

光スイッチ適用による光ネットワークの革新

高橋 哲夫

Optical Network Revolution Brought by Optical Switching Technology

Tetsuo TAKAHASHI

The modern social infrastructure that supports a global information society is propelled by optical communication technology. Optical switching technology has gone into the stage of the practical use in the ROADM/WXC node that employs the wavelength switching technique in the wavelength division multiplexing network. In this paper, we survey the history of the optical switch technology used in a ROADM/WXC node, and clarify the significance of the optical switch technology. Then we describe the cutting edge technology and their issues in the area of the ROADM/WXC functional upgrade, such as CDC (colorless/directionless/contentionless)-ROADM and elastic photonic network, as well as the hierarchical type optical cross-connect node and the optical Packet Switch Node beyond the line switching of the optical path layer.

Key words: optical switch, reconfigurable optical add/drop multiplexer (ROADM), elastic photonic network, optical cross-connect, optical packet switch

私たちの社会生活はさまざまな技術によって支えられ、その生活水準は向上し続けている。古くは産業革命以降、重労働からの解放と自然の脅威の克服を進める上で、生産性やコスト効率の向上は最優先課題とされてきた。近代科学技術は20世紀までに、これらの課題解決のために多くの努力を費やしてきた。蒸気機関、内燃機関、さまざまな重機、大規模な土木・建築、これらを支える火力・原子力エネルギーなどは、その代表といえよう。これらの技術を利用して拡大する人々の活動範囲を、遠隔通信という手段で支える基礎的なインフラストラクチャーとして、情報通信は発展してきた。すなわち、Marconiの無線通信を契機に、実用に供するようになった通信技術である。人類はその活動領域を広げるに従い、より遠距離に、より多くの情報量を通信するインフラストラクチャーを実現する技術として、無線通信および同軸ケーブル通信方式を開発し、実用化してきた。これら通信技術の急速な発展は、新たな展開をもたらした。通信帯域が広帯域化されるとともに、通信を介して流通するコンテンツの種類は多様化してきた。1950年代のコンピューターの発展とともに始まったイン

ターネットの歴史は、その当初はメインフレームと端末との1対1通信であったが、端末同士の通信へ拡張する中で、TCP/IPが標準化(1982年)され、世界規模で相互接続されるインターネットが構築された。さらに、営利目的のインターネットサービスプロバイダー(ISP)が1980年代末から1990年代に出現し、インターネットの商業化が完了し、インターネットの営利目的の利用についての制限がなくなった。そのことで、インターネットは文化や商業に大きな影響を与えている。電子メール、インスタントメッセージ、VoIP、ビデオチャット、World Wide Webとそれによるインターネットコミュニティ、ブログ、ソーシャル・ネットワーキングなどがインターネットによって可能になった。試算によれば、1993年時点では、双方向電気通信でやり取りされた情報の総量のうちインターネットを使ったものは1%にすぎなかったが、2000年にはそれが51%に成長し、2007年には97%以上の情報がインターネット経由でやり取りされている¹⁾。

21世紀に入って、この方向性に対する修正の必要性が活発に議論されている。世界人口は驚異的にも指数関数的

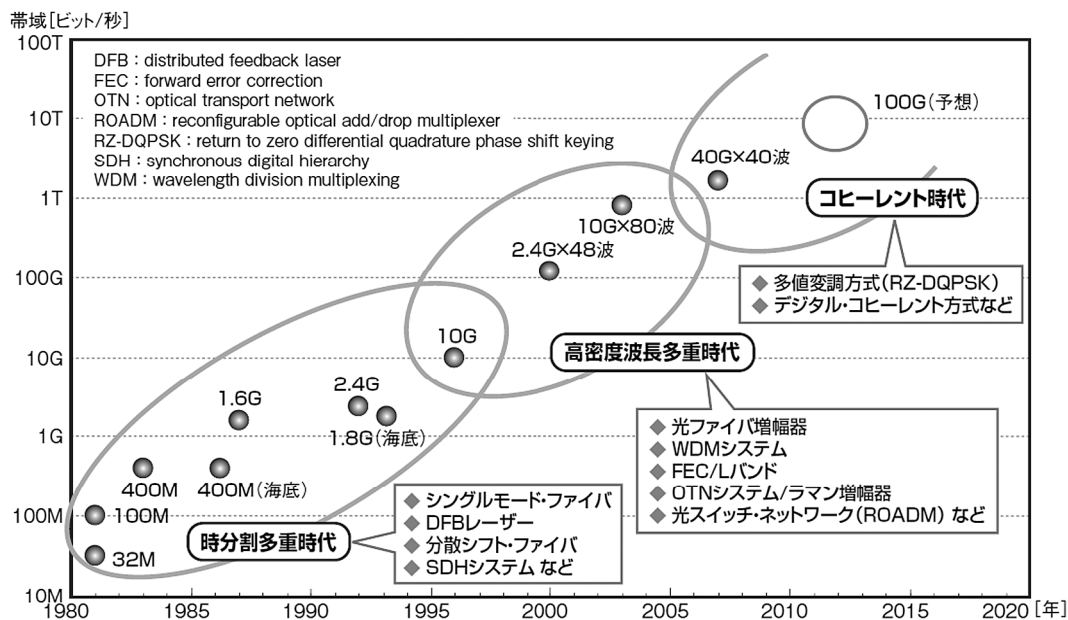


図1 光伝送技術の変遷 (文献4より引用).

な増加を維持し、2011年には70億人を超えるに至った。このような大人口を支え持続的に発展可能な地球社会を維持するためには、地球に与える環境負荷を低減し持続可能な人間社会の発展を目指すための技術が必要とされている。これまで通信量の増加は、光伝送技術によるリンク技術の広帯域化とトラフィックの交換処理を行うルーター・スイッチの高速化・高機能化によるインフラストラクチャーの増強によって支えられてきたが、近年ルーターやスイッチの消費電力増加が著しく、低消費電力化が課題となり始めている。それはリンク速度の高速化に伴いトラフィック交換処理を支えるCMOSデバイスに要求される処理量が増加しているためであり、これを解消するためさらにCMOSの微細化を進める、もしくは駆動周波数を上昇させることは、大幅な消費電力増を招くためである。

その一方で、光スイッチ技術は大容量の光信号を低消費電力でスイッチ処理することができる。おおよそGbit/s以上の高速信号の交換を境に、より高速な信号は光スイッチ処理を、より粒度の細かい交換処理は電子スイッチ処理を行うことで、通信ネットワーク全体の低消費電力化を図ることが可能である。

本稿では、まず光ネットワークの歴史を概観し、初めて光スイッチが適用されたROADM/WXCノードシステムの概説を通じて、光スイッチ技術の意義を明らかにする。次に、これら実用化されたROADM/WXCノードシステムの高機能化への取り組みである、colorless, directionless, contentionless化とエラスティックネットワーク技術についての現状と課題について述べる。さらに、これまでの光

パスレイヤーの回線交換にとどまらない新たな光ノード技術への取り組みとして、階層型クロスコネクトノードと光パケットスイッチノードについて述べる。

1. 光通信の歴史とROADM/WXCノードシステム

人類はその活動領域を広げるに従い、より遠距離に、より多くの情報量を通信するインフラストラクチャーを必要としてきた。その実現技術として、無線通信および同軸ケーブル通信方式が開発され、実用化されてきた。

1966年にはCharles Kao (のちに2009年にノーベル賞を受賞)が光ファイバーに関する重要な論文²⁾を発表した。すなわち、光ファイバーは広帯域な信号を伝送する可能性があるものの、その損失が大きすぎて遠隔の通信には利用が不可能との当時の常識を破る予言であり、ファイバー中の光信号の伝搬損失を1kmあたり20dBにまで劇的に減少させることが可能であることを理論的に示したものである。これ以降、光ファイバー通信システムの研究開発は加速し、半導体レーザー、フォトダイオード、光ファイバー増幅器、光合波器、分波器などの技術開発と相携え発展してきた。現在では、実験室レベルではファイバーあたり1Pbit/s×50km³⁾、実用化レベルではおおよそ10Tbit/s×2~3000km/fiberの光通信が達成されている。この歩みは25~30年で性能指数が6桁向上するというもので、まさに驚異的な速度で技術レベルの向上がなされてきた⁴⁾。

図1は光伝送技術の変遷をまとめたものである。図中では光伝送技術の変遷を大きく3つのフェーズに分類している。最初の時分割多重時代は、広帯域で低損失なファイ

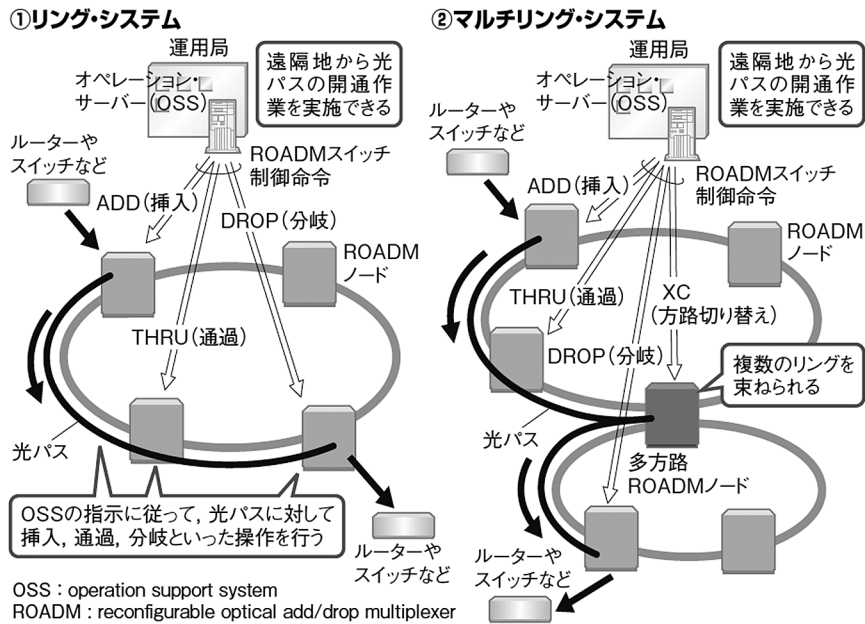


図2 ROADMシステムの概要 (文献5より引用). ROADMシステムは, 光パスを作り, 信号を伝送するROADMノードと, それらを一元管理するOSSで構成される. トポロジーとしては, ①のように単一のリングによるリング・システムと, ②のように複数のリングを束ねたマルチリング・システムがある.

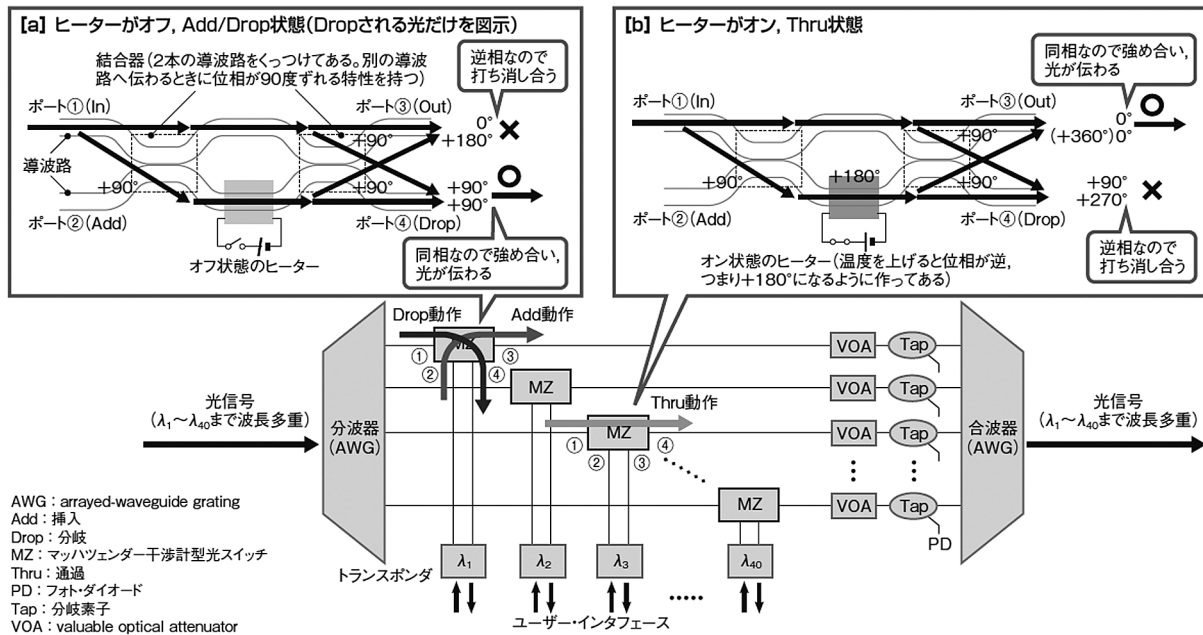


図3 PLC ROADM スイッチ (文献8より引用). 例として, 40 波長対応の PLC (planar lightwave circuit) 型波長選択スイッチの構成と, 光を切り替えるマッハ・ツェンダー干渉計型光スイッチの動作原理を示した.

バーおよび半導体レーザー光源の実現など, 光伝送に必要な基本要素デバイス技術が確立した時代である. ネットワークの交換処理という側面からみると, 電子スイッチデバイスを用いて光伝送システムに収容するクライアント信号の多重分離・分岐挿入・方路切り替えを行っていた. 光信号の帯域は~Gbit/s 以下であり, 編集され多重分離され

る信号は 1~100 Mbit/s オーダーであった. 第2のフェーズである高密度波長多重時代に入り, 波長単位の信号が多重分離されるに至って初めて, 光信号を電気信号に変換することなくそのまま編集する光スイッチの適用検討が本格化した. 1990年代には分岐挿入フィルターの適用による光アド・ドロップ・マルチプレクサー (OADM: optical

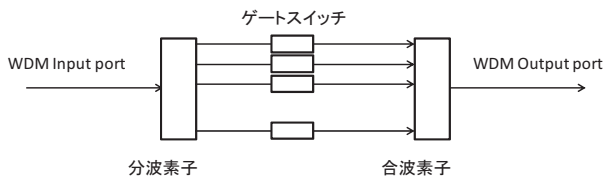


図4 波長ブロッカー。

add/drop multiplexer) が登場した。

さらに、波長多重信号を波長ごとに選択動作させて分岐挿入させる光スイッチが研究開発された結果、ROADMは波長信号の分岐挿入状態を電子的に管理可能となり、光パスの開通時に遠隔から自動で設定を行う能力を具備するようになった。このようなROADMはROADM (reconfigurable OADM) とよばれる (図2)⁵⁾。

ROADMを実現する光スイッチデバイスとして、当初は図3に示すようなスイッチ素子・分散素子・モニター素子の集積性に優れたPLC (planar lightwave circuit) 技術によるROADMスイッチ⁶⁻⁸⁾が開発され、世に広く普及した。

その後、空間光学系技術の確立と液晶技術の成熟にもとづき、波長多重信号を空間光学系で波長多重分離し各波長ごとに通過・遮断する波長ブロッカーが開発された⁹⁾。波長ブロッカーとは図4に示すように、多ポート入出力の合分波素子としてバルク部品の回折格子、波長選択的にゲートスイッチ動作を行うMEMS、液晶などの空間変調素子、これらを空間的に結合するレンズ系を空間的に共有することで、波長ブロッカーを構成している。波長ブロッカーは、波長フィルター特性に関してはPLC ROADMSwitchをしのぐ急峻な特性をもっており、40~100 Gbit/sの信号をスイッチング処理する能力をもっている。

これらROADMノードは、インターネット高速化が世界に先駆けいち早く進んだ日本において、地域のIPトラフィックを収容するリングネットワークにて適用され、現在のNGN (next generation network) を支えるインフラとして稼働中である¹⁰⁾。

そのスイッチ構成からわかるように、ROADMノードは隣接する2つのROADMノードを波長多重信号伝送により接続するとともに、自らのノードでは波長単位の編集を行い、ある波長は通過させ、ある波長は分岐挿入するという動作を行う。すなわちROADMノードは、線形に接続されたネットワーク、もしくはリング状に接続されたネットワークを構築可能な方路数2のノードである。

これに対し、メッシュ状のネットワークポロジを考えた場合、そのネットワークの構成に合わせて3以上の方路数が必要となる。このような多方路スイッチアーキテクチャーのさきがけは、分配合流型光スイッチアーキテクチャーである¹¹⁾。

図5右上は分配合流型スイッチの論理アーキテクチャーを示した図である。左側より入力される波長数 m に分波された光は、下側の n 個出力方路のうち特定の方路に向けて1×2光スイッチでスイッチされ、光カップラー (OC) で合流されることにより、多方路スイッチ動作が可能となる。

本スイッチ方式の入出力を入れ替えることで、多方路ノードを実現した構成が、パラレル-λスイッチ¹²⁾のスイッチアーキテクチャーである。本方式においては、ノードに入力した各方路からの波長多重信号は、ブロードキャストされたのち、波長選択スイッチの入力に集約される。

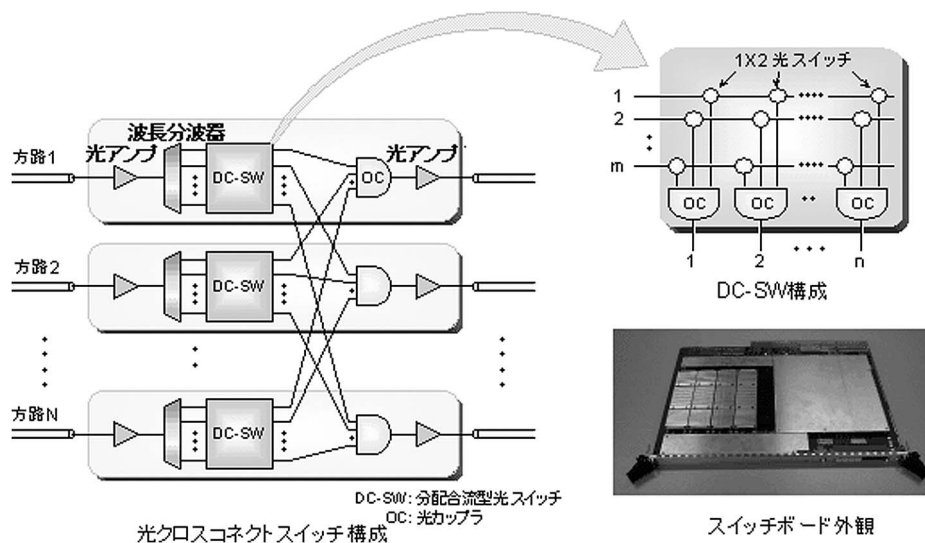


図5 分配合流型光スイッチ。

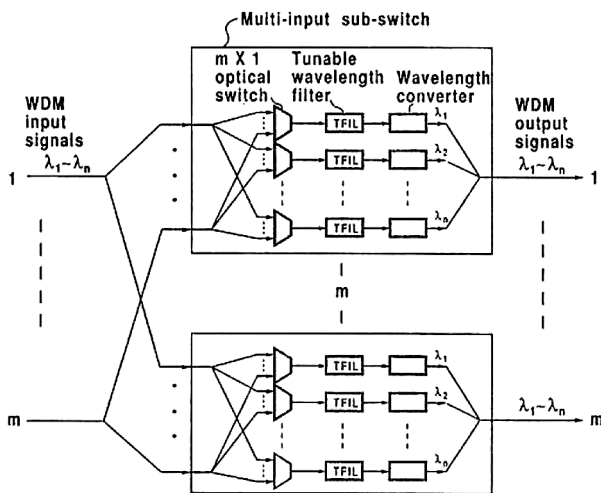


図6 パラレルλ-スイッチ (文献12より引用).

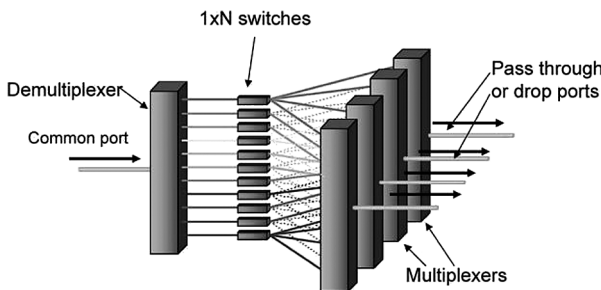


図7 波長選択スイッチの基本構成 (文献13より引用).

波長選択スイッチにおいて各方路の波長多重光は波長分波されたのち、波長ごとに入力方路を選択した後で再度合波され、波長多重信号として出力される (図6). その動作原理により、今日ではこの形態を「ブロードキャスト&セレクト型スイッチアーキテクチャ」と称するほうが一般的である.

このような波長選択スイッチは、空間光学系デバイスとして巧妙に実現されている¹³⁾. すなわち図7に示すように、多ポート入出力の合分波素子としてバルクの回折格

子、波長選択動作を行うMEMS、液晶、LCOSなどの空間変調素子、これらを空間的に結合するレンズ系を空間的に共有することで波長選択スイッチを構成している.

これらの多方路スイッチは、東西南北に面的な広がりをもつ北アメリカの光ネットワークで利用され始め、爾後世界的に普及しつづけている¹⁴⁾.

2. ROADM/WXC ノードシステムの高機能化

これまで概観してきた光ネットワークノードでの方路および add/drop 設定に加え、レイヤー2 以上の上位ネットワークとの連携を視野に入れた高機能化が精力的に検討されている. その機能とは、Colorless 機能、Directionless 機能、Contentionless 機能である. これらは現状の光スイッチのもつハードウェア的な制限を解消することにより、より自由自在な光ネットワーク運用を可能とする機能といえる. これら3つの機能を集成的に CDC 機能と呼んだり、これらを具備した ROADM/WXC ネットワークノードを、その頭文字をとって CDC-ROADM と呼ぶ.

CDC-ROADM の3つの機能は、光ネットワークへの入出力点における波長および方路設定の自由度を向上する機能である. Colorless 機能とは、光ネットワークへの入出力点において、光波長パスが利用する波長を光スイッチにより自在に割り当て可能とする機能である. また Directionless 機能とは、通常の ROADM ノードにおいては add/drop ポートごとに固定されている入出力方路を、光スイッチを具備することにより自由に設定可能とする機能である. Contentionless 機能とは、Colorless/Directionless 機能を具備した光のノードにおいて、別方路に割り当てられる同一波長の光パスが光ノード内で衝突せずに設定可能とする光スイッチの能力のことである.

文献15においては、WSSを用いた Colorless-Directed/

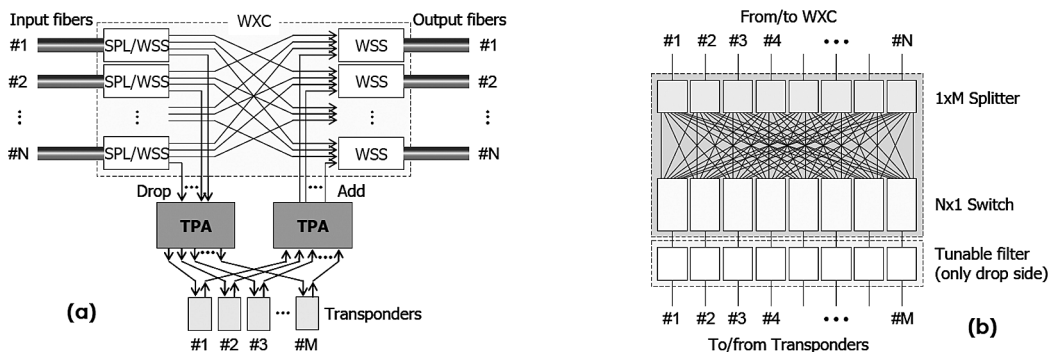


図8 CDC-ROADM を実現するトランスポンダーアグリゲーター (TPA). (a) CDC-ROADM ノードのスイッチ構成, (b) TPA を実現するマルチキャストスイッチの構成.

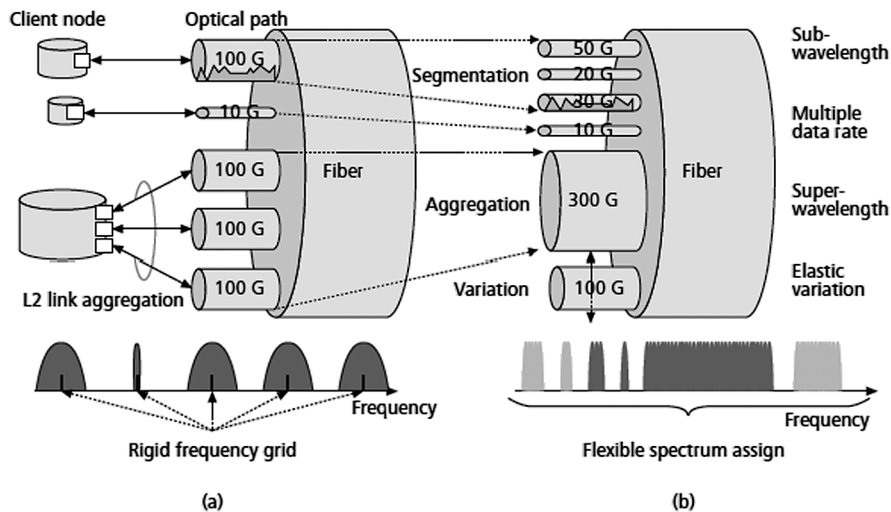


図9 エラスティックネットワーク技術の概要。(a)は従来の波長多重用周波数グリッド上のスペクトル割当方法、(b)はエラスティックネットワーク用フレキシブルなスペクトル割当方法。(b)は周波数利用効率が高いことがみとれる。(文献19より引用)

Directionless ROADM のデモンストレーションを行うとともに、これらのノード方式における contention 確率を評価している。また文献16においては、CDC 機能を実現する PLC ベースのトランスポンダーアグリゲーター (TPA) (図8) が報告されている。

これら CDC スイッチの現時点の光パスハンドリング能力は、1スイッチモジュールあたり16波長程度であり、多方路 WXC ノードの光波長パス量 ($N \times M =$ 数百, $N =$ 方路数, $M =$ 波長数) 規模に比べまだまだ小さい。また、これらを並列に並べて取り扱い波長数を増やすには、光分岐数を増やすことによる損失増加とファイバー接続数の増加が顕著になるため、実装規模がきわめて大きくなる。大規模な CDC 機能の実現に向けては、低損失な TPA の実現とスマートな光インタコネクションが課題である。ECOC 2012 ではシリコン導波路技術で作成した小型 TPA の報告¹⁷⁾ があり (本特集号の中村氏の解説にて詳述)、この分野の今後の進展が注目される。

並行して検討が進展している技術として、エラスティックネットワーク技術がある。この技術は従来固定的であった WDM の周波数間隔の制限を緩和し、より細かい単位での光周波数資源の割り当てを行うことにより、WDM ネットワークの効率を向上しようとする取り組みである¹⁸⁾。図9はその概念を示したもので¹⁹⁾、従来の固定的なグリッドに対して種々の信号を収容する際には収容効率上無駄が発生するが、フレキシブルにスペクトルアサインすることにより、収容効率を向上できることが示されている。

エラスティックネットワークは、現在の WDM の標準的な光周波数グリッドである 50 GHz 間隔の一定間隔の光周

波数帯域割当を用いるのではなく、より細かい単位である 6.25 GHz のスロットとよばれる波長資源を自由に複数連結して、収容する伝送信号ごとに最適な周波数帯域割り当てを行う。この方式の狙いは、WDM ネットワークの収容効率のさらなる向上と、現在の一波長あたりの最大伝送速度である 100 Gbit/s を凌駕する 400 Gbit/s もしくはそれ以上の伝送速度の実現である。エラスティックネットワークを実現する光スイッチの詳細については本特集号の桜井氏の解説に譲り、ここではその概要を述べるにとどめる。エラスティックネットワークを構成する光スイッチには、従来の光周波数 50 GHz Grid よりもより細かい波長粒度での光スイッチング能力が求められる。そのため、WSS のスイッチングに用いられてきた MEMS 方式には、本方式の適用は困難である。それゆえに、現在ではプロジェクター用途として開発されたピクセル化された MEMS ミラーアレイである DMD (digital micromirror device) や、同じくプロジェクター用途に開発された LCoS (liquid crystal on silicon) を用いた WSS などが、本方式の実験的検討に供されている。

本方式の実現に向けた課題は、フレックスグリッドネットワーク内を伝送する光伝送変復調方式と帯域通過特性設計、これらの伝送品質を保証するに必要十分な光周波数精度 / 光パワー精度をもつ光モニター系の設計、そしてこれらを実現したフレックスグリッドネットワークの収容効率性能のコストパフォーマンスであり、これらについての研究開発が活発にすすめられている。

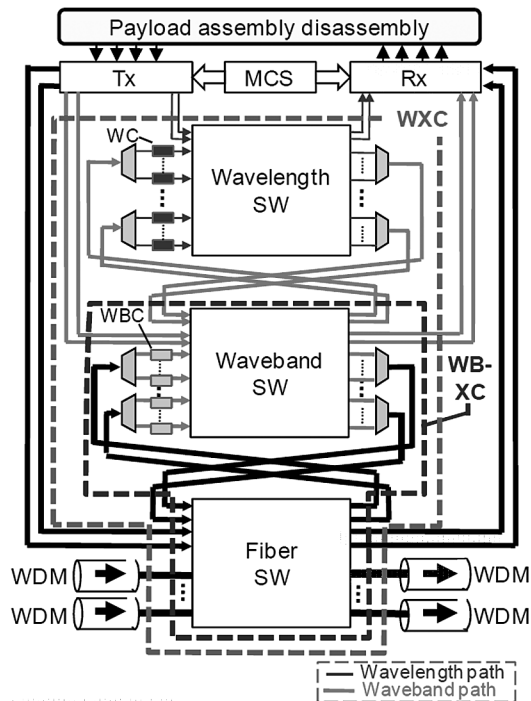


図 10 階層型クロスコネクットの例 (文献 20 より引用). WC: wavelength converter, WBC: waveband converter, MCS: multi-carrier source, WXC: wavelength cross-connect; WBXC: waveband cross-connect.

3. 多階層クロスコネクット

これまで述べてきた技術は、波長多重ネットワーク内の波長スイッチを波長単位にスイッチングする光スイッチにより構成する技術に関するものであった。そのため、指数関数的に増加するトラフィック需要増に応じて光ファイバーで伝送する波長数を増やすと、光パス (波長) のあて先を制御する光スイッチの接点数は、光ノードシステムでハンドリングする全波長数の 2 乗に比例して増加する。つまり、波長多重ネットワーク内で波長単位のみでのスイッチアーキテクチャーをとることは、スケーラビリティの点で課題がある。

このような背景のもと、スケーラブルなスイッチアーキテクチャーとして階層型クロスコネクットスイッチが検討されている (詳細は本号掲載長谷川・佐藤両氏の解説を参照)。図 10 は、波長スイッチ、波長群スイッチおよびファイバースイッチの 3 階層にわたる光スイッチを組み合わせた階層型クロスコネクットスイッチの例である。

このスイッチアーキテクチャーにおいては、他のノードから来た信号はまずファイバースイッチ部に入力する。波長よりも細かい粒度でのスイッチング処理が必要であれば、そのファイバー内の信号はファイバースイッチにより波長群スイッチに、必要なければそのまま他ノードへ接続

されるファイバーへとスイッチングされる。さらに波長群スイッチに入力された信号も同様に、波長単位でのスイッチング処理が必要であれば波長スイッチに、不要であればファイバースイッチに接続される波長群出力にスイッチングされる。このような処理を行うことで、より多重されたレイヤーでのスイッチが可能となり、結果として大容量の光ノードシステムをより少ないスイッチ数で実現することが可能となる。

これらの多階層スイッチを構成するスイッチとしては、上記で紹介した波長スイッチ、波長群スイッチ、ファイバースイッチに加え、波長単位のバーストスイッチとの組み合わせ²⁰⁾や、エラスティック光パスとの組み合わせにより最大 6000 倍の粒度の違うパスを収容する階層型ネットワーク²¹⁾の検討等がなされている。多方、光ファイバー自身の伝送容量制限を克服するための技術検討²²⁾と合わせて、マルチコアファイバーのファイバーコア間スイッチも検討の余地がある。そのため階層型クロスコネクットスイッチにおいては、各スイッチレイヤーごとの特徴を生かした光スイッチの構成法、スイッチレイヤー間の連携制御、階層型スイッチアーキテクチャー全体の構成法と性能設計などが今後の課題である。

4. 光パケット型高速スイッチ

これまで述べてきた光スイッチは回線交換型のスイッチである。すなわち、一定時間以上の長期にわたって、通信する二者間の通信資源を回線として排他的に確保して、その品質を保証するものである。これに対して、電子スイッチを用いたルーター・スイッチのように光信号をパケットとして転送することで統計多重効果を高め、合わせて低消費電力化を図ろうという検討もなされている。その前提となる光スイッチ処理は広帯域性、プロトコル無依存性に優れる一方で、オーバーヘッド信号などの論理処理やバッファ処理などの実現が現状では困難である。そのため電子スイッチのルーター・スイッチと同様の交換アーキテクチャーをとれないため、さまざまな工夫が提案されている。

この分野の交換方式は、信号継続時間がマイクロ秒オーダーの光バースト交換方式と、ナノ秒オーダーの光パケット交換方式に大別される。光バースト交換方式は電気的処理と光信号処理のハイブリッド方式であり、ヘッダーを電気処理、ペイロードを光で転送する方式である。継続時間が長い光バースト信号であるため、光パケット交換に比べて帯域利用効率は小さいが、光デバイスとの親和性は高い。

光パケット交換方式はパケット単位の伝送であり、ヘッダー処理、バッファ処理などを光デバイスの性能に依存

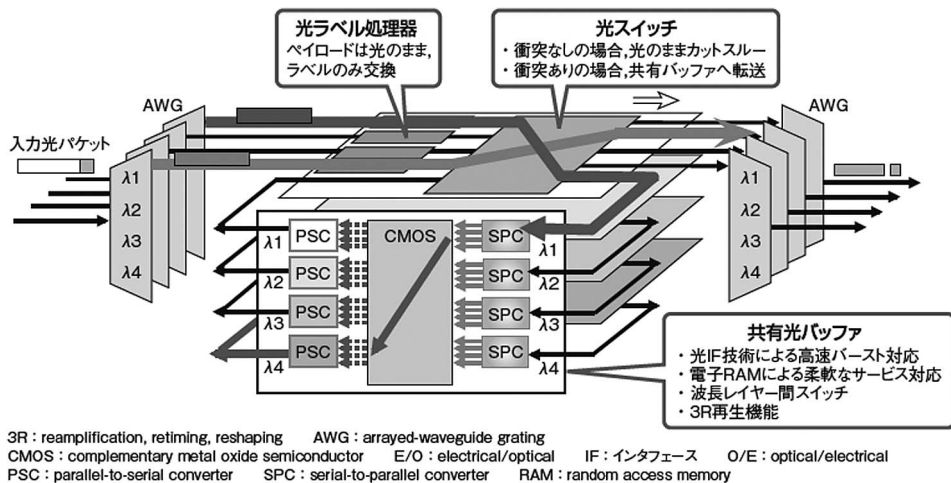


図 11 光電子融合型光パケットルーター。

するため、光デバイスへの要求レベルはきわめて高いものになる。

この高い要求に応えるには、デジタル光デバイス / 高速光スイッチと、それを要素デバイスとして用いるアーキテクチャーが必要となる。高速光スイッチについては、本特集の別稿(種村・中野両氏)に譲り、ここでは後者のアーキテクチャーのひとつである光電子融合型光パケットルーター²³⁾について概観する。

光電子融合型光パケットルーターの構成を図11に示す。この構成では、まず入力光パケットはAWGで波長ごとに分波される。分波された光は光ラベル処理器に入力し、ペイロードを光のまま通過させるとともに、OEICデバイスによって光ラベルだけを高速に処理する。続く光スイッチでは、10ナノ秒以下での高速スイッチングを実現することによりバッファレスで光パケット交換処理を行うため、パケット衝突がない場合、400ナノ秒以下というきわめて小さな遅延時間で転送可能である。パケット衝突がある場合、光スイッチにより共有バッファに転送し、衝突がないタイミングで再度次のノードに転送する仕組みである。これに対し、既存の電気ルーターでは数十マイクロ秒以上もの遅延が発生しており、このように高速かつ低消費電力な光技術と高機能な電気技術を融合することにより、従来の電気ルーターに比べ、消費電力の削減、遅延の低下、装置の小型化が可能となる。

5. 光スイッチの今後の課題

第4章までにみてきたように、光ネットワークにおける光スイッチの適用は歴史が浅く、かつデジタル処理に不得手なこともあり、適用形態は現時点できわめて限定的である。他方、これまでの延長線上での電子デバイスでのス

イッチ処理に大きく依存したネットワーク構築のみでは、ネットワークを流れるトラフィック増加に伴う消費電力の増加に対してスケラブルに対応することが困難になるであろう。この問題を解決する有力な手段として、光スイッチによる光ネットワークの革新に対する期待がある。

ROADM/WXCノードの高機能化に関する光スイッチデバイスの課題は、スイッチの小型化とトランスパアレンシーの向上である。実際に、CDC-ROADM/WXCを構成する際には多数のスイッチと多数のインターコネクションが発生するため、現在市中にあるWSSやTPAスイッチでの構成は、将来の大トラフィックを支えるにはまだまだ改良・改善の余地がある。また、エラスティックネットワーク技術に関しては、光スイッチの光周波数通過帯域特性の設計や光周波数精度の向上などが課題である。エラスティックネットワーク上に分散配置された光ノード間で共通の波長の物差しをもつことで、より高い周波数利用効率を高めることがそのねらいである。階層型クロスコネクタについても同様に、インターコネクションを含めたスイッチの小型化が課題である。加えて、波長多重された信号を一括でスイッチ処理することを併せ考えると、各スイッチ素子が処理する光信号パワーと波長帯域は2桁程度の上昇となるため、スイッチ素子のハイパワー耐性の向上や、広い光周波数帯域にわたる各種光学的特性の均一性もまた課題となるであろう。光パケットスイッチについては長きにわたり光信号のデジタル処理が大きな課題であるが、それだけにこの課題に対するブレイクスルーが大いに期待される場所である。

これらの光スイッチの課題の解決は、全世界的にボーダーレスに情報の行きかう人間社会を支える通信技術の発展を支え続けるであろう。持続可能な地球文明の発展を支

えるためにも、光ネットワーク技術の発展と、それを支える光スイッチ技術の進展が今こそ求められている。

文 献

- 1) M. Hilbert and P. López: "The world's technological capacity to store, communicate, and compute information," *Science*, **332** (2011) 60–65.
- 2) K. C. Kao and G. A. Hockham: "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, **113** (1966) 1151–1158.
- 3) H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshihara and T. Morioka: "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Paper Th.3.C.1 (2012).
- 4) 中島 隆, 松岡伸治, 高橋哲夫: "通信事業の新常識, 光ネットワークの最新技術 12—光コア・ネットワークの発展史", *日経コミュニケーション*, 542号 (2009) 78–79.
- 5) 中島 隆, 松岡伸治, 佐原明夫: "通信事業の新常識, 光ネットワークの最新技術 16—コア網を自在に操る「ROADM」", *日経コミュニケーション*, 546号 (2009) 66–67.
- 6) T. Watanabe: "Silica-based PLC optical switches designed and fabricated for OADM and OXC," *Proc. of 9th Optoelectronics and Communications Conference/3rd Conference on Optical Internet (OECC/COIN)*, Paper 13F2-3 (2004).
- 7) 郷 隆司, 金子明正: "平面光波回路 (PLC) 技術を用いた ROADM スイッチ", *電子情報通信学会総合大会講演論文集 2007 年エレクトロニクス (1)*, BCS-1-2 (2007) S-13–S-14.
- 8) 中島 隆, 松岡伸治, 高橋 浩, 松浦 徹: "通信事業の新常識, 光ネットワークの最新技術 20—基幹ノードを支える光スイッチ", *日経コミュニケーション*, 550号 (2009) 68–69.
- 9) J. S. Patel and Y Silberberg: "Liquid crystal and grating-based multiple-wavelength cross-connect switch," *Photon. Technol. Lett.*, **7** (1995) 514–516.
- 10) 笠原英樹, 錦戸 淳, 織田一弘, 大西邦宏, 梶山義夫: "次世代ネットワークを支えるネットワーク基盤技術", *NTT 技術ジャーナル*, 4月号 (2007) 38–43.
- 11) M. Koga, A. Watanabe, T. Kawai, K. Sato and Y. Ohmori: "Large-capacity optical path cross-connect system for WDM photonic transport network," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **16** (1998) 1260–1269.
- 12) M. Nishio and S. Suzuki: "Photonic wavelength-division switching network using parallel λ -switch," *Photonic Switching II: Proceedings of the International Topical Meeting*, eds. K. Tada and H. S. Hinton (Springer, Berlin, 1990) pp. 286–290.
- 13) W. J. Tomlinson: "Evolution of passive optical component technologies for fiber-optic communication systems," *J. Lightwave Technol.*, **26** (2008) 1046–1063.
- 14) E. B. Basch, R. Egorov, S. Gringeri and S. Elby: "Architectural tradeoffs for reconfigurable dense wavelength-division multiplexing systems," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **12** (2006) 615–622.
- 15) A. Sahara, Y. Tsukishima, T. Takahashi, Y. Okubo, K. Yamada, K. Matsuda and A. Takada: "Demonstration of colorless and directed/directionless ROADMs in router network," *National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, Paper NMD2 (2009).
- 16) T. Watanabe, K. Suzuki and T. Takahashi: "Silica-based PLC transponder aggregators for colorless, directionless, and contentionless ROADM," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper OTh3D.1 (2012).
- 17) T. Hino, H. Takeshita, M. Sakauchi, K. Ishii, J. Kurumida, S. Namiki, S. Takahashi, S. Nakamura and A. Tajima: "Silicon photonics based transponder aggregator for next generation ROADM systems," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECCO)*, Paper Tu.3. A.5 (2012).
- 18) M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka and A. Hirano: "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, **48** (2010) 138–145.
- 19) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone and S. Matsuoka: "Spectrum efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Commun. Mag.*, **47** (2009) 66–73.
- 20) K. Yonenaga, F. Inuzuka, Y. Sun, Y. Aoki, K. Sone, A. Sano, K. Mori, T. Ono, Y. Kai, S. Yoshida, G. Nakagawa, Y. Sakai, Y. Takada and S. Kinoshita: "Demonstration of 10-Tbit/s multi-granularity optical cross-connect node toward 100-Tbit/s scalability," *National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, PDPC-4 (2009).
- 21) N. Amaya, M. Irfan, G. Zervas, R. Nejabati, D. Simeonidou, J. Sakaguchi, W. Klaus, B. J. Puttnam, T. Miyazawa, Y. Awaji, N. Wada and I. Henning: "First fully-elastic multi-granular network with space/frequency/time switching using multi-core fibres and programmable optical nodes," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECCO)*, Paper Th.3.D.3 (2012).
- 22) 盛岡敏夫: "エクサビット伝送に向けた光ファイバー技術", *光学*, **40** (2011) 258–263, ほか同号特集論文.
- 23) R. Takahashi, T. Nakahara, K. Takahata, H. Takenouchi, T. Yasui, N. Kondo and H. Suzuki: "Ultrafast optoelectronic packet processing for asynchronous, optical-packet-switched networks," *J. Opt. Netw.*, **3** (2004) 914–930.

(2013年1月10日受理)