

## 定期拡張する WDM ネットワークにおける 不確定な光パス設定要求に対する光パス経路決定アルゴリズム

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

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒 560-8531 豊中市待兼山町 1-3

<sup>††</sup> 独立行政法人通信総合研究所 〒 184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-8531 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 豊中市待兼山町 1-30

<sup>†††††</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 560-8531 豊中市待兼山町 1-3

E-mail: †y-fukusm@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††harai@crl.go.jp, †††arakawa@econ.osaka-u.ac.jp,

††††murata@cmc.osaka-u.ac.jp, †††††miyahara@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 従来提案されてきた WDM ネットワークの複数期間設計手法では、将来発生するトラフィック量が既知と仮定して低コストのネットワークを構築しているが、実際にその予測は困難である。本稿では、将来のトラフィック量が不確定な状況で、将来収容可能なトラフィック量を最大にする光パス経路決定アルゴリズムを提案する。本アルゴリズムは使用するファイバ数を少なくできるため、定期的に設備を拡張しながら低コストのネットワークを構築する手法に導入すると、追加するネットワーク設備量を抑えることができる。性能評価により、提案アルゴリズムが、従来方式よりも必要となるファイバ数を抑えつつ、収容可能なトラフィック量が増加することを明らかにする。

キーワード WDM ネットワーク, 複数期間設計, トラフィック予測, 波長ルーティング, 階層グラフ

## An Enhanced Minimum Interference Routing Algorithm for Multi-Period Planning of WDM Lightpath Networks without Traffic Prediction

Y. FUKUSHIMA<sup>†</sup>, H. HARAI<sup>††</sup>, S. ARAKAWA<sup>†††</sup>, M. MURATA<sup>††††</sup>, and H. MIYAHARA<sup>†††††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University Toyonaka-shi, Osaka 560-8531, Japan

<sup>††</sup> Communications Research Laboratory Koganei-shi, Tokyo 184-8795, Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University Toyonaka-shi, Osaka 560, Japan

<sup>††††</sup> Cybermedia Center, Osaka University Toyonaka-shi, Osaka 560-0043, Japan

<sup>†††††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University Toyonaka-shi, Osaka 560-8531, Japan

E-mail: †y-fukusm@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††harai@crl.go.jp, †††arakawa@econ.osaka-u.ac.jp,

††††murata@cmc.osaka-u.ac.jp, †††††miyahara@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** It is difficult to predict future traffic precisely although it is assumed that the amount of future traffic is predictable in many researches on a multi-period planning for WDM networks. In this paper, we propose a wavelength-routing algorithm that maximizes the number of accommodated lightpaths without precise prediction of future traffic demand. Since our algorithm reduces the number of leased fibers, it can be effectively applied to a multi-period planning for WDM networks. We show that the proposed algorithm reduces the number of leased fibers more than the existing algorithm does while it accommodates lightpaths more.

**Key words** WDM network, multi-period planning, traffic prediction, wavelength routing, layered graph

## 1. はじめに

次世代インターネットの基幹における基盤技術として WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術の適用が有望視されている。WDM は、一本の光ファイバに複数の波長を多重し、並列にデータを伝送することによって大容量通信を実現する光技術である。WDM ネットワークにおいて発生するトラヒックは、光信号に変調され、送受信ノードペア間において設定された光パス上を流れる。光パスとは、トラヒックの送信ノードから受信ノードまで特定の波長を用いて設定される帯域固定のチャネルである。光パスの設定は、中継ノードに配置された OXC (Optical Cross Connect) の入出力を適切に切替えることで行える。光パス上では光電気変換は行われず、トラヒックは光信号のまま受信ノードへ到達する [1]。

トラヒックの発生に対して光パスを設定するためには、じゅうぶんに波長資源のあるネットワークを予め構築しておく必要がある。構築にかかるファイバ、ノードなどの設備コストを最小化するために、さまざまな研究がなされてきた [2-4]。それらの実際の適用方針はいろいろ考えられるが、例えば、(1) 10 年先のトラヒック量を予測し、すべてに光パスを設定するために必要な設備量を求める、(2) 単年ごとにトラヒック量を予測し、段階的に設備を増やす、などが考えられる。ところが、近年のアクセスサービスの高速化、高速アプリケーションの登場などで、インターネットを流れるトラヒックは飛躍的に増加していることはわかっていても、サービスの広域化やアプリケーションの使用形態などを把握することは難しい。つまり、ネットワーク内のトラヒック量の伸びは予測できても、各トラヒックの発生場所を正確に予測することは難しい。また、光技術の進展により、ノードコストの減少はじゅうぶん考えられることであり、10 年先のトラヒック収容のために、高価な設備を用意しておくのは現実的ではない。したがって、(1) への適用は難しい。実際には、数倍のトラヒックが発生すると想定して最適化を行うことになる。それでも、すべてのトラヒックを収容できるとは限らない。

最近、光ネットワークを長期にわたり定期的に拡張する設計手法も提案されつつある [5, 6]。しかし、これらにおいても、将来発生するトラヒック量を予測し、ネットワーク設備コストが最小になるように設備を配置する手法を提案している。しかし、先述のように、トラヒック量の変化/増加を正確に予測することは単年に限っても困難で、すべてのトラヒックを収容できるとは限らない。

一方で、なるべく多くのトラヒックを収容するというアプローチは可能である。その場合には、どんなトラヒックが発生しても、より多くのトラヒックを収容する柔軟なネットワークを低コストで構成することが望ましい。

本稿では、将来のトラヒック量が不確定な状況で、定期的に設備を拡張しながら、低コストの WDM ネットワークを構築する手法を提案する。先述のように、ノードコストは年を経るごとに減少すると考えられる。したがって、単年ごとに、トラヒック量を予測し、それを収容するためのネットワークを構築する。ただし、トラヒック量の予測は、エッジノード間ごとのトラヒック量の予測ではなく、ネットワーク全体でのトラヒック量の予測

ができるという想定にとどめる。さまざまなパターンで発生するトラヒックを収容するために、必要最小限の OXC と光ファイバを追加して、WDM ネットワークを構築する。単一期間におけるネットワーク構築は、OXC と光ファイバの追加を繰返しながらか一定の条件（具体的には、適当な複数種類のトラヒックパターンの  $x\%$  を収容できるという条件）を満たすまで行う。繰返しが少なければ少ないほど、低コストのネットワークが構築できると考えられる。

さらに本稿では、WDM ネットワークにおけるデマンドは全体のトラヒック量のみ予測し、送受信ノードごとのトラヒック量が不確定な状況で、与えられた設備に対して適切に光ファイバを追加しつつ、収容可能なトラヒック量を最大にする光パス経路決定アルゴリズム EMIRA (Enhanced Minimum Interference Routing Algorithm) を提案する。EMIRA は、従来の経路決定アルゴリズムである MIRA [7]、MOCA (Minimum Open Capacity Routing Algorithm) [8] を本ネットワーク設計に用いるように拡張したアルゴリズムである。アルゴリズムを用いることで、収容可能な光パス数を最大化する。また、予め想定した光パスを収容するために必要なファイバ数を減らすことができるので、上述のネットワーク設計手法に EMIRA を導入することで追加するネットワーク設備量を抑えることが期待できる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2. において、定期的に設備拡張を行う方法を提案する。3. において既存の経路決定アルゴリズム MIRA を説明する。次に、4. において MIRA を 2. に述べる設備設計に適するように拡張した EMIRA を提案する。5. で EMIRA の評価を行い、その有効性を明らかにする。最後に 6. で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 定期的に設備拡張するネットワーク設計手法

### 2.1 ネットワーク構成

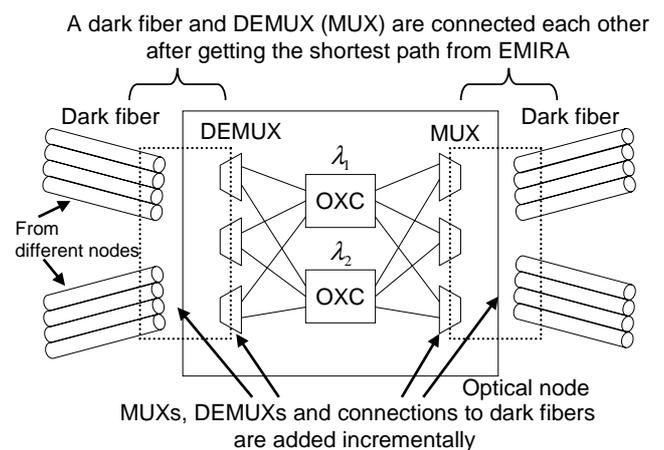


図1 ノードアーキテクチャ

WDM ネットワークは光ノードとダークファイバから構成される。光ノードは、波長多重/分離装置 (MUX/DEMUX) と波長多重数と同数の OXC から構成される。図1に光ノード構成を示す。ノードにおいて波長変換は許されない。ダークファイバは、波長多重/分離装置にファイバが接続されていない場合は、新たに接続可能である。以降では、波長分離装置に空きがある場合、それに接続されている OXC の入力ポートはすべて1つ空いてい

るとみなす．同様に，波長多重装置に空きがあれば，OXC の出力ポートはすべて 1 つ空いているとみなす．本ネットワーク設計では，定期的に OXC の追加とダークファイバの接続を行う．ただし，一旦追加した設備の構成変更は考えない．例えば，あるノードに注目すると，同一波長を交換する OXC が複数置かれることがありうる．それらの OXC が Clos 構成などノンブロッキング構成になっていない場合，光ファイバを接続する OXC を変更することで，全体の性能が良くなることもある．しかし，一旦接続された光ファイバは運用中のものであり，物理的な移動を伴う接続先の変更には，サービスの中断が発生する．それを避けるために，一旦追加した設備の構成変更は許されないものとする．

## 2.2 ネットワーク設計法

以下に，定期的に設備拡張するネットワーク設計手法を提案する．本手法では，ネットワークの耐性という指標  $x$  を導入し ( $0 \leq x \leq 1$ )，その割合のデマンドをネットワークが収容できると判断するまで設備追加を行う．

拡張期間を  $N$  年として， $n = 1, 2, \dots, N$  に対して，以下の処理を行う．

- (1) (トラフィック量予測ステップ) 予測  $n$  年目のデマンドの総量  $D_n$  を予測する (ただし， $D_n$  は波長の通信容量で正規化された値)．それに対して適当に  $P$  種類のデマンドパターン  $T_1, T_2, \dots, T_P$  を発生する．
- (2) (OXC 追加ステップ) 以下の処理を， $x D_n P$  の光パスを設定できるまで繰り返す．
  - (2-a) 適当な数の OXC を追加する．
  - (2-b)  $i = 1, 2, \dots, P$  に対して，順に，デマンドパターン  $T_i$  に対して，EMIRA を適用して，設定できないパス数  $b_i$  を求める．また，追加する光ファイバの集合を求める．この集合に含まれる光ファイバはこのステップが  $i = P$  で終了するまで，ノードに接続されているとみなす．
  - (2-c)  $\sum_{i=1}^P b_i$  を求める． $\sum_{i=1}^P b_i > (1-x) D_n P$  であれば，制約を満たさないので，再びステップ (2-a) に戻り，処理を続ける． $\sum_{i=1}^P b_i \leq (1-x) D_n P$  なら次のステップ (3) へ．
- (3) (光ファイバ接続ステップ) 集合に含まれている光ファイバを実際に配置する．
- (4) (運用開始ステップ) 新たに追加した設備への光パスの設定を許す．なお，以前より配置されている設備への光パスの設定は，上記ステップ中でも可能である．

将来の要求トラフィック量が不確定かつ，ノードコストが年の経過とともに減少する状況で，最小コストのネットワークを構築するには，1 度 (1 年) の手続きで設備の追加を最小限にすることが有効である．そのためには，トポロジー構築手続きの反復を最小限に抑えることが有効で，上記ステップ (2-b) において，さまざまなデマンドの集合に対して，多くのデマンド ( $x = 1$  ではすべてのデマンド) を収容できるようにファイバを追加することが望ましい．あるデマンドの集合を収容するときに追加する

ファイバ数を抑えておくと，別のデマンドの集合を収容するために新たなファイバが必要になっても，ファイバを追加する余地が残されている可能性が高い．その結果，少ない反復で制約を満たす数のデマンドを収容できるようになる．

4. では，追加するファイバの数を小さく抑えつつ，より多くの光パスを収容するトポロジーを構築することを目的とした経路決定アルゴリズム (EMIRA) を提案する．EMIRA は，ネットワークに追加するファイバの数量および場所を決定するために，ステップ (2-b) において適用される．次章に述べる MIRA のステップ (2-b) への適用もノード間の光ファイバ数を予め決め，設定しておけば可能である．しかし，ファイバを自由に設定することで，よりさまざまなトラフィックパターンに適したトポロジーを構築できるため，EMIRA を適用している．

本設計の適用は，ノードを自ら整備し，ダークファイバを通信事業者から借りてネットワークを構築するサービスプロバイダであると想定している．上記のステップ (3) において，適切な数量のダークファイバを通信事業者より借り，ノードに接続する．ダークファイバは現在大量に敷設されているので，接続するファイバの枯渇はないものとする．

なお，本設計手法では，ファイバを効率的に追加するだけでなく，OXC を追加する必要がある．その追加方法については，本稿の対象外であり，今後の課題とする．

## 3. MIRA

### 3.1 概要

将来において要求されるトラフィック量が不確定な状況において，将来収容可能なトラフィック量の最大化を目指した経路決定アルゴリズム MIRA および MOCA が提案されている [7, 8]．これらは，将来要求されるトラフィックが未知である状況で，次々と離散的に到着するトラフィック要求に対して最短経路を求めるオンラインアルゴリズムであり，MPLS (Multi-Protocol Label Switching) ネットワーク，GMPLS (Generalized MPLS) ネットワークにおける LSP (Label Switched Path) の設定などに用いることが可能である．MIRA では，ある送受信ノードペア間に設定する経路を求める際に，将来他の送受信ノードペアが要求するパスが設定される可能性があるリンクを求め，なるべくそれらの邪魔にならない経路を選択する．その結果，将来において収容可能なトラフィック量の最大化を実現する．例えば，図 2 のようなネットワークトポロジーにおいて  $(S_1, D_1)$ ， $(S_2, D_2)$ ， $(S_3, D_3)$  の 3 送受信ノードペアがあり，各リンクでは 1 波長のみが利用可能であるとする．ノードペア  $(S_3, D_3)$  でトラフィック要求が発生した場合，従来の経路決定アルゴリズムの一つである MIN-HOP アルゴリズム (すべてのリンクコストを 1 とした最短経路を解とする方法) を用いると，光パスの経路は  $1-7-8-5$  となる．しかし， $(S_3, D_3)$  がリンク (7, 8) を用いることにより送受信ノードペア  $(S_1, D_1)$  や  $(S_2, D_2)$  で要求されるトラフィックに対する光パスが設定できなくなる．MIRA はこの問題を解消するために，適切なリンクコストを設定し，ホップ数が大きい経路  $1-2-3-4-5$  を選択する．

### 3.2 MIRA におけるリンクコスト

MIRA は，ある送受信ノードペアでパス設定要求が発生する

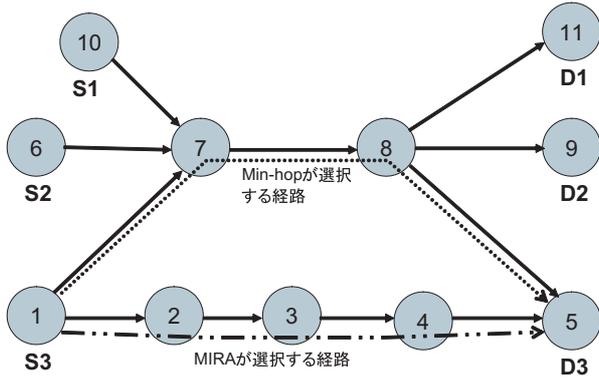


図 2 MIN-HOP と MIRA により選択されるパスの違い

と、将来他の送受信ノードペアが要求するパスの設定を邪魔しない経路を選択するために、他の送受信ノードペアの Critical Link をなるべく通らない経路を選択し、パスを設定する。Critical Link とは、他の送受信ノードペアの光パスへの使用により、ある送受信ノードペアの最大流が減少するリンクを指す。Critical Link は送受信ノードペアごとに定義される。ここで、送受信ノードペアの最大流は、その送受信ノードペアが空き資源を用いて設定可能な光パスの集合である。MIRA では各リンクのコストに、そのリンクを Critical Link とする送受信ノードペア数 (式 (1)) を用いて最短経路を導出し、その最短経路にパスを設定している。

$$Cost_{ij} = A_{ij} \quad (1)$$

$$A_{ij} = \sum_{s,d} x_{sd}^{ij} a_{sd}^{ij} \quad (2)$$

$A_{ij}$ : リンク  $i$  の波長  $j$  を Critical Link とする送受信ノードペアの数

$x_{sd}^{ij}$ : 送受信ノード  $sd$  間の最大流がリンク  $i$  の波長  $j$  を通っているならば 1, そうでなければ 0

$a_{sd}^{ij}$ : 送受信ノード  $sd$  間の最大流を流した際に、リンク  $i$  において波長  $j$  が余っているならば 0, そうでなければ 1 (すなわち、リンク  $i$  は Critical Link となる)

#### 4. 光パス経路決定アルゴリズム EMIRA の提案

##### 4.1 概要

2. に述べたネットワーク設計手法において、将来発生するトラフィック量が未知である状況において収容可能なトラフィック量の最大化を目的とした MIRA を光パス設定アルゴリズムとして用いることは可能である。しかし、MIRA はファイバ数も含めた物理トポロジーが与えられた上で、発生したトラフィックを収容する経路を求める方法であるゆえ、予めファイバをノードに接続しておかねばならない。一方、ノード構成を与え、ファイバを適切に追加していけばより多くのトラフィックを収容できると期待されるが、MIRA はそれに適していない。そこで、MIRA を拡張し、光パス経路を決定しつつ光ファイバを適切に追加することによりトポロジーを設計する EMIRA を提案する。

EMIRA では、すべての OXC と光ファイバが部分的に接続

されているネットワークを物理トポロジーとして与える。OXC ポートに空きがあれば光ファイバを追加接続できる。EMIRA では (1) 将来どのノードペア間でデマンドが発生しても新たにファイバを追加して空き資源を確保できるよう OXC の空きポートを均等に残すよう適切にファイバを追加し、また、(2) すでに配置した資源に対しては、どのノードペア間でデマンドが発生しても空き資源が残るように、なるべく多くの空きがある波長を用いて光パスのルーティングを行っている。そのようなルーティングを行うために、EMIRA では、物理トポロジーをもとに階層グラフ [9] を作成し、階層グラフ上で求めた最短経路を光パスとする。階層グラフは波長ごとに異なる階層を構成しており、頂点はノードに、辺はそのリンク上の波長に対応している。こうした処理により、収容可能なトラフィック量の最大化を実現する。

##### 4.2 EMIRA におけるリンクのコスト

EMIRA ではリンクコストとして、Critical Link のみでなく空いているポート数および波長数を基にした、以下の式 (3) を用いる。

$$Cost_{ij} = \frac{A_{ij}}{B_i + C_{ij}} \quad (3)$$

$B_i$ : リンク  $i$  の上流ノードの空き出力ポート数と、下流ノードの OXC の空き入力ポート数の小さい方の値

$C_{ij}$ : リンク  $i$  において、既に配置されたファイバ上で利用可能な波長  $j$  の数

$B_i$  の導入により、経路を選択する際に空きポート数の多い経路が優先され、空きポート数が少ないリンクへのファイバ追加の可能性を残しやすくなる。後にそのリンクを通るパスを設定できるので、収容可能なトラフィック量が大きくなるのが期待できる。また、 $C_{ij}$  の導入により、既に設定されたファイバ上で利用可能な波長が多い経路を優先することにより、新たにファイバを設定する経路よりも既存のファイバを用いる経路を選択しやすくなる。すなわち、 $B_i$  の導入と同様に、収容可能なトラフィック量が大きくなるのが期待できる。このように、空きポート数が多く、かつ既に設定されたファイバ上で利用可能な波長数が多い波長を選択しやすくなることで、さまざまなデマンドの発生に備えることができる。

##### 4.3 EMIRA アルゴリズム

EMIRA では、デマンドの集合それぞれに対し、以下のアルゴリズムを適用し、光パス経路および追加するファイバの場所および数を決定する。以下、EMIRA への入出力を示す。

###### 入力

- 階層グラフ
- 送信ノード  $s$ , 受信ノード  $d$  および要求する光パス数

###### 出力

- $s$  から  $d$  へ光パスを設定する経路、および、光パスに用いる波長
  - 光ファイバを追加する場所、および、数
- 次に、EMIRA のアルゴリズムを以下に述べる。

- (1) 送受信ノードペア  $(s, d)$  以外の送受信ノードペアそれぞれについて最大流を求める

- (2) 送受信ノードペア  $(s, d)$  以外の送受信ノードペアそれぞれについて Critical Link を求め、各リンクの  $A_{ij}$  の値を求める
- (3) 各ノード  $i$  の OXC の空きポート数  $(B_i)$  を求める
- (4) 各リンク  $i$  に配置されたファイバ上におけるそれぞれの波長  $j$  が空いている数  $(C_{ij})$  を求める
- (5)  $A_{ij}, B_i, C_{ij}$  の値を式 (3) に代入し、階層グラフにおける各リンクのコストを求める
- (6) 階層グラフにおいて Dijkstra のアルゴリズムを用いて光パスを設定する経路および用いる波長を求める

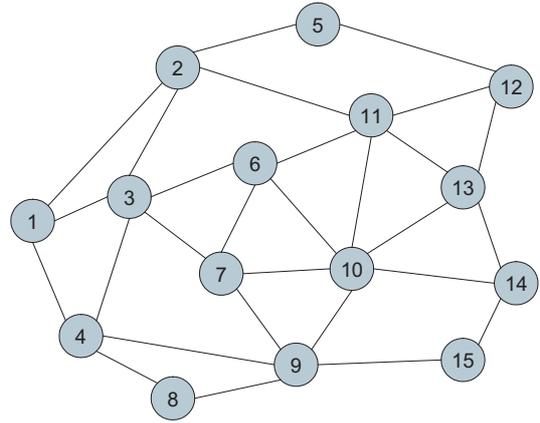


図 3 ネットワークモデル

### 5. EMIRA の評価

本章では、文献 [7] の論文で用いられているランダムに生成された 15 ノードネットワーク (図 3) を対象として、EMIRA の性能を評価する。OXC のポート数を 16, 32 とする。光パス設定要求はすべてのノードペア間でランダムに発生し、その総数を 4,000 とする。波長多重数は  $W = 2, 4, 8, 16$  とする。比較のため、MIRA を用いる。MIRA には、各リンクに一樣にファイバを設定して構成される物理トポロジーを予め用意する。一方 EMIRA にはノードのみが与えられ、ファイバはアルゴリズムに従って追加される。

図 4, 図 5 に、 $W = 16$  とした時の、光パス設定要求数に対する呼損発生数を示す。横軸は光パス設定要求回数を示し、縦軸はその回までの呼損発生数を示す。図中、傾きが 1 になると、常に呼損が発生していることを表す。本稿では、最初に呼損が起きるまでに収容した光パス設定要求数を尺度とした評価を行う。

図 4, 図 5 より、MIRA と比較して EMIRA1 (リンクコストを式 (3) とした EMIRA) が最初に呼損が発生するまでに収容可能な光パス数が多いことがわかる。これは、EMIRA1 では各リンクに設定するファイバ数は、ノード規模を超えない限り自由に設定できるので、光パス設定要求が多い場所に多くのファイバを設定しているためである。その経路選択の際、空きポート数が多い OXC がある経路を優先して用い、どのリンクにも後からファイバを追加できる可能性を残すことも有効と考えられる。一方、MIRA では光パス設定要求がある場所に関係なく、予めファイバを設定していることから EMIRA に比べて早く呼損が発生している。本稿では紙面の都合上省略するが、波長数  $W = 2, 4, 8$  とした場合も同様の結果が得られた。

さらに、すでに設定されたファイバ上で利用可能な波長が多い経路をより優先させることによって、新たに追加されるファイバ数を少なく抑えることが期待できる。本稿では、コスト  $C_{ij}$  に重みを付けるためのパラメータとして  $c (c \geq 1)$  を導入し、リンクコストを、

$$Cost_{ij}^2 = \frac{A_{ij}}{B_i + c \cdot C_{ij}} \quad (4)$$

とした経路選択アルゴリズム (EMIRA2) による結果 ( $c = 10$ ) も図中に示している。

図 6, 図 7 に、波長数  $W = 16$ , OXC のポート数を 16 およ

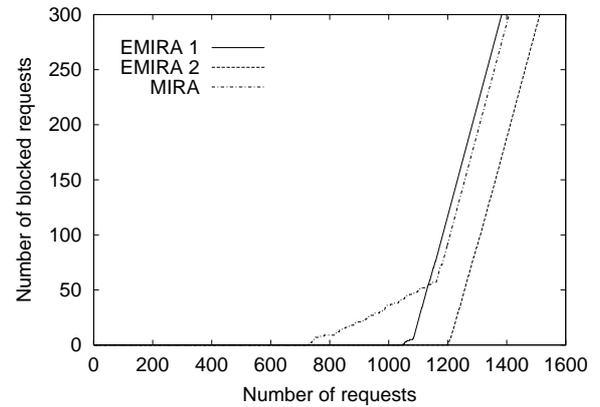


図 4 呼損発生数 ( $W = 16$ , OXC: 16 ポート)

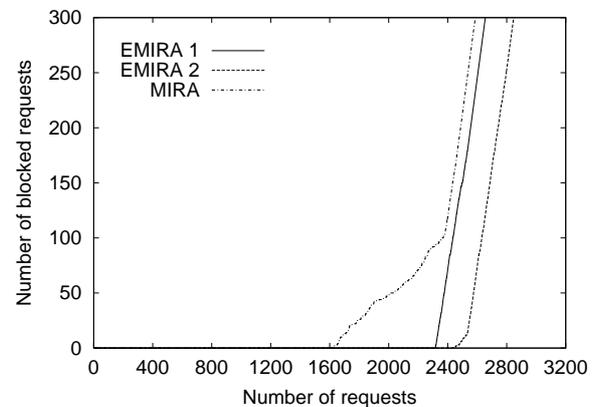


図 5 呼損発生数 ( $W = 16$ , OXC: 32 ポート)

び 32 としたときの、10 通りのデマンドパターンにおいて、初めて呼損が発生するまでに収容した光パス数を示す。図の横軸は試行回数を示し、縦軸には初めて呼損が発生するまでに収容した光パス数を示す。これらの図より、様々なトラフィックパターンにおいても、EMIRA が MIRA よりもより多くの光パスを収容できていることがわかる。

最後に、図 8 に、異なる 10 通りのデマンドパターンにおいて、MIRA において最初に呼損がおきるまでの光パス設定要求回数に対して光パスを設定するために用いた光ファイバ数を示す。MIRA については、予めファイバを配置するため、ファイバ数は常に一定である。EMIRA は、MIRA よりも必要としたファ

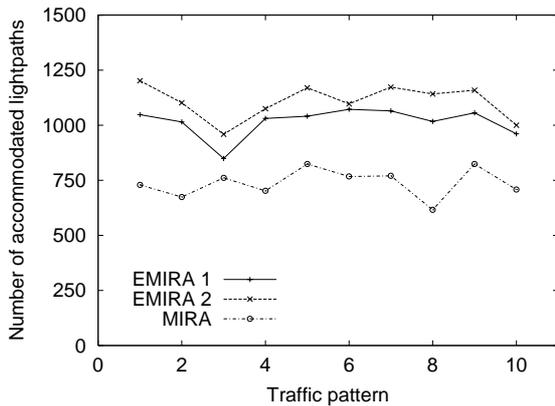


図 6 最初に呼損が起きるまでに収容した光パス数 ( $W = 16$ , OXC: 16 ポート)

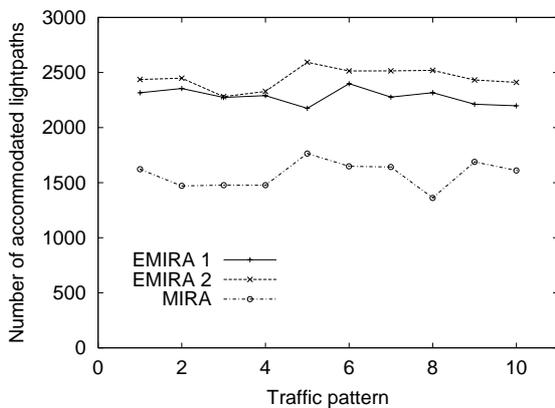


図 7 最初に呼損が起きるまでに収容した光パス数 ( $W = 16$ , OXC: 32 ポート)

ファイバ数が少ないことがわかる。これは、EMIRA が各リンクに対して必要なだけのファイバを配置しているためである。EMIRA2 ではさらに EMIRA1 よりファイバ数が少なくなっている。これは、経路を決定する際に既に配置されたファイバ上の波長を、新たにファイバを配置することにより利用可能となる波長よりも優先して用いるためである。このように、必要最小限のファイバのみを用意し、OXC のポートに空きを残しておくことで、別のデマンドパターンに対する光パスの設定にファイバが必要になっても、ファイバを追加できる可能性がある。

なお、予めファイバ数を変えた構成にして MIRA を適用すれば、本稿で示した結果より良好な性能を示す可能性がある。しかし、その構成を見つけるためには試行錯誤が必要である。また、その構成はデマンドパターンに依存する。一方、EMIRA はその必要はなく、EMIRA が不確定なデマンドを受け付けやすいネットワークの構築に適していると考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、将来のトラフィック量が不確定な状況で、定期的に設備を拡張しながら、WDM ネットワークを構築する手法を提案した。その実現のために、ノード構成が予め決められている時に、収容可能な光パス数を最大にする光パス経路決定アルゴリズム EMIRA を提案した。シミュレーションにより提案アルゴリズムを従来のアルゴリズムと比較し、EMIRA は従来手法より

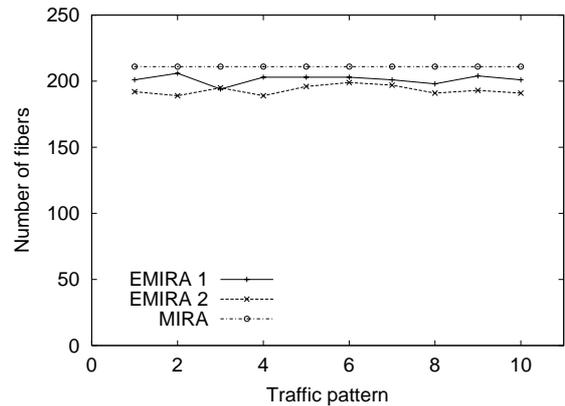


図 8 一定の光パス数を収容するために必要なファイバ数 ( $W = 16$ , OXC: 16 ポート)

も多くの光パスが収容可能なことを示した。さらに、同数の光パスを収容するために必要とする光ファイバ数も小さく抑えられることを明らかにした。後者の結果は、定期的に設備の拡張を行うネットワーク構成手法に有効であることを示している。

今回は光ファイバの配置問題のみについて検討したが、今後は、OXC 等の配置問題を扱い、最終的には長期にわたってネットワークの拡張を行うネットワーク設計手法を完成する予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、通信・放送機構「高速・高品質・高性能インターネットのためのフォトニクスルータの研究開発プロジェクト」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 Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1171–1182, July 1992.
- [2] N. Nagatsu, S. Okamoto, and K. Sato, "Optical path cross-connect system scale evaluation using path accommodation design for restricted wavelength multiplexing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 14, pp. 893–902, June 1996.
- [3] Y. Miyao and H. Saito, "Optimal design and evaluation of survivable WDM transport networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1190–1198, Sept. 1998.
- [4] B. V. Caenegem, W. V. Parys, F. D. Turck, and P. M. Demeester, "Dimensioning of survivable WDM networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1146–1157, Sept. 1998.
- [5] M. Sridharan and A. K. Somani, "Design of upgradability in mesh-restorable optical networks," *Optical Network Magazine*, vol. 3, May 2002.
- [6] N. Geary, A. Antonopoulos, E. Drakopoulos, and J. O'Reilly, "Analysis of optimization issues in multi-period DWDM network planning," in *Proc. of IEEE INFOCOM 2001*, pp. 152–158, May 2001.
- [7] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, pp. 884–893, May 2000.
- [8] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM 2001*, pp. 358–366, May 2001.
- [9] H. Harai, M. Murata, and H. Miyahara, "Performance analysis of wavelength assignment policies in all-optical networks with limited-range wavelength conversion," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1051–1060, September 1998.