

WDM技術と当社の取り組み

D-WDM Technologies

大久保勝彦*

Katsuhiko Okubo

泉対信太郎*2

Shintaro Sentsui

1. はじめに

1960年のレーザ発振成功以後、光通信は将来の通信技術として有望視されていたが、最も重要な要素である光源と伝送路に問題があり実用化のめどがたっていなかった。しかし、1970年に光源（半導体レーザの室温連続発振）と伝送路（減衰量20 dB/kmの光ファイバ）が実用化に必要なとされる水準を達成したことにより、これから後わずか10年余りで光通信は急速に普及していった。この当時は、次世代の光通信は、光を搬送波としヘテロダイン検波を用いたコヒーレント通信と考えられており、多くの研究機関でこの研究が精力的に行われていた。この流れを変えたのは、高温超伝導がフィーバーしていた1989年に1480 nmの波長の半導体レーザ励起によるエルビウム添加光ファイバ（EDF: Erbium Doped Fiber）を用いた光ファイバ増幅器（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）の報告である^{1), 2)}。EDFAは瞬く間に実用化され、今日のD-WDM（Dense Wavelength Division Multiplexing）を支えるキーテクノロジーとなっている。

当社は、光ファイバとその後のEDFAがすじの良い技術で将来性があると着目し、これらの研究開発に重点的に取り組んできた。1974年には世界に先駆けて光ケーブルの屋外布設を行ない³⁾、1989年から光ファイバ増幅器の研究にいち早く着手した。1989年の1480 nm半導体レーザ励起²⁾や1997年のLバンド光ファイバ増幅器等⁴⁾、光通信とそれを発展させたWDMの重要な局面において貢献し、1998年の冬季長野オリンピックでは、WDMによるHDTV（High Definition Television）の中継システムを成功させてきた。また、光ファイバ増幅器は、WDMにより高出力化が必要とされることを予期して1480 nm半導体レーザの高出力化を推進し、励起レーザ業界のリーダーとして貢献している。

当社は、WDM関連商品の開発を最重要開発テーマとして位置づけ、この新技術開発により事業創出を図り、情報通信分野の発展を通して社会に貢献していく所存である。

この「WDM小特集号」を御理解いただくために、WDM伝送システムとこれに係わる当社の取り組みについての概要を示す。

2. WDM伝送システム

電気通信は、インターネットの普及によって通信容量が倍以上の年率で増加している。技術革新が通信料金の低下をもたら

し、それによって新たな需要を喚起することによって、更に技術革新が促進される循環が見られるが、これを支えている技術がWDMである。通信容量の増大の手段には、TDM（Time Division Multiplexing）とWDMがあるが、図1に示すように、光ファイバ増幅器が実用になるまでは、1波当たりの容量を増加することで技術開発が行われてきた。

WDMそのものは、新しい考えではなく、この時期にも簡単なWDMは用いられていた。当時は、光源の波長を狭い範囲で安定して安価に生産することができず、また波長間隔の狭い光を分離するフィルタが実用化されていなかったため、1310 nmと1550 nmの波長のように、波長帯域を変えたWDMであった。

光ファイバ増幅器を用いたWDMシステムの基本構成を図2に示す。図2 a)は、従来の光中継システムで、送信装置（Tx）から出力された光が、伝送路である光ファイバを伝搬し、光信号が弱くなったところで、光電気変換・電気光変換を伴う3R光中継器により光信号を再生して伝送している。WDMシステムは、図2 b)に示すように、異なった波長の送信装置（Tx）から出力された光がMUX（Multiplexer）で合波され、合波された光が伝送路である光ファイバを伝搬し、光信号が弱くなったところで、光ファイバ増幅器により光信号を増幅する。増幅を繰り返した後、DEMUX（Demultiplexer）で光信号を分波し受信装置（Rx）で受信する。従来の光中継器でWDMを行うと、中継地点ごとにMUX/DEMUXと多重した波の数だけのの中継器が必要で、光ファイバの節約にはなるが、それ以上の経済的効果は少なく、ほとんど実用化されていなかった。これに対して、光ファイバ増幅器を用いたWDMは、多重数が多くても、これまでに開発されている送受信装置をその数だけ準備すれば、光ファイバ増幅器の出力を増加するだけで実現でき、

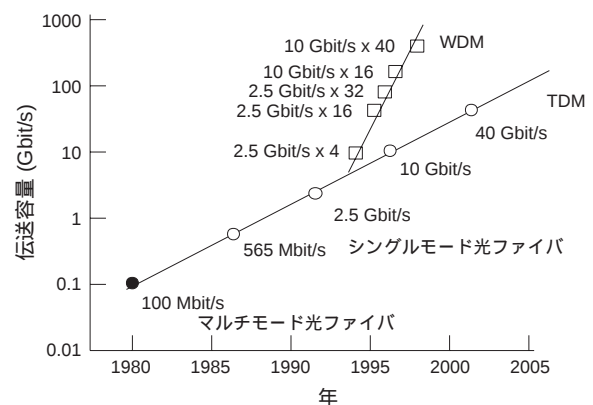


図1 伝送容量の推移
Evolution of transmission capacities

* 常務取締役 研究開発本部長

*2 研究開発本部

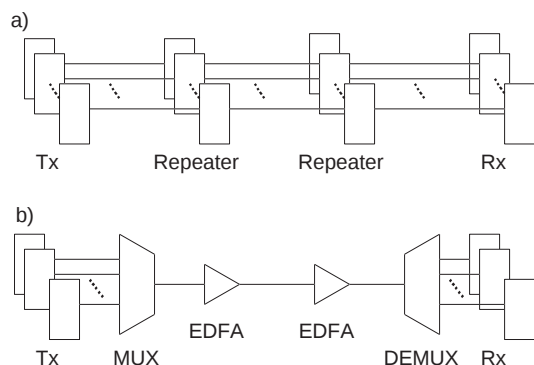


図2 従来の光中継システムと光ファイバ増幅器を用いたWDMシステム
Conventional optical repeater system and WDM system with optical amplifiers for long-haul applications

極めて経済的な伝送システムとなる。このシステムは、狭い波長間隔で波長多重をするので、従来のWDMと区別するために、D-WDM（Dense Wavelength Division Multiplexing）と呼ばれている。

光ファイバ増幅器を用いたシステムは、第一世代の、従来の光中継器を光ファイバ増幅器に置き換えた1波長だけのシステムから、現在の幹線系で主力となっている、複数の波長を用いて伝送容量を増加させる第二世代のWDMシステムになっている。将来のWDMシステムは、図3のように発展すると予測されており、適用される範囲も現在の幹線系からアクセス系にまで拡大される。ノードで、一部の光を出し入れする光アドドロップ（OADM: Optical Add-Drop Multiplexer）は、既に一部で実用化が行われている。光クロスコネクタ（OXC: Optical Cross Connect）は、複数の光ファイバからWDMで送られてきた光信号をそれぞれのDEMUXで分離し、波長単位で異なった出力ファイバに割りふるもので、大容量の光信号を電気信号に変換することなく切り替えるので、経済的なシステムが構成できる。

将来の研究課題としては、光領域で光をルーティングする光ルーターや、光で3Rを行う中継器等があるが、実用化までには技術的な課題が多く、見通しがたっていない。

WDMシステムを構成するキーテクノロジーは、信号光源、光ファイバ増幅器、MUX/DEMUX、及び伝送媒体となる光ファイバである。大規模なOXCは、利用できる光部品によって方式が異なるが、集積化された光スイッチは必須であり、波長変換素子が利用できればシステムの融通性が拡大する。当社は、OXCを視野に置いて、すべての主要製品の開発に取り組み、システムの要請に合わせた開発を行ってきている。

3. WDMの要素技術

光ファイバ増幅器の帯域の有効利用は、光を分波するDEMUXの性能に依存している。DEMUXは、多重されて同時に送られてきた光を、各Rxに対応する1波だけ取り出し、他の波長の光は回り込まないようにするフィルタ特性が重要である。初期の多重数が少ないときのWDMには、誘電体多層膜フィルタを用いたDEMUXが多かったが、ファイバブラッググレーティング（FBG: Fiber Bragg Grating）やAWG（Arrayed-Waveguide Grating）⁵⁾による新技術で狭い波長範囲でのフィ

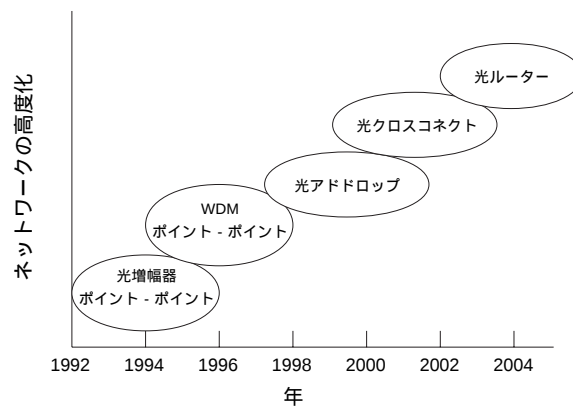


図3 光ネットワークの推移
Evolution of photonic network

ルタが可能になり、多重周波数間隔は50 GHz（約0.4 nm）まで狭まっている。この領域になると、理想的なフィルタができて、1波当たりの伝送容量を大きくしようとすると、伝送容量に比例して光を変調することによる光のスペクトル広がりが大きくなり、隣接する波長帯にまで広がるところで、1波当たりの伝送容量は限界となる。現実には理想的なフィルタにならず、1波当たりの伝送容量が大きいときには、フィルタのクロストークだけでなく波長分散により信号が劣化するので、これらを考慮したDEMUXの性能向上が重要である。MUXは、DEMUXの入出力方向を逆にすればそのまま用いることができるが、クロストークの問題がなく、挿入損失も光増幅器で補えるので、多重数の少ないときには、安価なスターカプラでMUXをおこなうこともある。当社は狭帯域での分波特性に優れたAWGを用いたMUX/DEMUXの商品化を行っている。

OADMには、固定のOADMと波長や時間が可変なOADMとがある。前者は波長を固定したフィルタで、後者は波長可変フィルタを用いており、フィルタには幾つかの方法があるが、いずれもFBGと光サーキュレータを用いて構成することが多い。

WDMの多重数を増加させるには、光ファイバ増幅器の増幅帯域を拡大し、帯域内の利得偏差を小さくする。更に増幅器からの1波長当たりの出力を一定に保つためには、多重数に比例した光ファイバ増幅器の出力が必要である。このような性能を達成するには、光ファイバ増幅器を構成する主要部品である、EDF、利得等価フィルタ、励起用レーザの高性能化が必要であり、キーテクノロジーとして自社開発に取り組んでいる。光ファイバ増幅器の利得平坦性を実現するためには、EDFの利得特性との組合せで利得等価フィルタを設計するので、これには独自の設計が必要である。当社のEDFAには、誘電体多層膜、FBG、エタロン等で作成された利得等価フィルタをEDFAの仕様に合わせて用いている。更に光ファイバ増幅器を高機能化するためには、入力レベルの変動に対応するための可変減衰器や可変利得等価フィルタも必要となる。また光ファイバ増幅器の小型・低価格化を図るために、信号光と励起光を合波するカプラとアイソレータの複合部品等の開発も合わせて進めている。

光ファイバ増幅器の高出力化にともない、励起用半導体レーザ（LD: Laser Diode）に対する要求性能が変化している。実用化されているLDの波長帯は、980 nmと1480 nmである。光

ファイバ増幅器の雑音の点では、980 nm のほうが 2 dB 程度低雑音であり、かつ LD を駆動する電力から光増幅された光信号までの全体のエネルギー変換効率が優れているため、励起 LD は 980 nm になると言われていた時期があった。980 nm LD は、信頼性問題は既に解決されているが、励起光から信号光への変換効率が小さく、かつ励起光として利用できる波長範囲が狭いため、光ファイバ増幅器の出力に限界が生じる。これに対して、1480 nm LD は、利用できる波長範囲が広く、励起光の波長多重が可能であり⁶⁾、高出力光ファイバ増幅器にはこの技術が用いられる。1480 nm LD は現状では不可欠であり、更に、海底ケーブルに用いられる光ファイバ増幅器の遠隔励起やラマン増幅器⁷⁾への応用など適用範囲が拡大している。当社は、D-WDM による光ファイバ増幅器の高出力化を予測し、1480 nm LD の開発を初期段階から重点的に行っているが、980 nm LD の開発も合わせて行い、この LD の信頼性問題を解決し、両波長の LD を商品化している。

更に、励起 LD で獲得した技術を基に、WDM の信号光源となる DFB-LD の開発も行っている。

既に布設されているシングルモード光ファイバのシステムを D-WDM でアップグレードしようとする、1550 nm での光ファイバの波長分散が大きくこれを補償することが必要である。分散補償器は、分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensating Fiber) と FBG⁸⁾ によるものがあり、いずれも利点と欠点がある。当社はどちらの開発にも取り組んでいるが、現状で商品化しているのは DCF である。

伝送媒体となる光ファイバは、光ファイバ増幅器によって要求性能が増加した。従来の光通信システムでは、波形劣化や雑音は、中継器ごとに除去され累積されることがなかったが、光ファイバ増幅器を用いたシステムでは、信号劣化は累積される。このため、システム全体での波長分散をマネージしながら、従来は問題とならなかった偏波分散 (PMD: Polarized Mode Dispersion) やカー効果による光ファイバの非線形問題が生じた。最も問題となる非線形現象は、4 光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) で、波長分散が小さいほど FWM が生じる。一方波長分散が大きいと、波長分散によって信号波形が劣化する。これを解決するために提案されたのが、ITU (International Telecommunications Union) で勧告されている G.655 のノンゼロディスページョン光ファイバである。光ファイバ増幅器によって送出信号のレベルに実質的に制限がなくなったことにより、可能な限り大きな光信号を送出して中継距離を長くすることが求められるが、光ファイバの非線形性により、光ファイバの入力レベルが制限される。単位面積あたりの光強度が大きいほど非線形現象が生じるので、コア領域を大きくすることが検討されているが、コア領域を大きくすると波長分散勾配が大きくなる。一方 WDM の波長帯域は拡大する傾向にあり、波長分散勾配を小さくすることも要求されており、WDM に適した設計がなされた光ファイバが内外の研究機関から提案されている。

当社は、ノンゼロディスページョン光ファイバの大コア径化の開発とともに、シングルモード光ファイバの波長分散と逆な波長分散を持つ RDF (Reverse Dispersion Fiber)⁹⁾を開発し、システム全体で広い波長範囲にわたって波長分散を小さくし、

長距離で大容量な D-WDM に適した線路構成とすることを提案し、ケーブル化にも問題ないことを確認している。この線路構成を用いた伝送システムの実験結果も報告され、次世代の伝送路として期待されている¹⁰⁾。

光クロスコネクタ (OXC) は、集積化された光スイッチが必須である。現状で確実な光スイッチはメカニカルスイッチであるが、このスイッチで大規模なスイッチをするには装置が大きくなるので、新技術によるスイッチが多く提案されている。電気光学 (EO) 効果、音響光学 (AO) 効果、熱光学 (TO) 効果等を用いて屈折率を変化させる可動部のない導波路型光スイッチや MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) を用いたメカニカルスイッチ¹¹⁾の開発が進み、一部は現場試験で用いられる段階にまでなっている。

波長変換が可能となると、異なった光ファイバから来た同一の波長を、波長変換して波長が重ならないようにして同じ出力光ファイバに送り出すことができるので OXC の機能が向上する。半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor Optical Amplifier) による波長変換素子等の開発が行われているが実用化までには技術的な課題が多い。

4. むすび

当社の WDM への取り組み状況を御理解いただくために、今回「WDM 小特集号」を発行することになり、WDM と当社の WDM への取り組みについての概要を示した。次頁以下に代表的な技術や製品の開発状況を紙面の許す範囲で御紹介する。この特集を御参考にしていただくと共に、WDM システムに必要とされる製品の御要望をお知らせしていただければ幸いです。

参考文献

- 1) Y.Kimura, K.Suzuki and M.Nakazawa: Efficient Er3+-doped optical amplifier pumped by a 1.48- μ m high-power laser diode, OFC'89, TUG6 (1989)
- 2) M.Suyama, K.Nakamura, S.Kashiwa and H.Kuwahara: 14.4-dB gain of Erbium-doped fiber amplifier pumped by 1.49 micrometer laser diode, OFC'89, PD-6, (1989)
- 3) H.Murata, S Inao and Y.Matsuda: Step index type optical fiber cable, 1st ECOC, London, p.70 (1975)
- 4) M.Fukushima, et al.; Flat gain Erbium-doped fiber amplifier in 1,570 nm - 1,600 nm region for dense WDM transmission systems, OFC'97, PD-3, (1997)
- 5) H.Takahashi, S.Suzuki and I.Nishi: Multi/demultiplexer for nanometer-spacing WDM using arrayed-waveguide grating, IPR'97, PD1-1, (1991)
- 6) Koyanagi, et al.; The ultrahigh-power 1,480 nm pump laser diode module with fiber Bragg grating, OAA'98, MC2 (1998)
- 7) R.Rotwitt, et al.; A 92 nm bandwidth Raman Amplifier, OFC'98, PD-6 (1998)
- 8) K.O-Hill, et al.; Aperiodic in-fiber Bragg gratings for optical fiber dispersion compensation, OFC'94, PD-2, (1994)
- 9) Mukasa, Y.Akasaka, Y.Suzuki and T.Kamiya; Novel network fiber to manage dispersion at 1.55 μ m with combination of 1.3 μ m zero dispersion single mode fiber, vol.1, pp.127-130, ECOC'97 (1997)
- 10) K.Yonenaga and Y.Miyamoto; Dispersion-managed high-capacity WDM systems using zero-dispersion -flattened transmission line, FD-4, OFC'99, (1999)
- 11) Lightwave, All-optical equipment emerging from the lab to the marketplace, June 1999, p1