

IP over WDM ネットワークにおける プロテクションパスの段階的設計手法の提案

荒川 伸一 村田 正幸

大阪大学大学院 基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Tel: 06-6850-6588 Fax: 06-6850-6589
{arakawa,murata}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらかし

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。しかしながら、これまでの多くの研究では、トラフィ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。インターネットへの適用を考えた場合、そのような仮定は非現実的である。そこで、本稿では、動的に変動するようなトラフィック要求に対して、まず、プライマリ/バックアップ光パスを設定するためのアルゴリズム MRB (Minimum Reconfiguring for Backup lightpaths) を提案する。ただし、提案アルゴリズムは動的に変動するトラフィックに対して最適な解を与えるものではない。そこで、バックアップ光パスは障害が発生していない時には使われないため、バックアップ光パスの再構成を行うことで、より多くのプライマリ光パスを効率的に収容するための最適化問題の定式化を行う。本稿では、シミュレーションによって、提案方式の有効性を検証している。

キーワード IP over WDM、ネットワーク再構成、最適化問題、波長分割多重、プロテクション方式、ネットワーク管理

Incremental Capacity Dimensioning for Reliable IP over WDM Networks

Shin'ichi Arakawa Masayuki Murata

Graduate School of Engineering Science,
Osaka University,
Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
{arakawa,murata}@ics.es.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. In this paper, we propose a new approach, called an incremental capacity dimensioning approach, which consists of three steps for designing the logical topology: an initial step, an incremental phase, and readjustment phase. By our approach, the logical topology can be adjusted according to the incrementally changed traffic demands. We reconfigure the backup lightpaths when the new primary path is necessary to be set up since the backup lightpaths do not affect the traffic on the primary paths. Our proposed algorithm, called MRB (Minimum Reconfiguring for Backup lightpath), assigns the wavelength route such that the number of backup lightpaths to be reconfigured is minimized. We next formulate an optimality problem for reconfiguring the backup lightpaths. Our results show the total traffic volume which the IP over WDM network can accommodate is improved by using our MRB algorithm.

Key Words IP over WDM, Reconfiguring, Optimization Problem, Wavelength Division Multiplexing, Protection, Network Management

1 はじめに

次世代インターネットの基盤技術として、WDM (Wave-length 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 [1,2]。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ンネル (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 [3] 参照)。文献 [3] 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 (Dedicated Protection)、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 (Shared Protection) などが示されている。筆者らは、文献 [4] 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 [3,4] 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。

しかし、特にインターネットへの WDM 技術の適用を考えた場合、トラヒック量を既知としたネットワーク設計手法は非現実的である。過去、電話網においては、ネットワークプロビジョニングに関する枠組みはすでに確立されている。これは、まず、目標呼損率から必要な回線容量を算出し、トラヒック測定によって、必要であれば回線増強を行うというフィードバックループによるものである。電話網の場合、(1) 呼損率がユーザ品質として直結していること、(2) 安定した成長のもとで過去の統計データによる将来予測が可能であること、(3) アーラン呼損式という基本的理論があること、(4) 品質測定を行うことがすなわち呼損率を測ることであること、(5) キャリアが品質測定 (呼損率測定) を行えること、などの理由により、パケット交換ネットワーク、すなわち、インターネットと比較して QoS 保証が容易であった。

一方、インターネットにおいては、(1) ネットワーク観測によって得られる測定データはパケット単位のものであるため、それがユーザ QoS と直結しないこと、(2) インターネットの急激な成長によりトラヒック予測が困難であること、(3) アーラン呼損式に対応する基礎理論が存在しないこと、などにより、ネットワークプロビジョニングの方法論はいまだ確立されていない [1]。

インターネットに代表されるパケット交換ネットワークにおいては、そのネットワーク設計の基礎理論として待ち行列理論が長らく用いられてきた。待ち行列理論によって明らかになるのは、例えば、ルータにおけるパケット待ち時間や棄却率などである。しかし、データ系の QoS はルータにおけるパケット待ち時間では決していない。アーラン呼損式 (すなわち、電話網) では呼損率が得られるが、これはユーザレベル QoS に直結した指標であり、それがアーラン呼損式に基づいた電話網のネットワーク設計を有効なものにしてきた。一方、パケット交換ネットワークにおいては、ルータでのパケットの振る舞いは TCP、すなわち、フィードバック系システムが上位レベルにあることを前提に考慮しなければならず、それがインターネットにおける待ち行列理論の適用を無意味なものにしている。また、ユーザレベル QoS 項目としてパケットレベルの遅延や棄却率ではなく、アプリケーションレベルの性能指標が重要である [1]。

以上のことを考慮すると、従来のようなトラヒック量を既知としたネットワーク設計では不十分であり、将来的にも、従来のようなネットワーク設計論を基盤としたネットワーク構築は困難であると考えられる。それよりも、ネットワークトラヒック測定から統計分析、回線容量設計というフィードバックループを前提として [5]、ユーザ性能が不十分である場合には、即座に回線増強に対応できるような柔軟なネットワーク構築を可能としておくことが重要である。WDM ネットワークにおいては波長ルーティング機能を活用すれば、トラヒック測定 / ユーザ性能測定を随時行い、それが不十分であれば、論理パス設定を行うことによって、上述のようなフィードバックループを構築することができる。

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 [6] 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、そのバックアップ光パスは既存のプライマリ光パスとは独立して経路を定めている。しかし、IP over WDM ネットワークの場合、障害復旧後、ルーティングテーブルが更新された後においてもバックアップ光パスを使えるようにするには、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しておく必要がある。

そこで、本稿では、まず 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を提案する。

初期段階では、あらかじめ想定されたトラヒック要求を収容するために、論理トポロジーの構築（プライマリ、および、バックアップ光パス設定）を行う。これは、従来の提案手法を変更すればよい。

追加段階では、初期段階において構築された論理トポロジーに対して、トラヒックデマンドの変動に応じて新しい光パスの設定を行っていく。本稿では、追加段階において、動的に変動するトラヒ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、その解法を示す。また、プライマリ光パスを設定する時に、利用する波長を選択するためのアルゴリズムとして MRB (Minimum Reconfiguring for Backup lightpaths) アルゴリズムを提案し、その評価を行う。なお、設定の簡単化のため、ここではエンド間でトラヒック要求があるとしているが、実際にはトラヒック計測で行い、エンド間トラヒック量が増大した時に対応する光パス設定を行う必要がある。ここでは、トラヒック量があるしきい値を越えた時に、光パス設定要求が発生するものとする。また、初期段階でのトラヒック予測が不適切であれば光パスが不要になる場合も十分考えられる。その場合は、光パス解除後の影響も考慮しつつ、設定解除を行えばよい。

追加段階において光パスを動的に設定していく場合、最初にすべてのトラヒック要求を既知として設計を行った場合（以下では静的設計と呼ぶ）に比べて、波長の有効利用は損なわれる。そこで、本稿で提案する枠組みにおいては、調整段階において、プライマリ光パスとプロテクション光パスの再構成を行うものとする。

これまで、ユーザに対する QoS (Quality of Service) を保証、あるいは、差別化するための研究が数多く行われてきた。フロー単位で QoS 保証を行う int-serv アーキテクチャ、クラス（フローの集合）に対して QoS 差別化を行う diff-serv アーキテクチャなどであ

る。しかし、IP over WDM ネットワークにおいては、上記のような細かい粒度の QoS 保証 / 差別化を行うのではなく、光パスを単位とした QoS 差別化が現実的であると考えられる。本稿では、QoS 指標としてバックアップ光パスの品質を規定し、それに応じた QoS 差別化を実現する IP over WDM ネットワークを提案する。これは、本稿における最適化問題においては、若干の変更で実現することができる。

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ー管理を行う段階を導入する。次に、3章において論理トポロジー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。提案するアルゴリズムの評価を4章にて行い、その有効性を明らかにする。5章では QoS を考えた場合に3章で示した最適化問題の変更点を述べる。6章でまとめを行う。

2 IP over WDM における論理トポロジー管理

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。以下の各小節において、それぞれの段階におけるトポロジー設計をまとめる。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。

トポロジー設計は、過去の研究結果を適用すれば可能である。例えば、文献 [4] 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ー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

トポロジー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ーを構築した後、トラフィ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フィック測定を行い、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フィ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フィ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。ただし、ここでは、実行頻度は一カ月に一回など、比較的長期を想定している。この段階においては、トラフィ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ーを求め、Branch-Exchange [7] を用いることで解への移行を行う。ただし、プライマリ光パス上を流れるトラフィックへの影響を最小限に留めるためには、変更光パスを最小にする必要がある。この点については今後の課題である。

3 段階的光パス設定手法の提案

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 の提案と、バック

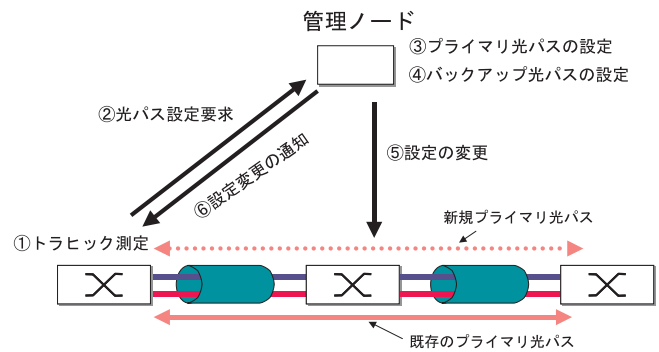


図 1: パス設定要求発生から完了までの動作

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、通常時にはトラフィ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、遅延時間の上限値 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。

$$if P_{ij}^k = 1,$$

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

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。

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

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。

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

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。

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

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。

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

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

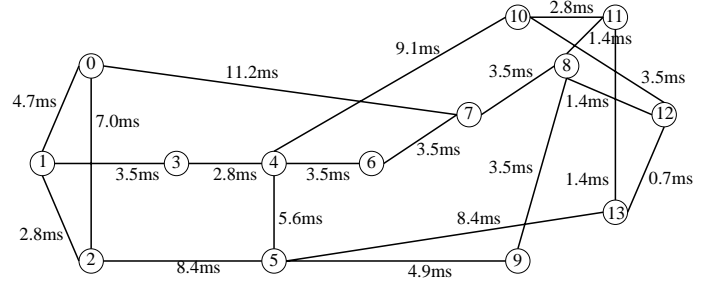


図 2: ネットワークモデル: NSFNET

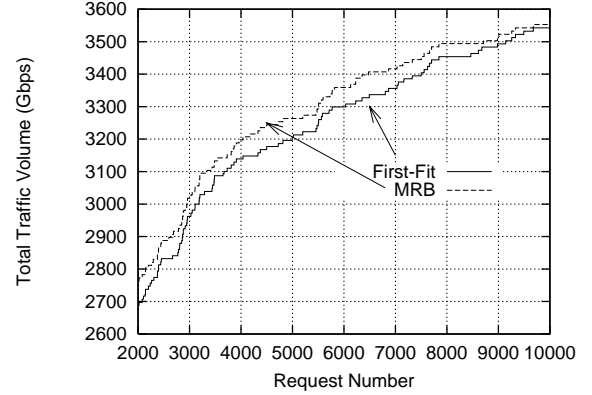


図 3: 収容可能なトラフィック量の比較

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 性能評価

本章では、提案アルゴリズムの評価を行う。対象ネットワークとして、本稿では、図 2 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 [8] 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 [4] 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、本稿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

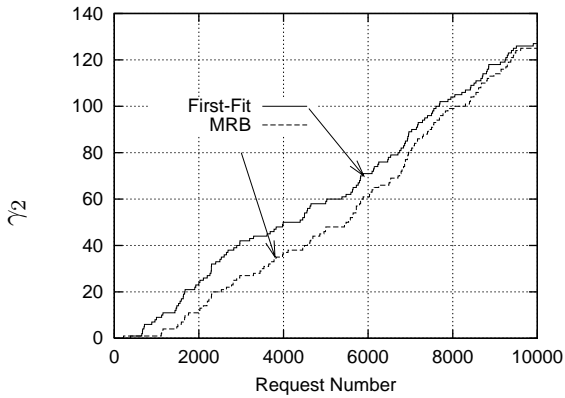


図 4: γ_2 の比較

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 [9] 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、トラヒック要求を 10000 回発生させ、収容したトラヒック量を MRB、First-Fit に対して求めた。その結果を図 3 に示す。この図を見ると、MRB アルゴリズムを適用した際に収容可能なトラヒック量は、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ヒック要求の数を 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ヒック要求数を γ_2 とした時に、到着するトラヒック要求数に対する γ_2 の値を求めた結果を図 4 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われていることがわかる。

5 QoP の導入

前章までは、すべての光パスに対して共有プロテクション方式を対象としたバックアップ光パスの設定を考えた。本章では、IP over WDM ネットワークにおける QoS 項目として、障害復旧のレベルを考え、それを QoP (Quality of Protection) を呼ぶ。QoP の種類として、本稿では以下の 3 つを考える。

1. 追加段階においてパス設定時にバックアップ光パスを提供する。

2. 次回調整段階までバックアップ光パスの設定を行わず、調整段階においてバックアップ光パスを提供する。
3. プロテクションをまったく行わない。

QoP を実現するには、論理トポロジー構成問題を以下のように変更すればよい。まず、以下の変数を最適化問題の与条件として加える。

QoP_{ij} : ノード i とノード j 間のトラヒックに対して、追加段階においてバックアップ光パスを提供する場合、 $QoP_{ij} = 1$ 。それ以外は 0。

追加段階に着目した場合、調整段階までにバックアップ光パスの設定を行わない場合とプロテクションをまったく行わない場合は $QoP_{ij} = 0$ とする。また、式 (4) を以下の式に置き換えることによって、追加段階におけるパス設定時にバックアップ光パスを提供する時のみ波長割当を行うことができるようになる。

$$QoP_{ij} = \sum_{w \in W} \sum_{r \in A_{ij}^k} \sum_{it \in r} g_{ij,pq,k}^{it,w,r} \quad (9)$$

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、追加段階に着目し、トラヒ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。次に、動的に変動するトラヒ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ヒック量が増加することがわかった。

2.3 節にも述べたように、調整段階において再調整を行う時点においては、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。しかしながら、論理トポロジーの最適構成を重視すれば、現用の光パスを大部分をいったん切断して論理トポロジーを再構成する必要がある。今後は、現用のプライマリ光パスを一本ずつ段階的に再構成していく光パス再構成アルゴリズムを考えていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」(JSPS-RFTF97R16301)によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [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] John L. Wei, Chang-Dong LIU, Sung-Yong PARK, Kevin H. LIU, Ramu S. Ramamurthy, Hyogon KIM, and Mari W. MAEDA, “Network control and management for the next generation internet,” *IEICE Transaction on Communications*, vol. E83-B, pp. 2191–2209, October 2000.
- [3] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, “Survivable WDM mesh networks, part I - protection,” in *Proceedings of Infocom’99*, pp. 744–751, Mar. 1999.
- [4] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, “Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks,” *IEICE Transactions on Communications*, pp. 2224–2233, October 2000.
- [5] 的場 一峰, 阿多 信吾, 村田 正幸, “インターネット上のエンドホスト間通信におけるボトルネックリンクの回線利用率計測手法,” 電子情報通信学会テレコミュニケーションマネジメント研究会 (発表予定), March 2001.
- [6] V. Anand and C. Qiao, “Static versus dynamic establishment of protection paths in WDM networks,” available at <http://www.cse.buffalo.edu/~qiao>.
- [7] J-F. P. Labourdette, G. W. Hart, and A. S. Acampora, “Branch-exchange sequences for reconfiguration of light-wave networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, pp. 2822–2832, October 1994.
- [8] 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.
- [9] “CPLEX homepage,” <http://www.cplex.com>.