

波長変換に制限のある光交換ネットワークの性能評価

——リンクに複数のファイバがある場合——

宮本健太郎^{†*a)} 原井 洋明^{†**} 村田 正幸[†] 宮原 秀夫[†]

Performance Evaluation of All-Optical Network with Limited-Range Wavelength Conversion —— Case of Multiple Fibers on the Link ——

Kentaro MIYAMOTO^{†*a)}, Hiroaki HARAI^{†**}, Masayuki MURATA[†], and Hideo MIYAHARA[†]

あらまし 光交換ネットワークでは、波長変換を行うことができれば、ネットワーク性能は確実に向上する。しかしながら、現状の波長変換技術では完全に波長変換を行うことは難しい。各リンクの光ファイバを複数にすれば、性能はそれだけ向上するが、ネットワークコストの増大は避けられない。本論文では、波長変換に制限があるネットワークにおいてリンクにファイバが複数ある場合のルーチング/波長割当問題を簡潔に記述できるような階層グラフを提案し、階層グラフを用いてルーチング/波長割当てのためのアルゴリズムを提案している。更に、シミュレーションにより、波長変換と複数ファイバの効果について検討し、コスト面からもその性能について検討を行う。

キーワード 波長変換, 複数ファイバ, 階層グラフ, ルーチング/波長割当て, コスト問題, シミュレーション

1. ま え が き

情報のマルチメディア化/大容量化に伴う高速広帯域ネットワーク実現の期待が光交換に向けられている。光交換ネットワークの通信方式として回線交換サービスを提供するネットワークアーキテクチャが考えられている [1]~[9]。このようなアーキテクチャでは、波長変換を行わない場合、ネットワーク内ノードは図 1 に示される構成となる。入力された光信号を別々の波長に分離し、それぞれの波長に対して交換を行った後、再び波長を多重して出力する。一方、波長変換が許される場合には、図 2 に示される構成となる。光信号を各波長に分離後、波長変換処理を施して再び波長を多重する。この波長変換機能によって性能向上は確実に見込めるが [1]~[4]、現状では光・電気変換を行わずネットワーク内で使用できるすべての波長へ変換する

ことは難しい [1], [8]。交換ノードで光信号の波長変換が許されない場合は、コネクションを設定する際に経路の各リンクで同一の波長を用いなければならず、リンクの使用効率が低下する。しかし最近、波長変換技術の発達により、限られた範囲ながら光の領域内での波長変換が可能になりつつある。変換された光信号の減衰、低 S/N 比などの原因による信号の誤りを回避するために、波長変換に制限を設ける必要はあるが、変換可能な範囲は次第に広がりつつある [10]。この技術によって、わずかでも波長変換が許されれば、波長変換が許されない場合と比較して性能が確実に改善されることが既に示されている [1], [9]。

ネットワーク性能向上の手段としては、波長変換のみならず、各リンクを構成する光ファイバを複数にする方法も考えられる [2], [3]。ファイバ数を増やすと、1リンクにファイバと同数の同一波長が存在するので、同一波長のうち 1 本空き波長があればコネクション接続ができ、リンクの使用効率の改善が期待できる。更に、送受信端末間で設定しうる最大コネクション数もそれだけ増加する。

先述のように、文献 [9] では波長変換に制限のあるネットワークの性能評価が行われ、文献 [2], [3] におい

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理系専攻, 豊中市
Department of Informatics and Mathematical Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka-shi, 560-8531 Japan

* 現在, 日本アイ・ピー・エム

** 現在, 郵政省通信総合研究所

a) E-mail: kmiyamo@jp.ibm.com

では複数ファイバネットワークにおける評価が行われている。しかし、これらの組み合わせられたネットワークは評価の対象とされていない。そこで本論文では、複数ファイバを有するネットワークの性能改善のためのルーチング/波長割当アルゴリズムを示し、波長変換と複数ファイバの効果を検討する。そのアルゴリズムを記述するために階層グラフ [5] を導入する。完全な波長変換ができない光交換ネットワークでは、送受信端末間にコネクション接続の可否を判断するとき、先述のように波長に関する制約を満たす必要があり、ルーチング/波長割当アルゴリズムを記述するのが難しくなる。文献 [5] では、1 リンクを波長数に相当する辺に分解して波長ごとに個別のネットワークを形成する階層グラフが提案されているが、波長変換の許されるネットワークを表現するために、それを用いることは不相当である。文献 [6] では、この階層グラフを波長変換（あるいは、制限のある波長変換）を許すネットワークに拡張しているが、本論文では更にリンク上にファイバが複数ある場合に拡張する。この階層グラフを用いることによって、ルーチング/波長割当アルゴリズムを簡潔に表現できるようになる。

本論文の構成を以下に示す。まず 2. で、波長変換

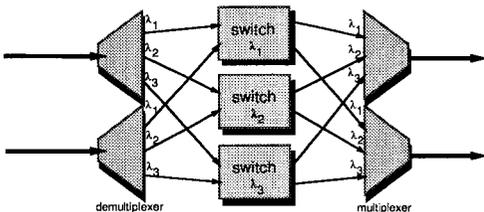


図 1 波長変換を行わないノードの構成
Fig. 1 Node structure with no wavelength conversion.

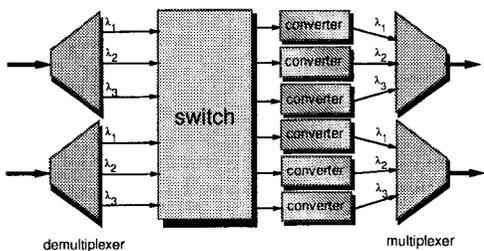


図 2 波長変換を行うノードの構成
Fig. 2 Node structure with wavelength conversion.

に制限のある光交換ネットワークにおいて、リンクにファイバが複数ある場合を対象とした階層グラフについて述べ、3. で階層グラフを用いてルーチング/波長割当てのためのアルゴリズムを述べる。4. では、3. で示したルーチング/波長割当てにおいて波長変換と複数ファイバの効果について、複数のネットワークモデルを用いて検討する。ここでは、コスト面からの考察も与える。最後に 5. で、まとめと今後の課題を述べる。

2. 階層グラフの導入

光交換ネットワークにおいて送受信端末間にコネクションを接続するためには、隣接するリンクで同一の（波長変換が行われる場合、定められた範囲内の）波長を用いるという制約を考慮しなければならない。例えば、図 3 のようなネットワークが与えられた場合、図 4 のように一つのリンクを波長数に相当する辺に分解して、波長ごとにネットワークを構成する階層グラフを導入することにより、上述の制約を取り除くこ

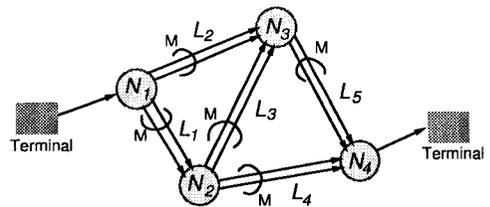


図 3 オリジナルネットワーク
Fig. 3 Original network.

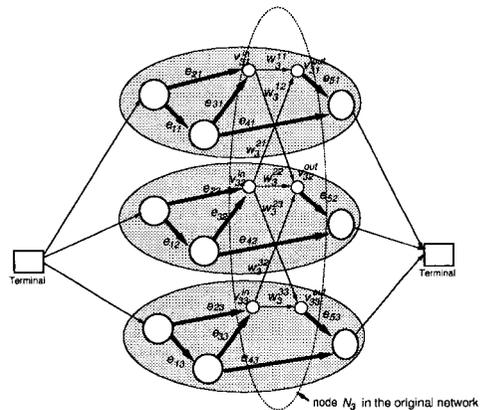


図 4 図 3 に相当する階層グラフ
Fig. 4 Layered graph corresponding to Fig. 3.

とができる（詳細については後述）．その結果，光交換ネットワークにおけるルーチングは一般の回線交換ネットワークのルーチングと同じようにみなせる．更に，もとのネットワークでは表現できない波長割当問題も容易に扱えるようになり，その結果コネクション接続の可否判断が容易になる．また，階層グラフを用いれば，送受信端末間のパス（各リンクでコネクション接続に使用する波長の集合）の発見や，順序づけも行える．以降では，もとのネットワークモデルの送受信端末間を接続するリンク集合を“経路”，階層グラフの送受信間を接続する辺（波長）の集合を“パス”と表す．同様にしてリンクと辺を区別する．

まず，もとのネットワークの表現に用いる記号を以下に示す（図 3 参照）．

（１）ネットワークは I 個のノードと J 本の有向リンクからなる．ノード集合，リンク集合をそれぞれ， $\{N_1, N_2, \dots, N_I\}$ ， $\{L_1, L_2, \dots, L_J\}$ と表す．

（２）すべてのリンクにおいてファイバ数は同数で，各リンクは M 本のファイバをもつ．同様に，すべてのファイバにおける波長数は等しく各ファイバは W 本の波長をもつ．波長は短い順に並べ，その集合を $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W\}$ と表す．

（３）波長変換が許される場合，変換をできるしきい値を θ とする．すなわち，波長 λ_k で入力された光信号は， $\lambda_{\max(k-\theta, 1)}$ から $\lambda_{\min(k+\theta, W)}$ までのいずれかの波長が空いているとき，その波長に変換され出力される．特に，すべての波長に変換可能な場合 $\theta = W - 1$ であり， $\theta = 0$ ならば波長変換が許されないことを示す．

次に，上述のネットワークを相当する階層グラフで表す．図 4 ではノード N_3 に相当する部分のみを詳細に記述した．グラフの各層は 2 ファイバによって構成されるサブネットワークに相当し，層の数が波長数に相当する．波長変換が許されない場合（ $\theta = 0$ ），送受信端末間を結ぶパスはすべて同一の波長を使用することになる．したがって，波長変換が許されない場合に同一の波長を利用しなければならないという制約を階層グラフ上で考慮する必要はなく，コネクション接続は回線交換と同様，使用されていないファイバが各辺に 1 本あれば接続できることになる．一方，波長変換を表現する場合，もとのネットワークにおける各交換ノードを入力ノードと出力ノードに分解し各層に配置する．異層間の入力ノードと出力ノードを結ぶ辺は，波長変換が許されることを示す．すなわち，図 4 は

ノード N_3 において $\theta = 1$ の制限がある波長変換が行われ，その他のノードでは波長変換が行われないネットワークを表すグラフになる．また，完全な波長変換ができる場合（ $\theta = W - 1$ ），一つの入力ノードはすべての出力ノードと接続されることになる．なお，ここでは先述のようにすべてのリンクにおいてファイバ数，波長数は同数であるとしているが，一般化は可能である．

以下に，階層グラフ表記のための記号を導入する．

（１）階層グラフは W 層からなる．第 k 層は k 番目の波長（ λ_k ）に相当する．

（２）有向リンク L_j は W 本の辺に分解され，これらの辺は $e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jW}$ と表される．また，ノード間を結ぶ辺は，ファイバ数に等しい M 回線からなる．

（３）ノード N_i は W 個の入力ノード， W 個の出力ノードに分解される．これらは $v_{i1}^{\text{in}}, \dots, v_{iW}^{\text{in}}$ ，及び $v_{i1}^{\text{out}}, \dots, v_{iW}^{\text{out}}$ と表される．

（４）波長 λ_k から λ_l への変換がノード N_i で許されるならば， N_i における第 k 層の入力ノードと第 l 層の出力ノードを接続する有向辺 w_i^{kl} が存在する．

この階層グラフを用いると，送受信端末間に存在する複数のパスの割当順序を与えることができる．例として，波長変換が許されないネットワークにおける first-fit 方式（常に最短の波長からコネクション接続の可否判断を行う方式）のためのパスの発見を考える．まず最初に第 1 層に着目し，すべての辺に等しいコストを与え，Shortest Forward Path Tree Algorithm [11] 等を利用して最短パスを発見する．この際，入力/出力ノード間を接続する辺のコストは 0 と仮定する．第 1 層で接続可能な経路が見つからなかった場合，第 2 層以下のパスを調べる．この結果，第 1 層がまず優先され，そのなかでホップ数が短い順番にパスの順序が与えられる．その後，第 2，第 3 層の順にパスの順序が与えられる．そのほかに，波長変換による光の減衰を考慮して，送受信端末間で減衰の小さなパスから順にパスの順序を与えることもできる．このときは，入力/出力ノード間の辺に，減衰に相当するコストを与えればよい．以上の例では，送受信端末間におけるパスの順序はあらかじめ決定されているとしているが，階層グラフでは，文献 [3] のように，コネクション接続要求発生時にネットワーク全体の波長の利用状況から各辺にコストを与え，パスの順序を決定することも容易にできる．

本論文では、以上に述べたように、エンド間のパスの順序を決めるために階層グラフを導入したが、文献 [9] で示すように波長変換と波長割当てを考慮したネットワークの解析モデルとして用いることもできる。

first-fit 方式の例では、下位層に相当する波長にホップ数の短いパスがあったとしても、それよりもホップ数は長くなるが、上位層に相当する波長をもつパスが優先されるが、ホップ数の短いパスを用いた場合に性能が改善される可能性がある。次章では、階層グラフを利用してパスの割当順序を決定するアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、パスに残された利用可能な回線数とパスのホップ数、パスのコストを用いて重み付けを行い、パスの順序を決定する。

3. ルーチング/波長割当アルゴリズム

波長変換が許されないネットワークでは、送受信間端末のルーチングのみならず、複数の空き波長がある場合にどの波長を用いてコネクション接続を行うかが重要になってくる。使用できる波長のなかで常に最短の波長から割当てを行う first-fit 波長割当方式は、その性能/実装の容易性から優れた割当方式であると考えられる [7]。一方、波長変換が完全に許される場合、波長割当てが性能に与える影響はなくなるが、波長変換に制限がある場合、波長割当ての影響は依然として残る。

更に、動的ルーチングによる性能の改善も考えられる。動的ルーチングの一手法として LLR (Least Loaded Routing) があり、文献 [3] では波長変換を完全に行う/行わないネットワークにおいて、コネクション接続要求時に使用されていないファイバが最も多い波長を用いてコネクション接続を行う LLR 方式が提案されている。

階層グラフは波長ごとにネットワークを構成しているため、ルーチング/波長割当問題は、階層グラフにおけるパス割当問題とみなせる。本章では、リンクにファイバが複数あるネットワークにおいて、階層グラフを用いたパス割当アルゴリズムを述べる。それぞれの送受信端末間には、ホップ数が最短となるものから n_R 本の経路が与えられているものとし、存在するパスごとにコネクション接続可能な回線数を求め、その数とホップ数、パスのコストを用いて重み付けを行い、その結果から、コネクションを接続するパスの順番を動的に決定する方式を考える。4. では本章で提案したアルゴリズムで表すことのできる波長割当方式を用

い、波長変換と複数ファイバの導入による性能への影響を示す。

アルゴリズム表記のために以下の記号を導入する。

(1) 辺 e_{jk} のコストを $C(e_{jk})$ とし、パス P のコストを $\sum_{e_{jk} \in P} C(e_{jk})$ とする。ただし、 E はパス上

にある辺の集合である。例えば、first-fit 方式による波長の割当優先順序を表す場合、与えられた経路にリンク L_j が含まれていれば、 $C(e_{jk}) = k$ 、そうでなければ、 $C(e_{jk}) = \infty$ とする。

(2) コネクション接続要求が発生した送受信間 a に存在するパス集合を $\mathcal{P}_a = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_a}\}$ と表す。ただし、 n_a は送受信間 a のパス数を表す。 \mathcal{P}_a を求めるには、階層グラフの各辺に与えられたコストを調べ、コスト有限のパスをすべて求めればよい。 \mathcal{P}_a 中、コスト最大のパスのコストを $\max_i(c_i)$ で表す。パス集合に対応するコスト集合を $\mathcal{C}_a = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_a}\}$ で表す。

(3) パス集合 \mathcal{P}_a に対応するホップ数の集合を $\mathcal{H}_a = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_a}\}$ と表す。

(4) コネクション設定要求時において、パス P_i 上のコネクション接続可能な回線数を γ_i と表し、その集合を $\Gamma_a = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n_a}\}$ と表す。ここで、 γ_i はパス P_i 上のすべての辺の空き回線数のうち最小のものに相当する。

(5) コネクション設定要求に対するパスの順序を定めるために、各パスの接続可能な回線数 (Γ_a) とホップ数 (\mathcal{H}_a)、コスト (\mathcal{C}_a) を利用し、それらに重み付けを行う。すなわち定数 α_1 ($0 \leq \alpha_1 \leq 1$)、及び関数 σ_i を導入し、

$$\delta_i = \alpha_1 \gamma_i + (1 - \alpha_1) \sigma_i(h_i, c_i) \quad (1)$$

とする。 σ_i は、ホップ数 h_i 、コスト c_i の関数である。例えば、各パスのホップ数を考慮せず、 $\sigma_i(h_i, c_i) = \max_i(c_i) - c_i$ とすれば、 α_1 を 0 に近づけることで、コスト最小のパスから順にコネクション接続の可否判断を行う傾向が大きくなる。また、ホップ数を考慮するためには、定数 α_2 ($0 \leq \alpha_2 \leq 1$) を導入して、例えば、

$$\delta_i = \alpha_1 \gamma_i + (1 - \alpha_1) \{ (1 - \alpha_2) h_i + \alpha_2 (\max_i(c_i) - c_i) \} \quad (2)$$

とすればよい。一方、 α_1 を 1 に近づければ、回線の多く残されたパスにコネクション接続を行うことになる。

送受信端末間 a にコネクション設定要求が到着すると、ネットワークは以下の処理を行う。

(1) コネクション接続要求が発生した送受信端末間 a において、パス集合 $\mathcal{P}_a = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_a}\}$ 上のコネクション接続可能な回線数の集合 $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n_a}\}$ を求める。すべてのパスにコネクション接続可能な回線がない場合、すなわち、 $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_{n_a} = 0$ であれば、そのコネクション要求を呼損とする。

(2) すべてのパス P_i について δ_i を求め、小さい順に並べる。 δ_i が等しいときは、まず γ_i が小さいパスが優先され、その次に c_i が小さいパスが優先される。更に、 γ_i, c_i, h_i がすべて同じであれば、短い波長を多くもつパスが優先される。

δ_i の小さい順にコネクション設定の可否を調べ、設定可能であれば、パス P_i にコネクション設定を行う。設定が不可能であれば、その次の候補を用い、同様の処理を繰り返す。

このように本アルゴリズムを用いることで、リンクにファイバが複数あるネットワークにおいて、ルーチング/波長割当ての二つの面からパス割当て問題が扱える。 $\alpha_1 > 0$ とすることでコネクション接続要求時にパスの順序を決定する動的ルーチングを扱えるようになるが、本論文では評価の対象としていない。次章では、提案アルゴリズムのパラメータ (α_1, α_2) を固定とし、ファイバ数 M 、波長変換の幅 θ の性能への影響を検討する。

4. 性能評価

本章では、波長変換と複数ファイバの導入による性能への影響をシミュレーションを用いて調べ、その結果を用いて、低コストネットワークを実現する波長変換及びファイバ数の検討を行う。評価に用いるルーチング/波長割当て方式として、前章で示したアルゴリズムにおける $n_R = 1, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$ を利用する。すなわち、各送受信端末間には最短経路が一つ与えられる。ただし、最短経路が複数あるときには、あらかじめその一つがランダムに決定される。ここで、 α_2 を大きくする、すなわちホップ数の大きな経路を選択しやすくすることで呼損率に影響を与えることが考えられる。しかし、ホップ数の大きな経路を考慮しても性能への影響はほとんどない[7]。したがって、すべてのパスのホップ数が同じとした(エンドノード間の経路数 $n_R = 1$)。また、 δ_i の計算には式(2)を用い、波長割

当ては first-fit 方式 ($C(e_{jk}) = k$) に従うことにする。以下のシミュレーションでは図5で示されるノード数10、有向リンク数30のネットワークモデル(1)、及び図8で示されるノード数49、有向リンク数142のネットワークモデル(2)を用いる。

4.1 10ノードネットワーク

本節では図5のネットワークを用い、波長変換及びファイバ数が性能に与える効果を調べる。各端末間には、最短経路が一つ与えられているので、5のネットワークには1~3ホップのコネクションが接続されることになる。コネクション接続要求は、すべての送受信端末間にポアソン過程に従って発生するものとし、その到着率はすべての送受信端末間で等しいと仮定する。コネクションの保留時間は平均1の指数分布に従う。本節に示す結果は、各送受信端末間にコネクション接続要求を20,000発生させたものである。

図6にファイバ数 $M = 1$ を固定し、波長数 $W = 5, 10, 15, 20$ とした結果を、また、図7に

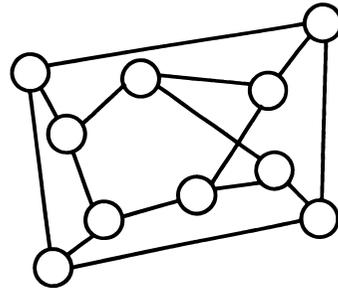


図5 ネットワークモデル(1)
Fig. 5 Network model (1).

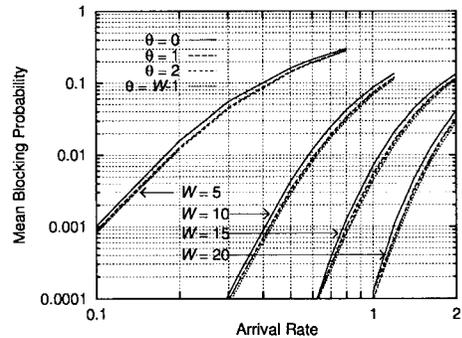


図6 波長変換と呼損率の関係 ($M = 1$)
Fig. 6 Relation between wavelength conversion and blocking probability ($M = 1$).

波長数 $W = 5$ を固定し、ファイバ数 $M = 1, 2, 3, 4$ とした結果を示す。横軸は各送受信端末間へのコネクション接続要求の到着率を示し、縦軸はすべての送受信端末間の呼損率の平均を示す。図中 θ は、波長 λ_k を用いて入力された信号を $\lambda_{\max(1, k-\theta)}$ から $\lambda_{\min(k+\theta, W)}$ のいずれかに変換できることを示すパラメータである。例えば $\theta = W - 1$ は、すべての波長に変換できることを表す。

図 6 より、文献 [1] の結果と同様に、図 5 に示すネットワークを用いても波長変換の効果を表す平均呼損率の差は θ を 0 から 1 に変化させたときが最も大きくなることがわかる。しかし、図 7 より、その効果はファイバを複数にするとさほど見られなくなることがわかる。次に図 6 と図 7 において、1 リンクに設定できるコネクション数が等しくなる $M = 1, W = 5a$ と $M = a, W = 5$ に着目する(ただし、 $a = 1, 2, 3, 4$)。この場合、 $\theta = 0$ において呼損率を比較すると後者の性能が良い。これは、前者は同一波長が 1 本しかなく、送受信端末間にコネクションを接続するための条件が厳しいのに対し、後者では同一のリンクにファイバ数に等しい同一波長が存在し、そのうち空き波長が 1 本あればコネクション接続ができるためである。しかしながら、ファイバ数 $M = 1$ に固定した前者の性能は、 $\theta = 1$ とすることで後者とほぼ同等の性能を得ることがわかる。

4.2 大規模ネットワーク

本節では、図 8 で示される光ファイバ網において波長数、ファイバ数及び波長変換が性能に与える影響について評価する。コネクション接続要求の到着過程、

及び各端末間のルーチング/波長割当ては 4.1 と同様に仮定する。以降に示す結果は、コネクション接続要求を 10,000 発生させたものである。図 9 にファイバ数を $M = 1$ に固定し、波長数を $W = 20$ とした場合のコネクション接続要求の到着率と平均呼損率との関係を示す。図よりわかるように、 $\theta = 0$ と $\theta = 1$ の場合の平均呼損率の差は、図 5 で示されるネットワークにおけるその差よりも小さい。これは図 8 のネットワークにおいて、制限のある波長変換の効果が小さいことを示している。この原因を調べるために、各送受信端末間の経路のホップ数に着目し、ホップ数が等しくなる送受信端末間ごとに平均呼損率を求めた。1 ホップ、12 ホップそれぞれの平均呼損率を図 10 に示す。

図よりわかるように、 $\theta = 0$ と $\theta = 1$ における 12 ホップのコネクションの平均呼損率の差は小さい。したがって、呼損率が大きいロングホップのコネクションに波長変換の効果が小さいために、ネットワーク全体の波長変換の効果が小さくなるといえる。 $\theta = 1$ 程

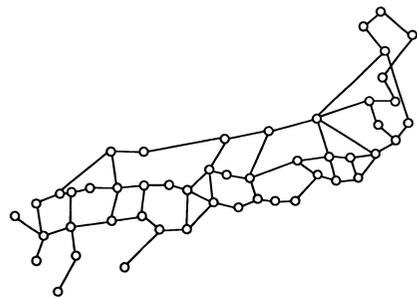


図 8 ネットワークモデル (2)
Fig. 8 Network model (2).

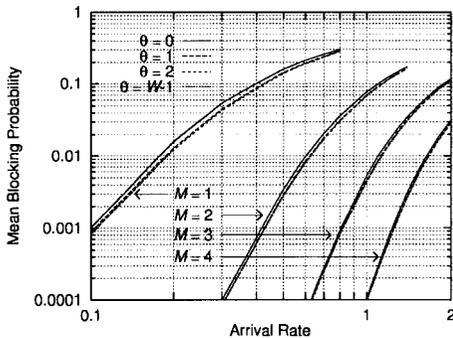


図 7 波長変換と呼損率の関係 ($W = 5$)
Fig. 7 Relation between wavelength conversion and blocking probability ($W = 5$).

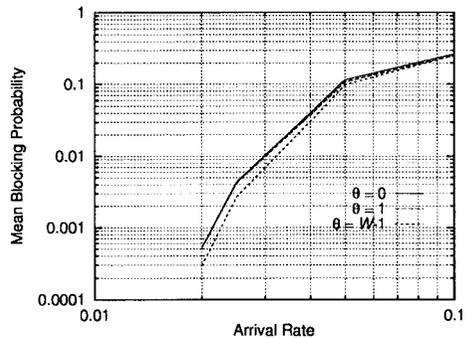


図 9 波長変換と呼損率の関係 ($M = 1, W = 20$)
Fig. 9 Relation between wavelength conversion and blocking probability ($M = 1, W = 20$).

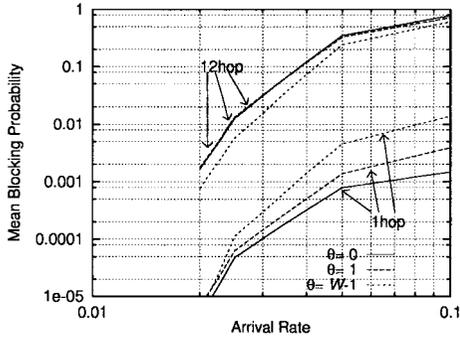


図 10 異なるホップにおける波長変換と呼損率の関係 ($M = 1, W = 20$)

Fig. 10 Relation between wavelength conversion and blocking probability in different hops ($M = 1, W = 20$).

度の波長変換では、文献 [1] の mesh-torus における効果ほどの波長変換の効果をネットワーク全体で期待することは難しい。

しかしながら、波長変換により異なる接続間への呼損率の差を小さくすることは可能である。図 10 からわかるように、 $\theta = 1$ の波長変換をすると、特に到着率が大きくなるにつれて、12 ホップの呼損率は小さくなり、1 ホップの呼損率は大きくなる。これは、呼損率の大きい、12 ホップ接続が受け付けられやすくなる一方で、1 ホップ接続の接続接続要求が受け付けられにくくなったためである。

更に、波長変換の幅が大きい、変換が完全に許される $\theta = W - 1$ の場合には、10 ノードネットワークと同様に、平均 25% 程度の呼損率の減少を実現でき、例えば接続接続要求の到着率が 0.025 である場合、38% 程度呼損率が減少することがわかる (図 9)。これは先ほどと同様、呼損率の大きい、12 ホップ接続の呼損率が 10 ノードネットワークの場合よりも減少したためである。一方で、1 ホップ接続の呼損率は $\theta = 1$ と同様に増加している。

次に、ファイバ数 $M = 2$ 、波長数 $W = 10$ とした場合の結果を図 11、図 12 に示す。ファイバ数を増やした場合、10 ノードネットワークの結果と同様に、波長変換の効果は小さくなるが、全体の呼損率、及びホップ数ごと呼損率はともに、 $M = 1, W = 10$ と同様の傾向を示すことがわかる。更に、波長変換をしない場合の呼損率を比較すると、ファイバ数を 1 本とし

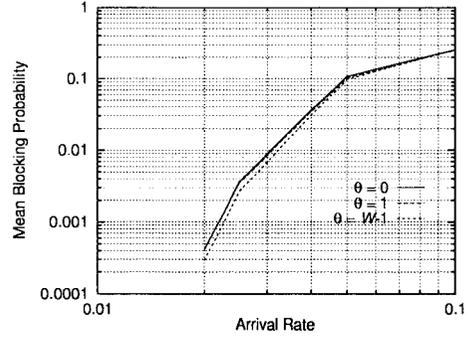


図 11 波長変換と呼損率の関係 ($M = 2, W = 10$)
Fig. 11 Relation between wavelength conversion and blocking probability ($M = 2, W = 10$).

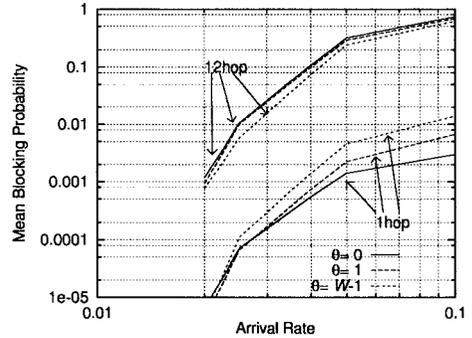


図 12 異なるホップにおける波長変換と呼損率の関係 ($M = 2, W = 10$)

Fig. 12 Relation between wavelength conversion and blocking probability in different hops ($M = 2, W = 10$).

た場合よりも接続間への呼損率の差は小さくなるのがわかる。

4.3 コストと性能の関係

前節までに、波長変換 θ 及びファイバ数 M と性能の関係を示し、それらの値が増加すると性能が向上することがわかった。しかし、性能の向上によるコスト増は避けられない。本節では、波長変換/複数ファイバの簡単なコストモデルを導入し、そのコストと性能の関係について検討する。ネットワークコストは、リンクとノードそれぞれのコストに分解できるものとし、以下にそのコストを導出する。なお以下の記号では、リンクのラベルは省略する。

(1) リンクコスト

1 ファイバ当たりのコストを c_f 、1 リンク配線のためのコストを c_l とする。 c_l は社会的要因により変化する

るが、ここでは1リンクに複数のファイバを配線してもコストの変化は少ないと考え c_l を固定にする。すなわち、ネットワークポロジーが同じ場合にはすべてのリンクを配線するコストはファイバ数にかかわらず同じ値になると仮定する。また、ファイバを実際に敷設する場合には複数のファイバを一度に敷設することなども考えられるが、ここでは簡単化のため、ファイバコストは必要なファイバ数に比例すると仮定する。つまり、各リンクのファイバ数が M の場合、1リンクの総コスト C_L は、 $C_L = Mc_f + c_l$ となる。

(2) ノードコスト

ノード構成のためのコストも波長変換の幅 θ が大きくなるにつれて増加すると予測される。波長変換を行わないならば(図1)、ノードは交換部だけで構成でき、波長変換部は不要である。ノードへの入出力リンク数を D とすると交換部は $MD \times MD$ のクロススペーススイッチを W 個用いて構成できる。交換コストは格子点に置かれたスイッチ(コスト c_s) の数に比例すると仮定すると、そのコストは $c_n(0) = W(MD)^2 c_s$ となる。一方、波長変換の幅 θ の波長変換機能をもつノードを構成する場合(図2)、その交換部には $WMD \times WMD$ のクロススペーススイッチが必要である。制限があるために波長変換のできない入出力の組合せに相当する格子点にスイッチを置かないとすると、交換コストは、

$$c_n(\theta) = c_s MD \times \sum_{i=1}^W MD \{ \min(i + \theta, W) - \max(1, i - \theta) + 1 \}$$

になる。更に、交換コストのみならず波長変換を行うためのコストについては以下のような仮定を置く。波長変換を FWM (Four-Wave Mixing) 方式[10]によって行う場合、入力波長 λ_i と波長 λ_p を合成して、それらに依存した長さの波長 λ_c を出力する。 $[\min(i + \theta, W) - \max(1, i - \theta)]$ 通りの変換を可能にするには、その数に相当する波長 λ_p (コスト c_p) が

必要で、図2における“converter”一つのコストは

$$c_w(i, \theta) = c_p \{ \min(i + \theta, W) - \max(1, i - \theta) \}$$

となる。したがって、波長変換部のコストは

$$c_c(\theta) = MD \sum_{i=1}^W c_w(i, \theta)$$

となり、1ノードのコスト C_N は、

$$C_N = c_n(\theta) + c_c(\theta)$$

で与えられる(ただし、 $c_c(0) = 0$)。

(3) 以上より、ネットワーク全体では、 $C = JC_L + IC_N$ のコストが必要になる。

以下では簡単化のため、すべてのリンクにおいて M, c_f, c_l は等しいものとする。これを用いて、1リンクに設定できるコネクショ数が等しくなるようなパラメータの組合せを用いて、コスト比較を行う。対象とするネットワークは図5に示すモデル($J = 30, I = 10, D = 3$)である。このとき、Case1 ($W = 10, \theta = 0, M = 1$) と Case2 ($W = 10, \theta = 1, M = 1$)、Case3 ($W = 5, \theta = 0, M = 2$) を対象として、 c_f, c_s, c_p を与えた結果を示す。表1に $c_f : c_s : c_p$ が $1 : 1 : 1, 50 : 1 : 1$ であるときの全体のコスト C と各送受信端末間の到着率を 0.60 としたときの平均呼損率をそれぞれの場合について示す。ただし、リンク配線コスト c_l は一定としているので、表1には全体のコストからリンク配線コストを引いた値 $C - JC_l$ を示している。

まずファイバ数が1本で波長変換を行わない Case1 と波長変換を行う Case2、複数ファイバにする Case3 を比べてみると、Case1 はコストを半分程度に抑えることが可能となるが、呼損率を比べると 20%程度劣化し、同程度の性能を得るには波長数を増やす必要がある。

次に、呼損率がほぼ同じ値を示す二つの状況；波長

表1 必要なネットワークコスト

Table 1 Network cost.

c_f	c_s	c_p	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
1	1	1	980	3,090	1,860	5,010	5,220
50	1	1	2,400	4,560	4,800	6,480	8,160
呼損率			0.01198	0.00908	0.00976	0.00854	0.008355

c_f : ファイバ1本のコスト c_s : スイッチ1個のコスト

c_p : 波長変換のコスト

変換を行う Case2 と波長変換を行わずにファイバ数を増やした Case3 を比較する。リンクコストに影響する c_f とノードコストに影響がある c_s , c_p のコスト比が小さい場合には、波長変換を行わずにファイバ数を増やすことで呼損率の改善を行う Case3 が低コストになる。逆に、長距離網の場合など c_s 及び c_p に比べ c_f に高いコストが必要となる場合はファイバ数を少なくし、波長変換を行うことで呼損率の改善を行う Case2 が低コストになる。

更に、Case4 ($W = 10, \theta = 2, M = 1$) と Case5 ($W = 5, \theta = 1, M = 2$) との比較を行った。これは、それぞれ Case2, Case3 に対して、波長変換できる範囲 θ を増やした場合に相当する。この場合においても呼損率はほぼ同じ値をとるが、全体のコストを比較すると Case4 よりも Case5 のほうが高コストとなり、また c_f が他に比べコスト高になる場合の全体のコストの差が Case2, Case3 に比べて大きくなっていることがわかる。すなわち、 θ が大きくなると、ファイバ数 M を増やすよりも、波長変換の幅 θ を更に増やす方が必要なコストは減少することがわかる。

5. む す び

本論文では、複数ファイバを有する光交換ネットワークにおけるルーチング/波長割当アルゴリズムを示し、複数のネットワークを用いて波長変換と複数ファイバの効果を検討した。その結果、波長変換または複数ファイバにより性能が改善されることが示されたが、その実現のためにはコスト増は避けられない。そこで、スイッチとファイバにコストを与え、低コストのネットワーク実現のための検討を行った。

本論文では、3. で示したルーチング/波長割当アルゴリズムのうち、1パラメータにおいてのみ評価を行った。今後は、その他のパラメータを与えた場合、特に動的ルーチングにおける波長変換と複数ファイバの検討をする予定である。

文 献

- [1] J. Yates, J. Lacey, D. Everitt, and M. Summerfield, "Limited-range wavelength translation in all-optical networks," IEEE INFOCOM '96, pp.954–961, 1996.
- [2] G. Jeong and E. Ayanoglu, "Comparison of wavelength-interchanging and wavelength-selective cross-connects in multiwavelength all-optical networks," IEEE INFOCOM '96, pp.156–163, 1996.
- [3] E. Karasan and E. Ayanoglu, "Effects of wavelength routing and selection algorithms conversion gain in WDM optical networks," IEEE GLOBECOM '96,

pp.299–305, 1996.

- [4] M. Kovačević and A. Acampora, "Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.13, pp.868–880, June 1996.
- [5] C. Chen and S. Banerjee, "A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks," IEEE GLOBECOM '96, pp.164–171, 1996.
- [6] 原井洋明, 宮本健太郎, 村田正幸, 宮原秀夫, "波長割当を考慮した光交換ネットワークの性能解析," 信学技報, SSE96-121, vol.96, pp.19–24, Dec. 1996.
- [7] 原井洋明, 村田正幸, 宮原秀夫, "光交換ネットワークにおけるルーチング方式の性能評価," 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, pp.74–86, Feb. 1997.
- [8] M. Kovačević and A. Acampora, "Electronic wavelength translation in optical networks," IEEE GLOBECOM '95, pp.2182–2187, 1995.
- [9] H. Harai, M. Murata, and H. Miyahara, "Performance of all-optical networks with limited-range wavelength conversions," Proc. of IEEE ICC '97, vol.1, pp.416–421, June 1997.
- [10] J. Zhou, N. Park, K.J. Vahala, M.A. Newkirk, and B.I. Miller, "Four-wave mixing wavelength conversion efficiency in semiconductor traveling-wave amplifiers measured to 65 nm of wavelength shift," IEEE Photonics Tech. Lett., vol.6, pp.984–987, Aug. 1994.
- [11] T.N. Saadawi, M.H. Ammar, and A.E. Hakeem, Fundamentals of telecommunication networks. John Wiley & Sons, Inc., 1994.

(平成9年8月14日受付, 12月19日再受付)



宮本健太郎

平9 阪大大学院修士課程了。現在、日本アイ・ピー・エム(株)。



原井 洋明 (正員)

平7 阪大・基礎工・情報・博士前期課程了。平10 同博士後期課程了。現在、郵政省通信総合研究所研究官。光交換網の設計に関する研究に従事。工博、IEEE、SPIE 各会員。



村田 正幸 (正員)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒．昭 59 同大
大学院修士課程了．同年日本アイ・ピー・
エム(株)入社．同社東京基礎研究所を経
て，昭 62 阪大・大型計算機センター・助
手，平 1 同大・基礎工・助手，平 3 同講師，
平 4 同助教授，平 10 同教授．この間，待
ち行列理論，システム性能評価，広帯域通信網などの研究に従
事．工博．IEEE，ACM 各会員．



宮原 秀夫 (正員)

昭 42 阪大・工・通信卒．昭 47 同大大学
院博士課程了．昭 48 京大・工・助手．昭
57 阪大・基礎工・助教授，昭 62 同大・大
型計算機センター・教授，平 1 同大・基礎
工・情報・教授，平 7 同大・大型計算機セ
ンター・センター長併任，平 10 同大・基
礎工・学部長併任．昭 58 ~ 59 米国 IBM トーマスワトソン研
究所客員研究員．システム性能評価，マルチメディアシステム，
広帯域通信網，ネットワーク管理に関する研究に従事．工博．
平 3 本会論文賞受賞．IEEE Fellow，情報処理学会各会員．