

# 階層化光クロスコネクトノードのアーキテクチャー

長谷川 浩・佐藤 健一

## Hierarchical Optical Cross-Connect Node Architecture

Hiroshi HASEGAWA and Ken-ichi SATO

Hierarchical optical path networks introducing waveband paths, bundles of wavelength paths, have been investigated to realize bandwidth abundant optical networks cost-effectively. In this paper we provide an overview of the technology development first. Then we explain hierarchical optical cross-connect node architectures and necessary devices for waveband routing.

**Key words:** hierarchical optical path network, hierarchical optical cross-connect, waveband, switch scale reduction

インターネットの浸透とブロードバンド環境 (ADSL/FTTH 等) の普及により, 2000 年頃からネットワーク上の通信量は急激に増加しており<sup>1)</sup>, 今後もネットワーク上の映像配信が大きく伸びることが予想されるなど<sup>2)</sup>, より大容量のネットワークを実現していく必要がある. しかし, その一方ではバックボーンネットワーク等で用いられる大型 L3 ルーターの性能向上が通信量の伸びに比べて小さいこと, また今後これらの装置が消費する電力が急増し, アクセス系まで含めたネットワークの総消費電力の中で大きな割合を占めること<sup>3)</sup> から, 光ファイバー中の波長多重信号を, 波長をラベルとして電気信号に変換することなくルーティングするフォトニックネットワークの研究が進められ, そのノード装置である ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer) の導入が進められている.

1 波長あたりの通信速度は 10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps と向上しているが, 現在の通信量の増加に対処するためにはインターフェースの速度を高めるだけでなく, より密な周波数グリッドを採用して波長間隔を狭める, あるいは使用ファイバーを増やすことで通信に使用する波長数 (波長パス数) を増やすことが必要になる. しかし, 波長数の増加は, 光クロスコネクトノードにおける光スイッチの大型化につながり, 装置全体の高コスト化に直結する. そこで, 複数の波長をグループ化して, グループ単位でルーティン

グを行う提案がなされた<sup>4)</sup>. このような波長のグループは波長群 (waveband) とよばれる<sup>5)</sup> (図 1). 電話網や SDH (synchronous digital hierarchy), OTN (optical transport network)<sup>6)</sup> をはじめとした規格において, 低位パスを大容量の高位パスに収容して効率的なルーティングを可能にするというパスの階層構造が以前より用いられており, 波長群の導入はその技術の延長とみることができ. しかし, フォトニックネットワークにおいては波長という物理パラメーターがパスに割り当てられており, 波長が属することができる波長群は一意に決定され, 任意に選ぶことができない. また, 複数の同一波長信号・波長群信号は 1 つの光ファイバーの中で共存できない制約があるため, 想定される通信需要に応じ, ネットワークの各ノード間に指定された数の波長パスと, それを伝送する波長群パスを設立して, 使用する光ファイバーやノード装置等のネットワーク資源量を最小化する問題は, NP (non-deterministic polynomial) 完全に属するきわめて困難な問題となる<sup>7)</sup>. そこで, この最適化問題に対して準最適解を与え, 階層化光パスネットワークの有効性を検証するさまざまな試みがなされている<sup>8-10)</sup>. 一例を挙げれば, 9×9 の正方格子状ネットワークにおいて, 波長群を導入しない従来型のネットワークに比べ, 同一の通信需要を収容するために必要なノードのハード規模が半減するという結果が得られている<sup>10)</sup>. す

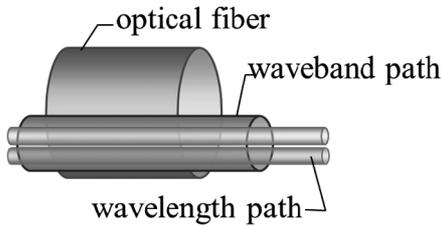


図1 波長・波長群・光ファイバーの階層構造.

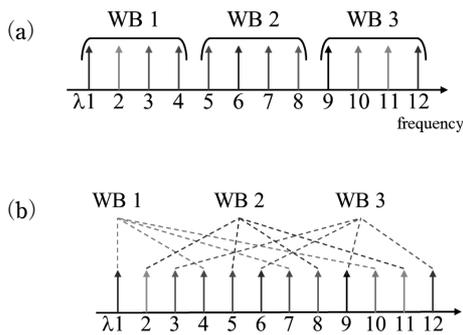


図2 波長群のタイプ. (a) 連続配置波長群, (b) 分散配置波長群.

なわち、波長という物理パラメータの制約が加わったフォトニックネットワークにおいても、適切なルーティング手法を用いることで、パス階層化による効率化を達成可能となることが示されてきた。

一方で、波長群を導入した階層化光パスネットワークを実現するためには、光ファイバー中の波長多重信号を波長群単位に合分波するデバイスの開発が必要であり、S. Chandrasekhar らは arrayed waveguide grating (AWG) を2つ接続しバンドパスフィルターの機能をもたせた波長群合分波器のアーキテクチャの提案と、プロトタイプを試作を報告している<sup>11)</sup>。このデバイスは2つのAWG間を複数の配線で結び、これらの経路での透過特性を重ね合わせることで所望の特性を得ており、配線間の光路長を適正值とするための製造上の困難がある。これに対しわれわれは、同様にAWGを用いながらも、WDM信号が利用するITU-Tグリッド上の周波数に適合した周波数特性をもたせた上で、各配線間の透過特性を互いに独立なものとし、シンプルかつ製造上有利なモノリシック波長群合分波器等を開発してきた<sup>12)</sup>。また、階層化光パスネットワークノードシステムのプロトタイプを製作し、敷設ファイバーを用いたの伝送実験を行った<sup>13)</sup>。本稿では、これら階層化光パスネットワークで利用する各種ハードウェアに関する検討結果を中心に報告する。

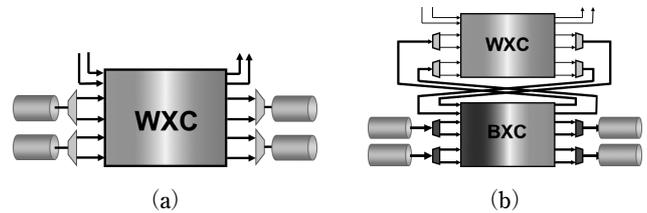


図3 従来型および階層型光クロスコネクタ. (a) 一階層光パスネットワーク用光クロスコネクタ, (b) 階層型光クロスコネクタ.

## 1. 階層化光パスネットワーク

階層化光パスネットワークでは、光ファイバー中の波長多重信号をいくつかのグループに分割し、各々のグループを「波長群」(waveband)として定義する。波長群の構成にはおもに、連続配置型と分散配置型の2種類が利用される(図2)。波長群を単位とするパスを「波長群パス」(waveband path)とよび、波長を単位としてクライアント信号を収容する「波長パス」(wavelength path)を収容する。各波長パスは、それと始点・終点が同一となる波長群パスに収容されるか、あるいは連続した複数の波長群パスに収容される。連続する波長群パスの境界ノードで実行される波長群パス間の波長パスの入れ替え処理を grooming 処理とよぶ。

波長パスを用いる従来型ネットワーク(以降では「一階層光パスネットワーク」とよぶ)のクロスコネクタを図3(a)に、波長群パスを導入した光パスネットワークの階層型クロスコネクタの概念図を図3(b)に示す。階層型光クロスコネクタは、波長群パスのルーティングを行う波長群クロスコネクタ(waveband cross-connect; BXC)と、波長パスのルーティングを行う波長クロスコネクタ(wavelength cross-connect; WXC)の、2種のクロスコネクタがスタックされ、相互に接続された構造を有している。階層化光クロスコネクタでは、入力ファイバー中の波長信号をまず波長群単位に分割し、可能な限り波長群パス単位でのルーティングを行う。収容している波長パスが別々のリンクへ送出される場合や、波長パスが終端する(drop)、あるいは新たに波長パスを波長群パスに加える(add)場合には、一端波長群パスを終端し、波長単位に分解した上で波長クロスコネクタにおいて grooming/add/drop 処理を行う(図4)。

クロスコネクタ装置の規模は多くの場合ルーティングされる光パス数で決まるため、階層型光クロスコネクタにおける波長群クロスコネクタの規模は、一階層型クロスコネクタの規模に比べ、格段に小さい。しかし、波長群パス内のすべての光パスが波長クロスコネクタの処理を必要とす

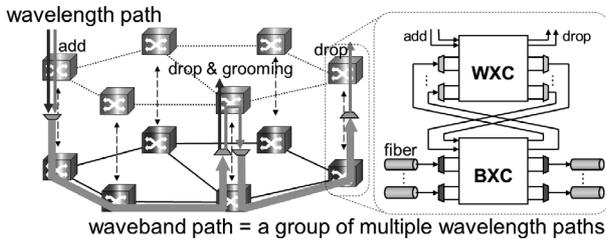


図4 複数波長群パスにまたがる波長パスと境界ノードでのGrooming処理。

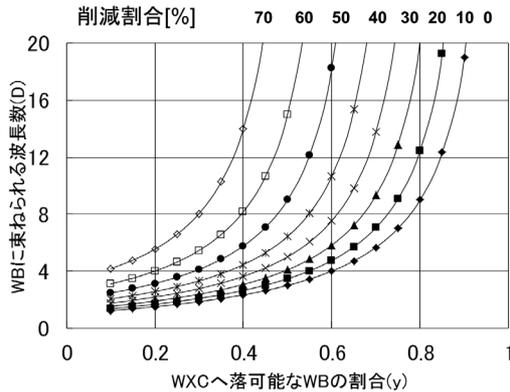


図5 波長クロスコネクต์へのadd/drop率とクロスコネクต์規模削減率の関係<sup>17)</sup>。

る場合には、一階層型光クロスコネクต์と波長クロスコネクต์の機能は本質的に同一となり、階層型クロスコネクต์は一階層型光クロスコネクต์に比べて規模が大きくなる。そこで、入出力される波長群パスのうち、波長クロスコネクต์で処理する割合を、ルーティング能力を損なわない範囲で適切な閾値以下に制限することで、クロスコネクต์の規模を抑制することが可能である。図5では、図3(b)のクロスコネクต์のスイッチ規模を、実現に必要となる $2 \times 2$ の単位スイッチ数(クロスポイント数、各マトリクススイッチの入出力数の積に等しい)で評価し、その削減率と、波長群パスあたりの波長パス数および波長クロスコネクต์で処理する波長群パスの比率との関係を示している。波長クロスコネクต์で処理する割合を小さく抑えることと、波長群パスあたりの波長パス数ある程度大きく取ることが有効であることがわかる。

すなわち、極力波長群パスを波長パスに分解せずにルーティングできるように、波長群パスの配置と波長パスの収容をネットワーク全体で最適化することがきわめて重要である。これを実現する設計手法の開発が、波長群を処理するデバイスの開発、それをを用いたノード全体の効率的な構成と同様に重要である。本稿ではパス収容アルゴリズムについては誌面の都合上割愛するが、詳細については文献<sup>4,14)</sup>等をご覧いただきたい。

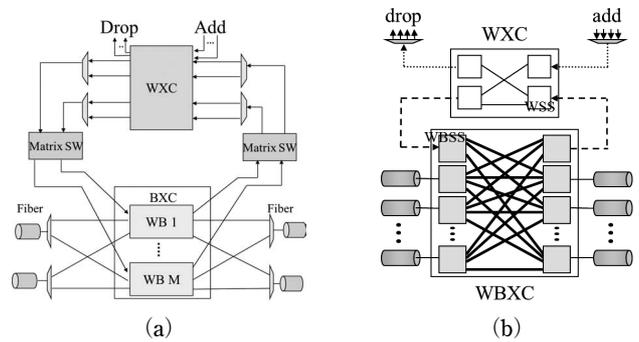


図6 階層化光クロスコネクต์の実現例。(a)マトリクススイッチによる構成<sup>17)</sup>、(b)選択スイッチによる構成<sup>18)</sup>。

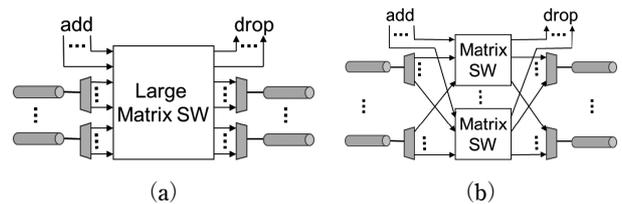


図7 一階層光クロスコネクต์のマトリクススイッチによる実現例。(a)単一の大型スイッチによる構成、(b)複数の小型スイッチによる構成。

## 2. 階層化光クロスコネクต์ノードアーキテクチャー

### 2.1 コンパクトな階層化光クロスコネクต์ノードの実現

階層型光クロスコネクต์の各クロスコネクต์部の実現方法として、合分波器とマトリクススイッチを組み合わせたものと、波長選択スイッチ(wavelength selective switch: WSS)と波長群選択スイッチ(waveband selective switch: WBSS)<sup>15)</sup>の2種類の選択スイッチを組み合わせたものが検討されている(図6参照)。

ここで、一階層光クロスコネクต์を例に取り、必要な機能ごとにスイッチを分割することが、クロスコネクต์全体でのスイッチ規模の削減に役立つことを説明する。以降では第1章と同様、マトリクススイッチの規模を、実現に必要となる $2 \times 2$ の単位スイッチ数として、入力ポート数と出力ポート数の積で評価する。図7に一階層光クロスコネクต์の2種類の実現法を示す。図7(a)ではクロスコネクต์が単一のマトリクススイッチで構成され、図7(b)では波長ごとに1つの小型マトリクススイッチが使用されている。例えば1ファイバーあたり40波、各6本の入出力ファイバーを仮定すれば、add/drop部分を除外したとしても図7(a)では $240 \times 240$ スイッチが必要だが、図7(b)では40個の $6 \times 6$ スイッチですみ、スイッチ規模は後者が前者の40分の1となる。この例でも明らかのように、スイッチを極力機能ごとに分割することでスイッチ規模を小さく抑えることができる。

以上の議論を踏まえて、波長クロスコネクต์、波長群ク

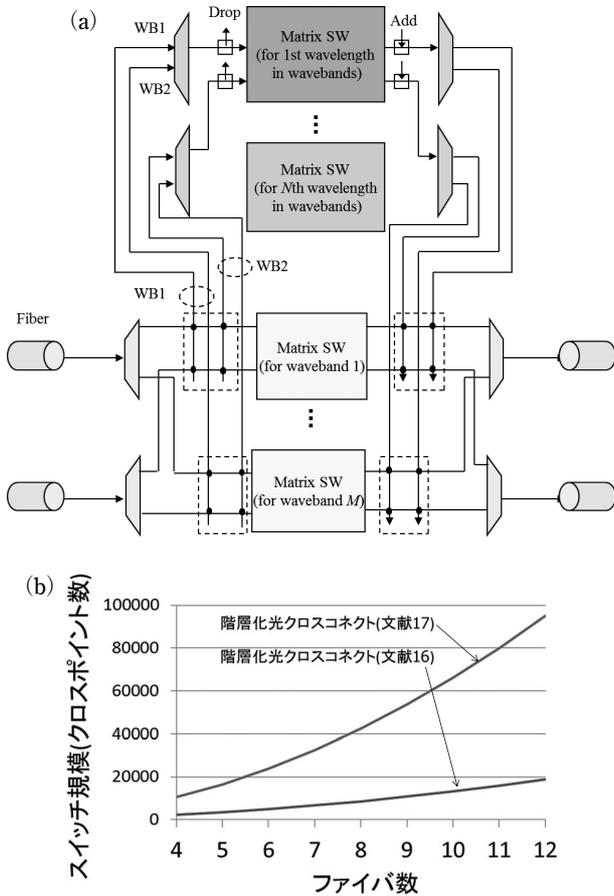


図8 カラーレス波長合分波器を用いた階層化光クロスコネクタノードの構成およびスイッチ規模<sup>16)</sup>。(a) ノードアーキテクチャー, (b) スイッチ規模比較。

ロスコネクタおよび add/drop 部分をそれぞれ独立させた, 階層化光クロスコネクタノードのアーキテクチャー (図8 (a)) が提案されている<sup>16)</sup>。階層化光クロスコネクタの波長群クロスコネクタは一階層と同様な方針で小型マトリクススイッチに分割可能である。しかし, 階層化光クロスコネクタの波長クロスコネクタでは, 一階層光クロスコネクタと違い, 入力される波長群パスの波長群番号は変化する。そこで波長群に依存せず, 波長群内の波長の順に 1, 2, 3, ... 番ポートへ出力する合分波器を用いることで, 波長クロスコネクタを小型のマトリクススイッチに分割することに成功している。波長群クロスコネクタのみを小型のマトリクススイッチに分割していた従来型 (図6 (a))<sup>17)</sup> に比べ, ファイバー数が12本のときに約5分の1にまでスイッチ規模を削減している (図8 (b))。

図6 (b) に示した選択スイッチによる階層化光クロスコネクタノードにおいても, コンパクト化の試みがなされている。詳細については文献<sup>18)</sup> をご覧いただきたい。

## 2.2 波長群合分波器・カラーレス波長合分波器

階層化光パスネットワークを実現するためには, 入力

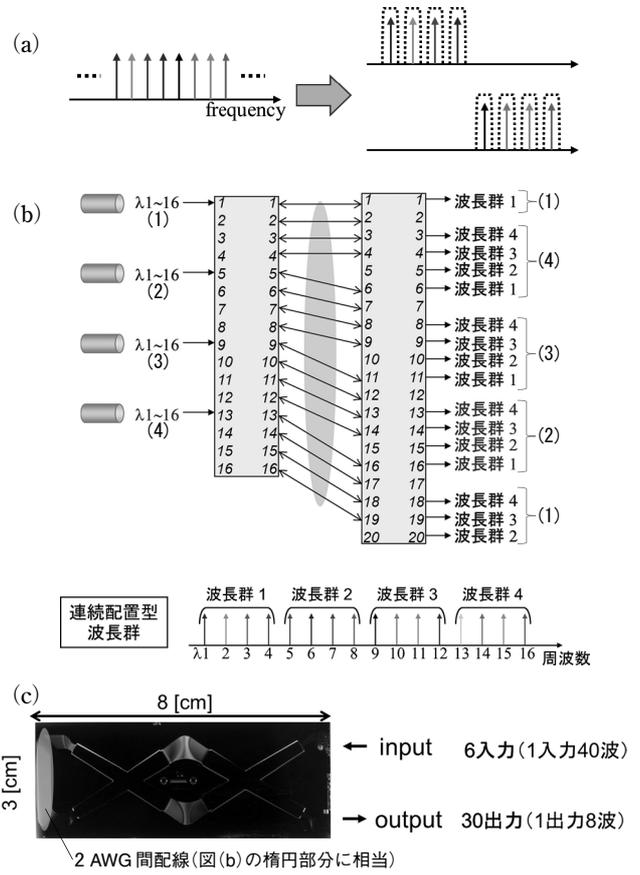


図9 連続波長群合分波器<sup>12)</sup>。(a) グリッド上の信号のみを透過する連続波長群の分波, (b) 2つのサイクリックAWGの接続による連続波長群合分波器の実現例, (c) 6入力30出力連続波長群合分波器のモノリシック実現 (40波/ファイバー, 8波長/群)。

ファイバー中の波長多重信号を波長群パスごとに分波・合波することが必要になる。本稿では, 連続波長群および分散波長群の各々について, AWGを用いた実現法を紹介する。前述のように, S. Chandrasekhar らにより, 2つのAWGを縦続接続した連続波長群合分波器が提案されている<sup>11)</sup>。この合分波器では, 1段目のAWGの入力と2段目のAWGの出力間を, 複数の経路で光信号が伝搬し, 各経路での透過特性を多数重ね合わせることで, 所望の波長群全体をカバーする矩形の透過特性を得ている。しかし, この複数の経路における光路長を揃えることが製造上の課題となる。一方, 波長群に含まれるITU-Tグリッド上の周波数を所望の出力ポートに出力すれば合分波機能として十分であることに着目した, 別の合分波器も提案されている<sup>12)</sup> (図9 (a))。この分波器は同様に2つのAWGから構成されるが, 2つのAWG間の配線の各々はグリッド上の各周波数に個別に対応しており, 2番目のAWGの入力ポートを波長群ごとにグループ化することで, 所望の機能を実現している (図9 (b))。各グリッド波長は単一のAWG間の配

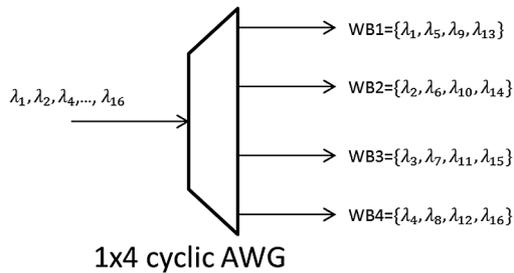


図10 サイクリック AWG による分散波長群合成分波器の例.

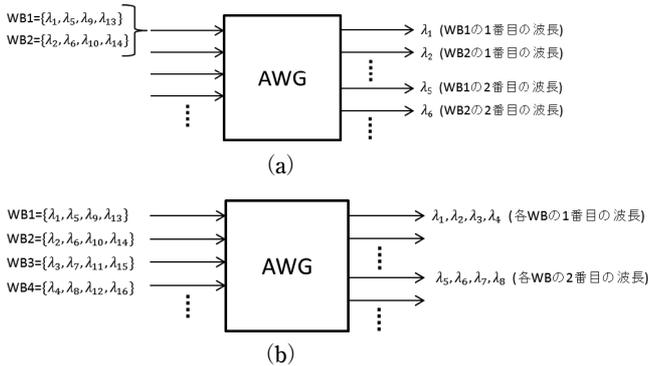


図11 波長群番号に依存しない波長合成分波の実現. (a) 同一ポートに波長群信号を入力した場合, (b) カラーレス波長合成分波器.

線にのみ依存することから、前述の連続波長合成分波器と違い光路長を揃える必要がない。また、2番目のAWGの入力には、各波長群に対応するAWG間の配線が接続される部分と空きポートとが交互に配置されており、この規則的な構造を利用して、複数の合成分波器を1対のAWG上に実現可能である(図9(c))。

一方、分散波長群については、FSR (free spectral range) が、波長パスが使用するITU-Tグリッドの周波数間隔に波長群数を乗じた値に等しくなるサイクリックAWGを用いることで実現可能である(図10)。

波長クロスコネクにはさまざまな波長群が入力されるが、図8(a)で用いている、波長群番号に依存しない処理を行うための「カラーレス」な波長合成分波器も、AWGを用いて実現できる。図2(b)の分散配置波長群に対応する波長合成分波器の実現例を図11に示す。未使用の入出力ポートを利用して、複数の合成分波器を1チップに集積することが可能である。試作したモジュールの写真を図12に示す。このモジュールでは、40波/ファイバーのWDM信号を、8波/波長群、5波長群/ファイバーとして扱い、5入力8出力のカラーレス合成分波器を2台、40×40サイクリックAWG内に実装している。すなわち入力側10ポート、出力側16ポートであり、図11(b)に示すようにポー



図12 10入力16出力カラーレス波長群合成分波器モジュール.

トごとに入力される光信号の波長が限定されていることから、これらの使用波長に特化したAWGの最適化を行うことで特性を向上させている。

選択スイッチによる階層化光クロスコネクノードでは、波長群選択スイッチの実現が必要である。波長群単位でのスイッチングは、スイッチ数の削減と配線数の削減によるモノリシック化を実現可能とし、空間光学系により実現されている波長選択スイッチと比べコンパクトであり、可動部分が不要になることによる信頼性の向上も期待できる。これまでに1×5の波長群選択スイッチをモノリシックに実現し(図13(a),(c))、それを集積した5×5のコンパクトな波長群クロスコネクが試作された(図13(b),(d))。波長群選択スイッチによる出力信号の例(WB1を選択して出力)を図13(e)に示す。各種の性能評価の詳細については文献<sup>18)</sup>を参照されたい。

### 3. 階層化光クロスコネクノードプロトタイプ

前章で解説したマトリクススイッチを用いた階層化光クロスコネクに関する研究成果を踏まえて、階層化光クロスコネクシステムのプロトタイプを開発し、NTT横須賀研究開発センター-NTT東日本局舎間に敷設された17.6kmのDSFファイバー上で伝送実験を実施した<sup>13)</sup>。図14(a)にプロトタイプスイッチの構成図を示す。各AWGを搭載したボードは、19インチラックのバックパネルに搭載された光バックプレーンを経由して、相互に接続されている。図14(b)はノード4台を模したプロトタイプの全景と、伝送実験の結果の一例である。2ノード通過後のパワーペナルティーは0.4dB以下であり(ペナルティーの主要因はDSFを用いたことによる非線形歪み)、また波長群・波長の各スイッチを適宜切り替えることにより階層化光パスのルーティングが適切に実現されていることを確認した。

なお、本プロトタイプでは、マトリクススイッチをベースとするノードアーキテクチャーとデバイスに関する研究成果に基づくものであり、その後実現された波長群選択スイッチ等を用いた伝送実験も行われ、シングルモードファ

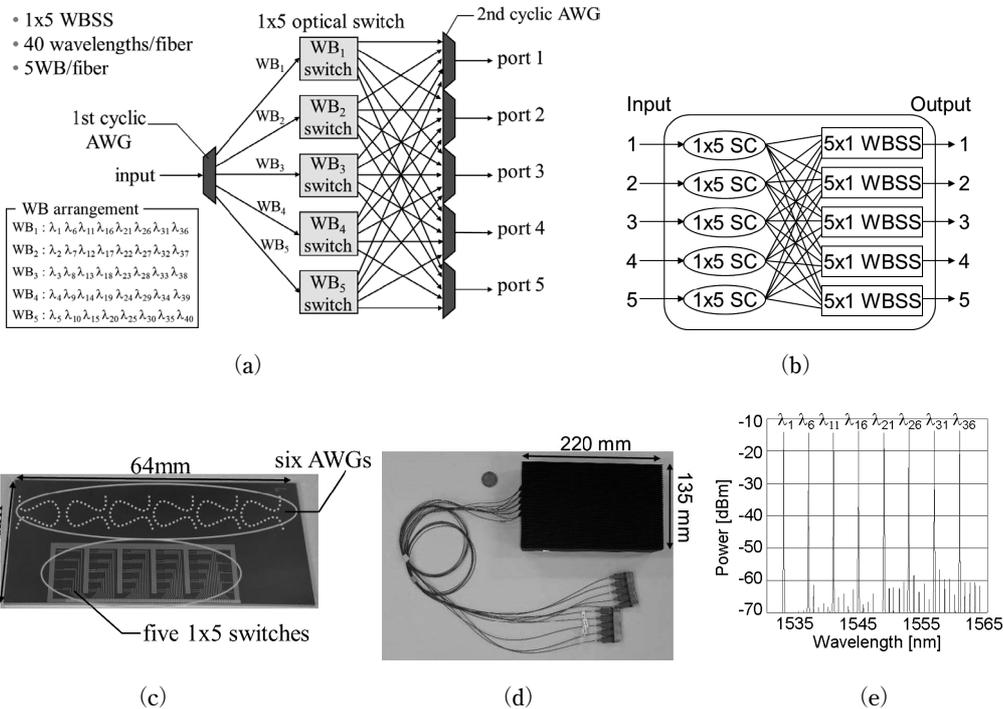


図13 波長群選択スイッチおよび波長群クロスコネクタ. (a) 1x5 波長群選択スイッチの基本構成, (b) 選択スイッチを用いた5x5 波長群クロスコネクタの構成, (c) 1x5 波長群選択スイッチのモノリシック実現, (d) 5x5 波長群クロスコネクタスイッチモジュール, (e) 波長群選択スイッチによる出力信号の例 (WB1 を選択して出力).

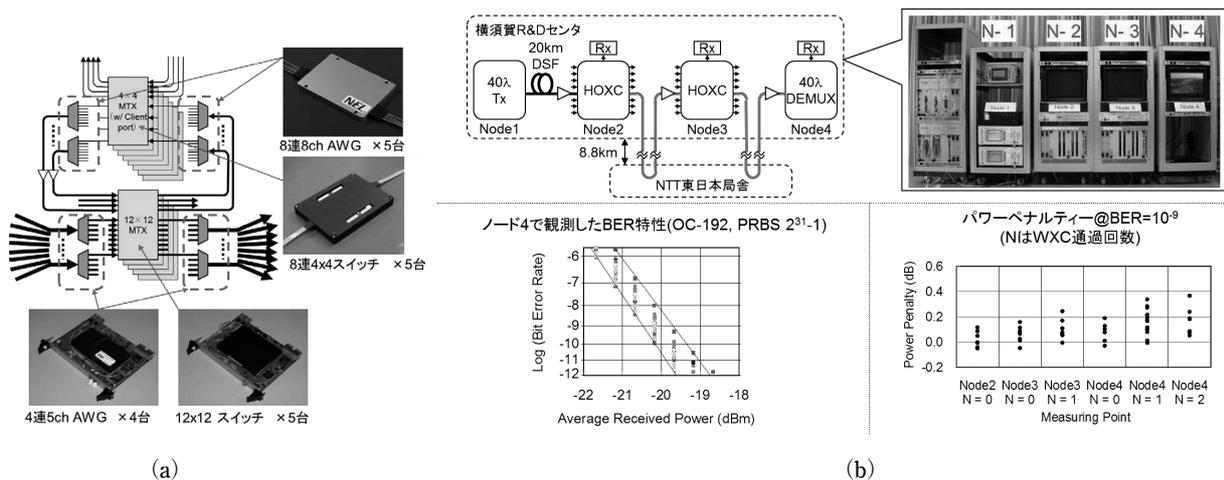


図14 階層化光クロスコネクタノードプロトタイプ. (a) プロトタイプスイッチの構成, (b) プロトタイプ4台を用いた伝送実験.

イパーでノード経由数を5~10とした場合にも良好な伝送特性が実証されている<sup>17)</sup>.

本稿では波長群パスを導入した階層化光パスネットワークについて紹介し, 波長群単位でのルーティングを実現するデバイスと, それを用いた階層化光クロスコネクタノードのアーキテクチャに関する各種の研究結果を報告した.

現在, 波長群単位でのマルチキャストによる point to

multipoint サービスの効率的な配信<sup>19)</sup> や, 波長群パスを離れた2点間を接続する仮想ファイバーとして扱い, 内部の波長パスを再構成可能な専用線として提供するサービス<sup>20)</sup> に関する検討がなされ, 今後想定されるさまざまなサービスを効率よく実現するための技術検討が行われている. また, 波長単位での処理を行う波長クロスコネクタは扱う波長も多く複雑であり, 大規模化が困難であることから, トラフィックが増加した場合には, 波長群単位でのルーティングと波長単位での add/drop 処理を組み合わせ

せ、波長クロスコネクタを不要としてハードウェアをさらに大きく削減した *grouped routing optical network*<sup>21)</sup> が提案されるなど、各種のアーキテクチャが提案され、研究が進められている。

本研究は JST CREST および科学研究費 (23246072) の支援を受けた。また、本研究の実施においては、高橋浩氏をはじめとする NTT フォトニクス研究所の皆様、大森保治氏・奥野将之氏をはじめとする NTT エレクトロニクスの皆様の多大な支援を受けた。厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Japan Internet Exchange: <http://www.jpix.ad.jp/en/technical/traffic.html>
- 2) Cisco VNI: [http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns827/networking\\_solutions\\_sub\\_solution.html](http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns827/networking_solutions_sub_solution.html)
- 3) C. Lange, D. Kosiankowski, C. Gerlach, F.-J. Westphal and A. Gladisch: "Energy consumption of telecommunication networks," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Paper 5.5.3 (2009).
- 4) K. Harada, K. Shimizu, T. Kudou and T. Ozeki: "Hierarchical optical path cross-connect systems for large scale WDM networks," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper WM55 (1999) pp. 356-358.
- 5) K. Sato and H. Hasegawa: "Optical networking technologies that will create future bandwidth-abundant networks," *J. Opt. Commun. Netw.*, **1** (2009) A81-A93.
- 6) ITU-T Recommendation G.709/Y.1331: *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)* (2009).
- 7) I. Chlamtac, A. Ganz and G. Karmi: "Lightpath communications: An approach to high-bandwidth optical WAN's," *IEEE Trans. Commun.*, **40** (1992) 1171-1182.
- 8) X. Cao, V. Anand, Y. Xiong and C. Qiao: "A study of waveband switching with multilayer multigranular optical cross-connects," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **21** (2003) 1081-1094.
- 9) P. Torab, V. Hutcheon, D. Walters and A. Battou: "Waveband switching efficiency in WDM networks: Analysis and case study," *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTuG3 (2006).
- 10) I. Yagyu, H. Hasegawa and K. Sato: "An efficient hierarchical optical path network design algorithm based on traffic demand expression in a cartesian produce space," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **26** (2008) 22-31.
- 11) S. Chandrasekhar, C. R. Doerr and L. L. Buhl: "Flexible waveband optical networking without guard bands using novel 8-skip-0 banding filters," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17** (2005) 579-581.
- 12) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, S. Kamei, Y. Jinnouchi and M. Okuno: "Performance of waveband MUX/DEMUX using concatenated AWGs," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 1197-1199.
- 13) O. Moriwaki, K. Noguchi, H. Takahashi, T. Sakamoto, K. Sato, H. Hasegawa, M. Okuno and Y. Ohmori: "Terabit-scale compact hierarchical optical cross-connect system employing PLC devices and optical backplane," *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper PDPC9 (2010).
- 14) H. Hasegawa and K. Sato: "Design of bandwidth abundant photonic networks that utilize flexible/multi-granular optical path routing," *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)* (2012) pp. 26-27.
- 15) K. Ishii, S. Mitsui, H. Hasegawa, K. Sato, S. Kamei, M. Okuno and H. Takahashi: "Development of hierarchical optical path cross-connect systems employing wavelength/waveband selective switches," *J. Opt. Commun. Netw.*, **3** (2011) 559-567.
- 16) R. Hirako, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato and O. Moriwaki: "Compact matrix-switch-based hierarchical optical path cross-connect with colorless waveband add/drop ratio restriction," *IEICE Trans. Commun.*, **E94-B** (2011) 918-927.
- 17) S. Kakehashi, H. Hasegawa and K. Sato: "Optical cross-connect switch architectures for hierarchical optical path networks," *IEICE Trans. Commun.*, **E91-B** (2008) 3174-3184.
- 18) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno and H. Takahashi: "Ultracompact waveband cross-connect module using waveband selective switches: Development and performance verification," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **22** (2010) 1741-1743.
- 19) L. Guo, X. Wang, J. Cao, W. Hou and L. Pang: "Multicast grooming algorithm in waveband switching optical networks," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **28** (2010) 2856-2864.
- 20) F. Naruse, Y. Yamada, H. Hasegawa and K. Sato: "Virtual fiber networking and impact of optical path grooming on creating efficient layer one services," *IEICE Trans. on Commun.*, **E95-B** (2012) 723-729.
- 21) Y. Taniguchi, Y. Yamada, H. Hasegawa and K. Sato: "A novel optical networking scheme utilizing coarse granular optical routing and fine granular add/drop," *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper JW2A.2 (2012).

(2013年1月7日受理)