

特別研究報告

題目

光パスネットワークにおける分散型経路制御方式の評価

指導教官

村田 正幸 教授

報告者

徳 隆宏

2003 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

近年のインターネットユーザの増加、および、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) に代表されるアクセス網の広帯域化により、基幹ネットワークにおいて高速かつ大容量通信に対する要求が高まってきている。波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は、複数の波長の光信号を多重化して伝送することにより高速かつ大容量のデータ転送を実現する技術である。WDM 技術の利用形態として、データ発生時にオンデマンドで送受信ノード間に波長のチャンネル (光パス) を設定し、光パス設定後にデータの転送を行う方式が考えられている。光パスを設定するためには、その送受信ノード間で用いる経路および波長を選択する必要があるが、今まで様々な光パス設定方式に関する研究がなされてきた。しかし、その多くの研究では、アルゴリズムを適用する時点のネットワーク内の波長の利用状況が正確であるという前提で経路選択アルゴリズムを適用していた。実際には、経路選択アルゴリズムで用いる波長の利用状況に関する情報は、少なくともリンクの伝搬遅延時間だけ遅れて各ノードに到着し、その結果、波長の利用状況の正確さが失われる可能性がある。そこで、本報告では分散環境における動的な光パス設定方式を対象とし、リンクの伝搬遅延時間が経路選択アルゴリズムにおよぼす影響を明らかにする。まず、リンクの伝搬遅延時間が短く、かつ予約に利用される波長数ができるだけ多くなるような経路を選択するアルゴリズムを検討している。

そしてシミュレーションによる評価の結果、光パスの平均保持時間に対してリンクの伝搬遅延時間が大きい場合には、リンクステート情報が遅れて各ノードに到着するため、最小負荷経路選択手法では性能が低下することを明らかになった。しかし、到着率が低い場合には予約された波長が少ないため、予約時にブロックが起きる場合が少い。そのため複数の経路候補から経路を選択する方式による性能向上はほとんど見られず、伝搬遅延時間が最小となる経路を固定で与える方式がわずかに性能が良くなることを明らかにした。また、バックワード型波長予約方式において受信ノードでの波長選択アルゴリズムの評価を行い、その結果、選択可能な波長集合の中で最小な波長を選択する方式よりもランダムに波長を選ぶ方式が良い性能を示すことがわかった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing) 、光パスネットワーク、分散ネットワーク、経路選択、
波長選択、波長連続性、リンクステート情報、リンク伝搬遅延、波長予約方式

目次

1	はじめに	6
2	動的光パス決定方式	9
2.1	経路選択アルゴリズム	10
2.1.1	固定経路選択方式	11
2.1.2	固定代替経路選択	11
2.1.3	適応型経路選択方式	11
2.1.4	動的経路選択方式	12
2.2	動的光パス設定方式	12
2.3	波長選択アルゴリズム	14
3	分散型経路制御方式の評価	15
3.1	ネットワークモデル	15
3.2	シミュレーションモデル	15
3.3	リンク伝搬遅延時間の影響	18
3.4	経路候補数とブロック率との関係	18
3.5	PROBE 時/RESERVE 時のブロック	21
3.6	波長選択アルゴリズムの影響	27
4	分散型光パス設定方式における経路選択方式の評価	28
4.1	比較する経路選択アルゴリズム	28
4.2	リンクステート情報の遅延を考慮した適応型経路選択アルゴリズム	28
4.3	経路選択アルゴリズムの評価	30
5	おわりに	34
	謝辞	35
	参考文献	36

目次

1	波長連続性の制約を考えた場合の光パス設定	9
2	フォワード型波長予約方式	14
3	バックワード型波長予約方式	14
4	ネットワークポロジ	16
5	リンクステート情報の遅延が性能におよぼす影響 (常時アダプタイズメント) . . .	19
6	リンクステート情報の遅延が性能におよぼす影響 (定期的アダプタイズメント) . .	19
7	経路候補数がブロック率に及ぼす影響 (常にリンク情報を更新する場合)	20
8	経路候補数がブロック率に及ぼす影響 (定期的にリンク情報を更新する場合) . . .	21
9	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (常時アダプタイズメント): $\alpha = 1, 1/\mu = 1 \text{ sec}$	22
10	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (定期アダプタイズメント): $\alpha = 1, 1/\mu = 1 \text{ sec}$	23
11	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (常時アダプタイズメント): $\alpha = 5, 1/\mu = 1 \text{ sec}$	23
12	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (定期アダプタイズメント): $\alpha = 5, 1/\mu = 1 \text{ sec}$	24
13	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (常時アダプタイズメント): $\alpha = 5, 1/\mu = 500 \text{ ms}$	24
14	バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブ ロックの関係 (定期アダプタイズメント): $\alpha = 5, 1/\mu = 500 \text{ ms}$	25
15	波長選択アルゴリズムの影響: ランダム方式と最小一致方式との比較	26
16	バックワード型波長予約方式のタイムチャート図: 定期アダプタイズメント	29
17	バックワード型波長予約方式のタイムチャート: 常時アダプタイズメント	29
18	光パス設定要求の到着率とブロック率との関係: $\alpha = 0.5, 1/\mu = 500\text{ms}$	31
19	光パス設定要求の到着率とブロック率との関係: $\alpha = 0.5, 1/\mu = 5000\text{ms}$	31

20	伝搬遅延時間を 0.5ms とし、光パス設定平均時間を 50ms とした時の光パス設定要求の到着率とブロック率との関係	32
21	到着率を 0.01[requests/ms] とし、光パス設定平均時間を 0.5ms とした時のリンク伝搬遅延時間とブロック率との関係	33

1 はじめに

近年、インターネットを利用した情報化が進むとともに、インターネットトラフィックは増加しており、高速かつ大容量のデータ転送を実現する技術として波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）技術が有望視されている。WDM 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、高速かつ大容量のデータ転送を実現する技術である。現状の WDM 伝送技術では、1 波長あたり 10Gbps の伝送速度で 8 波長多重することで 80Gbps の伝送帯域を提供する製品が発表されており、WDM 技術は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。

WDM 技術の高速データ通信への適用形態として、データ発生時に波長を割当て、コネクション設定を高速に行い、その後にデータ転送を行う方式が考えられている [1-3]。コネクション設定は送受信ノード間に波長のチャンネル（光パス）設定されることで行なわれる [4]。しかし、1 波長あたりの伝送容量が増大するとデータ転送時間は短くなるため、リンクの伝搬遅延時間が相対的に増加し、その影響を無視できなくなる。ところが、これまでの多くの研究では伝搬遅延時間が無視されてきた [4]。

光パス設定時のリンクの伝搬遅延時間を考慮した研究として、文献 [5] がある。文献 [5] では、光パス設定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基づいて、いくつかの光パス設定方式が提案されている。それらのひとつに、光パスに用いる波長を送信側、または、受信側から予約する光パス設定方式（それぞれ、フォワード型予約方式、バックワード型予約方式）がある。フォワード型予約方式は、送信ノードにデータ転送要求が到着した時に、経路および波長を決定し、その波長を送信ノードから受信ノードまで予約する方式である。バックワード型波長予約方式では、データ発生時に送信ノードから受信ノードまでの各リンクにおける波長の利用状況を収集し、受信ノードでは、収集した波長の利用状況に基づいて光パスに用いる波長を選択する。選択した波長をもとに、送信ノードから受信ノードまで経由した経路に沿ってその波長を予約する。この方式は、光パス設定要求が発生した時に波長の利用状況を動的に収集することから、最新の利用状況に基づいた波長選択ができる。その結果、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での光パス設定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。しかし、これらの研究では、波長の利用状況は動的に収集するものの、送受信ノード間の経路は固定経路があらかじめ与えられるとしている。

WDM ネットワークにおいて、複数の経路候補集合からネットワークの利用状況に応じて経路を選択するアルゴリズムは、従来の研究において盛んに研究されており、主に静的に経路を設定する静的経路選択方式 [6, 7] と、データ発生と同時に経路選択を行なう動的経路選択方式 [3, 7-9] に分類される。静的経路選択方式とは、波長数およびノード、リンクなどのネットワークの情報や、予想されるネットワークトラフィック要求量から、ノード間の経路を事前に設定する方式である。一方、動的経路選択方式は、光パス設定要求が発生すると同時に現在のネットワークの利用状況からノード間の経路を計算する方式である。各リンクにおける波長資源の予約状況をネットワーク内の全てのノード間に通知することによって、各ノードは利用状況を把握し、その情報に基づいて経路を選択する。しかし、文献 [3, 7-9] を含む多くの研究では、経路および波長選択アルゴリズムを適用する時にはネットワーク内の各リンクの利用状況が正確であるとしてきた。現実には、波長の利用状況に関する情報は、少くともリンクの伝搬遅延時間だけ遅れて各ノードに到着するため、利用状況を正確に反映することはできない。一方、文献 [1] では、リンク情報の更新の遅延による光パス設定でのブロック率の上昇を明らかにしているが、そこでは送信ノードにおいて波長を決定する方式を対象とした評価が行なわれている。また、文献 [5] で議論されている光パス設定時のリンクの伝搬遅延時間の影響は考慮されていない。さらに、受信ノードにおいて波長を決定するバックワード型波長予約方式に関しては、リンク利用状況に関する情報の遅延の影響は明らかになっていないのが現状である。

光パス設定方式としてバックワード型波長予約方式を適用する場合、送信ノードから受信ノードまでの各リンクにおける波長の利用状況はデータ発生時に収集される。そのため、[1] で示されたリンク情報の不正確さがおよぼす波長決定アルゴリズムへの影響は抑えられると考えられる。一方、経路選択アルゴリズムは送信ノードで適用されるため、リンクの利用状況に関する情報の遅延がネットワークの性能におよぼす影響は大きくなると考えられる。そこで、本報告では、動的に波長の利用状況を収集するバックワード型波長予約方式を対象として、リンクの伝搬遅延時間がネットワークの性能へおよぼす影響を計算機シミュレーションによって明らかにする。シミュレーションにあたって、C++言語で作成したシミュレーションツールを用いて光パス設定要求のブロック率の評価を行なっている。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において既存の動的な光パス設定方式を説明する。3 章

では、分散環境において動的に光パスを設定する際のリンクの伝搬遅延の影響、および、リンク利用状況に関する情報の正確さがブロック率におよぼす影響と波長選択手法による性能の違いをシミュレーションによって明らかにする。4章では、3章で示したリンク伝搬遅延時間の影響を考慮した、動的な光パス設定手法と、最小負荷経路選択、最小ホップ数経路選択、最小遅延時間経路選択とで比較を行い、分散環境での性能評価を行う。最後に、5章にて本報告のまとめと今後の課題を述べる。

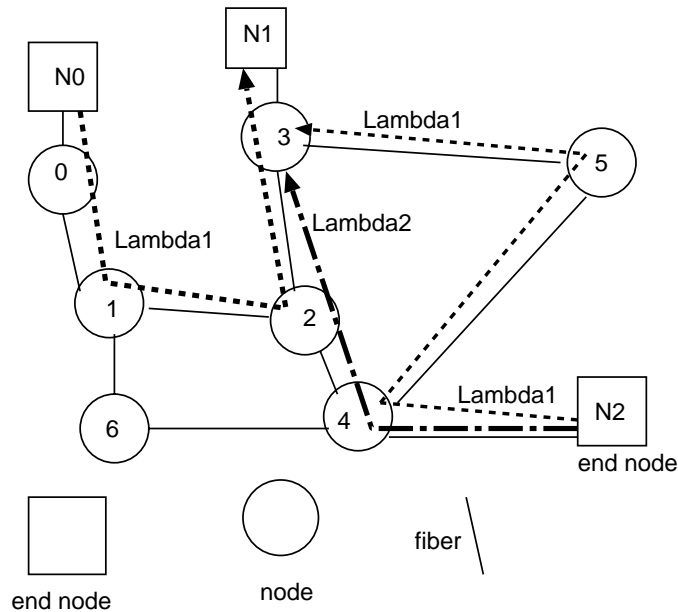


図 1: 波長連続性の制約を考えた場合の光パス設定

2 動的光パス決定方式

本報告で対象とする光パスネットワークのモデルを図 1 に示す。ネットワークは、ノードと光ファイバから構成され、ノード間は光ファイバで連結されている。各ノードは、電気信号を光信号に変換する送受信器、波長多重装置、波長分割装置、波長スイッチから構成される。データを送信する場合、まず送信側においてデータを光信号に変換する。次に、波長多重装置によって各波長を多重化し、多重化された光信号をファイバに送り出す。次ノードでは、多重化された光信号を波長分波装置によって各波長に分波し、分波された各波長の光信号は、各波長毎に用意された波長スイッチを経由しあらかじめ定められた出力先に送られる。波長スイッチは、入力ファイバ中の特定の波長の出力先を切替える装置であり、ノードにおいて電気処理を行なうことなく光信号を出力ファイバへ送り出すことができる。波長スイッチの出力先を光電変換器 (O/E converter) に切替えることで、光信号を電気信号に変換することが可能である。受信ノードでは、波長スイッチの出力先を光電変換器に設定することでデータを受信する。

波長スイッチを用いて送受信ノード間に設定される光のチャネルを光パスと呼び、波長変換を行わない場合には、送受信ノード間の各リンクにおいて同一の波長を用いなければならない (波長連続性)。波長連続性の制約によるブロックの例を図 1 に従って説明する。送信ノード N_0 から受信ノード

ド $N1$ 間の光パスが波長 λ_1 を用いて設定されているとする。この時、送信ノード $N2$ から受信ノード $N1$ に光パスを設定する場合、波長 λ_1 を用いてノード $N2$ を通る経路は既にノード $N2$ とノード $N3$ の光ファイバで波長 λ_1 が使用されているため、波長 λ_1 を予約することはできず、光パス設定要求はブロックとなる。各ノードに波長変換を行なう光デバイスを配置することで、波長連続性による光パス設定要求のブロックを抑えることはできる [10]。しかし、波長変換デバイスはコストが高く、また、変換可能な波長の範囲が制限される。そのため、本報告では、波長変換を行わないネットワークを対象として、リンクの伝搬遅延時間による影響を明らかにしている。

2.1 経路選択アルゴリズム

経路選択アルゴリズムは今まで盛んに研究されており、主に以下の 4 種類に分類することができる [1, 3, 7, 10]。

1. 固定経路選択 (Fixed Routing):

ある送受信ノード間に対して 1 つの経路をあらかじめ与え、光パスはその経路上のみに設定される。

2. 代替経路選択 (Alternative Routing):

事前に複数の経路を用意する。光パス設定要求が到着すると、複数の経路の中から 1 つ選択し、光パス設定を試みる。その経路上での光パス設定に失敗した場合、その経路以外の経路に対して光パス設定を試みる。

3. 適応型経路選択 (Adaptive Routing):

事前に複数の経路を用意する。その経路集合の中から、ネットワークの波長の利用状況に基づいて、経路を選択する。

4. 動的経路選択 (Dynamic Routing):

光パス設定要求が到着すると、ネットワーク内で光パス設定が可能なあらゆる経路を対象として経路計算を行ない、どの経路を選択するか決定する。

これらの経路選択方式は、紹介した順に計算に必要となる波長の情報および計算時間をより多く必要とする。しかし、より多くの経路を選択候補として利用できるため、ブロック率に関して性能は向上すると考えられている。なお、本報告では、固定経路選択および適応型経路選択を対象とし 4 章においてシミュレーションによる比較評価を行う。以降の各節では上記 4 方式についてそれぞれ説

明する。

2.1.1 固定経路選択方式

固定経路選択方式では、送信ノードおよび受信ノードに対して、常に同じ経路が選択される。光パス設定要求が発生した際には、その送受信ノードから唯一の経路が与えられる。この方式では、何らのポリシーによってリンクのコストを与え、ネットワーク内のすべてのノード間に対して、コストが最小となる経路を計算により事前に求めておく。リンクのコストとしては、伝搬遅延時間や負荷もしくはホップ数が用いられる。経路計算を事前に行なうことで、光パス設定要求が発生すると同時に高速にパス設定を開始できる長所があるが、経路がある特定のリンクに集中する場合には、光パス設定がブロックされる確率が高くなる。また、経路が固定されているため、リンクやノードの故障に対応することができない。

2.1.2 固定代替経路選択

固定代替経路選択方式においても、固定経路選択方式と同様に経路を事前に与える。ただし、本方式では、送受信ノード間に対して、複数の経路を事前に与える。光パス設定要求が発生すると、その送受信ノードからあらかじめ決められた優先順位に基づいて経路を一つ決定し、波長の予約を試みる。光パスの設定に失敗した場合、次の優先度を持つ経路に対して再び波長予約を行ない、全ての経路で光パスの設定が失敗した場合にブロックとする。この手法は複数の経路設定を試みることができるため、固定経路選択方式に比べてブロック率が低下し、また、ノードもしくはリンクなどの障害にも対応できる。しかし、経路選択がネットワークの現在の利用状況に基づいて行なわれないため、ネットワークの利用状況の変動が高い場合には、性能が劣化する。

2.1.3 適応型経路選択方式

適応型経路選択方式でも複数の経路候補から経路を選択する。固定代替経路選択方式とは異なり、ネットワークの各リンク上における波長予約状況を利用することで、より適切な経路の利用を行なう。ただし、利用される経路は、送信ノードおよび受信ノードの全ての組合せに対し、あらかじめ求めた複数の経路候補の中から選ばれる。この経路選択ではアルゴリズムを適用する時点で各ノード

が把握しているネットワークの状態を反映することができるため、よりブロック率の低い経路を選択することが可能となる。

この手法の 1 つとして、最も負荷の小さい経路を選択する (Least-Loaded) アルゴリズムがある [10]。このアルゴリズムは以下の通りである。まず、経路上の各リンクにおいて、予約されていない波長の数を調べ、その最小値を得る。この最小値が最も高い経路を経路候補から選択する。経路選択時に利用可能なネットワークで混雑しているリンクを回避することができるため負荷ブロック率をより低くすることができる。

適応型経路選択方式で重要なパラメータとして、あらかじめ与える経路候補の数がある。経路候補数が多い場合、少ない場合よりも利用される経路数が増加するため、経路選択方式でより適切であると算出される経路を利用することができる。一方、経路選択の計算を行なう際に、多くの経路を評価するため、経路選択時の計算時間が増加する。よって、あらかじめ与える経路候補は十分検討しなければならない。

2.1.4 動的経路選択方式

ここでは、複数経路から 1 つの経路を選択するのではなく、その時点でのネットワークの状況に応じて適切な経路を算出し、利用するものである。それにより、最適な経路を選択する機会が多い。この手法の 1 つとして、ダイクストラアルゴリズムを用いて、設定したリンクコストから経路を選択するというものがある。この動的経路選択方式では、ネットワークの状況の変化ごとに経路を求めするため、変動の大きいネットワークでは計算時間が増大する。

2.2 動的光パス設定方式

分散型 WDM ネットワークでは、波長を予約する際にはリンクの伝搬遅延時間の影響によって他の光パス設定要求と競合する。リンクの伝搬遅延時間の影響を考慮した波長予約方式としてフォワード型波長予約方式 (図 2) とバックワード型波長予約方式 (図 3) がある [5]。

フォワード型波長予約方式は、送信ノードにデータ転送要求が到着した時に、経路および波長を選択し、その波長を送信ノードから受信ノードまで予約する方式である。予約する波長を RESERVE 信号に書き込み、送信ノードから受信ノードまでの経路上において、RESERVE 信号中の波長の予約

を試みる。他の光パス設定によって波長が予約されている場合、光パスの設定は失敗となり送信ノードへブロックされたことを通知する NACK 信号が送信される。それと同時に、予約を行なった波長を解放する RELEASE 信号を送信ノードに向けて送り出す。受信ノードに RESERVE 信号が到着した場合、送受信ノード間のすべてのリンクで波長の予約に成功しているため、光パスが設定されたことを表す ACK 信号を送信ノードに送る。送信ノードでは、ACK 信号を受け取るとデータの転送を開始し、データ転送が完了すると波長を解放する RELEASE 信号を受信ノードに向けて送り出す。

バックワード型波長予約方式では、データ転送要求の発生時に送信ノードは受信ノードまでの経路を選択する。送信ノードに接続されている経路上のリンクにおいて利用可能な波長を、送信ノードは PROBE 信号として登録する。そして経路にそって PROBE 信号を受信ノードへ送信する。この時、PROBE 信号にはその経路で利用可能な波長情報が格納される。そして、この経路上に存在する中継ノードがこの PROBE 信号を受信する。この時中継ノードはさらに中継ノード自身のリンク中で利用可能な波長情報を PROBE 信号に反映させる。もし利用不可能な波長が PROBE 信号に登録されていれば削除する。受信ノードで PROBE 信号を受けとった場合、PROBE 信号中に格納された利用可能な波長集合の中から 1 波長を選択する。この選択した波長を用いて送信ノードから受信ノードまで経由した経路に沿ってその波長を予約する。波長予約は RESERVE 信号を用いて行い、受信ノードから送信ノードに向けて行なわれる。

バックワード型波長予約方式における光パス設定要求のブロックには 2 種類ある。一つは、PROBE 信号により利用可能な波長を調べた結果、利用可能な波長が存在していないと判明した時であり、もう一つは受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約する際に、すでに他の光パスによって波長予約が行なわれていた場合である。バックワード型波長予約方式では、PROBE 信号による利用状況の調査と、実際に波長予約が行なわれるまでにはリンクの伝搬遅延による時間差がある。そのため、この間に他の光パス設定によって波長が使用される可能性がある。しかし、バックワード型波長予約方式はフォワード型波長予約方式に比べて波長の予約時間を短くすることができるため性能が向上し [5]、また、波長の利用状況を動的に収集することから、最新の利用状況に基づいた波長選択が可能となる。

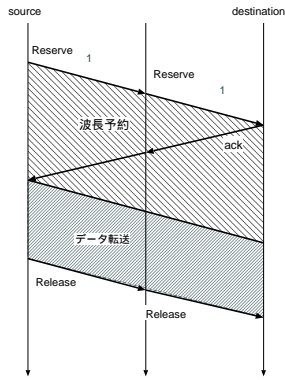


図 2: フォワード型波長予約方式

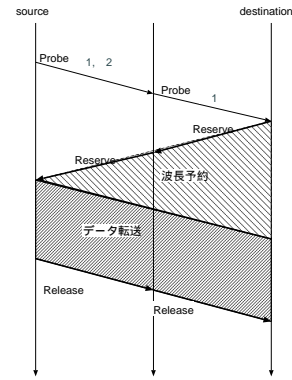


図 3: バックワード型波長予約方式

2.3 波長選択アルゴリズム

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、光パスで用いる波長を決定しなければならない。文献 [1] では、波長選択アルゴリズムとして、以下のアルゴリズムを挙げている。

- Random: 使用可能な波長の中から無作為に選択する
- First-Fit: 使用可能な波長集合のうち、周波数が短い波長を選択する
- Least-Used: 経路で利用されている波長の利用数を調べ、最も利用されていない波長を選択する
- Most-Used: 経路で利用されている波長の利用数を調べ、最も利用されている波長を選択する
- Least-Loaded: 経路上で最も空いている波長を利用する

これらの波長選択アルゴリズムの評価は文献 [6] に示されておりリンクの伝搬遅延時間を考慮しない場合、Most-used 方式が最も良い性能を示す。一方、リンク伝搬遅延時間の影響がある場合は、波長をランダムに選択する手法が良い性能を示す [1]。ランダムに波長を選択する場合、予約される波長を分散され、他の光パス設定要求との競争が起こりにくくなるためである。本報告においても、バックワード型波長予約方式における受信ノード波長選択アルゴリズムの影響を明らかにしており、その結果は 3 章で示す。

3 分散型経路制御方式の評価

本章では、バックワード型波長予約方式を用いた分散型光パス設定方式において、リンクの伝搬遅延時間の影響が光パス設定のブロック率におよぼす影響を明らかにする。計算機上のシミュレーションによって、経路制御方式への影響を示し、最適な経路制御方式について議論を行なう。

3.1 ネットワークモデル

シミュレーションでは、図 4 [11] に示す 15 ノード、28 リンクからなるネットワークトポロジーを用いる。ノード間の各リンクには双方向に光ファイバが接続されているとし、片方向あたりのファイバ数を 1 とする。リンクの伝搬遅延時間は、図 4 から作成した遅延の比（表 1）に、係数 α を乗じた値を設定する。 α はシミュレーション時のパラメータであり、この α の値を変えることで、様々なリンクの伝搬遅延時間を設定する。各ノードペアごとの最短ホップ数は表 2 の通りであり、平均ホップ数は 2.56 である。

ノードは、隣接するファイバにおけるリンクの利用状況を取得可能であるとし、ネットワーク内のすべてのノードにその情報（リンクステート情報）を配布する。リンクステート情報は、制御用の波長を用いて各ノードへ配布される。制御用の波長の帯域はリンクステート情報の配布で用いる帯域に比べて十分に大きいとし、リンクステート情報の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。

3.2 シミュレーションモデル

本章で用いるシミュレーションモデルは以下のとおりである。

- 光パス設定要求は、平均到着率 γ のポアソン分布にしたがって発生し、各ノードペアに対して一様に発生する。
- また、光パスの保持時間は平均 $1/\mu$ の指数分布に従う。
- ノードにおける処理遅延時間は 0 とする。
- 波長予約方式としてバックワード型波長予約方式を使用する。
- 光ファイバの波長多重数を 8 とする。
- リンク情報の配布を定期的に行なう場合、その間隔を 1 [sec] とする。

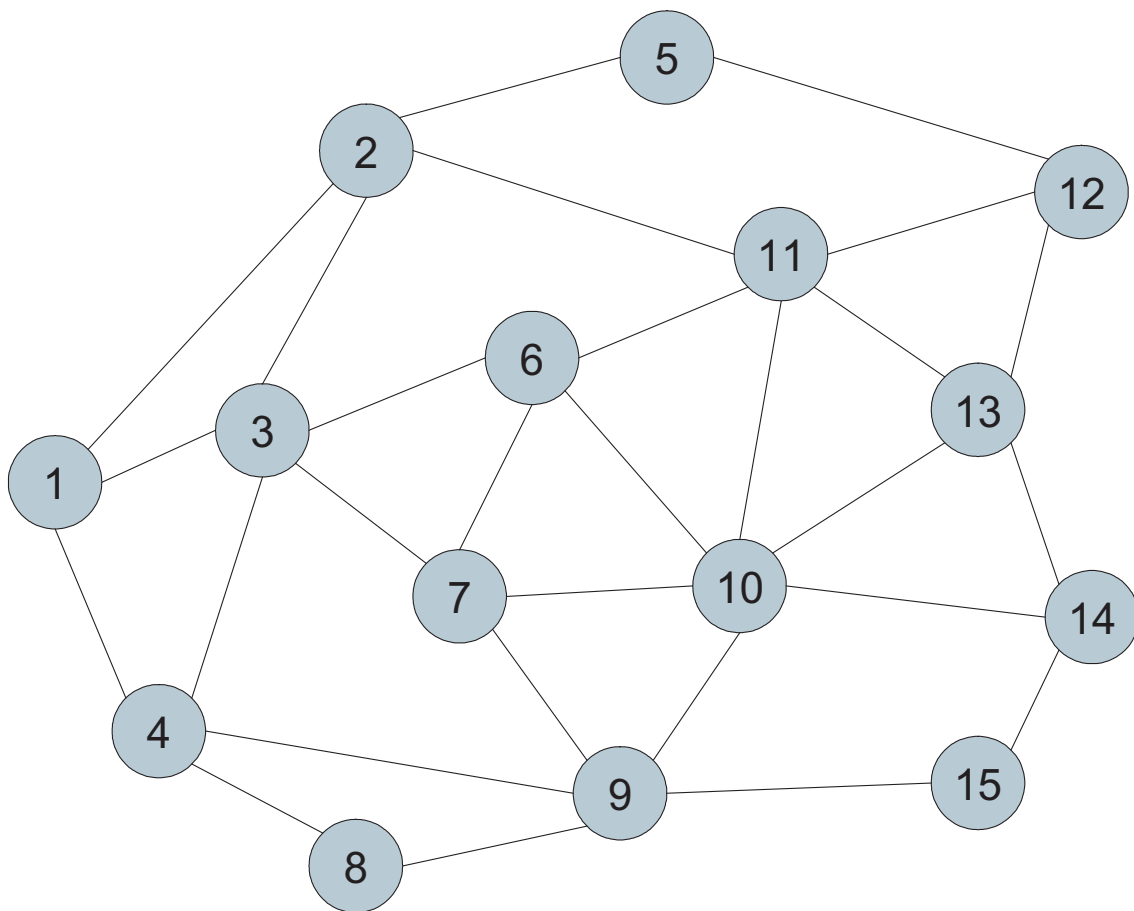


図 4: ネットワークトポロジー

表 1: 光ファイバの伝搬遅延の比

ノード番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-	3.0	1.1	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3.0	-	1.8	-	1.9	-	-	-	-	-	2.8	-	-	-	-
3	1.1	1.8	-	1.9	-	1.6	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1.5	-	1.9	-	-	-	-	1.3	3.1	-	-	-	-	-	-
5	-	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-
6	-	-	1.6	-	-	-	1.4	-	-	1.8	1.5	-	-	-	-
7	-	-	1.4	-	-	1.4	-	-	1.4	1.6	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1.3	-	-	-	-	1.6	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	3.1	-	-	1.4	1.6	-	1.3	-	-	-	-	2.2
10	-	-	-	-	-	1.8	1.6	-	1.3	-	2.0	-	1.7	2.2	-
11	-	2.8	-	-	-	1.5	-	-	-	2.0	-	1.8	1.3	-	-
12	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	1.8	-	1.3	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	1.3	1.3	-	1.2	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2	-	-	1.2	-	0.9
15	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2	-	-	-	-	0.9	-

表 2: 最短経路のホップ数とノードペア数

ホップ数	1	2	3	4
ノードペア数	56	84	56	14

- 光パスの保持時間は 1 [sec] とする。

3.3 リンク伝搬遅延時間の影響

本節では、文献 [7] において良いとされている最小負荷経路選択方式を対象とし、リンクの伝搬遅延時間およびリンク情報の不正確さが性能におよぼす影響を明らかにする。

図 5 に、到着率を変化させた時の光パス設定要求のブロック率を示す。この図を得るにあたって、経路候補数を 3 と設定した。図中において、リンク情報が各ノードに伝わる時間を考慮した時の結果を “LL-EV nodelay” と表記し、リンクの伝搬遅延時間を考慮した時の結果は “LL-EV” と表記している。また、伝搬遅延時間 d をそれぞれ 1ms、5ms とした時の結果も示している。この図を見ると、リンクステート情報の配布に遅延が発生しない場合、すなわち、送信ノードにおいて正確な情報に基づいて経路選択を行なう場合には、ブロック率が大きく抑えられることがわかる。特に、伝搬遅延時間が 5ms と大きい場合には、性能差が顕著である。これは、伝搬遅延が長くなることにより、予約処理時間が増大する。他の光パスとの競争が発生しやすくなるためブロックがより多く発生する。

定期的にリンク情報の更新を行なった時の結果を図 6 に示す。リンク情報が各ノードに伝わる時間を考慮した時の結果を “LL-PE nodelay” と表記し、リンクの伝搬遅延時間を考慮した時の結果は “LL-PE” と表記している。“LL-PE nodelay” と図 5 の “LL-EV nodelay” を比較すると、定期更新する場合にはブロック率が増加していることがわかる。これは、波長が予約 / 解放されたことを知らせるリンクステート情報は定期的に更新されており、その結果送信ノードでの経路選択が不正確な情報に基づいて行なわれたためである。図 6 で示されているように、リンクステート情報が定期的に更新されている場合は、伝搬遅延時間の遅れが存在していたとしても、ブロック率の差は小さい。これは、リンクステートの配布回数が少ないことから、伝搬遅延時間による不正確さが経路選択に影響する場合が少ないためであると考えられる。

3.4 経路候補数とブロック率との関係

前節の結果は、送信ノードにおける経路選択時の経路候補数を 3 としていた。本節では、経路候補数とブロック率の関係を示す。

図 7 は、リンク状態の変化に対して常にリンク情報の配布を行なう場合において、経路候補数 K

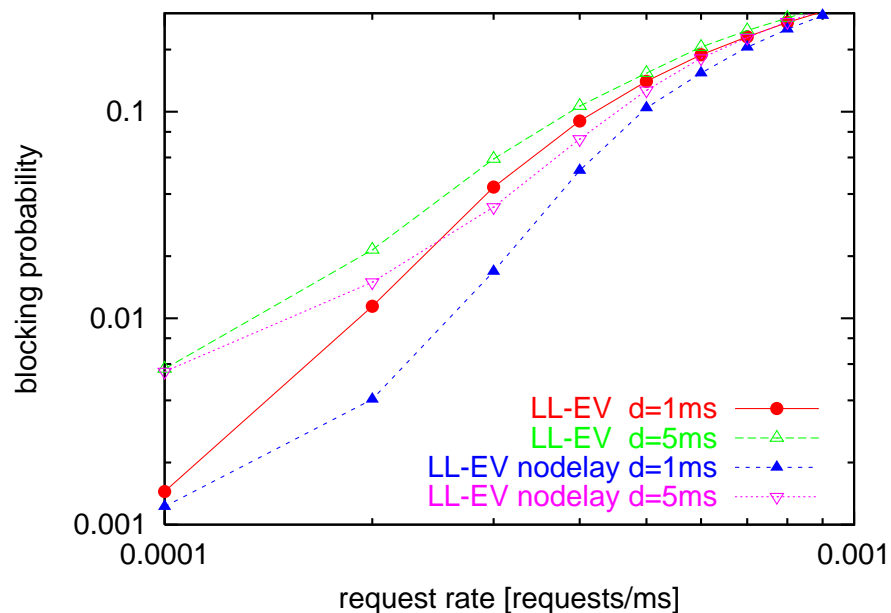


図 5: リンクステート情報の遅延が性能におよぼす影響 (常時アドバタイズメント)

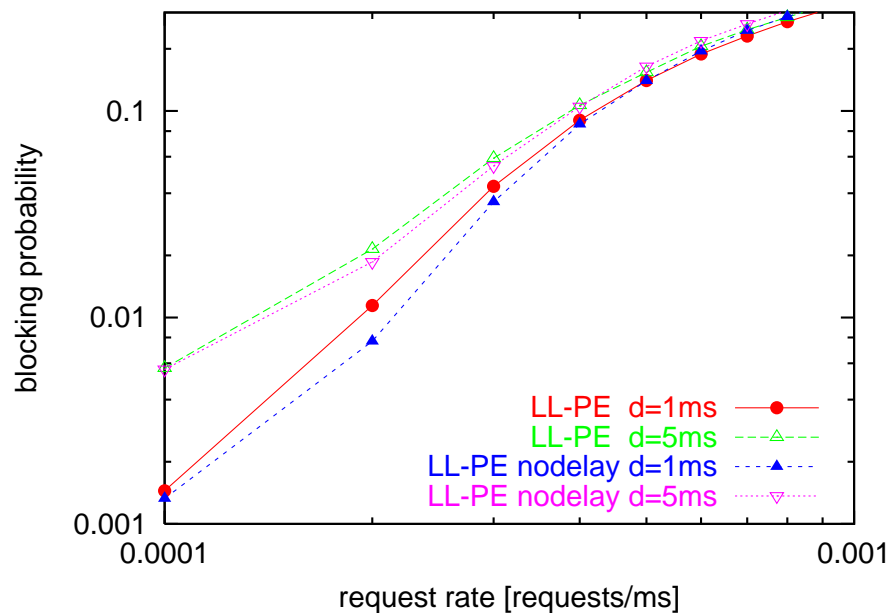


図 6: リンクステート情報の遅延が性能におよぼす影響 (定期的アドバタイズメント)

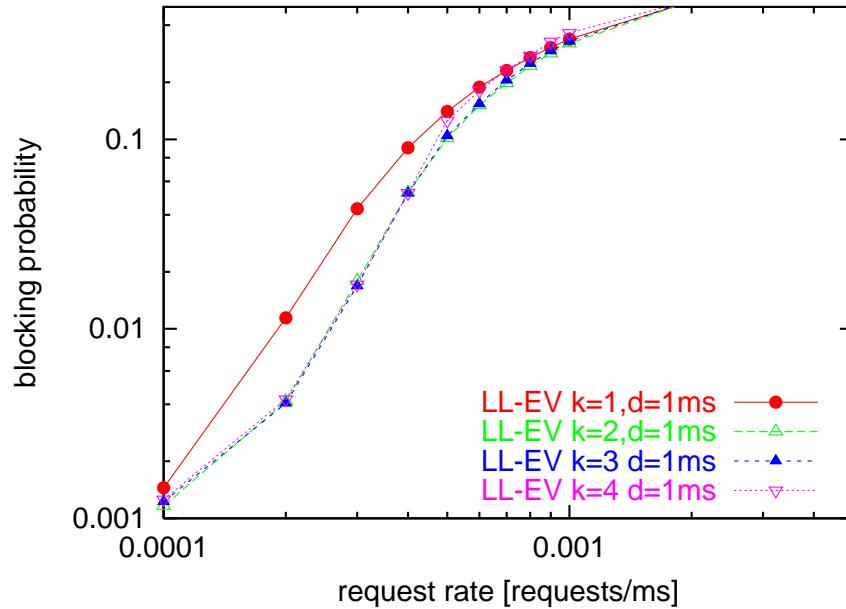


図 7: 経路候補数がブロック率に及ぼす影響（常にリンク情報を更新する場合）

を 1 から 4 まで変化させた時の棄却率を示した図である。リンクの伝搬遅延時間の設定として α を 1 としている。K が 1 である場合、常にホップ数に関する最短経路を選ぶ固定経路選択方式を意味する。この図を見ると、K が 1 の時はブロック率が高いが、K が 2 以上に設定することで棄却率を低くすることができる。しかし、K が 2, 3, 4 の時の結果を比較すると性能に差が見られない。この傾向は、定期的にリンク情報の更新を行なう場合（図 8 参照）においても同様である。経路候補数 K を増やすことで、より負荷の低い経路の選択が可能となる。しかし、シミュレーションで利用したネットワークポロジでのノード数は少なく、そして光パス設定要求の到着率や保持時間は同じパラメータをとっているため、経路候補中の経路での負荷の差が小さいと考えられる。そのため、候補数を増加させたとしても同様の負荷の経路をとることが考えられる。そのため、若干負荷が低く、競合の起きない経路を選択できたとしても、それによってホップ数の長い経路を選択するため、予約時間の増加によって上昇するブロック率の問題から、全体のブロック率の向上ができなかったものと考えられる。

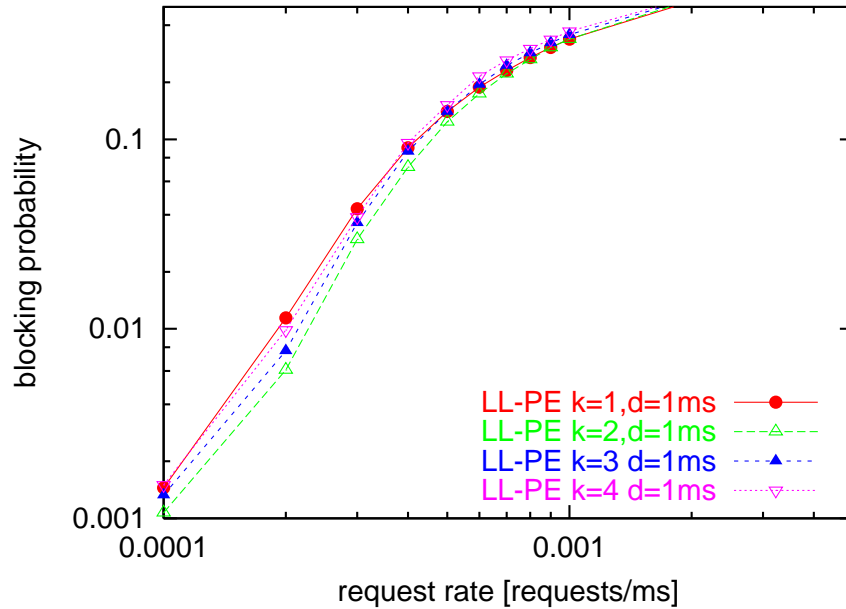


図 8: 経路候補数がブロック率に及ぼす影響 (定期的にリンク情報を更新する場合)

3.5 PROBE 時/RESERVE 時のブロック

今まで、バックワード型波長予約方式のブロック率の評価を行ってきたが、2章で述べたように、バックワード型波長予約方式では、送信ノードから受信ノードに向けてリンク情報を収集している時 (PROBE 時) に発生するブロックと、受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約する時 (RESERVE 時) に発生するブロックがある。本節では、リンク伝搬遅延時間の影響によって、これらの2種類のブロックがどのように変化するかを示す。ここでは、 $\alpha = 1$ としている。波長の予約/解放が行なわれる毎に、リンク情報を配布する場合の結果を図 9 に示す。この図を見ると、PROBE 信号のブロックは到着率が比較的に高い時に発生することがわかる。次に、リンク情報の遅延がない場合には、PROBE 信号のブロック率に対して大きな改善が見られるものの、RESERVE 信号のブロックに対してはほとんど性能向上が見られない。図 10 は、定期的にリンク情報の更新を行なう場合の結果であるが、この図においても同様の傾向を示している。

次に、 α を 1 から 5 に変更した時の結果を、図 11 および図 12 に示す。伝搬遅延時間を 1ms とした時の結果と比較して、伝搬遅延時間が大きくなっているため全体的なブロック率は増加している。この図を見ると、PROBE 信号のブロック率に関しては伝搬遅延時間を 1ms とした時とほとんど変わらないものの、RESERVE 信号のブロック率は増加していることがわかる。

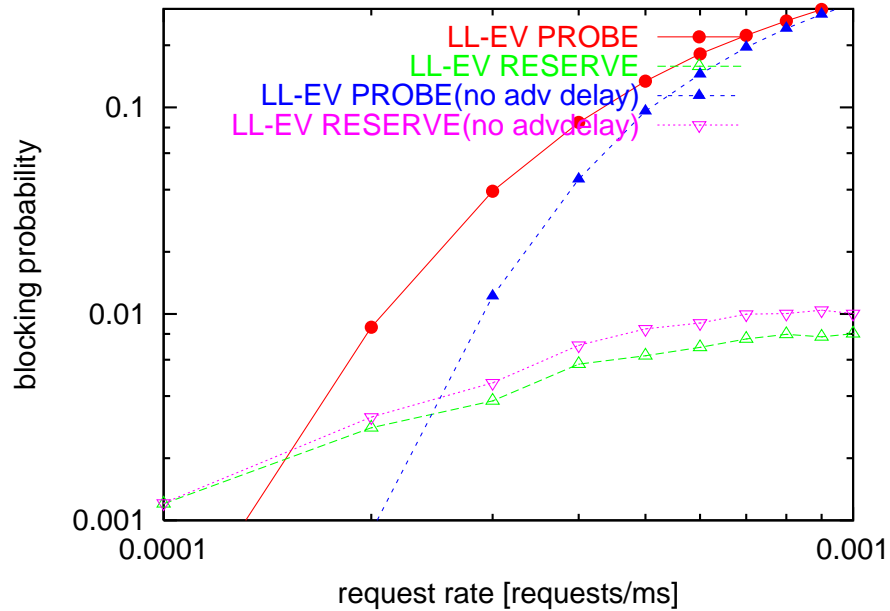


図 9: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (常時アダバタイズメント): $\alpha = 1, 1/\mu = 1 \text{ sec}$

これは、リンク伝搬遅延時間が大きくなるにつれて波長が予約されている時間も大きくなり、その結果、他の光パス設定との競合が起きやすくなるためである。その一方で、PROBE 信号のブロックは、波長の利用状況を調査している時に発生するため、伝搬遅延時間の影響は少なく、ネットワークの負荷に大きく依存する。この傾向を明らかにするため、光パスの保持時間を 1 sec から 500ms とした時の結果、すなわちネットワークの負荷を半分にした時の結果を、図 13 および図 14 に示す。この図を見ると、負荷が半減することによって、PROBE 信号によるブロックは減少しているものの、RESERVE 信号のブロックは変化が見られない。

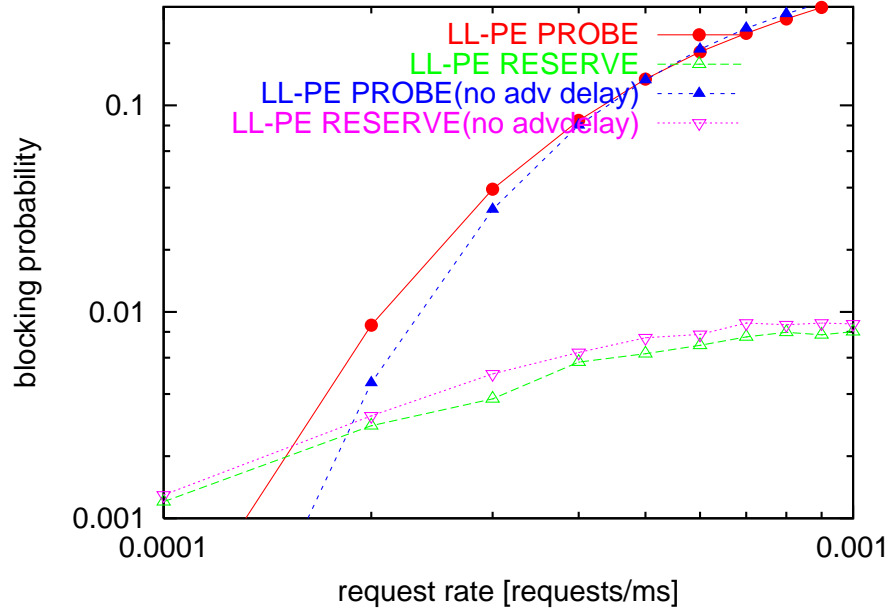


図 10: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (定期アドバタイズメント): $\alpha = 1, 1/\mu = 1 \text{ sec}$

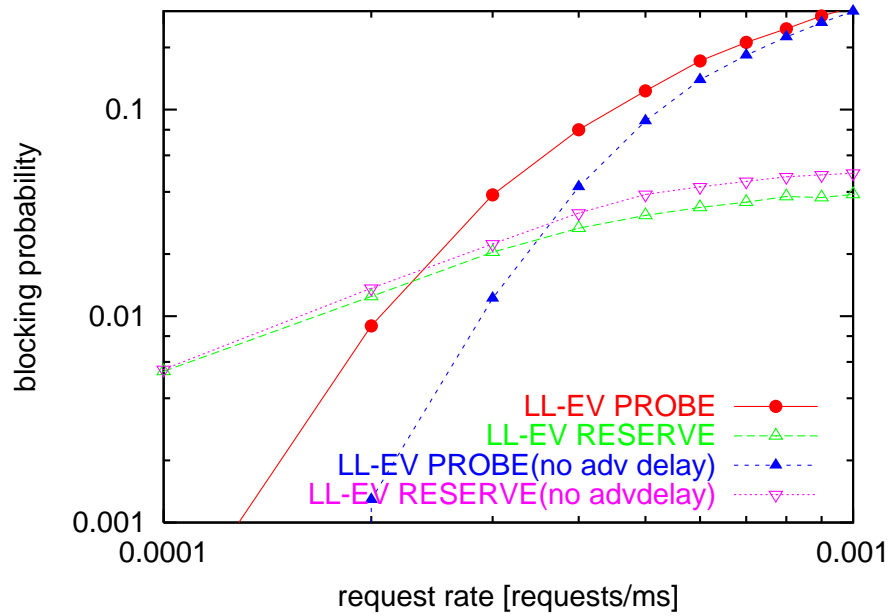


図 11: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (常時アドバタイズメント): $\alpha = 5, 1/\mu = 1 \text{ sec}$

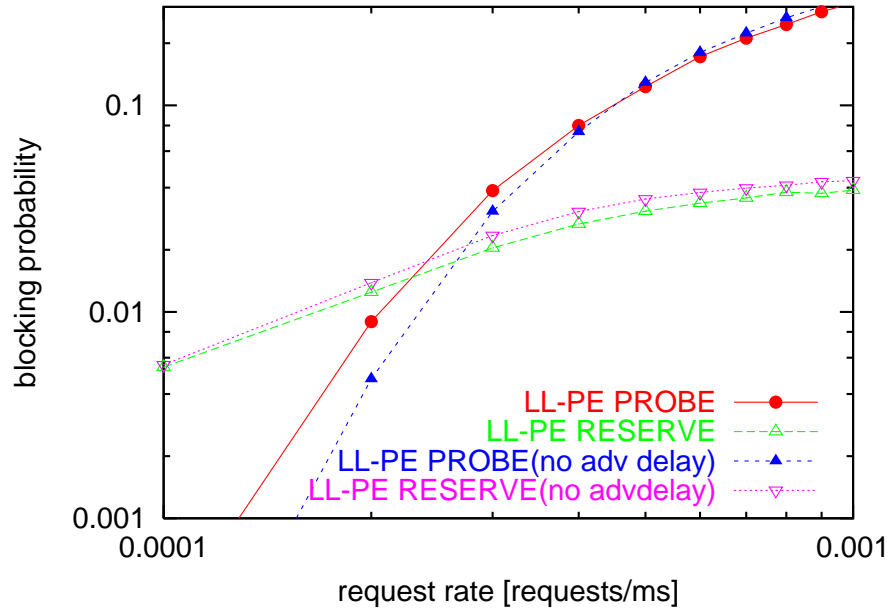


図 12: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (定期アドバタイズメント) : $\alpha = 5$, $1/\mu = 1 \text{ sec}$

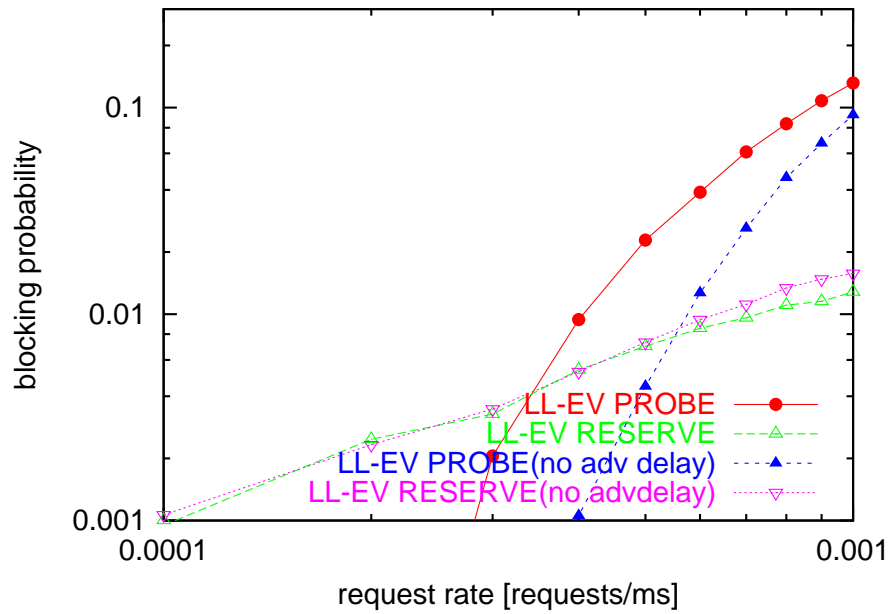


図 13: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (常時アドバタイズメント) : $\alpha = 5$, $1/\mu = 500 \text{ ms}$

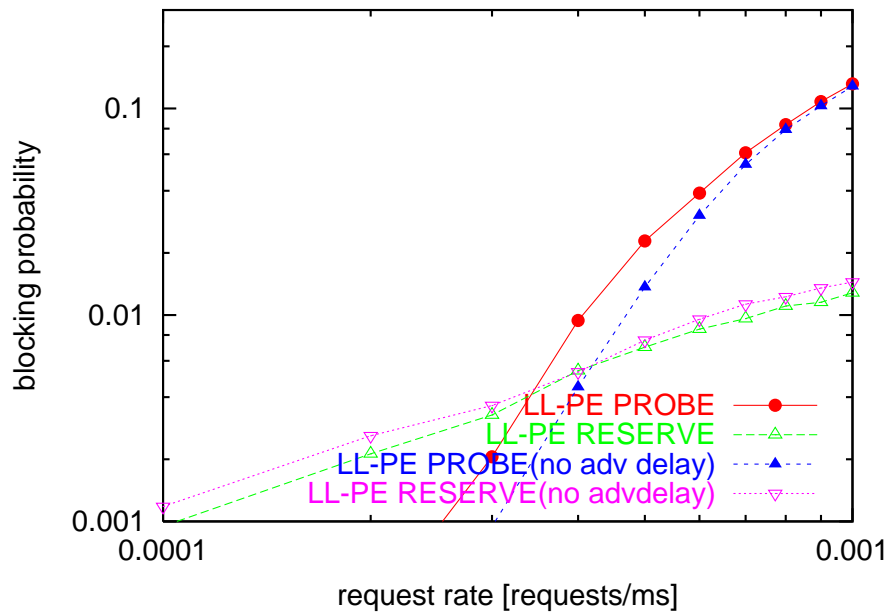


図 14: バックワード型波長予約方式における PROBE 信号および RESERVE 信号によるブロックの関係 (定期アダバタイズメント): $\alpha = 5$, $1/\mu = 500$ ms

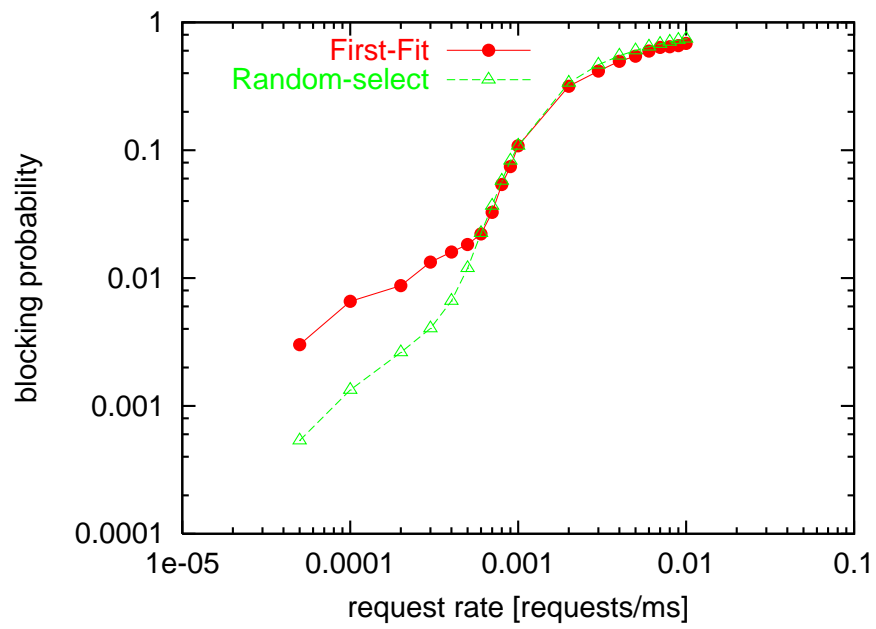


図 15: 波長選択アルゴリズムの影響：ランダム方式と最小一致方式との比較

3.6 波長選択アルゴリズムの影響

図 15 では送信ノードでの経路選択に最小負荷経路選択を用い、受信ノードでの波長選択でランダム波長選択の場合と最小一致波長選択の場合の 2 種類それぞれを用いた際の結果を示している。ここで凡例で記述されている FF は First Fit (最小一致波長選択) の略であり、RAND は Random (ランダム波長選択) の略である。そして、LL は Least Loaded (最小負荷経路選択) を意味し、EV は常時アダプタイズメント、PE は定期的にあダプタイズメントを行う手法であることを示している。この図を見ると、負荷が非常に高い場合はランダム波長選択と最小一致波長選択とでは大きな差は存在しない。これは負荷が非常に高い場合は、PROBE メッセージで利用可能な波長を収集する時にブロックされる場合が多いためであり、また、PROBE メッセージが受信側まで到着したとしても、選択可能な波長集合での波長数が少ない。そのためランダムで選択したとしても最小一致波長選択を用いた場合のどちらを利用したとしても大きな差が無い。一方負荷が低い場合には、ランダム波長選択は最小一致選択よりも優れている。これは、ランダムに波長が選択されることにより、予約に用いられる波長が分散され、その結果他経路での予約と競合が発生し難い。それにより、ブロック数を抑えることができる。

4 分散型光パス設定方式における経路選択方式の評価

3章では、文献 [7] において良いとされている最小負荷経路選択方式を対象として、リンクの伝搬遅延時間が性能におよぼす影響を明らかにした。その結果、リンク情報が遅れて各ノードに到着することにより性能が劣化することがわかった。本章では、これらの議論を踏まえ、バックワード型波長予約方式を適用した時の経路選択アルゴリズムの評価を行なう。計算機シミュレーションによりブロック率の評価を行ない、分散型光パス設定を適用する場合においては、最小負荷経路選択方式は有効ではないことを示す。

4.1 比較する経路選択アルゴリズム

比較する経路選択アルゴリズムとして、以下の方式を用いる。

1. 最小ホップ数経路選択 (Minimum Hop Routing):

経路候補の中から、ホップ数の最も小さい経路を選択する。少ない波長資源で光パスを設定することを期待するアルゴリズムである。

2. 最小遅延時間経路選択 (Minimum Delay Routing):

遅延時間の短いものを選択する。光パス設定に必要な時間を少なくし、波長が予約されている時間を減らすことを期待するアルゴリズムである。

3. 最小負荷経路選択 (Least Loaded):

複数の経路候補から最も負荷の低い経路を選択する。同じ負荷の経路が複数ある場合には、ホップ数が小さい経路を選択する。

また、リンクの伝搬遅延時間を考慮した経路選択アルゴリズムを導入し、これら 4 つの経路選択方式の比較を行なう。新たに導入する経路選択アルゴリズムを次節で説明する。

4.2 リンクステート情報の遅延を考慮した適応型経路選択アルゴリズム

各ノードにおいて、配布されたリンク情報に基づいて経路選択を行なう場合、リンクの伝搬遅延時間の影響により、配布されたリンク情報では利用可能であったとしても実際には波長が予約されている可能性がある。そこで、本報告では、リンク情報が伝達されるまでの遅延時間の間に、波長が予約される確率を用いたリンク情報を利用する。経路選択アルゴリズムは以下の通りである。

図 16: バックワード型波長予約方式のタイムチャート図: 定期アダプタイズメント

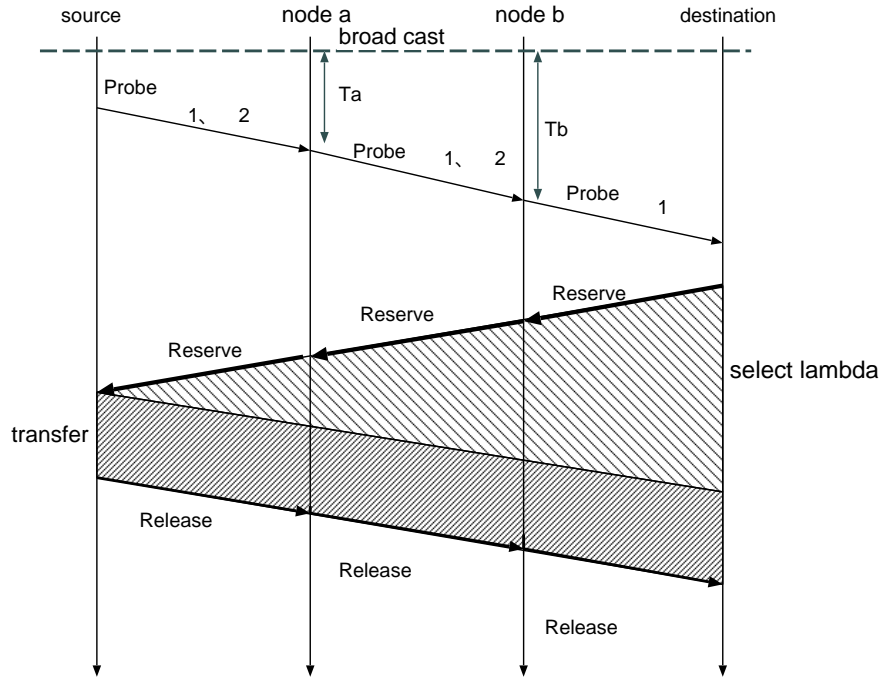
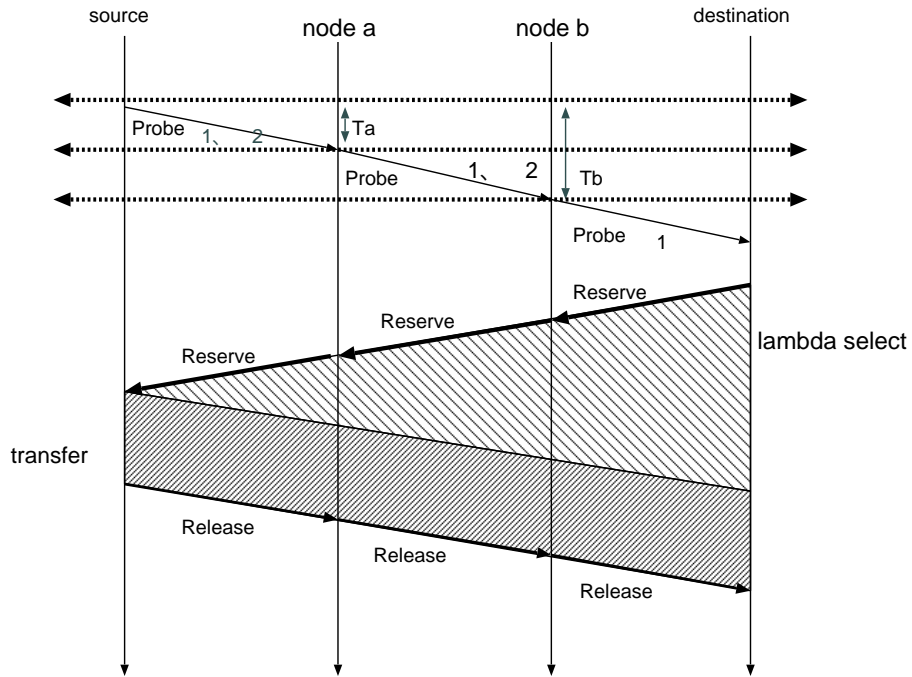


図 17: バックワード型波長予約方式のタイムチャート図: 常時アダプタイズメント



- 送信ノード s , 受信ノード d
- リンク ℓ の波長 w の空き状況 A_ℓ^w (この値は空であれば 1、そうでなければ 0 の値をとる)
- 送信ノード s からリンク ℓ までの伝搬遅延時間 t_ℓ^s
- 経路集合 R
- リンク ℓ の波長 w のメトリック C_ℓ^w

リンクステート情報の価値は時間が経過するにつれて、指数的に価値が下がる。これに光パス設定要求の到着率による単位時間あたりに予約される確率が増大することを考えた場合、リンク ℓ の波長 w のメトリックは式 (1) となる。

$$C_\ell^w = e^{-t_\ell^s} \cdot A_\ell^w \quad (1)$$

C_ℓ^w は、0 から 1 までの値をとる。波長が空いていないときは 0 となり、波長が空いている場合には、最大で 1 となる。伝搬遅延時間が短くなるにつれて、1 に近い値をとり、伝搬遅延時間が大きい場合には、指数的に 0 に近付いていく。上記リンクメトリックを利用して、複数の経路のうち波長予約成功確率の高いものを選択する。波長連続性の制約があるため、ある経路において各波長ごとに光パス設定の成功確率を計算し、各波長ごとに得られた成功確率を全て加算することで、この経路において利用可能な光パス数を導出する。したがって、複数経路からなる経路集合 R の各経路 r に対し、式 (2) で表現される光パス設定の成功確率を取得する。これにより、その時点でのリンクステート情報の劣化を加味した波長利用状況を予測し、バックワード型波長予約方式において、光パス設定の成功確率が高い経路を選択することを目指す。

$$\sum_w \prod_{\ell \in r} e^{-t_\ell^s} \cdot A_\ell^w \quad (2)$$

4.3 経路選択アルゴリズムの評価

ここではシミュレーションによって得られた結果から、それぞれの経路選択方式がどのような環境下で良い性能を示すか議論する。

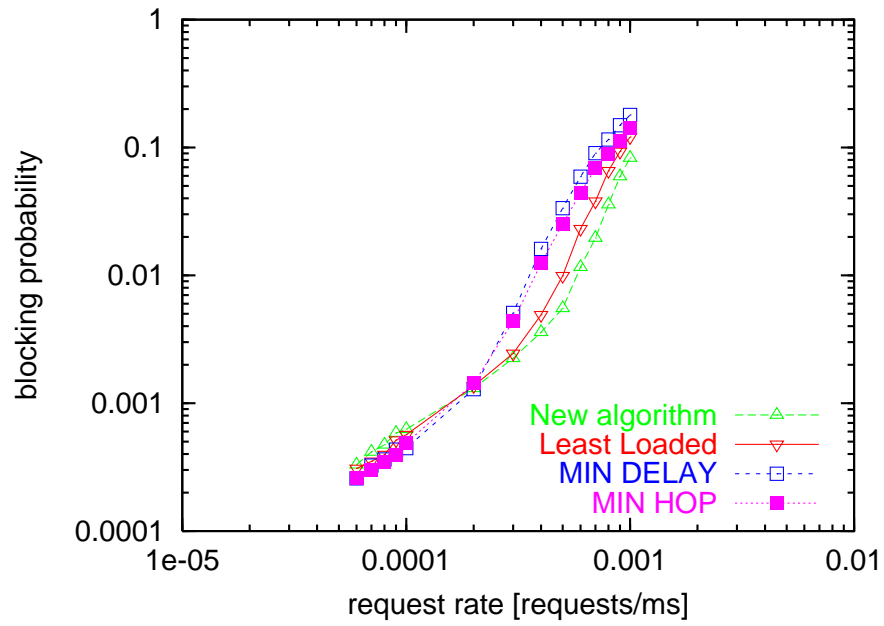


図 18: 光パス設定要求の到着率とブロック率との関係: $\alpha = 0.5, 1/\mu = 500\text{ms}$

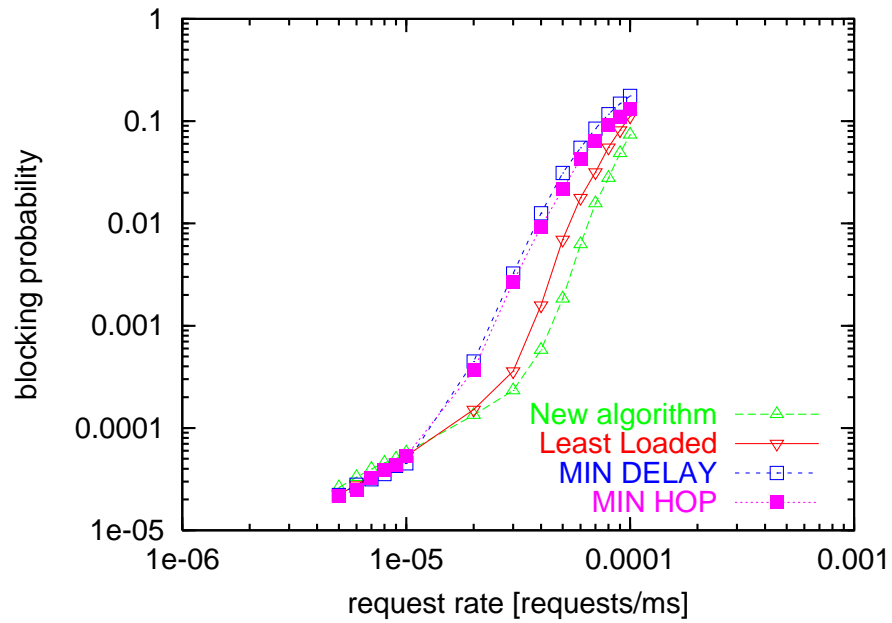


図 19: 光パス設定要求の到着率とブロック率との関係: $\alpha = 0.5, 1/\mu = 5000\text{ms}$

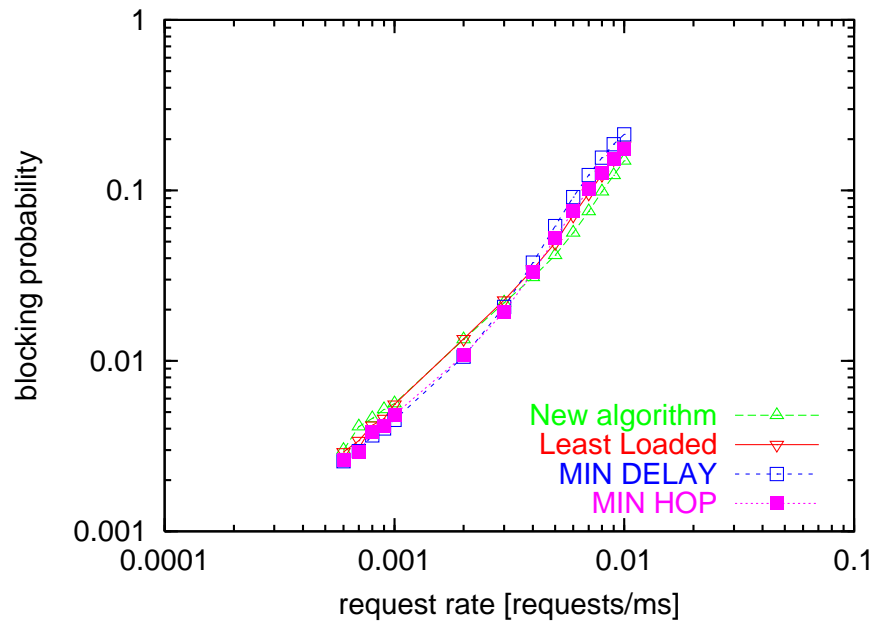


図 20: 伝搬遅延時間を 0.5ms とし、光パス設定平均時間を 50ms とした時の光パス設定要求の到着率とブロック率との関係

図 18 は、 α を 0.5 と設定し、光パスの平均保持時間を 500 ms とした時の、到着率に対する棄却率を示した結果である。この図を見ると、到着率が高い場合には、4.2 章で述べたアルゴリズムが最も良い性能を示していることがわかる。しかし、到着率が低い場合にはほとんど差がない。この傾向は、光パスの平均保持時間を 5000ms とした図 19 においても示されている。しかし、光パスの平均保持時間が 50ms とした結果（図 21 参照）を見ると、高い到着率の場合においても性能に差は見られず、むしろ、到着率が低い場合には、最小ホップ経路選択および最小遅延経路選択が良い性能を示していることがわかる。これは、リンクの伝搬遅延時間に対して光パスの設定時間が短い場合で、かつ、到着率が低い場合には、波長が利用できる可能性が大きいためである。また、光パスの保持時間が短いため、リンクステート情報が各ノードまで伝達される前に波長の予約 / 解放が行なわれ、その結果、性能が劣化している。

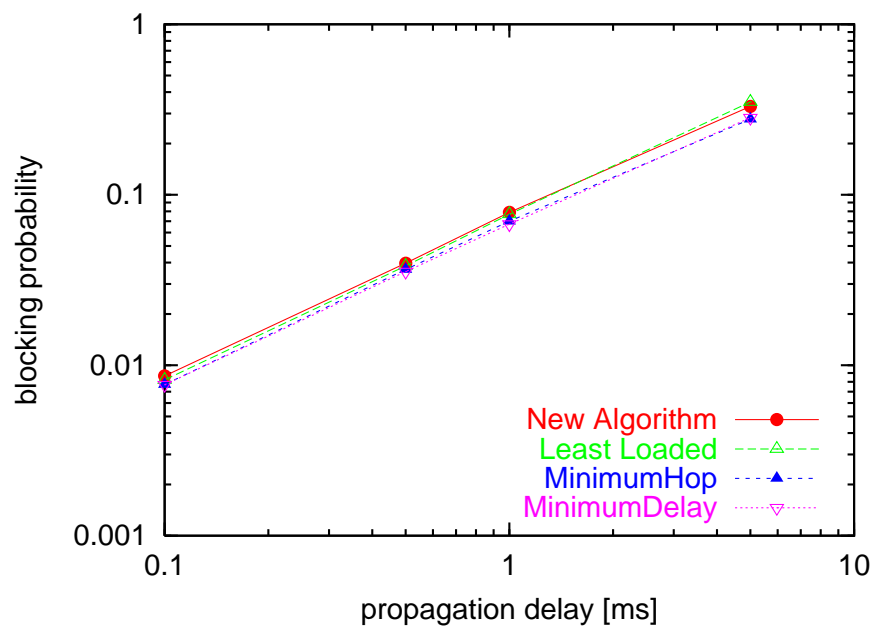


図 21: 到着率を 0.01[requests/ms] とし、光パス設定平均時間を 0.5ms とした時のリンク伝搬遅延時間とブロック率との関係

5 おわりに

本報告では、分散型光パス設定方式において、バックワード型波長予約方式を対象とし、リンクの伝搬遅延時間が経路選択方式におよぼす影響を明らかにした。次に、バックワード型波長予約方式の特性を考え、本報告では伝搬遅延時間が短く、かつバックワードでの予約に利用される波長数ができるだけ多くなるような経路を選択するアルゴリズムの検討を行った。計算機シミュレーションによって分散型経路選択方式の性能評価を行い、その結果、光パスの平均保持時間に対してリンクの伝搬遅延時間が大きい場合には、リンクステート情報が遅れて各ノードに到着するため、最小負荷経路選択手法では性能が低下することが明らかになった。しかし、到着率が低い場合には、複数の経路候補から経路を選択する方式による性能向上はほとんど見られず、伝搬遅延時間が最小となる経路を固定で与える方式がわずかに性能が良くなることがわかった。さらに、バックワード型波長予約方式において受信ノードでの波長選択アルゴリズムの評価を行い、最小一致に基づいて波長を選択する方式よりもランダムに波長を選ぶ方式が良い性能を示すことを明らかにした。また、バックワード型波長予約方式において到着率が低い場合には、PROBE 信号によるブロックよりも RESERVE 信号のブロックの影響が大きく、本報告で示した経路選択アルゴリズムでは改善されないことも明らかとなった。今後は、RESERVE 信号のブロックを改善するため、経路選択アルゴリズムだけでなく波長選択アルゴリズムについても提案していく予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、御指導、御教授を頂きました大阪大学サイバーメディアセンター
先端ネットワーク環境研究部門 村田正幸教授に深く感謝致します。

本報告の作成に常日頃から熱心に、指導および助言をして頂きました大阪大学経済学研究科 荒川
伸一助手に深く感謝致します。

並びに適切な助言を頂きました大阪大学情報科学研究科 宮原秀夫教授、若宮直紀助教授、大崎博
之助教授、長谷川剛助教授、通信総合研究所 原井洋明氏に心から感謝致します。

最後に日頃から、本報告の作成にあたって様々な相談に答えて頂きました石田晋哉氏、福島行信氏
をはじめとする村田研究室および宮原研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [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*, pp. 424–433, April 2000.
- [3] H. Zang, J. Jue, L. Sahasrabudhe, R. Ramamurthy, and B. Mukherjee, “Dynamic light-path 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] S. Subramaniam and R. Barry, “Wavelength assignment in fixed routing WDM networks,” in *Proceedings of IEEE ICC’97*, pp. 406–410, June 1997.
- [7] 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.
- [8] M. Ali, C. Assi, and A. Shami, “Performance evaluation of two GMPLS-based distributed control and for dynamic lightpath provisioning in future IP networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Apr. 2002.
- [9] J. Strand, A. Chiu, and R. Tkach, “Issues for routing in the optical layer,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 39, pp. 81–87, Feb. 2001.
- [10] 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, no. 2, pp. 186–196, 1998.

- [11] M. Kodialam and T. Lakshman, “Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering,” in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 884–893, June 2000.