

# 波長予約に基づく高速光パス設定方式の実装と評価

大橋 正稔<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 基礎工学部 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

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

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

E-mail: <sup>†</sup>m-oohashi@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし WDM を利用した通信形態のひとつに、ノードにおいて光パス設定要求が発生すると同時に高速に波長を予約し、通信を行う方式が考えられている。ただし、光パス設定時に資源の競合が生じた場合は再度光パス設定を試みる必要があることから、通信要求発生から通信開始が可能となるまでの時間は光パス設定の試行回数に大きく依存する。この通信開始までの時間の短縮を目的として、往復伝播遅延時間あたりに光パス設定を 2 回試みることで光パス設定を高速化する高速光パス設定方式が提案されており、計算機シミュレーションによりその有効性が明らかになっている。本稿では波長の予約および解放を行う GMPLS プロトコルを実装し OXC と組み合わせて実証実験を行い、従来手法と提案手法を比較および評価することで、高速光パス設定方式の有用性を明らかにする。

キーワード 波長分割多重、フォトニックネットワーク、光パス、波長予約、バックワード、コネクション設定遅延

## Implementation and evaluation of fast lightpath setup method in wavelength-routed WDM networks

Masatoshi OHASHI<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> School of Engineering Science, Osaka University Mathikaneyama 1-3, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University Mathikaneyama 1-7, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: <sup>†</sup>m-oohashi@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** One promising approach to effectively utilize WDM networks is to transfer the data on-demand basis through a fast wavelength reservation. Then, the data is transferred using the assigned wavelength channel. If the wavelength reservation fails, the data transfer delay, which is defined as the time from when the data transfer request arises at the source node to when the data is successfully received by the destination node, is much affected since retrial of the wavelength reservation is delayed by the propagation delay. We have proposed a fast lightpath setup method that tries to establish a lightpath twice during a round-trip propagation time, and have evaluated the method by computer simulations where there is neither packet processing delay nor OXC configuration delay. In this paper, we present overview of our implementation and experimental results showing that our setup method takes smaller lightpath setup delay than the backward reservation protocol.

**Key words** Wavelength Division Multiplexing, Photonic Network, Lightpath, Wavelength Reservation, Backward, Setup Delay

### 1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) における通信形態の一つに、通信要求の発生時に波長の予約を高速に行い、その後通信を行う方式が考えられている [1]。この

場合、送受信ノード間で波長のチャンネルを設定することで光パスを設定し、通信を行う。GMPLS は IP ネットワークで用いられるパケット転送技術 MPLS (Multi Protocol Label Switching) の概念を WDM などの回線交換型のネットワークにも適用可能となるよう拡張させたプロトコルである。GMPLS では波長

に対してラベルをつけ、ラベルによってスイッチングを行うことにより送受信ノード間での光パスの確立を可能としている。

光パス設定をネットワーク内の各ノードが分散して行うための波長予約方式として、波長を送信側、または、受信側から予約する波長予約方式（それぞれ、フォワード型波長予約方式、バックワード型波長予約方式）がある [2]。フォワード型波長予約方式は送信ノードから受信ノードに向かって各リンクで波長を予約していく波長予約方式である。一方、バックワード型波長予約方式は、送信ノードから受信ノードへ向かう時は各リンクの波長の利用状況を調べるのみで、それに基づいて受信ノードから送信ノードに向かって各リンクの波長を予約していく。文献 [2] では、光パス設定時における波長の予約時間、および、予約する波長数の違いに基づいてフォワード型/バックワード型波長予約方式の比較評価が行われている。その結果、フォワード型波長予約方式よりもバックワード型波長予約方式のスループット性能が良いことが示されている。また、文献 [3, 4] ではバックワード型波長予約をもとにして、光パス設定時の棄却率を小さくする方式が提案されている。しかし、上記を含む分散型波長予約に関する多くの研究 [3], [4] では、受信ノードから送信ノードに対してのみ波長予約を試みるのみであり、往復伝搬遅延時間あたりの光パス設定の試行回数は 1 回である。そのため、光パス設定のための波長予約に失敗すると、波長予約に成功し、通信が可能となるまでの時間は往復伝搬遅延時間だけ遅れる。

我々の研究グループでは光パスの再設定時の波長予約動作に着目した高速光パス設定方式 [5] を提案している。高速光パス設定方式はフォワード型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式を組み合わせ、常に波長利用情報を収集することで、光パス設定要求が棄却されて再設定を行う際に直前に収集した波長利用情報を利用する。また、往復伝播遅延時間あたりに光パス設定を 2 回試みることを可能としている。その結果、制御信号の往復回数が少なくなり、高速な光パス設定を行うことができる。以降では、この高速光パス設定方式をハイブリッド型光パス設定方式と呼ぶ。

文献 [5] では、シミュレーションにより性能評価を行いその有効性を示したが、シミュレーションではメッセージの処理遅延や OXC の設定遅延が発生しないものと仮定している。しかし、現実には制御パケットの送信遅延および処理遅延、OXC 設定遅延が生じる。これらの遅延が、光パス設定要求が発生してから光パスが設定されるまでの時間である光パス設定遅延に与える影響は明らかになっていないのが現状である。

そこで本稿では我々の研究グループが提案したハイブリッド型光パス設定方式を PC 上に実装し、実証実験を通してその有効性と実用性を評価する。シミュレーション評価では考慮されておらず、実証実験による評価で初めて明らかになる点としては、例えば、ハイブリッド型光パス設定方式における光パス設定高速化のためのオーバヘッドの大きさに関する評価が挙げられる。ハイブリッド型光パス設定方式では従来方式と比較して、パス設定時に中継ノードが受信する制御パケット数および制御パケット長が大きくなっている。実証実験を通してこのオーバ

ヘッドが小さいことを示すことにより、提案方式の有効性が確かめられる。このように、ハイブリッド型光パス設定方式を実装し、実証実験を通して評価することでハイブリッド型光パス設定方式の有効性と問題点を明らかにすることが本研究の目的である。

本稿の内容は以下の通りである。まず 2 章において既存の光パス設定方式およびハイブリッド型光パス設定方式を説明する。3 章ではハイブリッド型光パス設定方式の実装の概要を説明する。4 章ではバックワード型光パス設定方式とハイブリッド型光パス設定方式の実装プログラムを用いた光パス設定遅延の計測実験を通して、メッセージの処理遅延や OXC の設定遅延が光パス設定遅延に与える影響について議論を行う。最後に、5 章にて本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 分散型光パス設定方式

### 2.1 ネットワークモデル

本稿で想定するネットワークは、ノードと光ファイバから構成される。各ノードは、波長スイッチとその制御を行う制御部から構成されており、ノード間は光ファイバで連結されている。光ファイバ中の 1 波長は、制御用のデータをやりとりするための波長である。残りの波長は送受信ノード間の通信に用いるための波長でありオプティカルクロスコネクタ (OXC) と連結される。OXC は、入力光ファイバ中の特定の波長を電気処理を行うことなく光信号のまま出力光ファイバに送り出す装置である。ノード間で通信を開始する場合、送信ノードから波長スイッチの調整を行うための制御信号を送出し、受信ノードまでの各ノードにおいて波長スイッチの設定を行うことで光パスを設定し、その後通信を行う。なお、本稿では、波長変換は行わないとし、送受信ノード間において同一の波長を用いて光パスを設定するものとする。

### 2.2 フォワード型光パス設定方式

フォワード型光パス設定方式では、送信ノードで通信要求が発生すると、まず送信ノードに接続されているリンクの波長の利用状況を調べる。空いている波長の中から 1 波長を選択し、その波長を予約するとともに、波長ラベルを RESV (波長予約) 信号に書き込んで次ノードに向けて送信する。受信ノードまでの各ノードでは、RESV 信号に書き込まれた波長ラベルに基づいて次リンクの波長を予約する。波長予約に失敗した場合 RESV 信号を NACK 信号に置き換える。受信ノードで RESV 信号を受け取ると、光パスの設定が完了されたとし、ACK 信号を送信ノードに向けて送出する。NACK 信号を受け取った場合、NACK 信号を送信ノードに向けて送出する。送信ノードが ACK 信号を受け取ると送受信ノード間で通信を開始する。一方、NACK 信号を受け取ると、光パスの設定に失敗したため予約した波長を解放する RLS (波長解放) 信号を送出するとともに、再度波長の予約を試みる。

### 2.3 バックワード型光パス設定方式

バックワード型光パス設定方式の動作を図 1 に示す。送信ノードにおいて通信要求が発生すると、PROBE (予備的検査) 信号を生成し、送信ノードに接続されているリンクの波長の利

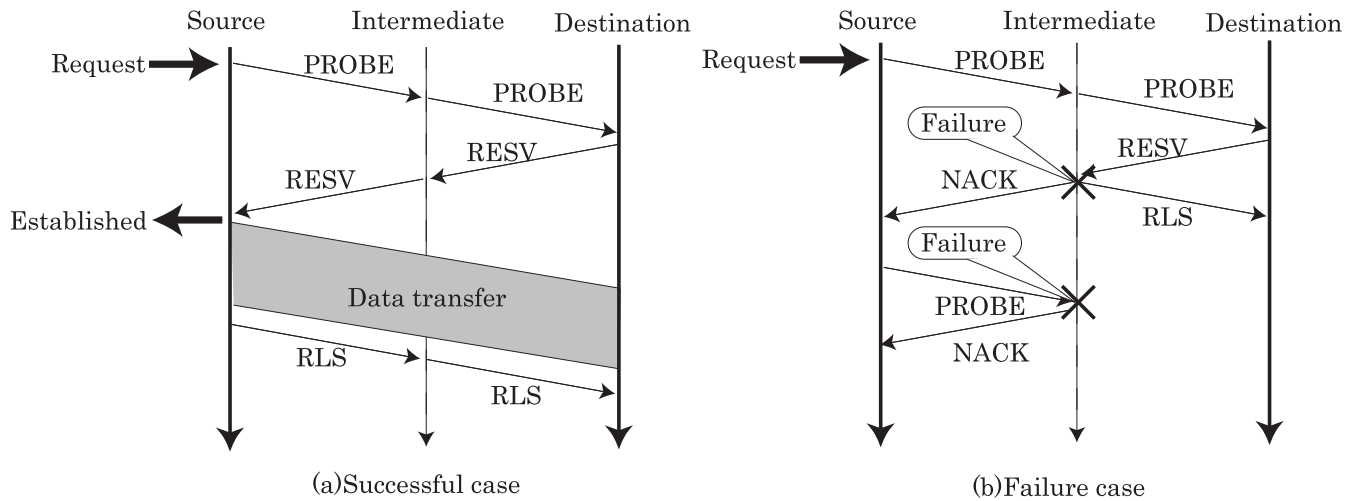


図1 バックワード型波長予約方式

用状況を調べ、その結果を PROBE 信号に書き込んで次ノードに向けて送出する。受信ノードまでの各ノードでは、PROBE 信号に書き込まれた波長利用状況と次リンクの波長利用状況との積集合をとる。受信ノードでは、PROBE 信号中に書き込まれた波長利用状況にもとづいて 1 波長選択し、RESV 信号を用いて受信ノードから送信ノードに向けて波長予約を試みる。すべてのリンクで波長予約に成功すると設定された光パスを用いて通信を開始し、通信が終了すると予約した波長を解放する RLS 信号を受信ノードに向けて送出する。波長の予約に失敗した場合、光パスの設定に失敗したため予約した波長を解放する RLS 信号を送信するとともに、再度波長の予約を試みる。

#### 2.4 ハイブリッド型光パス設定方式

ハイブリッド型光パス設定方式の動作を図 2 に示す。通信要求が送信ノードに到着すると、送信ノードはバックワード型光パス設定方式と同様に PROBE 信号を受信ノードに向けて送出する。従来方式と異なる点は、受信ノードで PROBE 信号を受け取った時に、RESV 信号を送出するだけでなく、PROBE 信号を生成し送信ノードに向けて送出する点にある。受信ノードから RESV 信号によって波長予約が順次行われている時に、競合により波長予約に失敗すると、送信ノードでは受信ノードから送られてくる PROBE 信号から波長を選択し、フォワード型光パス設定方式と同様に送信ノードから受信ノードに向けて波長予約を試みる。また、バックワード型光パス設定方式と同様に PROBE 信号を生成し、受信ノードに向けて送出する。

以上のように、提案方式では往復伝搬遅延時間あたりの波長予約の試行回数が 2 回となるため、従来方式に比べて波長予約のための制御信号の往復回数が少なくなる。その結果、高速な光パス設定を行うことができる。提案方式の詳細な動作は以下の通りである。

##### (1) 送信ノードの動作

(S1) 端末から通信要求を受取ると PROBE 信号を生成し、最初のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、次のノードへ送出する。

(S2) 中間(受信)ノードから RESV 信号を受取ると、端末へ

コネクション設定が完了したことを知らせる。端末は、RESV 信号中に書き込まれた波長を用いて通信を開始する。

(S3) NACK 信号を受取ると (NACK 信号中の予約波長が空集合の場合)、受信ノードから送られてくる PROBE 信号中の空き波長を調べ、ランダムに選んだ 1 波長を予約波長とし次リンクの波長を予約する。次に、波長番号を RESV 信号に書き込み、受信ノードに向けて送出する。また、受信ノードから送信ノードにむけての波長予約に備え、(S1) に従って PROBE 信号を再度作成し、受信ノードに向けて送出する。

(S4) NACK 信号を受取ると (予約波長が空集合以外の場合)、予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末に送出する。続いて (S3) と同様に RESV 信号および PROBE 信号を生成し、これらの信号を受信ノードに向けて送出する。

(S5) ACK 信号を受取ると、ACK 信号中に書き込まれた波長を用いて通信を開始する。

(S6) 通信が終わると最初のリンクで予約された波長を解放するとともに予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末へ送出する。

##### (2) 中間ノードの動作

(I1) PROBE 信号を受取ると次のリンクでの空き波長の集合と、PROBE 信号中の候補波長の集合の積集合をとり、次のノードへ PROBE 信号を送出する。

(I2) RESV 信号を受取ると RESV 信号中の予約波長の集合と次のリンクの空き波長の集合の積集合をとる。予約波長が空集合でない場合は RESV 信号を次のノードへ送出する。予約波長が空集合である場合、NACK 信号を送信ノードに向けて送出する。

(13) NACK 信号、あるいは、ACK 信号を受取ると、そのまま次のノードへ送出する。

(14) RLS 信号を受取ると、次のリンクの予約波長を解放し、次のノードへ RLS 信号を送出する。

### (3) 受信ノードの動作

(R1) PROBE 信号を受取ると、PROBE 信号中の空き波長を調べ、1 波長をランダムに選び予約波長とする。次に、受信ノードにつながったリンクでその予約波長が空いているかを調べる。空いていない場合は予約波長を空集合とし、NACK 信号を送信ノードへ送出する。空いている場合には予約波長を予約し、RESV 信号を送信ノードへ送出する。また、次のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、送信ノードに向けて送出する。

(R2) RESV 信号を受取ると、RESV 信号中の予約波長を調べ、空集合の場合は NACK 信号を送信ノードへ送出する。空集合以外の場合は ACK 信号を送信ノードへ送出する。

(R3) NACK 信号を受け取ると (NACK 信号中の予約波長が空集合の場合)、送信ノードから送られてくる PROBE 信号中の空き波長を調べ、ランダムに選んだ 1 波長を予約波長として次リンクの波長を予約する。次に、波長番号を RESV 信号に書き込み、送信ノードに向けて送出する。また、次のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、送信ノードに向けて送出する。

(R4) NACK 信号を受取ると (予約波長が空集合以外の場合) 予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末に送出する。続いて (R3) と同様に RESV 信号および PROBE 信号を生成し、これらの信号を受信ノードに向けて送出する。

## 3. ハイブリッド型光パス設定方式の実装

### 3.1 GMPLS の実装

GMPLS 実装プログラムは C++ 言語で記述しており、Linux kernel 2.6.9 上で動作する。シグナリングメッセージは UDP を用いて通信する。図 3 に実装した制御プログラムの概要を示す。制御プレーンと実装したモジュールについては、資源予約モジュール (RSVP Controller)、ルーティングモジュール (OSPF Controller)、リンクマネジメントモジュール (Link Management Protocol Controller) がそれぞれ対応している。コンソールインターフェースは光パス設定要求のコマンド入力と、光パス設定状況の表示を行う。GMPLS System Manager は Console Interface からのメッセージとシグナリングや制御を行うモジュールからのコマンドを受信する。Path Request Generator はパスの設定と解除の要求を RSVP Controller に

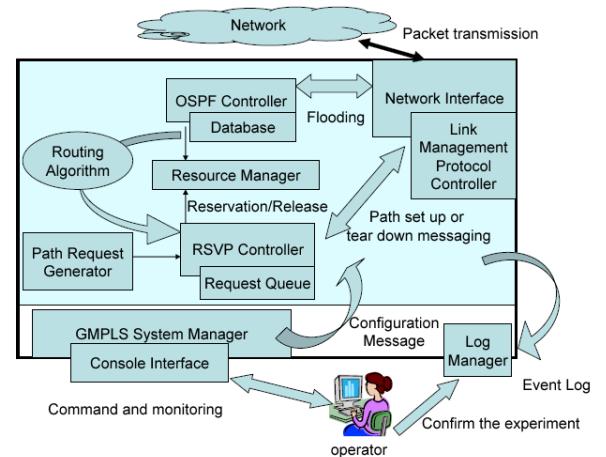


図 3 GMPLS 実装プログラムの概要

対して生成する。要求の発生頻度については、GMPLS System Manager によって設定される。RSVP Controller はリクエストキューを持っており、Path Request Generator からの要求はキューにいれられる。そして、パスの設定、解除と RSVP シグナリングの制御を行う。RSVP Controller がパスの設定を始める際に、Routing Algorithm により指定する経路を用いる。制御プレーンが隣接ノードから RSVP Reserve/Release メッセージを受信すると、RSVP Controller がそれを受け取り、Resource Manager によって選択された波長の予約および解除を行う。RSVP Reserve/Release シグナルは Network Interface を通じて次ノードに転送される。Network Interface では Link Management Protocol Controller が動作しており、転送エラーや隣接ノードとの接続状態の検出を行っている。OSPF Controller はリンク状態情報の交換を行っており、波長資源の予約状況が変化すると制御プレーンを通して隣接ノードに対して予約状況を伝える。OSPF Controller は隣接ノードの広告した情報の受信も行い、受信した情報をデータベースに記録する。その情報は Routing Algorithm による経路選択のために用いられる。なお、本稿ではシグナリングプロトコルを評価するためルーティングアルゴリズムは固定経路であるとし、各目的地ノードへの経路をコンソールから入力して指定している。

### 3.2 OXC 制御機能の実装

OXC の制御には GSMP (General Switch Management Protocol) を用いた。OXC 上では GSMP\_slave プログラムが動作しており、受信した GSMP メッセージに基づいて OXC の操作を行う。まず制御プレーンにおいて GMPLS 実装プログラム起動時に OXC に adjacency 確立メッセージを送信し、OXC との adjacency を確立する。一旦 adjacency を確立すると、OXC と制御プレーンのノードの間で adjacency を維持するためのメッセージの送受信が定期的に行われ、この確立されたコネクションを介して OXC の設定変更を行う。

GSMP には様々なメッセージが定義されているが、本実験ではスイッチ設定を行う Add Branch メッセージとスイッチ設定解除を行う Delete Branches メッセージの 2 種類のみを用いた。

ハイブリッド型光パス設定方式における RESV\_PROBE メッ

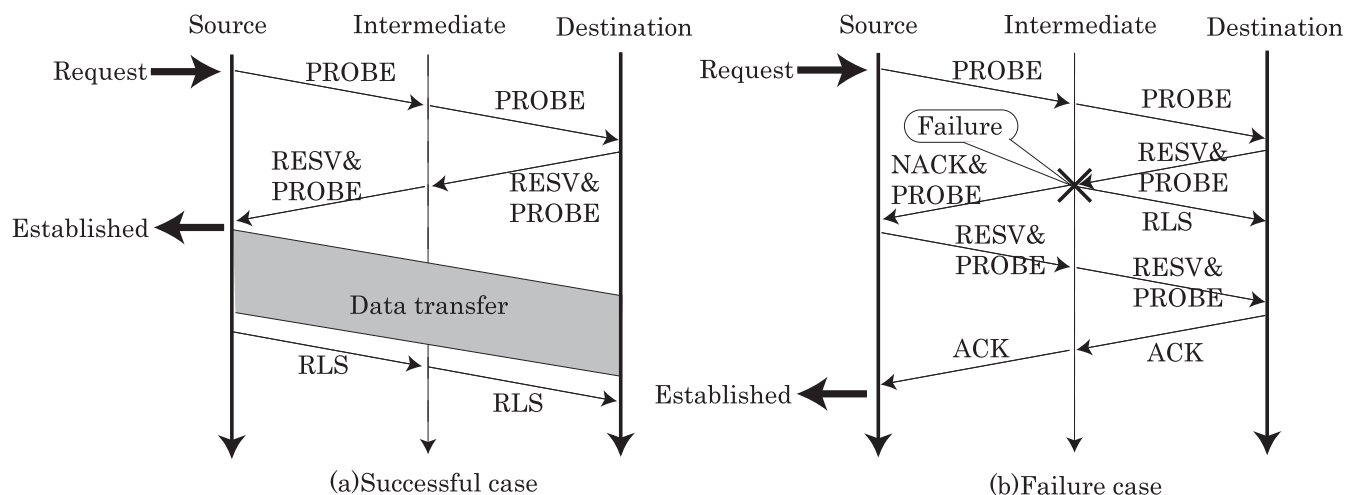


図 2 ハイブリッド型光パス設定方式

セージまたは ACK メッセージが経路上の中間ノードにおいて受信されると、そのノードは OXC に対して Add Branch メッセージを送信する。メッセージには入力ポート番号と出力ポート番号を指定し、指定入力ポートからの光信号を指定出力ポートへ出力するバインド設定を行う。

同様に RELEASE メッセージが送信ノードで生成される際に、送信ノードは同時に OXC に対して Delete Branches メッセージを送信する。メッセージには入力ポート番号と出力ポート番号を指定し、指定入力ポートからの信号を指定出力ポートへ出力するバインド設定を解除する。

#### 4. 光パス設定遅延の評価

本章では実験ネットワークを構築し、光パス設定遅延の計測とハイブリッド型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式による光パス設定遅延の比較および評価を行う。

##### 4.1 実験環境

PC 3 台と、波長 1550nm の光端子付スイッチングハブ 1 台、OXC 1 台により構成した実験環境を図 4 に示す。各ノードでは GMPLS 実装プログラムを動作させ、スイッチングハブを介してイーサネットにより通信を行い、制御プレーンを構成している。またノード 2 と OXC の制御用ポートを接続し、ノード 2 上で動作している GMPLS 実装プログラムから OXC の制御を行う。データプレーンでは、スイッチングハブの VLAN 機能を用いてイーサネットポートと光端子を 1 対 1 で繋ぐことにより E/O コンバータとして動作させる。ノード 1 からのパケットは E/O コンバータにより波長 1550nm の光信号となり OXC によりスイッチングされ、O/E コンバータを介してノード 3 に到着する。

##### 4.2 OXC 設定遅延

光パス設定遅延を計測する前に、本節では OXC 設定遅延を明らかにする。なお、ここで言う OXC 設定遅延とは、OXC 設定変更を開始してから光パス上にデータが流れ始めるまでの時間である。4.1 節に示した実験環境においてノード 3 からノード 1 に対して IPerf [6] により常に UDP パケットを固定レート

80Mbps で送出する。ノード 1 では UDP パケット到着の間隔を tcpdump によって観測する。UDP パケットはおよそ 0.1ms 間隔で送出されるので、OXC の入出力ポートをバインドしている状態では UDP パケット到着の間隔は 0.1ms 前後となる。OXC においてバインドを解除・再設定を行い、UDP パケットの到着をノード 1 で観測し、データプレーンレベルでの OXC 設定遅延を測定した。その結果、OXC の切り換えからデータ通信開始までに必要となる時間は 9ms となることがわかった。

##### 4.3 パス設定要求到着モデル

光パス設定要求のモデルを図 5 に示す。ノード 1 においてノード 2 とノード 3 に対してそれぞれ到着率  $\lambda$  で光パス設定要求が発生し、同様にノード 2 においてノード 3 に対して到着率  $\lambda$  で光パス設定要求が発生する。要求発生はポアソン過程に従う。光パスの保持時間は平均 1000ms の指数分布に従うものとする。また、GMPLS 実装プログラム上で利用可能な波長多重数は 8 とするが、機材の関係上実際に光パス設定を行うのは 1 波長のみとする。波長選択は利用可能波長の中からランダムに行われることから、各波長について光パス設定に関する設定遅延特性は同一であり、1 波長の実装により観測された事象は他の全ての波長においても生じるとみなせる。

また、簡単のために光パス設定はノード 1 からノード 3 に対してのみ行う。ノード 1 からノード 2 に対する光パスおよびノード 2 からノード 3 に対する光パスに関しては OXC にノード 1 からノード 3 に対する光パス設定に用いていないポート間への解除・設定メッセージを送信し、設定遅延を設けている。なお、データプレーンにおけるパケットの送信方向(ノード 3 からノード 1)が光パスの方向と一致していないが、これはノード 1 において同一のタイマによる計測を行う必要があるためである。次節で光パス設定遅延を計測する際にもノード 3 からノード 1 に対してパケットを送信しているが、このことが光パス設定遅延に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。

##### 4.4 バックワード型光パス設定方式との比較評価

以上の実験環境において、ノード 1 においてノード 3 に対するリクエストが発生した時刻と、そのリクエストにより OXC

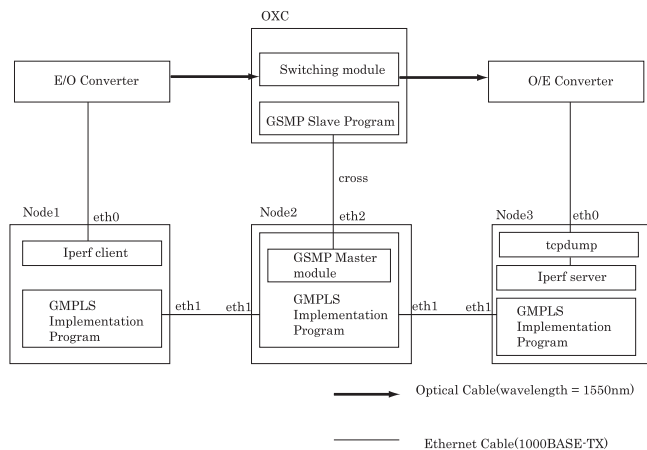


図 4 光パス設定遅延の計測実験の環境構成

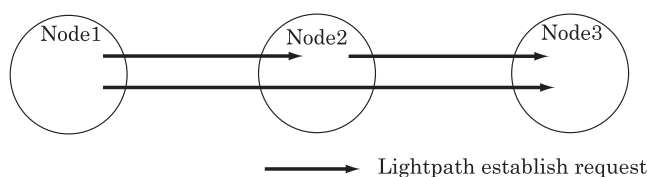


図 5 実験における光パス設定要求の発生

のバインド設定・解除が行われノード1のデータプレーンにおいて観測される光パス設定時刻の差より光パス設定遅延を導出する。その計測結果を図6に示す。結果より、光パス設定要求の到着率がおよそ0.0018[requests/ms]以下のとき、ハイブリッド型光パス設定方式による平均光パス設定遅延はバックワード型光パス設定方式と比較して小さいことがわかる。この時リンク利用率は40%付近となっており、実ネットワークにおいて十分適用可能であることがわかる。また、文献[5]でも観測されるように、到着率が高くなるとハイブリッド型光パス設定遅延が増加し、バックワード型光パス設定方式よりも性能が劣化する。この理由は以下の通りである。負荷が高くなるとともに波長予約を行った後に他ノードで光パス設定要求の棄却が多くなり、波長が無駄に予約される可能性が高まる。ハイブリッド型光パス設定方式はバックワード型光パス設定方式よりも光パス設定試行回数が多く、無駄に波長が予約される波長予約回数も多くなり、その結果、光パス設定遅延が大きくなっている。この問題への対処としては、PROBE信号で収集したリンクの利用情報をもとにバックワード型とハイブリッド型を切り替える方式が考えられるが、これは今後検討していく予定である。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、通信要求が到着してから通信開始までの時間の短縮を目的としたハイブリッド型光パス設定方式の実装と評価を行った。ハイブリッド型光パス設定方式では、受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約するとともに、波長の空き状況を調べるためのPROBE信号を送信ノードに向けて送る。波長予約に失敗した場合に送信ノードから受信ノードに向けて波長を予約することにより、往復伝搬遅延時間の光パス設定の試行を2回とすることにより、通信が可能になるまでの時間を短縮

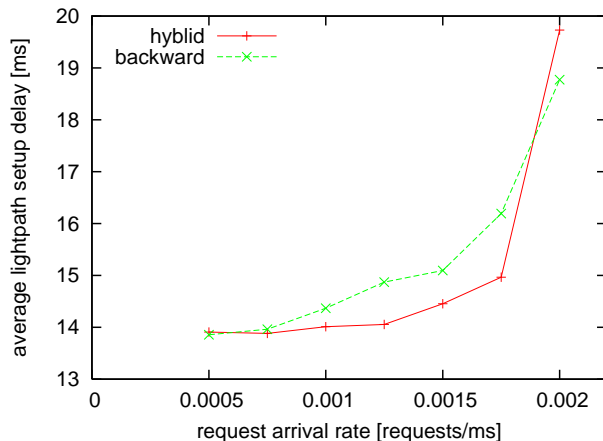


図 6 光パス設定遅延の比較結果:実験時間 20 分の平均値

している。GMPLS 実装環境における従来手法との比較評価では、リンク利用率が40%以下の場合で従来手法よりも光パス設定遅延を短くすることができることを明らかにした。今後は光パス上にTCPトラフィックを流し、その輻輳ウィンドウサイズを調べ、光パス設定変更時の影響を明らかにするとともにルーティング手法の違いによる光パス設定遅延への影響を明らかにする予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)によっている。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN's," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, pp. 1171-1182, July 1992.
- [2] X. Yuan, R. Melhem, R. Gupta, Y. Mei, and C. Qiao, "Distributed control protocols for wavelength reservation and their performance evaluation," *Photonic Network Communications*, vol. 1, no. 3, pp. 207-218, 1999.
- [3] J. Zheng and H. T. Mouftah, "Distributed lightpath control based on destination routing for wavelength-routed WDM networks," *Optical Network Magazine*, vol. 3, pp. 38-46, July 2002.
- [4] J. Zheng and H. T. Mouftah, "A nested path reservation protocol for multiplexed all-optical networks," in *Proceedings of ONDM*, pp. 401-411, Feb. 2003.
- [5] Y. Kanitani, S. Arakawa, M. Murata, and K. Kitayama, "Distributed wavelength reservation method for fast lightpath setup in WDM networks," in *Proceedings of Optical Network and Technologies Conference*, pp. 121-128, Oct. 2004.
- [6] "Iperf - the TCP/UDP bandwidth measurement tool," available at <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>.