

光波ネットワークへの期待と技術課題

近 間 輝 美

近年、パソコンなどの情報通信端末の高性能化は著しく、大量の情報を処理できるようになってきた。家庭でも、インターネットなどを通じて、世界中の映像を含む各種データにアクセスできるようになった。また、企業では、グローバル化の中で効率的でかつ迅速な経営判断を行うための手段として、情報通信網の整備を積極的に進めている。これまでにないほど、通信に対する期待が高まっている。現状のネットワークは、主に電話サービス（64 kb/s）への対応を中心に考えられており、映像や高速データなどのデジタルマルチメディアサービス（約 10 Mb/s）を自由に通信するには、十分なものではない。最近、NTT より 10 Mb/s の通信を、月 1 万円の定額料金で提供するネットワークを 2005 年をめどに実現すると発表があったように、現在の電話を中心とするネットワークから 2～3 桁大きい容量を取り扱えるネットワークにアップグレードしていく必要がある。このような通信容量の爆発的な増大にどのように対応するか、技術面、経済性の面からのブレイクスルーが求められている。

光通信技術は光ファイバーというきわめて良質な伝送路を得て、高速大容量化を急ピッチで進めてきた。これまで約 4～5 年で伝送速度が 4 倍に拡大してきており、1996 年から、現在最高速の 10 Gb/s 方式の商用サービスが開始されている。技術的には、光パルスの幅を短くして単位時間当たりの伝送速度を増加させる時分割多重方式（TDM: time division multiplexing）により大容量化が実現されてきた。しかしながら、光デバイスや電

子回路のさらなる高速化は、現状の材料や微細化だけでは限界に近づきつつある。また、光ファイバーの分散や非線形の影響も厳しく、これまでのように 4～5 年で 4 倍の高速化を達成するのが難しくなっている。一方、上に述べたように通信容量増大の要求はもっと急速に訪れる可能性がある。大容量化のひとつの技術的選択として、光ファイバーが細く軽量である特長を生かし、多芯の光ファイバーケーブルを使って大容量化する空間多重方式がある。コストの下がった既存技術が使えるため魅力的であるが、管路に制限があり多芯ケーブルの導入が難しいケースや、敷設費を含む初期投資の増大など経済性の観点からの問題もある。

このような背景のなかで、1 本のファイバーの中に異なる波長をもつ多数の光信号を伝送する波長多重技術（WDM: wavelength division multiplexing）が大容量化の技術として注目されている。従来使用されていなかった波長軸に新たに多重化を行う方式で、光ファイバーの低損失帯に少なく見積もっても約 20,000 GHz の周波数資源がある。最近の伝送実験でも、既存のファイバーを用いてテラビット級の伝送が報告されており¹⁻⁴⁾、大容量化に対して非常に有効なことが示されつつある。また、北米を中心に実用システムの導入も開始されている。

さらに、ポイント-ポイントの伝送システムだけではなく、波長多重技術をベースにした次世代光ネットワークの研究開発が開始されている。表 1 に示すように、欧州では ACTS (Advanced Communications Technologies and Services)、米国では、政府機関である ARPA (Advanced Research Projects Agency) が中心になり、Lucent, Bellcore, BOC などが参加する

(株)富士通研究所ネットワークシステム研究所 (〒211-88 川崎市中原区上小田中 4-1-1)

E-mail: chikama@flab.fujitsu.co.jp

表1 欧米の光波ネットワークプロジェクト。

	プロジェクト	主な実験場所	テクノロジー
欧州	WOTAN (Wavelength-agile Optical Transport and Access Network)	イギリス	ATM-SW, LAN 間接続 WDM/TDMA 広帯域 PON
	OPEN (Optical Pan-Europe Network)	1. ノルウェー, デンマーク 2. フランス, ベルギー	ツリー 4 ノード, 4 波, 光 XC, 2.4 Gb/s
	COBNET (Corporate Optical Backbone Network)	イギリス	CPN WDM リング/SCM リング
	METON (Metropolitan Optical Network)	スウェーデン	ATM-SW, 光 XC+ADM リング 4 波, 4 nm 間隔
	PHOTON (Pan European Photonic Transport Overlay)	オーストリア, ドイツ	光 XC, 10 Gb/s まで 8 波, 400 GHz 間隔 500 km, スター
北米	MONET (Multiwavelength Optical Network)	アメリカ (ニュージャージー, ワシントン)	光 XC (4×4), 8 波 長距離伝送テストベッド
	NTONC (National Transparent Optical Network Technology)	アメリカ (サンフランシスコ)	光 XC+光 ADM

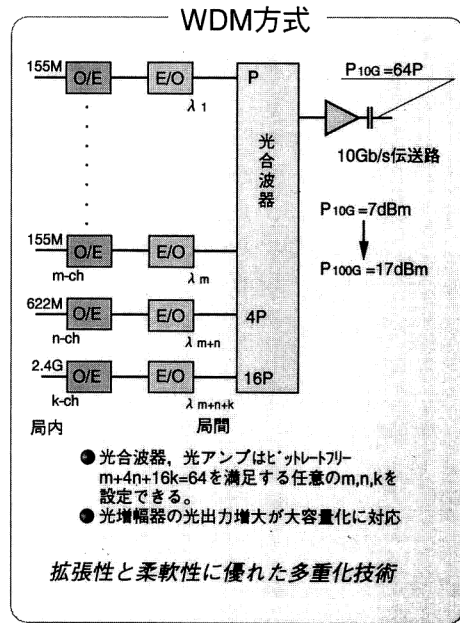
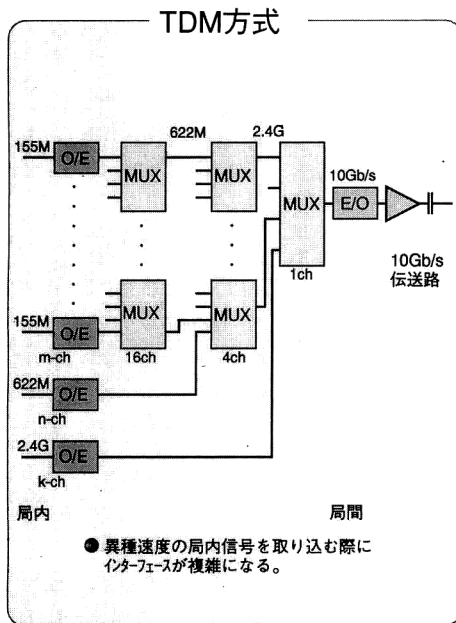


図1 波長多重技術の特徴。

MONET (Multi-wavelength Optical NETWORK Consortium) などのプロジェクトが推進されている^{5,6)}。キャリア、有力企業、大学等の研究機関が参加して、次世代ネットワーク構築に向けた具体的な装置試作、フィールドトライアルなど、各種プロジェクトが推進されている。日本でも、NTTで320 Gb/sの容量をもつ光バスクロスコネクタ装置の試作⁷⁾、光分岐挿入装置を用いたフィールド実験⁸⁾など、実用化に向けた研究開発が進められている。

本論では、光波ネットワークへの期待、今後の解決す

べき技術課題について述べ、研究開発の一助としたい。

1. 光波ネットワークへの期待

波長多重技術を多重化技術としてみたときにどのような特徴があるかを整理してみたい。図1にTDMとWDMの比較を、多重化端局装置の例で示す。低速の150 Mb/s, 600 Mb/s, 2.4 Gb/sの局内信号を多重化して、局間伝送路に10 Gb/sで送信する場合を例として考える。TDMの場合は、局内信号を電気段で多重化していくために、その構成上、局内信号の組み合わせを変更

するのが難しく、自由に組み合わせるためには、信号速度の整合をとるためのインターフェース回路の規模が増大する。一方、WDMの場合には、光分波器で多重化するために、信号の速度には依存せず、入力ポートの数(波長数)が十分用意されていれば、局内信号の組み合わせを比較的自由に選べる柔軟性がある。また、伝送路には波長多重信号を一括増幅中継できる光増幅器を用いることになるが、光信号の信号対雑音(SN)比は光増幅器の光出力で決まり、例えば、総伝送容量が10 Gb/sの場合に7 dBmが必要とすると、励起パワーを上げて光出力を17 dBmにすると、総容量100 Gb/sの伝送路に拡張できる。このような柔軟性、拡張性は、TDMにない特徴であり、これを生かした新しいネットワークへの期待がある。従来、光部品の価格が高いことや、波長を自由にハンドリングする技術が未熟であったため、TDMのほうが経済的であった。しかしながら、テラビットの容量を処理する場合には再検討が必要と思われる。ここで、今なぜ光波ネットワークなのかについて、技術的な背景やネットワーク環境、ニーズ面から、そのメリットを考えてみる。

1.1 大容量化と既存設備の有効活用

特に先進国では、通信インフラとしてすでに多数のファイバーが敷設導入されている。通信需要の急速な伸びに対応するために、新規ファイバーを敷設するには時間がかかることなどもあり、既設ファイバーの波長多重による有効活用が考えられている。既存の伝送設備も、波長を調整する必要はあるものの、新規設備と同時に多重

化して使用できる。さらに、既設ファイバーを利用する際に以下の問題があり、波長多重の適用が促進されている。現在、世界的に敷設されているファイバーの80~90%が、光増幅器の増幅波長域である1.55 μm 帯で波長分散が大きいことや、偏波分散が大きく、高速信号の伝送が難しいという問題である。このような状況の場合、伝送速度を上げずに波長の数を増やして伝送容量を増大させる波長多重方式は非常に有効である。また、波長多重の場合は、需要に応じて1波ずつ増設していくことも可能であり、投資を抑えることができるメリットもある。

1.2 新規通信需要への柔軟な対応

マルチメディア通信時代には、現在顕在化していない新サービスの出現や、需要の突発的な変動を考慮にいれて通信ネットワークを考える必要がある。新サービスを導入する際に、設備の置き換えや従来装置とのインターフェースが必要になると、導入に対して障害となる。波長多重の場合は、光波長で多重化するために、その波長にどのような信号が乗っているかを比較的意識せずにファイバーに多重化が可能である。例えば、伝送速度の異なる信号(2.5 Gb/sと10 Gb/sなど)の混在や、ATM信号とSONETやSDH信号の混在、極端なケースではデジタル信号とアナログCATV信号の混在などが考えられる。このような柔軟性は他の方式にない特長で、現状のサービスを途絶させることなく、新サービスの導入が可能になる。

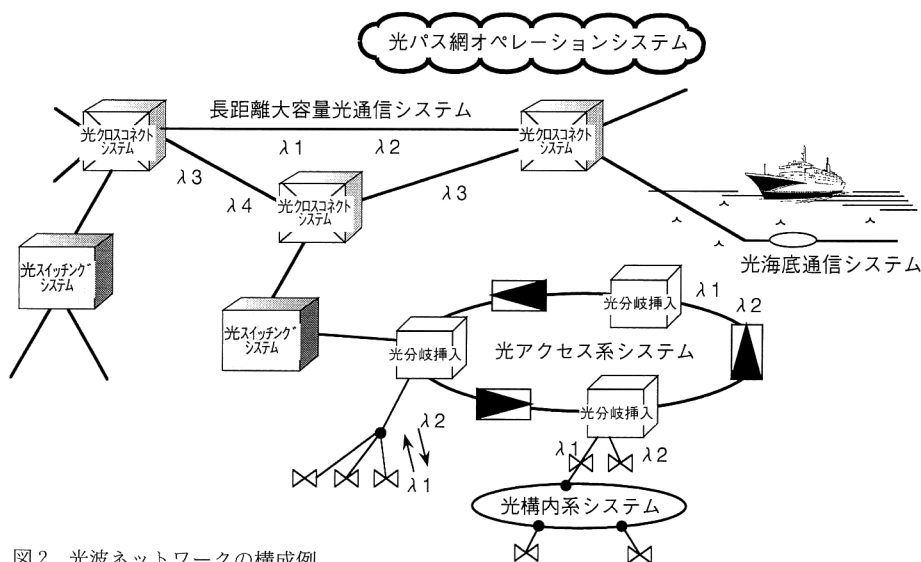


図2 光波ネットワークの構成例。

1.3 通信網の保守，運用性の向上と高信頼化

地震などの災害や、装置や伝送路の故障などの障害に対して、そのネットワーク全体への影響を軽減するために、ネットワークの冗長構成や予備設備を現在も多数もっている。パス（1.5 Mb/s, 50 Mb/s, 150 Mb/s など）と呼ばれる単位で、クロスコネクタ装置や分岐挿入装置などのノード装置を用いて、障害を迂回したり、通信需要に応じてネットワークの接続を変更したりする、通信網の保守運用が行われている。21世紀のマルチメディア通信時代には、処理容量が約100倍になること考えると、保守運用の単位であるパスも大容量化する必要がある。例えば、2.5 Gb/s や 10 Gb/s がそのひとつの候補であるが、パスの処理単位が大きいため電氣的な処理がかなり難しくなることや、伝送路が波長多重されている状態を考えると、ノード装置においても、光レベルでの処理が有利ではないかと考えられる。波長に乗っている信号を意識せず光パスとして処理する光クロスコネクタ、光分岐挿入などの装置が用いられる光波ネットワークが、通常の電氣処理のネットワークの上にオーバーレイされるようになると思われる⁹⁾。図2に光波ネットワークの構成例を示す。現在、日米欧で21世紀に向けて研究開発が進められており、光波ネットワークの導

入により、大容量化と同時に、高速障害復旧処理、光レベルでの直接処理による高信頼度化などが期待されている。

2. 光波ネットワークの技術課題

波長多重技術を使った光波ネットワークを実現するためには、今後解決すべき種々の技術課題がある。波長多重伝送に関する課題は、本特集の別の著者により詳しい説明があると思われるので、ここでは光パスクロスコネクタ（OPXC）装置、光分岐挿入（OADM）装置に関連した技術課題を述べる。図3に光波ネットワークの構成要素に対して課題をまとめた。また、表2には、要素デバイスをあげ、その課題と要求特性をまとめた。

2.1 光パスクロスコネクタ装置

光パスクロスコネクタ装置で重要な課題は、光パスの収容設計法として、パス終端点間で1波長を割り当てるWP（wavelength path）方式、2つのノード装置間のリンクごとに波長を変えて、網内の波長利用効率を高くできるVWP（virtual wavelength path）方式のどちらを選択するかという問題である。VWP方式の場合には、XC装置に波長可変機能が必要になる¹⁰⁾。網の構成やトラフィック量に対して、ネットワークに必要なファ

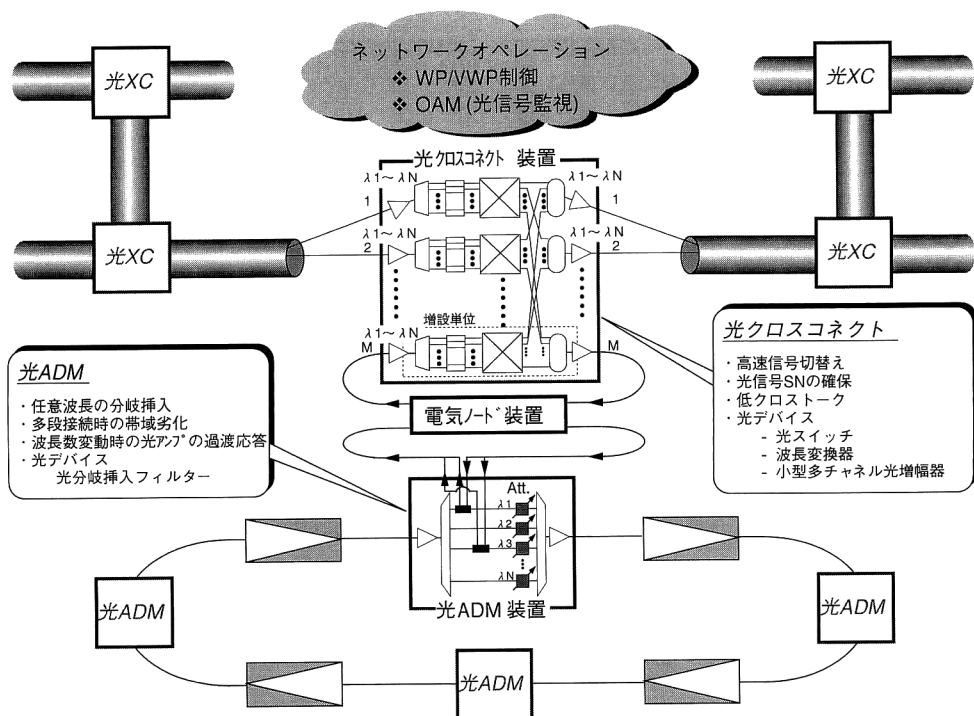


図3 光波ネットワークの技術課題。

表2 光波ネットワーク用光デバイス。

光デバイス	技術課題	所要特性	デバイス例
光合波器 MUX/DEMUX	帯域平坦性, 低損失, 中心波長安定度	0.5 dB 帯域幅: >0.7 nm 波長数: 8~32 波長間隔: 0.8~1.6 nm	AWG Dielectric filter Fiber grating+ Circulator
光増幅器	広帯域 (1530~1600 nm) 高出力, 低雑音, 小型化 波長数変動耐力	光出力: > +5 dBm/ch 利得平坦性: <0.5 dB 雑音指数: <7 dB	Al co-doped EDFA Fluoride EDFA EDFA with GEQ
光源	波長制御性, 可変性 波長安定性 アレイ化	波長域: 1530~1600 nm 光出力: < +5 dB	DFB-LD (fixed wavelength) Tunable DBR-LD
波長変換器	高効率 低偏波依存性 消光比改善	波長域: 1530~1600 nm 変換効率: >50 % Chirp なし	SOA (XGM) SOA (XPM) SOA, Fiber (FWM)
光 SW	高集積 低クロストーク 低損失	4×4~16×16 SW クロストーク: >50 dB PDL: <0.5 dB SW 速度: ms 程度	SiO ₂ PLC MZI SW LN MZI SW SOA gate SW
波長可変 フィルター	波長可変幅 可変速度	可変幅: 1530~1600 nm 可変速度: <1 ms 半値幅: 0.5~1.0 nm	Mechanical filter AOTF EOTF

イバー数, 波長数, XC のポート数などについて, それぞれの方式で比較検討が行われている。一般的に, VWP 方式のほうが必要なファイバー数などを削減でき性能的に優れているが, 波長変換機能をもつ分, 装置が大きくなることやコストが高くなる問題もあり, ネットワークの規模を考えて最適化していく必要がある。網内で取り扱う波長数に関しても, 最近の伝送システムの状況では, 16 波, 32 波と増えていく傾向にあるが, ノード装置との兼ね合いで, ネットワーク全体としての最適化が必要と思われる。

光 XC 装置のアーキテクチャーに関しては, 種々の構成が提案されており, 空間スイッチを用いたものが一般的である。光スイッチは従来の光部品と違って, 多入力多出力で, ガラス, 半導体, ニオブ酸リシウム, ポリマーなどの基板を用いた光導波路集積デバイスが必要になると考えられ, 研究が進められている¹¹⁾。特性的には, クロストーク特性が重要で, 特に同じ波長の信号をスイッチする場合には光の干渉性の雑音が発生するために, 50 dB 程度の高いクロストーク抑圧が必要になる。クロストークについては, モニターして制御することが難しいため, デバイスそのものの特性で安定に実現できることが求められる。また, この光スイッチを含め, 多数の光部品が実装されることになるため, 小型化, 低損失特性, 部品間の簡易接続などに課題がある。また, クロスコネクされた光信号は局間の長距離伝送に出ていくため, 光信号の SN が重要になる。光 XC 装置内で, 光信号レベルを高く, しかも信号間のレベル偏差が大き

くならないように保つため, 小まめに光増幅する必要がある。この目的のため, 小型で多チャンネルの光増幅器の実現が期待される。また, VWP 装置の場合には, 波長変換機能が必要になる。光 XC 装置への入力信号によらず光のまま処理できることが理想であるが, 光 XC 装置間は光増幅中継器を用いて長距離伝送され, 光増幅器で発生する自然放出光雑音の累積や, 分散, 非線形による波形劣化を受けるケースが一般的と考えられる。したがって, 光 XC 装置で SN を回復する必要がある。ひとつの考え方は, 信号に対するトランスペアレンシーは失われるが, いったん受信して, 波長可変レーザーを用いて波長変換を行う方法で, 現実的な解かもしれない。一方, いずれにしても波長可変レーザーは用いるわけであるが, 相互利得変調, 相互位相変調, 四光波混合などの非線形光学効果を用いて, 光-光で波長変換を行い, トランスペアレンシーを確保する研究も行われている¹²⁾。最近, 波形再生機能のある波長変換が実現できるとの発表もあり¹³⁾, 今後の進展が期待される。

2.2 光分岐挿入装置

光 ADM に関しては, 光 XC のサブセットとの見方も可能であるが, 光増幅中継器に光フィルター機能が付加されたものとしての見方もある。海底伝送システムでは, 8 波の中から, 設置される場所ごとに固定の波長を分岐挿入する海中分岐挿入装置が実用化され, 実際にシステムへの適用が計画されている¹⁴⁾。さらに, 機能を向上するためには, 多波長の中から 1 波, もしくは, 任意の m 波を分岐, 挿入できるフィルターが必要になる。

そのような目的に最適なデバイスとして、音響光学チューナブルフィルタがある¹⁵⁾。波長に対して周波数の決まったマイクロ波を、同時に複数入射すると、一括して分岐、挿入が可能になる。現状の特性は、クロストーク、帯域幅などの点で十分なものとはいえないが、非常に面白いデバイスであり、今後の進展を期待したい。さらに、光ADMを多段に接続する場合に、光フィルタを多数通過することになり、通過段数に依存して実効的な透過帯域幅が減少して、信号に歪みが発生する問題もあり、光フィルタとして必要な、帯域幅、平坦性、中心波長ずれなどについて検討されている¹⁶⁾。

2.3 光パス監視

光XC、光ADM共通の課題として、光信号監視の問題がある。光信号が光のまま処理されるため、信号の品質（波長ずれ、光信号対雑音比、光パワーレベルなど）の監視、運用状態（波長数、各波長に乗っている信号の種類、光パス経路）の監視制御など、光の特長をうまく引き出すオペレーション技術が必要になる¹⁷⁾。光の状態を簡易に監視する技術、デバイスの開発も並行して進める必要がある。この方面に関しては、標準化が重要であるが、国際標準を策定する場であるITU-Tで議論が開始されつつある。

光通信技術の最近の大きな動きとして、波長多重技術を用いた光波ネットワークの研究動向を述べてきた。光波ネットワークは、21世紀のマルチメディア通信に要求されるネットワークの柔軟性、拡張性、高信頼性、経済性を実現する有力な技術として研究開発が活発に進められるものと考えられる。実用化までには、半導体レーザー、光フィルタなどの光デバイスの性能向上と低価格化、光の高密度実装技術、波長の制御管理技術、光波ネットワーク網管理技術など光技術の総合的な開発が必要と思われ、光技術者にとってビッグチャレンジである。多数の方が、研究に参加されることを期待したい。

文 献

1) H. Onaka, *et al.*: "1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μm zero-dispersion single-mode fiber," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD-19.

2) A. H. Gnauck, *et al.*: "One terabit/s transmission experiment," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD-20.

3) T. Morioka, *et al.*: "100 Gb/s \times 10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD-21.

4) Y. Yano, *et al.*: "2.6 terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, ThB. 3.1.

5) A. M. Hill, *et al.*: "Optical networking in the European ACTS programme," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, Th11.

6) R. S. Vodhanel, *et al.*: "National-scale WDM networking demonstration by the MONET consortium," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, PD27.

7) M. Koga, *et al.*: "Optical path crossconnect system demonstrator designed to achieve 320 Gbit/s," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, PDP ThC 3.1.

8) M. Fukui, *et al.*: "Field experiment of all-optical WDM ring network up-to 70 Gb/s capacity employing 198-km installed dispersion shifted fiber," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, pp. 5.33-5.36.

9) K. Sato, S. Okamoto and H. Hamada: "Optical path layer technologies to enhance B-ISDN performance," *Proc. ICC (International Conference on Communications) '93*, pp. 1300-1307.

10) N. Nagatsu, *et al.*: "Optical path cross-connect system evaluation using path accommodation design for restricted wavelength multiplexing," *Special Joint Issues of IEEE J. Sel. Areas Commun. and IEEE J. Lightwave Technol.*, **14**, (1996) 893-902.

11) M. Kawachi: "Integrated silica waveguide technologies," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, Tutorial Session ThT, pp. 261-287.

12) S. J. B. Yoo: "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **14** (1996) 955-966.

13) K. E. Stubkjaer, *et al.*: "Wavelength conversion devices and techniques," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96*, ThB. 2.1.

14) Time: "Welcome to the wired world," *Special Report*, Feb. 3 (1997).

15) 谷口眞二, ほか: "AOTFの挿入損失低減", 1997年電子情報通信学会総合大会, C-3-187.

16) 宮田英之, ほか: "光波ネットワークにおける合分波器の帯域制限の検討", 1996年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1078.

17) M. Maeda: "Optical network management," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, Tutorial ThU.

(1997年4月14日受理)