

光伝送システム・ネットワークへの応用

桑原秀夫

光ファイバー通信技術は1970年代半ばから実用化が開始され、今日では陸上や海底の幹線伝送系における主要な伝送技術となっている。しかし、これまでの光通信では送信光源から受光素子まで光のパワーは減衰する一方であり、伝送路と光部品は損失の少ないことが大きな条件であった。これは、電気通信技術にあてはめると、三極真空管の発明以前の通信技術に相当する。光通信の世界では最近の光増幅技術の進展、実用化により、その状況は大きく変わってきた。前稿に詳しい解説がなされている海底伝送をはじめ、陸上のシステムにおいても、光増幅技術は大きな役割を果たしている。

光増幅技術を、システムの中で単なる伝送路損失の補償による point-to-point 通信だけでなく、ネットワーク形態の光通信に適用することにより、種々の通信形態が対応可能となったことが重要である。このことはシステム・ネットワークの構築にとって非常に大きな変革である。また、光増幅技術の進展により扱う光パワーレベルが飛躍的に大きくなった結果、これまであまり目立たなかった光非線形効果が顕著に現れるようになり、新たな問題を生じるとともに、積極的に利用してシステムを構築する技術も進展している。本稿ではこれらに視点をあてて、現状の技術、将来の方向等を概観する。

1. 光伝送システムへの応用

光増幅器の伝送システムへの応用は、送信部の電力増幅、中継増幅、受信側の前置増幅に大別される(図1)。

Optical amplifier applications in optical transmission systems and networks (1996年7月8日受理)
Hideo KUWAHARA 富士通研究所(〒211-88 川崎市中原区上小田中4-1-1)

受信側に関しては、光増幅技術出現以前の高速度光伝送技術においては、受光素子としてなだれフォトダイオード(APD: avalanche photodiode)が主に使われてきた。しかし、超高速化とともにAPDの帯域と高い増倍率の両立が困難になり、高い受信感度が実現しにくくなっている。光増幅技術を用いると、弱まって到達した受信信号を信号速度に無関係に100~1000倍にも増幅できるので、超高速システムの受信感度を大きく改善できる。信号光を増幅する際に雑音光も発生させるので、光増幅器としては十分に反転分布の励起された状態での、雑音指数の低い増幅が必要であり、0.98 μm 励起レーザーが適している。この光前置増幅技術により、受信側超高速電子回路に対する低雑音化の要求は大きく緩和される。

一方、送信側では光電力増幅器を用いた高出力化が主な目的である。光アクセス系での分配システムにおいても分岐損を補償するための大出力光増幅器が用いられる。これらの光電力増幅器では、低雑音特性より、励起効率の高さ、高出力化が重要であり、1.48 μm レーザーによる励起、消費電力、信頼度等に関心がある。光の非線形効果により、ファイバー1本に注入できる光電力は制限されるため、いくつかの回避策が検討されている。

これらにより、送受信レベル差が広がり、無中継伝送距離が拡大できる。また、光増幅中継器は従来の再生中継より経済性においても有利である。また、無中継光伝送距離をさらに拡大できる技術として、EDFを伝送路の途中に置き端局から励起光を送って信号光を増幅する遠隔励起¹⁾による光増幅があり、500 kmを超える無中継伝送実験が行われている²⁾。

さらに超高速技術においては、タイミング抽出機能な

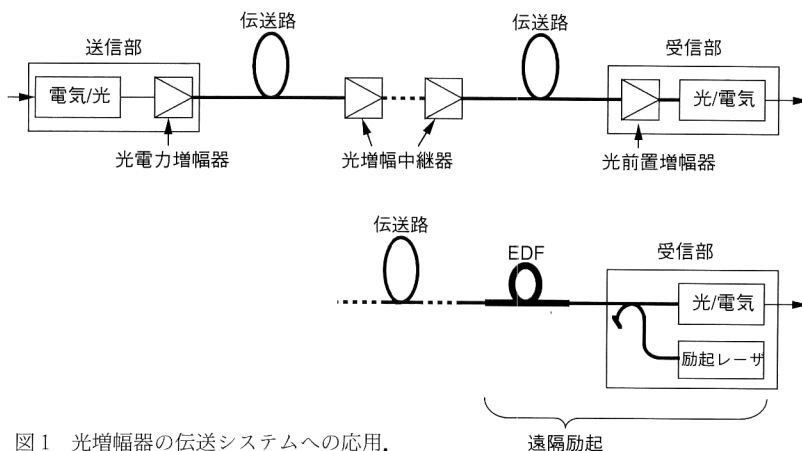


図1 光増幅器の伝送システムへの応用.

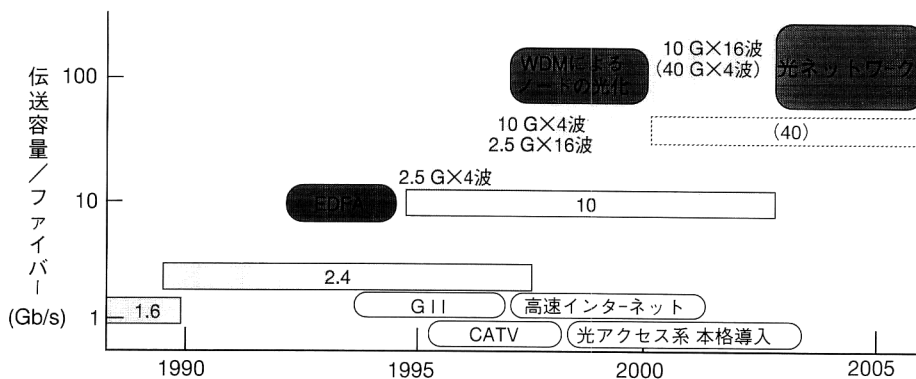


図2 光通信システムの展開.

どこれまで電子回路で行っていた機能を光で実現しようという試みが研究されている³⁾。これらの光による処理機能は、その損失のため実現できなかったものの多くが光増幅技術の進展により活発に研究されている。

2. 光ネットワーク

これまでの光通信は、約4～5年で伝送容量を4倍に拡大してきたが、昨今のパソコンの家庭への普及やインターネットなどによる通信量の急激な増大と、さらに、アクセス系の光化が進展して動画像などの広帯域信号を扱うマルチメディア社会が実現すると、幹線伝送系は大幅な大容量化が必要とされる。

これらの最近のネットワークの背景のなかで、1本の光ファイバー中を異なる波長の多数の光信号が伝送される波長多重技術 (WDM: wavelength division multiplexing) が大容量化の技術として大きく注目されている (図2)。多重化された波長数としては最大128波ま

で報告されている⁴⁾。WDM技術が急速に進展している背景にも光増幅技術の進展がある。WDMにおいて従来の再生中継を用いると、中継器の中で波長分離して各々を再生中継し、また波長多重化して送ることになるが、光増幅技術により波長多重化された信号を一括増幅中継できる。

さらに、伝送コストが大容量化により低減すると、通信ノードにおいても波長の違いを利用した信号の処理を行うことにより、通信ノードのコストの削減も期待されている。すなわち、通信システムのなかで伝送コストが下がると、クロスコネクタ技術、多重化端局装置等のノードコストが相対的に高くなり、これらを光技術を用いて実現する新しいアプローチが求められている。

3. 光ネットワークの特徴と課題

波長多重技術をベースにした光ネットワークは、上記のような背景で急速に注目されているが、その特徴は表

1に示すようなものである。

一方、光ネットワークの技術課題を図3にまとめた。これらの課題の中で、早期に導入されるとと思われる幹線系の光ネットワークにおいて重要となる、光ファイバーの分散、非線形効果等の伝送方式上の課題と本特集で扱う光増幅について少し述べる。

表1 光ネットワークの特徴。

<ul style="list-style-type: none"> ■ 超大容量ネットワーク (光ファイバーの広い波長域を活用) ■ 通信需要に応じた通信容量の拡張性と柔軟性を実現 (Wavelength on demand) ■ 信号形態、伝送速度等に依存しない信号伝送 (信号形態、速度の異なる信号を同時に伝送可能) ■ 波長を使った新しいノード処理を実現 (分岐・挿入、ルーチングなど)

光ネットワークでは、各光部品の損失を補償することが必要であり、光増幅器を多用するため、非線形効果の影響が無視できない。したがって、幹線系の高速度、長距離伝送の場合には、まず、ファイバーの非線形効果と分散の影響に注意する必要がある。

非線形効果としては、表2に示すいくつかのものがある。まず、ファイバーの屈折率が信号光自身の強度に依存する自己位相変調 (SPM: self-phase modulation) により信号のスペクトルが広がり、分散により波形劣化を引き起こすため、光送信電力に制限が生じる。波長多重技術を用いた光ネットワークでは、これらに加えて四光波混合 (FWM: four wave mixing) と相互位相変調 (XPM: cross-phase modulation) が関係する。FWM はやはり非線形効果により信号光と近傍のスペクトルの

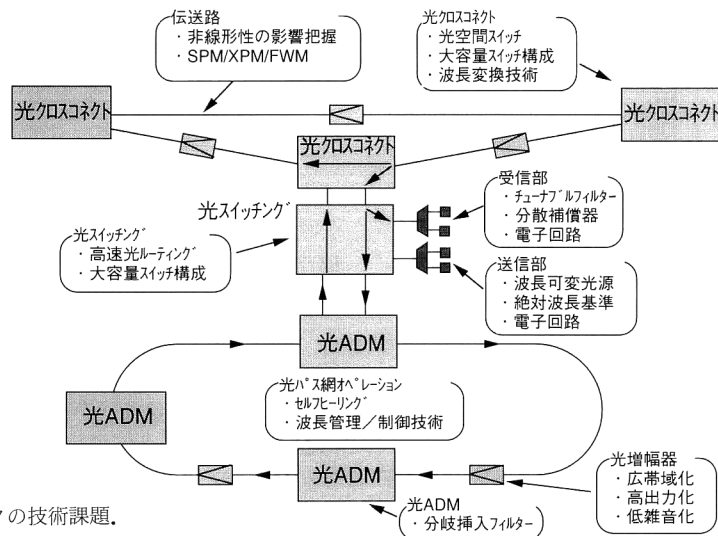


図3 光ネットワークの技術課題。

表2 光ファイバー中の非線形効果。

項目	現象	発生する光パワー	
非線形屈折率 (光カー効果)	自己位相変調 (SPM)	・ 信号光の強度変化に伴って屈折率が変化	~>10 mW
	相互位相変調 (XPM)	・ 他信号光の強度変化に伴って屈折率が変化	~>10 mW
	四光波混合 (FWM)	・ 信号光間、信号光と光増幅器の ASE 間の 3 次相互変調歪 (光の 3 次ビート妨害)	~>1 mW
誘導散乱	誘導ラマン散乱 (SRS)	・ ガラス分子の熱振動と入射光が結合し、数十 nm 波長の異なる光が発生し、出力光が減少	~>100 mW
	誘導ブリルアン散乱 (SBS)	・ ファイバー中の音波と入射光が結合し、入射光が反射され出力光が減少	~>数 mW

表3 四光波混合への対策.

- SMF と分散補償技術の適用
- 波長間隔の不等間隔化
 - 波長制御の高精度化
- 伝送光パワーの低減
 - 光増幅器の低雑音化, 誤り訂正技術の適用
- DSF の分散値管理, 新規 DSF の適用
- 位相共役を用いた補償技術

光 (合計 3 波) との間で生じた波 (4 波目) が信号光に対して干渉雑音となる現象であり, 特に, 分散の少ない, すなわち信号波長とファイバーの零分散波長が近い場合には相互作用長が長くなるため無視できない効果を生じる. したがって FWM に対しては表 3 に示すような対策が必要である. XPM は他の波長の信号の強度変化により屈折率が変化するもので, 長距離の場合や波長数が多い場合に効いてくる.

多波長による光ネットワークでは上記のように伝送路のファイバーの性質により大きく異なる. 1.3 μm 零分散ファイバー (G.652) の場合は, 光源の波長 1.55 μm において約 17 ps/nm/km の分散があるため分散補償技術が必要となる. いくつかの分散補償技術のうち, 現状では負の分散値をもつ分散補償ファイバーの使用が一般的であるが, 小型化等を目指した分散補償素子としてファイバグレーティングや導波路素子等を使う方法もある.

1.55 μm 零分散ファイバー (分散シフトファイバー: G.653) の場合は, 分散の値が信号波長域で小さいので, 分散補償は通常は必要ない. しかし, 距離の長い海底ネットワークなどでは累積するため, きちんとした分散管理が必要であり, また, ファイバー間での分散値のばらつき等も問題となる場合がある. G.653 の場合に波長多重伝送で最も大きな問題は四光波混合の発生であり, 表 3 の対策, 特に波長の不等間隔化が詳しく検討されている.

現在, 新しく 1.55 μm 帯で分散が小さいがゼロでない, NZ-DSF (non-zero dispersion shift fiber) の研究が行われている. 零分散波長を信号帯域から少しずらすことにより四光波混合を避け, かつ分散が大きな値とならないようにするという考えからであり, G.65x として議論が開始されている. 狭い分散範囲に再現性よくファイバーを作る技術がまず必要であろう.

4. 光ネットワークに要求される光増幅器

光ネットワークが注目されるようになった要素には, 光増幅器の発展により, 波長多重化された光信号を一括

して光増幅中継できることが挙げられる. したがって, 多波長を一括して増幅できる十分な出力があり, 広帯域であり, 多重化された信号を均一にクロストーク少なく, 低雑音で増幅できることが要求される.

上記の種々の非線形効果から光ファイバー内の光パワーには上限があり, もともと, 光の SN 比から下限があるので, 伝送設計には光電力の許容範囲が生じ, 光増幅器の出力制御, 入力ダイナミックレンジへの要求が生まれる. また, 光ネットワークにおいては, ある波長の信号の分岐・挿入 (ADM: add-drop multiplexing) やルート切替 (routing) などが期待されているが, 波長数が増減して光増幅器への入力パワーが変動した場合に, 出力の回復時間や光サージ量などが重要であり, EDFA の動特性が研究課題となっている.

広帯域化については, いくつかの技術が検討されている. まず, EDF 自身の利得特性が平坦であることが必要で, 石英系ファイバーの場合には Al 等のドーパントを高濃度で加えることによりもとのエルビウム準位によるピークを広げている. このほか, 性質の違うファイバーを縦続に接続する方法や, フッ化物ファイバーを用いる方法が提案されている.

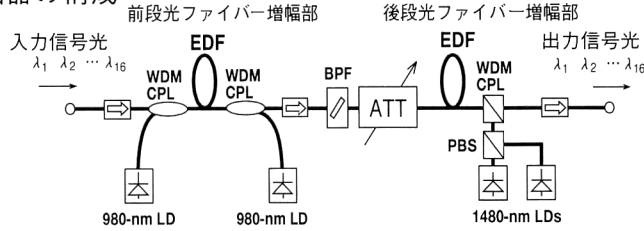
図 4 に 2 段型で構成した EDFA の例を示す. 2 つの EDF に役割分担させることにより, 広帯域化, ダイナミックレンジの拡大等を実現させた⁵⁾. これらの技術により EDFA の帯域は当初より大きく改善されたが, さらに広帯域化をねらう場合, 多段に接続した場合の広帯域化には, 逆特性のフィルターの使用などが検討されている.

また, 光アクセス系での光増幅の応用は, まず, CATV や VOD の分配系の下り回線であり, 分配数の大幅な拡大が可能である. Head-end のコストを分担する加入者数が増え, コストの低減が可能である. 1.3 μm 帯での光増幅もフッ化物ファイバーを使用して報告されているが, 励起効率の向上が望まれている.

5. 波長多重大容量伝送 (1 Tb/s 伝送実験)

今年 2 月に米国の San Jose で開かれた OFC '96 では光増幅技術等を駆使した 1 Tb/s の伝送実験が Post-deadline Paper として 3 件連続で報告された⁶⁻⁸⁾. 1 Tb/s 伝送は以前から光通信技術者の大きな目標であり感慨深い. 各発表には種々の新しい技術が投入されている. 一例として当社における実験を図 5 に示す⁶⁾. 上述の広帯域光増幅器が送信部, 中継器, 受信部に使われている.

光増幅器の構成



16波一括増幅の光スペクトル

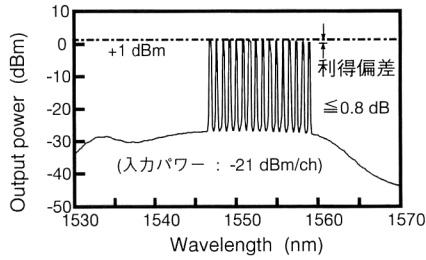


図4 波長多重用EDFA.

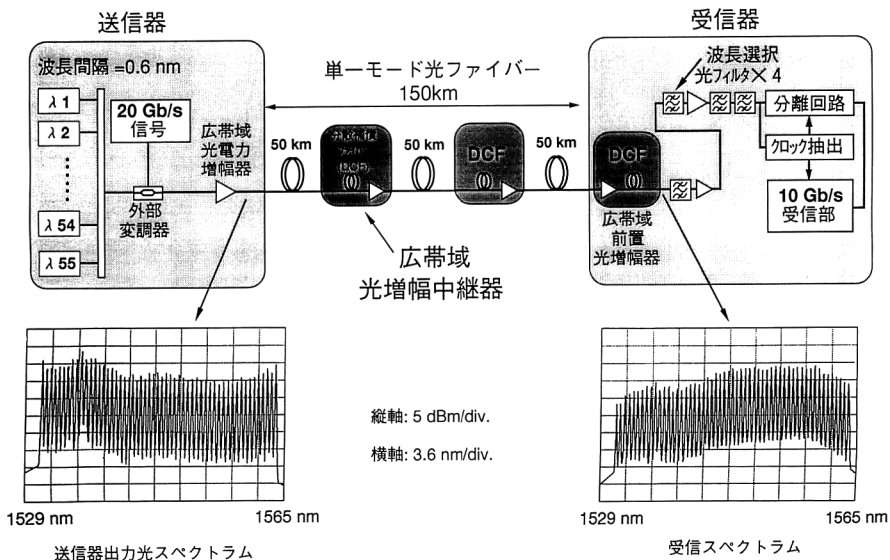


図5 1.1 Tb/s 伝送実験の構成図と光スペクトラム (55 波×20 Gb/s).

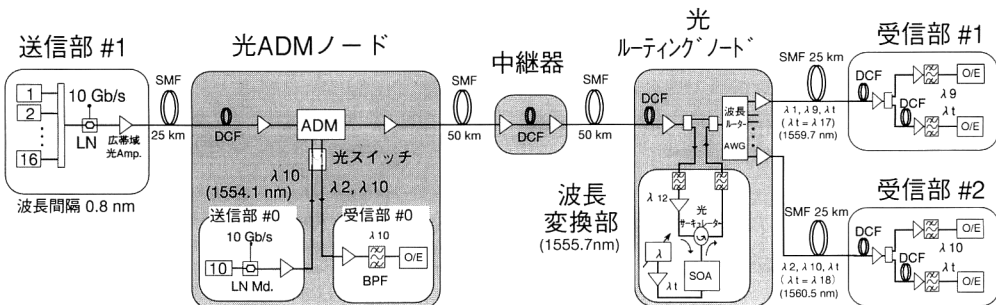


図6 光ネットワーク機能確認実験.

表4 ACTS 光ネットワーク関連プロジェクト.

プロジェクト	タイトル	主な実験場所	テクノロジー
AC 029	WOTAN(Wavelength-agile Optical Transport and Access Network)	イギリス	ATM-SW, LAN 間接続 WDM/TDMA 広帯域 PON
AC 066	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
AC 069	COBNET(Corporate Optical Backbone Network)	イギリス	CPN WDM リング/SCM リング
AC 073	METON(Metropolitan Optical Network)	スウェーデン	ATM-SW, 光 XC+ADM リング 4 波, 4 nm 間隔
AC 084	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

6. 光ネットワーク基礎実験

光ネットワーク技術は分岐・挿入機能を手始めに海底伝送に導入されようとしているが、将来は光技術を駆使した光レイヤーの導入によりノードの光化が進展し、全体としてネットワークの柔軟性、拡張性、簡素化、低価格化が実現されることが重要である。図6に波長を使った分岐・挿入機能、波長ルーティング機能を検証した基礎実験の例を示す⁹⁾。分岐・挿入ノードによる特定の波長の出し入れ、ルーティングノードにおける波長による方路振分け、半導体レーザーの相互利得変調を用いた波長変換機能による方路変更等の基本機能が確認された。

7. 海外の動向

欧米でも光ネットワーク技術が大きく進展している。欧州では RACE(R&D in Advanced Commun. in Europe)により進められていた活動が、95年9月からは ACTS(Advanced Communications Technologies and Services)として継続している。ACTSの中で光ネットワークに関するプロジェクトについて表4にまとめる^{10,11)}。

米国では、ARPA(Advanced Research Projects Agency)が中心となり、Bellcoreなどが参加する ONTC(Optical Network Technology Consortium)や DEC, AT&T, MIT 等が参加する AON(All Optical Network)などが主に feasibility study としての活動を続けてきたが、AT&T, Bellcore, BOCなどが推進している MONET(Multi-wavelength Optical Network consortium)になって商用を視野に入れたものとなり、一段と検討が具体化している。

国際標準化機関である ITU-T(SG 15, WP 4)においても光ネットワーク技術について議論が開始されている。まず、波長の標準については基準周波数として 193.1 THz (1552.5 nm) を規定し、その基準周波数が

ら 25 GHz (約 0.2 nm) 間隔にグリッド点を設け、その整数倍の 25 GHz $\times n$ を波長間隔として使う方向で合意を目指している。各波長当たりの容量は 622 MHz (STM-4), 2.5 GHz (STM-16), 10 GHz (STM-64) 等を想定しており、波長多重数については 2, 4, 8, 16 波などが考えられる。絶対波長基準光源としてもいくつかの吸収スペクトルが候補に挙がっている。チャンネルごとの SN 比, クロストーク, チャンネル認識機能等に関する規定については今後の検討項目となっている。

光ネットワーク技術が幹線系からアクセス系まで広く使われ、光が本来もっている広帯域性を十分に使うには、やはり光増幅技術をはじめとして、光源技術、光フィルターなどの光デバイス技術の進展と低価格化が鍵である。ITU 等の標準化により世界共通の波長が確立されれば、価格の低減も促進されると思われるが、関連光デバイスの研究開発努力に期待したい。光増幅技術は、現在はエルビウムドープファイバーを用いるものが主体だが、光処理機能などは半導体レーザー増幅器に期待するところが大きい。また、光ネットワーク特有のネットワーク管理手法、光増幅により増加した光パワーレベルの安全上の問題等も、今後の研究が必要な分野である。

文 献

- 1) K. Aida, *et al.*: "1.8 Gb/s 310 km fiber transmission without outdoor equipment using a remotely pumped in-line Er-doped fiber amplifier in an IM/DD systems," *European Conference on Optical Communication (ECOC)* '89, PDA-7 (1989).
- 2) P. B. Hansen, *et al.*: "2.488 Gb/s unrepeaters transmission over 529 km using remotely pumped post- and pre-amplifiers, forward error correction, and dispersion compensation," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* '95, PD25 (1995).
- 3) K. Hagimoto, *et al.*: "Twenty-Gbit/s signal transmission using a simple high-sensitivity optical receiver," *Optical*

- Fiber Communication Conference (OFC) '92*, Tu13 (1992).
- 4) K. Oda, *et al.*: "128 ch 480 km FSK-DD transmission experiment using 0.98 μm pumped erbium doped fibre amplifiers and a tunable gain equaliser," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 982-984.
 - 5) 菅谷 靖, ほか: "波長多重 Er ドープファイバ光増幅器の構成法の検討", *電子情報通信学会信学技報 OCS95-36* (1995) 21-26.
 - 6) 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*, PD19 (1996).
 - 7) A. H. Gnauck, *et al.*: "One terabit/s transmission experiment," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD20 (1996).
 - 8) 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*, PD21 (1996).
 - 9) 大塚和恵, ほか: "波長多重技術を用いた光 ADM 及び光ルーティングの検討", *電子情報通信学会信学技報 OCS95-100* (1995) 31-36.
 - 10) A. M. Hill, *et al.*: "Optical networking in the European ACTS programme," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, Th11 (1996).
 - 11) 松本隆男: "光波ネットワーク", *オプトロニクス*, No. 173 (1996) 124-129.