生は、MZ (Mach-Zehnder)-LN (LiNbO₃) 変調器の透過特性の谷を中心に伝送速度の1/2の周波数で±π変調することにより得られる。実験では200 GHz間隔、8チャンネル



(a) 367 km伝送後の信号波形 (b) 伝送後のWDMスペクトル

図8 ZDF 367 km 伝送後の信号波形と WDM スペクトル。

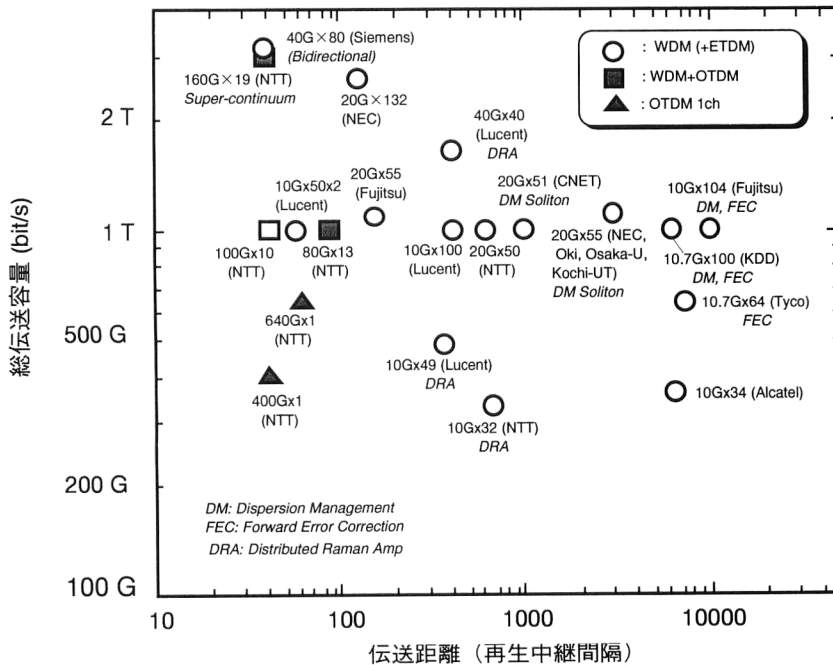


図9 大容量光中継伝送実験。

WDM 光出力を InP-HEMT (high electron mobility transistor) IC MUX (multiplexer) 出力をプッシュプル型の MZ-LN 変調器 (LN1) で一括変調することにより 40 Gbit/s NRZ 光信号を生成し、2 段目の MZ-LN 変調器 (LN2) により CS-RZ 符号化している。伝送路は SMF と、波長分散と分散スロープが SMF とは逆の特性を有する逆分散ファイバー (reverse dispersion fiber: RDF) を組み合わせた分散フラット伝送路 (zero dispersion flattened transmission line: ZDF) 約 120 km を EDFA により中継して 3 スパン、367 km で構成している。ZDF 伝送路は、局所分散値の絶対値が十数 ps/nm/km の大きな値をもち FWM 光の発生を抑圧しつつ、使用波長帯 (1546.1~1557.3 nm) での総分散値は -3~+16 ps/nm と小さく、高速信号の波長分散劣化も抑圧可能である。伝送実験では 1 チャネル当たりのファイバー入力を +11 dBm とした。図 8 に 367 km 伝送後の波形と WDM スペクトルを示す。ファイバー伝送後も FWM 光の発生がなく、良好な受信感度特性が得られた。一方、NRZ および通常の RZ 符号を用いて同一ファイバー入力パワーで伝送した場合には顕著な伝送特性劣化が生じ、CS-RZ 符号の有効性が確認された。

図 9 にこれまでに報告されている大容量光増幅中継伝送実験をまとめる。広帯域・低利得偏差の光増幅器の開発に伴い、伝送距離、総伝送容量とも年々増大し、前述のように総伝送容量は片方向光伝送容量で 3 Tbit/s が報告されている²⁾。これは、160 Gbit/s OTDM (optical time division multiplexing) 信号を 19 チャネル波長多重したもので、スーパーコンティニューム (SC) 光源を用いて生成した WDM 信号 (信号帯域 69 nm) を、テルライト EDFA により一括増幅して DSF 40 km を伝送している。また、40 Gbit/s×80 チャネルで総容量 3.2 Tbit/s の双方向伝送実験が報告されている¹⁹⁾。さらに、長距離中継伝送実験では、1.04 Tbit/s (10 Gbit/s×104 チャネル WDM)、10,000 km 伝送が報告されている²⁰⁾。この実験では、信号帯域として C バンドと L バンドを使用し、伝送路として、大口径フ

ァイバーを用いるとともに、分散スロープを含めた分散マネジメント伝送路を使用している。さらに、分布ラマン増幅と FEC を併用することによりエラーフリー動作を実現している。

2. フォトニックネットワーク技術

フォトニックネットワークの定義は必ずしも明確ではないが、従来のポイント-ポイントの TDM/WDM 光伝送から発展して、ルーティング、スイッチング、光処理、等のネットワーク転送機能を光技術を用いて行うネットワークを本論ではフォトニックネットワークと呼ぶことにする。表 1 に光技術が伝達機能に与えるインパクトをまとめる。伝送・多重化における光技術の有効性は 1 章でも述べたように顕著であり、現在すでに広く実用化されている。次の段階として、以下の章に述べる波長ルーティングやそれを利用した切り替え系を含む光レイヤーでの網制御の導入に向け、世界的に研究開発が進められている。更には、光の直進性・波面性等の光の特徴を活かした 2 次元処理や 3 次元空間結線等は今後の重要な課題である。また、大規模な光メモリーの実現が困難な状況においては、論理深度の深い光処理は現実的ではなく、この領域で広範囲に電気処理をリプレースすることはきわめて難しい。光処理の広範囲な適用に関しては今後いくつかのブレイクスルーが必要である。

表 2 多重化方式とルーティング。

多重化方式	フロー/チャネル/ パス識別	ルーティング
パケット	パケットヘッダー	store-&-forward 電気処理 +
ATM	セルヘッダー	空間スイッチ
SDH (PDH)	TDM フレーム内 の時間位置情報	タイムスロット入れ替え +
		空間スイッチ
WDM	波長	波長ルーティング (セルフルーティング) and/or 空間スイッチ

表 1 光技術が伝達機能に与えるインパクト。

光技術のポテンシャル	伝達機能	インパクト
●光の並進性を利用した 2 次元処理, 3 次元空間結線	転送プロトコル	光速プロトコル/光信号処理
●新たに光レイヤーでの制御が可能	網制御	フォトニックレイヤーでのクローズドオペレーション 高信頼度網構成 (プロテクション等)
●光処理によるパッシブデバイスによる 波長ルーティング	ルーティング	波長ルーティングによる大容量信号の簡易なルーティング ノード装置大容量化・低消費電力化
●波長軸による非同期多重 ●任意のフォーマットの電気信号の自由な多重	多重	トランスペアレンシーを活かした光インターフェース 超大容量信号の簡易な多重
●40 THz を超える超広帯域性と超高速性	伝送	Nw 機能強化のための原資 (基盤)

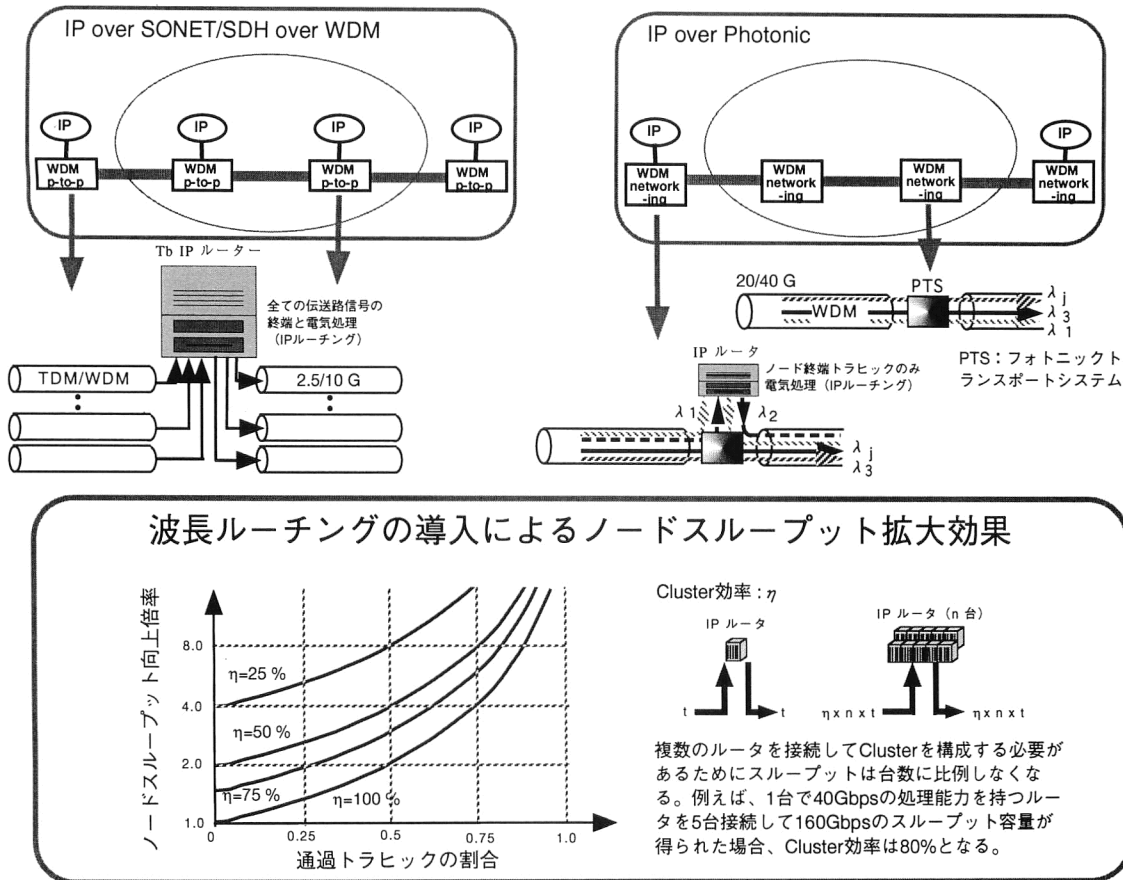


図10 波長ルーティングの導入によるノードスループットの拡大。

2.1 波長ルーティング

電気処理技術と比較して、光技術の大きな特徴のひとつとしてパッシブデバイスによる波長ルーティングがある。この機能を用いることにより、従来伝送ノード（クロスコネクタ、ADM (add/drop multiplexer)）において、SDH (PDH) 伝送においてはTDMフレーム内の時間位置、ATM (asynchronous transfer mode) においてはセルのヘッダー、により行われていたパス/チャネル/フローの識別ならびにルーティングに波長を利用することが可能となる（表2）²¹⁾。現状のネットワークでは、電気処理ノードのタンデム接続により、ノードごとに光/電気変換と電気信号終端処理・ルーティングを繰り返す転送方式が用いられている。たとえば、ATM/IPでは通過ノードごとにセル/パケットごとの蓄積転送処理が行われる。一方、波長ルーティングを用いることにより、必要に応じてエンド-エンドを光レベル（波長）で直結することが可能となり、従来の電気信号終端処理やstore-&-forwardに基づくルーティングによる転送遅延が最小化される。

光レイヤーでのルーティング（波長ルーティング）を導入することにより得られるノードスループットの拡大効果

を図10に示す。IP (over SONET (synchronous optical network)/SDH) over WDM (2.2参照)においては、ノードごとにすべての伝送路信号の終端とパケットごとの電気処理 (IPルーティング) を行う必要がある。一方、フォトニックネットワーク (IP over OP (optical path)) では各ノードでは終端されるトラフィック（波長パス）のみを電氣的に終端し電気処理 (IPルーティング) を行うが、その他の、ノードを通過するトラフィックは光のまま通過させることができる（波長ルーティング）。これにより、ノードに必要な電気処理を大幅に低減することができる、必要な電気IPルータの容量が削減できる²²⁾。このような効果は、ノードが大容量であればあるほど大きい。

2.2 レイヤー構成のシンプル化

通信を行う場合、用途に応じて各種のエンティティが用いられる。たとえば、レイヤー3では、X 25, SMDS (switched multi-megabit data service), IPパケットが、レイヤー2ではフレーム（フレームリレー）が、レイヤー1/2ではATMセルが、レイヤー1ではSDH, WDM (オプティカルチャネル) などが利用される。各レイヤーのもつ転送機能の中で多重に関していえば、多重化可能な最大

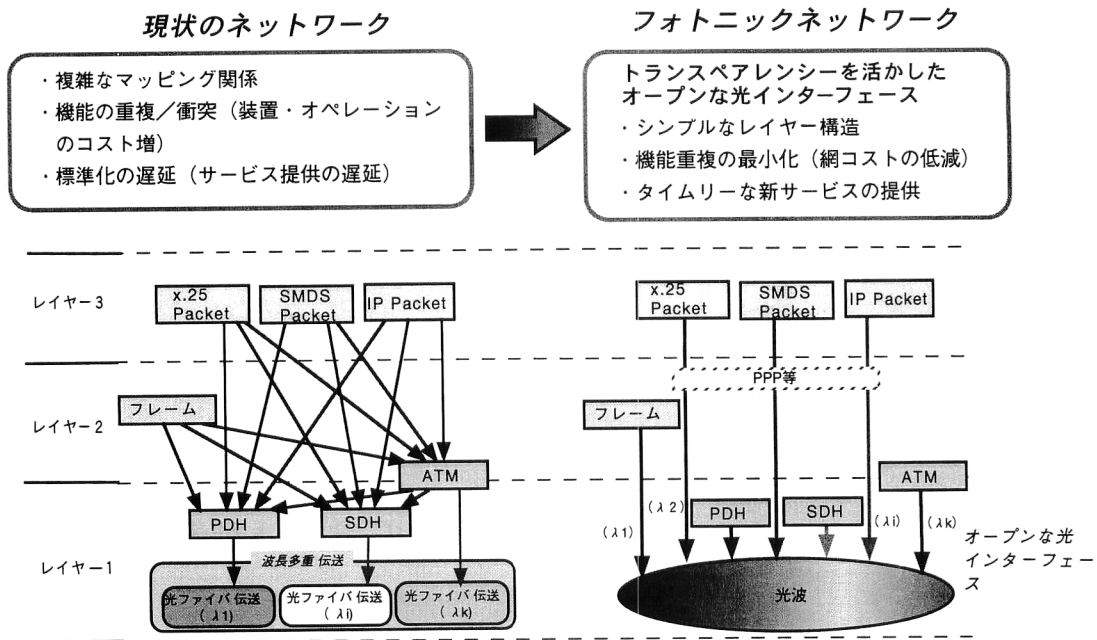


図 11 フォトニックネットワークの利点—フレキシブル光インターフェース。

速度は一般に低位レイヤーほど大きく、トータルの容量が数十 Gbit/s を超える領域では、WDM の有効性はきわめて大きい。

現状の転送ネットワークではレイヤー構造的に見ると、複雑なマッピング関係が存在し (図 11 参照) 往々にして複雑なレイヤー構成を取る場合がある。たとえば、IP パケットを転送するのに、ATM レイヤー、SDH レイヤー、WDM レイヤーを経由する場合がある (IP over ATM over SDH over WDM)。この場合、各レイヤー間で機能が重複しており、また、網の故障に伴う切り替え (プロテクション/リストラクション) においては、複数のレイヤーに機能がインプリメントされている場合は、各レイヤーでの切り替えが競合しないように、オペレーションにおける協調動作が必要となる (たとえば、SDH 網における伝送端局装置とクロスコネクタ装置の切り替えの協調)。

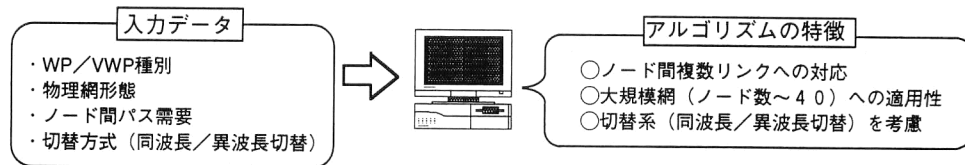
フォトニックネットワークの光波レイヤー (レイヤー 1) はトランスペアレンシーを活かしたオープンな光インターフェースの実現を目指している。これにより、各種のエンティティ (ATM セル、IP パケット、SDH 信号、等) を効率良く直接収容できる単純なレイヤー構成が実現され、網内のルーティングは単一種類の、パッシブデバイスを用いた波長ルーティングで実現される。これにより、機能重複の最小化 (網コストの低減) やタイムリーな新サービスの提供がやりやすくなる (図 11 参照)。なお、図 11 は各種のエンティティの直接収容が可能となるように光波レイヤーを規定すべきであることを示しているが、

対地間のトラフィックが小さい場合などは (たとえば、2.5 Gbit/s 以下)、それを直接光レイヤーに収容するのではなく、従来どおりに他のレイヤーを介して転送すればよい。

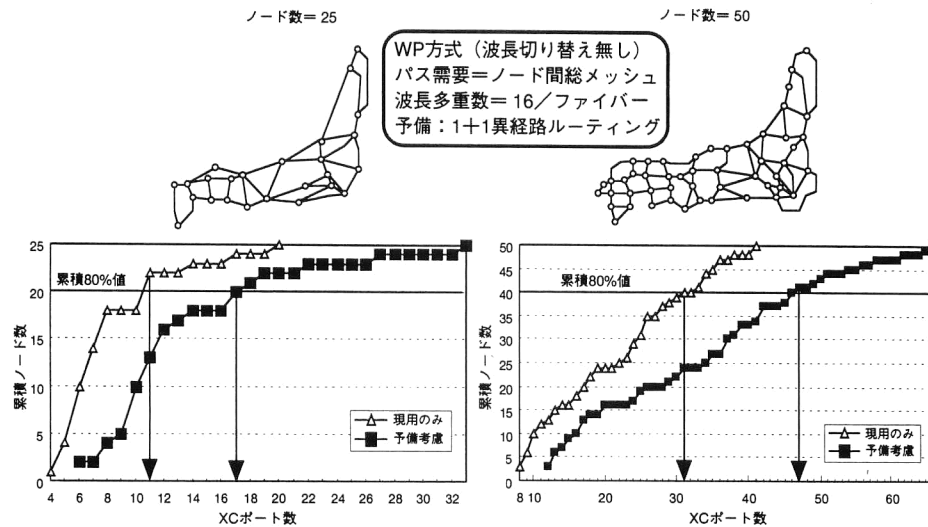
2.3 伝達網構成と光パス収容設計

フォトニックネットワークの網形態としては、長距離網あるいは IP のバックボーンとして、拡張性とフレキシビリティに優れたメッシュ構成、マルチファイバリング²³⁾ や既存の SDH のリング網の一形態に WDM/波長ルーティング技術を適用した 2/4 fiber bi-directional optical path switched ring²⁴⁾ をはじめとする大規模リング網構成が、地域網においては、所要トラフィック量に応じてマルチファイバリング網、2/4 fiber uni-directional optical path switched ring 網^{25,26)} 等が用いられることとなる。

オプティカルパスの実現方法としては、パスの終端点間で 1 波長を割り当てる方式 (WP: wavelength path)、リンクごとに必要に応じて波長を変える方式 (VWP: virtual wavelength path) が提案されている²¹⁾。パスを伝送路網へ収容する場合には、一般にルート最適化が必要である。WP においてはルートの決定に際し、ファイバー内で波長衝突が起こらないように波長割り当てを行う必要がある。波長割り当てを伴う経路決定問題は NP-complete²⁷⁾ であり、網規模がある程度以上大きい場合には (ノード数が数十以上の場合)、ヒューリスティックなアルゴリズムの開発が必要となり、これに関してはこれまでい



(a) オプティカルパス収容設計ツール



(b) XCノード所要ポート数評価結果

図12 オプティカルパス収容設計.

くつかの検討結果が発表されている。VWP方式はリンクごとに波長変換が可能のため、WPと比べて網内での波長利用効率が高く、逆にファイバー当たりの波長多重数が制約されている場合には網内で必要となるファイバー数が少なくすむ。このように波長パスの収容設計においては、WP/VWPの区別、物理伝送路ネットワークトポロジー、ノード間トラフィック需要マトリックス、パス切り替え方式、等のパラメータを考慮し、方式に応じた目的関数の下での最適化問題を解くことが必要となる。図12にオプティカルパス収容設計ツールの概要と結果の一例を示す。

WDM伝送システムは、インターネットに代表されるデータトラフィックが急激に増大している現在、多重チャネルの追加によって比較的容易に伝送容量を増大することができるため、盛んに導入が進められている。光増幅器の広帯域化を背景としてWDMの多重チャネル数が増大するとともに、チャネル伝送速度も実用レベルで2.5 Gbit/sから10 Gbit/sに高速化し、研究レベルでは40 Gbit/s以上の検討も進められている。さらに、今後ポイント-ポイントのWDM伝送から、光レベルでルーティングを行うフォトニックネットワークへの展開が進められるものと考えられる。フォトニックネットワーク技術が広く導入されるためには、波長ルーティングを行うフォトニックトラン

スポートシステム²⁸⁾(WDM伝送、XC/ADM機能、光終端機能等)の低コスト化が課題となる。フォトニックトランスポートシステムのネットワークオペレーションを含めた標準化は、2000年代の中頃までには広範囲な導入を行うのに十分なレベルに到達すると考えられる。本論文で紹介したフォトニックネットワーク技術は、まず効果の大きいコアネットワークの領域で部分的に切り出され、やがて広範囲のネットワークに浸透することにより、将来の情報流通社会の基盤の構築を大きく前進させることが期待されている。更に、ファイバー当たりテラビット以上の速度の信号を、光の特徴を最大限に活かした光信号処理により伝達することができるようになるためには、各種の革新的な基盤技術の研究が必要であり今後の発展が期待される。

本論に示した収容設計の計算を担当されたNTT未来ねっと研究所長津尚英研究主任に深謝いたします。

文 献

- 1) 島田禎吾：“光伝送方式の研究の流れと今後の展開”，NTT R&D, **40** (1991) 153-160.
- 2) S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake and K. Mori: “3 Tbit/s (160 Gbit/s×19 ch) OTDM-WDM transmission experiment,” *Optical Fiber Conference (OFC) '99*, PD1 (1999).

- 3) K. Yonenaga, S. Kuwano, S. Norimatsu and N. Shibata: "Optical duobinary transmission system with no receiver sensitivity degradation," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 302-303.
- 4) Y. Yano, T. Ono, K. Fukuchi, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi and K. Emura: "2.6 Terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, PD (1996) pp. 5.3-5.6.
- 5) K. Okamoto, K. Shuto, H. Takahashi and Y. Ohmori: "Fabrication of 128-channel arrayed-waveguide grating multiplexer with 25 GHz channel spacing," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1474-1476.
- 6) A. R. Chraplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach and R. M. Derosier: "8×10 Gb/s transmission through 280 km of dispersion-managed fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5** (1993) 1233-1235.
- 7) M. Nakazawa and H. Kubota: "Optical soliton communication in a positively and negatively dispersion allocated optical transmission line," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 216-217.
- 8) H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Yonenaga and H. Toba: "Highly efficient distributed Raman amplification system in a zero-dispersion-flattened transmission line," *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '99* (1999) pp. 110-113.
- 9) H. Suzuki, J. Kani, H. Masuda, N. Takachio, K. Iwatsuki, Y. Tada and M. Sumida: "25-GHz-spaced, 1 Tb/s (100×10 Gb/s) super dense-WDM transmission in the C-band over a dispersion-shifted fibre cable employing distributed Raman amplification," *ECOC '99*, PD2-4 (1999) pp. 30-31.
- 10) M. Jinno, J. Kani and K. Oguchi: "Ultra-wide-band WDM networks and supporting technologies," *Networks and Optical Communications (NOC) '99* (1999) pp. 90-97.
- 11) H. Ono, M. Yamada and Y. Ohishi: "Gain-flattened Er³⁺-doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60- μ m wavelength region," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9** (1997) 596-598.
- 12) Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava, A. Abramov, T. A. Strasser, P. F. Wysocki, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, R. P. Espindola, C. Wolf, J. L. Zyskind, A. M. Vengsarkar and J. Zhou: "A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems," *ECOC '98* (1998) 53-54.
- 13) A. Mori, Y. Ohishi, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, K. Oikawa and S. Sudo: "Ultra-broadband amplification by tellurite-based EDFAs," *OAA '97* PD1 (1997).
- 14) H. Masuda, S. Kawai and K. Aida: "76-nm 3-dB gain-band hybrid fiber amplifier without gain-equalizer," *OAA '98* PD7 (1998).
- 15) T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa and Y. Miyajima: "Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μ m," *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (1995) 1880-1889.
- 16) T. Kasamatsu, Y. Yano and H. Sekita: "Novel 1.50- μ m band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier by using dual wavelength pumping of 1.05 μ m and 1.56 μ m," *OAA '99*, PD1 (1999).
- 17) J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori and K. Oguchi: "Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers," *OAA '99* (1999) pp. 26-29.
- 18) Y. Miyamoto, A. Hirano, K. Yonenaga, A. Sano, H. Toba, K. Murata and O. Mitomi: "320 Gbit/s (8×40 Gbit/s) WDM transmission over 367-km zero-dispersion-flattened line with 120-km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero pulse format," *OAA '99*, PDP4 (1999).
- 19) J.-P. Elbers, C. Scheerer, A. Farbert, C. Glingener, A. Schoepfin, E. Gottwald and G. Fischer: "3.2 Tbit/s (80×40 Gbit/s) bidirectional DWDM/ETDM transmission," *ECOC '99*, PD2-5 (1999) pp. 32-33.
- 20) T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki and M. Suyama: "1 Terabit/s WDM transmission over 10,000 km," *ECOC '99*, PD2-1 (1999) pp. 24-25.
- 21) K. Sato: *Advances in Transport Network Technologies—Photonic Networks, ATM, and SDH*— (Artech House, Norwood, MA, 1996).
- 22) K. Sato and S. Okamoto: "Photonic transport technologies to create robust backbone networks," *IEEE Communications Magazine*, **37** (1999) 78-87.
- 23) N. Nagatsu, S. Okamoto and K. Sato: "Architectural analysis of multiple fiber ring networks employing optical paths," *IEEE JLT*, **15** (1997).
- 24) N. Nagatsu, S. Okamoto, K. Koga and K. Sato: "Flexible OADM architecture and its impact on WDM ring evolution for robust and large-scale optical transport networks," *IEICE Trans. Commun.*, **E82-B** (1999) 1105-1114.
- 25) M. Fukui, T. Sakamoto, M. Jinno, S. Aisawa, M. Fukutoku, H. Ono and K. Oguchi: "1580 nm band all-optical ADM node prototype equipped with fast automatic level control," *ECOC '98* (1998) pp. 571-572.
- 26) 長津尚英: "WDM リングアーキテクチャの検討", 電子情報通信学会光通信方式研究会資料, OCS97-113 (1998).
- 27) I. Chlamtac, A. Ganz and G. Karmi: "An approach to high bandwidth optical WAN's," *IEEE Trans. Commun.*, **40** (1992) 1171-1182.
- 28) M. Koga, A. Watanabe, T. Kawai, K. Sato and Y. Ohmori: "Large-capacity optical path cross-connect system for WDM photonic transport network," *J-SAC*, **16** (1998) 1260-1269.

(1999年11月9日受理)