

IP over WDMにおけるネットワーク設計手法と機能分担

荒川伸一 村田 正幸 宮原 秀夫

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,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 現在、インターネットにおける信頼性の確保は、IP レベルにおける経路制御で行われているが、WDM におけるプロテクションを用いれば、その信頼性は飛躍的に増加すると期待できる。しかし、WDM の上位層として IP を考えた場合、まず、IP ネットワークにおける経路制御の特徴を前提として WDM パスネットワークを構築する必要がある。本稿では、インターネットの IP レベルでの経路制御の特徴を損なうことなく、WDM ネットワークを構築するためのネットワーク設計手法を提案する。

キーワード フォトニックネットワーク、IP over WDM、最適化問題、波長分割多重、プロテクション、ネットワーク設計

Design of Lightpath Networks with Protections for IP over WDM Networks

Shin'ichi ARAKAWA Masayuki MURATA Hideo MIYAHARA

Graduate School of Engineering Science,
Osaka University,
Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
{arakawa,murata,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract Conventional IP (Internet Protocol) is provided its reliability (i.e., robustness against the link/node failures) by a routing protocol. If we can utilize protection methods of WDM networks, we can expect much more reliable networks. However, for IP over WDM networks, we need to build the WDM path networks by carefully taking account of the properties of IP routing mechanisms. In this paper, we formulate the optimality problem for designing IP over WDM networks with protection functionalities, by which we can offer the IP over WDM networks with high reliability.

Key Words Photonic Network, IP over WDM, Optimization Problem, Wavelength Division Multiplexing, Protection, Network Design

1 はじめに

近年のインターネットトラフィックの増大により、基幹ネットワークにおける大容量化が求められている。WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術は、1 波長当たり 2~10Gbps のチャネルを、20~100 波長多重することで大容量化を実現する技術であり、次世代の基幹ネットワークとして有望視されている。しかし、現状の IP over WDM 技術では、ルータ間のポイントポイント間通信に WDM 技術を利用することで通信回線の大容量化を図っている。この場合、ルータにおける電気処理がボトルネックとなる可能性は大きい。

WDM の利用形態についてはさまざまな議論があるが (例えば、[1] 参照)、有力なものとして、WDM 技術を用いて物理ネットワークを構築し、その上で IP を用いる方式が考えられている。この場合、WDM ネットワークはネットワーク上では、複数のホップにまたがって同一波長を割り当てることによってライトパスを設定し (図 1)、その結果、ライトパスの途中 WDM ノード上では電気処理による経路制御が不要となる [2]。

WDM ネットワーク内において、すべてのエンドノード間にライトパスを設定することができれば、WDM ネットワーク内部では電気処理はまったく不要となり、波長をラベルと見れば、WDM ネットワークをひとつの MPLS (Multiprotocol Label Switching) ネットワークとみることもできる。しかし、そのようなトポロジーを形成するためには数多くの波長が必要となる [3]。一方、WDM ネットワーク内部においてもライトパスの終端を許すとすれば、ルータ上での電気処理による経路制御が一部必要になる。しかし、IP はライトパスによって構築された論理トポロジー上で本来のプロトコル処理 (経路制御など) を行えばよいので、IP の変更はまったく必要ないという利点は残される。

物理 WDM ネットワーク上で論理トポロジーを構築する手法については、いくつかの研究がある [2, 4]。例えば、文献 [2] では、論理トポロジー設計に関する最適化問題の線形計画問題としての定式化が示されている。しかし、ここでの定式化では波長数の制限は考慮されていない。また、文献 [2] の解法は、論理トポロジー設計問題を分割しており、波長数に制限を加えないという仮定のもとで、この最適化問題を解いている。一方、文献 [4] では、波長数による制約条件を付加した定式化を行っている。ただし、これまでの研究では、その目的関数の設定においては、文献 [4] も含めて、必ずしも IP を考慮した定式化にはなっていないのが現状である。

また、WDM 技術を用いることによって、障害時に代替経路に高速に切替えるプロテクション技術を用いれば、耐故障性の強いネットワークを構築することが可能になる (例えば、文献 [5])。しかし、IP においてはその経路制御によって信頼性が確保されているため、必ずしも WDM

ネットワーク上でプロテクションを完全に行う必要はない。本稿では、そのような議論を行うために、WDM プロテクションを考慮した論理トポロジーの設計化手法を提案する。

以下に、本稿の構成を示す。まず 2 章において、本稿で扱う 2 種類のプロテクションの方式を述べる。次に 3 章で物理トポロジー上に論理トポロジーを構成する最適化問題の定式化を行う。4 章では、与えられた論理トポロジーに対して、障害時の代替パスを準備するプロテクション方式を考慮した定式化を行う。5 章では、定式化した最適化問題に対する数値例を示す。最後に、6 章では、結論及び今後の課題を述べる。

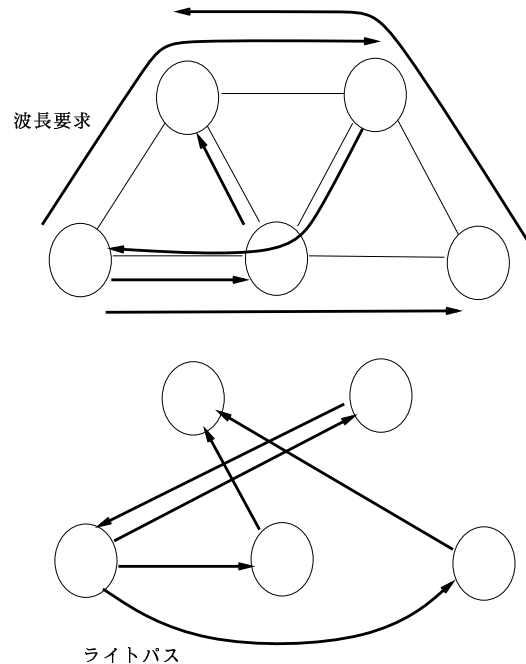


図 1: 物理トポロジー上の論理トポロジー。

2 WDM プロテクション方式

WDM 技術を利用したプロテクション方式には、各ライトパスに 1 対 1 対応するバックアップライトパスを定める 1 対 1 (Dedicated Backup) プロテクション方式、及び、複数のライトパスが一本のバックアップライトパスを共有する多対 1 (Shared Backup) プロテクション方式がある [5]。1 対 1 プロテクション方式では、プライマリパスに対してバックアップパスは 1 対 1 対応にするため、複数のプライマリパスで同時に障害が発生した場合にもトラフィックを収容することが可能である。しかし、多対 1 プロテクション方式に比べて波長数をより多く必要とするのは明らかである。特に IP への適用を考えた場合、IP の経路制御による耐故障性があるので、WDM プロテクション方式としては多対 1 プロテクション方式で十分であると考えられる。

さらに、それぞれのプロテクション方式に対して、以下の 2 方式がある。

1. リンクプロテクション方式

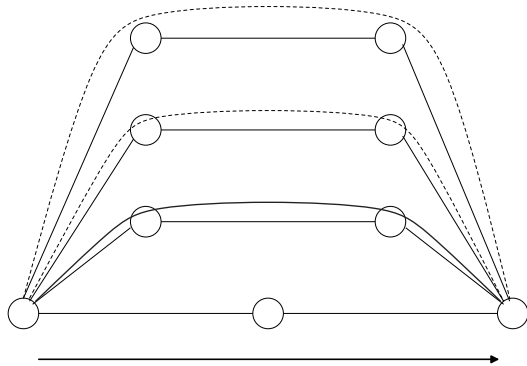
リンク毎にバックアップ経路を用意し、リンク故障に対応可能とする。図 3(a) は、リンクプロテクションの例である。リンク E12 に対して、バックアップ経路 E14 及び E24 を用意する。また、リンク E23 に対しては、バックアップ経路 E25、E35 を用意する方式である。このリンクプロテクションでは、リンク E12、E23 の障害時には、トラフィックをそれぞれ、E14→E24、E25→E35 に流すようにする。

2. ノードプロテクション方式

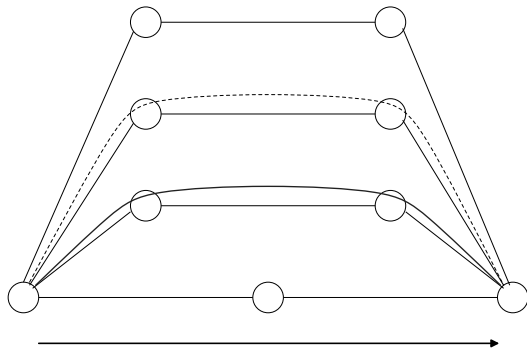
エンドノード間のパスに対してバックアップ経路を用意することによって、リンク故障だけでなく、ノード故障にも対応可能とする。図 3(b) はノードプロテクションの例である。送受信ノード s, d 間でリンク、および、ノードを共有しないようにバックアップ経路を定める。リンクプロテクションではリンク E12 及び E23 に対する耐故障性を持つのにに対して、ノードプロテクションではリンク E12、E23 に加え、ノード N2 の故障にも対処できるようになる。

3 論理トポロジー構成のための定式化

本章では WDM ネットワークにおいて、光パスによって論理トポロジーを構成するための最適化問題を定式化する。本稿では上位層として IP を考慮するため、目的関数はネットワークにおける平均遅延時間の最小化を考える。ただし、平均遅延時間はライトパスにおける伝搬遅延時間とノードにおける待ち時間の和である。ノードにおける待ち時間の導出には、M/M/1 待ち行列システムの結果を用

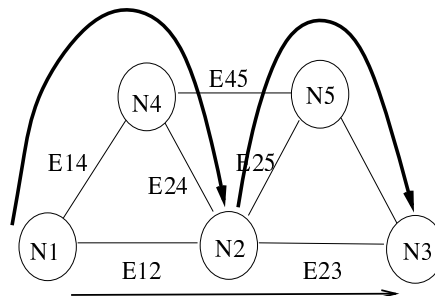


(a) 1 対 1 プロテクション (Dedicated Protection) 方式



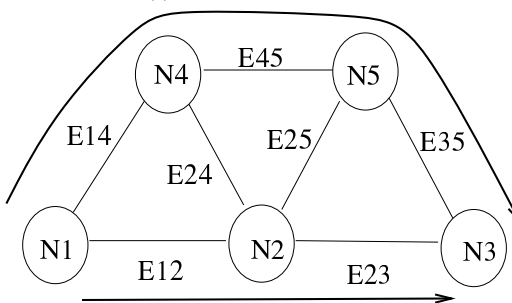
(b) 多対 1 プロテクション (Shared Protection) 方式

図 2: プロテクション方式。矢印はプライマリとバックアップの関係を表す。



E35

(a) リンクプロテクション



(b) ノードプロテクション

図 3: WDM におけるプロテクション方式

いる。

なお、定式化にあたり、以下の記号を統一して用いる。

s, d : トラフィック転送要求を行う送信元/送信先ノードのラベル

i, j : 論理トポロジー上のノードのラベル

n, m : 物理トポロジー上のノードのラベル

まず、与条件を示す。

N : ネットワークにおけるノード数

W : 各ファイバにおける波長数

C : 1 波長当たりの容量

λ_{sd} : 送信ノード s から受信ノード d へのトラフィック要求レート

P_{mn} : ネットワークトポロジーを表す。ノード m と n の間にファイバが施設されている場合 $P_{mn} = 1$ 、そうでなければ 0

d_{nm} : ノード m と n の間の伝搬遅延時間

次に、本稿で用いる変数を導入する。

V_{ij} : ノード i から j に対して設定されているライトパスの本数

$p_{mn}^{ij,k}$: ノード i から j に対して設定されているライトパスにおいて、ノード m, n 間の波長 k を使用する時 1。その他の場合は 0

λ_{ij}^{sd} : ノード s から d に対して設定されている経路において、ノード i, j 間のライトパスを流れるトラフィック量

以上の記号を用いて、最適化問題は以下のように定式化できる。

目的関数 ライトパスにおける伝搬遅延時間とノードにお

ける待ち時間の和を、トラヒック転送要求レートで重み付けし、すべてのノード間での総和を最小化する。

$$\min \sum_{ij} \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \left(\sum_{mn} (\max_{k \in W} p_{mn}^{ij,k}) * d_{ij} + \frac{1}{C - \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd}} \right) \quad (1)$$

制約条件

以下、制約条件を示す。

1. 論理トポロジー上のノード i, j 間に設定されるライトパスの数はファイバにおいて利用可能な波長数 W を越えられない。すなわち、

$$V_{ij} + V_{ji} \leq W \quad (2)$$

2. 論理トポロジー上の波長割当に関して、ノード i を始点、ノード j を終点とするライトパスの数は、 i, j 間のライトパスの本数、すなわち V_{ij} に等しい。

$$\sum_k \sum_n p_{in}^{ij,k} = V_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_m p_{mj}^{ij,k} = V_{ij} \quad (4)$$

3. ライトパス上の波長は同一であるため、

$$\sum_m p_{mx}^{ij,x} = \sum_n p_{xn}^{ij,x} \quad \text{if } x \neq i, j \quad (5)$$

4. 論理トポロジー上のノード s 、ノード d をそれぞれ、始点、終点とするトラヒック量は λ_{sd} に等しい。

$$\sum_j \lambda_{sj}^{sd} = \lambda_{sd} \quad (6)$$

$$\sum_i \lambda_{id}^{sd} = \lambda_{sd} \quad (7)$$

5. 複数のライトパスを経由する場合、その経由ノードにおけるトラヒック量は保存される。従って、

$$\sum_i \lambda_{ik}^{sd} = \sum_j \lambda_{kj}^{sd} \quad \text{if } x \neq s, d \quad (8)$$

6. ノード i, j 間に流れるトラヒック量は、ノード i, j 間で収容できる回線容量以下でなければならない。すなわち、

$$\sum_{s,d} \lambda_{ij}^{sd} \leq V_{ij} * C \quad (9)$$

7. ノード i からノード j に対して設定されているライトパスにおいて、ノード m, n 間の波長 k を使用可能なのは高々ファイバの本数である。すなわち、

$$\sum_{ij} p_{mn}^{ij,k} \leq P_{mn} \quad (10)$$

4 プロテクション方式を考慮した定式化

4.1 リンクプロテクションの場合

まず、与条件は以下ようになる。

N : ネットワークのノード数

W : ファイバ当たりの波長数

P : 物理トポロジー

V : 論理トポロジー

λ_{sd} : ノード s から d へのトラヒック要求量

R_{sd} : ノード s から d への経路。物理経路の集合で与えられる。

A_{nm} : ノード n から m への迂回経路。物理経路の集合で与えられる。

また、最適化問題の定式化のために次の変数を導入する。

w_{nm} : ノード n, m 間におけるプライマリとして波長割当されているライトパスのトラヒック量

b_{nm} : ノード n, m 間におけるバックアップとして波長割当されているライトパスのトラヒック量

o_{nm}^w : プライマリとして波長割当されているライトパスの物理経路 nm において、波長 w を用いる場合のトラヒック量を o_{nm}^w とする。

m_{nm}^w : バックアップとして波長割当されているライトパスの物理経路 nm において、波長 w を用いる場合のトラヒック量を m_{nm}^w とする。

$f_{nm}^{sd,w}$: 送受信ノード s, d 間の波長割当がなされているライトパス経路 mn において、波長 w がプライマリとして用いている場合のトラヒック量を $f_{nm}^{sd,w}$ とする。

$g_{nm}^{sd,w}$: 送受信ノード s, d 間において、波長割当されているライトパスの物理経路 mn において、波長 w がバックアップとして用いられている場合のトラヒック量を $g_{nm}^{sd,w}$ とする。

$flow_{ij}^{pq,w}$: 物理経路 ij に故障が発生した場合に、物理経路 pq の波長 w を使用するトラヒック量

$flow_n^{pq,w}$: 物理ノード n に故障が発生した場合に、物理経路 pq の波長 w を使用するトラヒック量

これらの変数は全て非整数値である。定式化において、整数値の場合があるが、紙面の都合上、変数の前に I をつける。また、整数値として、非整数値を切り上げた値を扱う。例えば、 $w_j = 0.4$ の場合、 $Iw_j = 1.0$ とする。

以上の記号を用いて、リンクプロテクションを考慮した場合の最適化問題は以下のように定式化できる。

目的関数 使用波長数を最小化する。すなわち、

$$\min \sum_{mn} (Iw_{mn} + Ib_{mn}) \quad (11)$$

制約条件

1. ノード m とノード n 間のファイバにおいて、プライマリパスに用いられる波長とバックアップパスに用いられる波長の和はファイバにおいて利用可能な

波長数 W 以下でなければならない。すなわち、

$$Iw_{mn} + Iw_{nm} + Ib_{mn} + Ib_{nm} \leq W \quad (12)$$

2. ノード n , m 間におけるファイバに関して、

$$w_{nm} = \sum_{w \in W} o_{nm}^w \quad (13)$$

$$b_{nm} = \sum_{w \in W} m_{nm}^w \quad (14)$$

3. プライマリもしくはバックアップのどちらか一方のみのパスがファイバにおける波長 k を占有する。すなわち、

$$Im_{nm}^k + Io_{nm}^k + Im_{mn}^k + Io_{mn}^k \leq 1 \quad (15)$$

4. プライマリパスに関して、

$$\lambda_{sd} = \sum_{k \in W} \sum_{nm \in R_{sd}: s=n} f_{nm}^{sd,w} \quad (16)$$

$$\lambda_{sd} = \sum_{k \in W} \sum_{nm \in R_{sd}: d=m} f_{nm}^{sd,w} \quad (17)$$

$$\sum_{nt \in R_{sd}} f_{nk}^{sd,k} = \sum_{tm \in R_{sd}} f_{tm}^{sd,k} \quad (18)$$

5. バックアップパスに関して、物理経路、 nm が故障した場合、ノード n から迂回するトラフィック量は、 nm を流れていたトラフィック量と等しくなる。

$$\sum_{sd} \sum_{k \in W} f_{nm}^{sd,k} = \sum_{nt \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{nt}^{sd,w} \quad (19)$$

$$\sum_{sd} \sum_{k \in W} f_{nm}^{sd,k} = \sum_{tm \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{tm}^{sd,w} \quad (20)$$

$$\sum_{pt \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{pt}^{sd,k} = \sum_{tq \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{tq}^{sd,k} \quad (21)$$

6. 迂回経路において、経由ノードにおけるトラフィック量は保存されるので、

$$\sum_{pt \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{pt}^{sd,k} = \sum_{tq \in A_{nm}} \sum_{sd} \sum_{k \in W} g_{tq}^{sd,k} \quad (22)$$

7. 定義より、

$$o_{nm}^k = \sum_{sd: nm \in R_{sd}} f_{nm}^{sd,k} \quad (23)$$

$$m_{nm} = \sum_{sd: nm \in R_{sd}} g_{nm}^{sd,k} \quad (24)$$

8. 物理経路 ij で障害が発生した場合に、別の物理経路 pq に迂回するトラフィック量は以下の式で与えられる。

$$flow_{ij}^{pq,k} = \sum_{sd: ij \in R_{sd}, pq \in A_{ij}} g_{nm}^{sd,k} \quad (25)$$

9. 障害が発生した場合もトラフィックは収容可能でな

ければならないので、

$$C \geq flow_{ij}^{pq,k} \quad (26)$$

4.2 ノードプロテクションの場合

ノードプロテクションの場合、迂回経路は各ノードペアに対して与えられる。そのために、以下の記号を新たに導入する。

B_{sd} : ノード s からノード d への迂回経路。物理経路の集合で表す。

$g_{nm}^{sd,w}$: 送受信ノード s , d 間において、波長割当されているライトパスの物理経路 mn において、波長 w がバックアップとして用いられている場合のトラフィック量を $g_{nm}^{sd,w}$ とする。

また、式 (19)、(20)、(21)、(25)) を以下の式にそれぞれ置き換える。

- sd 間のトラフィックは、故障が起こった時に迂回するトラフィックに等しく、また、経由ノードでもにおけるトラフィック量も保持される。

$$\lambda_{sd} = \sum_{k \in W} \sum_{nm \in B_{sd}: s=n} g_{nm}^{sd,w} \quad (27)$$

$$\lambda_{sd} = \sum_{k \in W} \sum_{nm \in B_{sd}: d=m} g_{nm}^{sd,w} \quad (28)$$

$$\sum_{k \in W} \sum_{nt \in B_{sd}} g_{nk}^{sd,k} = \sum_{k \in W} \sum_{tm \in B_{sd}} g_{tm}^{sd,k} \quad (29)$$

$$flow_{ij}^{pq,k} = \sum_{sd: ij \in R_{sd}, pq \in B_{sd}} g_{nm}^{sd,k} \quad (30)$$

さらにノードプロテクションの場合、ノード故障を想定する必要がある。新たに

- $Nflow_n^{pq,k}$: ノード n において故障が起きた場合、そのバックアップとして物理経路、 pq の波長、 k が利用される場合のトラフィック量を導入する。

- 送受信ペア、 s, d が与えられた時、その経由、もしくは、ライトパス中のノード n ($n \neq s, d$) において故障が発生する場合、

$$Nflow_n^{pq,k} = \sum_{t \in N: t < n} \sum_{tn \in R_{sd}} \sum_{pq \in B_{sd}} f_{pq}^{sd,k}$$

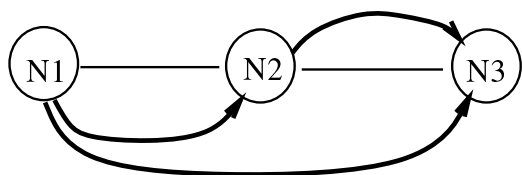
- トラフィックは収容可能であるためには、

$$C \geq Nflow_n^{pq,k} \quad (31)$$

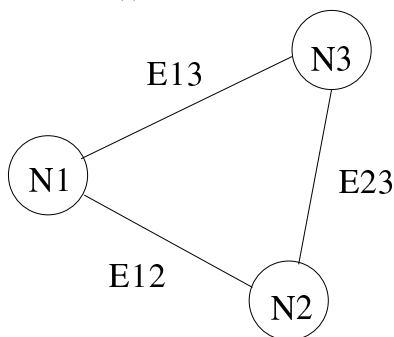
となる。

5 数値例

本節では、3章及び4章で定式化した最適化問題を解き、数値比較を行う。



(a) 物理トポロジー



(b) 波長割当結果

図 4: 論理トポロジー問題への入力、及び波長割当結果：3 ノードタンデムネットワーク

5.1 論理トポロジーの構成

3章で定式化した論理トポロジー設計問題は、式 (1) 及び、式 (9) により、非線形整数計画法に分類される。非線形整数計画法は、メタヒューリスティックな手法を利用して解を求めることが多い。本稿では、そのような手法の一つの SA (Simulated Annealing) 法を用いて解を求める。SA 法は、局所探索法と異なり、極小値から脱出し、最適値を求めるを可能にした探索法である [6]。しかし、この手法は、シミュレーション時間が多くかかるという難点を持つ。本稿では、3 ノードタンデム及びファイバにおける波長数を 2 とした時の、波長割当結果を図 4(b) に示す。

5.2 プロテクション方式の影響

本節では物理トポロジーは図 5 で与えられるような、5 ノードのネットワークとする。ファイバにおける波長数は 3 とし、ファイバの容量 C は 1 とする。

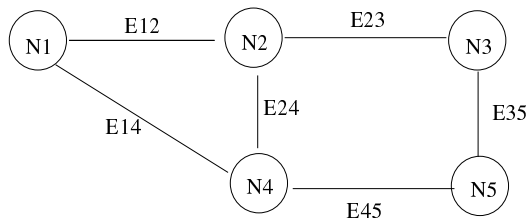


図 5: 物理トポロジー

次に 4 章で示したプロテクションの定式化に対する数値例を示す。定式化された最適化問題は整数計画法に分類されるものであり、その解は CPLEX6.5 を用いて求めた。トラフィックマトリックス及びバックアップ経路は表 ?? で定めるものとする。波長割当の結果を表 1 に示す。

プライマリ経路	トラフィック要求	経路集合
N2 → N5	0.4	(E23, λ_1)
	0.4	(E25, λ_1)
N2 → N1	0.4	(E12, λ_1)

表 1: ノードプロテクションの結果

プライマリ経路	バックアップ経路
N2 → N5	(E24, λ_2)
	(E45, λ_1)
N2 → N1	(E24, λ_2)
	(E14, λ_1)

表 2: ノードプロテクションの結果

6 まとめ

本稿では IP over WDM ネットワークにおける論理トポロジー設計、及び、耐故障性に関する機能分担に対する最適化問題を定式化した。

しかし、プロテクション機能の定式化においては、迂回経路をあらかじめ与えられるものとして数値を求めた。今後は、経路設定に関しても設計問題として採り入れていく必要がある。また、非線形整数計画問題の解法については、ヒューリスティックな解法による高速化が必要である。

参考文献

- [1] J. Anderson, H. S. Manchester, A. Rodriguez-Moral, and M. Veeraraghavan, "Protocols and architectures for IP optical networking," *Bell Labs Technical Journal*, pp. 105–124, January–March 1999.
- [2] S. Biswanath Mukherjee, Dhritiman Banerjee and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, pp. 684–695, OCTOBER 1996.
- [3] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, p. October, 489–500 1995.
- [4] R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers," *IEEE INFOCOM*, pp. 919–927, 1998.
- [5] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks, part i – protection,"
- [6] C. S. E. Projec, "Mathematical optimization," available at <http://csep1.phy.ornl.gov/mo/mo.html>.