

信頼性に関する QoS を考慮した WDM ネットワークにおける 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、あらかじめ別の経路を用意しておき、障害時にその経路上にトラフィックを流すことで障害回復を行うプロテクション方式が考えられている。しかし、従来のプロテクション方式に関する研究では、プロテクションの品質に関する研究はほとんど行われていない。本稿では、WDM ネットワークに適した QoS 項目として QoP (Quality of path Protection) を導入する。QoP は、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するものである。本稿では、使用波長数の最小化を目的としてトラフィックの QoP を満たす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する。

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 pathes for the working paths is now considered. By protection, the traffic traversing the damaged component is immediately switched to the backup paths. In this paper, we newly 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 two heuristic algorithms to design the logical topology satisfying QoP requirements from every traffic. Its objective is to minimize the number of wavelengthes on the fiber in the logical topology. We finally compare those algorithms through numerical evaluation.

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

1 はじめに

今日の高度に発展した情報化社会において、インターネットは重要な社会基盤となりつつある。インターネット上を流れるトラヒックは増加の一途をたどり、大容量帯域を実現する次世代インターネットが求められている。そのための有望な技術の一つとして、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術がある。WDM 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ものである。現在、この WDM 技術を用いて IP トラヒックを収容する IP over WDM ネットワークに対しても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ーを構築し、IP トラヒックをその論理トポロジー上に流す方式が考えられている。

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伴って、ネットワークの機器要素において発生した障害によるデータ損失量も大きくなる。IP 層を上位に有する場合、IP 層の経路制御に発生障害への対処を任せる方法も考えられるが、IP 層での経路の再構成は経路の不安定性を誘引する可能性があり、結果として経路制御のためのトラヒックを増大させ、ネットワーク全体の性能を低下させる要因にもなる。そこで、障害からの回復方法として、IP 層よりも低位の WDM 層での障害回復が考えられる [1]。

現在、WDM ネットワークでは、WDM 層での障害回復のための方式として、プロテクション (protection)、および、リストラクション (restoration) 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 (プロテクションパス) 上にトラヒックを流して障害回復を行うことであり、リストラクションとは障害時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。プロテクションを用いた場合、適切なプロテクションパスを用意しておけば、100%の障害回復が達成できる。一方、リストラクションの場合は、故障が発生した箇所でも局所的に障害回復を高速に行える可能性もあるが、波長が余っていない場合には WDM 層での障害回復が行えないことになる。

従来の研究においても、これらプロテクション/リストラクション機能を有する論理トポロジーの設計手法が多く提案されてきたが、そのほとんどは使用波長数の最小化やブロック率の最小化が目的となっており [2]、障害回復そのものの品質については議論されていない。文献 [3] では、障害回復時に主経路の帯域の何%を回復するかを定義することによって、そのような QoS 要求をトラヒックごとに規定することを可能にしている。文献 [3] では、これを QoP (Quality of Protection) と呼んでいる。また、文献 [4] はプロテクション経路の長さをトラヒックごとに指定することを可能とし、その要求を満たすプロテクション経路の

設計手法として SLSP (Short Leap Shared Protection) を提案しているが、具体的な評価結果は示されていない。

本稿では、各トラヒックは、QoS パラメータとして障害発生時に障害から回復するまでの平均待ち時間を規定できるものとし、それを QoP (Quality of Protection) と呼ぶ。本稿では、要求された QoP を実現するためにプロテクションパスを備えた論理トポロジーの設計手法を提案し、使用波長数の最小化を目指す。

なお、IP over WDM ネットワークにおいて所望の光パスに IP トラヒックを流す場合には、その経路制御機構が必要になる。そのため、実際には WDM 層の上位に GMPLS (Generalized MPLS) [5] を考え、各トラヒックは LSP (Label Switching Router) によって、始点ノードから目的ノードの間に設定されている光パスを選択するように経路制御されるものとする。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章では本稿で提案する QoP について説明する。続いて 3 章では、要求される QoP を実現するプロテクション方法を述べた上で、波長数の最小化を目的とする 2 つの論理トポロジー設計アルゴリズムを提案する。4 章では、QoP と使用波長数の関係を示した後、2 つの提案アルゴリズムを比較評価する。最後に 5 章では本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 QoP: Quality of Protection

2.1 最大障害回復時間を指定可能な QoP 機構の提案

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ー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ー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が目的関数とされ、結果として障害回復機能についてはトラヒ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がほとんどである。文献 [3] では障害発生時に保証される帯域の割合や保証される確率を用いてトラヒックが障害回復に対する QoS を要求できるようにする QoP (Quality of Protection) が提案されているが、具体的な評価は示されていない。

本稿では、各トラヒックが障害発生時に障害発生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 機構を提案する。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

これらの値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。各トラヒックは QoP_1 から QoP_{∞} までの値を QoP パラメータとして指定し、それに基づいてプロテクションパスを備えた論理トポロジーを準備することによって、そのトラヒックが割り当てられる光パスは表 1 に示された時間以内に障

害回復を完了できるようになる。

表 1: QoP (Quality of Protection)

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

2.2 障害回復時間モデル

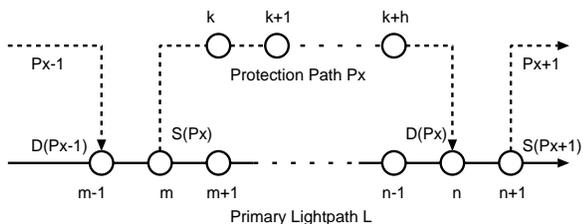


図 1: プロテクション方式によって保護された光パスモデル

図 1 のようにプロテクション方式によってプロテクションパス $P_0, \dots, P_{x-1}, P_x, P_{x+1}, \dots, P_y$ で保護された光パス L について、障害が発生した場合の最大障害回復時間 $RT_{max}(L)$ は以下の式で定義する。

$$RT_{max}(L) = \max(RT(P_x)) \quad x = 0 \dots y \quad (1)$$

ここで、プロテクションパス P_x の始点ノードを $S(P_x)$ 、終点ノードを $D(P_x)$ とする。このとき、 $S(P_x) = m$ 、 $D(P_x) = n$ の場合、光パス L を構成するノード $S(P_x) \dots (D(P_{x+1}))$ の区間で障害が発生した場合の区間最大障害回復時間 $RT(P_x)$ は以下の式で表される。

$$RT(P_x) = \sum_{i=m}^{\alpha} d_{i(i+1)} + D_{node} \times (h + 1) + D_{conf} \quad (2)$$

ただし、

$$\alpha = \begin{cases} n - 1, & n \leq S(P_{x+1}) \\ S(P_{x+1}) - 1, & m < S(P_{x+1}) < n \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 d_{ij} は物理的に隣接するノード i, j 間の伝搬遅延時間を意味し、 D_{node} は波長予約のために必要な各ノードでの処理時間、 D_{conf} はプロテクションパス P_x の始点ノード $S(P_x)$ での処理時間とする。

3 論理トポロジー設計手法の提案

3.1 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こととする。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する。

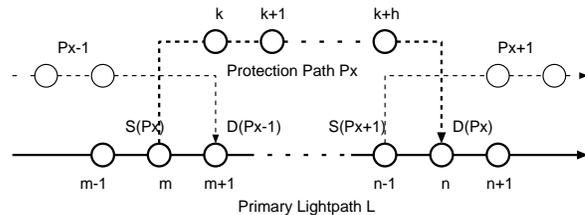


図 2: SLSP: Shortest Leap Shared Protection

SLSP (Short Leap Shared Protection) 方式は文献 [4] で提案された手法であり、図 2 の様にプライマリ光パス L が、プロテクション光パス $P_0, \dots, P_{n-1}, P_n, P_{n+1}, \dots, P_y$ で保護されている場合、隣接するプロテクションパス P_n, P_{n+1} の終点ノード $D(P_n)$ と始点ノード $S(P_{n+1})$ はそれぞれ $D(P_n) = n + 1, S(P_{n+1}) = n$ と隣接し、 P_n, P_{n+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 $m \dots n$ は、制約条件を満たす最長の区間となるように設定する。その結果、プライマリ光パス L はプロテクションパスによって図 3 のように保護される。

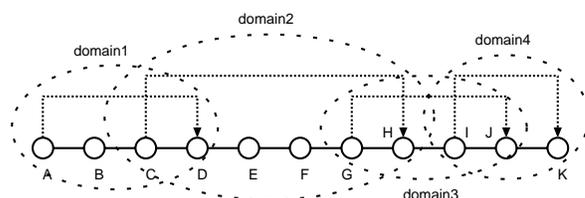


図 3: SLSP の概観

文献 [4] ではプロテクションパス $P_0 \dots P_y$ の最大長を制約条件として与えることによって QoP を実現している。一方、本稿では各プロテクションパス P_n に関して $RT(P_n)$ を求め、プライマリ光パス L の $RT_{max}(L)$ を QoP とし、制約条件にすることで QoS を実現する。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定めしておく必要がある。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

されたすべてのプロテクションパス P_n はプライマリパス L と同一波長 λ_i に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、障害発生時に障害が発生した区間をプロテクションパスに切替えた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の波長に割り当てる必要があるためである。また、プロテクションパス P_n は他のプロテクションパス P_1, P_2, \dots, P_k と同一リンクの同一波長を共有するが、このとき各プロテクションパス 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。

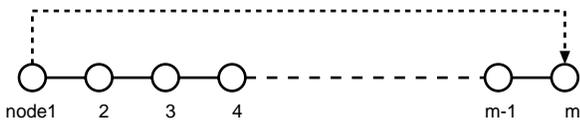


図 4: Path Protection

トラフィックの QoP の値が大きく、プライマリパス L の始点ノード $S(L)$, 終点ノード $D(L)$ 間のプロテクションパスのみで QoP が満たされる場合は Path Protection [6] に相当する。本来 SLSP ではプライマリパスとプロテクションパスには同一の波長 λ_i が割り当てられる必要があるが、この場合に限りプライマリパスとプロテクション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

本稿ではトラフィック量は既知とする。また、波長数は十分にありと仮定した上で、必要な波長数を最小化することを目的とする論理トポロジー設計手法を提案する。アルゴリズムの概要は以下になる。

step1: 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} に対して以下の処理を行う。ただし、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。

step1.1: ノード i, j 間にプライマリパス L_{ij} の経路を決定する。

step1.2: L_{ij} のプロテクションパス P_0, P_1, \dots, P_k の経路を決定する。

step1.3: プライマリパス L_{ij} 、およびプロテクションパス P_0, P_1, \dots, P_k に波長を割り当てる。

本稿では、指標 α としてトラフィックの QoP を用い、 $QoP1 > QoP2 > \dots > QoP\infty$ 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。また、プライマリ光パス L_{ij} の設定にはノード

i, j 間の伝搬遅延時間をコストとした最短経路を用い、プロテクション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。ただし、QoP 制約が厳しい場合には、QoP を満たすプロテクションパスが設定不可能な場合もありうる。QoP 条件を緩和することによってパスを設定することも可能であるが、ここではブロッキングが発生したとしてプライマリパスのみを設定することとする。

波長割当に関しては、以下の 2 つの異なるアルゴリズムを考える。

3.2.1 アルゴリズム 1

各パスの波長割当手法として、文献 [7] の First Fit (FF) 方式を用いる。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、可能な波長の内もっとも番号の小さい波長を割り当てるものである。ただし、本稿ではプロテクション方法により以下の 2 つの場合を考える必要がある。

- SLSP の場合

プライマリパスとその全てのプロテクション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

プライマリパスとプロテクションパスはそれぞれ異なる波長に割り当ててもよい。すなわち、プライマリパスとプロテクションパスはそれぞれに割当可能な最も番号の小さい波長を割り当てる。

3.2.2 アルゴリズム 2

対象となるパスに対して、割当可能な波長をすべて求め、各波長に対して新たに使用される波長数をコストとして与える。そして、最もコストの小さい波長数を割り当てる。ただし、この方法は同一波長を共有することが可能なプロテクションパスに対してのみ有効である。波長の共有ができないプライマリパスの場合、割当可能な波長コストはすべて同じであるためである。そのため、Path Protection の場合のプライマリパスに関する波長割当に関しては FF 方式を用いる。

具体的な波長割当アルゴリズムは以下になる。

step1: 現在使用されている波長のうち、最も大きい波長の番号を m とする。

step2: 波長 λ_0 から波長 λ_{m+1} に対して以下の手順を行う。

step2.1: 波長 λ_n を対象となるパスに割当可能か調べる。

step2.2: 波長 λ_n が割当可能な場合、新たに割当られる波長数 new を数える。

step2.3: 波長 λ_n のコスト $C_n = new$ とする。割当不可能な場合、 $C_n = -1$ とする。

step3: コスト $C \geq 0$ となる波長のうち、最もコスト C が小さい波長を λ_{min} とする。ただし、同一コストになる波長が複数ある場合は番号の小さい波長を λ_{min} とする。

step4: 対象パスに波長 λ_{min} を割り当てる。

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

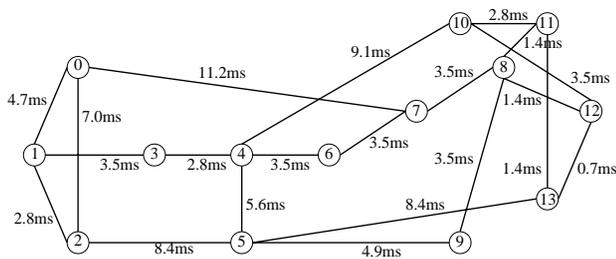


図 5: NSFNET モデル

ネットワークモデルには、図5に示す14ノードNSFNETを用いる。トラフィックマトリクスとして、文献[8]に示されているものを用いる。ただし、文献[8]のトラフィックマトリクスは相対的な値であり、本稿では文献[8]で与えられているトラフィック量の単位をGbpsとして考える。また、各光パスの伝送容量は10Gbpsとし、トラフィック量が10Gbps以上の場合には同一経路を通る複数本の光パスを設定するものとする。

以下ではまず、各トラフィックごとのQoPが論理トポロジーに与える影響を明らかにする。その上で、3章で述べた2つの論理トポロジー設計アルゴリズムによる論理トポロジーを比較し、その有効性について議論する。

4.2 評価結果

まず、 D_{min} , D_{scale} , D_{node} , D_{conf} について、それぞれ $D_{min} = 10ms$, $D_{scale} = 2ms$, $D_{node} = 1ms$, $D_{conf} = 0ms$ と仮定する。図6は、各トラフィックのQoPをすべて同じ値とした場合の、要求QoPとアルゴリズム1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。また、図7はそのときのQoPとブロッキング発生件数の関係を示したものである。図6より、トラフィックが要求するQoPが低くなるほど必要波長数が小さくなるが、ある値以下になると必要波長数の減少が止まる。ただし、QoPが高い場合には使用波長数が単調減少を示していない。これは図7に示されるように高いQoPをすべてのトラフィックが要求する場合、ブロッキングが発生する確率が高くなり、結果として設定されるプロテクションパスの数が少なくなるためである。

次に、ネットワークに対するトラフィック量と2つのアルゴリズムによって設計される論理トポロジーの必要波長数

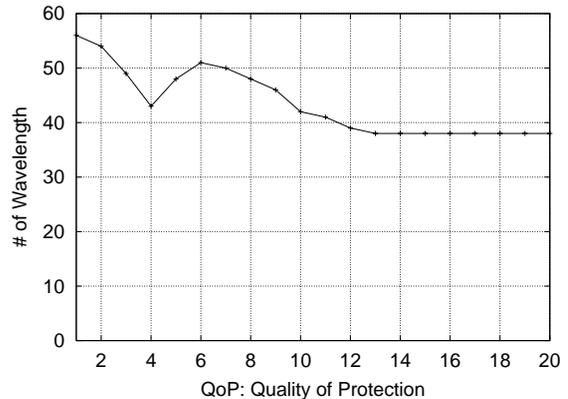


図 6: QoP に対する使用波長数の推移

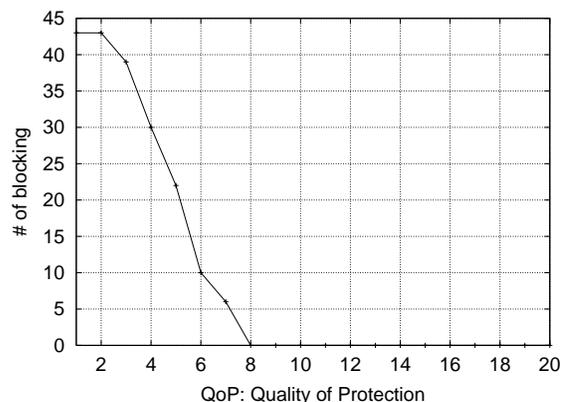


図 7: ブロッキング発生件数

の関係を図8に示す。各トラフィックのQoPはランダムに与えている。また、図の横軸はトラフィック係数 α を意味しており、数値例では、本稿で用いているトラフィックマトリクスの各要素を α 倍したものをトラフィック要求量として与えている。図より、アルゴリズム2がアルゴリズム

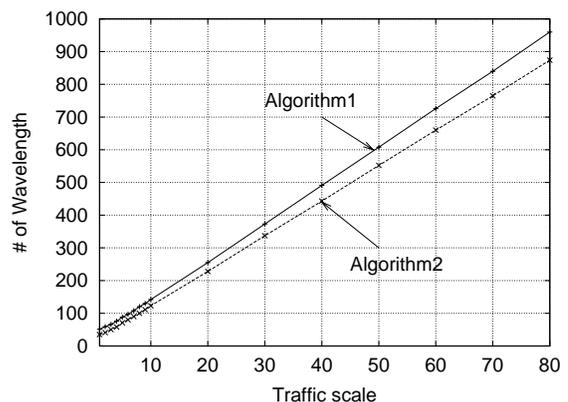


図 8: トラフィック量に対する使用波長数の推移

1 よりも使用波長数を低く抑えられていることがわかる。これは、アルゴリズム 2 がアルゴリズム 1 と比較して、1 つの波長を複数のプロテクションパスがより多く共有することによって、使用する波長数を抑制できているからである。

5 まとめ

本稿では、WDM ネットワークに適した QoS 機構として、障害からの回復時間を考慮した QoP の提案を行った。その上で、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備えた論理トポロジ-を、使用波長数の最小化を目的として設計するための 2 つのアルゴリズムの提案を行った。数値例を通して、トラフィックの要求する QoP と、それを満たす論理トポロジ-の使用波長数の関係を示し、QoP が高くなるにつれ、使用波長数も大きくなることを示した。また、トラフィックの要求する QoP をランダムとした場合の数値例によって、提案アルゴリズム 2 がアルゴリズム 1 よりも使用波長数を小さくできることを示した。

ただし、提案したアルゴリズムでは、高い QoP の場合にはその QoP を満たすプロテクションパスを設定できない場合もある。その場合、QoP の制限を緩くすればパス設定は可能になる。この点を含めた評価が今後の課題である。また、その他の課題として、使用波長数をより小さく抑える論理トポロジ-設計アルゴリズムや、上位層を IP とした場合に IP の経路制御機能（リストレ-ション機能）も考慮した論理トポロジ-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] 島野勝弘, 長津尚永, 岡本聡, “光監視制御チャンネル上の制御網を用いた光パス高速リストレ-ション方式,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 100, pp. 121–124, September 2000.
- [2] M. Kodialam and T.V.Lakshman, “Dynamic routing of locally restorable bandwidth guaranteed tunnels using aggregated link usage information,” *INFOCOM2000*, vol. 2, pp. 902–911, March 2000.
- [3] O. Gerstel and G. Sasaki, “Quality of protection (qop): A quantitative unifying paradigm to protection service grades,” *Opticom 2001*, April 2001.
- [4] P.-H. Ho and H.T.Mouftah, “A framework of a survivable optical internet using short leap shared protection (slsp),” *2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, May 2001.
- [5] A.Banerjee, J.Drake, J.P.Lang, B.turner, K.Kompella, and Y.Rekhter, “Generalized multiprotocol label switching: An overview of routing and management enhancements,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 144–149, January 2001.
- [6] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, “Survivable wdm mesh networks, part i – protection,” *INFOCOM '99*, pp. 744–751, March 1999.
- [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.