

IP over WDM ネットワークにおける統合経路制御のための リンクコスト関数の提案と評価

小泉 佑揮[†] 荒川 伸一^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 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

E-mail: [†]{ykoizumi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし WDM (Wavelength Division Multiplexing) ネットワークにおいて、ノード間に光パスを設定することにより論理トポロジを構築し、その上で IP を用いる方式が考えられている (IP over WDM)。光パス上に IP トラフィックを収容することで、中間ノードでの電気処理が不要となり、パケット処理によるノード負荷を削減することができる。しかし、IP と WDM の経路制御方式は本来は個別に設計されており、WDM ネットワークで設定した光パスを必ずしも IP が利用するとは限らない。したがって、WDM ネットワークの波長資源を効率的に使用するためには、IP と WDM の経路制御を統合した経路制御手法が必要となる。本稿では、IP over WDM ネットワークにおいて、WDM ネットワークの波長資源を効率的に使用し、トラフィックの変動に対しても柔軟に収容することを目標とした統合経路制御手法を提案する。提案手法では WDM ネットワークの波長利用状況に基づいて仮想リンクを用意し、仮想リンクを含むトポロジ上で経路制御を行う。提案手法では、仮想リンクのコスト関数がネットワーク性能に大きな影響を与える。そこで、本稿では様々なコスト関数の評価を行い、シミュレーションにより上に凸なコスト関数を用いることにより、下に凸または線形なコスト関数と比較して、エンド・エンド間の平均遅延が小さくなることがわかった。

キーワード 波長分割多重、IP over WDM、経路制御、リンクコスト、統合経路制御手法、

On the Integration of IP Routing and Wavelength Routing in IP over WDM Networks

Yuki KOIZUMI[†], Shin'ichi ARAKAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University,
1-5 Yamadagaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{††} Graduate School of Economics, Osaka University, 1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

E-mail: [†]{ykoizumi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

Abstract One approach for accommodating IP traffic on the WDM (Wavelength Division Multiplexing) network is to construct a logical topology by establishing a set of lightpaths between nodes. The lightpath carries IP traffic and does not require any electronic processing at intermediate nodes, which reduces the load of packet processing at that nodes. However, if IP and WDM networks have its own routing functions, the lightpaths configured in WDM network may not be fully utilized by IP unless the route of IP packets can be explicitly determined. Therefore, the integration of routing mechanisms is necessary to provide efficient resource utilization and flexible adaptation against traffic changes. In this paper, we propose an integrated routing mechanism for IP over WDM networks. The key idea is to prepare a set of *virtual-links* based on a resource utilization of the WDM network, and then calculate the minimum cost route on the IP network. In our approach, a fundamental problem is to select the cost function of virtual-links. We therefore evaluate end-to-end delay with three kinds of cost function for virtual links. Our simulation results show that among convex, concave and linear for cost functions, the concave function shows the best end-to-end delay performance against traffic changes. Fluid flow network simulation is conducted for simulating IP traffic flow on WDM networks.

Key words Wavelength Devison Multiplexing, IP over WDM, Routing, Link Cost Metrics, Integrated Routing Algorithm

1. はじめに

光ファイバの通信回線の大容量化を実現する波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は増加し続けるインターネットトラフィックを収容する手段として有望視されている。WDM 技術を活用すれば、各 WDM ノードにおいて波長レベルでの交換を行い (波長ルーティング)、エッジノード間に波長によってのみ構成される光パスが設定される。ネットワーク内では光信号を電気信号に変換することなくパケットを転送することが可能になり、ルータでの電気処理による負荷を軽減することができる。インターネットトラフィックの大部分は IP トラフィックで構成されているため、IP トラフィックを直接 WDM ネットワークに転送する方式 (IP over WDM) が考えられている [1-6]。

IP ネットワークおよび WDM ネットワークのそれぞれにおいて、経路制御を独立して行う方式 (オーバーレイ) がある [7]。オーバーレイモデルでは、WDM ネットワークにおいてノード間に光パスを設定することで論理トポロジを構成し、IP ネットワークでは論理トポロジ上で従来の経路制御などのプロトコル処理を行う [8]。この場合、IP プロトコルの変更が必要ないという利点は残されるが、波長ルーティングによって光パスを設定したとしても、IP パケットの転送に利用されない可能性があり、WDM ネットワークで光パスを設定する際に IP ネットワークの振る舞いを考慮する必要がある [9]。これは、IP パケットの経路は IP の経路制御機構によって決定され、WDM ネットワークで提供される光パスを使用するとは限らないためである。

その一方で、IP/MPLS ネットワークと WDM ネットワーク間でトポロジ情報やリンクステート情報を共有し、単一の経路制御によって LSP (Label Switched Path) を WDM ネットワークに収容する方式も考えられている [5,6]。文献 [5] では、IP/MPLS over WDM ネットワークを対象とし、次々と離散的に到着するトラフィックフローに対して、その LSP の経路および光パスの経路を求める MIRA (Minimum Interference Routing Algorithm) を提案している。MIRA では、ある必要とする帯域が明示的に定められたトラフィックフローの経路を求める際に、将来他のノードペア間に設定される LSP に対する残余帯域に着目し、その残余帯域の最大化を目指して経路を選択する。適切な経路がない場合は LSP 設定要求は棄却される。文献 [6] では、IP/MPLS over GMPLS ネットワークにおいて、新たに到着するトラフィックフローの LSP の経路を求める際に、GMPLS ネットワークのトポロジ情報を用いることで、LSP 設定要求の棄却率を改善することが示されている。

これらの研究を含め、IP ルーティングと WDM の波長ルーティングの統合化に関する研究では、IP トラフィックは MPLS の LSP にマッピングされ、その LSP と WDM の光パスの統合経路制御が提案されてきた。この場合、IP トラフィックの変動に対しては、LSP を新たに設定・解放することにより対応することができる。しかし、LSP を設定するたびに、その設定情報をネットワーク内のすべてのノードに通知する必要があり、更新処理は複雑になる。また、IP 経路選択時にネットワーク内の既

に設定されている LSP の情報を把握しなければならず、真の IP over WDM ネットワークとなっていないのが現状である。さらに、従来の研究では、LSP に対して明示的なフローレートが設定され、経路が見つからない場合には LSP 要求は棄却されるとしてきた。しかし、IP over WDM ネットワークにおいては、IP トラフィックは常に変動することから、LSP の棄却率による有効性の評価は不適切であり、遅延の変動による評価が望ましい。

本稿では、IP over WDM ネットワークにおいて、IP ルーティングと WDM の波長ルーティングを統合し、波長ルーティングにより設定した光パス上に IP パケットが確実に転送される経路制御手法を提案する。具体的には、IP ルータ間において、仮想的なリンク (以降、仮想リンク) を設定する。仮想リンクは、光パスとして設定はされていないが、要求に応じて波長を予約して光パスとして利用することが可能な論理的なリンクである。IP ネットワークではこの仮想リンクを含むトポロジ上で経路選択を行い、仮想リンクが選択されればそれに対応する光パスを設定することにより、IP パケットの経路と光パスの経路を同時に求めることが可能となる。計算機シミュレーションによる評価では、仮想リンクに様々なコスト関数を与え、エンド・エンド間の平均遅延を求め、提案する統合経路制御手法の有効性を示す。なお、WDM 技術によりネットワークに収容可能なトラフィックが増加するとともに、パケットレベルの振る舞いを計算機シミュレーションにより調べることは困難となる。そこで、本稿では、エンド・エンド間の遅延特性を明らかにするために、流体モデルによる計算機シミュレーション手法についても述べ、エンド・エンド間の平均遅延に関してパケットレベルシミュレーションによる結果とほぼ同等の傾向になることも示す。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では、想定するネットワークモデルと、提案手法で重要な概念となる仮想リンクの説明を行う。次に、仮想リンクを用いた経路制御アルゴリズムを提案する。3 章で提案アルゴリズムの評価を行う。最後に、4 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. 仮想リンクを用いた統合経路制御手法

2.1 ネットワークモデルと仮想リンクの概念

本稿で想定するネットワークは、光ファイバとノードから構成される。各ノードは、WDM インターフェースを持った IP ルータと、波長ルーティング機能を提供する光クロスコネクタ (OXC) で構成される。エンド・エンド間の到達可能性を保証するために、隣接ノード間には 1 波長利用して静的に光パスを設定しておく。以降では、その光パスを *persistent-lightpath* と呼ぶ。残りの波長資源は、要求に応じて動的に設定する光パスに利用する。

IP の経路制御と WDM の経路制御を統合するために仮想リンクの概念を導入する。仮想リンクは、光パスとして構成されていないが、要求に応じて波長資源を利用することで光パスとして構成できる論理的なリンクである。仮想リンクの簡単な例を図 1 に示す。図には、ルータ R_1 、 R_6 間に動的に光パスが設定されており、ルータ R_1 からルータ R_2 、 R_4 、 R_5 に 3 本の仮想

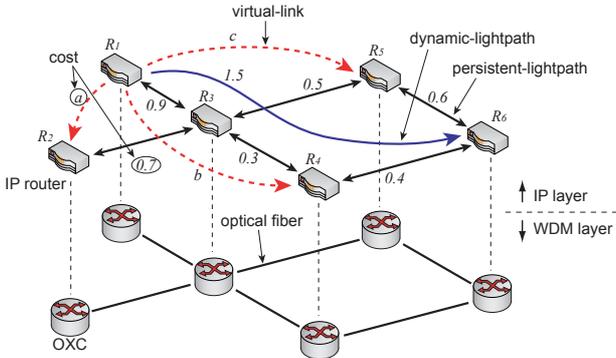


図1 仮想リンクを設定したネットワークの例

リンクが設定されている。仮想リンクおよび既存の光パスにはコストを設定し、仮想リンクとIPネットワークから構成されるトポロジ上で最小コスト経路を探索する。すなわち、IPの経路計算時にIPパケットの経路と必要となる光パスの経路を同時に求めることが可能となる。経路計算の結果、仮想リンクが経路として選択されると、波長資源を利用して仮想リンクに光パスを設定する。ここで設定した光パスは、IPの経路制御アルゴリズムによって選択された経路に含まれるため、IPパケットは確実に光パス上を転送される。

2.2 経路制御アルゴリズム

仮想リンクを用いた統合経路制御手法のアルゴリズムを以下に示す。なお、下記の統合経路制御手法では、仮想リンクへのコストの与え方が性能に大きな影響を与える。仮想リンクのコストの与え方については2.3節で議論し、その評価結果は3.章に示す。

2.2.1 トポロジデータベースの生成

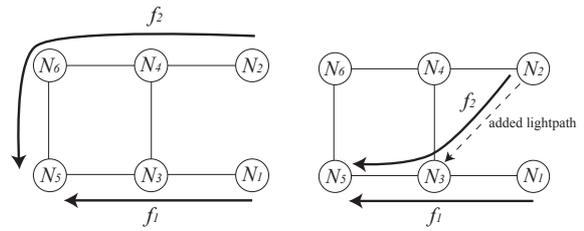
OSPF-TEを用いて各リンクにおける波長利用状況を配布する。各ノードは、配布されたリンクステート情報を用いて下記のトポロジデータベースを生成する。

- Step 1: 物理トポロジ上の各リンクにおいて、残余波長資源のない物理リンクを削除する。
- Step 2: 物理トポロジから最小ホップの経路を選択し、仮想リンクの経路とする。
- Step 3: ノードから、他のすべてのノードに対して仮想リンクを設定する。利用可能な波長資源がなく、光パスを設定できない場合は、仮想リンクは設定しない。
- Step 4: 仮想リンクにコストを設定する。具体的なコスト設定については2.3節で述べる。

2.2.2 経路選択

上述の手順で作成したトポロジデータベースを用いて経路選択を行う。

- Step 1: 仮想リンクと既存の光パスを含めた論理トポロジから、IPの経路制御アルゴリズムを利用して最小コストの経路を選択する。
- Step 2: 選択された経路に仮想リンクが含まれていれば、その



(a) 光パス追加前 (b) 光パス追加後

図2 光パスの設定によってノード負荷が高くなる例

仮想リンクに対して波長予約 ([10]) 行い光パスを設定する。

- Step 3: 経路選択の結果、IPの経路の一部として利用されなくなった光パスは開放する。

2.3 仮想リンクのコスト

仮想リンクのコストの指標としてノードの負荷を用いた。利用する記号を定義し、それぞれのコスト関数について述べる。

- l_{ij} : ノードペア ij 間の仮想リンク
- C_{ij} : l_{ij} のコスト
- v_i : ノード i の負荷
- α : コスト関数の係数

以下にコスト関数を示す。3つのコスト関数は、それぞれ下に凸、上に凸、線形な関数である。

$$C_{ij} = (\alpha v_j)^2 \quad (1)$$

$$C_{ij} = \sqrt{\alpha v_j} \quad (2)$$

$$C_{ij} = \alpha v_j \quad (3)$$

光パスを設定すると、その終端ノードにトラヒックが流れ込み、ノードの負荷が増加する場合がある。その例を図2に示す。図2(a)では、フロー f_1 、 f_2 がそれぞれ経路 $N_1-N_3-N_5$ 、 $N_2-N_4-N_6-N_5$ で転送されている。図2(b)は、ノードペア N_2 、 N_3 間に光パスが設定されたときの図である。新たに光パスが設定されたことで、フロー f_2 の経路が $N_2-N_3-N_5$ に変更され、光パスが設定される前は N_4 、 N_6 を経由していたトラヒックが N_3 を経由して転送される。その結果、 N_3 の負荷が高くなる。このように、光パスの終端ノードにトラヒックが集中し、ノードが過負荷状態になることを防ぐため、仮想リンクのコスト関数に利用するパラメータとして、仮想リンク l_{ij} の終端ノード j の負荷 v_j を利用する。 v_j が高いときにコスト値が高くなる関数を用いることで、ノードに流れ込むトラヒック量を制限し、遅延の増加を防ぐ。

- 3.章で、それぞれ3種のコスト関数の性能評価を行う。

3. 提案手法の評価

3.1 流体モデルによる近似

WDM技術によって通信回線容量が増加するとともに、ネッ

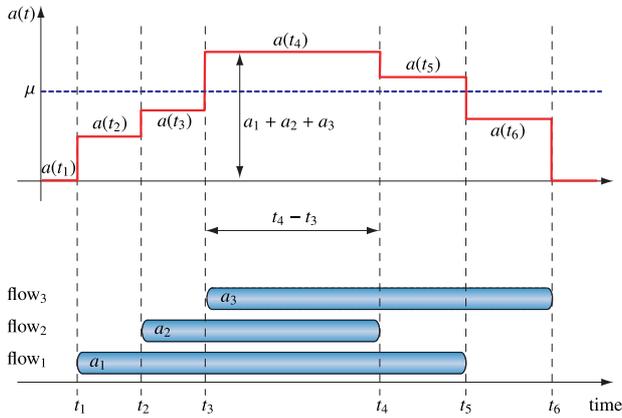


図3 ノードでの到着率の計算

トワーク上には膨大な量のパケットが転送される。計算機でシミュレーションを行うときには、大量のパケット処理によって、計算機の計算能力とメモリが消費され、評価するネットワークの規模が大きくなるにつれて、計算機でシミュレーションを行うことが困難になる。そこで、流体モデルによる近似 [11] を用いた計算機シミュレーションにより提案手法の評価を行う。まず、以下に記号の定義を示し、計算機シミュレーションの概要を示す。

- t_n : n 番目にフローの到着または離脱が起きた時刻
- $L(t_n)$: 時刻 t_n のノード内パケット数
- $a(t_n)$: 時刻 t_n のノードへのパケット到着率
- μ : ノードのサービス率
- $W(t_n)$: 時刻 t_n のノードでの遅延

図3にノードでのパケット到着率の計算方法の概要を示す。図は、3本のフロー ($flow_1, flow_2, flow_3$) がノードにそれぞれ時刻 t_1, t_2, t_3 で到着し、それぞれ t_5, t_4, t_6 で離脱の様子を示している。各フロー内では、パケットは到着率 a_1, a_2, a_3 で到着する。また、図の上部には、ノードに到着するパケットの到着率の変化を示している。時刻 t_n でのノード内パケット数は、時刻 t_{n-1} 以降の変化と $L(t_{n-1})$ から求めることができる。 $[t_{n-1}, t_n]$ でノードに到着したパケット数は $a(t_n) \times (t_n - t_{n-1})$ で表現でき、ノードから出て行ったパケット数は $\mu(t_n) \times (t_n - t_{n-1})$ で表現できる。したがって、 $L(t_n)$ は $L(t_{n-1})$ を用いて、以下のように表現できる。

$$L(t_n) = \{a(t_n) - \mu\} \times (t_n - t_{n-1}) + L(t_{n-1}) \quad (4)$$

$L(t_n) < 0$ となるときは、 $L(t_n) = 0$ とする。遅延はリトルの公式を用い、 $W(t_n) = L(t_n)/a(t_n)$ として計算する。

流体モデルに基づく計算機シミュレーションでは、各フローの先頭と末尾のパケットのみを生成し、ノードではこれらのパケットを受け取ったときに、 $a(t_n), L(t_n), W(t_n)$ を更新する。その結果、計算機シミュレーションに必要となる時間を大幅に削減することができる。

流体モデルによる近似の妥当性を示すため、ノードにパケットが到着する毎に $a(t_n), L(t_n), W(t_n)$ を更新するパケットレベル

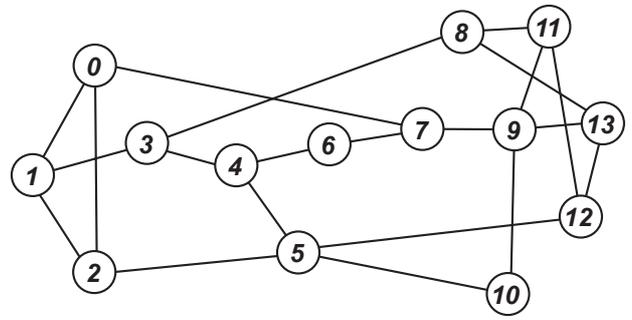


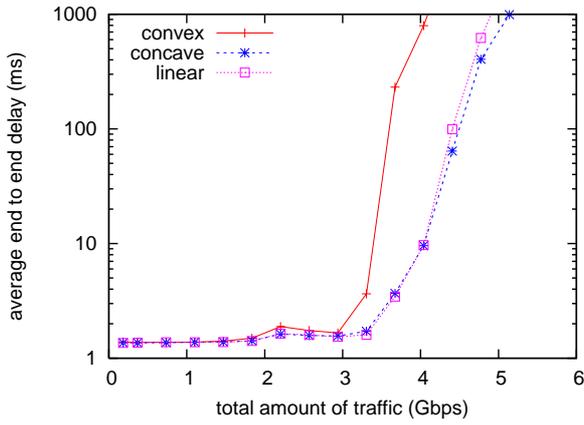
図4 NSFNet

シミュレーションとの比較を行う。これらのシミュレーションには、図4に示す NSFNet のトポロジを利用する。各リンクの波長多重数を8とし、1波長当たりの回線容量を10Gbpsとする。ルータの処理能力は1Gbpsとする。また、波長変換器は利用しない。フローは、文献 [12] に示されているトラフィックデマンドマトリックスにしたがって各ノードペア間にポアソン過程にしたがって到着するものとする。フロー長は平均12Mbyteの指数分布に従う。ネットワークに到着するトラフィックの総量は、フローの到着間隔で調節する。流体モデルに基づく計算機シミュレーションとパケットレベルシミュレーションを、2.3節に示した3つのコスト関数に対して行った結果を図5に示す。流体モデルによる近似により、パケットレベルシミュレーションとの間に誤差が生じているものの、エンド・エンド間遅延の傾向は十分に把握できている。以降の提案手法の評価には、流体モデルに基づく計算機シミュレーションの結果を用いる。

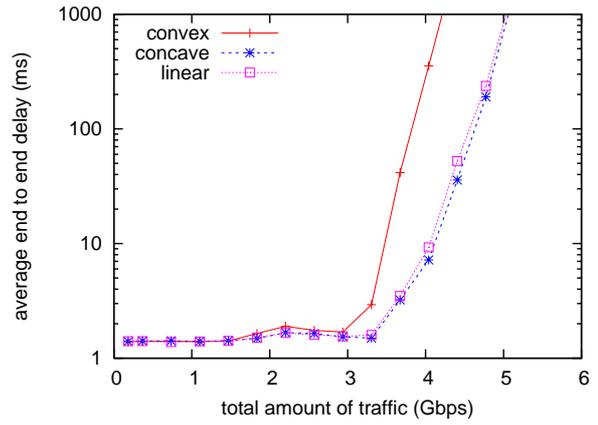
3.2 仮想リンクコストの評価

前節では、パケットレベルシミュレーションを現実的な時間で終了させるために、低速なネットワークでの評価を行ったが、提案手法の評価では、ルータの処理能力を10Gbps、平均フロー長を75Mbyteとして評価を行う。式(1)、(2)、(3)のコスト関数を利用したときのエンド・エンド間の平均遅延を図6に示す。図中において、コスト関数として式(1)、式(2)、式(3)を用いた際の結果を、それぞれ“convex”, “concave”, “linear”と表記する。各コスト関数に対し、乱数を変えて計算機シミュレーションを100回実施し、その平均値を数値結果として示している。また、提案手法と比較するために、静的に設計した論理トポロジ上に同量のトラフィックを転送したときのエンド・エンド間の平均遅延を用いる。論理トポロジは、与えられたトラフィックデマンドマトリックスの値が最も大きなノードペア間から順に光パスを設定することで構成する [12]。静的に設計されたトポロジを利用したときの結果は、図中では“static”と表記する。

図6(a)はトラフィックに変動がないときの結果である。このときは、提案手法の平均遅延は静的に設計されたトポロジの平均遅延よりも大きくなっているが、その差は小さいことがわかる。一方、トラフィックに変動を与えたときの結果を図6(b)に示す。図6(b)を求めるときに、トラフィックデマンドマトリックスの総和を一定にしつつ、トラフィックデマンドマトリックスをランダムに再生成している。トラフィックデマンドマトリックスは200秒ごとに5回変更し、その平均遅延を図に示している。トラヒッ



(a) 流体モデル



(b) パケットレベル

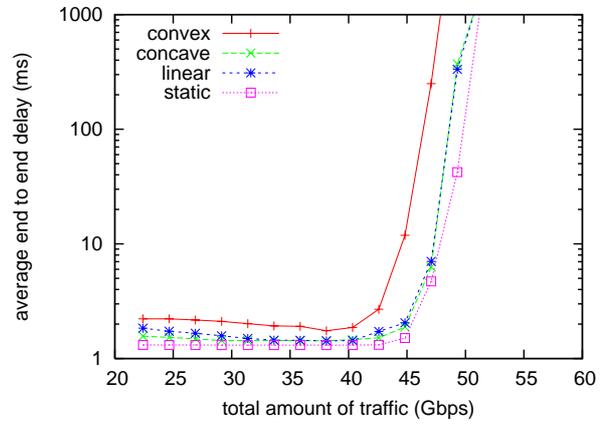
図5 流体モデルに基づいたシミュレーションとパケットレベルシミュレーションの比較

クに変動がある場合、静的に設計した論理トポロジでは遅延が急激に増加していることがわかる。一方、提案手法を用いた場合、平均遅延の変化はほとんどなく、トラフィック変動に対する耐性があると言える。

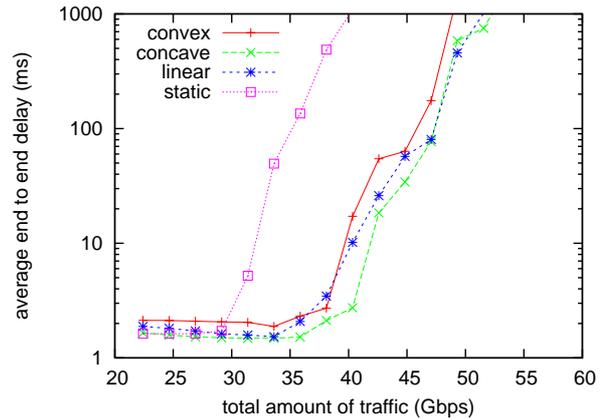
各コスト関数のエンド・エンド間の平均遅延に着目すると、図6(b)、6(b)のいずれの図においても concave、linear の平均遅延は convex の平均遅延よりも小さくなっている。提案手法では、波長資源を可能な限り利用して光パスを設定し、光パスの中間ノードの負荷を軽減することでエンド・エンド間の遅延を減少させる。convex のように、下に凸な関数ではコスト関数の値は他の関数と比較して大きくなる傾向がある。そのため、波長資源を十分に利用することができず、光パスの中間ノードでの負荷が高くなり、その結果エンド・エンド間の平均遅延が増加する。次に、コスト関数の係数 α の値とエンド・エンド間の平均遅延の関係を図7に示す。この図を見ると、concave、linear は、convex よりも常に小さい値を示している。さらに、concave は convex や linear と比較すると広い α の範囲で最適な性能を示しており、詳細なパラメータ調整をしなくても、エンド・エンド間の遅延を抑えることができる。また、 α が大きくなるとコスト関数の値も大きくなり、ノード負荷削減のために必要な光パスが設定されず平均遅延が増加する。逆に α が小さくなるとコスト関数の値も小さくなり、不必要な光パスが多く設定される。この場合、ノード負荷の削減効果が少ない場合でも光パスが設定され、ノード負荷を大きく削減する光パスは波長資源不足のため設定されない傾向が高まる。その結果、エンド・エンド間の平均遅延は悪化する。

4. まとめ

WDM ネットワークの波長資源を効率的に使用するためには、IP と WDM の経路制御を統合した統合経路制御手法が必要となる。本稿では、IP over WDM ネットワークを対象として、仮想リンクを用いた統合経路制御方式の提案を行った。提案手法では、仮想リンクにコスト値を与え、IP ネットワークの経路計算時に仮想リンクを含むトポロジ上で最小コスト経路を求める。



(a) トラフィックに変動がないとき



(b) トラフィックに変動があるとき

図6 エンド・エンド間の平均遅延 ($\alpha = 1.5$)

提案手法では仮想リンクに与えるコスト関数の選択がネットワーク性能に大きな影響を与える。本稿では、ノード負荷の効果的な削減を目的として、仮想リンクの終端ノードの負荷を指標としたコスト関数を示し、流体モデルによる近似を用いた計

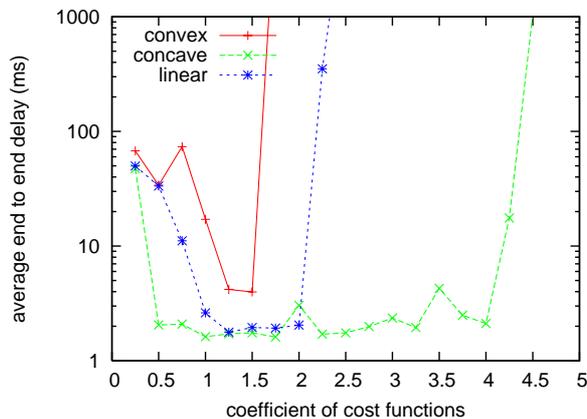


図7 コスト関数の係数 α とエンド・エンド間の平均遅延の関係
(ネットワークの総トラフィック量 42.58Gbps)

算機シミュレーションによりエンド・エンド間の平均遅延を評価した。下に凸、上に凸および線形の3種のコスト関数を比較評価した結果、上に凸なコスト関数を用いることにより平均遅延が小さくなることを明らかにした。また、提案手法はトラフィックが変動する場合にも、エンド・エンド間の平均遅延がほぼ同じになることを示した。

本稿では、仮想リンクの経路は最小ホップ経路としている。最小ホップ経路を用いることで、波長資源の使用量が抑えられる利点はあるものの、迂回経路を用いることでネットワーク性能が改善される可能性がある。今後は、仮想リンクに迂回経路を用いる効果を明らかにする予定である。

謝 辞

本研究の一部は、総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] J. Li, G. Mohan, E. C. Tien, and K. C. Chua, "Dynamic routing with inaccurate link state information in integrated IP over WDM networks," *Computer Networks*, vol. 46, pp. 829–851, Dec. 2004.
- [2] T. Ye, Q. Zeng, Y. Su, L. Leng, W. Wei, Z. Zhang, W. Guo, and Y. Jin, "On-line integrated routing in dynamic multifiber IP/WDM networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 1681–1691, Nov. 2004.
- [3] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E83-B, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [4] N. Ghani, S. Dixit, and T.-S. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [5] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proceeding of IEEE INFOCOM*, pp. 358–366, Apr. 2001.
- [6] J. Comellas, R. Martinez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, "Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks," *IEEE Network Magazine*, vol. 17, pp. 22–27, march/april 2003.
- [7] S. Koo, G. Sahin, and S. Subramaniam, "Dynamic LSP provisioning in overlay, augmented, and peer architectures for IP/MPLS over WDM," in *Proceeding of IEEE INFOCOM*, 2004.
- [8] R. Dutta and G. N. Rouskas, "A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks," *Optical Network Magazine*, vol. 1, pp. 73–89, Jan. 2000.
- [9] J. Katou, S. Arakawa, and M. Murata, "A design method for logical

topologies with stable packet routing in IP over WDM networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E86-B, pp. 2350–2357, August 2003.

- [10] K. Lu, J. P. Jue, G. Xiao, I. Chlamtac, and T. Ozugur, "A distributed signaling scheme for provisioning dynamic traffic in wavelength-routed networks," in *Proceeding of SPIE Opticomm*, pp. 151–162, October 2003.
- [11] G.F. ニューエル, 待ち行列理論の応用. サイエンス社, 1973. 森村英典, 森雅夫 訳.
- [12] 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.