

学位論文

光バーストスイッチネットワーク  
における波長選択方式に関する研究

平成 16 年 12 月博士（科学）申請

東京大学大学院新領域創成科学研究科

基盤情報学専攻

橋口 知弘

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景と目的.....	2
1.2 本論文の構成.....	5
<b>第2章 光バーストスイッチネットワークと波長選択方式</b> .....	<b>6</b>
2.1 はじめに.....	7
2.2 フォトニックインターネット.....	8
2.2.1 概要.....	8
2.2.2 基本構成.....	9
2.3 光スイッチング.....	10
2.3.1 光サーキットスイッチング.....	10
2.3.2 光パケットスイッチング.....	10
2.3.3 光バーストスイッチング.....	11
2.4 光バーストスイッチネットワーク.....	14
2.4.1 概要.....	14
2.4.2 双方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワーク.....	15
2.4.3 一方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワーク.....	15
2.5 光バーストスイッチネットワークにおける波長予約方式.....	19
2.5.1 既存手法.....	19
2.5.2 PWA 手法.....	19
2.6 おわりに.....	23
<b>第3章 双方向予約における波長優先度を用いた波長選択方式</b> .....	<b>24</b>
3.1 はじめに.....	25
3.2 双方向波長予約方式.....	26
3.2.1 フォワード型.....	26
3.2.2 バックワード型.....	27

3.2.3	波長選択方式.....	30
3.3	PWA を用いた双方向波長予約方式.....	31
3.3.1	フォワード型 PWA 手法.....	31
3.3.2	バックワード型 PWA 手法.....	33
3.4	性能評価.....	36
3.4.1	想定環境及び評価モデル.....	36
3.4.2	PWA 手法の学習効果と動的トラフィックへの応答.....	37
3.4.3	サービス時間の大きいネットワークにおける評価.....	39
3.4.4	サービス時間の小さいネットワークにおける評価.....	48
3.5	おわりに.....	54
<b>第4章</b>	<b>一方向予約におけるサービスクラス指向波長選択方式.....</b>	<b>55</b>
4.1	はじめに.....	56
4.2	光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供.....	57
4.3	バースト再送ポリシー.....	58
4.4	光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供手法.....	59
4.4.1	CoS 指向波長割当手法 (CWA).....	59
4.4.2	Enforced switching.....	62
4.5	関連研究.....	64
4.6	性能評価.....	67
4.6.1	評価モデル.....	67
4.6.2	評価項目.....	68
4.6.3	バーストブロッキング確率.....	69
4.6.4	スループット.....	72
4.6.5	伝送遅延.....	74
4.6.6	割当可能波長数.....	76
4.7	おわりに.....	78
<b>第5章</b>	<b>光バーストスイッチネットワークテストベッドの構築と実証実験.....</b>	<b>79</b>
5.1	はじめに.....	80

5.2 光バーストスイッチネットワークテストベッド .....	81
5.3 光バーストスイッチノード .....	83
5.3.1 コアノード .....	83
5.3.2 エッジノード .....	86
5.4 実験結果 .....	93
5.4.1 バースト伝送実験 .....	93
5.4.2 バースト伝送遅延の測定 .....	94
5.5 おわりに .....	97
<b>第6章 結論 .....</b>	<b>98</b>
6.1 本論文の主たる結果 .....	99
6.2 今後の課題と展望 .....	101
謝辞 .....	102
参考文献 .....	103
発表文献 .....	108

## 図一覧

図 2.1	インターネットバックボーンの変化予測 .....	8
図 2.2	フォトニックインターネットの適用例 .....	9
図 2.3	光パケットスイッチング .....	11
図 2.4	光バーストスイッチング .....	13
図 2.5	光バーストスイッチネットワーク .....	14
図 2.6	バーストの衝突問題 .....	16
図 2.7	衝突回避手法 .....	18
図 2.8	PWA による波長の空間的再利用 .....	21
図 3.1	フォワード型波長予約方式 ( Selective-2 ) .....	27
図 3.2	バックワード型波長予約方式 .....	29
図 3.3	フォワード型 PWA 手法 ( Selective-3 ) .....	33
図 3.4	バックワード型 PWA 手法 .....	35
図 3.5	PWA 手法による学習効果と動的トラフィックの影響 .....	39
図 3.6	フォワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 .....	40
図 3.7	フォワード型手法における予約衝突確率と N の関係 .....	41
図 3.8	バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 ( リンク距離 : 40 km ) .....	42
図 3.9	バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 ( リンク距離 : 400 km ) .....	43
図 3.10	n を変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック 負荷の関係 ( リンク距離 : 40 km ) .....	44
図 3.11	n を変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック 負荷の関係 ( リンク距離 : 400 km ) .....	45
図 3.12	各提案手法における予約衝突確率の比較 ( リンク距離 : 40 km ) .....	46
図 3.13	各提案手法における予約衝突確率の比較 ( リンク距離 : 400 km ) .....	47
図 3.14	フォワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 .....	49

図 3.15	フォワード型手法における予約衝突確率と $N$ の関係 .....	49
図 3.16	バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 ...	51
図 3.17	$N$ を変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係.....	51
図 3.18	各提案手法における予約衝突確率の比較 .....	52
図 3.19	各提案手法における平均コネクション設定遅延の比較 .....	53
図 4.1	オーバレイモデル.....	58
図 4.2	CWA の基本原理：割当可能波長数 $n(i)$ の差別化.....	60
図 4.3	CWA の問題点 .....	62
図 4.4	Enforced switching.....	63
図 4.5	オフセット時間による CoS.....	66
図 4.6	バーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷（波長数 64） .....	70
図 4.7	バーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷（波長数 128） .....	71
図 4.8	バーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷（波長数 256） .....	71
図 4.9	ネットワークスループット vs. トラフィック負荷（波長数 64） .....	72
図 4.10	ネットワークスループット vs. トラフィック負荷（波長数 128） .....	73
図 4.11	ネットワークスループット vs. トラフィック負荷（波長数 256） .....	73
図 4.12	伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷（波長数 64） .....	74
図 4.13	伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷（波長数 128） .....	75
図 4.14	伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷（波長数 256） .....	75
図 4.15	$n(l)$ を変化させた際のブロッキング確率 vs. トラフィック負荷 .....	77
図 4.16	$n(l)$ を変化させた際の伝送遅延 vs. トラフィック負荷 .....	77
図 5.1	OBS ネットワークテストベッド概要 .....	83
図 5.2	コアノード.....	84
図 5.3	エッジノード .....	87
図 5.4	バースト送信部.....	88
図 5.5	送信ノードで生成するバーストのスケジューリング .....	92
図 5.6	バースト伝送実験の実験系.....	93

図 5.7	EN-2 における測定結果 .....	94
図 5.8	EN-2 におけるバースト転送処理 .....	95

## 表一覧

表 3.1	シミュレーションパラメータ .....	37
表 4.1	シミュレーションパラメータ .....	67
表 5.1	バースト伝送遅延 .....	96

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 背景と目的

近年のインターネットにおけるトラフィック量の増加傾向は、「爆発的」、「指数関数的」といった急激なものである。今日のデータトラフィックは、既に電話網のトラフィック量を凌駕している。この増加は今後も継続すると考えられており、インターネットサービスプロバイダ（ISP）はこれらのトラフィック要求への対応を迫られている。

現行のインターネットにおいて、スループットのボトルネックとなっているのは中継技術である。インターネットバックボーンにおいて光の波長多重技術（WDM）が利用され、リンク帯域は増大しているが、インターネットにおける通信遅延の大半は中継ノードにおける処理遅延である。電気ルータの処理能力においても、ムーアの法則に従って性能向上を続けているものの、それを上回る速度で増加するインターネットトラフィックに将来的に対応することは不可能である。電氣的に並列処理を行って対処することは可能ではあるが、スイッチ規模及びコストを考慮した場合、非常に多くの入出力ポートを処理するためには光スイッチを利用することが有効となる。

以上から、現行のインターネットの規模拡大に対応したネットワーク帯域とルータなどのインターネットシステム性能の抜本的な改善を目指し、フォトニックインターネットの概念が提唱された[1-5]。ポイント・ポイントを WDM 技術で接続し、帯域向上を図った研究は重要な成果を挙げており、1997 年に開始された北米の DARPA (Defense Advanced Research Program Agency) による MONET (Multi-wavelength Optical networking) プロジェクト[6,7]や AON (All-Optical Networking) プロジェクト[8]、1998 年のヨーロッパの KEOPS (Keys to Optical Packet Switching) プロジェクト[9]等はテストベッドネットワークにおける実証実験も行っている。これら初期の研究は、フォトニックインターネットの第一世代と位置付けられ、光増幅器、波長多重技術の実用化と相俟って豊富なネットワーク容量を提供するに至った。

上記のプロジェクトはその後にも継続されており、MONET においてはフォトニックネットワークの透過性の高さに着目している。波長ルーティングを適用し、データフォーマットやプロトコル、波長帯域に関して透過性の高いネットワークは第二世代フォトニ

ックインターネットとされる。データ空間における透過性が高い第二世代フォトニックインターネットの概念は、データ伝送空間のハードウェアを単純化しているという点で非常に重要である。

KEOPS プロジェクトにおいては、光パケットスイッチングの検討を行っている。光パケットスイッチングが実現したネットワークにおいては、より粒度の細かなデータ伝送等が可能となるが、中継技術における同期の問題や要求される光デバイスの技術的課題等の問題を抱える。光パケットスイッチネットワークは第三世代とされ、フォトニックネットワークの理想形態であるが、現状では技術的に困難な点が多い。

第 2.5 世代とも言うべき光バーストスイッチング (OBS) は、パケットスイッチングのような粒度の高いデータ伝送が可能であり、要求されるハードウェアが少ないスイッチング方式として注目されている[10-12]。OBS は中継ノードにおけるバッファリングを必ずしも必要とせず、高速伝送、動的波長割当が可能なスイッチング手法である。

近年の OBS の捉え方は、大きく 2 種類に大別される。ひとつは第二世代の光ネットワークにおけるパス設定を動的、かつ高速化したものである[13,14]。このモデルでは、数秒以上のサービス時間のデータ送信を想定し、GMPLS シグナリング等の高速化を行っている。すなわち、経路予約として双方向予約方式が用いられる。双方向予約方式においては、シグナリングによって伝送路の予約を行った後にデータ伝送を開始するため、伝送データがネットワーク中で失われることはない。大容量ファイル転送や高画質の動画ストリーム配信等、明確な帯域保証を要求するサービスを提供するためには、双方向予約方式に基づいたデータ伝送が望ましい。

もうひとつは、光パケットスイッチングのパケットサイズを大きく捉えたものである[10-12]。本モデルでは経路情報等を持った制御パケットと光データ (バースト) を別チャネル (波長) によって伝送する。本モデルでは、送受信ノード間にて経路の予約確認を行わない一方予約方式が用いられる。したがって、帯域の保証がないものの、データの伝送遅延を小さくすることが可能である。

しかし、いずれの OBS においても、伝送波長の決定はランダムに行われることが多く、効果的な波長選択手法が示されていない。将来の光ネットワーク上では一本の光ファイバに数百～数千といった膨大な数の波長を多重することが可能となり、ネットワークはこれら膨大な伝送チャネル（波長）を管理し、発生するトラフィックに対して適切かつ高速な帯域割当を実現しなければならない。帯域割当処理の負荷を分散させるためには、各光終端ノードが自律分散的に波長情報の管理、及び波長割当を行うことが望ましい [15]。

上記のようにテラビット級の伝送帯域を持ち、多様なアプリケーションが想定される光ネットワーク上では、動的なコネクション設定への要求が強くなると考えられる。今後ますます多様化するであろうユーザの要求に即時的に対応するためには、ユーザのデータ伝送要求に応じて、任意の送受信ノード間におけるコネクションを動的かつ高速に設定する必要が生じるためである [16,17]。

また、将来の光パーストスイッチネットワークにおけるサービスクラス提供も重要な課題である。重要度が大きくリアルタイム性の強いアプリケーションは、高通信品質（低遅延、低ジッタ及び低損失）を要求する。例えば Eメールや FTP といったリアルタイム性の低いアプリケーションはベストエフォート型のサービスでも構わないが、リアルタイムオーディオやビデオ会議といった遅延に敏感なアプリケーションに対してはより高品質なサービスを提供できる必要がある。従って、複数のサービスクラスを実現し、パースト毎にサービス品質を差別化することが効果的である。特に、光バッファを想定せず、一方向予約を用いた OBS ネットワークでは、中継ノードにおいて複数のパーストが衝突した場合、一つのパーストのみが次ホップノードに転送され、他のパーストは破棄されてしまう。したがって、中継ノードでのバッファリングを前提とした DiffServ などのサービスクラス提供機構を、光パーストスイッチネットワークに適用することはできない。

以上を背景とし、本論文では分散制御型の光パーストスイッチネットワークにおける波長選択方式の検討を行う。本研究の目的は、効果的な波長選択方式の利用による経路予約における競合の回避、及びサービスクラスの提供である。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．

第1章	序論
第2章	光バーストスイッチネットワークと波長選択方式
第3章	双方向予約における波長優先度を用いた波長選択方式
第4章	一方向予約におけるサービスクラス指向波長選択方式
第5章	光バーストスイッチネットワークテストベッドの構築と実証実験
第6章	結論

第2章では、現行のインターネットにおける問題点を挙げ、フォトニックインターネットについて概説する．その後、本論文で着目する光バーストスイッチングについて述べ、光バーストスイッチネットワークについて概観する．次に、光バーストスイッチネットワークにおける波長選択手法について述べる．

第3章では、双方向予約を用いた光バーストスイッチネットワークにおける波長選択方式として、波長優先度を用いた手法を提案し、計算機シミュレーションによる評価結果を示す．

第4章では、一方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワークにおいて、波長選択方式によってサービスクラス提供を実現する手法を提案する．また、計算機シミュレーションによる性能評価について示す．

第5章では、本研究で構築した一方向予約方式を用いる光バーストスイッチネットワークテストベッドの詳細を示す．また、本テストベッド上で行ったバースト伝送実験についても述べ、測定結果を示す．

最後に第6章において、以上の結果を総括し、将来に向けた課題・展望を示す．

## 第2章

# 光バーストスイッチネットワークと 波長選択方式

## 2.1 はじめに

近年のインターネットトラフィックの増大に対応すべく，フォトリックインターネットが注目されている．フォトリックインターネットは，電気処理のボトルネックを排除し，広帯域のデータ伝送を可能とする．

本章では，フォトリックインターネットの一般的概念とその実現手法の一つである光バーストスイッチングアーキテクチャについて述べる．2.2においてフォトリックインターネットの必要性，アーキテクチャの概要，及び基本構成について説明する．次に，2.3において光スイッチングについて概説する．2.4において本研究のテーマである光バーストスイッチネットワークにおける課題である衝突回避手法について述べ，最後にまとめる．

## 2.2 フォトニックインターネット

### 2.2.1 概要

フォトニックインターネットは現行のインターネットの規模拡大に対応したネットワーク帯域とルータなどのインターネットシステム性能の抜本的な改善を目指し提唱された概念である。フォトニックネットワークは電気処理によるボトルネックを改善し、増加の一途を辿る IP トラフィックに対応可能なネットワークであると考えられている。

フォトニックインターネットの定義は、高性能ネットワークノードに接続された WDM 波長多重光ファイバ上の波長を伝送チャネルとするインターネットワーク全般を表すと言える。フォトニックインターネットにおいては、高性能のネットワークノードが従来の ATM や SONET/SDH のスイッチを代替する。図 2.1 はインターネットバックボーンの進化の予想図である。今日の複雑な多層構造から、多様なプロトコルに対応し、あらゆるサービスを提供可能な WDM コアネットワークにバックボーン系は移行していくであろう。

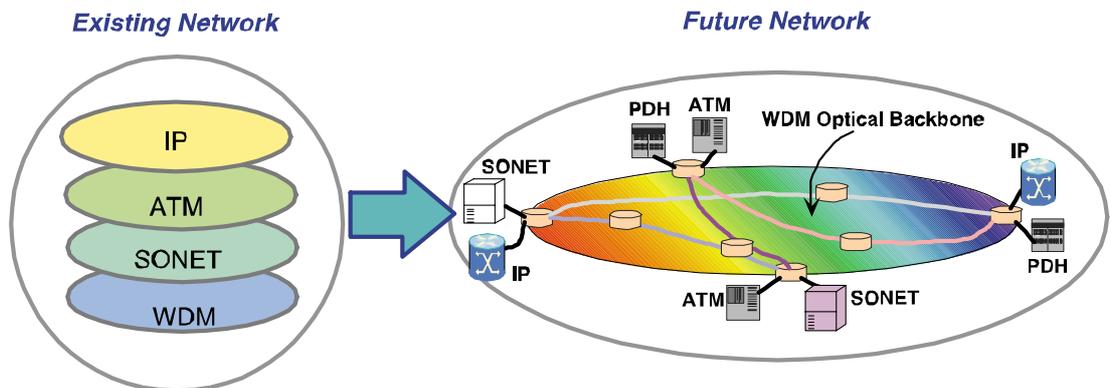


図 2.1 インターネットバックボーンの変化予測

SONET/SDH や ATM 技術は従来の電話系ネットワークの基盤であるサーキットスイッチング技術に基づいている。しかし、データチャンネルが波長で表現されるフォトニックインターネットにおいては、ネットワークトポロジやアーキテクチャの自由度は高い。したがって、光スイッチングや波長ルーティングによるより動的な帯域利用が可能なネットワークが望ましい。今日の WDM ネットワークはポイント・ポイントの多重チャンネルを提供するのみであるが、今後は経路制御と波長割当 (RWA: Routing and Wavelength Assignment [18-21]) を導入したフォトニックネットワークの普及が促進されると考えられる。

### 2.2.2 基本構成

図 2.2 はフォトニックインターネットの適用例である。ここではネットワークのコア部分においてはサービスに共通な転送処理が行われ、電気処理であるサービス毎の機能はネットワークのエッジ部分に集約されている。すなわち、サービスと転送機能の分離が実現されている。具体的にはコア部分において WDM/TDM による大容量かつ高速な伝送、同時に波長/タイムスロットによる高性能ルーティングが実現し、大容量の信号を低コストで伝達することができる。また、各種の異なる転送フォーマットの電気信号を効率的に光の層にマッピング可能であり、転送レイヤが簡素化される。このようなネットワークであれば超高速の IP ネットワークあるいは ATM ネットワーク等のバックボーンとして、既存のネットワークにオーバーレイする形で導入することが可能となる。

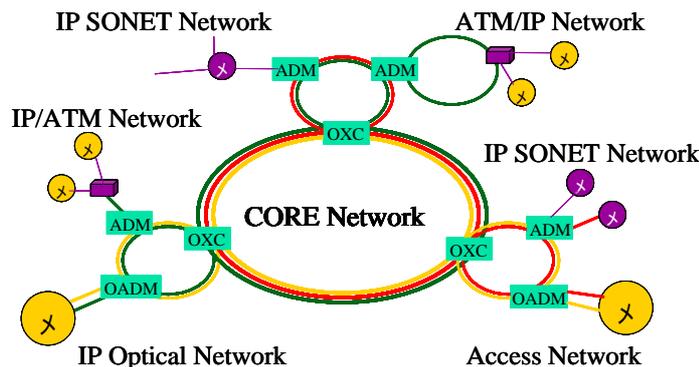


図 2.2 フォトニックインターネットの適用例

## 2.3 光スイッチング

本項では、フォトリックインターネット実現に不可欠な光スイッチング技術の説明を行う。光スイッチングにおいては光データ及び光ヘッダを伝送し、中継ノードにおいてはヘッダ情報のみを光電/電光変換処理し、データは光のまま中継する方式である。具体的なスイッチング方式としては、サーキットスイッチング、パケットスイッチング、及び両者の特徴を融合したバーストスイッチングがある。

### 2.3.1 光サーキットスイッチング

光サーキットスイッチングは、電話網と同様エンドツーエンドでシグナリングを行うスイッチング方式である。サーキットスイッチングにおいては、シグナリングを行うため、伝送したデータがネットワーク内で破棄されることがなく、帯域保障型のスイッチング方式である。

しかし、サーキットスイッチングではシグナリングの際に RTT (Round Trip Time) 分の遅延が生じるため、特に長距離伝送において伝送遅延が大きくなる。また、あらかじめ与えられた帯域分のみ利用可能であり、バースト性の高いトラフィックに対応できない可能性がある。さらに、帯域利用率も低くコネクティビティにも欠ける。

### 2.3.2 光パケットスイッチング

図 2.3 は光パケットスイッチング[22-24]の概念図である。光パケットスイッチングにおいては、伝送データはヘッダ部分とペイロード部分を有する。中継ノードにおいては、光パケットのヘッダ部分のみが取り出され、光電変換後ルーティング情報が読み込まれる。読み出されたルーティング情報に基づいて出力ポートが決定され、ペイロードは光のままスイッチを經由し新たな光ヘッダが付与された後、出力される。

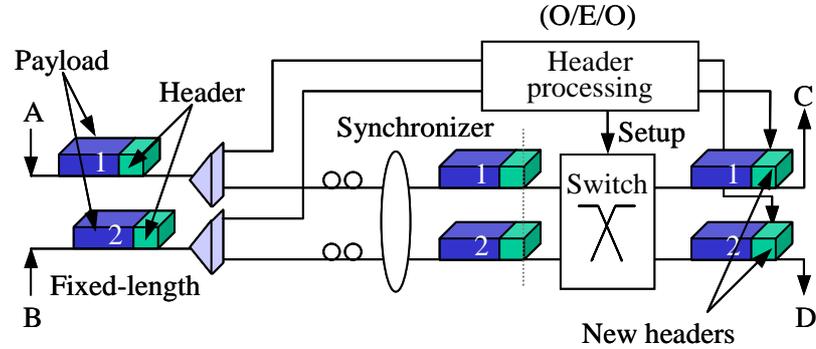


図 2.3 光パケットスイッチング

しかし光パケットスイッチングはスイッチ構造が複雑化しコストが増大するという経済的課題と、必須となる光 RAM やファイバ遅延線 (FDL: Fiber Delay Line) が未だ実用段階ではないという技術的課題とを抱える[25]。オーバーヘッドが大きい点も不利である。さらに重要な課題は同期技術である。ここでいう同期とは光スイッチの異なる入力ポートに到着した複数のパケット間の同期と、パケットのヘッダ、ペイロード間の同期を指す。図 2.3 に示すようにパケットスイッチングでは中継ノードにおいてヘッダ処理を行う間、FDL 等によってペイロードはバッファリングされていなければならない。従って光バッファが必要となるが、実用化が期待されている FDL を用いても現状ではわずかな遅延しか発生させることができない。さらに図中では示されていないが、複数のパケットが同じ出力チャネルにおいて衝突しないためにはスイッチ内部にも FDL が必要となる。

以上より、2.3.3 に示す光バーストスイッチングがフォトニックインターネット構築に適したスイッチング方式として注目されている。

### 2.3.3 光バーストスイッチング

1997 年に提唱された[5,6]OBS の基本原理は、経路情報等を保持する制御チャネルと、ペイロード部の伝送に用いるデータチャネルを分離することにあつた。情報処理の必要な制御信号を必要に応じて電気領域で処理し、ペイロードは光領域のまま伝送すること

により，電気と光の利点を生かしたネットワーク構築が可能となる．

図 2.4 は光バーストスイッチング[10-12] (OBS) の概念図である．OBS において伝送リンクは多重化された WDM チャネルを持ち，チャンネル割当はデータバーストに対し動的に行われる．各リンクのチャンネルは制御パケットにより予約される．制御パケットは続いて到着するデータバーストに関する情報を伝達すべく制御チャンネルに送信され，オフセット時間と呼ばれる短い間隔においてデータバーストが送信される．中継ノードにおいてデータバーストは光信号のままであり，それぞれの制御パケットが処理のために電気信号に変換される．

制御パケットが独自の波長で伝送されるのに対し，バーストは WDM ネットワークの波長帯域全体を使用して伝送が可能のため他の手法に比べ波長予約が容易である．オフセット時間も多くの場合ごく短いためサーキットスイッチングのような双方向の波長予約に比較して予約に要する時間も小さい．一方パケットスイッチングと比較すると，OBS ではバースト長は固定ではなくまた一般的にパケットよりも長い．従って制御及び処理のオーバーヘッドが小さい．また制御パケットとデータバーストを異なるチャンネル(波長)上で，かつオフセット時間という時間差を空けて伝送することにより制御パケットの処理及びバースト間の同期に対する要求は比較的緩やかである．しかしデータバーストは受信者からの経路確立確認応答を待たずに送信されるため(一方向予約方式)，バーストは中継ノードにおける衝突(ブロッキング)により破棄される可能性がある．OBS においては，その高いブロッキング確率を低減させるために衝突回避を考慮した手法が必要となる．

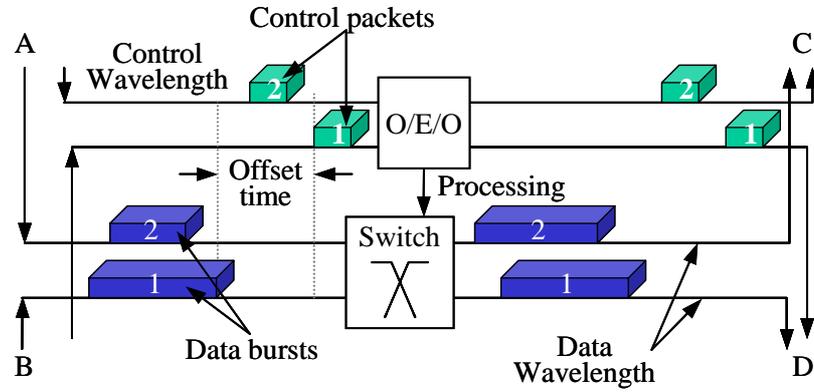


図 2.4 光バーストスイッチング

一方、近年になって図2.4のような一方向予約を用いないOBSも提唱されている[13,14]。[13]等では、双方向経路予約を行った後にデータを送信する。ここで、シグナリングによる経路の設定遅延は10ミリ秒オーダー、データ送信時間(サービス時間)は秒オーダーである。

以上から、本論文ではOBSを広義に解釈し、シグナリング方式を限定しない。すなわち、光信号であるバーストデータを光領域において高速にスイッチングするネットワークをOBSネットワークと定義する。

## 2.4 光バーストスイッチネットワーク

### 2.4.1 概要

光バーストスイッチネットワークの基本構成を図2.5に示す。スイッチング方式にOBSを適用し、WDM波長ルーティングを行うことにより、光カットスルー伝送が実現される。カットスルーとは、中継ノードにおいて光データが光領域のまま転送されることを指す。波長予約はエンド・エンドのシグナリングを行う双方向予約方式、あるいはエンド・エンドシグナリングを行わない一方向予約を用いる。いずれの経路予約方式を用いた場合でも、バースト伝送後に伝送波長は解放される。このネットワークの利点として、以下が挙げられる。

- ・ バースト性の高いデータトラフィックに適している
- ・ トラフィックやネットワークトポロジの変動に強い
- ・ データの通信速度や形式に対する透明性が高い

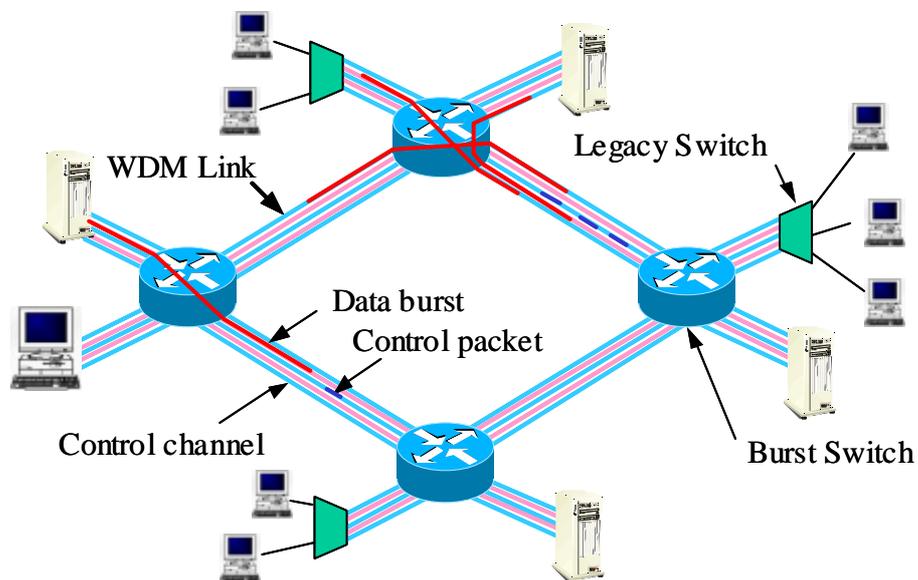


図 2.5 光バーストスイッチネットワーク

### 2.4.2 双方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワーク

双方向の経路予約を用いた光バーストスイッチネットワークの構築は，一方向予約方式に比して困難ではない．主に，光サーキットスイッチングを用いたネットワークにおける経路予約手法が利用可能となるからである．例えば，GMPLS[26]のようなシグナリングプロトコルを用いることで実現可能である．しかし，バーストスイッチングに適用するには，シグナリング遅延をさらに高速化する必要がある．

### 2.4.3 一方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワーク

一方向予約を用いた光バーストスイッチネットワークの構築には，議論すべき課題が多く残されている．OBS ノードの構成等も検討課題であるが[7]，光デバイス技術への依存が大きいため，ここではその他の項目に関して述べる．

#### 2.4.3.1 シグナリング

帯域予約（シグナリング）方式は，主に Just-in-time (JIT) プロトコル[8]と Just-enough-time[9]の研究開発が行われている．JIT においては，制御パケットは後続のバースト長に関する情報を保持しない．中継ノードにおいては制御パケットが到着した時点において既定出力ポートが利用可能かどうかでスイッチングを行う．JIT においては，バースト到着時に出力ポートが利用可能である保障は無いため，帯域利用効率は低くなるが，制御系は簡素化される．JIT プロトコルは，MONET テストベッドにおける実証実験が行われている．

一方，JET プロトコルにおいては，制御パケットはバースト長に関する情報を保持する．JIT において帯域予約は制御パケット到着時から行われるのに対し，JET においてはバースト到着予測時よりの予約となる．したがって，帯域の利用効率は優れているものの，バースト到着時間を正確に予測せねばならないため，複雑な制御システムが必要となる．

#### 2.4.3.2 制御パケットフォーマット

制御パケットのフォーマットに関する議論も未だ成熟していない．前項で述べたシグ

ナリングプロトコルにも依存するが，制御パケットにどのような情報を保持させるかは重要な検討課題である．送信ノード・宛先ノードに関する情報，オフセット時間，バーストの伝送波長等の情報は必須である．

制御パケットのフォーマットとして，MPLS のシム・ヘッダにオフセット時間，及びバーストサイズ等のフィールドを追加し，提案している研究例等がある[7,10,11]．

### 2.4.3.3 衝突問題

一方向予約方式においては，エンド・エンドで波長予約を行わないために帯域の保証がない．また，現状では光 RAM や全光波長変換技術は実用には耐えないため[27]，中継ノードにおけるバッファリングは困難である．したがって，バーストはエンド・エンドで一つの波長しか利用できない．以上より，図 2.6 のように同一の波長，同一の出力ポートを予約する2つ以上のバーストが同一のノードに同時に到着した場合，衝突が発生する(ブロッキング)．衝突が発生すると，最も早く到着した1バーストのみが次ホップノードへ転送され，それ以外のバーストは全てそのノードで破棄されてしまう．以上から衝突回避に効果的な手法が必要である．衝突を回避するには衝突を引き起こすバースト間の時間，リンクまたは波長のいずれかを他で代替可能であればよい．

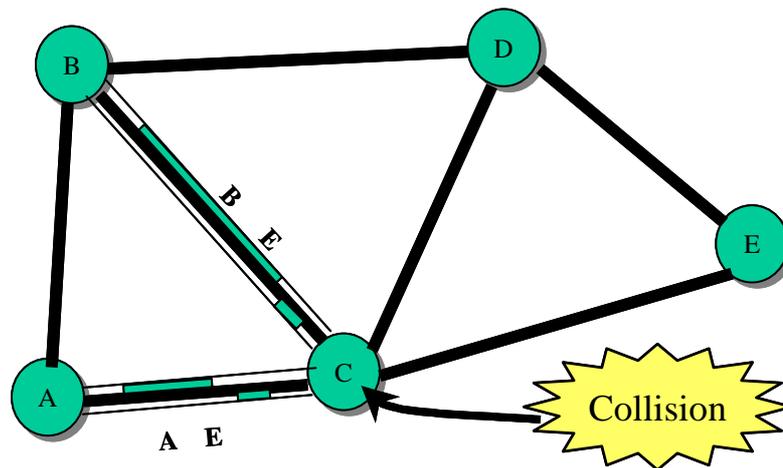


図 2.6 バーストの衝突問題

### 2.4.3.4 衝突回避手法

一方向予約方式における衝突回避手法について述べる。時間領域における衝突回避手法として、光 RAM や FDL (Fiber Delay Line) といった技術を用いた光バッファリングが考えられる。しかし、これらは技術的にもコスト的にも実用には見合わない。光 RAM に関する研究は未だ基礎段階であり、FDL により発生可能な遅延は小さい値である。現状の技術では FDL により発生可能な遅延は数 10 マイクロ秒であり、それ以上のバッファリングは困難である。また、FDL は固定長の遅延を与える要素技術であるため、動的に任意の遅延を与えることが困難である。波長変換も衝突回避に期待されている機能である。WDM ネットワークの中継ノードにおいてデータの伝送波長をある波長から別の波長へ変換することにより、バーストブロッキング確率は大きく減少する。しかし、全光波長変換器の技術はまだまだ実用段階には達していない。光電/電光変換に依存しない全光波長変換器の実用化は強く期待されるどころだが、長年の研究活動にも関わらず依然として性能や実装コスト等の問題を抱えており、実用には遠い現状である。以上から、光デバイスに依存しない他の衝突回避手法が求められる。

近年、リンクの重複による衝突回避を目的としたディフレクションルーティング [28-30] のような経路制御手法や、波長重複によるブロックを回避する PWA (Priority-based Wavelength Assignment) [31] のような波長割当手法が提案されている。図 2.7 は両者の概念図である。PWA 手法については 2.5.2 にて詳述する。

ディフレクションルーティングを適用したバーストスイッチネットワークにおいては、中継ノードにおいてバーストの衝突が発生した際、本来なら破棄されるはずのバーストを他の空き出力ポートへ送出する。広帯域だがバッファリング及び光論理処理といった機能が貧弱なオプティカルネットワークにおいて、ディフレクションルーティングは他の衝突回避手法と比較して、特に低負荷時に有利であることが示されている。ディフレクションルーティングでは使用されていないリンク(光ファイバ)を仮想的な FDL とし、ブロックされたバーストをバッファリングする。ネットワークの混雑部の負荷は比較的使用されていない領域に分散され、全体的なリンク利用効率やネットワークパフォーマンスが向上する。しかしアイドルリンクを効果的に利用できるという利点はあるものの、ネットワーク全体の負荷が大きい場合にはディフレクションルーティングはネットワー

クトラフィックを増大させ，却って不利となる．

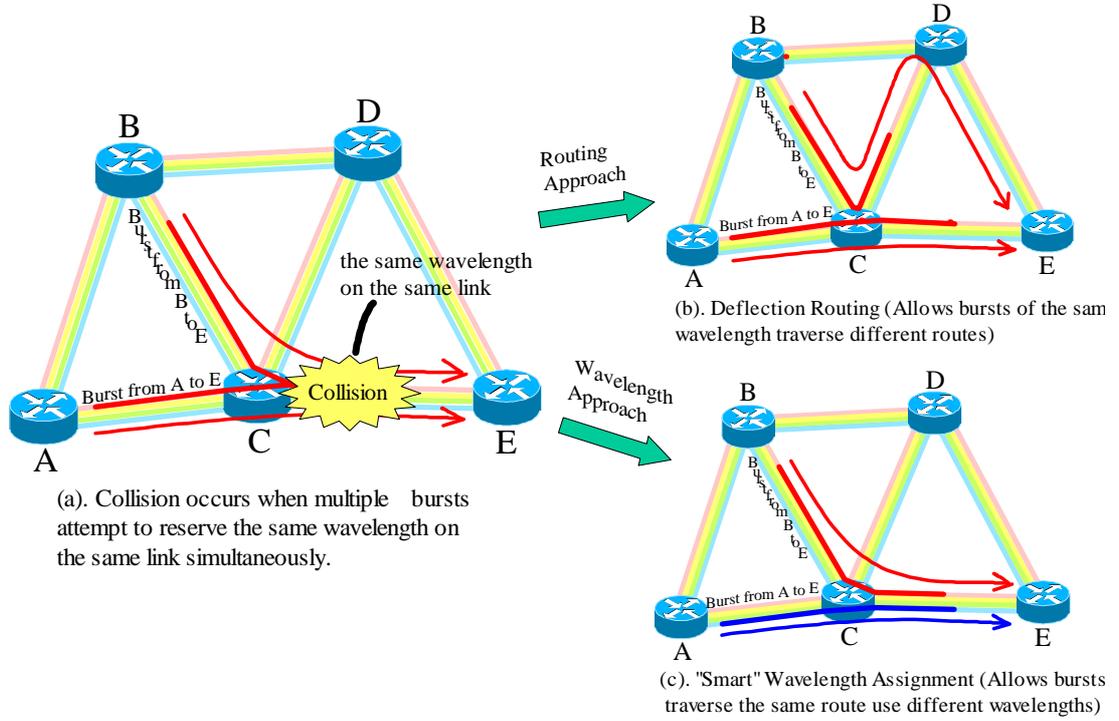


図 2.7 衝突回避手法

## 2.5 光バーストスイッチネットワークにおける波長予約方式

### 2.5.1 既存手法

光バーストスイッチネットワークにおける波長予約方式には、既存の光波長多重ネットワークにおける波長選択手法が利用できる。既存手法として、ランダム割当手法やファーストフィット手法、Most-used 手法、Least-used 手法といった方式が提案、比較評価されている[32-34]。本論文で想定している分散制御環境における光終端ノードは、波長利用に関するグローバル情報を持たず、他のノードがどのような波長を利用しているか不明である。分散制御環境において適用可能な波長選択方式としては、ランダム割当手法やファーストフィット手法が挙げられる。ランダム割当においては、データ伝送波長は文字通りランダムに選択される。一方ファーストフィット手法においては、リンクに多重化された波長がそれぞれ番号を保持する。データ伝送波長は、番号の小さな波長から順番に調査した結果、最初に利用可能であることが確認された波長に決定される。

しかし、これらの手法は主に帯域の利用効率向上を目的としている場合が多く、想定している多重波長数も大きくない。また、より効果的な波長割当を行うためには、送受信ノード対ごとに波長利用情報を管理すべきであり、共有リンクを保持するコネクション間において競合が発生しないよう、異なる波長を割当てるアルゴリズムが必要である。これらを満たす自律分散型の波長選択手法として、PWA[31]が挙げられる。[31]において、PWA は一方向型の帯域予約方式に適用されているが、解決している問題は分散制御による帯域予約における衝突回避であり、双方向予約方式にも適用可能である。

### 2.5.2 PWA 手法

PWA は、光バーストスイッチネットワークにおける自律分散学習型波長割当アルゴリズムである。各ノードは自身の送信履歴の統計結果から学習し、各波長をランク付け、その優先順位に従って波長を割当てる。

PWA においては、ネットワーク内の各ノードはネットワーク中の全ての宛先ノードに対して波長優先度情報を保持する。データ送信要求が発生した際、送信ノードは、宛先

ノードに対する自身の波長優先度情報に基づき，伝送波長を割当てる．

波長優先度情報は，各ノードのデータ伝送結果に基づいて逐一更新される．すなわち，ある宛先ノードへのデータ伝送が成功した場合，その宛先ノードに対する波長優先度情報のうち，データ伝送に用いた波長の優先度を高くする．逆に，データ伝送が失敗した場合，データ伝送に用いた波長の優先度を低くする．

図 2.8 (a) は 4 ノード (a-d) が WDM リンクで接続されたサンプルネットワークにおける波長優先度情報の初期状態を，図 2.8 (b) は学習が進んだ状態を示している．各リンクは  $(w_1 \sim w_4)$  の 4 波長を保持しており，波長優先度情報が各ノードの下に示されている．優先度情報はそれぞれの宛先ノード  $x$  別に保存され (Rcv.  $x$ )，グラフの高さはその状態における波長優先度の大きさを示し，その下の数字は波長を示す．ネットワークの初期状態において波長優先度は全て同値である． $B(x, y)$  を送信者  $x$  から宛先ノード  $y$  へのバーストとし，2つの隣接ノード  $x, y$  間のリンクを  $L(x, y)$  とする．ここで，トラフィックは図 2.8 中を左から右へのみ流れることとする．図 2.8 (b) のように衝突が発生しない波長割当がなされたとする．すなわち， $B(a, b)$  に対して波長  $w_1$  が， $B(a, c)$  と  $B(a, d)$  にはそれぞれ  $w_2, w_4$  が， $B(b, c)$  には  $w_3$ ， $B(b, d)$  には  $w_1$ ，さらに  $B(c, d)$  に  $w_2$  がそれぞれ割当てられたとする．上記のように波長が割当てられれば，衝突は発生せず各波長の優先度は増加する．反対に不適切な波長が割当てられた場合，衝突が発生し衝突した波長の優先度は小さくなる．このような波長割当を継続することで，図 2.8 (b) に示したようなネットワーク状態が得られる．ここで， $w_1$  は  $L(a, b)$  と  $L(b, d)$  に同時に割当てられている．これは空間的な波長再利用でありネットワーク利用効率を大きく改善することができる．また  $w_2, w_3$  についても  $w_1$  と同様に空間的に再利用されている．すなわち， $w_2$  は  $L(a, c)$  及び  $L(b, d)$  に， $w_3$  は  $L(b, c)$  及び  $L(c, d)$  にそれぞれ割当てられている．

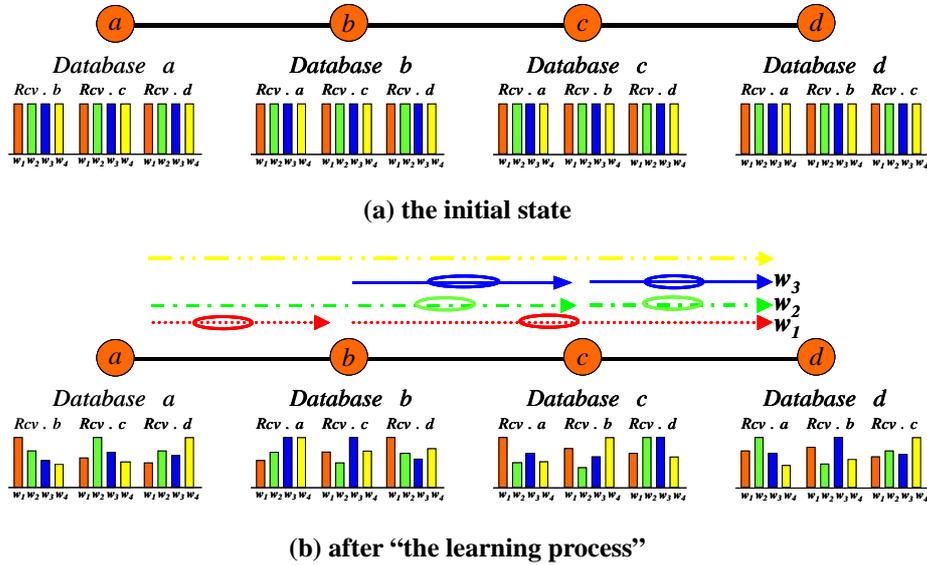


図 2.8 PWA による波長の空間的再利用

波長に優先順位を与えてから波長割当を行うことによって、共通のリンクを有する複数の送受信ノードペア間で波長の棲み分けが達成される。PWA 手法はランダム割当のような他の波長割当手法に比べネットワークパフォーマンスを改善することが可能である。さらには PWA において各送信ノードは波長割当を自律分散的に行うため、波長割当に際し他のノードの波長使用状況を把握する必要がなく、また逐一学習を重ねることで動的なバーストトラフィックやネットワークトポロジの変化に適応できる。

PWA の波長優先度更新処理の詳細を述べる。送信ノード  $x$  はすべての宛先ノード  $y$  に対し波長優先度情報を保持する。波長優先度の更新は、宛先ノードや中継ノードから到着する制御信号が示すデータ送信の結果に基づいて行われる。波長優先度は、送信ノード  $x$ 、宛先ノード  $y$ 、波長  $w$  ごとに  $P(x, y, w)$  で表される。送信ノード  $x$  から宛先ノード  $y$  へのデータ信号が伝送波長  $w$  を用いて宛先ノード  $y$  に到着した場合、送信ノード  $x$  の優先度  $P(x, y, w)$  を高くする。逆に、伝送に失敗した場合には優先度  $P(x, y, w)$  を低くする。

波長優先度の計算は以下の式によって行う。波長  $w$  によるデータ送信が成功した場合、 $P(x, y, w)$  は以下の式で更新される。

$$P(x, y, w) = P(x, y, w) + \frac{1 - P(x, y, w)}{Q(x, y, w) + 1} \quad (2.1)$$

ここで、 $0 < P(x, y, w) < 1$  であり、 $Q(x, y, w)$  は送信ノード  $x$ 、宛先ノード  $y$  のコネクションにおける波長  $w$  への通算予約試行回数である ( $Q = 1, 2, 3, \dots$ ) .

一方、波長  $w$  によるデータ送信が失敗した場合、波長優先度は以下のように更新される .

$$P(x, y, w) = P(x, y, w) - \frac{P(x, y, w)}{Q(x, y, w) + 1} \quad (2.2)$$

(2.1)式において、伝送成功時の波長優先度の増分は優先度が 1 に近いほど小さく、0 に近いほど大きい . 一方、(2.2)式においては、伝送不成功となった際の波長優先度の減少分は優先度が 1 に近いほど大きく、0 に近いほど小さい . (2.1), (2.2)式によって学習を重ねた後には、予約成功となった回数の多い波長の優先度が 1 付近で安定し、予約成功率を向上することができる . 同時に、予約試行回数による波長優先度の収束も考慮し、 $Q$  が大きい場合には優先度の変動幅を小さくしている . ただし、 $Q$  が過大となると波長優先度の増減幅が極端に小さくなってしまうため、トラフィックやネットワークトポロジの変動が発生し得る場合には、必要に応じて  $Q$  の値を制御する必要がある .

送信ノード  $x$  が宛先ノード  $y$  へのコネクション確立に成功すると、伝送に使用された波長  $w$  の優先度が相対的に大きくなるため、その後ノード  $x$  は宛先  $y$  へのデータ伝送に波長  $w$  を利用する傾向が強くなる . 逆に、 $x$  の近隣のノードが宛先  $y$  のデータ送信に際し同じ波長  $w$  を使用した場合、 $x$  が  $y$  へのデータ送信に波長  $w$  を使用する頻度が高いため、このデータ送信の成功確率は低くなる . したがって、他のノードは  $w$  の優先度を低くし、 $w$  以外の波長を割当てようになる . このように各ノード内で異なる優先度情報が形成され、ネットワーク内での波長の棲み分けが達成される .

## 2.6 おわりに

本章では，現行のインターネットの電気処理に伴うボトルネックを排除したフォトリックインターネットコンセプトを説明し，フォトリックインターネットを実現する技術として期待される光バーストスイッチングについて述べた．さらに，光バーストスイッチネットワークを構築するための課題，特に波長選択方式に着目し，概説した．

## 第 3 章

# 双方向予約における波長優先度を用いた波長選択方式

### 3.1 はじめに

本章では、双方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワークにおいて、波長予約方式に学習型波長選択方式である PWA 手法を適用した手法を示す。本手法においては、過去の送信履歴に基づいて伝送波長を決定することによって、ランダム選択手法に比して競合発生率を低減することが可能である。

まず 3.2 において双方向波長予約方式の概要を述べ、3.3 に PWA 手法を適用した双方向波長予約方式の詳細について示す。3.4 にて計算機シミュレーションによる提案手法の評価を行い、最後にまとめとする。

## 3.2 双方向波長予約方式

以下に双方向の波長予約方式について述べる。本論文においては、シグナリングの往路、復路、及びデータ伝送の経路はすべて同一であるものとする。

### 3.2.1 フォワード型

フォワード型の帯域予約方式では、コネクション設定は送信ノードが送出する予約信号 (RESV)、及び宛先ノードが送信する確認信号 (CONF) によって行われる。フォワード型の帯域予約においては、実際にはデータ送信に利用されない波長も予約されるため、帯域利用効率が低いという欠点がある。しかし、利用可能な波長が存在する場合には確実にコネクションを確立できる。

ここでは、N本の波長を同時に予約する Selective-N方式[35]の説明を行う。以下、ネットワーク内の各ノードの挙動を述べる。ただし、波長選択手法については3.2.3で述べることとする。図3.1はフォワード型の Selective-2方式の動作を示している。

#### (a) 送信ノード

接続要求を確認した送信ノードは、自身の空き波長状況を調査し、候補波長を選択する。候補波長の中から予約試行波長を決定する。同時に予約試行可能な最大波長数はNとする。送信ノードは予約波長をRESV信号に書き込み、宛先ノードへ送出する。同時に、次ノードへ向かうリンク上の波長を予約する。

予約が成功したことを示すCONF信号を受信した場合、CONF信号で指定された伝送波長に基づいてデータ信号を送出する。逆に中継ノードにおいて予約失敗となり、その旨を示すFAIL信号を受信した場合には予約を再試行する。

#### (b) 中継ノード

RESV信号を受信した中継ノードは、RESV信号に記述された波長と自身の空き波長とのANDをとり、予約波長を更新する。予約波長が存在しない場合には、波長予約を行わず、送信ノードへFAIL信号を送出する。予約波長が存在する場合、次ノードへ向かうリンク上の予約波長を予約し、更新されたRESV信号を転送する。

FAIL 信号を受信した場合、自身の予約波長を解放し、FAIL 信号を転送する。一方 CONF 信号を受信した場合には、信号に記述された伝送波長以外の波長を解放し、信号の転送を行う。

(c) 宛先ノード

宛先ノードに RESV 信号が到着した場合、RESV 信号中の予約波長が調査される。宛先ノードは予約波長の中からデータ伝送に用いる波長を決定し、伝送波長情報を記述した CONF 信号を送信ノードへ送出する。

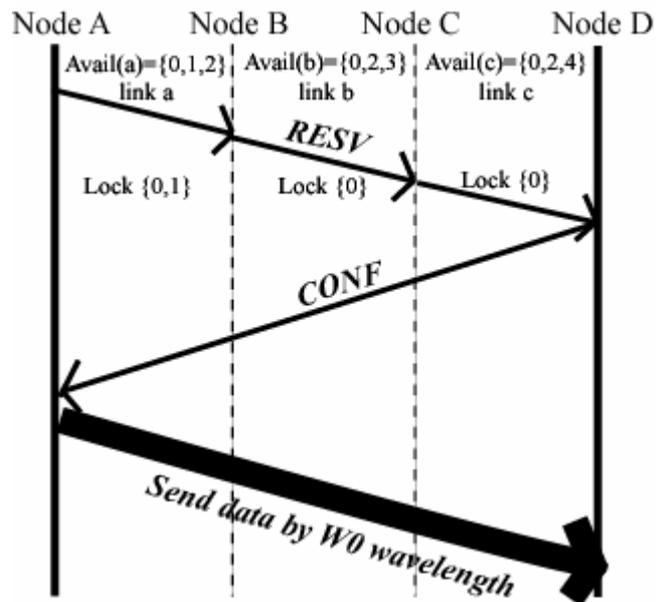


図 3.1 フォワード型波長予約方式 ( Selective-2 )

3.2.2 バックワード型

バックワード型の帯域予約方式においては、送信ノードが送信する調査信号 PROB によって経路中の波長利用状況が調査され、宛先ノードが送信する RESV 信号によって伝送波長の予約が行われる。バックワード型では、不要な波長予約が行われなため、帯域利用効率に優れる。しかし、波長利用状況の調査と波長予約が同時に行われなため、

調査時に空き波長であった波長の予約に失敗する可能性がある。

図 3.2 にバックワード方式の動作概要を示す。以下、バックワード手法の動作の詳細を述べる。バックワード方式においては宛先ノードの予約処理が失敗した場合に予約を再試行する機能[35]があり、本項では同機能を含めた説明を行う。また、3.2.1 と同様波長選択手法については 3.2.3 で述べることとする。

#### (a) 送信ノード

接続要求を確認した送信ノードは、自身の空き波長を調査する。次に、波長利用状況を調査する PROB 信号を生成し、自身の空き波長を予約候補波長として信号中に記述する。PROB 信号は宛先ノードへ送信されるが、この際、送信ノードは自身の候補波長に対する予約は行わない。

宛先ノードからの予約信号 RESV を受信した場合、コネクション確立成功となり、送信ノードは RESV に記述された伝送波長に基づいて自身の出力ポートを予約した後、データ信号を送信する。

経路上に予約可能な波長がなく、中継ノード、あるいは宛先ノードから NAK 信号を受信した場合、予約失敗となり、送信ノードは予約を再試行する。

#### (b) 中継ノード

PROB 信号を受信した中継ノードは、信号中の予約候補波長を調査し、自身の空き波長との AND をとる。予約候補波長が存在しない場合、予約失敗となり、送信ノードへ NAK 信号を送信する。予約可能な波長が存在する場合、候補波長として PROB 信号に上書きし、次ホップノードへ転送する。

宛先ノードからの RESV 信号を受信した場合、自身の現在の空き状況を調査し、予約波長が利用可能であるかを確認する。利用可能の場合、RESV 信号を転送する。

RESV 信号に記述された予約波長が利用不可の場合、通常は送信ノードに NAK 信号を送信すると共に、経路上の予約波長の解放を促す信号 (FAIL) を宛先ノードへ向けて送信する。一方、宛先ノードによる予約再試行機能が有効な場合、中継ノードは宛先ノードへ FAIL 信号を送信し、予約再試行を要求する。予約再試行機能が有効な場合、中継ノードは送信ノードへ NAK 信号を送信しない。

他ノードからの FAIL 信号を受信した場合、中継ノードは予約していた伝送波長を解放し、宛先ノードの方向へ FAIL 信号を転送する。

(c) 宛先ノード

PROB 信号を受信した宛先ノードは、受信ポート上の空き波長状況と PROB 信号に記載された予約候補波長の AND をとる。予約可能波長が存在する場合、予約波長を1つ決定し、予約波長を記述した RESV 信号を送信ノードへ送信する。同時に、自身の伝送波長ポートを予約する。空き波長がない場合、NAK 信号を送信ノードへ送出する。

中継ノードからの FAIL 信号を受信した場合、予約波長の解放を行う。ここで、宛先ノードが予約再試行を行うオプション  $\forall cite{Mei}$  が有効の場合、宛先ノードは PROB 信号に記載されていた波長の中から新たな伝送波長を選択し、再度 RESV 信号による波長予約を行う。

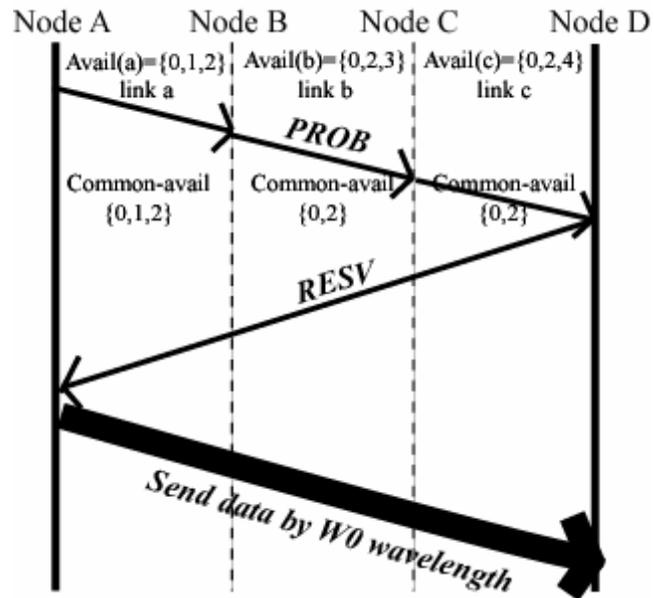


図 3.2 バックワード型波長予約方式

### 3.2.3 波長選択方式

フォワード型，バックワード型両方式においては，空き波長の中から伝送波長を決定する手法が必要となる．選択した波長が適切でない場合，すなわち他ノードが予約する波長と同一の波長である場合，波長の競合が頻繁に発生するため，予約失敗（衝突）が頻繁に発生し，ネットワーク性能が低下する．したがって，ネットワーク中の各送信ノードは他ノードのデータ伝送波長と競合しない適切な波長を選択する必要がある．特に，リンク波長数が膨大に存在すると予想される将来の光ネットワークにおいては，送受信ノード対ごとに異なる波長を利用することで，効率的なデータ伝送が実現可能である．すなわち，コネクション間の衝突を回避する波長割当手法が必要となる．

### 3.3 PWA を用いた双方向波長予約方式

#### 3.3.1 フォワード型 PWA 手法

本項では、PWA 手法をフォワード型波長予約の Selective-N 方式に適用した手法(以下、フォワード型 PWA 手法とする)を示す。Selective-N 方式では、制御信号によって同時に予約可能な波長ポートは  $N$  である。本手法において PWA の波長優先度情報は、送信ノードが  $N$  本の候補波長を決定する際、及び宛先ノードが利用可能波長のうちから伝送波長を選択する際に用いられる。

##### 3.3.1.1 波長割当動作

フォワード型 PWA において、ネットワーク中の各ノードにおける基本動作は通常のフォワード方式と同様である。以下、本手法における波長割当動作に関して述べる。なお、中継ノードの動作には従来と変更はない。ここでは、送信ノード  $x$  から宛先ノード  $y$  へのトラフィック要求が発生したとする。

###### (a) 送信ノード

コネクション設定要求を受信した送信ノードは、自身の送信ポートを調査し、予約可能な波長を調査する。予約可能な波長が  $(N+1)$  本以上存在する場合、自身の波長優先度情報を調査し、優先度上位  $N$  本の波長を予約波長とする。一方空き波長が  $N$  本以下の場合、すべての波長を予約波長とする。

次に、送信ノードは波長予約を行う RESV 信号を生成する。RESV 信号には予約波長フィールドが存在する。送信ノードは、RESV 信号の予約波長フィールドに予約波長を記述すると共に、各予約波長の優先順位も同時に記述する。

###### (b) 宛先ノード

RESV 信号を受信した宛先ノードは、RESV 信号に記述されている予約波長、及びそれぞれの波長優先度を調査する。ただし、ここでの波長優先度とは送信ノードにおける波長優先度であり、RESV 信号に記述されている。RESV 信号と宛先ノードにおける空き波長の AND が 0 でない場合、優先度の最も高い 1 波長を伝送波長として決定する。次に、決定した伝送波長情報と、伝送波長以外で予約成功となった波長情報を記述した CONF

信号を生成し，送信ノードへ向けて送信する．

### 3.3.1.2 波長優先度の更新

波長優先度の更新は，コネクション設定成功時の CONF 信号，あるいはコネクション設定失敗時の FAIL 信号受信時に送信ノードにおいて行われる．

CONF 信号を受信した送信ノードは，利用可能であった波長情報を利用し，波長優先度の更新を行う．決定した伝送波長を含め，経路上において利用可能であった全波長の優先度は(2.1)式に基づいて高くなる．逆に，利用中であった波長の優先度は(2.2)式によって低くなる．

図 3.3 にフォワード型 PWA の Selective-3 方式の動作例を示す．ノード A においてノード D へのコネクション要求が発生し，RESV 信号が生成される．ノード A から次ホップノード B へ向かうポート上において，波長{0,1,2,3}が利用可能である場合，波長優先度上位3波長である{0,1,3}を予約すると同時に，RESV 信号による予約を行う．この際 RESV 信号には，波長優先度は{1,3,0}の順であることが記述される．次ノード B においては，RESV 信号に記述された波長{0,1,3}のうち，{0,3}のみが利用可能であるから，ノード B は波長{0,3}を予約し，RESV 信号の予約波長情報を{0,3}に書き換え，転送する．宛先ノード D へ到着した RESV 信号には{0,3}が記述されており，より優先度の高い波長 3 を伝送波長として決定し，CONF 信号を送出する．送信ノードにおいては，伝送波長が波長 3 に決定したことが通知され，データ伝送が行われる．同時に，波長{0,3}が利用可能であったことが通知され，波長{0,3}の優先度が高くなり，中継ノードにおいて利用不可であった波長 1，及び送信ノードにおいて利用不可であった波長 4 の優先度がそれぞれ低くなる．

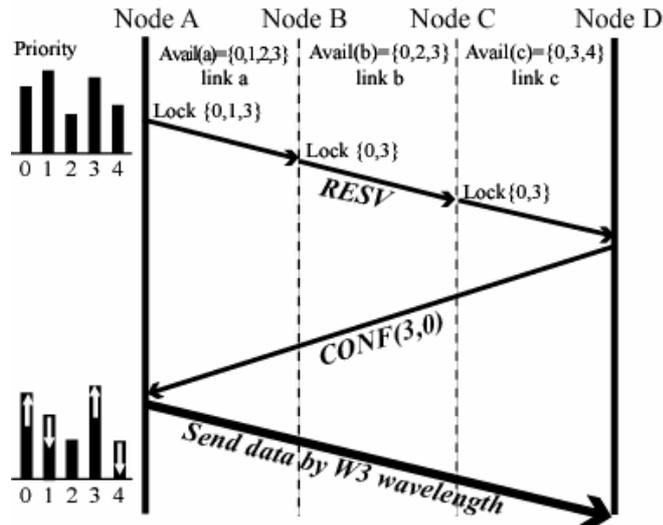


図 3.3 フォワード型 PWA 手法 (Selective-3)

### 3.3.2 バックワード型 PWA 手法

本項では、PWA をバックワード型の帯域予約方式に適用したバックワード型 PWA 手法について述べる。本方式において、PWA の波長優先度情報は宛先ノードにおける伝送波長決定時に用いられる。したがって送信ノードにおいて波長優先度情報は不要であり、波長優先度情報は宛先ノードが保持する。

#### 3.3.2.1 波長割当動作

3.3.2 と同様に、バックワード型 PWA 手法の波長割当動作に関して述べる。送信ノード、及び中継ノードの動作は通常のバックワード方式と同様である。以下、宛先ノードの動作について述べる。

PROB 信号が宛先ノードに到着後、宛先ノードが保持する波長優先度情報に基づいて伝送波長が決定される。次に、伝送波長情報を記述した RESV 信号が生成され、送信ノードへ送出される。

宛先ノードにおいて FAIL 信号が受信され、波長予約が失敗となった場合、予約波長

を解放する。さらに予約再試行機能が有効な場合には、最新の波長優先度情報に基づいて再度伝送波長決定処理が行われる。新たな伝送波長の決定後、RESV 信号が生成され、送信ノードへ送出される。

### 3.3.2.2 波長優先度の更新

波長優先度の更新は、PROB 信号による波長利用状況確認時、及びコネクション設定成功後のデータ受信確認時に宛先ノードにおいて行われる。

PROB 信号を受信した宛先ノードは、利用不可であった波長の優先度更新を行う。経路上において利用不可であったすべての波長の優先度は(2.2)式によって低下させる。その後、RESV 信号による波長予約が成功し、データ受信が確認された場合、伝送波長の優先度を(2.1)式に基づいて高くする。一方、PROB 信号による情報収集時に利用可能であった波長に関しては、データ伝送時における空き状況が不明なため、優先度の更新は行わない。

RESV 信号による波長予約が失敗した場合、宛先ノードにおいて FAIL 信号が受信される。宛先ノードは、FAIL 信号に記述された波長の優先度を(2.2)式によって低下させる。予約再試行機能が有効な場合、新たな伝送波長は更新後の波長優先度情報に基づいて決定される。

本手法の動作例を図 3.4 に示す。ノード A においてノード D へのコネクション要求が発生し、PROB 信号が伝送される。ノード A から次ホップノード B へ向かうポート上において、波長{0,1,2}が利用可能であり、次ノード B において、波長{0,2,3}が利用可能であるから、ノード B は PROB 信号中の利用可能波長情報として波長{0,2}を記述し、転送する。ノード C においても同様の処理が行われ、宛先ノード D へ到着した PROB 信号には利用可能波長として{0,2}が記述されている。宛先ノードにおいては、優先度の高い波長 0 を伝送波長として決定し、RESV 信号を送出する。同時に宛先ノードでは波長優先度の更新が行われ、経路上利用可能であった波長{0,2}以外の波長の優先度が低くなる。RESV 信号による波長予約が成功した場合、データ受信を確認した宛先ノードは、データ伝送に利用した波長 0 の優先度を高くする。一方、波長 2 に関しては PROB 信号伝送

時には利用可能であったが，RESV 信号伝送時の利用可能状態は不明であるため，優先度の変更は行わない．

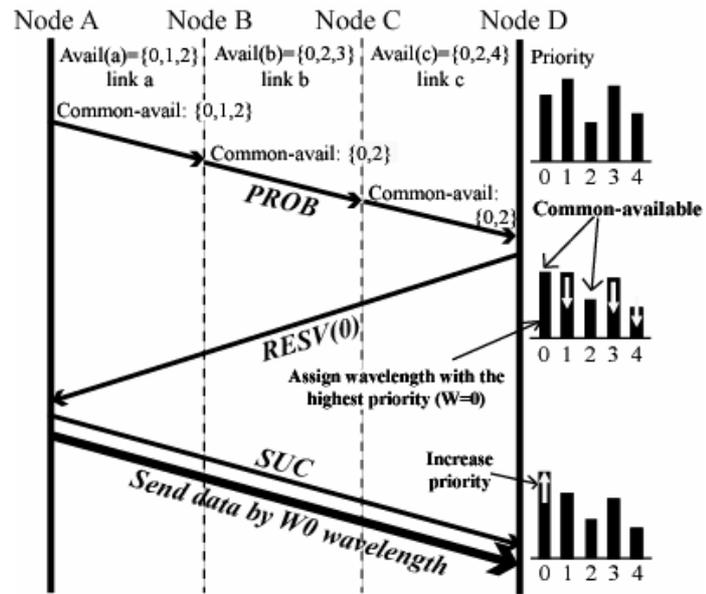


図 3.4 バックワード型 PWA 手法

### 3.4 性能評価

3.3.1 及び 3.3.2 で示した波長選択手法の性能評価を計算機シミュレーションによって行った。

#### 3.4.1 想定環境及び評価モデル

想定環境及び評価モデルは以下の通りである。

- ・ ネットワークトポロジは  $4 \times 4$  のメッシュ型である。
- ・ 中継ノードにおける波長変換は行わない。
- ・ すべての経路は同数の多重波長を有する。
- ・ アクセスノードとコアノードの区別はない。すなわち、すべてのノードは送信データを生成し、かつデータの中継、受信を行う。
- ・ ノードは自身のポートの波長利用状態を知ることが可能であり、出力ポートを自由に制御可能である。ただし、入力ポートの波長利用状態は受信する制御信号の内容に応じて制御される。
- ・ 送受信ノード間の経路は、最短ホップ数の経路の中からあらかじめ一つに決定されている。
- ・ コネクション要求の発生はポアソン分布に従う。
- ・ 発生するコネクションの伝送データサイズは指数分布に従う。

本シミュレーションで使用した各ネットワークパラメータを表 4.1 に示す。ここで、16 のネットワークノードには、最上列左端から最下列右端まで順に 1 から 16 のノード番号を付与した。隣接ノード間の距離（以後、リンク距離と表記する）は 40 km、あるいは 400 km とした。シミュレーションの初期状態において、波長優先度  $P$  は 0 から 1 までの間でランダムに決定される。また、 $Q(x, y, w)$  は 10 が上限値であり、 $Q$  が 10 となった以降は更新されない。本評価においては、簡単のため各ネットワークノードでの制御信号の処理遅延は 0 とした。

表 3.1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
ノード数	16 (4x4 の格子型)
リンク長	40 km , 400 km
リンク帯域	10 Gbps (波長当り)
平均サービス時間	6.4 秒 ( 3.4.2 , 3.4.3 項 )
	12.8 ミリ秒 ( 3.4.4 項 )
再送遅延	再送なし( 3.4.2 , 3.4.3 項 )
	1.5 ミリ秒 ( 3.4.4 項 )
Q の最大値	10

本評価においては、フォワード型 Selective-N (FRP-Selective-N) 方式、予約再試行を行わないバックワード方式 (BRP)、及び宛先ノードにおいて最大 n 回まで予約再試行可能なバックワード方式 (BRP-Tn) を用いた。各方式に対し、PWA を適用したネットワークとランダム割当手法を適用したネットワーク、及びファーストフィット手法を適用したネットワークとの比較を行った。評価項目を制御信号の衝突率とし、トラフィック負荷を変化させて測定した。制御信号の衝突率とは、予約が失敗となる確率である。トラフィック負荷はネットワーク中の全帯域に占めるサービス利用率であり、以下の式で定義される。

$$T_L = \frac{Nodes \times L \times H}{J \times W} \quad (3.1)$$

ここで *Nodes* はノード数、*L* は 1 秒間のトラフィック要求到着率と平均サービス長の積を示す。また、*H* は全経路の平均リンク数、*J* は総リンク数、*W* はリンク当りの多重波長数である。

### 3.4.2 PWA 手法の学習効果と動的トラフィックへの応答

PWA 手法による学習効果と動的なトラフィックへの応答を調査するため、波長優先度が初期値である状態から衝突率の測定を開始し、その変動を測定した。

本評価では、動的トラフィックへの応答の測定を目的とし、測定中にトラフィックパ

タンを変化させた。予約試行回数が0から30万以下の期間には、送信ノードはランダムとし、中央の4ノード、すなわち6,7,10,11番のノードを宛先とするトラフィックを8割、その他のノード宛てのトラフィックを2割とした。次に、予約試行数が60万までの期間においては、偶数番ノード間、及び奇数番ノード間のトラフィックを9割、偶数番と奇数番のノード間トラフィックを1割とした。予約試行数が60万より大きい期間には、偶数番ノード間、及び奇数番ノード間のトラフィックを1割とし、偶数番と奇数番のノード間トラフィックを9割とした。

図3.5に測定結果を示す。図3.5において、横軸は接続の予約試行数を、縦軸は過去1万の予約試行の中で予約失敗となった数を、縦線A,Bはトラフィックパターンが変わる時点を示している。ここでは、リンク波長数を128、トラフィック負荷を0.3、リンク距離を40kmとした。波長予約はフォワード型のSelective-4手法とし、PWA手法をランダム割当手法、及びファーストフィット手法と比較した。図3.5において、PWA手法を適用した場合、測定開始直後は衝突が検出されるが、学習を重ねた結果衝突数が減少することがわかる。予約試行回数が30万に達した時点でトラフィックパターンが変化し、PWA手法を適用した場合には衝突数が一時的に増大するが、再度数万回の学習を行うことによって衝突数が減少することがわかる。次にトラフィックパターンの変化する予約試行数60万の時点においても、一時的に衝突率が高くなるものの、再学習の結果、数万の予約試行後には衝突率は低くなる。本手法において衝突率が一度収束した後でも再学習が可能なのは、(2.1)、(2.2)式における予約試行数 $Q$ の上限値を設定しているためである。

また、測定を行った予約試行数100万までの期間において、PWA手法による衝突率は他の2手法に比較して常に低いことがわかる。以上から、波長優先度の再学習によって本手法が動的なトラフィックへも対応可能であることが確認された。

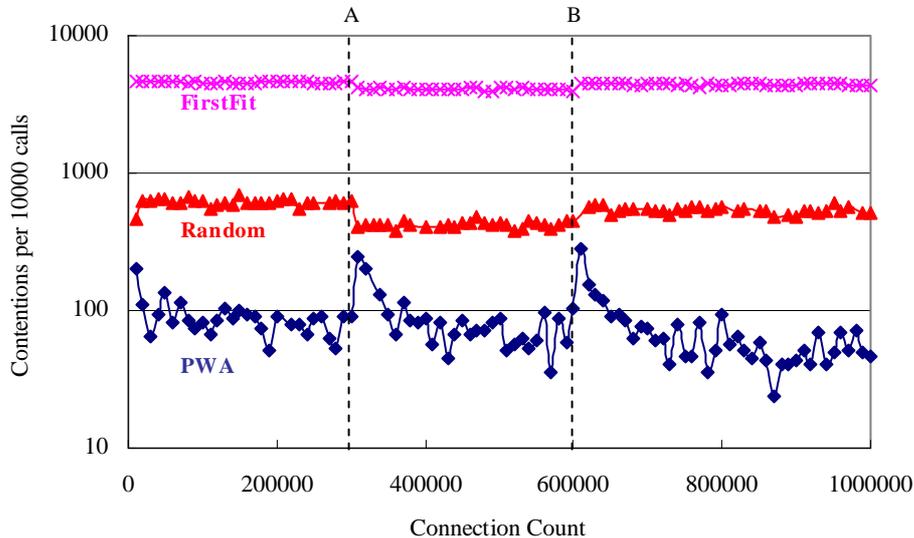


図 3.5 PWA 手法による学習効果と動的トラフィックの影響

### 3.4.3 サービス時間の大きいネットワークにおける評価

#### 3.4.3.1 フォワード型 PWA

フォワード型 PWA におけるトラフィック負荷と予約信号の衝突確率の関係を図 3.6 に示す。リンク距離は 40 km である。点線は波長選択手法としてランダム割当，あるいはファーストフィット手法を用いた場合の結果を，実線はフォワード型 PWA 手法の評価結果を示している。ここでは，各割当手法共にフォワード型の Selective-4 手法を用いている。図中において，PWA/Random/FirstFit それぞれの後の数値はリンク当りの波長数を示している。ランダム割当を用いた場合には衝突確率がリンク波長数に依存せず，ファーストフィット手法を適用した場合にはリンク波長数が多いほど衝突確率が高くなる傾向が見られた。一方，PWA 手法を用いた場合には両既存手法より衝突率が低下し，リンク波長数が増大すると衝突確率が低下することがわかる。したがって，PWA 手法はリンク波長数が多い場合に有効な手法であることが示された。しかし PWA 手法を用いた場合でも，トラフィック負荷が大きい領域においてはリンク波長数の変化による衝突率の差は小さくなる。

次に、トラフィック負荷を変化させた場合のパラメータ  $N$  と衝突確率の関係を図 3.7 に示す。リンク距離は 40 km、リンク当りの波長数は 128 とした。トラフィック負荷を 0.3 とした場合、各手法適用時において、衝突率がもっとも低く得られる  $N$  の値が存在する。ここで、PWA を適用した場合の衝突率最小となる  $N$  の値は 30 程度であり、40 程度であるランダム割当手法、及び 70 程度であるファーストフィット手法と比較して小さく、それぞれの値で得られる衝突率も、PWA を適用した場合が最も低い。これは、PWA の波長棲み分け効果によって効果的な予約が試行されていることを示している。

一方、図 3.7 においてトラフィック負荷が 0.5, 0.7 の場合には、トラフィック負荷 0.3 の場合と比較して  $N$  の変化に対する衝突率の変化が小さいが、PWA を適用した場合の衝突率は他の 2 手法を適用した場合より低く、 $N$  を大きくした場合の衝突率の収束も早いことがわかる。また、トラフィック負荷 0.3 の場合と異なり、 $N$  をリンク波長数である 128 まで大きくした場合でも衝突率の劣化は確認されなかった。これは、トラフィック負荷が大きいため、常に予約可能な波長が少なく、 $N$  が大きい場合でもネットワークへの影響が小さいためと考えられる。

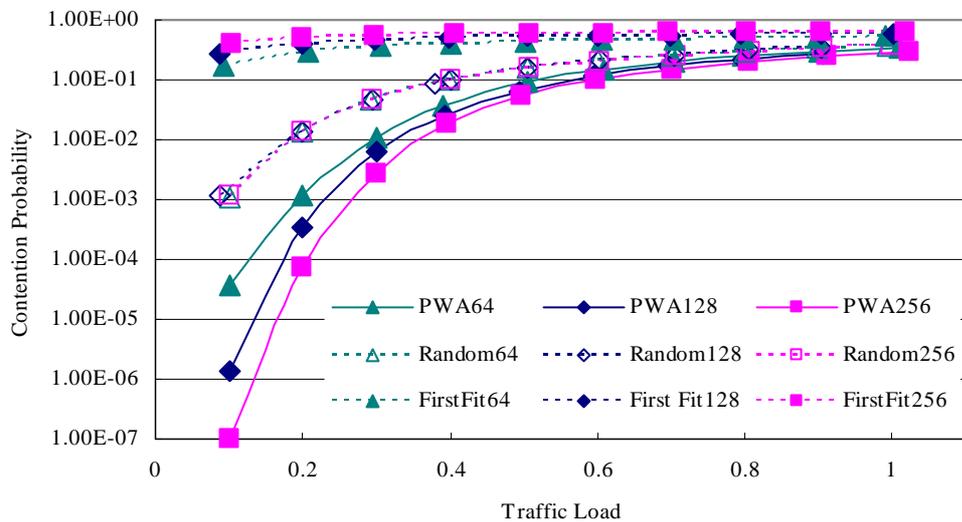


図 3.6 フォワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係

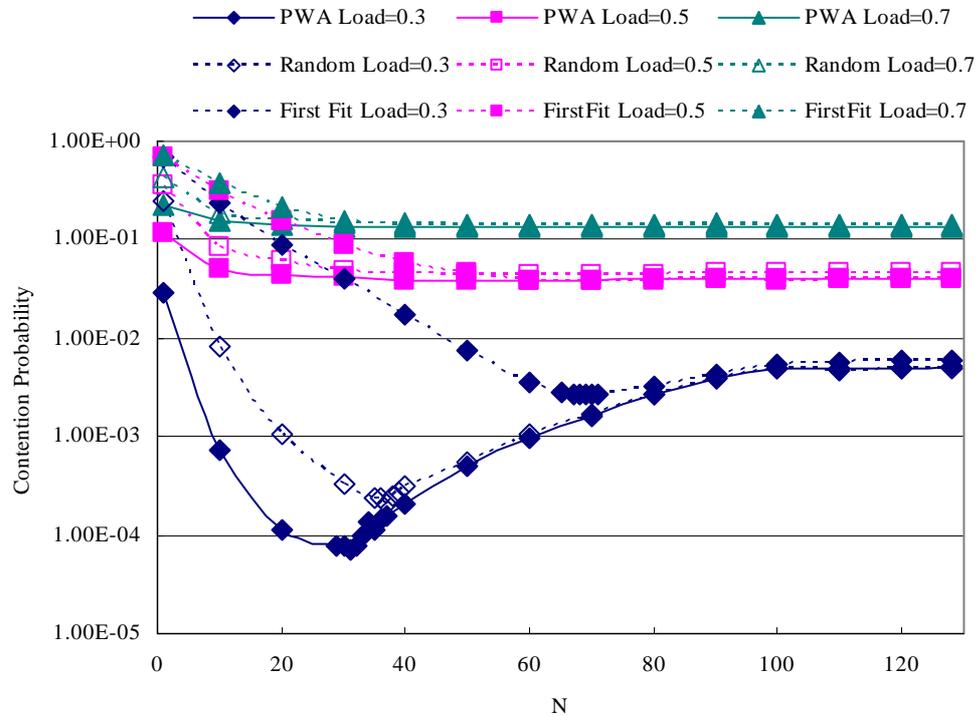


図 3.7 フォワード型手法における予約衝突確率と N の関係

### 3.4.3.2 バックワード型 PWA

バックワード型 PWA におけるトラフィック負荷と衝突確率の関係を図 3.8, 9 に示す。図 3.8 はリンク距離を 40 km とした場合の結果を、図 3.9 は 400 km とした場合の結果をそれぞれ示す。ここでは、宛先ノードにおける予約再試行機能は用いていない (BRP-T0)。フォワード型の結果と同様、ランダム割当適用時には衝突確率はリンク波長数の影響が小さく、ファーストフィット手法を適用した場合には波長数増大によって衝突率が上昇することがわかる。一方 PWA 手法を適用した場合には、リンク波長数が大きいほど衝突率が低減され、ここでもリンク波長数が大きいほど PWA 手法が有効であることがわかる。また各波長選択手法において、リンク距離を 40 km とした場合にはリンク距離 400 km の場合より同一トラフィック負荷時の衝突率が低減されていることがわかる。バックワード方式の性能は空き波長調査時と波長割當時の時間差に影響されるため、リンク距離が

小さい場合にはその時間差が小さく，性能が向上していると考えられる．

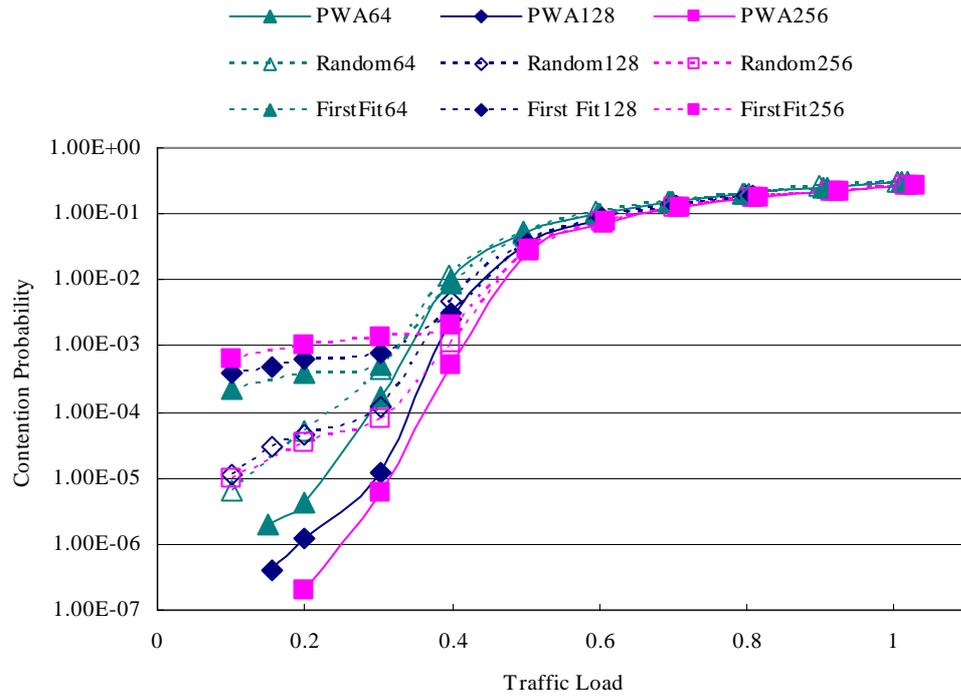


図 3.8 バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係  
(リンク距離：40 km)

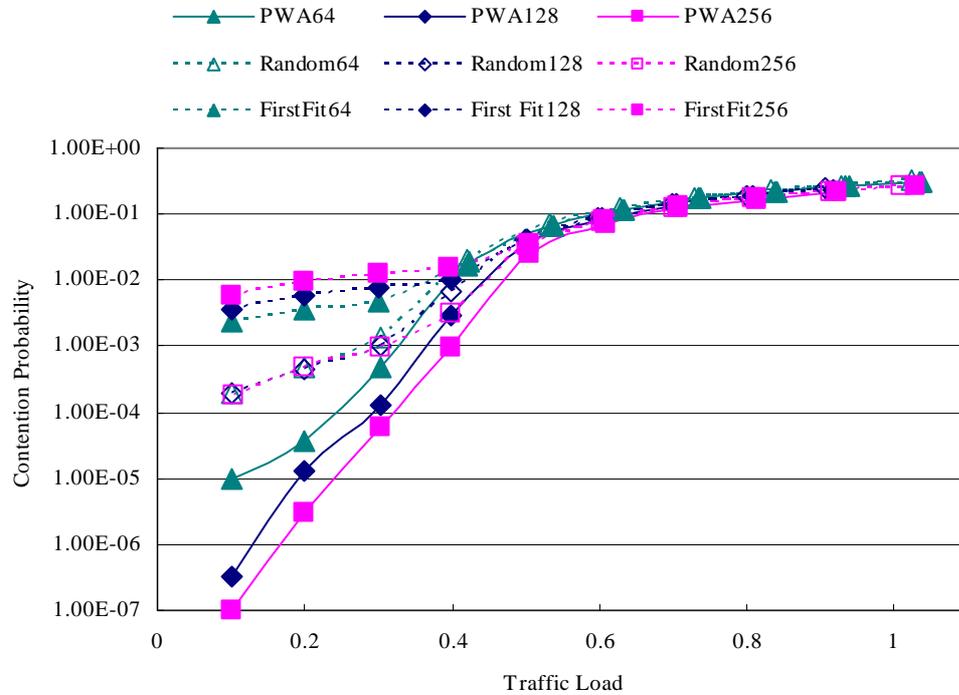


図 3.9 バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係  
(リンク距離：400 km)

次に、バックワード方式の予約再試行機能の評価を行った。ここで、宛先ノードにおける予約再試行が成功した場合、CONF 信号による予約が数回失敗した後に予約が成功したことになる。本評価においては、宛先ノードにおける予約再試行が成功した場合には、1 コネクション設定の成功として計測する。したがって予約再試行の回数に係わらず、宛先ノードの予約再試行によってコネクション設定が成功した場合には、衝突発生はなかったとして評価した。一方、予約再試行を行った結果波長予約に失敗した場合には、再試行の回数に係わらず 1 回の衝突発生として計測する。

BRP-Tn 手法におけるパラメータ n を 1, 3, 5 とした場合のトラフィック負荷と衝突確率の関係を図 3.10, 11 に示す。図 3.10 はリンク距離 40 km での結果を、図 3.11 はリン

ク距離 400 km での結果をそれぞれ示す。リンク波長数は共に 128 である。両図において、衝突率  $1.00E-07$  より小さい領域では衝突は検出されなかった。図 3.10 では、ファーストフィット手法がランダム割当手法より低い衝突率を示し、PWA 手法適用時との差が小さいことがわかる。しかし、トラフィック負荷が 0.3 から 0.4 までの領域において、PWA 手法による衝突率は他の既存手法より低いことが示されている。また、 $n$  を 1 から 3 とした場合には各波長選択手法において衝突率が低下しているが、 $n$  を 3 から 5 とした場合の衝突率の減少は極めて小さかった。図 3.11 ではランダム手法がファーストフィット手法より低い衝突率を示しているが、PWA 手法の衝突確率が最も低い結果となった。しかし、リンク距離 40 km の場合には PWA 手法と既存手法との差が小さく、リンク距離を 400 km とすると既存手法との差はやや大きくなる傾向が見られた。すなわち、セットアップ遅延の大きい環境の方が PWA 手法の学習効果が大きいことがわかる。

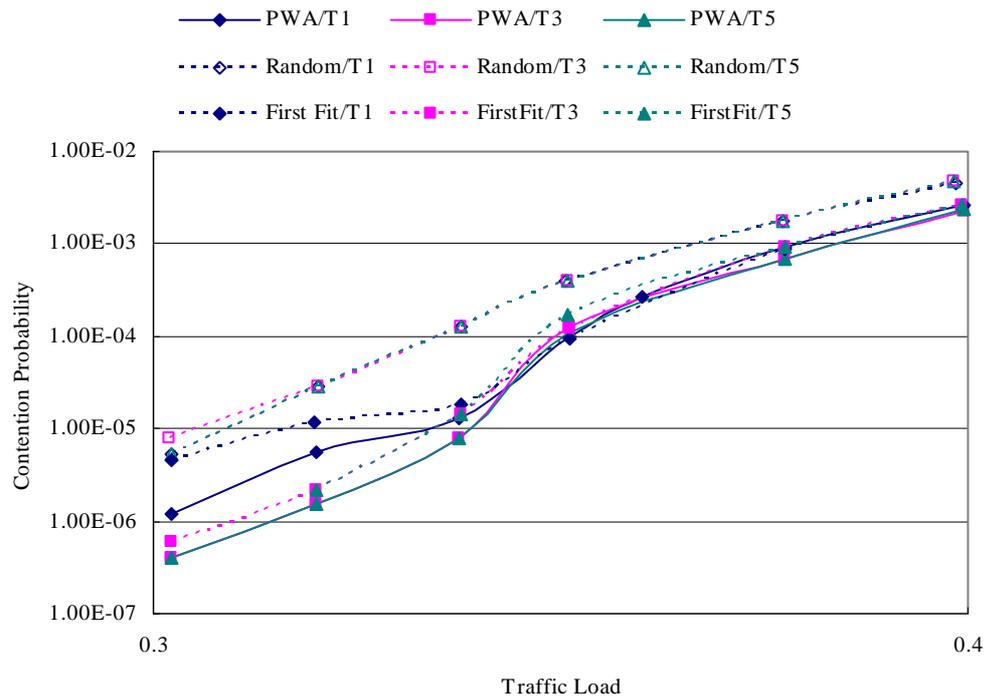


図 3.10  $n$  を変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 (リンク距離: 40 km)

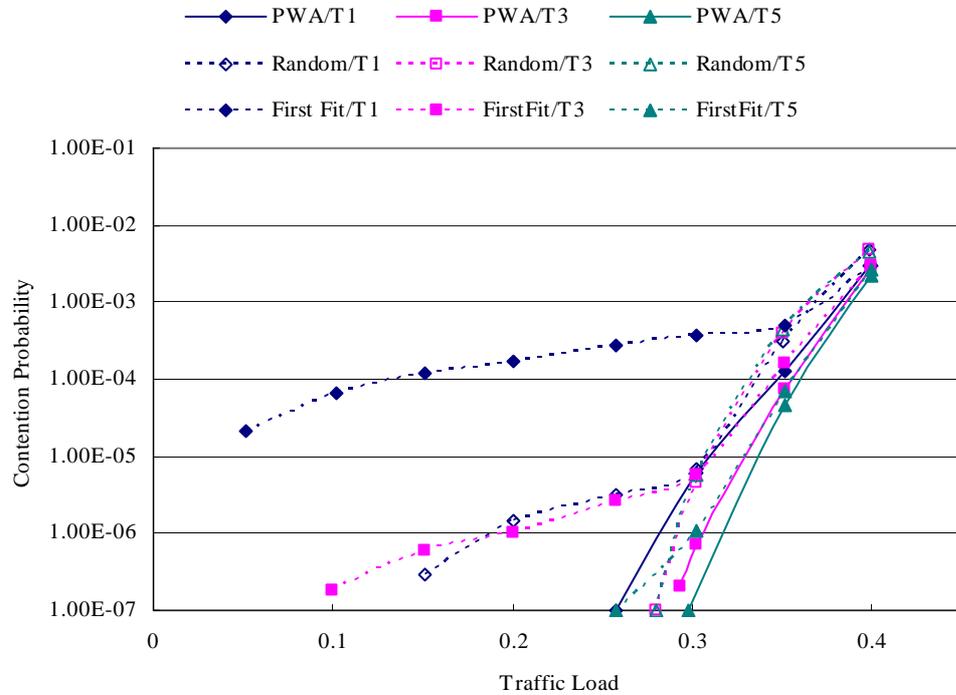


図 3.11 n を変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係 (リンク距離 : 400 km)

### 3.4.3.3 両手法の比較

トラフィック負荷と衝突確率の関係について、フォワード型 PWA 手法とバックワード型 PWA 手法の比較評価を行った結果を図 3.12, 4.13 に示す。図 3.12 はリンク距離 40 km とした場合の結果を、図 3.13 はリンク距離 400 km とした場合の結果を示している。リンク波長数は共に 128 である。図中の FRP, BRP, BRPT3 はそれぞれフォワード型 Selective-4 方式, 予約再試行を行わないバックワード方式, n を 3 としたバックワード方式を示す。図 3.12, 4.13 では、ランダム選択手法とファーストフィット手法のうち、各予約方式において衝突率の低かった方の手法と比較している。図 3.12, 4.13 において、トラフィック負荷 0.4 以下の領域でバックワード方式がフォワード方式よりも高いネットワーク性能を示している。また、リンク距離 40 km の場合の方がリンク距離 400 km の

場合より，バックワード型手法の衝突率とフォワード型手法の衝突率との差が小さい．これは，リンク距離（セットアップ遅延）が小さい場合のバックワード型の利点が大い効果を挙げているためだと考えられる．

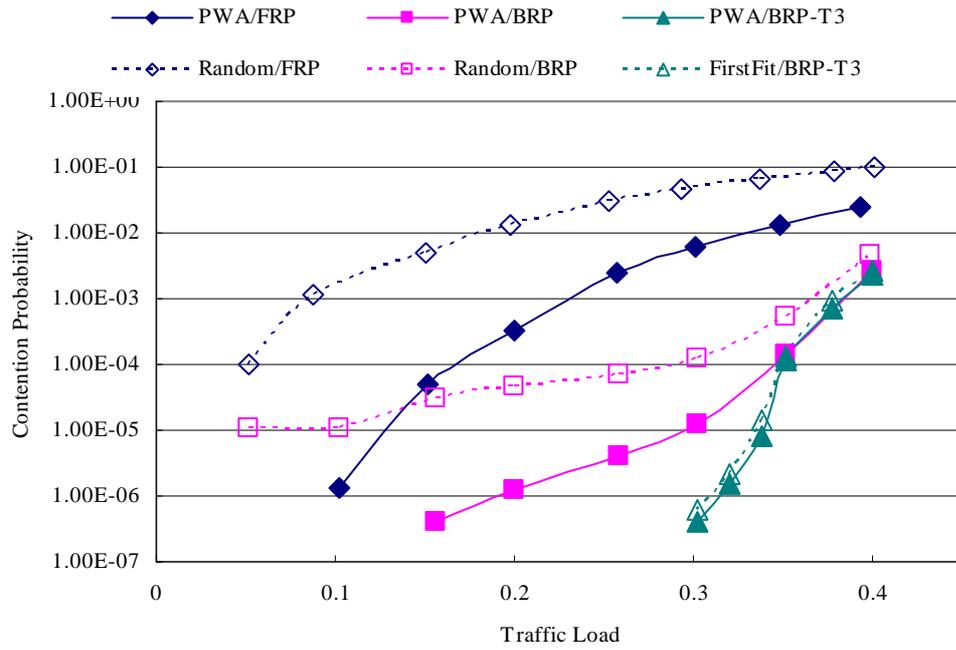


図 3.12 各提案手法における予約衝突確率の比較（リンク距離：40 km）

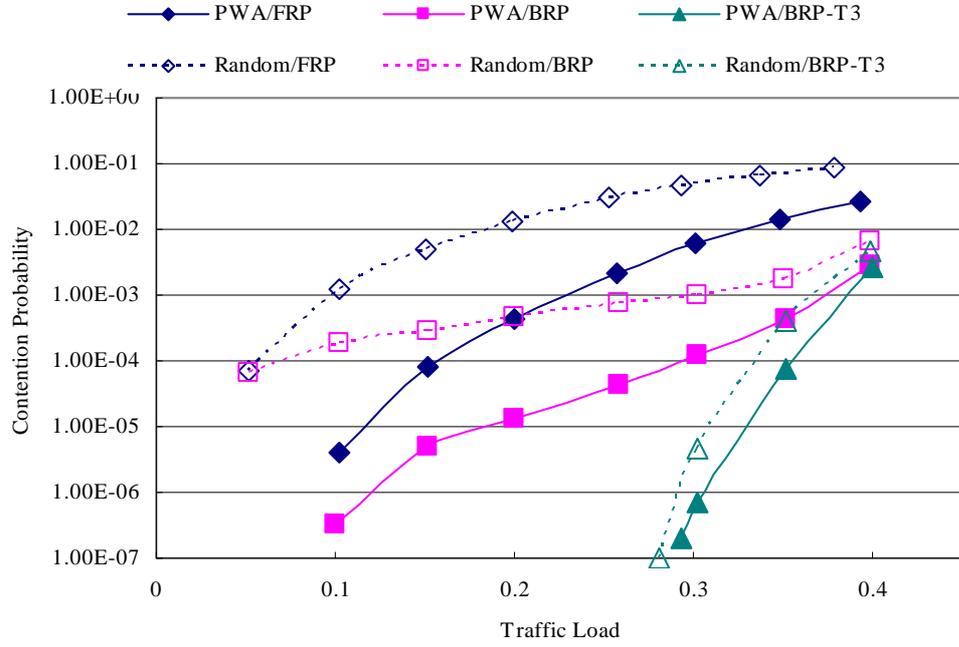


図 3.13 各提案手法における予約衝突確率の比較（リンク距離：400 km）

### 3.4.4 サービス時間の小さいネットワークにおける評価

#### 3.4.4.1 フォワード型 PWA

フォワード型 PWA におけるトラフィック負荷と予約信号の衝突確率(予約が失敗となる確率)の関係を図 3.14 に示す。点線は波長選択手法としてランダム割当を用いた場合の結果を、実線はフォワード型 PWA 手法の評価結果を示している。ここでは、両割当手法共にフォワード型の Selective-4 手法を用いている。図中において、Rand/PWA それぞれの後の数値はリンク当りの波長数を示している。ランダム割当を用いた場合には衝突確率がリンク波長数に依存しないのに対し、PWA 手法を用いた場合にはリンク波長数が増大すると、衝突確率が低下することがわかる。しかし PWA 手法を用いた場合でも、トラフィック負荷が大きい領域においてはリンク波長数の変化による衝突率の差は小さくなる。

次に、トラフィック負荷を変化させた場合のパラメータ  $N$  と衝突確率の関係を図 3.15 に示す。ここでもランダム割当手法と PWA 手法をそれぞれ用いて測定し、リンク当りの波長数は 128 とした。両手法共に、トラフィック負荷が小さい場合には衝突率がもっとも低く得られる  $N$  の値は大きく、トラフィック負荷が大きい場合には  $N$  の最適値は小さくなるのがわかる。ランダム割当を用いた場合、トラフィック負荷 0.3, 0.5, 0.7 における  $N$  の最適値はそれぞれ 9, 7, 5 である。トラフィック負荷の大きい領域において  $N$  の最適値が小さくなるのは、トラフィック負荷が大きい場合に  $N$  を過大とすると、他のトラフィックを妨げる予約が多数発生するためである。しかし、PWA 手法を適用した場合には  $N$  の最適値は 4, あるいは 3 である。PWA の波長優先度情報を用いることでネットワーク内における波長の棲み分けが行われ、過大な波長数を予約する必要なく予約衝突率の最適化が実現されていることがわかる。

$N$  が最適値より小さい場合、予約波長数が少ないために他のコネクションと競合する可能性が高まり、衝突率が高くなる。一方  $N$  が最適値より大きい場合、過剰な波長予約によって他のコネクションの確立を妨げ、結果衝突率が上昇する。したがって  $N$  の最適値が存在する。

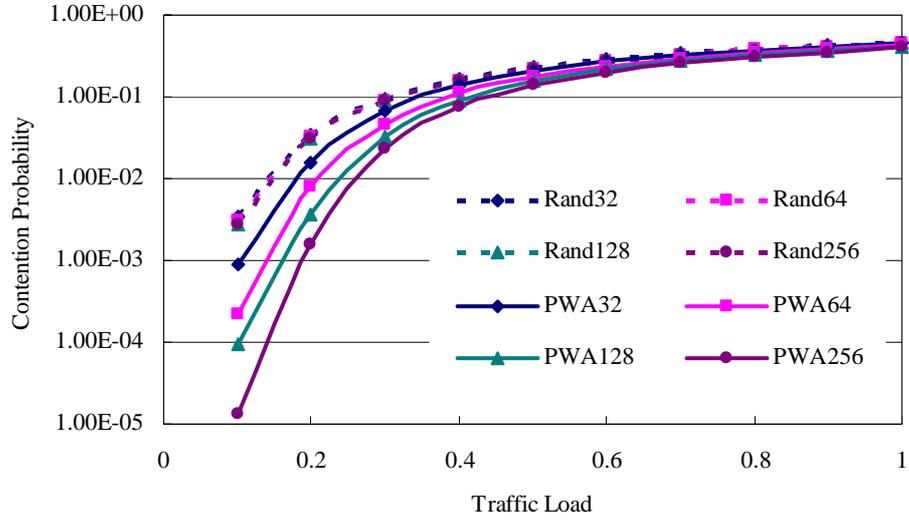


図 3.14 フォワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係

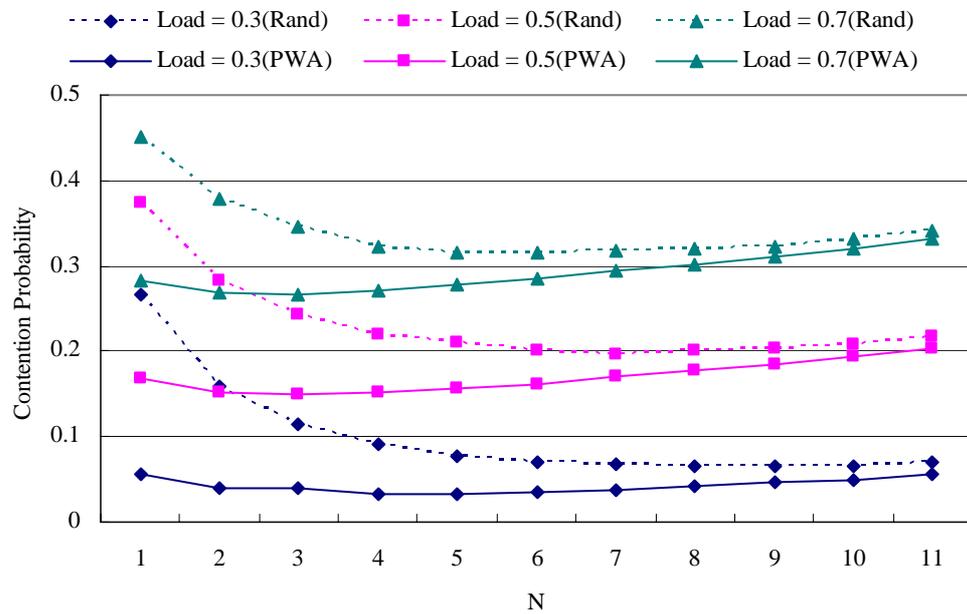


図 3.15 フォワード型手法における予約衝突確率と N の関係

#### 3.4.4.2 バックワード型 PWA

バックワード型 PWA におけるトラフィック負荷と衝突確率の関係を図 3.16 に示す。図 3.14 と同様、実線がバックワード型 PWA 手法の結果を、点線がランダム割当手法を適用した結果を表している。ここでは、宛先ノードにおける予約再試行機能は用いていない (BRP-T0)。フォワード型の結果と同様、ランダム割当適用時には衝突確率はリンク波長数に依存せず、PWA 手法を用いた場合にはリンク波長数が大きいほど衝突率が低減されることがわかる。

次に、バックワード方式の予約再試行機能の評価を行った。ここでも、予約再試行の回数に係わらず、宛先ノードの予約再試行によってコネクション設定が成功した場合には、衝突発生はなかったとして評価した。一方、予約再試行を行った結果波長予約に失敗した場合には、再試行の回数に係わらず 1 回の衝突発生として計測する。

BRP-Tn 手法におけるパラメータ  $n$  を 1, 3, 5 とした場合のトラフィック負荷と衝突確率の関係を図 3.17 に示す。ここでも、ランダム割当手法と PWA 手法とを比較した。図中、表示されていない衝突確率  $1E-05$  未満の領域においては、シミュレーションでの衝突は検出できなかった。評価を行ったトラフィック負荷 0.35 未満の領域においては、 $n$  の値が大きいほど衝突確率が低減されていることがわかる。ただし、 $n$  の値が過大の場合にはコネクション設定遅延が増大する可能性がある。

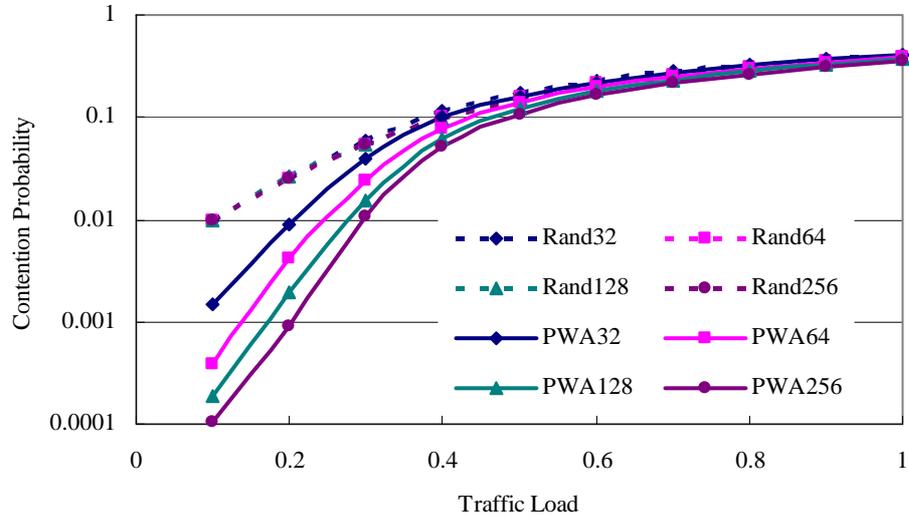


図 3.16 バックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係

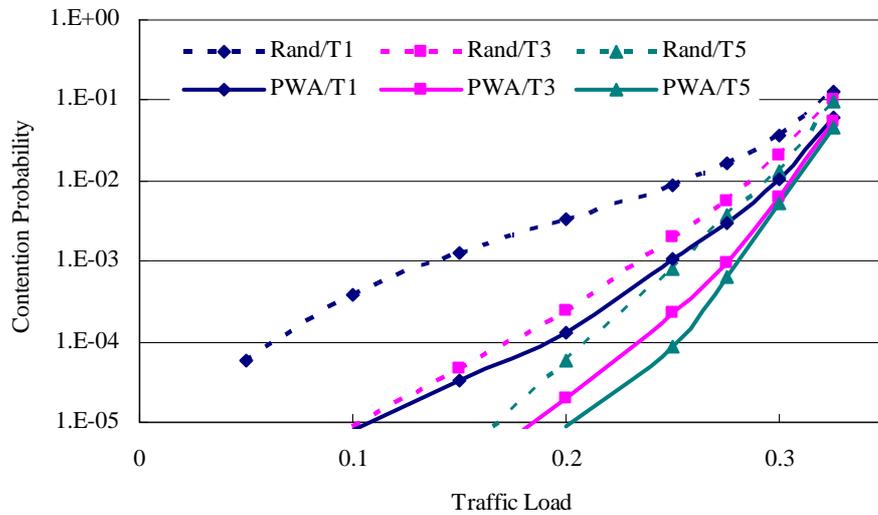


図 3.17 Nを変化させたバックワード型手法における予約衝突確率とトラフィック負荷の関係

### 3.4.4.3 両手法の比較

フォワード型 PWA 手法とバックワード型 PWA 手法の比較評価の結果を図 3.18 ,19 に

示す。図 3.18 はトラフィック負荷と予約信号衝突率との関係を、図 3.19 はトラフィック負荷と平均コネクション設定遅延との関係を示している。ここでは、リンク波長数は 128 とした。図中の FRP, BRP, BRPT3 はそれぞれフォワード型 Selective-4 方式, 予約再試行を行わないバックワード方式,  $n$  を 3 としたバックワード方式を示す。図 3.18, 19 においては、トラフィック負荷の小さい領域を除いて、バックワード方式がフォワード方式よりも高いネットワーク性能を示している。特にコネクション設定遅延に関しては、トラフィック負荷 0.3 以上の領域において、フォワード方式の性能が極端に劣化している。トラフィック負荷が大きい領域においてフォワード方式の性能が劣化するのは、フォワード方式において不要な帯域予約が増大し、帯域利用効率が低下するためである。一方トラフィック負荷の小さい領域においては、シグナリングの往路において利用可能であった波長が予約時に利用不可となる可能性のあるバックワード方式の衝突率に比して、往路において波長予約を行うフォワード方式の方が高い性能を示していることがわかる。

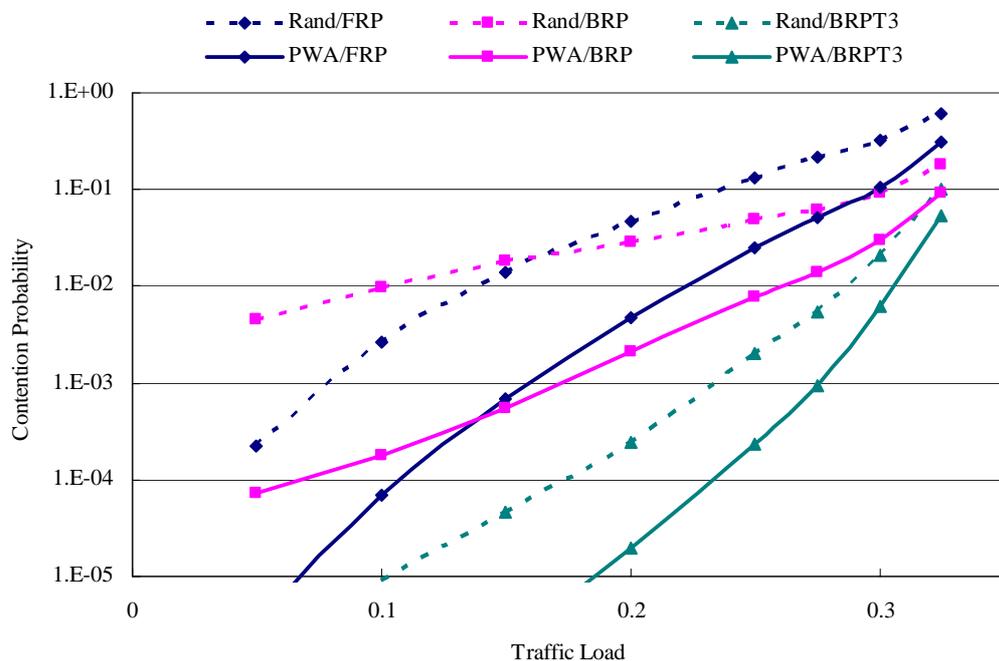


図 3.18 各提案手法における予約衝突確率の比較

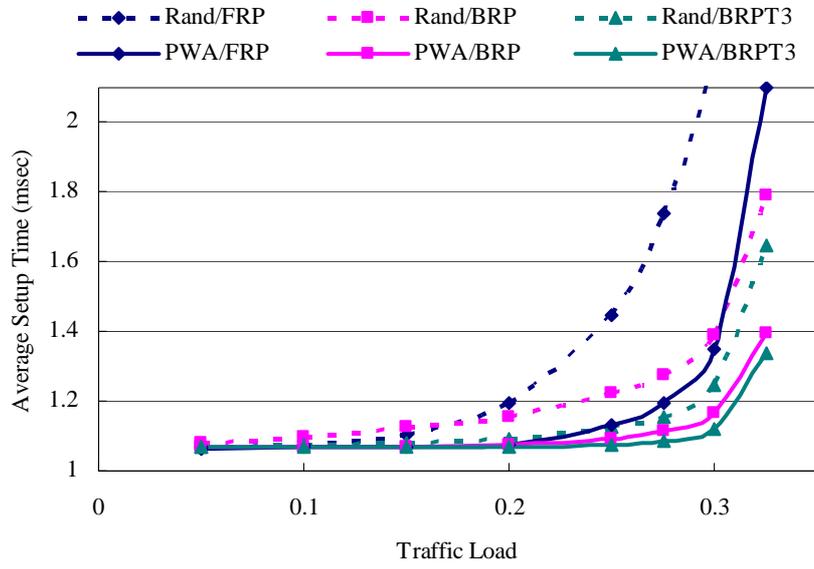


図 3.19 各提案手法における平均コネクション設定遅延の比較

### 3.5 おわりに

本章では、光ネットワークにおける双方向波長予約方式であるフォワード型、バックワード型両手法にPWAによる波長選択方式を適用した手法を示した。フォワード型PWAでは送信ノードにおいて、バックワード型PWAでは宛先ノードにおいて波長優先度情報を保持することによって、過去の伝送結果の統計に基づいた波長選択が可能である。計算機シミュレーションによる性能評価の結果、予約成功率について、PWAによる性能改善が確認された。

## 第4章

# 一方向予約におけるサービスクラス指向波長選択方式

#### 4.1 はじめに

本章では，一方向予約を用いた光バーストスイッチネットワークにおけるサービスクラス指向の波長選択方式である CWA (CoS-oriented Wavelength Assignment) 手法について述べる．CWA は PWA 手法を基にした CoS 提供手法である．

まず，4.2 において光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供の目的を述べる．次に，4.3 においてバーストスイッチネットワークにおけるバースト再送ポリシーに関して説明する．さらに提案手法である CoS 指向波長割当手法（4.4）と Enforced switching（4.5）の詳細を述べ，関連研究（4.6）と比較し，計算機シミュレーションによって性能評価を行う（4.7）．最後にまとめとする．

## 4.2 光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供

今後インターネットにおいては、多種多様なアプリケーションの利用が予想されるため、CoS (Class of Service) 提供は重要な課題である。重要度が大きくリアルタイム性の強いアプリケーションは、高通信品質（低遅延、低ジッタ及び低損失）を要求する。例えばEメールやFTPといったリアルタイム性の低いアプリケーションはベストエフォート型のサービスでも構わないが、リアルタイムオーディオやビデオ会議といった遅延に敏感なアプリケーションに対してはより高品質なサービスを提供できる必要がある。従って、CoS (Class of Service) を行いバースト毎にサービス品質を差別化することが効果的である。

しかしながら、Intserv [36] や Diffserv [37] といった現行のインターネットにおけるサービス差別化手法は、中継ノードにおけるスケジューリングアルゴリズムに基づく手法であり、中継ノードにおけるバッファリングを利用している。第2章で述べたように、バーストスイッチネットワークにおいては中継ノードにおけるバッファリングを想定しない。したがって、Diffserv のような CoS 提供手法は適用できない。

### 4.3 バースト再送ポリシー

バーストスイッチネットワークにおいて、ネットワーク中で破棄されたデータの再送をどのように行うかは重要な課題である。バーストスイッチネットワークがエンド端末まで網羅している場合には、再送問題はトランスポートレイヤで行うか光レイヤで行うかというのみであり、大きな問題ではない。しかし、図 4.1 のようなオーバレイネットワークを想定した場合、エンド端末間では TCP による再送スキームが存在すると考えるべきである。その際、バーストスイッチネットワーク内にて破棄されたバーストの再送を光レイヤで行った場合、TCP の再送スキームと競合する。TCP による再送が開始されるまでに光レイヤにおける再送が完了すれば問題はないが、TCP による再送と光レイヤによる再送が同時発生してはならない。中継のバーストスイッチングノードにおいてエンド・エンドの TTL が把握できる場合には、TCP による再送が開始とともに光レイヤにおける再送を中止することが可能であるが、オーバレイモデルを仮定した場合には困難である。したがって、光レイヤにおけるバースト再送を行わない方が望ましい。

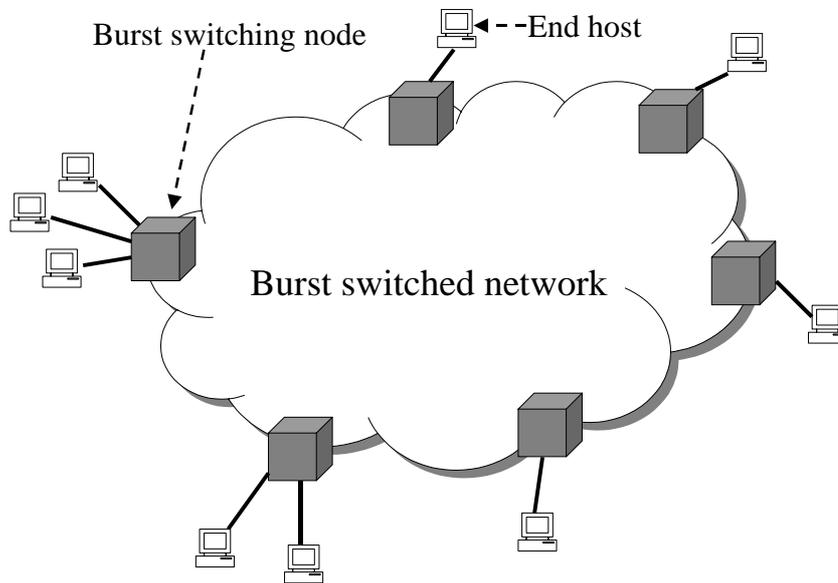


図 4.1 オーバレイモデル

## 4.4 光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供手法

### 4.4.1 CoS 指向波長割当手法 (CWA)

光バーストスイッチネットワークにおいて、CoS を実現するための波長割当手法として、CoS 指向波長割当 (CWA: CoS-oriented wavelength assignment) アルゴリズムを提案する。CWA は光バーストスイッチネットワークにおいて波長を選択的に割当てることにより複数のサービスクラス提供可能なアルゴリズムである。CWA においては、PWA 手法と同様、各送信者はすべての宛先ノードに対して波長優先度情報を保持しており、自身の伝送結果によって優先度を変動させ、学習を重ねる。学習を重ねた後にはネットワークの各ノードの波長優先度情報は定常的になり、送受信ノードペア毎に使用される波長が決定される。

CWA ではさらに、上記の波長棲み分け効果に加えて、CoS 提供を実現する。具体的には、波長割当の際の割当可能波長数をバーストのサービスクラスに応じて差別化する。プライオリティの高いサービスクラスに対してはそのサービスレベルに応じて割当可能波長数を多く与え、優先度上位の波長が使用中であっても他の波長を選択する余地を残すことでバーストの送出失敗を避けることができる。逆にプライオリティの低いサービスクラスに対しては、割当可能波長数を小さく制限することにより送信ノード内でブロックされる確率が相対的に高くなる。以上のようにプライオリティに応じた CoS が実現される。具体的には以下のネットワークパラメータに関して差別化が可能である。

- ・ エンドツーエンドの伝送遅延
- ・ エンドツーエンドのスループット

#### 4.4.1.1 動作概要

図 4.2 の棒グラフはあるネットワークノードにおける特定の宛先ノードへの波長優先度情報を示している。ここで、 $n(i)$  はサービスクラス  $i$  の選択可能波長数を示す。図 4.2 (a) は  $n(i) = 1$  の場合である。すなわち、このサービスクラスのバーストには優先度が最大の波長 1 つのみが割当てられる。具体的には、ノード内においてバーストが発生するとノードはこのバーストに波長割当を行う。その時点での波長優先度が最大の波長  $w_1$

がアイドル状態のとき，バーストは  $w_1$  で送信される．しかし  $w_1$  が使用中 (busy) だったとき，バーストはブロックされる．一方図 4.3 (b) に示す例では  $n(i) = 4$  であるため，波長優先度が最大の  $w_1$  が使用中だった場合には次に優先度の大きな波長  $w_2$  を調査する． $w_2$  が未使用の場合にはバーストは  $w_2$  で送信され，使用中の場合は  $w_3$  を調査する．このように最大で 4 個の波長を選択可能であり，優先度上位 4 つの波長  $w_1-w_4$  が全て使用中の場合にのみバーストは送信ノードでブロックされる．従ってブロッキング確率は図 4.2 (a) よりも低い．このようにバーストのプライオリティに応じて  $n(i)$  を設定することで CoS が可能である．

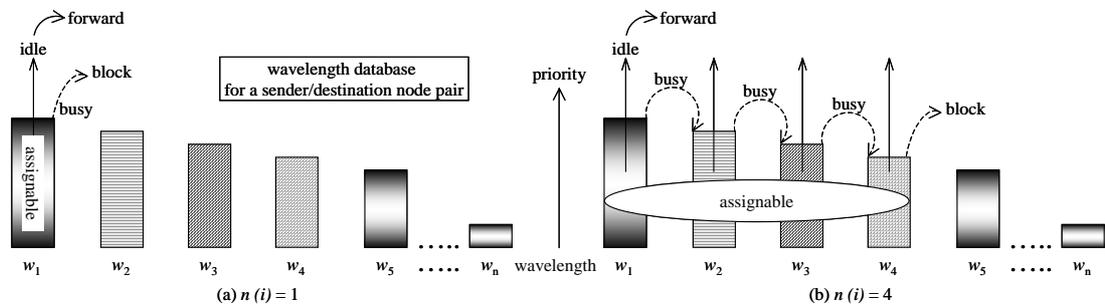


図 4.2 CWA の基本原理：割当可能波長数  $n(i)$  の差別化

#### 4.4.1.2 波長割当手順

本手法の波長割当手順は以下ようになる．送信ノード  $x$  はすべての宛先ノード  $y$  に対し波長優先度情報及び選択可能波長数  $n(i)$  を保持する．各バーストには発生時にサービスクラス  $i$  が与えられ， $i$  に対する選択可能波長数を  $n(i)$  とする．波長割当の手順は以下の 2 つ，すなわち波長割当と波長優先度の更新である．プロセス毎に述べる．

##### A 波長割当

送信ノード  $x$  が宛先ノード  $y$  にバーストを送信する際， $x$  は  $y$  に対する波長優先度情報を検索し最も優先度の大きい波長が現在利用可能かどうかを調査する．利用可能であればその波長でバーストを送信し，波長が他のバーストにより使用中である場合には  $n(i)$  回を上限とし利用可能な波長が検出されるまで優先度順に波長を検索する．その結果利用可能な波長が検出された場合には波長を割当てる．波長優

先度上位  $n(i)$  個の波長が全て利用できない場合にはそのバーストは送信ノード内でバッファされる． $n(i)$  の値はバーストのプライオリティに応じて大きな値を与える．

#### B 波長優先度の更新

一方向予約方式における光バーストスイッチネットワークでは，バーストが宛先ノードに到着した場合には *Ack* パケットが，バーストが途中でブロックされた場合にはその中継ノードから *Nack* パケットが制御チャネルによって送信ノードに通知される．波長優先度の更新はこれらの応答パケットが到着した際に行われる．波長優先度の更新方式は2.4と同様である．すなわち，バースト送信が成功した場合，波長優先度は(2.1)式に基づいて高くなり，バースト送信が失敗した場合には(2.2)式に基づいて波長優先度が低くなる．

なお，この送信失敗による優先度情報更新過程は送信ノードが実際にバーストを送信したときのみ実行される．すなわちバーストに波長割当アルゴリズムを適用し，波長優先度が上位であるにも関わらず使用中のため割当てられなかった波長の優先度は変化させない．あるバーストがネットワーク中で別のノードから送信されたバーストと衝突した場合にはその波長の優先度を小さくすることで波長の棲み分けが達成されるが送信ノード内でブロックされた場合には他のノードの波長使用状況との相関がないため波長棲み分けとは無関係だからである．以上の処理を各バーストに適用する．

送信ノード  $x$  が宛先ノード  $y$  へのバーストの送信に成功すると，伝送に使用された波長  $w$  の優先度が相対的に高くなるため，その後ノード  $x$  は宛先  $y$  のバースト送信に波長  $w$  を利用する傾向が強くなる．逆に， $x$  の近隣のノードが宛先  $y$  のバースト送信に際し同じ波長  $w$  を使用した場合， $x$  が  $y$  へのバースト送信に波長  $w$  を使用する頻度が高いため，このバーストのブロッキング確率は高くなる．従って他のノードは  $w$  の優先度を小さくし， $w$  以外の波長を割当てようになる．このように各ノード内で異なる優先度情報が形成されネットワーク内での波長の棲み分けが達成される．

#### 4.4.2 Enforced switching

4.4.1で述べたCWAは、送信ノード内で発生するバーストのサービスクラス間にて差別化を行うアルゴリズムである。プライオリティの高いバーストは優先的にネットワーク中に送られ、プライオリティの低いバーストは送信ノード内で送失敗となる確率を相対的に大きくする。従って現状では送信ノード内におけるCoSのみであり、ネットワーク中の中継ノードにおいてはCoSに関する処理をしていない。すなわち、図4.3のように中継ノードにおいてプライオリティの低い(クラス0)バースト(B(0))の制御パケット(CP)に続いてプライオリティの高い(クラス1)CPが到着した場合、B(0)が次ホップノードに転送される。B(1)はプライオリティが高いにもかかわらず、プライオリティの低いB(0)によってブロックされる。従って、CWAのみではネットワーク中のバーストブロッキング確率を差別化することができない。

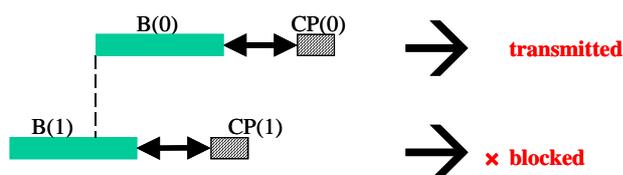


図 4.3 CWA の問題点：

**B(1) はプライオリティが高いにもかかわらず、先着の B(0) によってブロックされる**

本項では、ネットワーク中のバーストブロッキング確率を差別化する enforced switching を提案する。CWA と enforced switching を組み合わせることにより、以下のネットワークパラメータに関する差別化が可能となる。

- ・ エンドツーエンドのバースト伝送遅延
- ・ ネットワーク中のバーストブロッキング確率

以下で具体的に説明する。バーストブロッキング確率差別化のためには、上位クラスのバーストが、下位クラスのバーストが原因でブロックされることを防止すればよい。すなわち、ある中継ノードにおいて、下位クラスの制御パケットが到着した際に、遅れ

て到着した上位クラスのバーストを転送できればよい。ただし，以下では簡単のために制御パケットを受信後，スイッチングに必要な時間は0とし，サービスクラス数は2としている。サービスクラス1を上位クラス，クラス0を下位クラスとする。すなわち，中継ノードにおいてCP(0)により出力ポートが予約されている場合であっても，後からCP(1)が到着した際にはB(1)を優先的に出力できればよい。

図4.4に示すように，CP(0)に遅れてCP(1)が到着し，B(0)とB(1)競合する場合，B(1)を送出できるようスイッチの予約を行えばよい(Enforced switching)。その際B(0)はこのノードでブロックされるが，B(1)は送みされる。この手法によりB(1)がB(0)によってブロックされる確率は減少する。しかし，先に到着していたクラス0の制御パケットCP(0)は次ホップノードに転送される。この制御パケットは，宛先ノードに到着後，データ損失が確認される。CP(0)は続いて伝送されるはずのバーストデータがブロックされているにもかかわらず，ネットワーク資源の予約を行うため，帯域の浪費を招く。ただしenforced switchingを適用しているため，この制御パケットはクラス1のトラフィックを妨害することはない。また，光バーストスイッチネットワークは広帯域伝送を想定しているため，このような制御パケットの影響は小さいと予測できる。

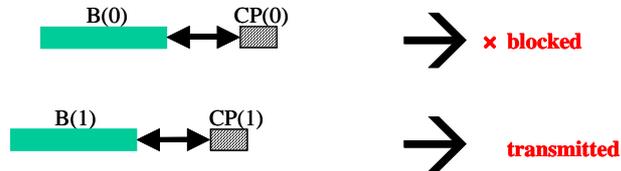


図4.4 Enforced switching:

先着のB(0)の予約がなされていても，B(1)は次ノードへ転送される

## 4.5 関連研究

光バーストスイッチネットワークにおける CoS 提供手法に関する他研究を挙げ、その問題点を指摘する。ここでは、オフセット時間による手法[38,39]に関して述べる。

OBS では、経路情報を持った制御パケットとデータバーストが別チャネル（波長）で伝送される。その際、制御パケットとデータバーストの時間間隔をオフセット時間としている。オフセット時間は中継ノードにおいて制御パケットが処理される時間を考慮して与えられるが、[38,39]では、オフセット時間をサービスレベルに応じた値だけ長く設定することにより CoS を実現している。オフセット時間をデータの優先度により大きくすることで、中継ノードにおいて優先的なスケジューリングが可能となり、バーストのブロッキング確率が低減され、高いサービス品質を保証する。

図 4.5 はクラス数を 2 とした場合のこの手法の概念図である。クラス 1 が上位クラス、クラス 0 が下位クラスである。図 4.5 (a) は、クラス 0 の制御パケット (CP (0)) が先に到着した場合である。両クラスのオフセット時間が同一であれば、後から到着するクラス 1 のバースト (B (1)) はブロックされてしまう。しかし、クラス 1 のオフセット時間を長く設定することによって、B (0) の転送後 B (1) を転送することが可能となる。一方、図 4.5 (b), (c) のように CP (1) が先に到着する場合、B (1) の予約が先になされるため B (1) は確実に転送される。後から到着するクラス 0 のデータバーストは、図 4.5 (b) のように B (1) の到着前に転送が終了できる場合、次ホップノードに転送され、図 4.5 (c) のように B (1) の転送を妨げる場合にはそのノード上でブロックされる。

オフセット時間による手法によって差別化されるネットワークパラメータは、

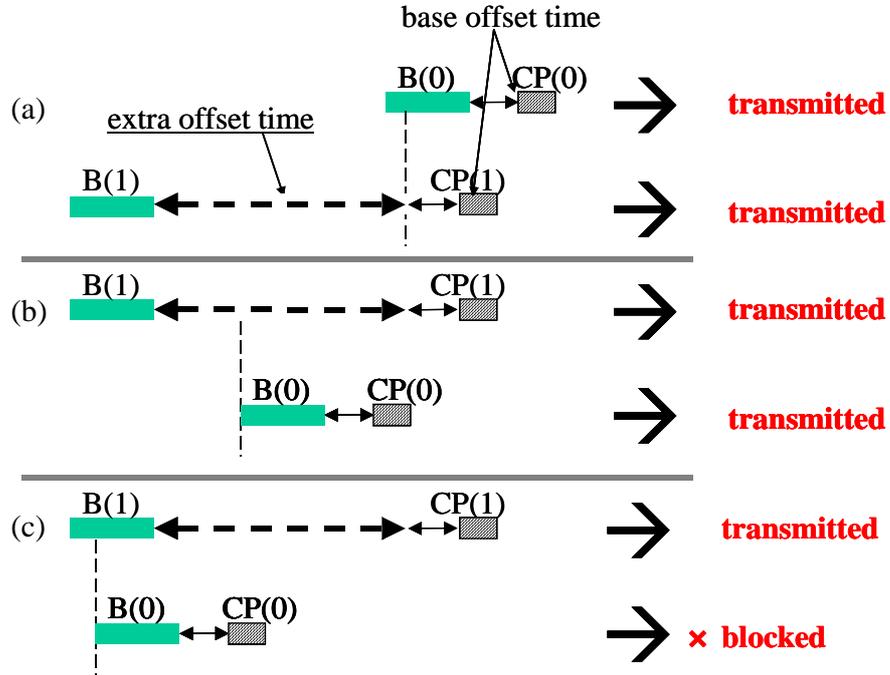
- ・ ネットワーク中のバーストブロッキング確率

である。

この手法の問題点を以下に挙げる．

- ・ バーストのサービス品質が伝送ホップ数に影響される．オフセット時間はホップ数を重ねる度に小さくなるため，バーストのプライオリティがホップ毎に小さくなってしまう．
- ・ プライオリティの高いバーストには大きなオフセット時間が与えられるため，エンドツーエンドのバースト伝送遅延が増大する．

以上のような問題はオフセット時間によって CoS 実現を試みたために発生する．送信ノードにおいて，送受信ノード間のリンク遅延，及び中継処理遅延を考慮してオフセット時間を与えることが可能な場合もあるが，その場合であっても異なるノードから送出されたバースト間でのオフセット時間は異なり，公平性を提供できない．従って同手法による効果が期待通り現れる保障はない．



$B(i)$ : data burst with service class  $i$   
 $CP(i)$ : control packet of  $B(i)$

- (a)  $B(1)$  arriving after  $B(0)$  is transmitted because of extra offset time.
- (b) Both  $B(0)$  and  $B(1)$  are transmitted because  $B(1)$  can be transmitted after transfer of  $B(0)$ .
- (c)  $B(1)$  is transmitted and  $B(0)$  is blocked because of extra offset time. ( $B(1)$  is blocked without extra offset time.)

図 4.5 オフセット時間による CoS

## 4.6 性能評価

### 4.6.1 評価モデル

シミュレーションにおいて想定したネットワークモデルは以下である。

- ・ ネットワークトポロジはメッシュ型とする。
- ・ 波長変換は行わない。すなわちバーストは送信ノードから宛先ノードまで同一の波長で伝送される。
- ・ バーストスイッチにおける光バッファはない。
- ・ すべてのファイバリンクの持つ波長数は等しい。
- ・ アクセスノードとルーティングノードの区別はない。すなわち全てのノードはバーストの生成、送受信、及び各種の中継処理を行う。
- ・ ノードは自身の出力ポートの波長が未使用であるか使用中であるかを知ることができる。
- ・ ルーティングプロトコルは Dijkstra Protocol を用いる。すなわち、最小ホップ数の経路の中からランダムに一つを選択し、固定する。

表 4.1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
ノード数	16 (4x4 の格子型)
波長数	64 ~ 254
リンク長	200 km
リンク帯域	10 Gbps (波長当り)
平均バースト長	1 MB
サービスクラス	クラス 0 (優先度低) クラス 1 (優先度高)
Q の最大値	10

シミュレーションパラメータは表 4.1 のように設定した。クラス数は 2 とし、それぞ

れクラス1（プライオリティ高）、クラス0（プライオリティ低）とした。それぞれのサービスクラスを持つバーストの発生確率は等しい。バースト生成は任意の送信・受信ノード間でランダムに発生し、バースト長はある平均値を持った指数分布とする。

ノード数に対する波長数が大きくなると、送受信ノード間のペア数全ての波長がユニークに決まり、一旦波長の棲み分け過程が終了した後は定常性が極めて強くなる。また、本シミュレーションでは4.3で述べた問題を考慮し、中継ノードでブロックされたバーストの再送は行わないこととする。

#### 4.6.2 評価項目

シミュレーションにおいて、性能評価のための評価項目、及びその他ネットワークパラメータの定義を行う。

評価項目としてバーストブロッキング確率、スループット及びエンドツーエンドのバーストの伝送遅延を用いた。比較のため、全てのバーストに対する割当可能波長数を同一としたネットワークにおいてもシミュレーションを行った（以下、“クラスレス”と表現する）。また、シミュレーションを行う上ではネットワークが定常状態に達するに十分な量のバーストがネットワーク上を流れてから各パラメータの測定を開始する。

##### （バーストブロッキング確率）

バーストブロッキング確率は、中継ノードにおけるブロッキングのみを対象としている。バーストブロッキングは、送信ノード内において割当てべき波長がない場合と、中継ノードにおいて他のバーストと競合した場合のいずれかで発生する。ここではネットワーク中のバースト損失率の評価を行うため、送信ノード内におけるバーストブロッキングは測定の対象外とした。バーストブロッキング確率は次式で計算される。

$$\text{ブロッキング確率} = \frac{\text{中継ノードでブロックされたバースト総数}}{\text{ネットワーク中に送出されたバースト総数}} \quad (4.1)$$

### (スループット)

スループットも，バーストブロッキング確率と同様ネットワーク中に送出されたバーストのみを対象とする．計算式は次式となる．

$$\text{スループット} = \frac{\text{宛先ノードに到着したバースト総量}}{\text{ネットワーク中に送出されたバースト総量}} \quad (4.2)$$

### (伝送遅延)

伝送遅延は，実遅延と理想遅延の比である Delay ratio により評価する．実遅延とは，バーストラフィックが発生してからネットワーク中に送出され，宛先ノードへ到着するまでの遅延時間を示す．理想遅延は，バーストが発生後，すぐに送出され宛先ノードへ到着した場合の遅延時間である．本シミュレーションにおいては中継ノードにおいてブロックされたバーストの再送は想定しておらず，また中継ノードにおけるバーストの処理遅延はないため，Delay ratio はバーストラフィック発生から波長が割当てられるまでの遅延を示す．Delay ratio の計算式を示す．

$$\text{Delay ratio} = \frac{\text{実遅延の平均値}}{\text{理想遅延の平均値}} \quad (4.3)$$

### (トラフィック負荷)

本シミュレーションにおけるトラフィック負荷は，単位時間に発生するバースト総量と，ネットワーク中の全帯域に対する割合とする．

#### 4.6.3 バーストブロッキング確率

トラフィック負荷とバーストブロッキング確率の関係を図 4.6～4.8 に示す．各サービスクラスの割当可能波長数は，それぞれ  $n(0)$  を (リンク波長数/16)， $n(1)$  を (リンク波長数/4) とした．また，クラスレスネットワークにおける割当可能波長数は  $n(0)$  と  $n(1)$  の平均値とした．ここで，ES は Enforced Switching を適用したネットワークを示している．

CWA アルゴリズムのみを適用し, enforced switching を適用しないネットワークにおけるバーストブロッキング確率は, クラス0よりクラス1の性能が全体的に劣化している。これは, CWA のみで CoS を提供しようとするため発生する。CWA は伝送遅延の差別化を目的としたアルゴリズムであり, クラス1のバーストは優先度が大きな波長が利用できない場合, 優先度の比較的小さな波長を利用した伝送が可能となる。この手法により伝送遅延の差別化は可能となるものの, 優先度の低い波長を利用することは, ネットワーク中におけるブロッキング確率の上昇を招く。

一方, enforced switching を適用したネットワークにおいては, バーストブロッキングの差別化も実現されている。すなわち, クラス1のブロッキング確率はクラス0の値よりも全体的に低くなっている。

また, 割当可能波長数をクラス1とクラス0の平均値としたクラスレスネットワークにおけるブロッキング確率の値は, 両クラス間にあり, 本手法を適用したことによるネットワーク性能の劣化はないと判断できる。

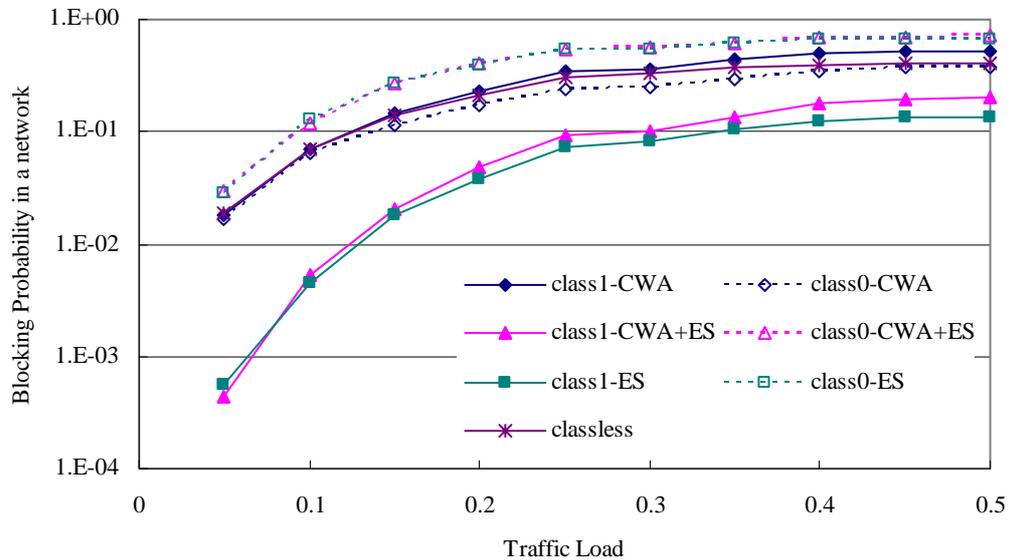


図 4.6 バーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷 (波長数 64)

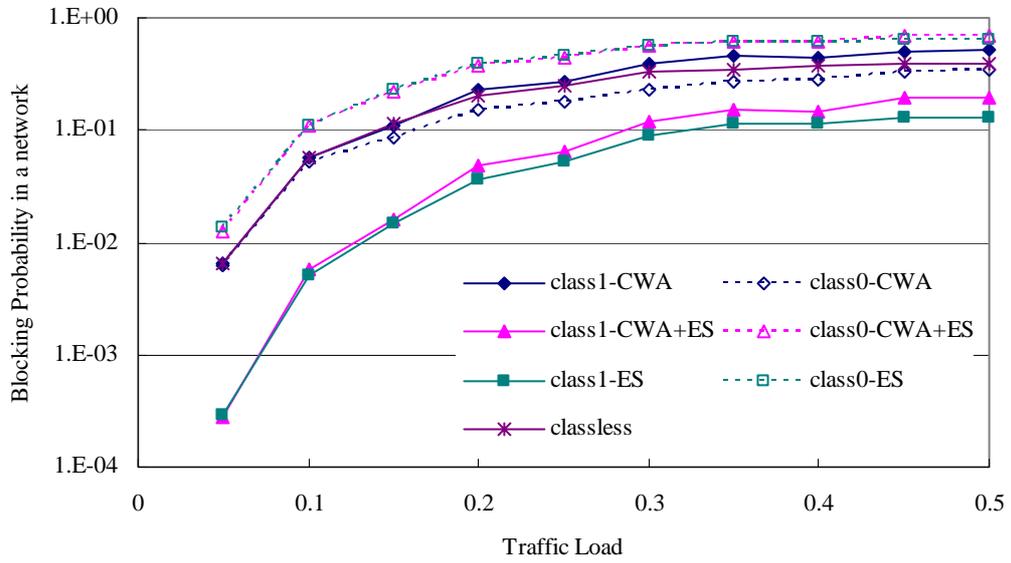


図 4.7 パーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷 (波長数 128)

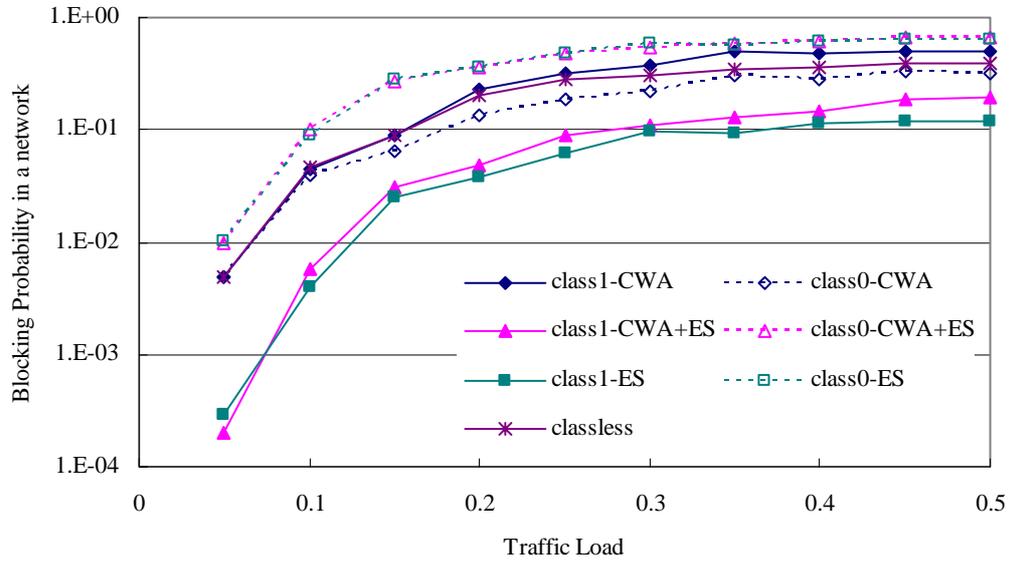


図 4.8 パーストブロッキング確率 vs. トラフィック負荷 (波長数 256)

#### 4.6.4 スループット

図 4.9~4.11 は、ネットワークスループットとトラフィック負荷の関係を示している。各サービスクラスの割当可能波長数は 4.6.3 と同様、それぞれ  $n(0)$  は (リンク波長数/16)、 $n(1)$  は (リンク波長数/4) である。全体的にバーストプロッキング確率と同様の結果を示している。すなわち、CWA のみを適用したネットワークにおいては、クラス 0 がクラス 1 より高い値を示している。また、enforced switching を適用したネットワークにおいては、クラス 1 とクラス 0 との差別化が実現している。CWA のみを適用した場合にクラス 1 の性能が劣化している原因は 4.6.3 で述べたものと同様である。

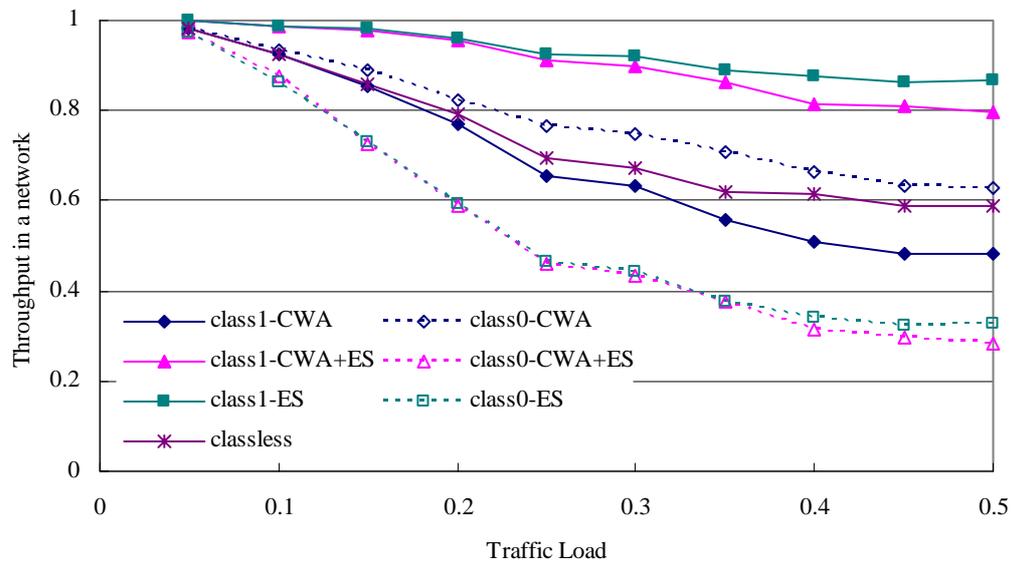


図 4.9 ネットワークスループット vs. トラフィック負荷 (波長数 64)

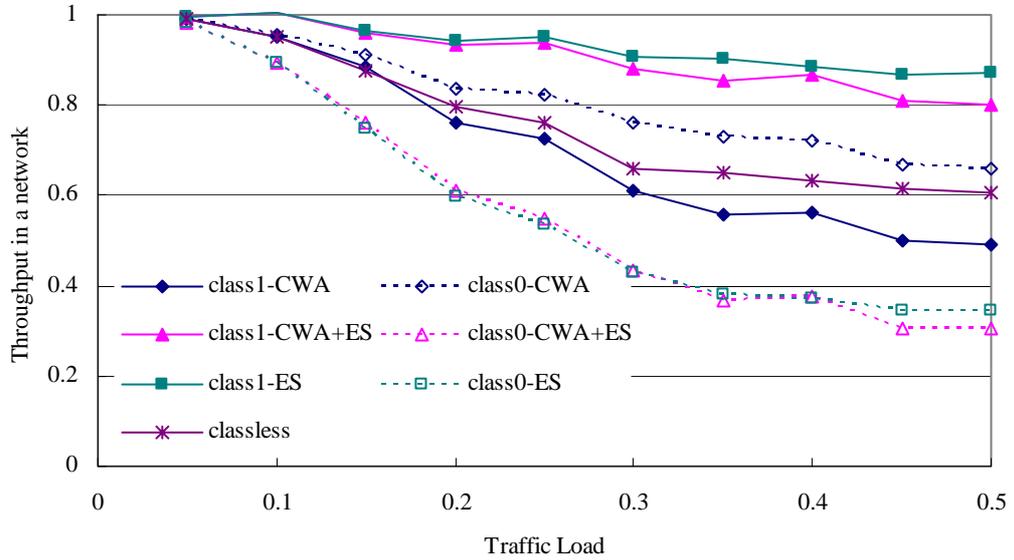


図 4.10 ネットワークスループット vs. トラフィック負荷 (波長数 128)

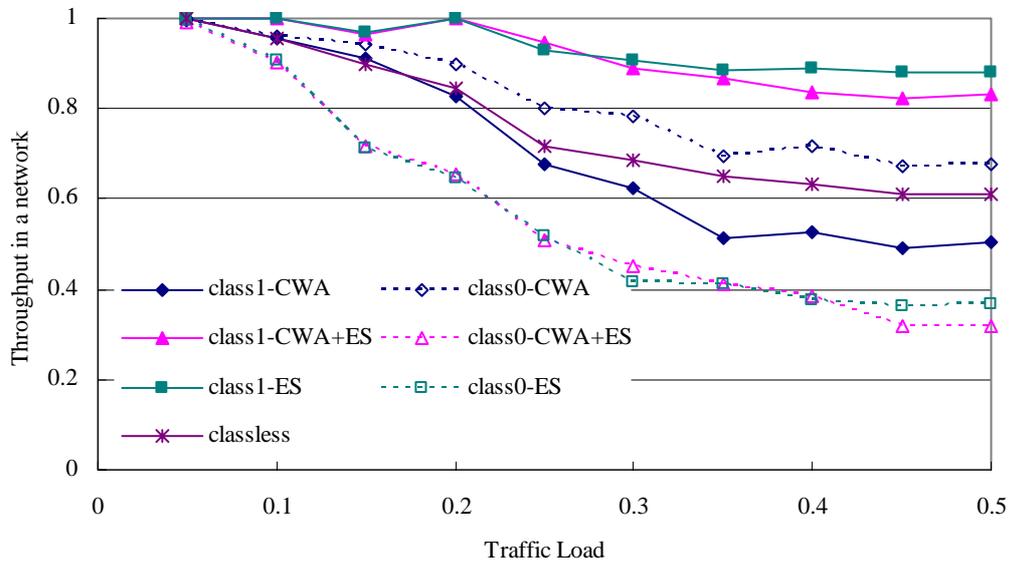


図 4.11 ネットワークスループット vs. トラフィック負荷 (波長数 256)

#### 4.6.5 伝送遅延

図 4.12 ~ 4.14 は伝送遅延 (Delay ratio) とトラフィック負荷の関係を示している。各サービスクラスの割当可能波長数は 4.6.3 と同様である

伝送遅延に関しては, CWA による差別化が実現されている。これは, enforced switching 機能を付加するかどうかに関わらず現れる効果である。Enforced switching を適用することにより, クラス 1 の伝送遅延には影響がないものの, クラス 0 の遅延は小さくなっていく。Enforced switching を適用したネットワークにおいては, クラス 0 のバーストはネットワーク中でブロックされる確率が高くなる。ブロックされたバーストは delay ratio の計算には用いられていないため, このような結果になったと考えられる。

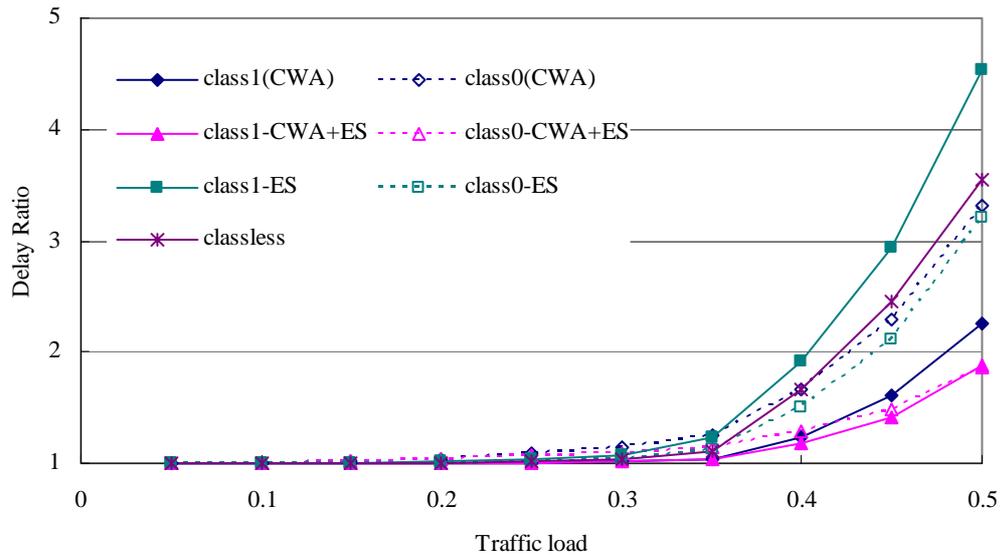


図 4.12 伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷 (波長数 64)

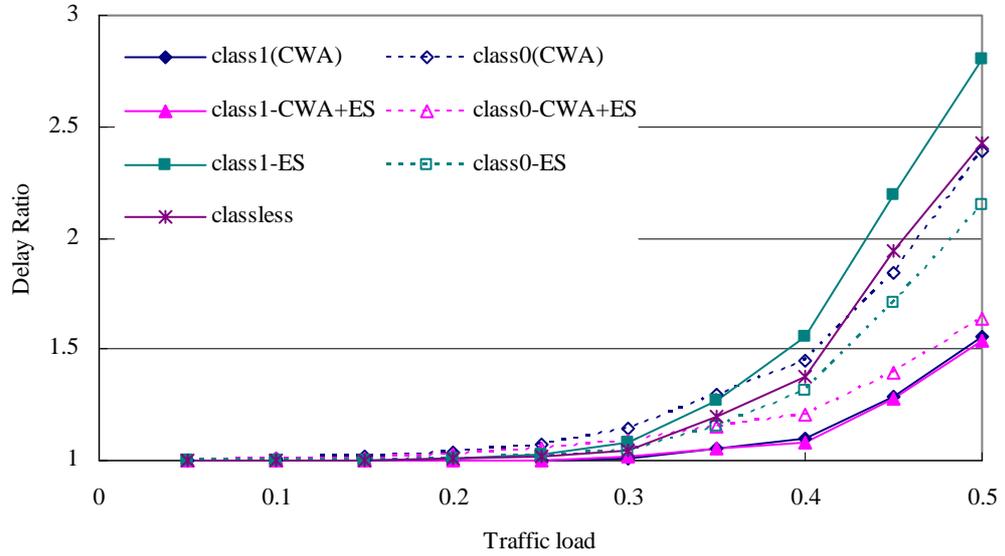


図 4.13 伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷 (波長数 128)

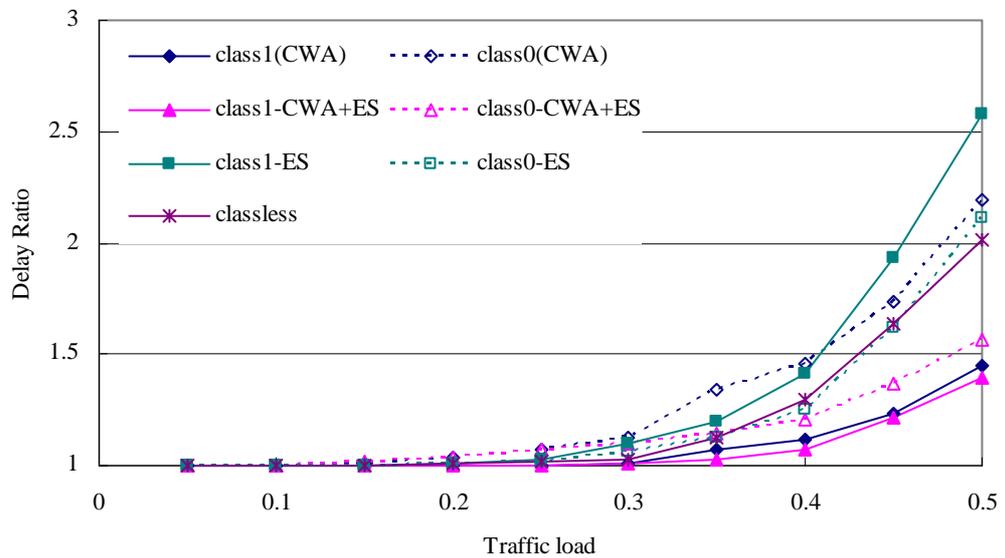


図 4.14 伝送遅延 (Delay ratio) vs. トラフィック負荷 (波長数 256)

#### 4.6.6 割当可能波長数

ネットワークパフォーマンスと同時に、クラス1の割当可能波長数に関する検討も行った。ここでは、リンク波長数を64、クラス0の割当可能波長数 $n(0)$ を4とし、 $n(1)$ の値を6から64まで変化させた場合のブロッキング確率、及び伝送遅延を測定した。それぞれのトラフィック負荷との関係を図4.15、4.16にそれぞれ示す。

図4.15は、ブロッキング確率とトラフィック負荷の関係を示している。 $n(1)$ が大きい場合、トラフィック負荷の増大とともにクラス1のバーストブロッキング確率が劣化していることがわかる。これは、トラフィック負荷の増大により、優先度の低い波長を利用してバースト送信を行う機会が増加するためである。従って、ネットワーク中の中継ノードにおいて、他のバーストと衝突する確率が高くなる。すなわち、バーストブロッキング率を重視する場合、 $n(1)$ の値は小さい方がよい。

図4.16は、バースト伝送遅延の比を示している。CWAの効果により割当可能波長数が大きい程、送信ノードからバーストが送出される確率が高くなりバーストの伝送遅延が小さくなることが確認された。しかし、トラフィック負荷が0.4以下、 $n(1) > 16$ の範囲では伝送遅延は変化しない。バースト伝送遅延の観点においては、 $n(1)$ を大きくした方がよいが、利用可能な全波長を割当てて必要はないことが確認できる。また、 $n(1) = 6$ の場合、トラフィック負荷が0.3より大きい領域において、伝送遅延が下位クラスよりも大きくなる。ただし、伝送遅延の測定には送信成功となったバーストのみを対象としていることに注意されたい。すなわち、ネットワーク中でブロックされたバーストは換算されていない。従って、バーストの再送を考慮し、全てのバーストを対象に伝送遅延を測定した場合、このような逆転現象は発生しない。

以上より、バーストブロッキング確率、及び伝送遅延に着目した場合、両パラメータを差別可能なクラス1の割当可能波長数を適切に選択することが必要である。ネットワーク設計の際、想定されるトラフィック負荷や運用ポリシーを考慮した上で与える必要がある。

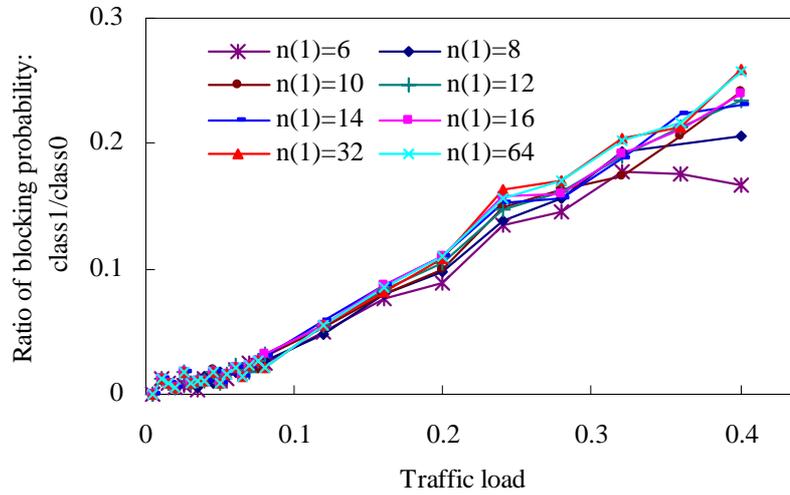


図 4.15  $n(1)$  を変化させた際のブロッキング確率 vs. トラフィック負荷

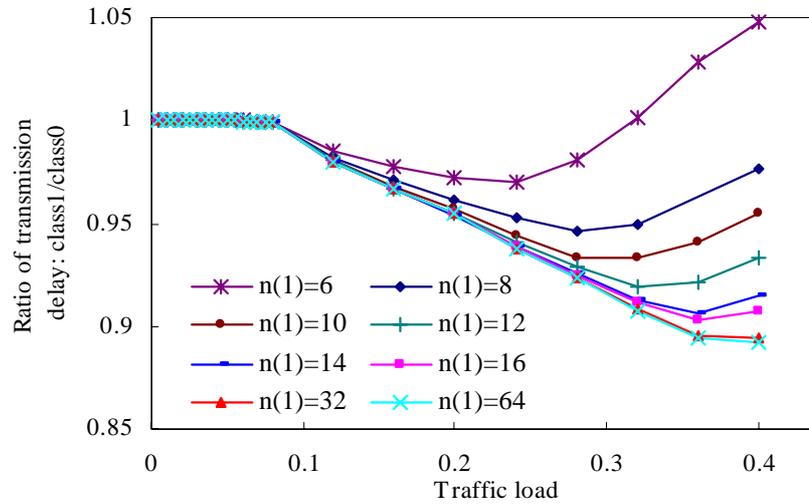


図 4.16  $n(1)$  を変化させた際の伝送遅延 vs. トラフィック負荷

#### 4.7 おわりに

本章では，光バーストスイッチネットワークにおけるサービス品質提供手法として，CWA アルゴリズムを提案した．CWA により，エンド・エンドのバースト伝送遅延が差別化可能となる．また，CWA の補完手法として，中継ノードにおいて上位クラスのバーストを優先する enforced switching も提案した．Enforced switching によって，中継ノードにおけるバーストブロッキング確率も差別化可能となるため，上記 2 手法を組み合わせることで，統合的な CoS 提供が可能となる．

また，本章ではオフセット時間による CoS を目指した関連研究を紹介した．同手法では，中継ノードにおけるバーストブロッキング確率の差別化は可能となるものの，上位クラスの伝送遅延増大が避けられない．また，公平性に関して問題を抱えている．以上から，CWA の優位性を説明した．

## 第5章

# 光バーストスイッチネットワークテスト ベッドの構築と実証実験

## 5.1 はじめに

本章では、OBS を適用したネットワークテストベッドの構成、及び設計した光バーストスイッチノードと光バースト送受信部の構成を示す。本研究において提案した各波長割当方式を OBS ネットワーク上に実際に適用するためには実ネットワーク上での動作確認及び問題点の抽出が不可欠であり、性能評価のための OBS ネットワークテストベッド構築が必要である。

本章では、まず構築したテストベッドネットワークの概要について述べる。次にテストベッドを構成する OBS ノードについて詳述し、最後に本テストベッドにおいて行ったバーストの伝送実験について述べる。

## 5.2 光バーストスイッチネットワークテストベッド

第3, 4章で示したPWAをOBSネットワーク上に実際に適用するためには実ネットワーク上での動作確認及び問題点の抽出が不可欠である。特に, 第4章で示した一方向予約方式は技術的課題が多く, 実ネットワーク上での検証は未だ十分に為されていない[40-44]。そこで本研究では, 一方向予約方式を適用したネットワークテストベッドを構築した。本テストベッドは開発手法の性能評価を目的とするものであり, 現在入手可能なデバイスを用いて構成する。

本テストベッドに要求される機能を以下に述べる。

- ・ バーストの生成機能。ネットワークのエッジノードにおいては, 同一の宛先を持つデータパケットを集約してバーストを生成する。また, 宛先のエッジノードにおいてはバースト内のパケットを復元する。
- ・ 専用チャネルを用いた波長予約機能。データバーストとその制御パケットはそれぞれ異なる波長(チャネル)上を伝送される。
- ・ バーストのカットスルー伝送。中継ノードにおいては, 先行の制御パケットによって光スイッチを制御し, 続いて到着する光バーストデータは光信号のままアナログ的に切り替えられる。
- ・ バースト単位のスイッチング。バースト毎に制御パケットが存在し, 制御パケットが各中継ノードにおいて光スイッチ切替えを制御する。すなわち, 本テストベッドにおいてはスイッチングを行う単位はコネクションやフローではなく, データ単位であるバーストである。
- ・ バーストごとの伝送波長決定機能。PWAでは送信ノードにて発生する個々のバーストに対して波長割当処理を行う。したがってバーストごとに伝送波長を決定する機能が必要となる。

設計するテストベッドネットワークのイメージを図5.1に示す。図5.1は4つのOBSノードで構成されるネットワークである。各リンクの多重波長数は4である。本ネットワークはバーストの中継のみを行うコアノードと, 外部ネットワークとの接続とバース

ト生成・送信，及び受信を行うエッジノードから構成される．本テストベッドでは外部ネットワークからの入力信号はギガビットイーサネット信号であり，エッジノードにおいて複数のイーサネットフレームから光バースト信号が生成される．

本テストベッドにおける光バーストは，複数のギガビットイーサネットフレームの連なりである．エッジノードの光バースト受信部においては，一連のイーサネットフレームを各個処理すればよい．

一方制御パケットもイーサネットフレームに基づいており，フレーム長は最小ペイロードである 46 バイトである．ここでは，確認応答である ACK 信号，及びバースト破棄されたことを示す NAK 信号も制御パケットの一種としている．以下に制御パケットに必要なデータフィールドを記す．

- Type (1 バイト): 制御パケット種を示す．通常のバーストに先行して伝送される制御パケットの場合は 0，ACK 信号の場合 1，NAK 信号の場合 2 とする．
- 伝送波長 (2 バイト): バーストの送信波長を示す．( 1: 0, 2: 1, 3: 2, 4: 3 )
- 宛先 Address (6 バイト): 宛先 OBS ノードの MAC アドレスを示す．
- 送信元 Address (6 バイト): 自ノードの MAC アドレスを示す．
- オフセット時間 (2 バイト): 制御パケット送信からバーストデータ送信までの間隔を示す．
- バーストサイズ (2 バイト)
- Burst Identifier (4 バイト): 32 ビットのカウンタ．バーストデータ生成順に付番する．
- Survivability (1 バイト): 制御パケットが指定のホップ数を経てもなおネットワーク中に存在する際にネットワークから破棄する場合に設定する．

### 5.3 光バーストスイッチノード

図 5.1 に示すようなネットワーク構築を目的とし，OBS ノードの設計を行った．本ノードは OBS を適用するためのものであるが，汎用性及び拡張性が高いことが望まれる．本項では，作成した OBS ノードの構成について述べる．本 OBS ネットワークはエッジノードとコアノードから構成され，エッジノードにおいて外部の IP ネットワークと接続される．コアノードにおいては制御信号の処理，及び制御信号と光バーストの転送のみを行う．

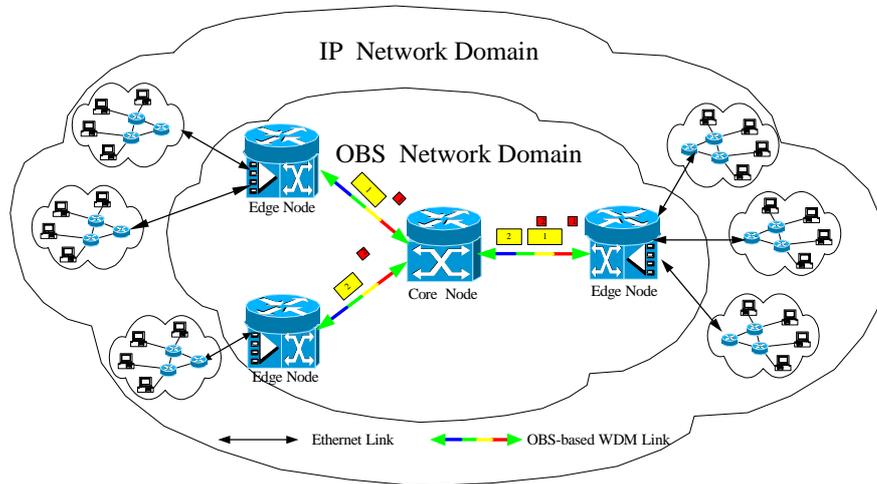


図 5.1 OBS ネットワークテストベッド概要

#### 5.3.1 コアノード

コアノードの構成を図 5.2 に示す．コアノードに要求される機能は主に光バーストスイッチングの実現である．具体的には，以下の機能を満たす必要がある．

- ・ 光スイッチング機能．複数のポートから入力される光バーストをそれぞれ任意のポートに出力する機能．
- ・ 光パワー等化機能．複数の異なる経路やリンクから到着したバースト間のパワー

を等化する機能。

- ・ 光増幅機能．光信号伝送路，及び光デバイスにおいて発生する光パワー損失をパワー増幅によって補償する機能．
- ・ 監視，制御，及び管理機能．ノードのパフォーマンスやパラメータ，状態をソフトウェアによって監視，制御，管理する機能．

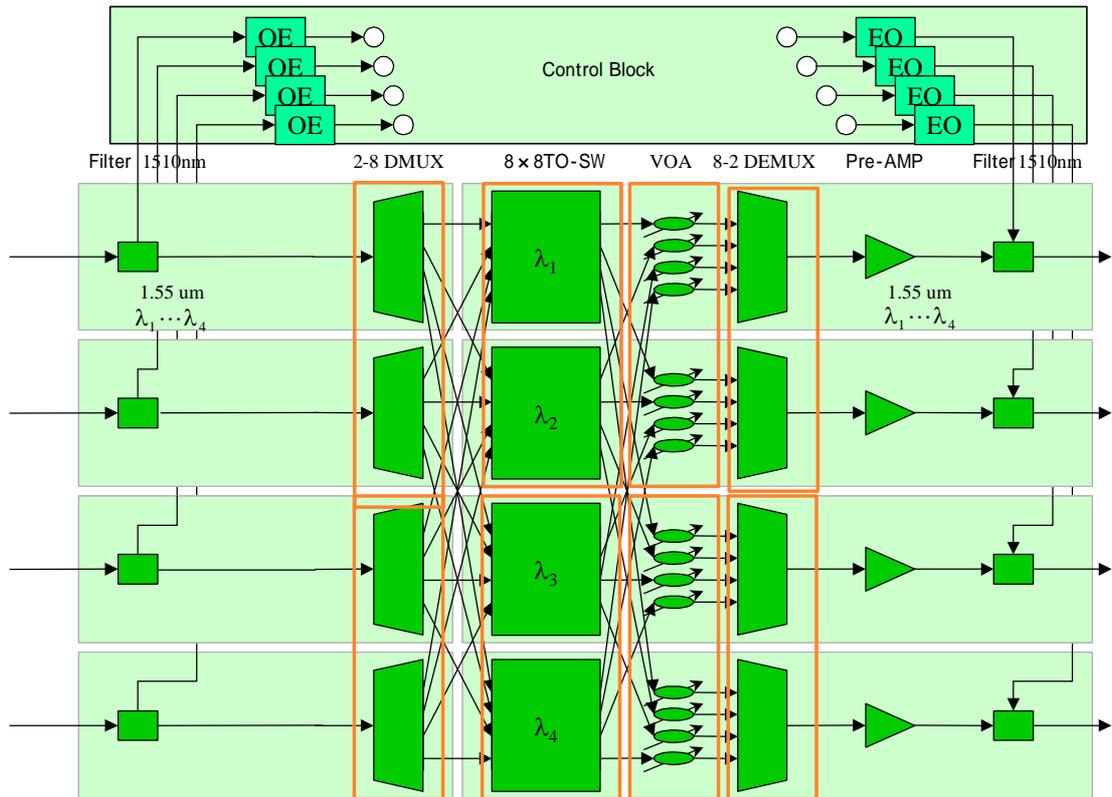


図 5.2 コアノード

コアノードは光入出力ポートを4ずつ保持する．本ノードは，フィルタ，波長合分波器（MUX/DEMUX），光スイッチ，VOA（光パワー等化器），光増幅器，制御ブロック等で構成される．

フィルタは制御信号とバーストデータの結合と分離を行う．光バーストスイッチングにおいては，両信号はそれぞれ別チャンネル上にて伝送される．本フィルタの透過波長は

1500-1520 nm, フィルタ透過挿入損失は 0.9 dB 以下, フィルタ反射波長は 1529-1562 nm, 反射側挿入損失は 0.6 dB である. 本研究においては, バースト信号を ITU-T の G.692 に基づいた WDM 波長 (反射側) 上で伝送し, 制御信号の伝送には 1510 nm の波長 (透過側) を用いた.

MUX/DEMUX は, WDM 技術によって多重化された光バースト信号の合波/分波を行う. 本装置は 4 波長チャンネルに対応しており, それぞれの波長間隔は 200 GHz である. 本 MUX/DEMUX の挿入損失は 3 dB 以下である.

光スイッチは 4 入出力ポートを備え, 任意のポートへのスイッチングを実現する. 本ノードにおける光スイッチは熱光学効果によって動作するマトリクス型スイッチである. 本スイッチの挿入損失は 7 dB 以下, 切替速度は 10 ms 程度である. 本スイッチを実装したボードには制御用 CPU と外部インタフェースである c-PCI (コンパクト PCI) を備えており, c-PCI を利用することによって外部からの制御も可能となる.

VOA は各入力チャンネルの光信号レベルを等化し, バンド内クロストークを低減する. 本モジュールの動作可能波長は 1530-1565 nm, 波長依存性は仕様波長において 0.1 dB, 動作可能波長において 0.4 dB である. また, 制御回路はフィードフォワード型とした. 出力設定制度は 0.5 dB を実現し, 制御安定時間は 10 ms 以下である.

光増幅器は, フィルタや MUX/DEMUX, VOA, さらには伝送路上で発生した光信号損失を増幅によって補償する. 本モジュールは EDFA で実装されており, 制御手法として AGC 機能と APC 機能の 2 つの機能を有する. 制御手法の切替えは外部からの操作で可能である. ここで, AGC とは EDFA の利得を一定に制御する手法であり, 高安定性を提供する. 一方, APC においては励起 LD の発光強度を一定とするため, 高速制御が可能となる. 本増幅器の最適増幅波長は 1551-1557 nm, 1 波長当りの入力光電力は -30(-20) dBm, 同出力光電力は 0 dBm 以上, 同小信号利得は 30 dB 以上である.

制御ブロックは, シグナリング手法や経路制御, スイッチ制御メカニズム等が実装されたソフトカーネルである.

コアノードの基本動作を述べる。光ファイバリンクから入力した光信号は、フィルタによって制御信号と光バーストデータに分離される。分離された制御信号は制御ブロックで電気処理され、光バースト転送のためのスイッチ切替処理等が行われる。一方、WDM信号であるバーストデータは DEMUX によって分波され独立した4信号となる。それぞれのバーストは光スイッチで切り替えられ、制御ブロックによって決定されている出力ポートに送出される。VOAによるレベル等化処理の後、出力されたバーストは MUX によって再び波長多重信号となり、フィルタを介して制御信号と合波され、ノードの外部ファイバリンクへ出力される。

### 5.3.2 エッジノード

#### 5.3.2.1 構成

エッジノードに要求される機能は、5.3.1で述べた機能に加え、OBS ネットワークに接続する外部ネットワークとの接続である。本研究で作成したエッジノードの構成を図5.3に示す。

エッジノードはバースト送受信部を保持し、バースト送受信部内にも CPU ブロックが存在する。バースト送受信部の CPU から光スイッチの制御を行うことが可能である。バースト送信部で生成されたバーストの送信タイミング決定(スケジューリング)、光スイッチの予約等の処理を考慮すると、エッジノードにおいては光スイッチの制御はすべてバースト送信部から行うのが望ましい。

エッジノードの基本動作に関して述べる。他の OBS ノードから到着した光信号はコアノードと同様にフィルタによって制御信号とバーストに分離される。他のバーストスイッチノードへ転送されるバーストデータは、コアノードの場合と同様に DEMUX、スイッチ、VOA、MUX、光増幅器、フィルタを経て外部リンクへ出力される。一方、到着した信号が自ノード宛である場合、光バーストデータはバースト受信部に入力され、受信処理が行われる。

バースト送信部で光バーストが生成された場合、制御パケットが生成・送信され、オフセット時間経過後に光バーストが光スイッチを経て出力される。

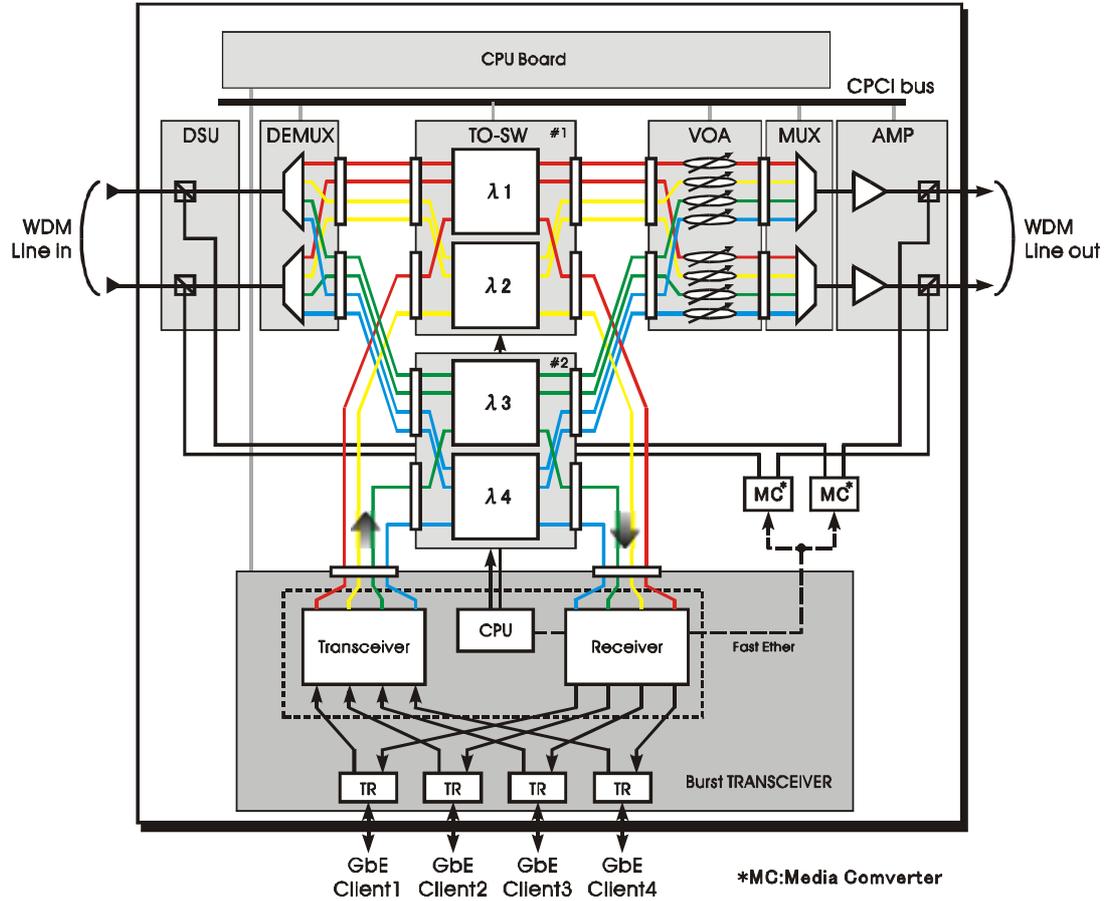


図 5.3 エッジノード

### 5.3.2.2 バースト送受信部

本項では、5.3.2で述べたエッジノードの構成要素であるバースト送受信部について述べる。図 5.4 にバースト送信部の構成を示す。バースト送信部は FPGA によって構成され、3 段階の FIFO バッファと電気スイッチを保持する。外部ネットワークから 1 次 FIFO に入力されたデータ信号はその宛先情報に基づいてスイッチングされ、2 次 FIFO に入力される。

2 次 FIFO では同一の宛先 OBS ノードへ向かうデータ信号が複数バッファリングされ、指定の条件を満たした時点で 1 つのバーストデータとして生成される。バースト生成条

件は 2 次 FIFO 内のデータ量が指定量を超えた場合，あるいは先頭のデータ信号のパッファリング時間が指定を超えた場合である．

2 次 FIFO でバースト生成後，伝送波長決定と自ノードの光スイッチ予約が行われる．ここで，伝送波長決定手法はソフトウェアで書換え可能である．バーストの送信タイミング決定後，バーストデータは 3 次 FIFO に入力され，指定時に出力される．なお，制御パケットはバースト送信時からオフセット時間前の時点で生成・送信される．

一方バースト受信部においては，受信された光バーストデータは，元のギガビットイーサフレーム単位に分離され，電気スイッチを経てそれぞれの宛先ホストへ向けて送出される．

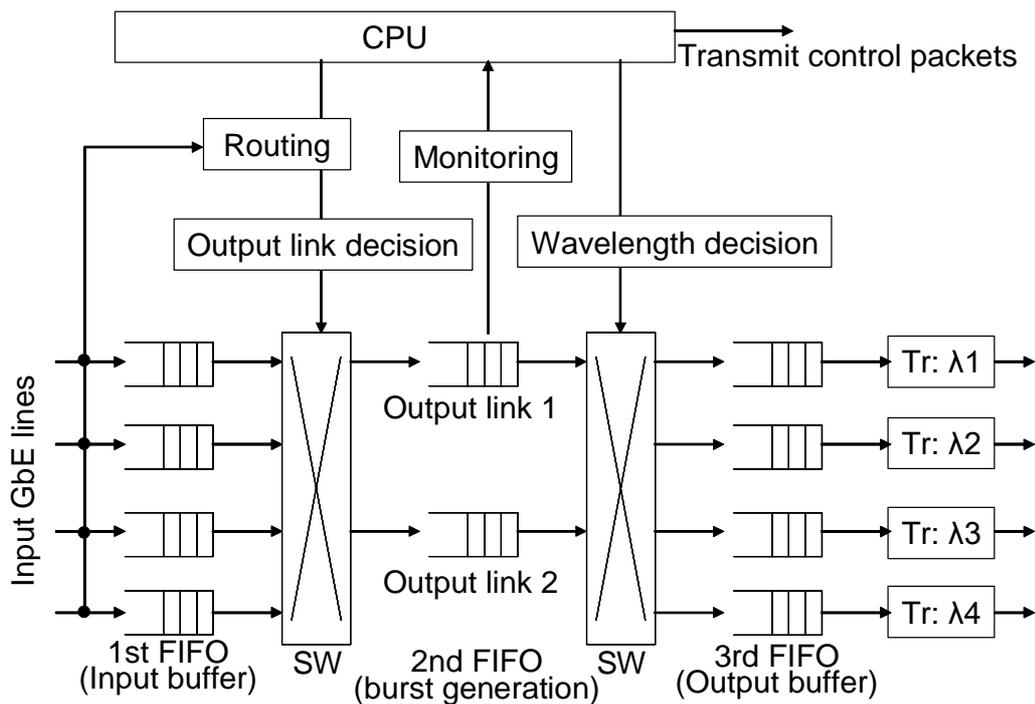


図 5.4 バースト送信部

### 5.3.2.3 バースト送信タイミングの決定（スケジューリング）手法

バーストのスケジューリング手法に関して述べる．スケジューリングには，自ノードで生成されたバーストの送信タイミングを決定するものと，他ノードから到着するバーストのタイミングに合わせて光スイッチを予約するものがあるが，エッジノードにおいては両者共にバースト送受信部の CPU によって制御される．

本テストベッドにおいては，送信ノード（エッジノード）でバーストの伝送波長を選択的に割当可能である必要がある．本項で述べるバーストスケジューリング手法では選択的波長選択が可能である．以下，下記的前提を元に説明する．

- ・ オフセット時間を  $T_o$  とし，全バーストに対して一定とする．
- ・ スイッチング時間をスイッチ切換に要する遅延（10ms 強）とし， $T_s$  で表す．
- ・ バースト到着後のガード時間（スイッチ安定までの時間）を  $T_g$  とする．
- ・ スイッチ予約時間をスイッチの切換開始から解放までの時間とする．すなわち，バースト到着の  $T_s$  前から到着の  $T_g$  後までの  $(T_s+T_g)$  の時間である．
- ・ 予約時間開始時，すなわちバースト到着予定時の  $T_s$  前から光スイッチ切換処理を開始する．

バースト送信部では，自ノードの伝送波長と出力ポートの組 12 対に対し， $T_e$  先までの光スイッチ予約情報を保持する（スイッチ予約テーブル， $T_e \gg T_o$ ）．具体的にテーブルに記述すべき情報は，各バーストのスイッチ予約時間と入力ポート情報，及び光スイッチ切換時間．同一の伝送波長及び出力ポートを予約する複数バースト間にて予約時間が重なった場合衝突となり，予約不可となるバーストが発生する．

#### (a) 送信部で生成したバーストのスケジューリング

送信部で発生したバーストのスケジューリング手法を図 5.5 に示す．バースト完成時を  $t_0$  とする．以下では，バースト完成からスケジューリング終了までの処理遅延は無視する．バースト完成後，バーストの宛先ノードに基づいて光スイッチの出力ポートが決定される．同出力ポート上の各波長の予約テーブルを参照する．予約テーブルのうち，もっとも早く予約可能な時点である  $(t_0+T_o-T_s)$  時におけるスイッチ予約状態を調査し，予

約されていない波長を空き波長とする。ただし、図 5.5 中では  $t = (t_0 + T_o - T_s)$  としている。空き波長の中から波長選択アルゴリズムによって伝送波長が決定され、光スイッチ予約テーブルの更新、及び光スイッチ予約が行われる。この際のスイッチ予約時間は  $(t_0 + T_o - T_s) \sim (t_0 + T_o + T_b + T_g)$ 、制御パケット送信は  $t_0$ 、バースト送信は  $(t_0 + T_o)$  時にそれぞれ開始される。ただし、 $T_b$  はバースト長（可変値）である。 $(t_0 + T_o - T_s)$  時の空き波長がない場合、 $(t_0 + T_o - T_s + n * T_i)$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) の時点における波長予約情報を  $n=1$  から調査し、予約されていない波長が検出された段階で調査を終え、 $n$  を固定する。ここで  $T_i$  は調査間隔であり、可変長、外部から設定可能とする。検出された空き波長の中から波長選択アルゴリズムによって伝送波長が決定される。予約するテーブル上で最後に波長が解放される時点をも  $t_r$  とすると、この場合のスイッチ予約時間は  $t_r$  から  $(t_r + T_s + T_b + T_g)$  まで、制御パケット送信開始は  $(t_r + T_s - T_o)$  時、バースト送信開始は  $(t_r + T_s)$  時とする。波長選択アルゴリズムは別途設定されているものとする。予約テーブル中に空き波長が存在しない場合、バーストは破棄される。

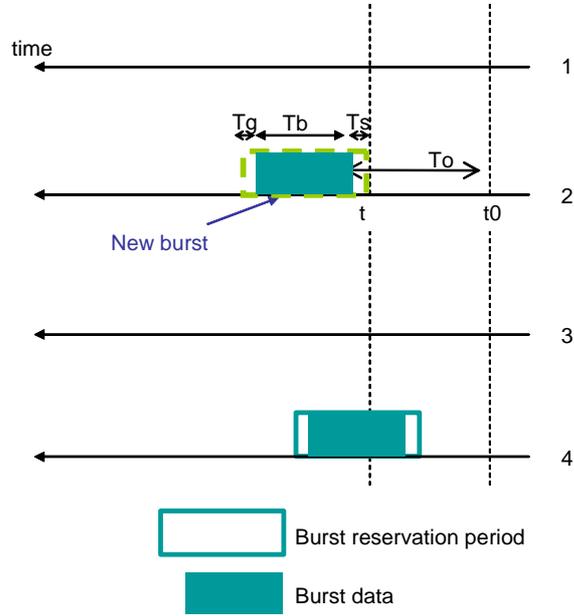
(b) 他ノードから到着するバーストのスケジューリング

制御パケットを受信したノードは、フレームヘッダに記述されている送信元アドレス（直前ホップのノードを示す）から、光スイッチの入力ポート情報を調査する。同時に、制御パケットに記述された宛先ノード、伝送波長情報を調査する。自身の光スイッチ予約テーブルと照合し、スケジューリング可能であれば予約テーブルを更新し、光スイッチを予約する。自ノードが宛先ノードである場合、送信ノードに確認応答である ACK 信号を送信する。宛先ノードでない場合、制御パケットを次ノードへ転送する。光スイッチ切替はバースト到着の直前に行う。一方スケジューリング不可の場合、送信ノードに NAK 信号を送信する。

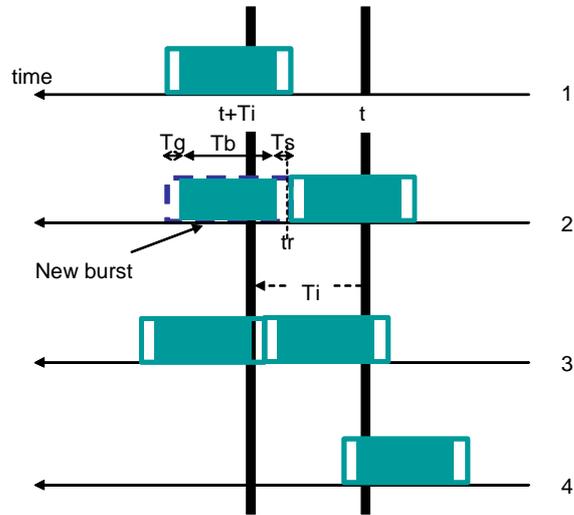
制御パケットを受信した時刻を  $t_0$  とする。出力ポートと伝送波長から該当の光スイッチ予約テーブルを参照し、スケジューリング可能かを判断する。 $(t_0 + T_o - T_s)$  時点のスイッチ予約テーブルを参照し、伝送波長が空きであればスケジューリング可となり、 $(t_0 + T_o - T_s)$  から  $(t_0 + T_o + T_b + T_g)$  までの時間が予約される。伝送波長が利用不可であればスケジューリング不可とする。

ここで、ACK/NAK パケットの内容は当該信号を送出するノードにおいて受信された制御パケット中の Type フィールドを除いた全フィールドのコピーとする。

ACK/NAK パケットを受信したノードは、パケットペイロードの送信元ノードを調査する。送信元ノードが自ノードでない場合、送信元ノードへ向けて受信パケットを転送する。この際パケットのペイロード部は更新しない。一方、送信元ノードが自ノードである場合、必要があれば受信パケットの情報を内部プログラムへ渡す。



(a)  $t$  時に空き波長が存在する場合



(b)  $t$  時に空き波長がない場合

図 5.5 送信ノードで生成するバーストのスケジューリング

## 5.4 実験結果

本項では、本研究で構築した OBS ネットワークテストベッド上にて行ったバーストの伝送実験を示す。具体的には、バーストの非同期伝送した結果、及びエンドツーエンドのバースト伝送遅延の測定について述べる。

### 5.4.1 バースト伝送実験

本テストベッド上におけるバーストの伝送遅延を測定するため、図 5.6 に示すような 3 つの OBS ノードを直線に並べたネットワークにおいてバーストの伝送実験を行った。ここで、隣接ノード間の距離は 2 m、リンク速度は 1.25 Gbps である。また、バースト長は 72 バイトから 15 キロバイトの間である。

各 OBS ノードにはクライアントとしてアジレント社のルータテストが接続されている。本実験において、クライアント A はクライアント B 及び C に IP パケットを送信する。図中の EN-1 は、クライアント A から送信される IP パケットを宛先ノードごとに集約し、バーストを生成する。これらのバーストを送受信ノードごとに  $B_{ab}$ 、 $B_{ac}$  する。EN-2 は、 $B_{ab}$  を受信し、クライアント B へ送信し、 $B_{ac}$  を EN-3 へ転送する。 $B_{ac}$  を受信した EN-3 はクライアント C へデータを送信する。

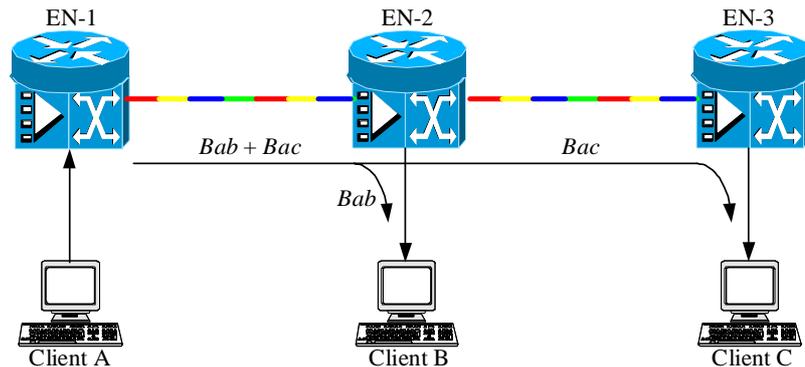


図 5.6 バースト伝送実験の実験系

図 5.7 は EN-2 において観測された入力バースト，及び受信バースト，転送バーストを示している．ここで，入力バーストとは EN-2 に転送されてきたバーストを示し，受信バーストは EN-2 において電気信号に戻され，クライアントへ送信されるデータを示す．バースト長は 72 バイトから 15 キロバイトの間であり，リンク速度は 1.25 Gbps である．図 5.7 より，同一波長上を伝送される 2 種類のバーストが適切にスイッチングされていることがわかる．

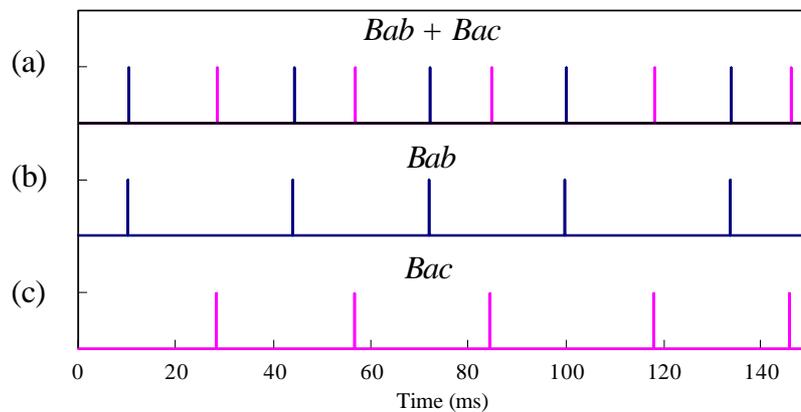


図 5.7 EN-2 における測定結果

(a) 入力バースト，(b) 受信バースト，(c) 転送バースト

#### 5.4.2 バースト伝送遅延の測定

本項では，バーストの伝送遅延を測定した．ここでは，光バーストの伝送遅延を，送信ノードで生成されてから受信ノードで電気信号へ復元されるまでの遅延とする．すなわち，送信ノードにおけるバッファリング遅延，オフセット時間，リンク遅延，及び受信ノードでの処理遅延の和である．なお，本稿における実験系は図 5.6 と同一である．

OBS ネットワークにおいては，光スイッチの切替時間が大きい場合，バースト長を大きくせねばならず，送信ノードにおけるバッファリング遅延の増大を招く．したがって，現行デバイスを用いたネットワークにおける実遅延を考慮し，適切にオフセット時間を設定する必要がある．

図 5.8 は EN-2 におけるバースト (Bac) 到着の様子を示している。時刻 T において制御信号を受信した EN-2 は、スイッチの予約状態を調査し、バーストの転送が可能であれば制御信号の転送、及び光スイッチの切換処理を行う。ここで、光スイッチ切換処理の終了はおよそ T の 3 ms 後である。さらに、T からオフセット時間経過すると、光バーストが到着し、EN-3 へ転送される。オフセット時間は光スイッチの切換処理遅延と中継ノードにおける制御信号の処理遅延に応じて設定される。

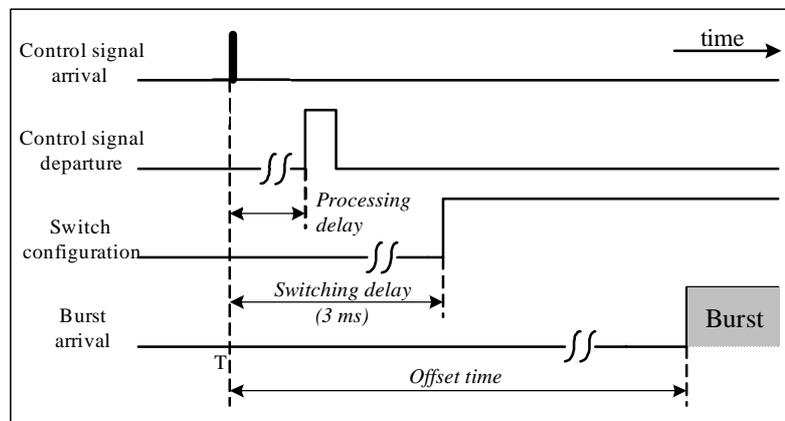


図 5.8 EN-2 におけるバースト転送処理

Bac の制御信号の処理遅延を EN-2 において測定した。ここで、利用可能なリンク波長数を 1~4 の間で変化させ、それぞれの場合において、波長数に比例したトラフィックを発生させた。すなわち、波長数 4 の場合には波長数 1 の場合の 4 倍のトラフィックが発生する。また、オフセット時間を 15 ms、バースト生成の閾値は時間を 15 ms、サイズを 14816 バイトとした。測定された制御信号の処理遅延の平均値は、波長数に依らず 50  $\mu$ s 程度であり、スイッチ切換速度が 3 ms である本テストベッドにおいては無視できる遅延であることが確認された。

次に、IP パケットの伝送遅延を測定した。表 5.1 にオフセット時間を変化させた際の IP パケットの平均伝送遅延を示す。IP パケットの伝送遅延とは、クライアント A からクライアント B あるいは C までの伝送遅延である。なお、WDM リンク中において利用可能な波長数は 1 とした。本実験では、リンク遅延、及び受信ノードでのバースト処理遅延

延は共にミリ秒未満であり，無視できる．したがって，バーストの伝送遅延へ影響を与えるのは送信ノード内でのバッファリング遅延とオフセット時間となり，リンク遅延だけが異なる  $Bab$  と  $Bac$  の間では伝送遅延に大きな差がないことがわかる．また，送信ノードにおけるバッファリング遅延はおよそ 12 ms である．

表 5.1 バースト伝送遅延

	オフセット時間 (ms)				
	15	20	25	30	35
$Bab$	27.237	32.234	37.238	42.238	47.242
$Bac$	27.239	32.234	37.238	42.238	47.242

以上から，現行デバイスで OBS ネットワークを構築した場合，送信ノードにおけるバッファリング遅延が支配的であることがわかる．送信ノードにおけるバッファリング遅延は，バースト生成手法やスケジューリングアルゴリズムによって改善可能であり，ハードウェアの置換を必要としない．一方オフセット時間には中継ノードにおける制御信号の処理遅延，及び光スイッチの切替処理遅延が含まれるため，オフセット時間の短縮には光スイッチの動作速度の高速化が不可欠である．

## 5.5 おわりに

本章では、本研究で構築した OBS ネットワークテストベッドの概要と、それを構成する OBS ノード構成、及びバースト伝送実験の結果を述べた。実験より、エッジノードにおいて生成されたバーストがバースト単位でスイッチングされていることが確認された。また、バーストの伝送遅延測定も行った。測定結果から、バースト伝送遅延の低減にはハードウェア、ソフトウェア双方の改善が必要となると言える。

## 第 6 章

### 結論

## 6.1 本論文の主たる結果

将来のインターネットを、多種多様なコンテンツが流通するブロードバンド世界と仮定すると、サービスの形態も多岐に渡ると考えられる。WDM 技術に基づいたフォトニックインターネットは帯域に関する要求には容易に応じられるものとなるであろう。さらには、光バーストスイッチングのような動的な帯域割当を行うことにより、利用効率の向上も可能である。しかしながら、膨大な波長数を考慮した効果的な波長選択方式や、光技術によってサービス品質の差別化を行う検討はこれまであまり注目を集めていない。膨大な波長資源を効果的に利用するには従来のランダム割当方式等は不向きである。また多様なサービス要求に対応するためには、多種のサービスクラスを提供する必要がある。

以上から、本論文では膨大なリンク波長数を有する将来の WDM 光バーストスイッチネットワークにおける波長選択方式の検討を行った。また、波長選択方式を用いたサービスクラス提供方式の検討も行った。さらには、提案した波長選択方式の実証が可能な光バーストスイッチネットワークのテストベッドを構築し、基礎的な実験も行った。

第3章では、双方向波長予約方式を用いた光バーストスイッチネットワークにおける経路予約方式であるフォワード型、バックワード型両方式に PWA による波長選択方式を適用した手法を示した。フォワード型 PWA では送信ノードにおいて、バックワード型 PWA では宛先ノードにおいて波長優先度情報を保持することによって、過去の伝送結果の統計に基づいた波長選択が可能である。計算機シミュレーションによる性能評価の結果、予約成功率について、PWA による性能改善が確認された。

第4章では、一方向予約を用いた光バーストスイッチネットワークにおいてサービスクラスを実現する手法として、波長割当方式の観点から検討を行い、CWA アルゴリズムを提案した。さらには、CWA の補完手法として、中継ノードにおけるバーストブロッキング確率の差別化を目的とした enforced switching も提案し、CWA と共に用いた。計算機シミュレーションの結果、提案した CWA 方式によるネットワークパフォーマンスのサービスクラス提供が実現できることを示した。サービスクラス提供が実現された項目は、

バーストブロッキング確率，スループット，及びバースト伝送遅延である

第3章，及び第4章で示した波長選択方式は，共に OBS ノード内におけるソフトウェア処理で実現しているため，光デバイスに依存度，及び要求は小さいと言える．また，本方式は光ネットワークにおける制御方式として非常に重要だと考える．

第5章では，特にその実現へ向けた技術課題の多い一方向予約方式を用いた光バーストスイッチネットワークのテストベッドを構築し，その構成を詳述した．また，テストベッド上におけるバースト伝送実験も行い，光バースト信号が光スイッチによって高速に切り換えられていることが確認された．

## 6.2 今後の課題と展望

本論文において提案した波長選択方式は、ネットワーク内の中継ノードにおける光バッファ、及び全光波長変換機能が実用化されていないことを前提とした手法である。光デバイスの研究開発は世界中で盛んになされているため、本論文の前提が今後も真であるとは限らない。したがって、上記のような光デバイスが実用化された場合、どのようなネットワーク構築が必要となるかという点は今後の検討されるべき課題であろう。

第5章で構築した光バーストスイッチネットワークのテストベッドネットワークは、任意の波長選択方式を利用可能である点など、柔軟性の高い構成とした。したがって、今後は様々な実証実験に利用されるものと期待できる。

---

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教官である森川助教授にはとても熱心に御指導いただきました．特に，研究方針決定の折などには的確な助言をいただきました．感謝致します．また，同じく指導教官である青山教授には，研究が壁にぶつかった折などに様々な助言，提案をしていただき大変お世話になりました．感謝致します．

また，青山・森川研究室助手の王溪氏には，氏の博士課程学生時より，常に私の研究の一番身近なところで熱心に辛抱強く指導していただきました．完成度の低い論文原稿等，常に最初にチェックしてくださいました．ありがとうございました．

青山・森川研究室の諸先輩方からは，常に楽な方へ流れようとする自分を何度も叱咤，激励していただきました．おかげで5年間研究を継続できたと思います．感謝いたします．

この5年間で，私は研究者として，また人間として，大きく鍛えられました．修士論文，及び博士論文研究の経験を今後の社会人生活の糧とし，がんばっていきたいと思います．

ここに挙げた方たちに改めて深く感謝します．

---

## 参考文献

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, "Optical networks, a practical perspective," Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [2] T. W. Chung, et al., "Architectural and engineering issues for building an Optical Internet," <http://www.canarie.ca/~bstarn/optical-internet.html>, Oct. 1998.
- [3] F. J. Westphal M. Jager, H. M. Foisel, and A. Gladisch, "Evolution of optical networks and management aspects," International topical workshop on contemporary photonic technologies (CPT 2001), pp. 35-38, Tokyo, Japan, Jan. 2001.
- [4] S. J. B. Yoo, "Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS and GMPLS," Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC 2001), 4585-02, Beijing, China, Nov. 2001.
- [5] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical WAN's," IEEE Trans. Commun., vol.40, no. 7, pp. 1171-1182, July 1992.
- [6] R. E. Wagner, R. C. Alferness, A. M. Saleh, and M. S. Goodman, "MONET: multiwavelength optical networking," IEEE J. of Lightwave Techno., vol. 14, no. 6, pp. 1349-55, 1996.
- [7] L. D. Garrett, et al., "The MONET new jersey network demonstration," IEEE J. on Selected Areas in Communications, vol. 16, no.7, pp. 1199-1219, Sep. 1998.
- [8] B. R. Hemenway, "Terabit per second all-optical wavelength-routed networks," Optoelectronics and Communications Conference (OECC 97), pp. 86-87, Seoul, South Korea, July 1997.
- [9] P. Gambini, et al., "Transparent optical packet switching: network architecture and demonstrators in the KEOPS project," IEEE J. on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 7, pp. 1245-1259, 1998.
- [10] J. S. Turner, "Terabit burst switching," <http://www.arl.wustl.edu/~jst/projects/TerabitBurst.html>, Oct. 1999.
- [11] H. Chaskar, et al., "A framework to support IP over WDM using optical burst switching,"

---

Optical Networks Workshop, Dallas, TX, Jan.2000.

- [12] M. Yoo, M. Jeong, and C. Qiao, "A high speed protocol for bursty traffic in optical networks," in SPIE's All-Optical Communication Systems: Architecture, Control and Network Issues, vol. 3230, pp. 79-90, 1997.
- [13] A. Sahara, K. Shimano, Y. Takigawa, and M. Koga, "Optical burst data switching utilising GMPLS signaling," IEEE Electronics Letter, vol. 39, no. 17, pp. 1267-1269, Aug. 2003.
- [14] A. Sahara, Y. Tsukishima, K. Shimano, M. Koga, K. Mori, Y. Sakai, Y. Ishii, and M. Kawai, "Demonstration of optical burst switching network utilizing PLC and MEMS switches with GMPLS control," European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), pp. 896-897, Stockholm, Sweden, Sep. 2004.
- [15] R. Ramaswami, and A. Segall, "Distributed network control for optical networks," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 5, no. 6, pp. 936-943, Dec. 1997.
- [16] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "Review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," Optical Networks, vol. 1, no.1, pp. 47-60, Jan. 2000.
- [17] T. DeFanti, C. Laat, J. Mambretti, K. Neggers, and B. Arnaud, "TransLight: a global-scale LambdaGrid for e-science," Commun. ACM, vol. 46, no. 11, pp. 34-41, Nov. 2003.
- [18] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," Optical Networks, vol. 1, no. 1, Jan. 2000.
- [19] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. karmi, "Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical WAN's," IEEE Trans. Commun., vol.40, no. 7, pp. 1171-1182, July 1992.
- [20] A. Birman, and, A. Kershenbaum, "Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking," IEEE INFOCOM, pp. 431-438, 1995.
- [21] E. Karasan, et al., "Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 6, no2, pp. 186-196, Apr. 1998.

- 
- [22] D. J. Blumenthal, et al., "Photonic packet switches: architectures and experimental implementations," IEEE, vol. 82, no. 11, pp. 1650-1667, Nov. 1994.
- [23] P. Gambini, "State of the art of photonic packet switched networks," In Photonic Networks: Advances in Optical Communications, Springer Verlag 1997.
- [24] F. Masetti, "System functionalities and architectures in photonic packet switching," In Photonic Networks: Advances in Optical Communications, Springer Verlag 1997.
- [25] F. Masetti et al., "Fiber delay lines optical buffer for ATM photonic switching applications," IEEE INFOCOM, pp. 935-942 1993.
- [26] draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-02.txt. work in progress, Internet draft in [www.ietf.org](http://www.ietf.org), 2002.
- [27] M. Kovacevic, and A. Acampora, "On wavelength translation in all-optical networks," IEEE INFOCOM, pp. 413-422, Boston, MA, Apr. 1995.
- [28] F. Borgonovo, and L. Fratta, "Deflection networks: architectures for Manhattan networks," Computer Networks and ISDN Syst., vol.24, no.2, pp. 171-183, Apr. 1992.
- [29] E. A. Varvarigos, and J. P. Lang, "A virtual circuit deflection protocol," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 7, pp. 335-349, Jun. 1999.
- [30] X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Burst optical deflection routing protocol for wavelength routing WDM networks," SPIE/IEEE Opticom 2000, pp. 257-266, Dallas, USA, Oct. 2000.
- [31] X. Wang, A. Saito, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Distributed wavelength assignment algorithm for optical burst in WDM networks," Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2001), pp.191-193, Sydney, Australia, Jul. 2001.
- [32] R. Ramaswami, and K. N. Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 3, no. 5, pp. 489-500, Oct. 1995.
- [33] Y. Zhu, G. N. Rouskas, and H. G. Perros, "A comparison of allocation policies in wavelength routing networks," Photonic Networks Communication Journal, vol. 2, no. 3, pp. 265-293,

---

Aug. 2000.

- [34] S. Subramaniam, and R. A. Barry, "Wavelength assignment in fixed routing WDM networks," ICC '97, Montreal, Canada, vol. 1, pp. 406-410, June 1997.
- [35] Y. Mei, and C. Qiao, "Efficient distributed control protocols for WDM all-optical networks," International Conf. on Computer Commun. and Networks, pp. 150-153, Las Vegas, U.S.A., Sept. 1997.
- [36] F. Baker, J. Krawczyk, and A. Sastry, "Integrated services management information base using SMIPv2," RFC 2213, Sep. 1997.
- [37] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black, "Definition of the differentiated services field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 headers," RFC 2474, Dec. 1998.
- [38] M. Yoo, and C. Qiao, "QoS performance in IP over WDM networks," IEEE ICC'00, pp. 974-979, 2000.
- [39] M. Yoo, C. Qiao, and S. Dixit, "Comparative study of contention resolution policies in optical burst switched WDM networks," Terabit Optical Networking: Architecture, Control, and Management Issues, vol. 4213, pp. 124-135, Boston, U.S.A., Nov. 2000.
- [40] Y. Xiong, M. Vandenhouste, and H. Cankaya, "Control architecture in optical burst-switched WDM networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 10, pp. 1838-1851, Oct. 2000.
- [41] L. Xu, H. G. Perros, and G. N. Rouskas, "Techniques for optical packet switching and optical burst switching," IEEE Communications, vol. 39, no. 1, pp. 136-142, Jan. 2001.
- [42] L. Dittmann, et al., "The european IST project DAVID: a viable approach toward optical packet switching," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 7, pp. 1026-1040, Sept. 2003.
- [43] S. J. B. Yoo, et al., "High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for the next-generation Internet," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 7, pp. 1041-1051, Sept. 2003.

- 
- [44] J. Li, C. Qiao, and Y. Chen, "Recent progress in the scheduling algorithms in optical-burst-switched networks," *J. of Optical Networking*, vol. 3, no.4, pp. 229-241, Apr. 2004.

---

## 発表文献

### 論文誌 (3)

- [P-1] 橋口, 王, 森川, 青山, “WDM ネットワークにおける波長優先度を用いた波長予約方式,” 電子情報通信学会和文論文誌, vol. J88-B, no. 3, Mar. 2005.
- [P-2] 橋口, 王, 森川, 青山, “一方向予約におけるサービスクラス化指向波長選択方式,” 電子情報通信学会和文論文誌 (投稿予定).
- [P-3] Y. Sun, T. Hashiguchi, V. Q. Minh, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Design and implementation of an optical burst-switched network testbed,” IEEE Communications (submitted).

### 国際会議 (7)

- [P-4] T. Hashiguchi, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “CoS-oriented wavelength assignment algorithm in burst switching optical networks,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2001), pp. 371-373, Sydney, Australia, July 2001.
- [P-5] T. Hashiguchi, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Improving CoS-oriented wavelength assignment for burst switched photonic networks,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2002), pp. 406-407, Yokohama, Japan, July 2002.
- [P-6] T. Hashiguchi, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Improving CoS-oriented wavelength assignment for optical bursts in WDM networks,” Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC 2002), 4910-25, Shanghai, China, Oct. 2002.
- [P-7] T. Hashiguchi, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Burst assembly mechanism with delay reduction for OBS networks,” Conference on the Optical Internet (COIN 2003), pp. 664-666, Melbourne, Australia, July 2003.
- [P-8] T. Hashiguchi, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Performance evaluation of

---

distributed wavelength assignment in WDM optical networks,” Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC 2003), pp. 480-491, Wuhan, China, Nov. 2003.

- [P-9] Y. Sun, T. Hashiguchi, N. Yoshida, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Architecture and design issues of an optical burst switched network testbed,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2004), pp. 386-387, Yokohama, Japan, July 2004.
- [P-10] Y. Sun, T. Hashiguchi, V. Q. Minh, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Design and implementation of burst switching nodes for WDM optical networks,” Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC 2004), Beijing, China, Nov. 2004.

## 研究会 (5)

- [P-11] 橋口, 王, 森川, 青山, “バーストオプティカルネットワークにおける CoS 指向波長割当手法,” 電子情報通信学会技術報告, SSE2000-294/IN2000-250, Mar. 2001.
- [P-12] 橋口, 王, 森川, 青山, “バーストスイッチフォトニックネットワークの中継ノードを考慮した CoS 提供手法,” 電子情報通信学会技術報告, PNI2001-16, Nov. 2001.
- [P-13] 橋口, 王, 森川, 青山, “光バーストスイッチネットワークと衝突回避,” 電子情報通信学会技術報告, PS2002-12, Apr. 2002.
- [P-14] 橋口, 王, 森川, 青山, “光波長多重ネットワークにおける波長優先度を用いた波長予約方式の性能評価,” 電子情報通信学会技術報告, 通信方式研究会, CS2003-54, July 2003.
- [P-15] Y. Sun, T. Hashiguchi, V. Q. Minh, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “A burst switched network testbed for future photonic Internet,” 電子情報通信学会技術報告, フォトニックネットワーク研究会, NS2004-167/PN2004-63, Dec. 2004.

---

## 大会 (7)

- [P-16] 橋口, 王, 森川, 青山, “バーストオプティカルネットワークにおける CoS 指向波長割当手法,” 電子情報通信学会総合大会, B-10-107, Mar. 2001.
- [P-17] 橋口, 王, 森川, 青山, “バーストスイッチフォトニックネットワーク CoS 提供手法における割当可能波長数,” 電子情報通信学会総合大会, B-6-188, Mar. 2002.
- [P-18] 橋口, 孫, 吉田, 王, 森川, 青山, “光バーストスイッチネットワークにおけるバースト送受信部の設計と試作,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-14, Mar. 2004.
- [P-19] 住吉, 橋口, 王, 森川, 青山, “光バーストスイッチングネットワークにおける遅延低減バースト送信手法,” 電子情報通信学会総合大会, B-10-58, Mar. 2003.
- [P-20] Y. Sun, T. Hashiguchi, N. Yoshida, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Design and development of an optical burst switched network testbed,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-13, Mar. 2004.
- [P-21] 橋口, 孫, ミン, 王, 森川, 青山, “光バーストスイッチネットワークテストベッドにおけるバースト伝送遅延の一考察,” 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2005.
- [P-22] V. Q. Minh, T. Hashiguchi, Y. Sun, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Bandwidth guarantee for optical burst switched networks with periodical wavelength sharing,” 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2005.

## 学位論文 (3)

- [P-23] 橋口, “顕微ラマン分光法による半導体レーザダイオード端面評価,” 卒業論文, 東京大学 工学部 電子情報工学科, Mar. 2000.
- [P-24] 橋口, “光バーストスイッチネットワークにおける CoS 指向波長割当方式,” 修士論文, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻, Mar. 2002.

- 
- [P-25] 橋口, “光バーストスイッチネットワークにおける波長選択方式に関する研究,” 博士論文, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻, Mar. 2005.