

## IP/光マルチレイヤネットワークにおける QoS 制御方式の検討

木村 卓巳†

† 日本電信電話株式会社 NTT サービスインテグレーション基盤研究所  
〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11  
E-mail: †takumi.kimura@lab.ntt.co.jp

あらまし 本稿では、IP レイヤのホップ・バイ・ホップ転送と光レイヤの波長パスカットスルー転送を同時にサポートするマルチレイヤネットワークにおいて、DiffServ アーキテクチャにもとづく QoS 制御方式を提案する。まず、ネットワーク内でクラスの異なるトラフィックを分離する方法の違い (DiffServ キューによるクラス分離と波長によるクラス分離)、転送方式の違い (IP ホップ・バイ・ホップ転送と波長パスカットスルー転送) にもとづいて分類される 4 方式を示す。シミュレーションにより、ノードでの必要ポート数を尺度として、4 方式を比較評価する。その結果、トラフィック量が少ないうちは、IP ホップ・バイ・ホップ転送が低コストであるが、トラフィック量が多くなると、波長パスカットスルー転送のコスト増加傾向が急速に緩やかになることが分かった。最後に、トラフィック量と DiffServ キューのコストの観点から、4 方式の適用領域を示す。

キーワード 光ネットワーク, マルチレイヤ, DiffServ, QoS 制御, シミュレーション

## A Study on QoS control in IP/Optical Multi-layer Networks

Takumi KIMURA†

† NTT Service Integration Laboratories, NTT Corporation  
3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi, Tokyo 180-8585, Japan  
E-mail: †takumi.kimura@lab.ntt.co.jp

**Abstract** This paper proposes QoS control, based on DiffServ architecture, in Multi-layer Networks which support simultaneously both a IP hop-by-hop transmission and a cut-through transmission using end-to-end lambda paths. Four QoS control types, which categorized based on a class differentiation type (using DiffServ queue or using class-based lambda) and a transmission type (IP hop-by-hop transmission or lambda path cut-through transmission) are shown. Then, the four QoS control types are evaluated using simulation. The results show the increasing rate of network cost for lambda path cut-through transmission turns rapidly smaller in large traffic case, while IP hop-by-hop transmission achieves lower cost in small traffic case. Finally, applicability conditions for these QoS control types are clarified from the points of traffic volume and DiffServ queue cost.

**Key words** Optical Networks, Multi-layer, DiffServ, QoS control, Simulation

### 1. はじめに

ブロードバンドアクセスの普及、P2P や映像ストリーミングの急増により、インターネットのバックボーンにおけるトラフィックは指数関数的に増加している [1] [2]。例えば、国内の IX (Internet eXchange) の一つである NSPIX2 におけるトラフィック量は、1 年で約 1.9 倍 ( $e^{0.657}$  倍) の割合で急速に増加し、同時に、短時間でのトラフィック変動幅も拡大している [2]。

一方、VoIP (Voice over IP)、企業の VPN における業務用アプリケーションなどは、パケット損失や遅延に非常に敏感であり、従来のインターネットに対するよりもシビアな QoS

(Quality of Service) を要求する。ネットワークでは、これらの高い QoS 要求のトラフィックと同時に、従来のベストエフォートトラフィックも収容する必要があるため、サポートすべき QoS の幅は非常に広がってきた [3]。

急増するトラフィックに対応するために、バックボーンネットワークの広帯域化が必要とされており、光ネットワークが注目されている。

現在、1 波長あたり 10Gbps や 40Gbps の高速伝送技術や、1 本の光ファイバに複数波長を波長多重して伝送する WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術の実用化が進んでいる。また、波長多重装置 (MUX: Multiplexor) をネットワーク

のノード間の1リンクに用いた光リンクから、OADM (Optical Add-Drop Multiplexor) を輪状に接続した光リングネットワーク、光クロスコネクタ (OXC: Optical cross-connect) を網的に接続した光メッシュネットワークへと WDM の適用可能なネットワークトポロジは広がっている。メッシュトポロジでは、波長パスの柔軟な経路設定が可能となり、トラヒック急増への対応や収容効率の向上がはかれる。

このような光ネットワークにおける波長パス等の動的制御に向けて、IETF (Internet Engineering Task Force) 等の標準化団体では、MPLS (Multi-Protocol Label Switching) 技術におけるパスである LSP (Label Switching Path) を動的に制御するためのルーティングプロトコル (ネットワークトポロジや資源情報の収集) や、シグナリングプロトコル (LSP の設定) を拡張した GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) [4] [5] の仕様化が進められている。これにより、MPLS 技術を用いて、IP レイヤのトラヒック (LSP) を動的制御するシングルレイヤ制御から、GMPLS 技術を用いて、従来の LSP に加えて、光レイヤの波長パスも同時に動的制御するマルチレイヤ制御が可能になる [6] [7]。マルチレイヤ制御には、レイヤ間で独立に LSP 制御するオーバレイモデル [6] と、レイヤ間で連携して LSP 制御するピアモデル (統合モデル) [7] があり、ここでは、ピアモデルを対象とする。

このような IP/光マルチレイヤネットワークに関する既存研究として、マルチレイヤの特徴を考慮したノード構成方法 [8] [9]、ルーティング方式 [10] [11]、障害回復方式 [12] 等が検討されている。また、ネットワークへのトラヒック収容効率の向上を目指し、トラヒックエンジニアリング [13] [14] や、グルーミング方法 [15] の検討も行われている。ここでは、静的なトラヒック需要に対してネットワークにトラヒックを最適 (波長数、コスト等を最小化) に収容設計するために、ネットワークと経路計算等の設計システムが連携することなく独立に動作する off-line アプローチと、運用中の動的な需要変動やネットワーク障害に対応するために、ネットワークと経路計算等の制御機能が緊密に連携して、リアルタイムに動作する on-line アプローチがある。前者は、ネットワーク設計の検討に適し、後者は、設計後の運用/制御の検討に適すアプローチである。

以上のトラヒックの急増に対応する方向とは別に、ネットワークでは、従来のベストエフォートのトラヒックと、要求 QoS の高いトラヒックに同時に対応する必要がある。

文献 [3] によると、要求 QoS が異なるクラスのトラヒックを混在させて、ネットワークで同一に扱うと、最も高い要求 QoS のクラスにあわせてネットワーク設計する必要があるため、膨大な帯域が必要になる。QoS 要求が極端に異なるトラヒックが混在する場合には、クラスに応じてトラヒックの扱いを分ける QoS 制御を導入した方が低コストになる。

既存の IP/光マルチレイヤネットワークに関する研究では、要求 QoS の異なる複数のクラスのトラヒックを対象にしたものはほとんどない。つまり、単一クラスのトラヒックを対象に、コストや波長数の削減を目的としたトラヒック収容効率の向上を目指したものがほとんどであり、ユーザの要求 QoS を満た

すような QoS 制御については考えられていない。IP/光マルチレイヤネットワークでは、QoS 機能をどのように構成し、どのような方式で、どのようなアルゴリズムを使えば良いかの検討が必要である。これらは、急拡大するトラヒック変動量の実測結果を考慮して、トラヒック変動に追従可能な柔軟な方式が望ましい。

従来の IP バックボーンネットワークを対象とした QoS 制御として、ネットワークに流入するトラヒックを高々6 クラスに分離し、クラス毎の要求 QoS に応じたバッファ管理とパケットスケジューリングにより、QoS 制御する DiffServ (Differentiated Services) アーキテクチャ [16] が知られている。ここでは、IP/光マルチレイヤネットワークの QoS 制御に向けて、DiffServ アーキテクチャにもとづく、IP レイヤと光レイヤのマルチレイヤを考慮した方式を検討対象とする。

次節で IP/光マルチレイヤネットワークにおける QoS 制御方式を提案する。そして、3. 節では、ノードでの必要ポート数の観点から、シミュレーションを用いて各方式を評価し、結果を4. 節で述べる。最後に、5. 節では、シミュレーション結果にもとづいて、コストの観点から考察を加える。

## 2. IP/光マルチレイヤネットワークへの QoS 制御の導入

IP/光マルチレイヤネットワークにおける一般的なノード内の機能構成例を、図1に示す [8], [15]。本ノードは、光レイヤと IP レイヤから構成され、光レイヤは、光クロスコネクタ機能 (OXC: Optical cross-connect)、波長多重機能 (MUX: Multiplexor)、波長分離機能 (DEMUX: De-multiplexor) から構成される。IP レイヤは、ルータ機能 (MPLS/IP Router)、波長伝送機能 (TX: Transmitter array)、波長受信機能 (RX: Receiver array)、光レイヤと IP レイヤを連携して制御するコントローラ機能 (Controller) から構成される。

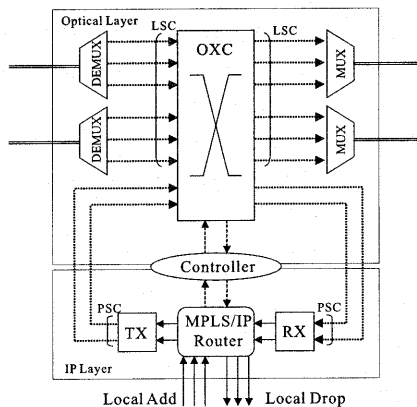


図1 IP/光マルチレイヤネットワークのノード構成例

このようなノードにおいて、OXC からルータ側につながるポートを PSC (Packet Switch Capable) ポート、波長多重/分離装置を経由して別のノードと接続するポートを LSC (Lambda Switch Capable) ポートと呼ぶ。PSC ポートは、LSC ポート

と比べると高価であり、ノードコストのほとんどを占めることが知られている[17]。そのため、文献[15]では、できるだけPSCポートの無いノードを使ってトラヒックを集約するアルゴリズムを検討している。

次に、以上で示したノードから構成されるネットワークにおけるQoS制御を検討する。

従来のIPバックボーンネットワークを対象としたQoS制御として、ネットワークに流入するトラヒックを高々6クラスに分離し、クラス毎の要求QoSに応じたバッファ管理とパケットスケジューリングにより、QoS制御するDiffServアーキテクチャ[16]が知られている。DiffServアーキテクチャでは、ドメインの入口のボーダールータにおいて、契約を越えるトラヒックに対して、マーキング/シェーピング/ドロップングを適用して、トラヒックの入力流量を規制し、各ルータにおいて、パケットのクラス情報にもとづき、クラス毎にあらかじめ規定した扱い(優先転送、帯域保証等)を適用する。特に、IPネットワークでは、各ルータにおいては、クラシファイヤ、クラス毎に設けたバッファ、パケットスケジューラから構成されるDiffServキューを送出ポートの直前に設け、クラシファイヤにてパケットをクラスに応じてバッファに振り分け、スケジューラにてクラス毎の優先度または設定帯域比にしたがう順序でパケットをバッファから取り出し、送出ポートに送ることになる。

ここでは、スケーラビリティの高いIPレイヤの転送と、大容量トラヒックを波長のまま転送する光レイヤの連携によるマルチレイヤネットワークの特徴を生かしたDiffServアーキテクチャにもとづくQoS機能構成を考える。その際に、波長パスをエンド-エンドで用いるかホップ・バイ・ホップで用いるかという転送方式の選択と、クラスの異なるトラヒックを分離する方法の選択が必要である。

まず、クラスの異なるトラヒックをネットワーク内で分離する方法として、従来のIPネットワーク上で実現するDiffServと同様に、ノード内のルータ機能におけるキュー処理(パケットスケジューリング)によってクラス分離する方法(DiffServキュー方式)と、光の波長をクラス数分用意し、クラス毎に異なる波長を用いる方法(クラス別波長パス方式)が考えられる。前者のDiffServキュー方式では、同一波長パスの中に複数クラスを混在できるため、波長数の節約が可能であるが、送出キューとして、クラス間の重みに応じた複雑なパケットスケジューリング処理をするDiffServキューを用いる必要がある。一方、クラス別波長パス方式では、クラス別に波長パスを用意する必要があるため、波長帯域の分割損が発生するが、ノードのルータ機能における波長パスからの送出キューとして、単一バッファにより到着順にパケットを蓄積/送出する簡易なFIFOキューを用いれば良い。

また、次の2通りの転送方式が可能である。1つ目は、IPホップ・バイ・ホップ転送方式であり、波長パスがノード間で分断されて、ノードでは、必ずIPレイヤ処理をしながら転送する。そのため、途中のノードでは、同じ方路であれば、異なる対地のトラヒックも集約可能であり、高いスケーラビリティを有する。もう一方は、波長パスカットスルー転送方式であり、

経由するノードでは、IPレイヤ処理をすることなく、ネットワークのエンド-エンドにおいて波長のまま光を伝送する。そのため、途中ノードでのトラヒック集約はできないが、大容量化が可能である。

以上より、マルチレイヤQoS制御方式を、クラスの異なるトラヒックの分離方法と転送方式にもとづいて、以下の4方式に分類する。

- (1) IPホップ・バイ・ホップ転送 + DiffServキュー方式
- (2) IPホップ・バイ・ホップ転送 + クラス別波長パス方式
- (3) 波長パスカットスルー転送 + DiffServキュー方式
- (4) 波長パスカットスルー転送 + クラス別波長パス方式

これらの(1)~(4)の方式は、同時に実現可能であり、適切に組み合わせることにより、クラス毎に所定のQoSを確保しつつ、低コストで大容量のトラヒックを収容可能となると考えられる。例えば、トラヒック量が少ない対地には方式(1)を、トラヒック量が多い対地には方式(3)を、ある対地の特定のクラスのトラヒックが多ければ方式(4)を採用するといった運用も考えられる。

### 3. シミュレーション評価

前節の各方式において、IPホップ・バイ・ホップ転送を波長パスカットスルー転送と比較すると、各リンクにて複数対地のトラヒックを1つの波長に集約できるため、波長を有効利用できるが、各ノードで光からIPパケットへの変換が必要になるというコスト的なトレードオフの関係がある。また、DiffServキューによってクラスの異なるトラヒックを分離する場合とクラス別波長パスによって分離する場合とでは、前者では、FIFOキューと比較したDiffServキューのコスト増、後者では、クラス毎に波長を用意する必要があることから、コスト的なトレードオフの関係がある。さらに、これらを組み合わせた上記(1)~(4)では、どれがコスト的に良いかは明らかではない。

ここでは、シミュレーション実験により、前節の4方式をコストの観点から比較する。既存研究では、交流トラヒック量が固定の場合のトラヒック収容効率、または、設備量固定のもとでの呼損率による評価が中心であった。ここでは、トラヒック量を固定せず、徐々に増加した場合に、トラヒックを全てネットワークに収容した際のコストに関するPSCポート数とLSCポート数、LSCポート間の波長内帯域使用率によって比較評価する。

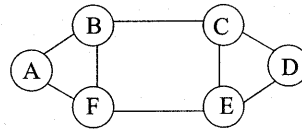


図2 ネットワークトポロジ

シミュレーションには、図2に示す6ノードのメッシュネットワークトポロジを用い、1波長の帯域を10Gbpsとし、リンクに波長数の上限を設けない。クラスは3クラスとし、各クラスのトラヒックの割合を8:1:1とする。このネットワークを対象に、以下の手順でトラヒックを増加させながら、トラヒック

クを収容した際の PSC ポート数, LSC ポート数, LSC ポート間の波長内帯域使用率という評価尺度を計算する。

- 対地を均等な割合でランダムに選択
- クラスを上記の比で重み付けしてランダムに選択
- その対地にそのクラスのトラフィックを 100Mbps 分増加
- 各方式にもとづき, 最短経路にてトラフィックを収容
- 帯域が足りない場合は, 波長 (PSC, LSC) を追加
- 評価尺度を計算
- 最初から繰り返し

#### 4. シミュレーション結果

(1)IP ホップ・バイ・ホップ転送 + DiffServ キュー方式では, トラフィック量が 1Tbps 増加すると LSC ポート数, PSC ポート数ともに, 300 程度のほぼ一定の割合で増加している (図 3, 4)。また, 本方式は, 全てのトラフィック量において, LSC ポート数を最も少なくでき, また, LSC ポート間の波長内帯域については, 最も高い使用率となっている (図 3, 5)。

(2)IP ホップ・バイ・ホップ転送 + クラス別波長パス方式では, トラフィック量の増加にともなう PSC ポート数の増加は, 方式 (1) とほぼ同程度の一定の割合で増加し (図 4), LSC ポート数の増加は, 方式 (1) よりも 30~60 程度多い一定の割合で増加している (図 3)。

(3) 波長パスカットスルー転送 + DiffServ キュー方式では, トラフィック量が少ない場合, トラフィックがほとんど流れていなくても波長を全ての対地に用意する必要があるため, 必要な LSC ポート数, PSC ポート数ともに, 方式 (1) よりも 50~60 程度多くなっている (図 3, 4)。さらに, LSC ポート数については, トラフィック量が 300Gbps 増加する毎に階段状に増加するが, 長時間でみると, 方式 (1), (2) とほぼ同程度の一定の割合で増加している (図 3)。一方, PSC ポート数については, トラフィック量が 300Gbps 増加する毎に階段状に増加するが, 1Tbps のトラフィック増加に対して, 200 程度の増加であり, 方式 (1), (2) と比べて, 増加傾向は緩やかで, 2Tbps のトラフィック量では, 200 程度削減できている (図 4)。

(4) 波長パスカットスルー転送 + クラス別波長パス方式では, 方式 (3) と比べて, 同一対地に波長をクラス数分用意する必要があるため, トラフィック量が少ない場合の LSC ポート数, PSC ポート数は, 方式 (3) の場合のほぼ 3 倍必要になっている (図 3, 4)。その後, LSC ポート数については, トラフィック量が 300Gbps 増加する毎に階段状に増加し, 全体として, 他方式よりも 100 から 150 程度多く必要としている (図 3)。一方, PSC ポート数については, 方式 (3) と同様に, トラフィック量が 300Gbps 増加する毎に階段状に増加するが, 1Tbps のトラフィック増加に対して, 200 程度の増加であり, 方式 (1), (2) と比べて, 増加傾向は緩やかである (図 4)。ただし, 同一対地に波長をクラス数分用意する必要があるため, トラフィック量が少ない初期での差があり, PSC ポート数は方式 (3) と比べると 50 から 150 程度多く必要としている (図 4)。また, 本方式は, 全てのトラフィック量において, LSC ポート間の波長内帯域が, 最も低い使用率となっており, 帯域使用効率の悪い方式といえる

(図 5)。ただし, トラフィック量が多くなるにつれて, PSC ポート数, LSC ポート数, 波長の帯域使用率全てにおいて, 方式 (3) の曲線に近づいており, 十分トラフィック量が多くなれば, 波長によるクラスの分割損が解消される (図 3~5)。

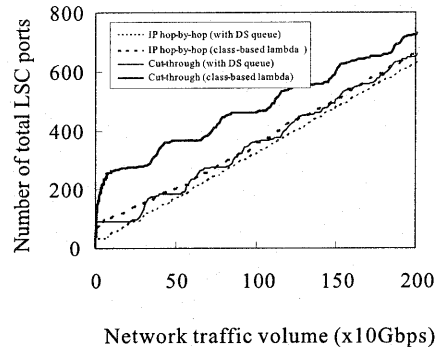


図 3 トラフィック量に対する LSC ポート数

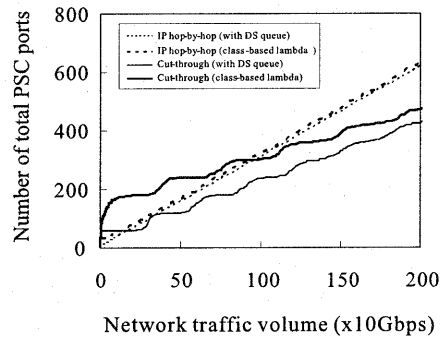


図 4 トラフィック量に対する PSC ポート数

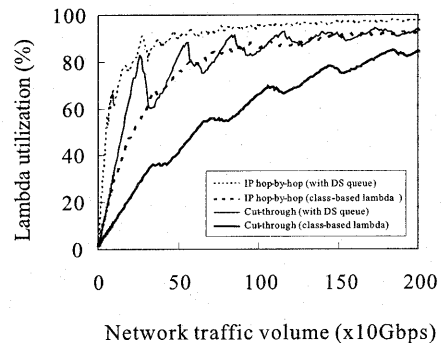


図 5 トラフィック量に対する波長パスの帯域使用率

#### 5. 考 察

必要とされる PSC ポート数と LSC ポート数という低コスト化の観点, および, 波長の帯域使用効率という観点からは,

クラスの異なるトラフィックを、波長によって分離するよりも、ノード内の DiffServ キューによって分離する方が良いといえる。ただし、IP ホップ・バイ・ホップ転送では、必要とされる PSC ポート数と LSC ポート数において、その差はほとんどない。波長パスカットスルー転送においても、その差は徐々に縮まっており、他のクラスに比べて極端にトラフィック量の多いクラスがあれば、そのクラスのみ波長で分けるようにすれば、低コスト化ははかれると予想される。別のコスト要因として、波長によりクラス分離する場合には、DiffServ キューよりも低価格の FIFO キューを用いることができるので低コストになる。

また、波長パスカットスルー転送では、IP ホップ・バイ・ホップ転送よりも、必要とされる LSC ポート数は多く、LSP ポートよりも高価な PSC ポート数 [17] は、トラフィック量が少ない時には多いが、トラフィック量が多くなると少なくなり、その差はかなり大きくなる。低コスト化の観点からは、トラフィック量が少ない時には、IP ホップ・バイ・ホップ転送が有利で、トラフィック量が多くなれば、波長パスカットスルー転送が有利になるといえる。

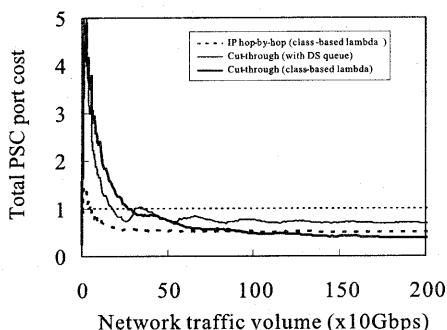


図 6 PSC ポートの方式 (1) に対するコスト比 ( $k = 2$  の場合)

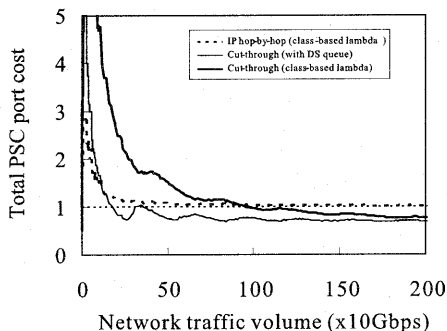


図 7 PSC ポートの方式 (1) に対するコスト比 ( $k = 1$  の場合)

PSC ポートコストは、ルータの送出キューとして DiffServ キューを採用するか、FIFO キューを採用するかで大きく異なる。今、DiffServ キューの単価を  $C_d$ 、FIFO キューの単価を  $C_f$  とする。クラスの異なるトラフィックを波長によって分離する場合、

FIFO キューを採用するため、PSC ポート数を  $N_p$  とすると、FIFO キュー数は  $N_p$  であり、ネットワーク全体の PSC ポートのコストは、 $C = C_f N_p$  となる。一方、ノード内の DiffServ キューによって分離する場合は、DiffServ キュー数を  $N_d$  とすると  $C = C_d N_d$ 。1DiffServ キューあたりの平均 PSC ポート数を  $N_m$  とすると、 $N_p = N_d N_m$ 。今仮に、 $C_d = f(N_m) = k C_f N_m$  ( $k > 0$ ) と仮定すると、 $C = k C_f N_p$  と表せる。一般に DiffServ キューは、FIFO キューよりも単価が高いことから、 $k \geq 1$  である。

ここで、図 4 のシミュレーション結果にもとづき、DiffServ キューの単価を FIFO キューの 2 倍 ( $k = 2$ ) と見積もった場合と、等しい ( $k = 1$ ) と見積もった場合のネットワーク全体の PSC ポートコストを方式 (1) に対するコスト比として計算する。 $k = 2$  および  $k = 1$  の結果を、それぞれ、図 6, 7 に示す。DiffServ キューの単価を考慮し、 $k = 2$  とすると、トラフィック量が 100Gbps 以下では、方式 (1) が最低コスト、100Gbps~800Gbps では、方式 (2) が最低コスト、800Gbps を越えると、方式 (4) が最低コストとなる。 $k$  の値が大きければ、更にこの傾向は強まる。一方、 $k = 1$  に近づくと、トラフィック量が 200Gbps 以下では、方式 (1) が最低コスト、200Gbps を越えると、方式 (3) が最低コストとなる。また、方式 (4) は、トラフィック量が多くなると、最も急速にコスト低下し、方式 (3) に近づいており、2Tbps 以上ではほとんど同等となる。方式 (1) と (2) では、400Gbps 以上になるとほとんど同等となる。

以上までの考察から、各方式の適用領域を整理すると、表 1 のようになる。

表 1 各方式の適用領域

	DiffServ キュー単価	
	安価な場合	高価な場合
トラフィック量が少ない場合	(1), (2), (3)	(2)
トラフィック量が多い場合	(3), (4)	(4)

DiffServ キューが高価であれば、トラフィック量に応じて、方式 (2) と (4) を使い分ける。DiffServ キューを安価にできれば、トラフィック量に関係なく方式 (3) を単独で使うか、トラフィック量に応じて、方式 (1) と (3) または方式 (2) と (4) を使い分けることが考えられる。

このように、4 方式それぞれに適用領域があり、これらの特徴を考慮して、トラフィック量やクラスの割合に応じて、方式の組み合わせを検討し、適切に使い分けることが必要である。方式の選択条件の定量化は今後の課題である。さらに、今回は波長パスおよび IP パケット転送の経路として最短経路を採用したが、クラスに応じて転送レイヤを変えたり、経路計算アルゴリズムを変えることにより、柔軟かつ低コストな経路設定が可能になると予想される。このようなマルチレイヤネットワークでのクラスを考慮した経路計算アルゴリズムの検討も課題である。

## 6. まとめ

IP レイヤのホップ・バイ・ホップ転送と光レイヤの波長パ

スカットスルー転送を同時にサポートするマルチレイヤネットワークにおいて、DiffServ アーキテクチャにもとづく QoS 制御方式を検討した。まず、ネットワーク内でクラスの異なるトラフィックを分離する方法の違い (DiffServ キューによるクラス分離と波長によるクラス分離)、転送方式の違い (IP ホップ・バイ・ホップ転送と波長パスカットスルー転送) にもとづいて分類される 4 方式を示し、これらを同時に実現するためのノードにおける QoS 機能構成を示した。さらに、シミュレーション実験を実施し、トラフィック増加に応じたノードでの必要ポート数により、4 方式を比較評価した。その結果、トラフィック量が少ないうちは、IP ホップ・バイ・ホップ転送が低コストであるが、トラフィック量が多くなると、波長パスカットスルー転送のコスト増加傾向が急速に緩やかになることが分かった。最後に、トラフィック量と DiffServ キューのコストの観点から、4 方式の適用領域を示した。

謝辞 IP/光マルチレイヤネットワークに関する貴重な示唆をいただいた NTT ネットワークサービスシステム研究所の漆谷重雄氏、青木道宏氏、樺島啓介氏、ならびに、NTT アドバンステクノロジー株式会社の谷上徹氏に感謝します。

#### 文 献

- [1] JPIX Traffic Volume Statistics, <http://www.jpix.co.jp/jp/technical/traffic.html>.
- [2] NSPIX2 Traffic, <http://nspixp.sfc.wide.ad.jp/Traffic/>.
- [3] 川田丈浩, 木村卓巳 “品質制御ネットワークにおけるクラス設計法の検討,” 信学技報, IN2003-19, 2003 年 6 月.
- [4] E. Mannie et al., “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture,” Internet Draft, work in progress, draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-07.txt, May 2003.
- [5] A. Banerjee et al., “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements,” IEEE Commun. Mag., pp. 144–50, Jan. 2001.
- [6] C. Xin et al., “On an IP-Centric Optical Control Plane,” IEEE Commun. Mag., Vol. 39 No. 9, pp. 88–93, Sep. 2001.
- [7] B. Rajagopalan et al., “IP over Optical Networks: Architectural Aspects,” IEEE Commun. Mag., Vol. 38 No. 9, pp. 94–102, Sep. 2000.
- [8] K. Sato et al., “GMPLS-Based Photonic Multilayer Router (Hikari Router) Architecture: An Overview of Traffic Engineering and Signalung Technology,” IEEE Commun. Mag., Vol. 40, No. 3, pp. 96–101, Mar. 2002.
- [9] 青木道宏 他, “マルチレイヤネットワークアーキテクチャの一検討,” 2003 信学総大, B-6-41, 2003 年 3 月.
- [10] 大木英司 他, “GMPLS ネットワークにおけるマルチレイヤダイナミックルーティング,” 信学技報, CS2003-2/OCS2003-9/PS2003-9, 2003 年 5 月.
- [11] J. Comellas et al., “Integrated IP/WDM Routing in GMPLS-Based Optical Networks,” IEEE Network, pp. 22–27, Mar./Apr. 2003.
- [12] S. Sengupta and R. Ramamurthy, “From Network Design to Dynamic Provisioning and Restoration in Optical Cross-Connect Mesh Networks: An Architectural and Algorithmic Overview,” IEEE Network, Vol. 15, No. 4, pp. 46–54, Jul./Aug. 2001.
- [13] D. Awduche and Y. Rekhter, “Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Cross Connects,” IEEE Commun. Mag., Vol. 39, No. 3, Mar. 2001.
- [14] P. Iovanna et al., “A Traffic Engineering System for Multilayer Networks Based on the GMPLS Paradigm,” IEEE Network, pp. 28–37, Mar./Apr. 2003.
- [15] K. Zhu et al., “Design of WDM Mesh Networks with Sparse Grooming Capability,” Proc. IEEE GLOBECOM '02, Nov. 2002.
- [16] S. Blake et al., “An Architecture for Differentiated Services,” RFC 2475, Dec. 1998.
- [17] 上山憲明, “バックボーンネットワークにおける全光アーキテクチャに関する検討,” 信学技報, CS2003-6/OCS2003-13/PS2003-13, 2003 年 5 月.