

WDM ネットワークにおける障害回復時間を考慮した QoP を実現する論理トポロジー設計手法の提案

加藤 潤一† 荒川 伸一‡ 村田 正幸§

†大阪大学大学院 基礎工学研究科 情報数理系専攻
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-7
Phone: 06-6850-6616, Fax: 06-6850-6589
E-mail: j-katou@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡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
Phone: 06-6850-6588, Fax: 06-6850-6589
E-mail: arakawa@ics.es.osaka-u.ac.jp

§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
Phone: 06-6850-6616, Fax: 06-6850-6589
E-mail: murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし

WDM 技術によってネットワークの伝送容量が増大すると共に、障害発生時のデータ損失は大きくなる。そのため、障害発生時の高速復旧を行うことでネットワークの信頼性を高める手法として、プロテクション方式が考えられている。本稿では、プロテクションによって提供される信頼性に関する QoS に着目し、障害発生時から別経路への切り替わるまでの時間、すなわち、障害からの復旧時間を規定した QoP (Quality of Protection) を考えている。要求された QoP を満たすために、階層グラフを用いた論理トポロジー設計手法を提案し、その有用性を明らかにしている。

キーワード WDM, 論理トポロジー, 障害回復時間, QoP (Quality of Protection)

Design Method of Logical Topologies in WDM Network with Quality of Protection

Junichi Katou† Shin'ichi Arakawa‡ Masayuki Murata§

†Department of Informatics and Mathematical Science
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Phone: +81-6-6850-6616, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: j-katou@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡Graduate School of Economics, Osaka University,
1-7, Machikaneyama, Toyonaka,
Osaka 560-0043, Japan
Phone: +81-6-6850-6588, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: arakawa@ics.es.osaka-u.ac.jp

§Cybermedia Center, Osaka University
1-30, Machikaneyama, Toyonaka,
Osaka 560-0043, Japan
Phone: +81-6-6850-6616, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract

According to a rapid growth of the bandwidth capacity of the WDM network, traffic loss due to the failure of the network components is becoming unacceptable. Against this problem, *protection* preparing backup paths for the working paths is now considered to enhance the reliability of networks by high-speed recovery from the failure. In this paper, we introduce a notion of QoP (Quality of Protection), which is one realization of QoS suitable to the WDM network. We denote QoP as a processing time from the occurrence of the failure to the end of recovery time of paths. We propose a heuristic algorithm using layered graph to design a logical topology with satisfying each QoP requirement from node pairs. Our objective is to minimize the number of wavelengths on a fiber in the logical topology. We present the effectiveness of algorithm through our numerical evaluation.

Keywords WDM, logical topology, recovery time, QoP (Quality of Protection)

1 はじめに

WDM 技術は一本の光ファイバに対して複数の波長を多重化した光信号を伝送することによって大容量通信を実現する伝送技術であり、現在、この WDM 技術を用いて IP トラフィックを収容する IP over WDM ネットワークに対して様々な議論がなされている。そのひとつとして物理 WDM ネットワーク上において、ノード間の波長を用いて光パスを設定することで論理トポロジを構築し、IP トラフィックをその論理トポロジ上に考えられている。

しかし、WDM 技術によってネットワークの伝送容量が増大するにもなつて、ネットワーク機器において障害が発生した時のデータ損失量も大きくなる。そこで、障害から高速に復旧するために、WDM ネットワークでの障害回復のための手法としてプロテクション、および、リストラクションが考えられている。プロテクションとは、障害時にあらかじめ決められた経路（バックアップパス）上にトラフィックを流して障害回復を行う手法であり、適切なバックアップパスを用意しておけば必ず障害回復が行える。一方、リストラクションとは、障害発生後に経路を再計算することによって障害回復を行うことである。そのため、リストラクションでは、すでに設定されているプライマリパスに余剰帯域がない場合、もしくは波長が余っていない場合には障害回復が行えないことになる。リストラクションでは、障害発生後に利用可能な経路を再計算するため、障害復旧に必要な時間は大きくなる。

WDM ネットワークにおける障害回復に関する議論の多くは、プロテクションに必要な波長数や、リストラクションにおいて障害発生後の経路の再計算に失敗する確率（ブロック率）の最小化を目的とする論理トポロジ設計手法に関するものであった [1, 2]。文献 [1] では、同時に複数のネットワーク機器に障害が発生することはないと仮定し、互いに異なるネットワーク機器を利用するようなプライマリパス間でバックアップパスで用いる波長の共有を許すことで、必要となる波長数を少なく抑えている。さらに、近年、障害回復に関する QoS として QoP (Quality of Protection) を導入し、ノード間に確率的な障害回復を保証することによって、さらなる波長資源の使用効率を向上させることが考えられている。例えば、文献 [3] では、障害発生時にプライマリパスからバックアップパスに流れるトラフィックの割合を規定することで、確率的な障害回復を考えている [3]。一方、文献 [4] は、同時に複数の障害が発生することを前提とし、その場合はプロテクションを用いたとしても障害回復は保証できないことを指摘している。その上で、各ネットワーク機器に対して障害が発生する確率を与え、各プライマリパスに対してその経路上の信頼性が要求された数値を満たさない場合には、部分的にバックアップパスを設定することによって信頼性を高める方法を提案している。

しかし、今まで考えられてきた QoP では、プライマリパスに対して提供される最も高い障害回復の品質は、障害発生に対して必ず復旧すること、すなわち、QoP が議論される以前の WDM ネットワークにおける障害回復と同じである。そこで、本稿では、従来の障害回復の保証をした上で、更に付加的な QoS としてトラフィックに対して障害回復に必要な時間を保証する QoP (Quality of Protection) を考えている [5]。本稿では、文献 [5] で提案されている論理トポロジ設計手法に加えて、階層グラフを用いた設計手法を提案し、その有用性を検討する。

以下に本稿の構成を示す。まず 2 章において、信

頼性に関する QoS である QoP を述べる。次に、3 章では、階層グラフを用いて要求された QoP を満たすための論理トポロジ設計手法の提案を行っている。4 章で提案手法を既存の手法と比較し、QoP を満たすために必要となる波長数を示し、提案手法の有用性を示す。最後の 5 章では結論を述べる。

2 QoP (Quality of Protection)

2.1 最大障害回復時間に基づく QoP

WDM ネットワークにおいて、障害回復機能を有する論理トポロジの設計手法については多くの議論がなされてきた。しかし、従来の論理トポロジ設計手法の多くは使用波長数の最小化やネットワークのスループットの最大化を目的としており、結果として障害回復機能についてはトラフィックに対してベストエフォート型のサービスしか提供できないものであった。本稿では、ノード間のトラフィックがその経路上に障害が発生してから回復までの最大待ち時間、つまり最大障害回復時間を指定可能な QoP 機構を扱う。具体的には表 1 のようになる。各記号は以下のような意味を持つ。

D_{min} : 保証可能な障害回復時間の最小値
 D_{scale} : 各 QoP の刻み幅

表 1: QoP (Quality of Protection)

QoP ₁	D_{min} 時間以内に障害回復
QoP ₂	$(D_{min} + D_{scale})$ 時間以内に障害回復
QoP ₃	$(D_{min} + 2D_{scale})$ 時間以内に障害回復
⋮	⋮
QoP _{<i>n</i>}	$(D_{min} + (n - 1)D_{scale})$ 時間以内に障害回復
⋮	⋮
QoP _∞	障害回復なし

D_{min} , D_{scale} は対象となるネットワークによって異なるため、ネットワークによって適宜与えるものとする。各トラフィックでは QoP のクラスを指定し、それに基づいてバックアップパスを備えた論理トポロジを準備する。そのトラフィックに割り当てられる光パスは表 1 に示された時間以内に障害回復を完了する。最大障害回復時間が小さいときは、高い QoP が要求されることになる。

しかし、表 1 のように設定した QoP では、 D_{min} , D_{scale} はネットワーク全体に対して一意に決定される。そのため、特定のノードペア ij 間では高い QoP を要求しても、物理上その QoP を満たす経路が存在しない場合がある。文献 [5] では、このような場合には QoP 要求は満たせなかったとしている。本稿では、要求された QoP よりも低い QoP でバックアップパスの設定を試みる。

2.2 障害回復時間モデル

本節では、障害発生から回復までのモデルの説明を行う。図 1 は、プライマリパス L に対して、バックアップパス $P_x (0 \leq x \leq H)$ が設定されている状態である。ただし H は、プライマリパス L が経由

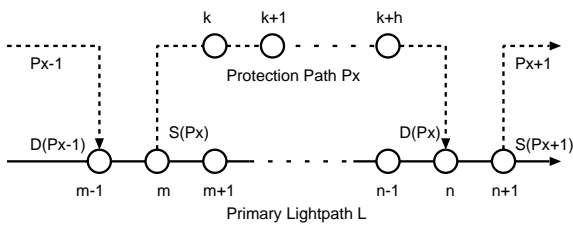


図 1: バックアップパス P_x によって保護されるプライマリパス

するノードの数 (ホップ数) とする。ここで、バックアップパス P_x の始点ノード $S(P_x)$ と終点ノード $D(P_x)$ の間の区間 $[S(P_x), D(P_x)]$ において、ノードまたはリンクで障害が発生した場合を考える。この時、まず障害発生箇所に隣接するノードからプライマリパス L の始点ノードに向けて障害が発生したことを伝えていく。ノード $S(P_x)$ に障害が発生したことが伝わると、あらかじめ用意されているバックアップパス P_x を利用するために、ノード $D(P_x)$ までの各ノード $k, k+1, \dots, k+H'$ 上で波長の予約を行う (H' はバックアップパス P_x のホップ数とする)。次に、プライマリパス上の信号を、バックアップパス上に切替えることで障害からの復旧を行う。プライマリパス L 上の区間 $[S(P_x), D(P_x)]$ で障害が発生した時に、バックアップパスに切替えるまでに必要となる時間の最大値 $RT(P_x)$ は、

- 障害発生情報がノード $S(P_x)$ に伝わるまでの時間
- バックアップパスの波長予約を各ノードで行う際の処理時間
- プライマリパス上の信号をバックアップパス上に切替えるために必要となる処理時間

の和で与えられる。すなわち、 $RT(P_x)$ は以下の式で表される。

$$RT(P_x) = \sum_{i=m}^{\alpha} d_{i(i+1)} + D_{node} \times (h+1) + D_{conf} \quad (1)$$

ただし、 D_{node} はバックアップパス上の各ノードでの波長予約のために必要となる処理時間であり、 D_{conf} はバックアップパス P_x の始点ノード $S(P_x)$ において必要となる処理時間である。また、 d_{ij} は隣接するノード i, j 間の伝搬遅延時間とし、 α は

$$\alpha = \begin{cases} n-1, & n \leq S(P_{x+1}) \\ S(P_{x+1})-1, & m < S(P_{x+1}) < n \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる。

プライマリパス L の最大障害回復時間は、各バックアップパス P_x ($0 \leq x \leq H$) に対して与えられる $RT(P_x)$ の最大値で与えられる。すなわち、

$$RT_{max}(L) = \max(RT(P_x)) \quad (0 \leq x \leq H) \quad (3)$$

3 QoP 要求を満たすための論理トポロジ設計手法の提案

3.1 QoP を実現するためのプロテクション方式

本稿では、リンク、ノードのどちらの障害にも対応可能な以下の2つのプロテクション方式を用いる。ただし、ネットワーク上ではリンクまたはノードでの障害は、同時に1つしか発生しないものとし、共有プロテクション方式を適用する [1]。

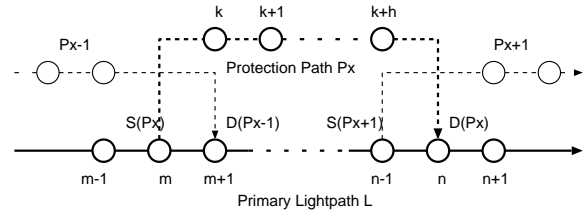


図 2: SLSP: Shortest Leap Shared Protection

バックアップパスの長さを指定するプロテクションとして、SLSP (Short Leap Shared Protection) がある [6]。SLSP では、図 2 のようにプライマリパス L が、バックアップパス $P_0, \dots, P_{x-1}, P_x, P_{x+1}, \dots, P_y$ で保護されている場合、隣接するプロテクションパス P_x, P_{x+1} の終点ノード $D(P_x)$ と始点ノード $S(P_{x+1})$ はそれぞれ $D(P_x) = n+1, S(P_{x+1}) = n$ と隣接し、 P_x, P_{x+1} が交差するように設定する。各プロテクションパスが保護する区間 $[m, n]$ を、その長さがあらかじめ与える閾値を越えないように設定する。その結果、プライマリパス L は図 3 のように複数のバックアップパスによって保護される。文献 [6] では各バックアップパス P_i ($0 \leq i \leq y$) の最大長を制約として与えることによって QoP を実現している。

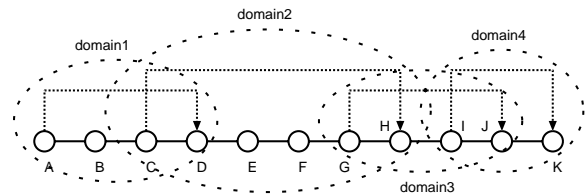


図 3: SLSP の概観

一方、本稿では各バックアップパス P_x に対して $RT(P_x)$ を求め、式 (1) より各ノード間ではこの $RT_{max}(L)$ を QoP として要求し、プライマリパス L の最大障害回復時間 $RT_{max}(L)$ を導出する。また、簡単化のため各プロテクションパス P_n はそれぞれ始点ノード $S(P_n)$ 、終点ノード $D(P_n)$ 間の最小ホップ経路とする。ただし、 $S(P_n), D(P_n)$ を除く P_n が通るすべてのノードは、プライマリ光パス L が通るすべてのノードと異なるものとする。

パスに対しては、経路とともに波長をあらかじめ決めておく必要がある。波長割当に際しては、以下の2つの点について留意しておく必要がある。まず、SLSP で設定されたすべてのバックアップパス P_x はプライマリパス L と同一波長を割り当てる必要がある。これは、本稿ではノードでの波長変換を考えていないため、障害発生時にバックアップパスに切替える

ことによって形成されるパス L も始点ノードから終点ノードまで同一波長に割り当てる必要があるためである (図4参照)。また、バックアップパス P_x は他の

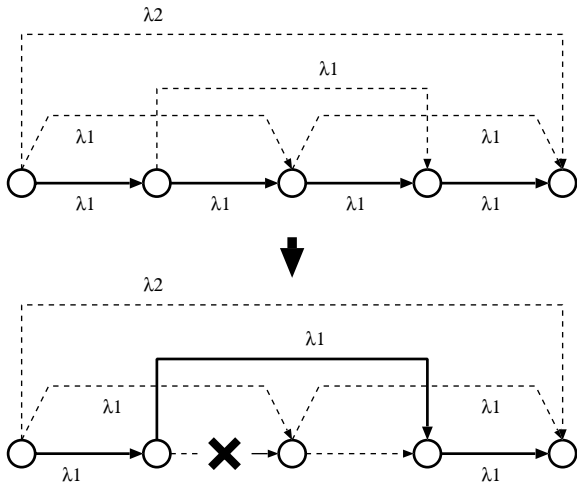


図4: プライマリパスとバックアップパスの波長の関係

バックアップパス P_1, P_2, \dots, P_k と同一リンクの同一波長を共有するが、このとき各バックアップパス P_a の保護対象となるプライマリ光パスを $L(P_a)$ とすると、同一波長を共有するプロテクションパスの保護対象となるプライマリ光パス $L(P_n), L(P_1), \dots, L(P_k)$ は互いに同じノードを共有しない必要がある。

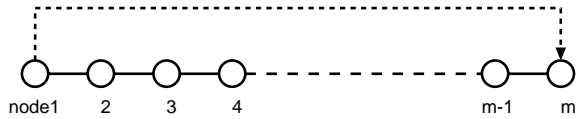


図5: Path Protection

ノード間のトラフィックが要求する QoP の値が大きく、プライマリパス L の始点ノードと終点ノードの間のバックアップパスのみで QoP が満たされる場合は従来の Path Protection [1] と同じになる。本来、SLSP ではプライマリパスとバックアップパスには同一の波長られる必要があるが、このように QoP の値が大きく、Path Protection となる場合に限り、プライマリパスとバックアップパスの波長は異なっても構わない。

3.2 提案アルゴリズム

提案する論理トポロジー設計のためのアルゴリズムでは、各ノード間に要求されるトラフィック量は既知とする。また波長数は充分にあると仮定した上で、すべての QoP 要求を満たすために必要となる波長数の最小化を目的としている。

ともにアルゴリズムの概要は、トラフィックに関する指標 α_{ij} の降順で各トラフィック T_{ij} に対しそれぞれの手順でプライマリパス、バックアップパスの経路を決定し、波長を割り当てる。ここで、トラフィック T_{ij} はノード i, j 間に要求されるトラフィックである。本稿では、指標 α としてトラフィックの QoP を用

い、 $QoP_1 > QoP_2 > \dots > QoP_\infty$ とした時、降順で一連の処理を行う。ただし、QoP が同じ値の場合はトラフィック量降順で処理する。ただし、物理的な制約により QoP を満たすプロテクションパスが設定不可能な場合は、2章で述べたように設定可能なレベルまで QoP を緩和してプライマリパス、プロテクションパスの設定を行う。

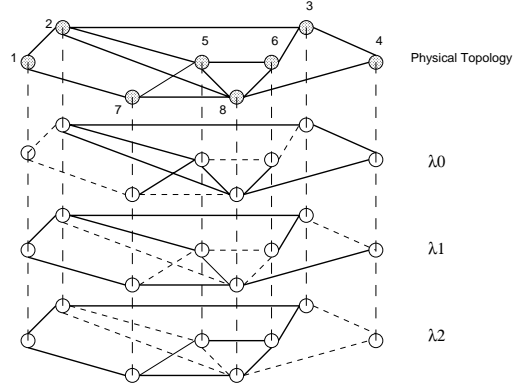


図6: 階層グラフの例: 波長数=3

3.2.1 階層グラフに基づく論理トポロジー設計アルゴリズム

図6に、波長数が3である場合の階層グラフの例を示す。階層グラフでは、各波長毎に独立したグラフが生成される。各階層グラフにおいてそれぞれ最短経路問題を解くことによって、各波長の使用状況を考慮した経路選択を行うことができる。そのため、波長資源をより有効に利用できると考えられる。提案するアルゴリズムでは以下の通りである。アルゴリズムでは、ノードペア ij 間のプライマリパス、バックアップパスの経路、および割当波長をそれぞれ決定している。

- step0: 変数の初期化を行う。 $w \leftarrow 0$ 。
- step1: 現在、 λ_0 から λ_w までの波長が使用されているとする。このとき、以下の手順で λ_0 から λ_{w+1} の波長にプライマリパス L_{ij} を割り当てた時に、各階層グラフ G_n 上で新たに波長を使用する際のリンクの数をコスト C_n で表す。
 - step1.1: ノード ij 間のプライマリパス L_{ij} を λ_n に割り当てたと仮定して、 G_n 上での経路を決定する。このときノード ij 間のプライマリパス L_{ij} の経路は、伝搬遅延時間をコストとした最短経路とする。
 - step1.2: 次に、求めたノード ij 間のプライマリパス L_{ij} に対して、 G_n 上でのバックアップパス P_1, P_2, \dots, P_k を求める。このとき、バックアップパスの設定方法は SLSP に基づいて行う。各バックアップパスの経路は始点ノードと終点ノード間のホップ数が最小となる経路を選ぶ。
 - step1.3: 求めたバックアップパス P_1, P_2, \dots, P_k の中にプライマリパスの始点、終点ノードを繋ぐバックアップパスがないかを調べる。存在する場合、そのバックアップパス (P_r とおく) は Path Protection となっているため、 P_r のみすべて階層グラフ $G_i (0 \leq i \leq w + 1)$ に対して割

り当てられるかを調べる。割り当て可能な各波長 λ_h に対して、各階層グラフ G_h において、新たに波長を使用するリンクを調べ、そのリンク数を l_{G_h} とおく。 l_{G_h} が最小となる波長 h' を選び、 $Cost_{P_r}$ を $l_{G_{h'}}$ とする。複数の波長が最小値を与える場合には、その中からもっとも波長の番号が小さい波長を選ぶ。

step1.4: プライマリパス L_{ij} のホップ数を波長 λ_n での L_{ij} のコスト $C1^n_{L_{ij}}$ とし、 P_r を除く他のプロテクションパス P が波長 λ_n に割り当てられたときに新規に使用する波長リンク数 $C2^n_P$ をバックアップパス P のコストとする。

step1.5: $C1^n_{L_{ij}} + C2^n_P + Cost_{P_r}$ を、 λ_n にプライマリパスとバックアップパスを設定するコスト C_n とする。

step2: 波長 $\lambda_i (0 \leq i < w + 1)$ のなかから、コスト C_i が最小となる波長 λ_a を選ぶ。同一コストの波長が複数ある場合には、波長の番号が小さい方を選ぶ。

step3: 波長 λ_a のコスト C_a を求めたときの、プライマリパスの経路とバックアップパスの経路、及び波長を用いてパスの割当を行う。

3.2.2 First-Fit アルゴリズム

本稿で提案する階層グラフを用いたアルゴリズムと比較するために、First-Fit アルゴリズムを用いた。First-Fit アルゴリズムでは各ノード間ごとにプライマリパス、バックアップパスの経路を設定し、経路が決定した後、それぞれのパスに対して波長を割り当てる。

プライマリ光パス L_{ij} の設定にはノード ij 間の伝搬遅延時間をコストとした最短経路を用い、バックアップパスはプライマリパスと始点、終点ノードを除いてリンクを共有することのない最小ホップ経路を用いる。

各パスの波長割当手法として、First Fit (FF) に基づく波長割当を行う [7]。すなわち、波長に 0 から番号を付け、パスに対して番号の小さい順に割当可能かどうかを調べ、波長割当可能な波長の集合からもっとも番号の小さい波長を割り当てる。ただし、割り当てる波長を求める際には、プロテクション方式の違いにより、以下の 2 つを考慮する必要がある。

- SLSP の場合

プライマリパスとその全てのバックアップパスは同一波長に割り当てられなければならない。

- Path Protection の場合

プライマリパスとバックアップパスはそれぞれ異なる波長に割り当ててもよい。そのため、First-Fit アルゴリズムでは、プライマリパスとバックアップパスには割当可能な波長の中から最も番号の小さい波長をそれぞれ選び出し、その波長を割り当てる。

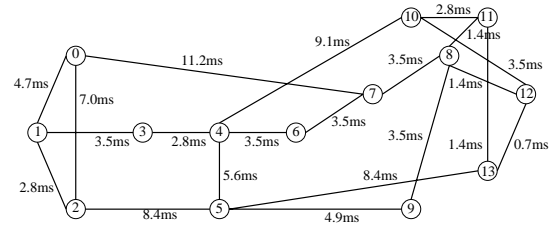


図 7: 14 ノード NSFNET

4 論理トポロジー設計手法の評価

4.1 ネットワークモデル

ネットワークモデルとして、図 7 に示す 14 ノード NSFNET を用いる。各ノード間が要求するトラフィック量として、文献 [8] に示されているものを用いる。ただし、文献 [8] のトラフィック量は相対的な数値で与えられているため、本稿ではその数値の単位を Gbps と仮定している。以降の図では、トラフィック量をトラフィック係数 α で乗じた値を実際に要求されるトラフィック量として与えている。また、1 波長当たりの伝送容量は 10Gbps とし、要求されるトラフィック量が 10Gbps 以上の場合にはトラフィックを収容するために必要となる最小限のプライマリパスを、同一経路上に設定する。

4.2 評価結果

まず、2 章における QoP のパラメータとして、 D_{min} , D_{scale} , D_{node} , D_{conf} について、それぞれ、10ms, 2ms, 1ms, 0ms, と仮定する。

図 8 は、各ノード間に設定される光パスの QoP が、すべて同じ値の時の、要求された QoP と各アルゴリズムで得られる論理トポロジーの必要波長数の関係を表したものである。この図においては、トラフィック係数 $\alpha=1$ としている。また、図 9、10 には、トラフィック係数 α をそれぞれ 5、10 とした時の必要波長数を示している。

図 8、9、10 を見ると、QoP が高くなるにつれ、論理トポロジーに必要な波長数も大きくなるのがわかる。また、提案手法である階層グラフを利用した論理トポロジー設計手法が、First-Fit に基づく設計アルゴリズムと比較して、より少ない波長数で要求された QoP を満たす論理トポロジーが設計されていることがわかる。これは、First-Fit アルゴリズムがプライマリパス、バックアップパスともに固定の経路選択を行っているのに対して、階層グラフアルゴリズムでは各波長での波長リンクの使用状況を考慮した経路選択を行うことによって、より波長資源を有効に利用しようとしているためである。

図 11 には、NSFNET と同じノード数、リンク数とし、ノード間のファイバをランダムに生成した物理トポロジーにおいて、各アルゴリズムで得られる論理トポロジーの必要波長数の関係を示している。ランダムに連結されたネットワークにおいても、階層グラフを利用したアルゴリズムが、First-Fit に基づくアルゴリズムよりも良い結果を示していることがわかる。

5 まとめ

本稿では、WDM ネットワークにおける信頼性に関する QoS として、障害からの回復時間を考慮した

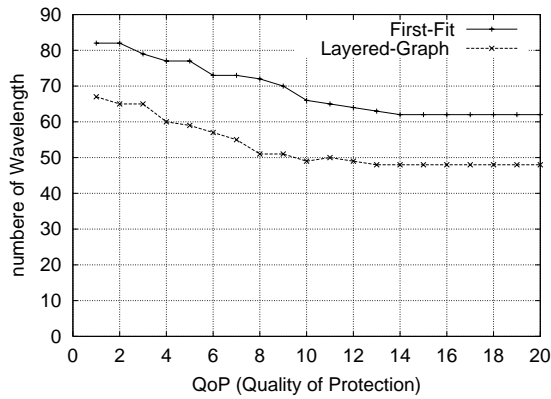


図 8: QoP に対する使用波長数の推移: $\alpha = 1$

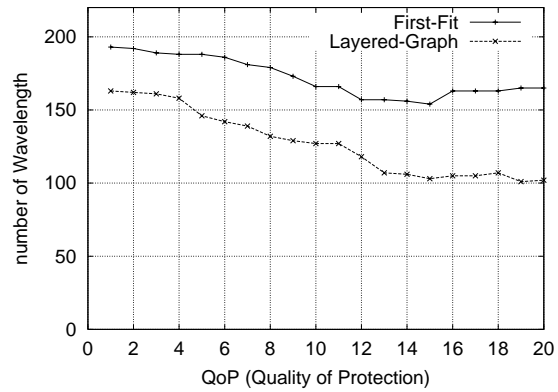


図 11: ランダムネットワークでの使用波長数: $\alpha = 1$

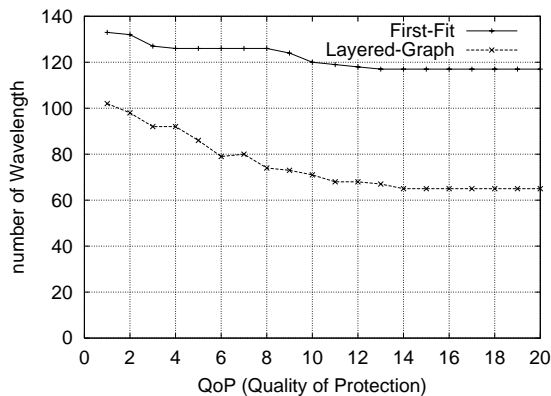


図 9: QoP に対する使用波長数の推移: $\alpha = 5$

QoPを対象とし、トラフィックが要求するQoPを満たすプロテクション方式を設定するための論理トポロジー設計アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、階層グラフを利用して必要となる波長数の最小化を目的としている。数値例では、トラフィックが要求するQoPを満たす論理トポロジーに必要な波長数を示し、QoPが高くなるにつれ、必要波長数も大きくなることを示した。また、提案した階層グラフを用いた論理トポロジー設計手法がFirst-Fitを用いた論理トポロジー設計手法よりも必要波長数が

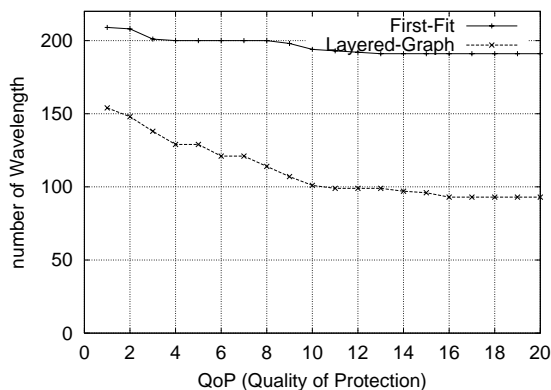


図 10: QoP に対する使用波長数の推移: $\alpha = 10$

少なくなることを示した。

今後の課題として、上位層としてIP層を考え、その時のIPの経路制御機能およびリストレージョン機能を考慮した、信頼性要求を満たす論理トポロジー設計アルゴリズムの提案を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、通信放送機構 (TAO) によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks, part I - Protection," in *Proceedings of IEEE INFOCOMM '99*, pp. 744-751, March 1999.
- [2] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Dynamic routing of locally restorable bandwidth guaranteed tunnels using aggregated link usage information," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, pp. 902-911, March 2000.
- [3] O. Gerstel and G. Sasaki, "Quality of protection (QoP): A quantitative unifying paradigm to protection service grades," in *Proceedings of Opticomm 2001*, April 2001.
- [4] C. V. Saradhi and C. S. R. Murthy, "Routing differentiated reliable connections in WDM optical networks," in *Proceedings of Opticomm 2001*, August 2001.
- [5] J. Katou, S. Arakawa and M. Murata, "Design method of logical topologies in WDM network with quality of protection," in *Proceedings of Workshop on OPTICAL NETWORKING*, November 2001.
- [6] P.-H. Ho and H. T. Mouftah, "A framework of a survivable optical Internet using short leap shared protection (SLSP)," in *Proceedings of 2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, pp. 21-25, May 2001.
- [7] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *Optical Network Magazine*, pp. 47-60, January 2000.
- [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.