

ブロードバンド時代を支える テラビット級光ネットワーク技術

尾関 幸宏

米国の1996年電気通信法の成立，EUの1998年を期限とする音声電話サービス・電気通信インフラの完全自由化によって始まった情報通信革命は，21世紀を迎え，我々の生活にも影響を与え始めている。既に通信は，IPなどのデータ通信が主流となり，電話・FAXなどのアナログ通信は過去のものとなりつつある。インターネット上で，電子メール，WWW，コンテンツ配信，動画・音楽配信，電子商取引など多種・多様な大容量通信（ブロードバンド）サービスが提供されるようになり，特に欧米ではネットワークで運ばれる通信トラフィック量は半年で2倍に増大し，ビットあたりの通信コストは飛躍的に低下している（ギルダールの法則）¹⁾。日本でも昨年末のIT基本法の制定を契機に業界の競争がさらに促進され，通信トラフィック量が今後急速に増大すると考えられる（2005年までに1千万世帯に超高速インターネット網の環境整備）。このような社会的要因を背景に，アクセス系ネットワーク伝送容量の広帯域化と，超大容量バックボーンIP光NWの早期の実現が必要とされている。

本稿では，超大容量バックボーンIP光NWに進展するテラビット光NWを実現する基盤技術について，多重化方式および伝送方式の観点から，その開発状況を紹介します。近未来のあるべき光NW像とそのために解決すべき技術課題について展望する。

ブロードバンド・サービスと伝送帯域

アクセス系ネットワークで提供されるサービスは今までの電話中心からブロードバンド・サービスへと急激に変化している。表1には，そのようなサービスと必要な通信帯域について示す。人が外界から受ける情報の90%は画像（視覚）情報であり，特に動画中心のサービスが今後ますます増え帯域需要は爆発的に増加すると思われる。例えば，2時間のDVD画像を転送する場合，現在の電話アナログ回線を用いた56kbit/sモデム転送で5日以上かかるものが，150Mbit/sで受信できれば3分ほどで完了する。また，話題のファイル共有peer-to-peerサービスの

表1 多様化する通信サービスと帯域

サービスの種類	必要帯域
企業LAN接続	45Mbit/s～1Gbit/s
SOHO	6Mbit/s～45Mbit/s
CTI(Computer-telephony)	1.5Mbit/s
テレビ会議(MPEG2)	6Mbit/s
画像一括伝送(MPEG2)	1Gbit/s
家庭インターネット常時接続	1.5Mbit/s
遠隔教育/双方向ビデオゲーム	6Mbit/s
VOD (ストリーミング)	6Mbit/s

表2 アクセス系適用技術と可能な伝送帯域

	伝送媒体	伝送帯域(典型値)
Modem	メタル	56kbit/s (v.90)
ISDN	メタル	64kbit/s × 2
HFC	同軸・光	50Mbit/s
ADSL	メタル	1.5Mbit/s～9Mbit/s (Annex-A)
SSDSL	メタル	1.5Mbit/s～2Mbit/s (Annex-C)
FTTH	光ファイバ	PDS:～10Mbit/s (ATM-PON) SS:～1Gbit/s (GbE)
FWA	無線(固定)	～156Mbit/s
IMT2000	無線(移動)	144kbit/s～2Mbit/s(静止)

進展状況によっては，各家庭間でも，大容量データのやり取りが活発となり，10Mbit/s～100Mbit/s級のトラフィックが双方向に発生する可能性がある。現在，情報をユーザに分配するアクセス系は，表2のように有線・無線・光ファイバ等いろいろな方式があるが，今後のブロードバンド化の観点から，FTTx (x:Home,Curb,Cab等)が有利であり，また，既存技術により10Mbit/sを越える帯域が比較的低コストで容易に提供できるようになって

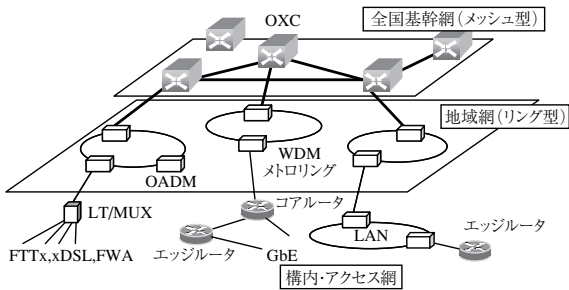


図1 光ネットワーク階層概念図

いる。

ブロードバンド化を実現する近未来の光NW構成の概念図を図1に示す。上記技術の特徴を組み合わせた広帯域アクセス網、それを收容するリング型光地域網（メトロリング）、地域網を全国および地球規模に接続するメッシュ型光基幹網の3階層構造で構成される。

アクセス系のブロードバンド化により今後100~1000倍の通信容量を收容するため、日本の最上位基幹網においては、現在の2.5Gbit/s~10Gbit/s伝送容量から、1Tbit/s~10Tbit/s（Tbit/sは1秒間に1兆ビットの2値デジタル信号を送れる速度：電話換算で1600万回線分もしくは新聞200年分の送信が可能な伝送速度）程度の伝送容量を持つシステムの構築が必要となる。

大容量・長距離伝送技術

光ファイバ伝送においてテラビット級の容量を実現するには、図2に示すように階層的に多重を行う必要がある。まず、電気レイヤーでの時分割多重（TDM）、次に光レイヤーでの波長多重（WDM）、同バンド多重、芯線数のファイバ多重と順次階層的に多重することで、その積で総伝送容量が決定される。例えば1Tbit/sを一本のファイバで伝送するには、10Gbit/s×100波長、40Gbit/s×25波長、160Gbit/s×7波長などが単純計算から挙げられるが、波長数を増大させる方向と減少させる方向がある。1Gbit/s×1000波長が実現できれば、メトロリング地域網などで波長パスを用いた粒度の細かい光NWが実現できる。また、バンド多重の観点では、新しい波長帯の開発として新バンドの光増幅器と光フィルタの開発が必要となる。

全国規模のメッシュ型基幹網では、無中継（1R）伝送距離の長距離化技術も重要である。ここでは、光パスがA点とB点間に設定される場合、必ずしも最短距離で設定され光信号が伝送されるとは限らない。ノードにあるOXCにおいてトラフィック状態によりパス変更したり、NE障

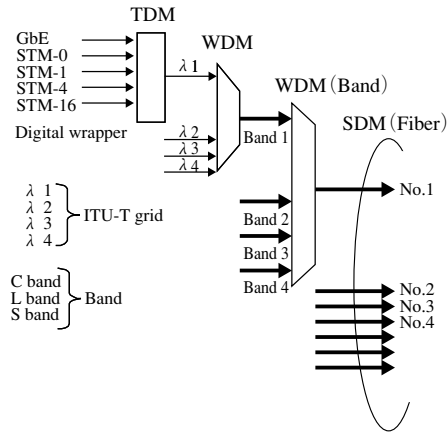


図2 光ネットワークの大容量多重化方式

害時の復旧目的のパス切り替えなどにより頻繁に伝送路とその条件が変化することになる。このような光NWでは、光信号が長距離にわたって再生中継なしに波形品質を保つ技術が必要となる。光電気変換回路（OEO）の数を減らすことで、経済的で透明度の高い拡張性に優れた光NW網を構築できる。分散マネジメント²⁾は長距離化を可能とする有力な手法である。

OTDM技術による高速化

TDMを高速化して1波長により伝送できる帯域を拡大する利点として、一定の総伝送容量を実現するために必要な波長数をその分減らすことで、保守部品の削減や波長管理・オペレーション簡易化、省スペース化・省電力化を

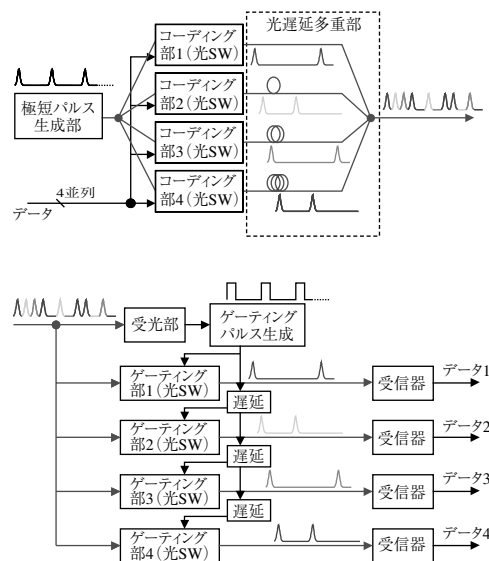


図3 OTDMを実現する光MUX（上）と光DEMUX（下）の構成概念図（多重度：N=4の場合を示す）

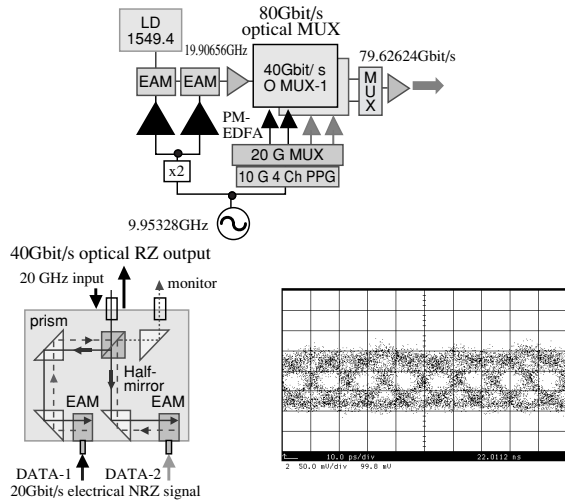


図4 試作した80Gbit/s 光MUX装置とモジュール⁴⁾
 上：80G MUX構成、左下：40G OMUX内部構成図
 右下：80Gbit/s多重化波形 [10 ps/div]

実現できることがある。現在40Gbit/s電子回路の開発で多重方式（ETDM）装置³⁾が実用化されつつあるが、このあたりが動作限界に近い。しかし、図3に示すように、並列に光信号を生成し光回路により多重化（OTDM）する方式を用いると、並列数Nを増大させることで100Gbit/s程度の光信号を比較的容易に生成することができる。受信側では逆操作の光ゲーティングにより元の低速の並列光信号に戻し、その後電気信号に変換する。

この場合、課題はOTDM用の光デバイスをいかに実現するかにある。我々は実用的なOTDM用多重化モジュール（光MUX）として、80Gbit/s OTDM光信号を生成する光MUXを試作した。図4に示すように10Gbit/sから20Gbit/sは電気時分割多重（ETDM）、20Gbit/sから40Gbit/s（40G/20G OMUX）、40Gbit/sから80Gbit/s（80G/40G OMUX）は2段階で80Gbit/sにOTDMする方式である。光MUXの前段には20GHz光パルス光源として、光短パルスを発生するための回路が接続されている。

図中には、送信される80Gbit/s光多重波形と送信機を構成する40G/20G OMUXモジュールのブロック図を示す。良好な80Gbit/s光多重信号波形が得られており、折り返しでおよび160kmのファイバ伝送でエラーのない伝送を確認した。現在40Gbit/sを160Gbit/sに4多重するOMUX装置の開発を進めている。

分散マネジメントによる長距離伝送

光ファイバは広帯域で知られているが、超高速信号を

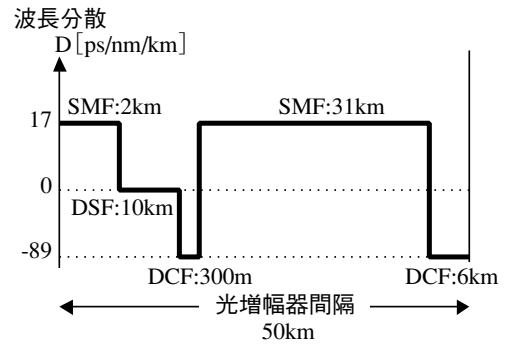


図5-a SMFを補償する分散マップ

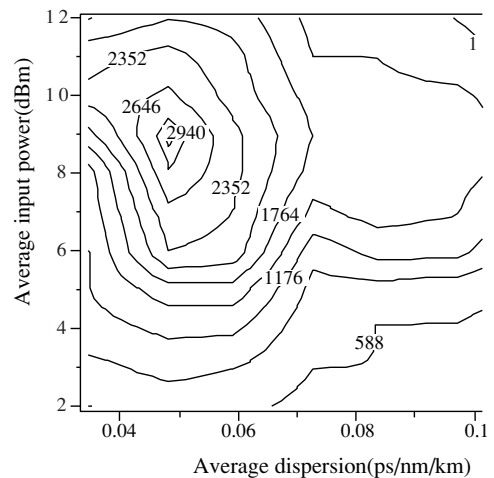


図5-b エラーフリー伝送距離等高線図⁵⁾
 横軸：区間平均分散値、縦軸：光入力パワー

伝播させる場合、波長分散（波長依存の伝播速度）による線形歪と材料であるシリカの光非線形による非線形歪や波長間クロストーク、光増幅中継器の累積光雑音など、長いファイバの中では、これらの効果がだんだん積み重なり、信号波形が劣化して、最後には伝送できなくなることがわかっている。このため、よく使われる単一ファイバ（SMF）においては、10Gbit/sの場合で50km、40Gbit/sでは3km程度しか伝送できない。しかし、光信号波形はファイバ上で伝播方向にゆっくりと変化するため、伝播方向に分散値を補償するような逆分散のファイバを接続し、等価的に分散をゼロとすることが可能である。これを周期的に繰り返すような伝送路の設計を分散マネジメント伝送方式と呼び、このような伝送路をハイブリッド伝送路と称する。ハイブリッド伝送路は光信号に対する分散劣化を補償するとともに、非線形作用も緩和することがわかってきた。我々は、光RZ符号を用いた40Gbit/sレベルで1000km以上を可能とする、非線形ハイブリッド伝送路の最適化を検討してきた。図5-aには

SMF上で40Gbit/sを伝送できるハイブリッド伝送路の最適ファイバ分散配置（距離方向のファイバの種類と長さのマップ）を示す。図5-bには光増幅器区間の平均分散と光信号パワーの位相平面でのエラーフリー最大伝送距離等高線分布を示す。伝送距離から言うと、平均分散値0.05ps/nm/km、光パワー9dBmで最適となる。平均分散値が異常分散であることからソリトンの伝播特性を示しており、分散と非線形効果のバランスにより3000km以上の伝送が実現できた。

WDM多重化技術

今日、北米を中心に光の大容量通信を可能にしている技術は波長多重（WDM）技術である。この技術は、複数の信号を複数の波長に載せて伝送し、光増幅器で一括に光直接増幅を繰り返すことで実現している。現在は光増幅器としてエルビウム光ファイバ増幅器（EDFA）信号の波長としてITU-Tの規格（G.692）が定める波長を使うことが良く行われている（図6）。

これに準拠した100GHz間隔で40チャンネル、50GHz間隔で80チャンネル、25GHz間隔で160チャンネルが収容できるシステム開発が進められている。

WDMでは、チャンネル当たりの変調速度と波長間隔の比で表される帯域利用効率を最大とすることが波長資源の有効利用となる。短距離伝送（186km）ではあるが、50GHz波長間隔で40Gbit/s NRZ符号×160波長を伝送することに成功し、ナイキスト限界（1bit/s/Hz）に近い0.8bit/s/Hz実現が報告された⁶⁾。一方、長距離伝送ではパルスの細いRZ符号を用いるため信号成分帯域がNRZ符号に比べて広くなり（2倍程度）、利用効率としては、0.4bit/s/Hz程度が目標となる。我々は、図7に示すように100GHz波長間隔で40Gbit/s RZ符号×8波長伝送で

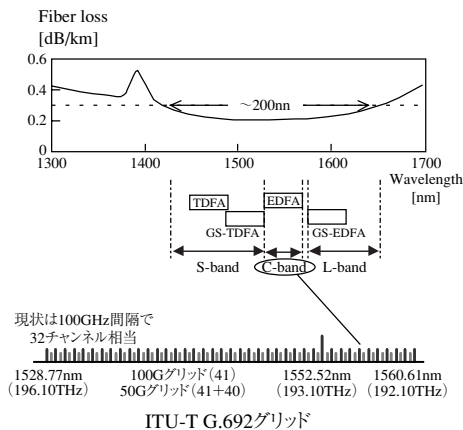


図6 利用可能な波長バンドとITU-T周波数グリッド

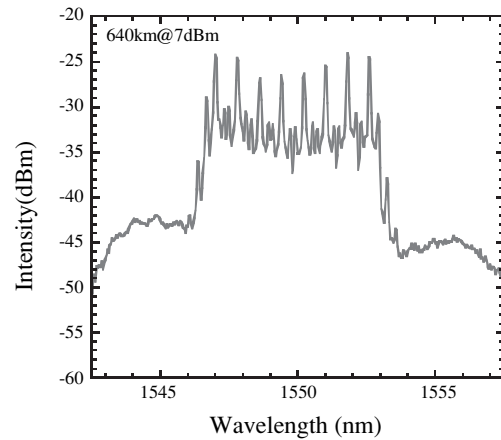
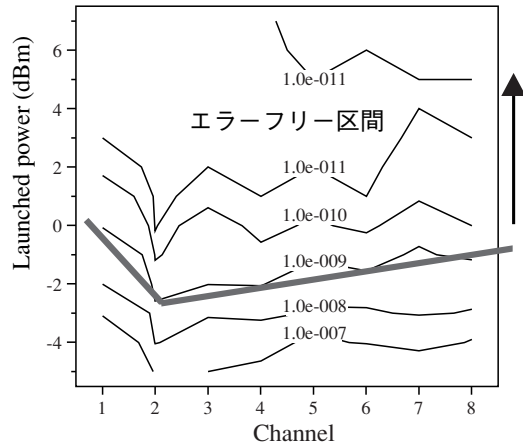


図7 40Gbit/s×8波長 100GHz波長間隔での640km伝送実験結果⁷⁾
上：エラーフリー条件，下：伝送後の光スペクトラム

（0.4bit/s/Hzに対応）、640kmを越える伝送距離を実現した。

適切な分散マネジメントにより、WDMチャンネル間の非線形クロストークが抑圧され、チャンネル波長間隔を100GHzまで狭めることができた。さらに符号方式として新しい光キャリア抑圧RZ（CS-RZ）符号を採用すれば、波長間隔をさらに狭められることをシミュレーションにより確認している。

バンド多重技術

エルビウム光ファイバ増幅器以外にも、図6で示す様々な光増幅器が開発されている。これら異種の光増幅器を一緒に使うことにより、それぞれの光増幅器に対応する波長信号を複数利用して、伝送容量を拡大する技術がバンド多重技術である。前述したCバンドの信号光の波長で1530nm～1565nmの35nm（約4.4THz）、Lバンドと呼ばれるEDFA利得波長域の長波長側に利得帯域をシフトしたエルビウム添加ファイバ増幅器（GS-EDFA）の利得帯

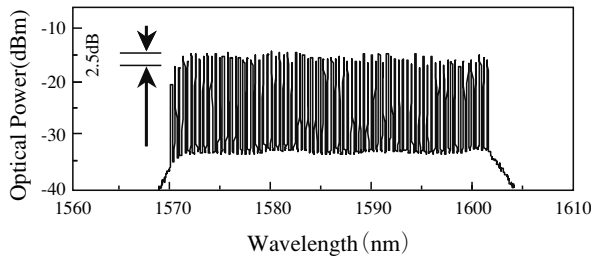


図8 Lバンド用GS-EDFA伝送特性 (80段後)⁸⁾
70波長伝送後の光スペクトル

域の1575nm~1610nmの35nm (約4.4THz) が実用化レベルにある。図8には、我々が開発したLバンド増幅用GS-EDFAの伝送後の平坦な光スペクトルを示す。CバンドEDFA⁹⁾と並列構成で、C+Lバンド多重により、3.2Tbit/s = 160波長×20Gbit/s、1500kmWDM伝送を実現した¹⁰⁾。

これ以外にも、さらに新しい帯域としてSバンドと呼ばれる1450nm~1480nm (4THz) を増幅するトリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) や利得をやや長波長にシフトしたGS-TDFAの開発が行われている。これらのバンドで光源、多重/分離用光フィルタと光増幅中継器が揃えば、S+C+Lバンド多重により1450nm~1610nmの波長帯域 (伝播損失が0.3dB/km以下) で20THzほどの光周波数資

源を活用できる。波長帯域利用効率を0.5bit/s/Hzと仮定しても10Tbit/sが可能となる。

敷設光ケーブルは光ファイバ芯線数が16本から100本あることから、そのファイバ多重度を活用することで、1ケーブルあたりPbit/s (P:ペタは10の15乗を表す) の伝送容量を実現できるようになる。

今後の展望

そこで、最近のTbit/s伝送の学界動向について図9に代表的事例をまとめて示す。TDMとWDMを巧みに組み合わせで総伝送容量としては最大6.4Tbit/sまで実現している⁶⁾。また、OTDMで1波長で1.28Tbit/sを実現、70km伝送した実験¹¹⁾はOTDMの可能性を示し注目される。

一方、1000波長以上のS (Super) WDMの領域では光源が一つで済むスーパーコンティニューム光源技術¹²⁾やITU-Tの100GHz間隔をさらに細かく利用して、1GHz間隔でCバンドにおいて3000波長多重できる技術提案¹³⁾もあり今後の開発進展が期待される。

変調方式の観点から見ると、波長帯域利用効率の上限は、NRZ符号2値変調方式を用いる限り、ナイキスト限界として1bit/s/Hzが最大値となる。しかし、シャノンの定理¹⁴⁾によれば、エラーフリー伝送の帯域上限値はチャンネルSNRで決定され、符号方式を工夫すれば1bit/s/Hzを大きく上回ることが知られている。光単側波帯変調 (SSB)¹⁵⁾や光残留側波帯変調 (VSB)¹⁶⁾技術の新たな展開や、強力

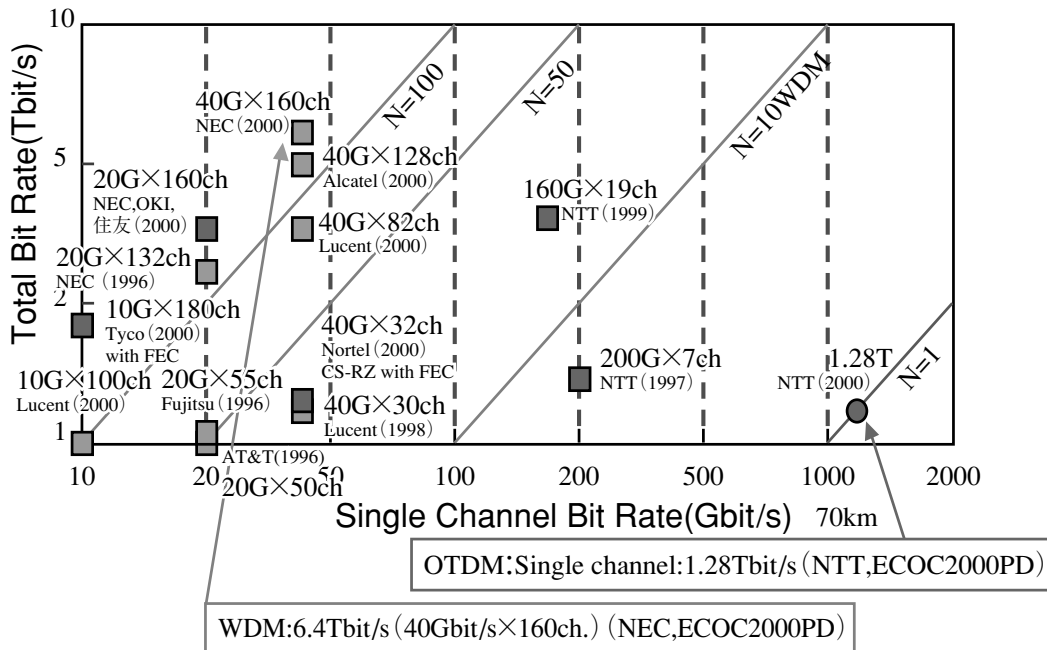


図9 最近のテラビット伝送実験の動向

なエラー訂正符号（ターボ符号など）の利用など新しい試みにより、さらに10Tbit/sを越える伝送帯域の拡大が可能になるであろう。

このようにして近い将来、我々が手にするケーブル当たりPbit/s帯域を有する光NWにおいては、今までのようなNWノードで一旦電気に変換して高速ルータ等でルーティング、フォワーディングする手法は大変非効率となる。近未来の光NWノードでは超高速光信号（光パス）を必要なもの以外は、そのラベル（MPλS）により光のままルーティングさせる構成となる。つまり、粒度の粗い波長パスのルーティング処理を高速かつ簡単にし、粒度の細かいパスのみ電気変換後ルーティング処理をする。

そのためのノード技術として、MEMS（Micro - Electro - Mechanical Systems）スイッチが高集積化され1000×1000を越える大規模光クロスコネクタが開発されケーブル単位で直接光波長パスの切り替えが可能となるであろう。その先には、光バファーマしくはそれと同等の機能のデバイス開発により、光パケット信号を直接動的にルーティングする光IPルータが可能となるであろう。そのためにはOTDMによる光パケット信号の分岐／挿入が可能なOTDM-ADMの開発も期待される。

ま と め

21世紀を迎えて、テラビット光NWを実現する基盤技術について、多重化方式および伝送方式の観点から、その開発状況を紹介した。2地点間の超大容量・長距離伝送技術という観点からは、かなり目標に到達しつつあるといえる。今後は、光トランスポートから光ネットワークへと技術開発の重点領域はシフトしていくと思われる。光伝送によりもたらされた無尽蔵に近い帯域を、より効率的に利用し、その上でサービスを柔軟に、安価に、高品質に提供するためには、まだ光ノード技術、NW技術において残された課題がある。特に光IPによるQOSの確保と柔軟かつ動的にパス設定・管理ができる光ノードおよびNW開発における技術進展が望まれる。現在、ITU-TやOIF等の標準化フォーラムで検討が進められているコントロールプレーンとデータプレーン間インタフェース、光パスルーティングを意識したGMPLSの光NWへの実装により、それほど遠くない時期にテラビットIP光NWが実現し、超広帯域サービスをリアルタイムに受けられるようになるはずである。◆◆

参考文献

- 1) 例えば池田, <http://www.meti.go.jp/topic/mitilab/downloadfiles/m4199-1.pdf>
- 2) M.Nakazawa *et al.*, Electron. Lett., vol. 31, pp.216, 1995.
- 3) K. Ishikawa, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich Germany, paper 2.3.4.
- 4) H.T.Yamada, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich, Germany, paper 1.3.5.
- 5) A.R.Pratt, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich Germany, paper 10.3.1.
- 6) T.Ito, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich, Germany, paper PD 1.1
- 7) H.Murai, *et al.*, Electron.Lett., vol.36, pp.1479, 2000.
- 8) 藤井他, 2000年度信学ソ大, B-10-110
- 9) 角井他, 2000年度信学総大, B-10-151
- 10) T.Ito, *et al.*, OFC 2000, Tech. Digest, Baltimore, MD, USA, paper PD 24-1
- 11) M. Nakazawa, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich, Germany, paper PD 2.6 (1.26Tbps)
- 12) H. Takara, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, Munich Germany, paper PD 3.1.
- 13) 例えばwww.essexcorp.com
- 14) C. E. Shannon, Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379, 1948.
- 15) M.Sieben, *et al.*, J. Lightwave Technol., vol.17, pp.1742, 1999.
- 16) S. Bigo, *et al.*, ECOC 2000, Tech. Digest, , Munich Germany, paper PD 1.2

筆者紹介

尾関幸宏：Yukihiko Ozeki.ネットワークシステムカンパニー 光ネットワーク開発センター