

高信頼 WDM ネットワークにおける論理トポロジー管理手法の検討

荒川 伸一[†] 石田 晋哉^{††} 村田 正幸^{†††}

[†] 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

^{††} 大阪大学大学院 情報科学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{†††} 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 1-30

E-mail: [†]arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††}s-isida@ics.es.osaka-u.ac.jp, ^{†††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし IP over WDM ネットワークにおいて信頼性を高めるために、WDM 技術におけるプロテクション方式の適用が有望である。その場合、WDM ネットワークにおいて論理トポロジーを構成する際に、プライマリ光パスとともにバックアップ光パスを設定すればよい。しかし、これまでの多くの研究では、トラヒック量が既知であるという仮定に基づいたトポロジー設計が行われてきた。トラヒックの変動に対しては、再びその手法を適用し、最適な論理トポロジーを求め、その解に移行することで可能となる。しかし、トラヒックが流れている現行の論理トポロジーから、新たに求めた論理トポロジーへ移行する時には、現行の光パスの解放によってトラヒックの損失が発生する。本稿では、プロテクション方式によって高信頼化された WDM ネットワークを対象とした論理トポロジー管理手法の検討を行っている。また、数値例によって、その手法を用いることで再構成中のトラヒック損失が低く抑えられることを示している。

キーワード IP over WDM (Wavelength Division Multiplexing)、光パス、論理トポロジー、プロテクション方式、段階的設計手法、ネットワーク再構成

Management of Logical Topologies for Dynamically Changing Traffic in Reliable IP over WDM Networks

Shin'ichi ARAKAWA[†], Shinya ISHIDA^{††}, and Masayuki MURATA^{†††}

[†] Graduate School of Economics, Osaka University

Mathikaneyama 1-7, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Mathikaneyama 1-3, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

^{†††} Cybermedia Center, Osaka University

Mathikaneyama 1-30, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

E-mail: [†]arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††}s-isida@ics.es.osaka-u.ac.jp, ^{†††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract A protection method is one of most promising methods for building reliable IP over WDM networks. To construct the IP over WDM network with protection, protection paths as well as primary paths are set up to be embedded within a logical topology. However, many conventional approaches assume that the traffic demand is known a priori. It is possible that against the changing traffic volume/pattern, we apply the design method based on the current traffic characteristics, and reconfigure the logical topology. However, during the reconfiguration process, releasing the wavelength resources allocated for elder lightpaths causes traffic loss. In this paper, we consider a new approach, called an incremental capacity dimensioning approach, which consists of three steps for designing the logical topology: an initial phase, an incremental phase, and readjustment phase. By our approach, the logical topology can be adjusted according to the changed traffic demands. Through numerical examples we show that the algorithm takes a much smaller number of traffic loss operations during reconfiguration of the logical topology.

Key words IP over WDM, Reconfiguring, Optimization Problem, Wavelength Division Multiplexing, Protection method, Network Management, Reconfiguration

1. はじめに

次世代インターネットの基盤技術として、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術の適用が有望視されている。WDM は、一本の光ファイバ中に複数の波長を多重化し、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ものである。WDM 技術をインターネットに適用した場合のネットワークアーキテクチャに関してはさまざまな議論がなされており、その一つに IP (Internet Protocol) over WDM ネットワークがある [1]。ここで言う IP over WDM ネットワークとは、物理 WDM ネットワーク上において、波長ルーティングによってノード間にチャネル (光パス) を設定することで論理トポロジを構築し、IP トラヒックをその論理トポロジ上に流すというものである。

WDM 技術によって大量の IP トラヒックが収容されるようになると、障害発生時のトラヒック損失も大きくなる。そのため、障害時の高速復旧を目的としたプロテクション方式が考えられている。例えば、文献 [2] では、プライマリ光パスに対して、1対1対応にバックアップ光パスを定める方式 (専有プロテクション)、及び、複数のプライマリ光パスが1本のバックアップ光パスを共有する方式 (共有プロテクション) などが示されている。筆者らは、文献 [3] において IP over WDM ネットワーク上でバックアップ光パスを共有方式によって準備する論理トポロジ設計手法の提案を行った。しかし、文献 [2,3] も含めた多くの過去の研究では、トラヒック要求を既知としてプライマリ、及び、バックアップ光パスの設定を行っている。

トラヒック量の変動に対応して、オンデマンドで、プライマリ光パスとバックアップ光パス設定を行うための発見的アルゴリズムは、文献 [4] に既に示されている。そこでは、バックアップ光パスに障害が発生していない時には、トラヒックが流れていないことを利用して、バックアップ光パスの再構成を行っている。しかし、そこで提案されているアルゴリズムでは専有プロテクションのみを対象としており、必要となる波長資源は大きくなる。そこで、本稿では、共有プロテクションを用いた高信頼 IP over WDM ネットワークを対象とし、プライマリ光パスとバックアップ光パスを設定する段階として、初期段階、追加段階、調整段階の3つを考えた、段階的ネットワーク設計手法を検討する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2章において論理トポロジ管理を行う3つの段階を導入する。次に、3章において追加段階での論理トポロジ再構成のための定式化、およびアルゴリズムの提案を行う。4章では、調整段階における論理トポロジ再構成のための光パス交換手法を述べる。5章では提案するアルゴリズムの評価を行い、その有効性を明らかにする。最後に6章で本稿のまとめを行う。

2. IP over WDM における論理トポロジ管理手法

本稿では、WDM 技術を用いた IP over WDM ネットワークを運用していく上で、初期段階 (Initial Phase)、追加段階 (Incremental Phase)、調整段階 (Readjustment Phase) の3つの管理段階を考える。以下の各節において、それぞれの段階におけるトポロジ設計をまとめる。ただし、以下のいずれの場合においても、光パスを設定できない場合には波長自体の不足を意味しているため、アラート信号を出してファイバー増設を図るものとする。

2.1 初期段階

初期段階では、あらかじめ想定されたトラヒック要求に応じてプライマリ光パスおよびバックアップ光パスの設定を行う。

この段階では、ネットワーク内のすべての波長を使い切るのではなく、トラヒック要求に応じた分のみの光パスを設定する。利用しない波長は、将来のトラヒック要求の変動に対応するために残しておく。なお、バックアップ光パスに関しては、追加段階においてその再構成を図るため、ここではプライマリ光パスの波長数の最小化のみを目標にする。

トポロジ設計は、過去の研究結果を適用すれば可能である。例えば、文献 [3] では、IP over WDM ネットワークにおいて、トラヒック量を既知とした論理トポロジ設計およびバックアップ光パスの設計手法が提案されており、本稿における初期段階のトポロジ設計に適用可能である。

2.2 追加段階

追加段階では、初期段階によって論理トポロジを構築した後、トラヒック要求の変動に応じて新しい光パスの設定を行う。各ノードにおいてトラヒック測定を行い、光パスの利用率が α ($0 < \alpha < 1$) 以上になると管理ノードに向けてプライマリ光パスの設定要求を送る。管理ノードでは、要求に基づいてプライマリ光パスおよびバックアップ光パスの経路探索と波長割当を行う。本稿では、プライマリ光パス設定時には、すでに設定されているプライマリ光パスに対しては一切変更を加えない。これは、プライマリ光パスに流れているトラヒックへの影響を排除するためである。一方、バックアップ光パスには通常時はトラヒックが流れていないため、バックアップ光パスの再構成を常時行うことによって、将来到着するプライマリ光パス設定要求に対してより柔軟に対応することが可能となる。

追加段階における

- プライマリ光パスの経路選択 / 波長割り当てアルゴリズム
 - バックアップ光パスの再構成問題の定式化
- については次章で詳細に述べる。

2.3 調整段階

調整段階では、追加段階とは異なり、プライマリ光パスを含めて再設定を行う。この段階においては、トラヒック量を既知とした静的設計手法を適用することも可能である。静的設計手法によって論理トポロジを求め、その解への移行を行う。しかし、既存の論理トポロジ再構成手法 [5,6] では、光カプラーを用いたスター型ネットワークを対象としており、メッシュ型 WDM ネットワークを対象とした研究は行われていないのが現状である。この点の拡張については4章で述べる。

3. 追加段階におけるバックアップ光パスの再構成

本章では、追加段階における、プライマリ光パスの設定アルゴリズムである MRB と、バックアップ光パスの再構成のための最適化問題の定式化を示す。

3.1 プライマリ光パスの経路選択と波長割当

追加段階において新たにプライマリ光パスを設定する場合、既存のバックアップ光パスで用いられている波長を、利用する場合と利用しない場合が考えられる。バックアップ光パスに関しては、通常時にはトラヒックは流れないため、再構成を行うことで将来到着するプライマリ光パス設定要求により柔軟に対応することが可能になる。そこで、本稿では既存のバックアップ光パスに割り当てられている波長も設定の対象とする。

プライマリ光パスの経路については、上位層プロトコルとして IP を想定するため、すでにプライマリ光パスが設定されている場合には同じコストとなる経路上に設定する。プライマリ光パスが設定されていなかったノード間には、伝搬遅延時間に関する最短経路上に新規のプライマリ光パスを設定する。一方、波長に関しては、本稿では再設定を必要とするバックアップ光パスの数が最も小さくなるような波長を用いる MRB アルゴリ

ズムを提案する。

MRB アルゴリズム

- Step.1 各波長 k に対して、 $\phi_k = \emptyset$ とする。
- Step.2 設定を行うプライマリ光パス P_{new} の経路において、各波長 k に対して、Step.3 を繰り返す。
- Step.3 各リンク pq における波長 k の利用状況を調べる。既に他のプライマリ光パスに利用されている場合、Step.2 へ。バックアップ光パスとして利用されている場合、それに対するプライマリ光パス P_{old} に対して、 $\phi_k = \phi \cup P_{old}$ を行う。すべての波長 k に対して Step.3 を行った場合、Step.4 へ。
- Step.4 ϕ_k の要素数が最も小さくなる波長 k_{select} を選ぶ。

再設定するバックアップ光パスを少なくすることによって、初期段階 もしくは調整段階 において設計された論理トポロジーの最適性が保たれると考えられる。また、最適化問題の計算時間を抑えることも可能となる。

3.2 バックアップ光パスの再設定

プライマリ光パスが既存のバックアップ光パスにすでに割り当てられている波長を利用する場合、バックアップ光パスの再構成を行う必要がある。それによって、論理トポロジーの最適性を維持できる可能性も大きい。本稿では、複数のプライマリ光パスでバックアップ光パスを共有する共有型プロテクション (Shared Protection) 方式を対象とし、最適化問題としての定式化を以下に示す。

与条件

まず、問題に与える定数を定義する。

- N : ネットワーク内ノード数
- W : ファイバ当たり波長数
- P_{mn} : 物理トポロジー。ノード m とノード n の間にファイバが施設されている時 $P_{mn} = 1$ 、それ以外は $P_{mn} = 0$ 。
- C_{mn} : ノード m とノード n の間のコスト。本稿では、伝搬遅延時間を与える。
- P_{ij}^k : ノード i とノード j の間において、波長 k を利用するプライマリ光パスに対するバックアップ光パスが、再構成しなければいけない時 1。それ以外は 0。
- R_{ij}^k : ノード i から j へ波長 k を用いているプライマリ光パスの経路集合。物理経路の集合: $(i, m_1), (m_1, m_2), \dots, (m_p, j)$ で与えられる。
- o_{nm}^w : ノード n, m 間において波長 w が、プライマリとして利用されている時 1。それ以外は 0。
- A_{ij}^k : ノード i とノード j の間において、波長 k を利用するプライマリ光パスの迂回経路の集合。ノード i と j の間に、遅延時間の上限值 τ を設け、 τ に基づいて与える。
- ϕ_{nm} : ノード n とノード m 間において共有する光パスの最大数

また、最適化問題の定式化のために次の変数を導入する。

- b_{nm} : ノード n, m 間において、バックアップとして利用されている波長数

m_{nm}^w : ノード n, m 間において、波長 w がバックアップとして利用されている時 1。それ以外は 0。

$g_{ij,pq,k}^{mn,w,r}$: ノード i からノード j まで波長 k を利用して設定されたプライマリ光パス上のリンク pq に対して、そのバックアップ光パスが第 r 番目の迂回経路を通り、かつ、リンク mn 上で波長 w を用いる時、1。それ以外 0。

目的関数

使用波長数を最小化する。すなわち、

$$\min \sum_{mn} (b_{mn}) \quad (1)$$

制約条件

以下、制約条件を示す。

(1) リンク mn において、バックアップ光パスとして用いられている波長数に関して、以下の式が成立する。

$$b_{mn} = \sum_{w \in W} m_{mn}^w \quad (2)$$

(2) リンク mn の波長 k は、プライマリ光パスとして用いられているかバックアップ光パスとして用いられているかのいずれかである。

$$o_{mn}^k + m_{mn}^k \leq P_{mn} \quad (3)$$

(3) 障害がリンク $pq \in R_{ij}^k$ で発生した場合、バックアップ光パスが用意されている必要がある。

$$\begin{aligned} \text{if } P_{ij}^k = 1, \\ \sum_{w \in W} \sum_{r \in A_{ij}^k} \sum_{it \in r} g_{ij,pq,k}^{it,w,r} = 1. \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 波長連続性に関する制約; ノード i と j の間において、波長 k を利用するプライマリ光パスに関して、その経路上の pq で障害が起きた場合、迂回経路 $r \in A_{ij}^k$ 上の各リンクで同一波長 w を用いなければならない。

$$\begin{aligned} \text{if } P_{ij}^k = 1, \\ g_{ij,pq,k}^{nt,w,r} = g_{ij,pq,k}^{tm,w,r} \\ \forall pq \in R_{ij}^k, \forall nt, tm \in r, \forall r \in A_{ij}^k. \end{aligned} \quad (5)$$

(5) ノード i と j の間で波長 k を利用するプライマリ光パス上で障害が起こった場合、そのバックアップ光パスは障害箇所によらず同一波長 w を用いなければいけない。

$$\begin{aligned} \text{if } P_{ij}^k = 1, \\ g_{ij,p_1q_1,k}^{pq,w,r} = g_{ij,p_2q_2,k}^{pq,w,r} \\ \forall p_1q_1, p_2q_2 \in R_{ij}^k. \end{aligned}$$

(6) 共有のための制約; リンク pq で障害がおこった場合、高々1つのプライマリパス ij, k がリンク mn 上の波長 w を利用する。

$$\sum_{ij} \sum_{k \in W: pq \in R_{ij}^k} \sum_{r \in A_{ij}^k: mn \in r} \sum_{mn \in r} g_{ij,pq,k}^{mn,w,r} \leq 1 \quad (6)$$

(7) 共有するバックアップ光パスの数は ϕ_{mn} 以下である。

$$\begin{aligned} \varphi_{mn} * m_{mn}^w \geq \\ \sum_{k \in W} \sum_{ij} \sum_{r \in A_{ij}^k: mn \in r} \sum_{pq \in R_{ij}^k} g_{ij,pq,k}^{mn,w,r} \end{aligned} \quad (7)$$

(8) ノード i とノード j の間において、波長 k を利用するプライマリパスと波長 k' を利用するプライマリ光パスに関して、それぞれのバックアップ光パスの経路 $r \in A_{ij}^k$ 、 $r' \in A_{ij}^{k'}$ におけるコストの和は同一である。

$$\begin{aligned}
 & \text{if } P_{ij}^k = 1 \wedge P_{ij}^{k'} = 1 \wedge r \equiv r', \\
 & \sum_w \sum_{mn \in r} C_{mn} \times g_{ij,pq,k}^{mn,w,r} \\
 & = \sum_{w'} \sum_{m'n' \in r'} C_{m'n'} \times g_{ij,pq,k'}^{m'n',w',r'} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式 (6)、(7) において、 $P_{ij}^k = 1$ である条件式を付与していない。これは共有可能かどうかの判断を、現在設定されているすべてのプライマリ光パスに対して行わなければいけないためである。また、IP への適用を考慮して、障害発生時に利用するバックアップ光パスにおいて同一コストとなるように迂回経路を設定する必要がある。式 (8) では、ノード間に複数のプライマリ光パスが設定されている場合に、それぞれのプライマリ光パスに対するバックアップ光パスのコストが等しくなるようにするための制約を課している。

4. 論理トポロジー再構成のための光パス交換手法

本章では、調整段階において論理トポロジー再構成のための光パス交換手法を述べる。以降では、現行の論理トポロジー (現行論理トポロジー) 上でのプライマリ光パス、バックアップ光パスをそれぞれ現行プライマリ光パス、現行バックアップ光パスと呼ぶ。また、移行する論理トポロジー (移行論理トポロジー) 上でのそれを、新規プライマリ光パス、新規バックアップ光パスと呼ぶ。

4.1 プライマリ光パスへの操作

4.1.1 一致するプライマリ光パスの検出 (Leave)

論理トポロジー再構成を開始する前に、移行論理トポロジー上のプライマリ光パスのうち、現行プライマリ光パスと同じ経路に同じ波長で設定されるものをすべて検出する。この操作で検出された新規プライマリ光パスはその設定を新たに行う必要はなく、現行プライマリ光パスをそのまま使用すればよい。この操作を行うことで、再構成の操作回数を減らすことができ、以降の再構成作業が簡単になる。

4.1.2 同一送受信ノードをもつ光パスの交換 (Exchange)

同一の送受信ノードをもつ現行プライマリ光パスと新規プライマリ光パスの間でパス交換を行う。その例を図 1 に示す。図 1 では、まず同じ送受信ノードをもつ現行プライマリ光パス $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ と新規プライマリ光パス $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ でペアを作る (図 1(a))。次に、その新規プライマリ光パスの設定を行い、現行プライマリ光パス上を流れているトラフィックを新規プライマリ光パス上に移す (図 1(b))。現行プライマリ光パス上にトラフィックが流れなくなった時点で (図 1(c))、現行プライマリ光パスを削除する (図 1(d))。この操作を Exchange と呼ぶ。Exchange 操作でパス交換を行えば、ノード 1 からノード 4 へのトラフィックを損失することなく論理トポロジーの再構成を行うことができる。また、現行プライマリ光パスの削除と新規プライマリ光パスの追加を一度で行えるため、効率のよい再構成操作と言える。

4.1.3 新規プライマリ光パスの追加 (Append)

新規プライマリ光パスの追加を行う。この操作は、Exchange 操作においてペアとなる現行プライマリ光パスが存在しない時のみ行う。

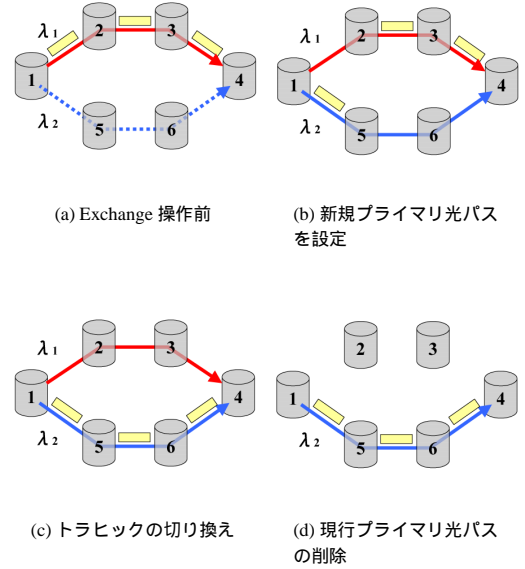


図 1 Exchange 操作

4.1.4 現行プライマリ光パスの削除 (Delete)

現行プライマリ光パスの削除を行う。ただし、現行プライマリ光パスの削除は、その光パス上に流れるトラフィックに影響を及ぼすため、この操作の回数を少なくする必要がある。

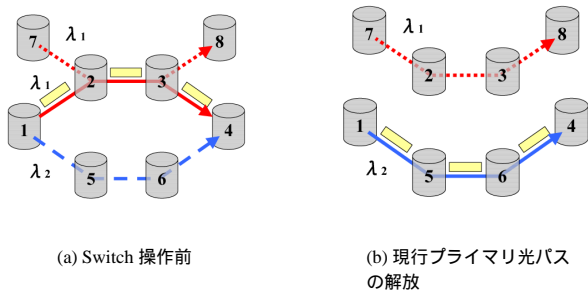
4.2 バックアップ光パスを用いた操作

4.2.1 バックアップ光パスへのトラフィックの退避 (Switch)

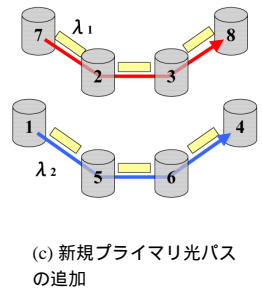
ペアとなる新規プライマリ光パスが存在せず、Exchange 操作ができない現行プライマリ光パスの波長資源を、トラフィックを損失することなく解放するために、障害発生時のために設定されている現行バックアップ光パスを用いた操作を考える。現行プライマリ光パスを削除する前に、トラフィックを現行バックアップ光パスに移せば、トラフィックを損失することなく現行プライマリ光パスの波長資源を解放できる。この操作を Switch と呼び、その例を図 2 に示す。現行プライマリ光パスの一部を用いて新たな新規プライマリ光パスを設定しなければならないとする (図 2(a))。Exchange と同様の操作で現行プライマリ光パス上のトラフィックを現行バックアップ光パスに移し、現行プライマリ光パスの波長資源を解放する (図 2(b))。解放された波長資源の一部を使用して新規プライマリ光パスを設定する (図 2(c))。この操作の間は現行バックアップ光パスを利用しているので、ノード 1 からノード 4 へのトラフィックは損失されない。ただし、共有プロテクション方式を用いてバックアップ光パスが設定されているため、この操作を行うと波長資源を共有しているバックアップ光パスが使用できなくなる。本稿では、他の現行プライマリ光パスのバックアップ光パスと波長資源を共有していないときのみこの操作を行うものとする。

4.2.2 バックアップ光パスの波長資源の解放 (Release)

現行プライマリ光パスのうち、Exchange、Append、Switch の操作の対象とならない光パスはいずれ Delete 操作で削除されることになるが、その削除は先延ばしすることが可能である。例えば、図 3(a) のような光パス設定がある場合、現行プライマリ光パスを削除する前に、そのバックアップ光パスの資源のみを解放して (図 3(b))、それによって論理トポロジーの再構成を促す (図 3(c))。その後の再構成の進み具合によっては、現行プライマリ光パスを Delete 操作で削除する必要がなくなる可能性も期待できる。

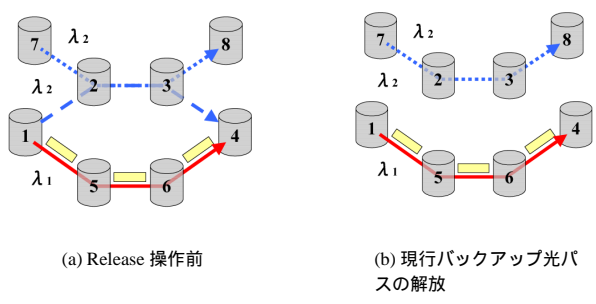


(a) Switch 操作前 (b) 現行プライマリ光パスの解放

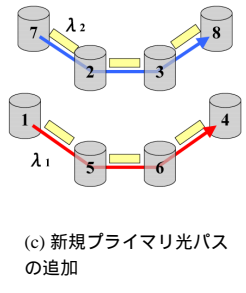


(c) 新規プライマリ光パスの追加

図 2 Switch 操作



(a) Release 操作前 (b) 現行バックアップ光パスの解放



(c) 新規プライマリ光パスの追加

図 3 Release 操作

4.3 空き資源を用いた光パスへの操作

ネットワークの上位層から論理トポロジを捉えた場合、新規プライマリ光パスが別の波長で設定されたとしても、同一経路であればネットワークの品質上問題はない。そのため、Exchange・Append 操作で新規プライマリ光パスを設定するとき、および Switch 操作で現行バックアップ光パスを設定するときに、それらの光パスに元々割り当てられている波長資源が確保できない場合は、他の波長を用いて設定できるかどうかを調べる。もし他の波長の資源が割り当て可能ならばそれを用いて光パスを設定する。ここで波長資源が割り当て可能であるとは、その波長が現行プライマリ光パスと現行バックアップ光パス、および他の新規プライマリ光パスのいずれにも使用されて

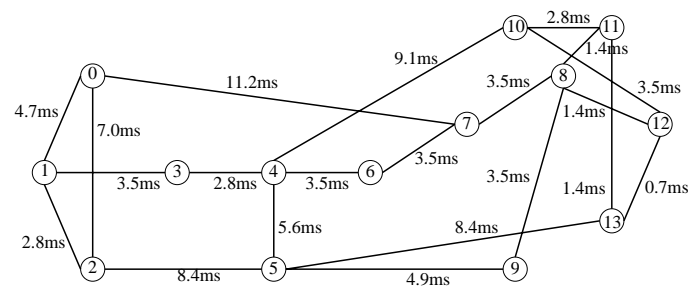


図 4 ネットワークモデル: NSFNET

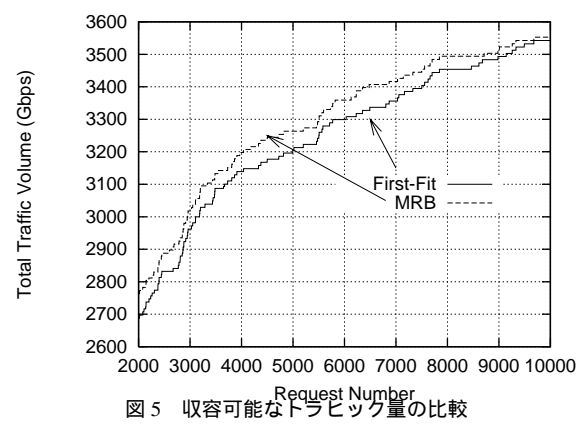


図 5 収容可能なトラフィック量の比較

いないことである。このように波長の変更を行うことによって、現行プライマリ光パスのトラフィックを保護することができる。

この操作によって設定される新規プライマリ光パスは移行論理トポロジには含まれない光パスであるが、ネットワークの品質へは影響がないためそのまま残してもよい。また、移行が完了した段階で、本来の波長を用いた光パスに設定することも可能である。

5. 性能評価

5.1 追加段階におけるプライマリ光パス設定アルゴリズムの評価

本章では、提案アルゴリズム MRB の評価を行う。対象ネットワークとして、図 4 に示すような 14 ノード、21 リンクからなるネットワークを考える。初期段階において、あらかじめ与えられるトラフィック要求は文献 [7] を参考にした。初期段階においてプライマリ光パスは伝搬遅延時間に関する最短距離上に設定し、波長は First-Fit に基づいて割り当てる。また、バックアップ光パスの設定は、文献 [3] に示された min-hop-first アルゴリズムを用いる。なお、簡単化のため、ここではすべてのエンドノード間に直接光パスを設定するものとしている。

追加段階で提案したアルゴリズムの評価のために用いるトラフィックモデルとして以下を想定する。新規トラフィック要求は、ノード間にランダムに到着し、そのトラフィック量は 0 から C (Gbps) の間でランダムに与える。ここで C は 1 波長当たりの伝送容量であり、シミュレーションにおいては 10 Gbps とした。また、ネットワークにおいて利用可能な波長数は 50 波長としている。新規のライトパス設定要求が発生する度に、MRB アルゴリズムを適用し、4 章において定式化した最適化問題を解く。なお、最適化問題は CPLEX [8] を用いて解いた。

MRB アルゴリズムの有効性を示すため、本稿では、新規プライマリ光パスに対して First-Fit に基づいて波長を割り当てた場合 (First-Fit) と比較する。シミュレーションは、トラフィック要求を 10000 回発生させ、収容したトラフィック量を MRB、First-Fit に対して求めた。その結果を図 5 に示す。この図を見

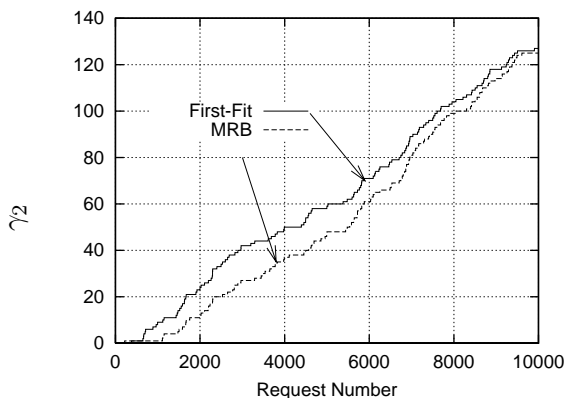


図6 γ_2 の比較

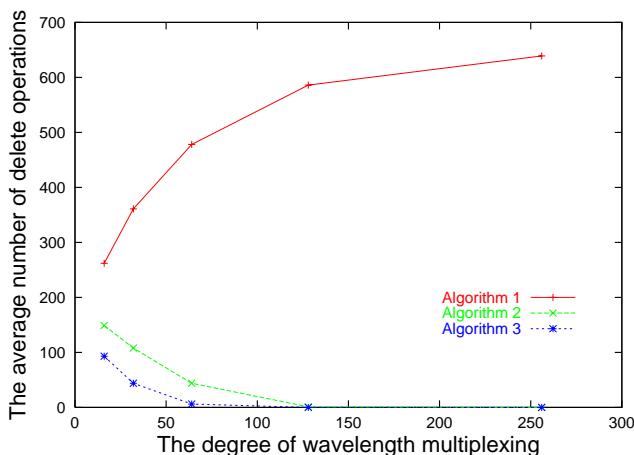


図7 波長多重度と Delete 操作回数との関係

ると、MRB アルゴリズムを適用した際に収容可能なトラフィック量は、First-Fit を適用した場合に比べて、およそ 50 Gbps 程度向上していることがわかる。

次に、プライマリ光パスが設定できないために受け付けられないトラフィック要求の数を γ_1 、プライマリ光パスは設定できるがバックアップ光パスが設定できないために受け付けられないトラフィック要求数を γ_2 とした時に、到着するトラフィック要求数に対する γ_2 の値を求めた結果を図 6 に示す。この図より、MRB アルゴリズムを用いることで γ_2 を小さく抑えられ、バックアップ光パスの再設計が効率良く行えていることがわかる。

5.2 論理トポロジー移行アルゴリズムの評価

本稿の評価では、3 章で示したすべての光パス交換手法を用いる再構成アルゴリズムの性能を比較するために、2 つのアルゴリズムを用意した。それぞれアルゴリズム 1、アルゴリズム 2 とする。アルゴリズム 1 は、Exchange、Append、Release、Delete の 4 つの操作のみを用いたアルゴリズムである。また、アルゴリズム 2 はアルゴリズム 1 で用いる 4 つの操作に加えて、波長の変換を許している。アルゴリズム 2 に残りの Switch 操作を加えた再構成アルゴリズムは、アルゴリズム 3 と表記する。

NTT 基幹ネットワーク上 (49 ノード、91 リンク) に波長数 16、32、64、128、256 としてランダムに生成した論理トポロジーに対して、アルゴリズム 1、2、3 を適用した結果を図 7 に示す。横軸が波長の多重度で、縦軸が移行に必要な Delete 操作回数の平均値である。

図 7 では、アルゴリズム 1 は波長数の増加とともに Delete 操

作回数が増えている。これは、波長数が増えるにつれ、論理トポロジー中の光パスの数自体が増えているためである。一方、アルゴリズム 2 および 3 では、波長数が増えるにつれてトラフィック損失の発生回数は減少しており、性能が大幅に改善されている。この結果から、波長多重度が大きくなるほど、波長の変換操作が有効であることが分かる。また、アルゴリズム 3 では、波長数が 128 以上のとき、トラフィック損失が一度も発生していない。これは、バックアップ光パスへトラフィックを退避させることにより、現行プライマリ光パスの波長資源の解放が容易になり、Exchange および Append の 2 つの操作が効率よく進んだためであると考えられる。

6. まとめ

本稿では、IP over WDM ネットワークにおいてプライマリ光パスとバックアップ光パスを設定する段階として、初期段階、追加段階、調整段階の 3 つを考えた段階的ネットワーク設計手法の提案を行った。次に、追加段階において、トラフィックデマンドの変動に応じて新規の光パスの設定を行うことを考え、プライマリ光パスの波長選択アルゴリズムとして MRB の提案を行った。また、動的に変動するトラフィック要求に対してバックアップ光パスを定める問題を最適化問題として定式化し、その解法を示した。その結果、提案する MRB アルゴリズムを用いることで収容可能なトラフィック量が増加することがわかった。さらに、調整段階を対象として、トラフィックの損失を低く抑えつつ、現行の論理トポロジーから新規の論理トポロジーへの移行を行うための光パス交換手法を述べ、その評価を行った。その結果、調整段階におけるトラフィック損失を大幅に抑えることが可能であることがわかった。今後は、IP の経路制御機能が論理トポロジーの再構成に与える影響を明らかにする予定である。

謝 辞

本研究の一部は、通信放送機構「高速・高品質・高機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] M. Murata, "Challenges for the next-generation Internet and the role of IP over photonic networks," *IEICE Transaction on Communications*, vol. E83-B, pp. 2153–2165, October 2000.
- [2] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks," in *Proceeding of IEEE INFOCOM'99*, pp. 744–751, March 1999.
- [3] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E83-B, pp. 2224–2233, October 2000.
- [4] V. Anand and C. Qiao, "Dynamic establishment of protection paths in WDM networks, part I," in *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N 2000)*, October 2000.
- [5] J.-F. P. Labourdette and A. S. Acampora, "Logically rearrangeable multihop lightwave networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 39, pp. 1223–1230, August 1991.
- [6] A. Narula-Tam and E. Modiano, "Dynamic load balancing in WDM packet networks with and without wavelength constraints," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, pp. 1972–1979, October 2000.
- [7] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840–851, June 1996.
- [8] "CPLX homepage," <http://www.cplex.com>.