

# WDM ネットワークにおける分散型経路制御方式の評価

徳 隆宏<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

<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> 大阪大学サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: <sup>††</sup>t-toku@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし WDM 技術の高速データ通信への適用形態として、データ通信要求の発生時にノード間で光パスを設定し、データ通信を開始する方式が考えられている。一方、各ノードが自律的に光パスを設定する分散環境を対象とした光パス設定に関する研究では、ネットワーク内の各リンクにおける波長利用情報を収集し、収集した波長利用情報に基づいて光パスの経路および波長を選択するための様々なアルゴリズムが提案されてきている。これらのアルゴリズムでは、光パス設定を効率良く行うためには波長利用情報を正確かつ詳細に収集する必要がある。その一方で、光パス設定時の波長予約方式として、光パスの受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約するバックワード型波長予約方式が考えられている。バックワード型波長予約方式を適用した場合、送信ノードから受信ノードまでの各リンクの波長利用情報をオンデマンドで収集するため、経路選択時にはリンク利用情報を正確かつ詳細に収集することなく効率良く光パスを設定できる可能性がある。本稿では、リンクの波長利用情報を収集する役割を波長予約方式に移すことにより、送信ノードにおける経路選択のために交換すべきリンク利用情報の検討を行った。その結果、フォワード型波長予約方式での結果とバックワード型波長予約方式での結果とを比較すると、バックワード型波長予約方式ではリンク利用情報の交換頻度を抑えつつ、光パス設定時の棄却率が劣化しないことを明らかにしている。

キーワード 分散型光パス設定、経路選択、波長選択、波長予約方式、バックワード型、リンク伝搬遅延時間

## An Evaluation of Routing Algorithms for Distributed Lightpath Establishments in WDM Network

Takahiro TOKU<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

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

<sup>†††</sup> Cybermedia Center, Osaka University 1-32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan

E-mail: <sup>††</sup>t-toku@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Many researches on the routing and wavelength assignment algorithms have assumed that the global link state information is obtained without any delays. For a distributed lightpath establishment environment, however, the blocking probability requests much depends on both the accuracy of the global link state information and distributed protocols for wavelength reservation. One promising approach for the distributed wavelength reservation is to use backward reservation protocol, where the usage of the wavelength resources is collected along the forward path and wavelength resources are reserved along the backward path. Therefore, frequent link state exchange and details on link state information, such as usage of each wavelength, may not be necessary since those information is collected on-demand basis. This paper first discusses the role of the routing algorithm in WDM networks and then investigate how the frequency of link state information exchange affect the blocking probability of lightpath establishments. The simulation results show that less details on link state and less frequent link state exchange is enough for the routing algorithm when the backward reservation protocol is used, whereas conventional reservation protocol greatly affected by the frequency of link state information exchange.

**Key words** optical network, WDM, routing, link state information, backward reservation

## 1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は複数の周波数 (波長) の光信号を多重化して光ファイバで伝送することにより高速のデータ転送を実現する技術であり、将来のインターネットの基盤となる技術として考えられている。その実現形態として、通信要求の発生時に波長を割当て、コネクション設定を高速に行った上で、通信を開始する時データ転送を行う方式がある [1-3]。この場合、送受信ノード間で波長のチャンネル (光パス [4]) を設定することでコネクション設定が行われる。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が文献 [5] で議論されている。そこでは、光パス設定時における波長の予約時間、予約する波長数の違い、および中間ノードにおける制御信号のためのバッファの有無などの違いにもとづいて、いくつかの波長予約方式が提案されている。それらには、送信ノードから波長の予約を開始するフォワード型波長予約方式 (図 1)、および、受信ノードから波長の予約を開始するバックワード型波長予約方式 (図 2) がある。文献 [5] では、波長の予約時間を短くすることで性能が向上する傾向が示され、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による光パス設定の性能が良いことが示されている。ただし、上記の研究を含む波長予約方式に関する多くの研究では、光パスの経路は事前に与えられるとしている。

一方、各ノードが自律的に光パスを設定する分散型光パスネットワークのために、これまで様々な経路選択方式が考えられてきた [1, 3, 6, 7]。これらの研究で提案されている経路選択アルゴリズムは、ネットワークの状態に応じて経路選択を行うことで性能向上を図るものであった。経路選択によって性能を向上させるためには、各ノードにおけるネットワーク内の波長の利用状況に関する情報 (波長利用情報) の精度を高める必要がある。しかし、現実には、ネットワークトラフィック量の増加を防ぐため情報交換の頻繁に交換することは難しい。さらに、リンクの伝播遅延時間により波長利用情報は各ノードに遅れて到着し、波長利用情報の正確さは損なわれる。しかし、前述のバックワード型波長予約方式では、光パス設定時に経路上の各リンクの波長利用情報の収集を行う (2章参照)。そのため、波長利用情報を正確かつ詳細に収集することなく経路選択を行ったとしても性能が劣化しない可能性がある。

そこで、本稿では、計算機シミュレーションによって波長利用情報を交換する頻度の違い、および、リンク伝播遅延時間の違いによるコネクション設定の棄却率への影響をフォワード型/バックワード型波長予約方式のそれぞれに対して示し、光パス設定時にオンデマンドで波長利用情報を収集することによる効果を明らかにする。バックワード型波長予約方式を適用することにより経路選択と波長選択を分離し、オンデマンドで波長利用情報を収集して波長を決定すること、経路選択時に必要となる波長利用情報を抑えられることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2章で従来の経路選択方式、波長選択方式、および、波長予約方式の説明を行う。

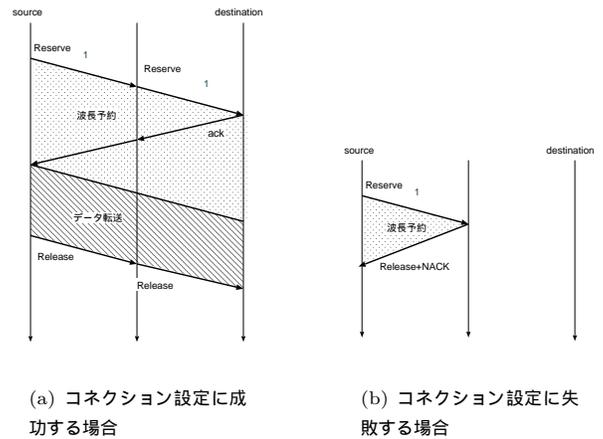


図 1 フォワード型波長予約方式

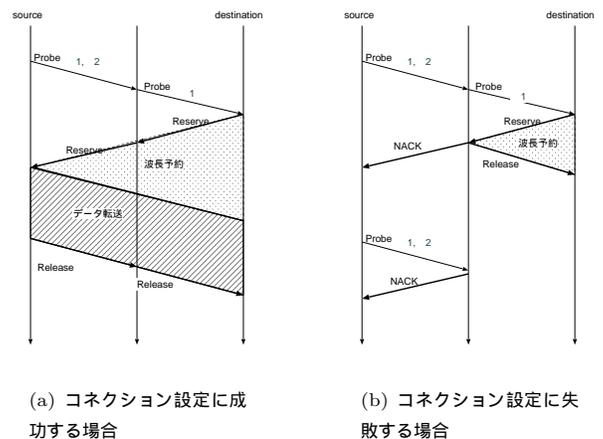


図 2 バックワード型波長予約方式

引き続き 3 章では、2 章で述べた各方式を適用した際の性能を、計算機シミュレーションの結果を用いてリンクステート情報更新間隔および棄却率の観点で考察を行う。最後に 4 章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 分散環境における経路選択方式とシグナリング方式

ネットワーク内の各ノードが分散して光パス設定を行なうためには、経路選択・波長選択に加え、波長予約を選択経路上で行なうためのシグナリング方式が必要となる。本章では、まずフォワード型波長予約方式およびバックワード型波長予約方式の動作を述べる。そして分散環境からリンクステート情報の交換による不正確さによって、フォワード型波長予約方式とバックワード型波長予約方式それぞれの性能がどのように低下するかについて述べる。

### 2.1 フォワード型波長予約方式

フォワード型波長予約方式ではコネクション設定要求が送信ノードに到着すると、まず光パスを設定する経路と波長を選択する。次に、選択した波長を予約するための RESERVE 信号を選択した経路上に送信する。中間ノードでは、RESERVE

信号中に書き込まれた波長を読みとり、次ノード間のリンクの波長を予約する。これを受信ノードまで順次行ない光パスを設定する。光パス設定に成功した場合(図 1(a))、受信ノードから送信ノードに向けて ACK 信号を送信する。送信ノードで ACK 信号を受信すると、データ転送を開始する。データ転送終了と同時に使用した波長を解放する RELEASE 信号を受信ノードに向けて送信し、受信ノードまでの各リンクの波長を解放する。光パス設定に失敗する例を図 1(b) に示す。送信ノードから RESERVE 信号が送られてくるものの、他の光パス設定要求によって既に波長が予約もしくは使用されている場合、光パス設定要求は棄却され、送信ノードに棄却されたことを示す NACK 信号が送信される。

## 2.2 バックワード型波長予約方式

バックワード型波長予約方式ではコネクション設定要求が送信ノードに到着すると、光パス設定に使用する経路を選択する。次に、隣接リンクにおいて波長予約が可能な波長を PROBE 信号に書き込み、選択した経路上に沿って PROBE 信号を送信する。中間ノードでは PROBE 信号を受信すると、PROBE 信号中に書き込まれた波長集合と次ノード間のリンクにおいて波長予約が可能な波長との積集合を求め、その結果 PROBE 信号に書き込み次ノードに PROBE 信号を送信する。これを受信ノードまで順次行ない、経路上で光パス設定が可能な波長の情報を取得する(図 2(a))。受信ノードに PROBE 信号が到着すると、PROBE 信号に書き込まれた波長の中から 1 波長選択し、その波長を用いて光パス設定を行なうために RESERVE 信号を送信ノードに向けて送信する。RESERVE 信号が送信ノードに到着すると、光パス設定に成功したとし、データの転送を開始する。データの転送が終了すると受信ノードに向けて RELEASE 信号を送信し、使用した波長を解放する。バックワード型波長予約方式において光パス設定要求が棄却されるのは以下の 2 つの場合である(図 2(b))。1 つは、中間ノードにおいて積集合を求めた結果、空集合になった場合である。ただし、この場合波長の予約は一切行なわれないため、予約した波長を解放するための RELEASE 信号は不要である。もう 1 つは、受信ノードから波長の予約を開始するものの、既に他の光パス設定要求により波長が予約されている場合である。波長の予約に失敗すると、送信ノードへ NACK 信号が送信され、さらに受信ノードへ向けてこれまで予約した波長を解放するために RELEASE 信号が送信される。

## 2.3 分散環境における経路制御方式

前節までにフォワード型波長予約方式、および、バックワード型波長予約方式の動作を述べた。フォワード型波長予約方式において光パス設定要求の棄却を回避するためには、送信ノードにおいて、他の光パス設定によって使用されていない波長および経路を選択しなければならない。そのため、送信ノードにおいて、各リンク上の各波長の利用状況を知る必要があり、各ノード間で交換されるリンクステート情報として、各波長毎に波長予約可能かどうかの情報が必要になる。一方、バックワード型波長予約方式では、送信ノードでは経路選択のみを行ない、波長の選択は PROBE 信号によって集められた利用情報をも

とに受信ノードにおいて行なわれる。このようにバックワード型波長予約方式では、各波長ごとに利用可能かどうかを各ノード間で交換する必要はない。

ネットワークにおける経路制御の目的として、エンドノード間の到達性の確保、負荷の高いリンクの迂回、障害が発生しているリンクの迂回などが挙げられる。負荷が高いかどうかを判断するには、波長毎の利用状況をリンクステート情報として交換する必要はなく、既に使用もしくは予約されている波長数で十分であると考えられる。これらのことから、バックワード型波長予約方式を用いることによって、リンクステート情報の更新間隔を大きくすることで経路制御のための交換情報量を減らしつつ、光パス設定の棄却率の上昇を抑えることができると考えられる。

経路選択については、各ノードペアに対してあらかじめ用意した経路を選択する手法(固定経路選択)と、リンクの波長の利用状況(リンクステート)にもとづいて経路を選択する手法(適応型経路選択、動的経路選択)がある [1, 3, 6, 7]。動的経路選択手法は、リンクステート情報にもとづいて経路選択を行なう手法である。しかし、この手法はネットワークの変動が大きいネットワークでは計算時間が大きくなることや、安定した経路選択が行なわれないといった問題が存在する。そこで、本稿では、事前に複数の経路候補を用意しリンクステート情報に基づいて最も負荷の低い経路を選択する最小負荷経路選択アルゴリズムを用いる。ここで用いる負荷とは、経路上の各リンクのうち最も波長が使用されているリンクでの利用波長数である。

## 2.4 関連研究

フォワード型波長予約方式やバックワード型波長予約方式といったこれらシグナリング方式にもとづいて、経路選択・波長選択についてこれまでにさまざまな検討が行われている。前述のようにバックワード型波長予約方式、フォワード型波長予約方式それぞれのシグナリング方式の特徴から、必要なリンクステート情報が異なる。波長選択・経路選択それぞれについて、リンクステート情報やシグナリングによって収集した情報を利用する方式、もしくはあらかじめ用意した経路もしくは波長を選択する方式が考えられ、それぞれについてこれまで研究されている。文献 [3, 5] ではバックワード型波長予約方式を用いて、経路については配布されたリンクステート情報にもとづきオンデマンドに選択し、波長についてはシグナリング方式により収集した空き波長情報から受信ノードで選択する手法について検討されている。文献 [3, 5] では経路についてはスタティックにあらかじめ計算したものをいい、波長については配布されたリンクステート情報にもとづいて選択を行う手法について検討されている。文献 [1, 3, 5] では、フォワード型波長予約方式を用い、収集した情報にもとづいて送信ノードでオンデマンドに経路および波長の選択を行う手法について検討されている。

## 3. 性能評価

本章では計算機上でのシミュレーションにより、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それぞれについて、リンクステート情報の配布量の更新間隔の違いによる棄却

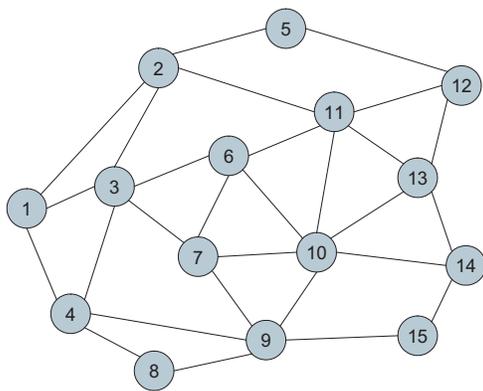


図 3 ネットワークモデル

率への影響を明らかにする。

### 3.1 シミュレーションモデル

図 3 に評価に用いるネットワークポロジを示す。ネットワークは 15 ノードで構成され、各リンクにはファイバが双方向に 1 本あるとする。リンクの伝搬遅延時間は、図 3 のリンクの長さをもとに作成した長さの比に係数  $\alpha$  を乗じた値を与える。ネットワーク内の各ノードは、隣接するファイバにおける波長の利用状況を取得可能であるとし、他のノードにその利用状況をリンクステート情報として配布する。各ファイバには制御情報交換用の波長が 1 波長用意されているとし、光パス設定時の制御信号とリンクステート情報は、この波長を用いて交換するものとする。また、ノードにおける処理遅延時間は 0 とし、制御信号およびリンクステート情報の交換時に発生する遅延はリンクの伝搬遅延時間によってのみ発生すると仮定する。

計算機シミュレーションでは以下のパラメータを用いる。

- 光パス設定要求は、各ノードペアに対して一様に発生し、平均到着率  $\lambda$  のポアソン分布にしたがって発生する。
- 光パスのサービス時間は平均  $1/\mu$  の指数分布に従う。
- 光ファイバの波長多重数を  $W + 1$  とする。1 波長は制御用の波長であり、光パス設定には残り  $W$  波長を用いる。
- リンクステート上の更新間隔を  $T$  で表す。

また、フォワード型波長予約方式における経路選択・波長選択は、文献 [1] で用いられている手法を用いる。これは、各リンクの各波長の利用情報を収集し、1 波長以上の空き波長が存在している経路のうち最もホップ数が小さい経路を選択し、空き波長のうち 1 つをランダムに選択する。バックワード型波長予約方式における経路選択は最小負荷経路選択アルゴリズムに基づいて選択し、PROBE 信号によって収集した空き波長の中から 1 波長をランダムに選択する。

### 3.2 リンクステート情報の更新間隔と棄却率との関係

図 4 に、 $W$  を 8、サービス時間を 1ms、平均リンク伝搬遅延時間を 0.177ms ( $\alpha = 1.0$  ms) とし、リンクステート情報の更新間隔を変化させた時の棄却率をフォワード型波長予約方式とバックワード型波長予約方式それぞれに対して求めた結果を示す。図において、横軸は各ノードに到着する光パス設定要求の平均到着率であり、縦軸は棄却率である。また、“global” は光パス設定時にリンク利用状況がすべてわかると仮定した場合

の結果であり、 $T = 0$  は波長の利用状況に変化がある度にリンクステート情報の交換を行った場合の結果である。この図を見ると、フォワード型波長予約方式およびバックワード型波長予約方式のいずれの場合においても、光パス設定時にすべてのリンク利用状況を正確に知っているとは仮定した時の結果と、 $T$  を 0 とした時の結果がほとんど同じであることがわかる。これは、平均リンク伝搬遅延時間が 0.177ms と非常に小さいためであると考えられる。次に、 $T$  を 15 秒とした時の結果と  $T$  を 0 とした時の結果を比較すると、棄却率はリンクステート情報の更新間隔を大きくすることにより確実に上昇していることがわかる。ただし、フォワード型波長予約方式においてリンクステート情報の更新間隔を大きくすることによる棄却率の上昇は、バックワード型波長予約方式におけるそれよりも大きいことが図 4 より見てとれる。先述したように、フォワード型波長予約方式では、リンクステート情報量の更新間隔が大きくなるにつれて、送信ノードで経路および波長を選択する際に、既に予約されている波長を選択する可能性が高くなる。一方、バックワード型波長予約方式では、経路選択時のリンクステート情報と実際の波長利用状況が異なっていたとしても、波長利用状況をオンデマンドで収集した上で波長選択が行なわれる。その結果、バックワード型波長予約方式では、リンクステート情報の更新間隔の棄却率への影響は小さくなっている。なお、到着率が低い場合 (0.004 以下) では、棄却率はほとんど変化しないことがわかる。これは、到着率が低い場合には波長予約が行われる頻度が低いため、リンクステート情報の更新間隔を大きくしたとしても、経路選択時に影響がないためである。

次に、平均リンク伝搬遅延時間を 1.77ms ( $\alpha = 1.0$  ms) に変更し、ネットワークの規模が大きい場合の結果を図 5 に示す。リンクの伝搬遅延時間が大きくなることで、全体の棄却率が図 4 に比べて上昇している。また、到着率が低い場合には、波長予約が行われる頻度が低く、リンクステート情報の更新間隔による経路選択への影響が無いいため、棄却率に差が見られない。次に、光パス設定時にすべてのリンク利用状況を正確に知っているとは仮定した時の結果と  $T$  を 0 とした時の結果を比較すると、フォワード型波長予約方式において棄却率に有意な差が現れていることがわかる。経路および波長選択時のリンク利用状況に関する情報がリンク伝搬遅延時間だけ遅れて各ノードに伝わるため、フォワード型波長予約方式では棄却率が上昇している。その一方でバックワード型波長予約方式では図 4 と同様に棄却率にほとんど差がない。これは、PROBE 信号でその経路上で利用できる波長をオンデマンドで選択することができるためである。

図 6 は、平均サービス時間を 500ms とした時の棄却率を、フォワード型波長予約方式およびバックワード型波長予約方式それぞれに対して求めた結果である。図 4 と比較すると、平均サービス時間が長くなることで更新間隔の違いが棄却率に大きく影響することがわかる。特に、フォワード型波長予約方式では更新間隔が長くなると棄却率が大きく劣化している。これは平均サービス時間が長くなることで波長が使用されている時間が長くなるにも関わらず、更新間隔が 15 秒であるため波長

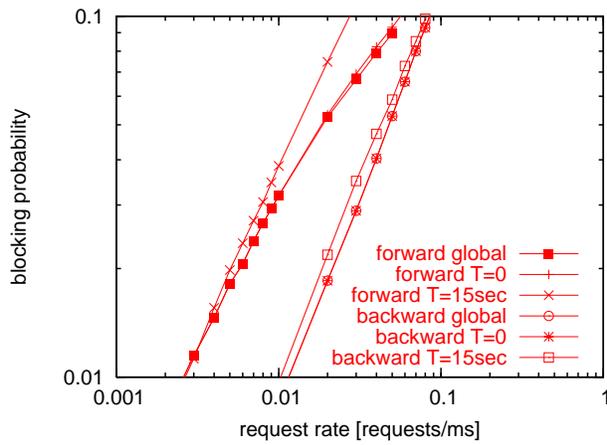


図 4 更新間隔の違いによる棄却率への影響 :  $W=8$ ,  $1/\mu = 1\text{ms}$ , 平均リンク伝搬遅延時間  $0.177\text{ms}$  ( $\alpha = 0.1\text{ms}$ )

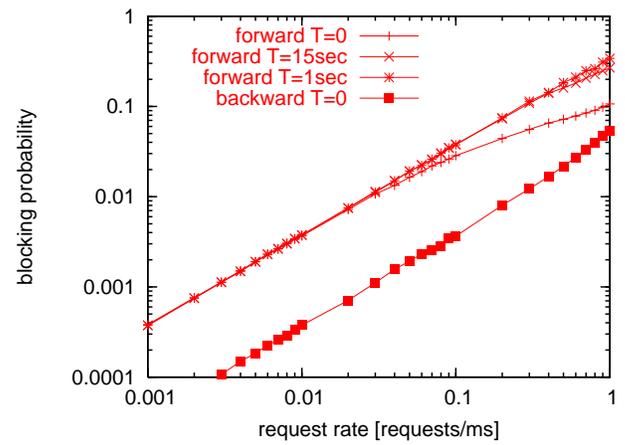


図 7 3 ノードタンデムネットワークにおける棄却率の評価 :  $W=8$ ,  $1/\mu = 1\text{ms}$ , 平均リンク伝搬遅延時間  $0.1\text{ms}$

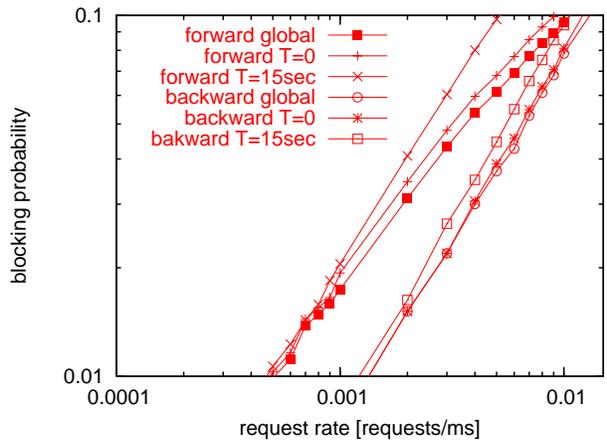


図 5 更新間隔の違いによる棄却率への影響 :  $W=8$ ,  $1/\mu = 1\text{ms}$ , 平均リンク伝搬遅延時間  $1.77\text{ms}$  ( $\alpha = 1.0\text{ms}$ )

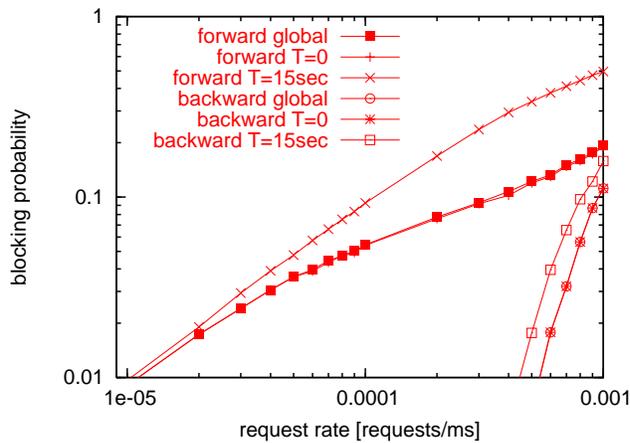


図 6 更新間隔の違いによる棄却率への影響 :  $W=8$ ,  $1/\mu = 500\text{ms}$ , 平均リンク伝搬遅延時間  $0.177\text{ms}$  ( $\alpha = 0.1\text{ms}$ )

の利用状況の変化をとらえきれないためである。一方、 $T$  が 0 の場合は、リンク伝搬遅延時間に対して平均サービス時間が長くなるため、リンク利用状況の全体を知っていると仮定した場合 (“ global ”) と  $T$  が 0 の場合の結果には性能差が現れていない。

### 3.3 リンクステート情報の更新間隔の波長選択への影響

次に、ネットワークのトポロジーを 3 ノードタンデムネットワークに変更し、経路を固定としてリンクステート情報の更新間隔が波長選択へ与える影響を明らかにする。図 7 に光パス設定要求の到着率に対して棄却率を求めた結果を示す。フォワード型波長予約方式では、 $T$  を、0、1 秒、15 秒と変化させている。なお、バックワード型波長予約方式では波長選択時には定期的に配布されるリンクステート情報を使用しないことから、ここでは  $T$  を 0 の結果のみを示す。この図より、フォワード型波長予約方式を用いた場合、リンクステート情報の更新間隔が長くなると棄却率が大きく劣化している。フォワード型波長予約方式を適用する場合には、更新間隔を短くする必要がある。

## 4. ま と め

本稿では、フォワード型波長予約方式およびバックワード型波長予約方式それぞれについて、リンクステート情報の更新間隔による棄却率への影響を計算機シミュレーションにより明らかにした。フォワード型波長予約方式では、送信ノードで波長を選択することからリンクステート情報の更新間隔を大きくすると性能が大きく劣化する。そのため、フォワード型波長予約方式において一定の性能を得るためには更新間隔を小さく設定しなければならない。一方、バックワード型波長予約方式では、受信ノードで収集したリンク利用状況をもとに波長選択を行うことから、リンクステート情報の更新間隔が大きい場合においても棄却率の上昇を抑えることができることがわかった。また、バックワード型波長予約方式では、各リンクで使用されている波長数のみを用いて経路選択を行なうことから経路選択のための制御情報量を抑えられる。今後は、代替経路選択 (Alternate Routing) 手法を適用した場合にフォワード型波長予約方式とバックワード型波長予約方式それぞれで必要となるリンクステート情報を検討していく予定である。

## 文 献

- [1] J. Zhou and X. Yuan, “A study of dynamic routing and wavelength assignment with imprecise network state information,” in *Proceedings of International Conference on*

- Parallel Processing Workshops (ICPPW'02)*, pp. 202–207, Aug. 2002.
- [2] 荒川 伸一, 宮本健太郎, 村田 正幸, 宮原 秀夫, “フォトニックネットワークにおける高速データ通信のための波長割当方式の性能解析,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. JB3-B, pp. 424–433, Apr. 2000.
  - [3] H. Zang, J. Jue, L. Sahasrabudde, R. Ramamurthy, and B. Mukherjee, “Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 39, pp. 100–108, Sept. 2001.
  - [4] 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.
  - [5] X. Yuan, R. Gupta, and R. Melhem, “Distributed control in optical WDM networks,” in *Proceedings of IEEE Conference on Military Communications (MILCOM'96)*, vol. 3, pp. 100–104, Oct. 1996.
  - [6] H. Zang, J. Jue, and B. Mukherjee, “A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks,” *Optical Networks Magazine*, vol. 1, pp. 47–60, Jan. 2000.
  - [7] E. Karasan and E. Ayanoglu, “Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks,” *IEEE / ACM Transaction on Networking*, vol. 6, pp. 186–196, Apr. 1998.