

# オーバレイ型光パスネットワークにおける波長変換器配置に関する検討

福島 行信<sup>†</sup> 原井 洋明<sup>††</sup> 荒川 伸一<sup>†††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 情報通信研究機構 〒 184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 豊中市待兼山町 1-7

E-mail: †{y-fukusm,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††harai@nict.go.jp, †††arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし 本稿では、オーバレイ型光パスネットワークにおけるキャリアネットワークでの波長変換器配置を検討する。まずシミュレーションにより、キャリアネットワークではアクセスリンク–コアリンク間での多重化波長数の差異を埋めるためにエッジノードで多数の波長変換器が必要となり、エッジノードに配置される波長変換器の数を抑えることがキャリアネットワーク全体での波長変換器コスト低減に繋がることを示す。次に、エッジノードにおける波長変換器コストを抑えるために、比較的安価な固定波長変換器を用いたエッジノード構成法を提案する。提案手法では、各アクセスリンクからの入力波長を固定波長変換によりコアリンク上の異なる波長へと変換する。シミュレーションの結果、提案手法により波長変換器コストが従来手法を用いた場合と比較して46%以上低減されることがわかった。キーワード WDM、オーバレイモデル、光パスネットワーク、波長変換、固定波長変換

## Deployment of Wavelength Converters in Wavelength–Routed Overlay Networks

Yukinobu FUKUSHIMA<sup>†</sup>, Hiroaki HARAI<sup>††</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> National Institute of Information and Communications Technology

<sup>†††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University

E-mail: †{y-fukusm,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††harai@nict.go.jp, †††arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Wavelength converters reduce connection blocking probability in wavelength–routed networks by eliminating the *wavelength continuity constraint*. We develop a method for deployment of wavelength converters in wavelength–routed overlay networks. In these networks, most wavelength converters are deployed on edge nodes to cover the difference in the numbers of wavelengths multiplexed on access and core links. Therefore reduction of wavelength converter cost on edge nodes leads to minimizing the wavelength converter cost in the whole network. We propose an ingress edge node architecture with fixed wavelength converters that are more economical than full wavelength converters. In our architecture, each input access link of ingress edge nodes is equipped with fixed wavelength converters and input wavelengths from the access links are evenly distributed on the output core link. As a result, competition for a free wavelength on an output core link is avoided. Simulation results show that our edge node architecture offers more than 46% cost reduction.

**Key words** WDM, overlay model, lightpath network, wavelength conversion, fixed wavelength conversion

### 1. はじめに

光パスネットワークでは、光パス設定に送受信ノード間の経路上の各リンクで同一の波長を用いる(波長連続性制約)。そのため、たとえリンク上に空き波長が存在しても波長が異なるために光パス設定要求が棄却される状況(波長資源の断片化)が起こる。その結果、光パスネットワークでは従来の回線交換型ネットワークと比較して回線設定要求の棄却率が大きくなる傾向がある。

棄却性能を改善する方法として、波長変換がある。波長変換

器を光パス経路上の中継ノードに配置し、波長資源が断片化した場合には波長変換器を用いて空き波長を変換する。こうして波長連続性制約を満たさない空き波長を光パスへ割り当てることが可能となり、棄却性能が向上する。

一方、波長変換器は高価である。目的とする棄却性能を達成するために要する波長変換器を最小限にすることが望ましい。そのため、一部のノードのみに波長変換器を配置することで全ノードに波長変換器を配置した場合に近い棄却性能を実現しつつ、配置される波長変換器のコストを大幅に削減するような波長変換器配置問題に関する研究がなされてきた[1-3]。例え

ば文献 [3] によると、一部のノードの一部のポートのみに、全ポート数の 1-5% に相当する波長変換器を配置 (Sparse-Partial Wavelength Conversion) することで、全ノードの全ポートに波長変換器を配置した場合に近い棄却性能が実現できる。

本稿では、オーバレイ型光パスネットワーク (図 1) における波長変換器配置を検討する。アクセスリンクとコアリンクの境界に位置するエッジノードからエッジノードまでのネットワークをキャリアネットワークと呼び、キャリアはそのネットワークのみを管理する。一方、エンドホストのインターフェースはユーザが用意する。そこではユーザはコストを抑えるため、小さな波長多重数のインターフェースを用意する。一方、キャリアもコスト低減のため、用いる光ファイバ数を抑え、複数ユーザからのトラフィック収容の大群化効果を期待して、波長多重数を大きくする。その結果、アクセスリンクとキャリアネットワークの波長数は大幅に異なる。本稿では、この問題解決を図る波長変換器配置を検討する。一方で、従来の研究 [1-3] では、多重数が違うという前提は考えられていない。

本稿では、まずシミュレーションにより、エッジノードに必要な波長変換器数が、コアノードに必要な波長変換器数よりもはるかに大きいことを示す。次に、キャリアネットワークの波長変換器コストを抑えるために、任意の入力波長を任意の出力波長に変換可能な波長変換器 (Full WC: Full-range Wavelength Converter) よりも比較的安価であり特定の入力波長を特定の波長のみに変換可能な固定波長変換器 (Fixed WC: Fixed Wavelength Converter) を用いたエッジノード構成法を提案する。提案手法では、各アクセスリンクからの入力波長を、Fixed WC を用いたコアリンク上の異なる波長へ分散させる。単に波長を分散させることが目的の場合に Full WC を用いないことで、エッジノードに配置される Full WC の数を抑える。キャリアネットワーク全体での必要波長変換器数は、本稿に述べるエッジノード構成法によりエッジノードの必要波長変換器数を算出し、従来研究の手法によりコアノードの必要波長変換器数を算出すると求まる。

2 章では、オーバレイ型光パスネットワークを説明した後に、エッジノードで多数の Full WC が必要なことを示す。3 章では、Full WC と Fixed WC のコストを議論した後に、Fixed WC を用いたエッジノード構成法を提案する。Full WC のみを用いたエッジノード構成法と提案手法をシミュレーションにより比較評価し、提案手法によりエッジノードの波長変換器コストが抑えられることを示す。最後に、本稿のまとめを 4 章で述べる。

## 2. オーバレイ型光パスネットワークにおける波長変換器配置

### 2.1 オーバレイ型光パスネットワーク

キャリアネットワークとエンドホスト間の主な接続形態として、オーバレイモデルとピアモデルがある [4]。前者ではキャリアネットワーク-エンドホスト間で経路情報や資源情報を交換せず、後者は交換する。セキュリティ上の観点からキャリアネットワーク内の情報を広告するのは好ましくないため、本稿ではキャリアネットワークとエンドホストの接続形態はオーバレイモデルとする。

オーバレイ型光パスネットワークでは、複数のエンドホストがアクセスリンクを介してキャリアネットワークに接続される。各エンドホストは他のエンドホストとの間に帯域が保証された

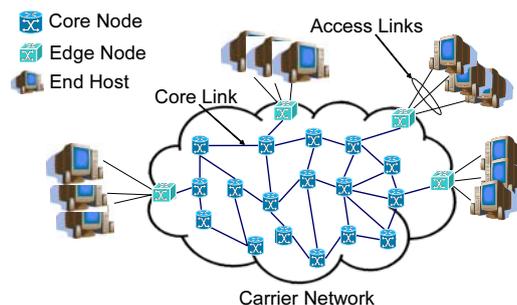


図 1 オーバレイ型光パスネットワーク

光パスを設定し通信する。エンドホストには、例えばグリッドコンピューティング [5] を行う計算機を想定する。一方、キャリアネットワークはノードと光ファイバで構成される。アクセスリンクが接続されるノードをエッジノード、他のノードをコアノードと呼ぶ。実装の容易性を考慮し、ノードの作業分担を明確にするために、エッジノードは一つのコアノードのみに接続されコアリンク間での光パスの中継はしない。アクセスリンクの波長多重数は数波程度、コアリンクの波長多重数は数十から数百波であると想定する。

### 2.2 ノード構成

図 2(a)、2(b) に、エッジノードおよびコアノードのノード構成を示す。エッジノードとコアノードはともに、分波器 (DEMUX)、合波器 (MUX)、光スイッチ (OXC)、および、Full WC で構成される。ノードへの入力信号は分波器により各波長へと分波される。分波された各波長は光スイッチにより適切にスイッチングされ、合波器により多重化され、ファイバへ出力される。もし出力ファイバ上で入力波長と同じ波長が空いていなければ、Full WC へとスイッチングされ出力ファイバ上の空き波長へ変換される。

Full WC を備えたノード構成としては、図 2 に示すように trunk-type [6] を想定する。この場合、全入力ポートで Full WC を共有し、波長変換が必要な入力ポートのみが Full WC を備えた出力ポートへとスイッチングされるため、必要となる Full WC の数が削減される。

### 2.3 エッジとコアの波長変換器最適配分比率

オーバレイ型光パスネットワークではエッジノードの必要波長変換器数がコアノードの必要波長変換器数より大きくなることを検証する。そのために、キャリアネットワーク全体で配置可能な Full WC 数が与えられたときに、光パス設定要求の棄却率を最小化するようなエッジノードとコアノードへの Full WC 配分比率をシミュレーションにより求める。ネットワークモデルには、14 ノード NSFNET (図 3) を用いる。図中の黒丸で示したコアノードそれぞれに 1 つのエッジノードが接続され、各エッジノードにはアクセスリンク数に等しい数のエンドホストが接続される。シミュレーションにおけるパラメータは以下の通りであり、その値を表 1 に示す。

$L_a$ : 一つのエッジノードに接続されるアクセスリンク数。

$W_a$ : アクセスリンク上の波長多重数。

$W_c$ : コアリンク上の波長多重数。

$\lambda_a$ : エンドホストへの光パス設定要求の到着率。ポアソン到着。

$\frac{1}{\mu}$ : 光パス保持時間の平均値。保持時間は指数分布に従う。

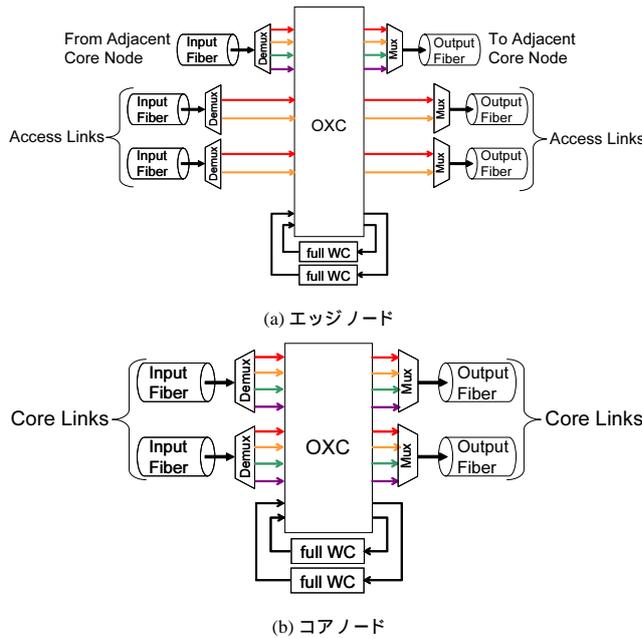


図2 ノード構成

表1 シミュレーションで用いたパラメータの値

$L_a$	$W_a$	$W_c$	$\lambda_a$	$\frac{1}{\mu}$	$\rho_c$
$\frac{\rho_c \mu W_c}{\lambda_a}$	8	{16, 32, 64, 128}	2	1	0.5

$\rho_c$ : エッジノードに接続された出力コアリンクの負荷。単位時間あたりにエッジノードへ到着した光パス設定要求と出力コアリンク上の波長数の比率を出力コアリンクの負荷と定義する。 $\rho_c = \frac{\lambda_a L_a}{\mu W_c}$ 。

エッジノードとコアノードへの Full WC 配分比率を変動させ、各配分比率において波長資源断片化による棄却率を求めた。配分比率に基づいてエッジノード集合およびコアノード集合に配分された Full WC は、各ノード集合内で均等に配分した。配置される Full WC の総数には、最適な配分比率においてエッジノードとコアノードのいずれでも波長資源断片化による棄却が発生しないような数を用いた。光パス設定要求は各エンドホストに率  $\lambda_a$  で到着する。光パスの目的エンドホストは一様分布に従って選択する。ただし、送信エンドホストが接続されたエッジノードと同じエッジノードに接続されているエンドホストは含まない。光パスの経路選択手法には最小ホップ選択手法を用いた。波長割当手法には、Modified First-Fit (MFF) [3] を変更して波長をランダムに選択する手法を用いた。具体的には、経路上でセグメント (波長連続性制約を満たす区間) を以下の順に設定し、各セグメントで空き波長の中からランダムに一波選択し、光パスに割り当てた。

(1) 始点エンドホストから終点エンドホストまでを一つのセグメントとする。

(2) 経路を始点エンドホスト-入力エッジノード、入力エッジノード-出力エッジノード、出力エッジノード-終点エンドホスト、の三つのセグメントに分割する。

(3) 経路上の各リンクをそれぞれ一つのセグメントとする。

隣接するセグメントのそれぞれで選択された波長が異なる場合は、セグメントの境界に位置するノードで波長変換した。リンクに空き波長がない、もしくは、Full WC が空いてなく隣接セグメント間で異なる波長を変換できない場合は、光パス設定要求は棄却される。

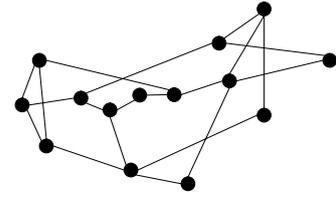


図3 NSFNET

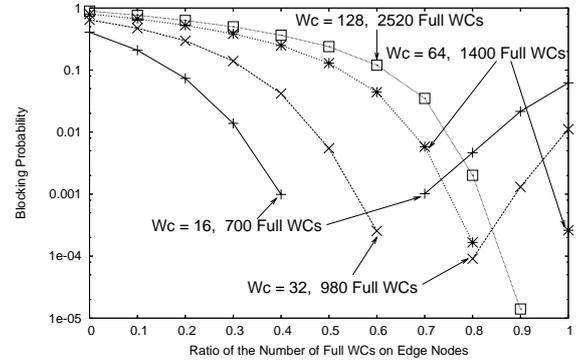


図4 エッジノードへの波長変換器配分比率を変えた場合の棄却率

図4に、エッジノードとコアノードへの Full WC 配分比率を変動させた場合の、波長資源断片化による光パス設定要求棄却率を示す。波長資源の不足による棄却は波長変換器では回避できないため、ここでは除外する。横軸はエッジノードへの Full WC 配分比率、縦軸は波長資源断片化に起因する光パス設定要求棄却率を表す。

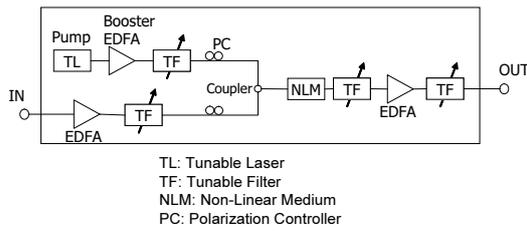
$W_c = 16$  のときは全 Full WC の 50% から 60% をエッジノードに配置した場合に波長資源断片化による棄却率が 0 となる。 $W_c$  が 32、64、128 のときの最適配分比率はそれぞれ 70%、90%、100% である。このように  $W_c$  が大きくなる、すなわち、アクセスリンクとコアリンクの波長多重数の差が大きくなると、エッジノードにより多くの Full WC を配置することで棄却性能が向上する。これは、キャリアネットワークでは波長資源の断片化が発生するのは主にアクセスリンク-コアリンク間であるためである。以上から、棄却性能を最適化するためにキャリアネットワーク全体で必要となる Full WC の大部分はエッジノードに配置されることがわかった。エッジノードで必要となる Full WC の数を減少させるとキャリアネットワーク全体で必要となる Full WC 数の減少に繋がる。以降ではそのためのエッジノード構成法を提案する。

### 3. 固定波長変換器を用いたエッジノード構成法とその評価

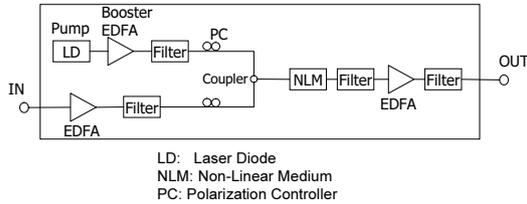
#### 3.1 波長変換器モデル

本稿で対象とする二つの波長変換器、Full WC と Fixed WC は、入力信号を光信号のまま波長変換可能な四光波混合 (FWM; Four-Wave Mixing) [7-9] による波長変換を想定する。

Full WC および Fixed WC の構成を図5に示す。Full WC、Fixed WC とともに波長変換器では、入力光は EDFA により増幅された後、+20dBm 程度またはそれ以上に増幅するブースタ EDFA により増幅された励起光と、偏波を調整した後合波される。それを非線形媒質 (NLM) に入力すると、入力信号の波長と励起光の波長のいずれでもない波長を得る。この出力光は、励起光を基準として入力光と位相共役関係にあり、波長軸上で励起光



(a) Full WC



(b) Fixed WC

図5 波長変換器

を中心とした対象配置となる。この波長のみをフィルタを用いて抽出し、増幅およびフィルタリングにより整形した光を変換波長として波長変換器から出力する。

Full WC では励起光の光源として波長可変レーザ (TL) を用いる。励起光波長を可変とすることで、出力波長を変更するためである。一方、Fixed WC では励起光として固定の一波長のみを出力するレーザダイオード (LD) を用いる。

Full WC と Fixed WC のコスト比は、波長可変レーザとレーザダイオードのコスト、および、その他の部品コストにより決まる。本稿では、将来的なコスト比見積りの根拠として、以下を参考にした [10]。

- 波長可変レーザと波長ロック付きレーザダイオードのコスト比は 10:1 程度。
- 波長可変レーザは現状で少なくとも 100 万円以上と高額で、将来的にも大幅なコストダウンは厳しい。
- 非線形媒質は現状は設計コストが大きく TL のコストと同程度であるが、量産できれば、コストは波長可変レーザに対して非常に小さくなる。
- EDFA はモジュール型でありかつ量産できれば、波長可変レーザの 3~4 割程度も望める。

一方、EDFA については、別に将来的に 1000 ドル程度という予測がある [11]。そこで、本稿では、励起光を増幅するブースタ EDFA のみ、[10] による値を用いる。他の EDFA、NLM、偏波コントローラ、波長可変フィルタのコストは合わせて、波長可変レーザコストとの比を 10:1 とする。

以上より、Full WC と Fixed WC のコスト比は 3:1 となる。さらに大きいコスト比も十分期待できる。たとえば、全光波長変換にこだわらず、O/E/O による波長変換であれば、コスト比はほぼ波長可変レーザとレーザダイオードの比 (10:1) と見られる。また、波長群一括波長変換技術 [12] を用いれば、連続する数波長 (例えばアクセスリンクの全波長) を光のまま一括して変換できる。

そこで、本稿では、Full WC と Fixed WC のコスト比が 3:1 から 10:1 になる状況で、Fixed WC を使用することで波長変換器コストを低減できるかどうかを検討する。

### 3.2 固定波長変換器を用いたエッジノード構成法

本稿では、エッジノードに接続された出力コアリンク上の各

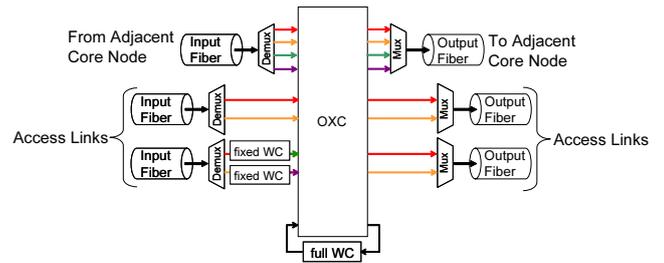


図6 固定波長変換器を用いたエッジノード構成

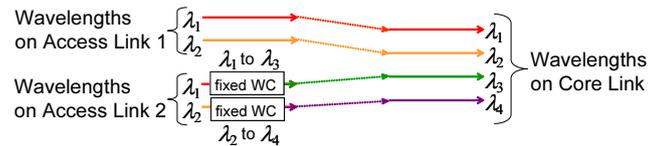


図7 固定波長変換によるアクセスリンク-コアリンク間での波長マッピングの例

波長の負荷が均等になるように Fixed WC を用いる。すなわち、コアリンク上の各波長に対して、各入力アクセスリンク上の波長が均等に割り当てられるように Fixed WC の入力/出力波長を決定する。その結果、コアリンク上の同一波長に対する波長予約の競合が発生しにくくなり、エッジノードで必要となる Full WC の数が低減される。

固定波長変換による入力アクセスリンク上の波長と出力コアリンク上の波長の対応は次のとおりである。 $k$  番目 ( $1 \leq k \leq L_a$ ) のアクセスリンク上の波長  $1, 2, \dots, W_a$  はそれぞれ Fixed WC によりコアリンク上の波長  $((k-1)W_a + 1) \bmod W_c, ((k-1)W_a + 2) \bmod W_c, \dots, kW_a \bmod W_c$  に変換される ( $\bmod$  は剰余演算)。なお、変換前と変換後の波長が同じ場合は、Fixed WC は不要である。Fixed WC を用いたエッジノード構成例を図 6 に示す ( $L_a = 2, W_a = 2, W_c = 4$ )。1 番目のアクセスリンク上の波長はコアリンク上で同じ波長が割り当てられるため Fixed WC は必要ない。一方、2 番目の入力アクセスリンクでは、エッジノードへの入力ポートに Fixed WC が配置され、Fixed WC により  $\lambda_1, \lambda_2$  がそれぞれ  $\lambda_3, \lambda_4$  へと変換される (図 7)。

固定波長変換は入力エッジノード (入力アクセスリンクが接続されるノード) のみで行われ、出力エッジノードでは行われない。これは、入力コアリンク上で光パスに割り当てられる波長と、出力エッジノードに配置された Fixed WC の入力波長が一致する可能性が小さいためである。すなわち、入力コアリンク-出力アクセスリンク間に Fixed WC を配置しても結局 Full WC による波長変換が必要となる可能性が大きい。よって Fixed WC の配置は入力アクセスリンク-エッジノード間のポートのみとする。

### 3.3 評価結果

エッジノードに (1) Full WC のみを配置する場合、(2) Full WC と Fixed WC を用いる場合、における必要 Full WC 数および波長変換器コストをシミュレーションにより比較する。

エッジノードの必要 Full WC 数および波長変換器コストのみに注目するため、図 8 に示すネットワーク (2 エッジノード、2 コアノード、3 コアリンク) をネットワークモデルに用いた。光パス設定要求は各送信エンドホストに率  $\lambda_a$  で到着する。光パスの目的エンドホストは、すべての中から一様分布に従って選

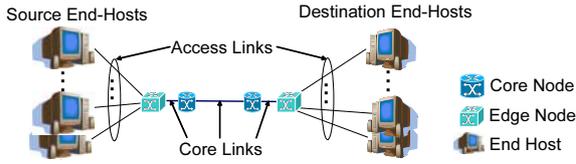


図8 ネットワークモデル

扱われる。波長割当手法には、2.3節と同様の手法を用いた。

以後、図8で送信エンドホストが接続されたエッジノードを入力エッジノードと呼び、入力エッジノードでの必要 Full WC 数および波長変換器コストを評価する。アクセスリンク上の波長多重数 ( $W_a$ ) は 8 波、コアリンク上の波長多重数 ( $W_c$ ) は 128 波、光パス保持時間の平均値 ( $\frac{1}{\mu}$ ) は 1 とした。なお、入力エッジノード以外のノードでは Full WC を制限なく使用可能であるとする。

入力エッジノードに十分な数の Full WC が配置されたかどうかの判断基準には、エッジノードからコアリンクへの全出力ポートに Full WC が配置された場合と同等の棄却性能を実現可能であることを用いる。このようにエッジノードに配置すべき Full WC の数を定量的に定めるために、式 (1) を満たす最小の  $X$  個の Full WC をエッジノードに配置する [13]。

$$\frac{P_B(X) - P_B(\infty)}{P_B(0) - P_B(\infty)} < \varepsilon \quad (1)$$

$P_B(0)$ 、 $P_B(\infty)$  はそれぞれエッジノードに Full WC が配置されていない場合、および、エッジノードからコアリンクへの全出力ポートに Full WC が配置された場合における棄却率を表す。 $P_B(X)$  は、入力エッジノードに  $X$  個の Full WC が配置された場合の棄却率を表す。本稿では、 $\varepsilon$  として 0.001 を用いる。このとき、 $X$  個の Full WC を配置したときの棄却性能と棄却率が最小になるときの  $P_B(\infty)$  との棄却性能差を  $\varepsilon$  より小さく抑えられる、すなわち、

$$P_B(X) < \varepsilon(P_B(0) - P_B(\infty)) + P_B(\infty) < \varepsilon + P_B(\infty)$$

となる。

### 3.3.1 波長変換器数

図9に式(1)を満たす最小の Full WC 数  $X$  を示す。 $x$  軸は入力エッジノードに接続されたアクセスリンク数である。図では、入力エッジノードに接続されたコアリンクの負荷 ( $\rho_c$ ) が 1 より小さい範囲を示している。Full WC のみを用いた場合、入力エッジノードで必要となる Full WC の数はアクセスリンク数に比例して大きくなる。これは、各アクセスリンクからの入力波長が競合しており、入力エッジノードで波長の競合を防ぐために Full WC が必要となるためである。なお、入力エッジノードに配置される Full WC の数は、入力エッジノードに接続されたコアリンクの波長多重数 ( $W_c$ ) 以下に抑えられる。

Fixed WC を用いる場合、アクセスリンク数が 16 以下の領域では Full WC は必要ない。これは、各アクセスリンク上の入力波長が出力コアリンク上の異なる波長へ固定波長変換され、出力コアリンク上で波長が競合しないためである。このような状況は、入力アクセスリンク上の波長数の和が、出力コアリンク上の波長数以下である場合 ( $L_a W_a \leq W_c$ ) に起こる。そのため、 $L_a W_a \leq W_c$  を満たす場合には、アクセスリンクが入力エッジノードに追加されても Full WC を追加配置する必要がなく、アクセスリンク追加時のコストを低く抑えられる。

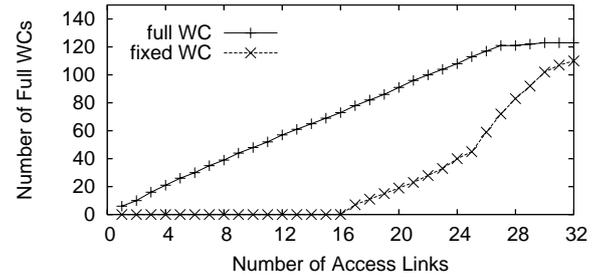


図9 波長変換器数 ( $\lambda_a = 4$ )

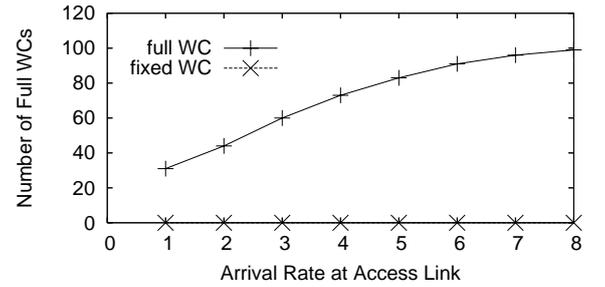


図10 波長変換器数 ( $L_a = 16$ )

次に、アクセスリンク数を固定し、送信エンドホストの光パス設定要求到着率を変動させた場合の必要波長変換器数を図10に示す。 $x$  軸はひとつの送信エンドホストへの光パス設定要求到着率である。アクセスリンク数としては、 $L_a W_a \leq W_c$  が満たされる値である 16 を用いた。到着率が増加すると、Full WC のみを用いる場合にはコアリンクでより多くの波長が競合するため必要波長変換器数は増加する。一方、Fixed WC を用いる場合は固定波長変換のみで競合を抑えられるため、光パス設定要求到着率にかかわらず Full WC は必要ない。

以上のことから、Fixed WC により、入力エッジノードの必要 Full WC 数を大幅に抑えられることがわかった。特に、 $L_a W_a \leq W_c$  を満たす場合には、Fixed WC のみで波長の競合を抑えられる。

### 3.3.2 波長変換器コスト

図11に(1) Full WC のみを用いた場合、(2) Full WC と Fixed WC を用いた場合、にエッジノードからコアリンクへの全出力ポートに Full WC を配置した場合と同等の棄却性能を実現するために必要となる波長変換器のコストを示す。 $x$  軸は入力エッジノードに接続されたアクセスリンク数である。

波長変換器のコストは Full WC 1 つのコストを 1 として正規化した。Full WC のみを用いる場合の波長変換器コストは、入力エッジノードに配置される Full WC 数に等しい。一方、Full WC と Fixed WC を用いた場合のコストは、入力エッジノードに配置される Full WC のコストとアクセスリンクから入力エッジノードへの入力ポートに配置される Fixed WC のコストの和となる。Full WC 1 つと Fixed WC 1 つのコスト比は、(1) 3:1、(2) 5:1、(3) 10:1 を用いる。

図11でアクセスリンク数が 16 以下の場合に注目する。Full WC のみを用いた場合の波長変換器コストと比較して、Fixed WC を用いた場合の波長変換器コストはそれぞれ約 54% (コスト比 3:1)、約 32% (コスト比 5:1)、約 16% (コスト比 10:1) となった。

一方、アクセスリンク数が 16 より大きくなると、Fixed WC を用いた場合の波長変換器コストの増加量が Full WC のみを用

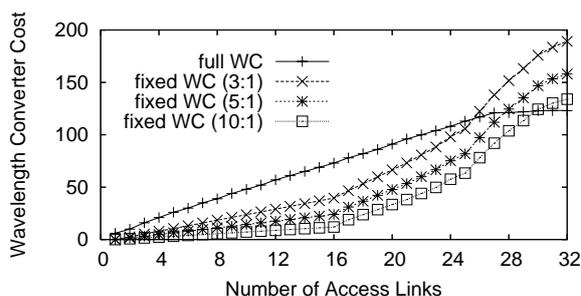


図 11 波長変換器コスト ( $\lambda_a = 4$ )

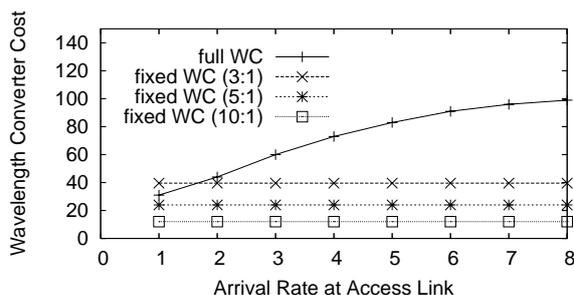


図 12 波長変換器コスト ( $L_a = 16$ )

いた場合のコスト増加量よりも大きい。これは、高負荷時には Fixed WC のみでは波長の競合を回避できず、また、アクセスリンク数の増加に比例して必要な Fixed WC の数が増加するためである。アクセスリンク数が 26 より大きくなると、コスト比が 3:1 の場合の波長変換器コストの大小関係が逆転し、Fixed WC を用いる効果が現れていない。同様にアクセスリンク数がそれぞれ 28、30 より大きくなると、コスト比がそれぞれ 5:1、10:1 の場合の波長変換器コストの大小関係が逆転する。しかし、文献 [3] によると、実際にネットワークが運用される状況では波長利用率は 60% 程度である。よって、コアリンクの波長利用率が 60% 程度以下になるアクセスリンク数が 20 より小さい状況での優位性が得られていることが大切である。

入力アクセスリンク数を 16 に固定し、光パス設定要求の到着率を変動させた場合の波長変換器コストを図 12 に示す。 $x$  軸はひとつの送信エンドホストへの光パス設定要求到着率である。図 10 での Full WC 数の評価で述べたように Fixed WC のみを用いてコアリンク上での波長の競合を回避できるため、Full WC のみを用いる場合と比較して波長変換器コストを大きく削減できている。 $\lambda_a$  が 1 の場合のみ、コスト比 3:1 で Fixed WC を用いた場合のコストが Full WC のみを用いた場合のコストよりも大きくなっている。しかし、一般にグリッドコンピューティングなど多地点間通信を行ったり、複数地点から情報を得たりする場合、同一端末から異なる端末に同時に光パスを設定することが多くなる。すなわち、 $\lambda_a$  が大きい状態での優位性が得られていることが大切である。

#### 4. ま と め

本稿では、オーバレイ型光パスネットワークにおけるキャリアネットワークでの波長変換器配置を検討した。シミュレーションにより、アクセスリンク-コアリンク間での波長多重数の差異を埋めるためにエッジノードで多数の波長変換器が必要となることを示した。次に、入力アクセスリンクで必要となる

Full WC 数および波長変換器コストを低減するために、Fixed WC を用いたエッジノード構成法を提案した。シミュレーションにより、Fixed WC を用いることで目標となる棄却性能を実現するために必要な波長変換器のコストを削減できることを示した。特に、エッジノードへの入力アクセスリンク数とアクセスリンクの波長多重数の積が、コアリンクの波長多重数よりも小さい場合には、Fixed WC によりエッジノードの波長変換器コストを 46% 以上削減できる。

#### 謝 辞

波長変換に関して有益な助言を頂いた NICT の淡路祥成氏に感謝する。

本稿の一部は、文部科学省科学研究費若手研究 (A)(17680004) および文部科学省 21 世紀 COE プログラム (研究開発拠点形成費補助金) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

#### 文 献

- [1] H. Harai, M. Murata, and H. Miyahara, "Heuristic algorithm for allocation of wavelength convertible nodes and routing coordination in all-optical networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 535–545, Apr. 1999.
- [2] S. Subramaniam, M. Azizoglu, and A. K. Somani, "On optimal converter placement in wavelength-routed networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, pp. 754–766, Oct. 1999.
- [3] X. Chu, J. Liu, and Z. Zhang, "Analysis of sparse-partial wavelength conversion in wavelength-routed WDM networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2004*, pp. 1363–1371, Mar. 2004.
- [4] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. S. Ramamoorthy, and K. Bala, "IP over optical networks: Architectural aspects," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 94–102, Sept. 2000.
- [5] I. Foster and C. Kesselman, *The grid: blueprint for a new computing infrastructure*. Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [6] E. Oki, D. Shimazaki, K. Shiimoto, N. Matsuura, and W. Imajuku, "Performance of distributed-controlled dynamic wavelength-conversion GMPLS networks," in *Proceedings of ICOCN 2002*, Nov. 2002.
- [7] S. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, pp. 955–966, June 1996.
- [8] J. H. Lee, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto, T. Tanemura, and K. Kikuchi, "Wavelength conversion of 40-Gbit/s NRZ signal using four-wave mixing in 40-cm-long bismuth oxide based highly-nonlinear optical fiber," in *Proceedings of 2005 Optical Fiber Conference (OFC 05)*, Mar. 2005. PD6.
- [9] K. Onohara, Y. Awaji, N. Wada, F. Kubota, and K. Kitayama, "Agile and highly efficient wavelength conversion using highly nonlinear fiber for optical code-labeled packets," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 627–629, Mar. 2005.
- [10] 淡路 祥成, 原井 洋明, "NICT internal study (personal communication)," June 2004.
- [11] "古河電工時報 (第 109 号、2002 年 1 月)," available at [http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj109/fj109\\_15.pdf](http://www.furukawa.co.jp/jiho/fj109/fj109_15.pdf).
- [12] J. Yamawaku, E. Yamazaki, A. Takada, and T. Morioka, "Field trial of virtual-grouped-wavelength-path switching with QPM-LN waveband converter and PLC matrix switch in JGN II test bed," *IEEE Electronics Letters*, vol. 41, pp. 88–89, Jan. 2005.
- [13] K. Xi, S. Arakawa, and M. Murata, "How many wavelength converters do we need?," in *Proceedings of Optical Network Design and Modeling 2005 (ONDM2005)*, pp. 347–358, Feb. 2005.