

# WDM を用いたパケット/パス光統合ネットワークの転送遅延の評価

筒井 宣充<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

E-mail: †{n-tsutsui,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし WDM 技術のインターネットへの適用形態として、パケット交換型の IP over WDM や、パス交換型の通信方式が広く検討されている。本稿では、パケット交換ネットワークとパス交換ネットワークに対してそれぞれ波長を割当てることで実現するパケット/パス統合ネットワークの性能を評価する。割当波長数を固定とした場合に、データ転送要求が発生してからデータ転送が完了するまでの時間であるレイテンシを求めた結果、トラフィック負荷に依存して最適な割当波長数が定まることがわかった。さらに、パケット交換ネットワークのバッファサイズが小さい場合、バッファで生じる遅延が小さくなり、レイテンシが低減されることもわかった。そこで、様々なトラフィック負荷においてレイテンシを低減するために、パケット交換ネットワークの平均キュー長の値にもとづいて動的に割当波長数を変更する手法を考案し、手法の有効性を示す。計算機シミュレーションの結果、動的に割当波長数を変更することでパケット交換ネットワークのバッファのキュー長が小さくなり、パケット/パス統合ネットワークのレイテンシが低減されることが明らかとなった。

キーワード パケット/パス統合ネットワーク, IP over WDM, 回線交換, 波長ルーティング, Transmission Control Protocol, レイテンシ

## Latency Analysis of Packet/Path Integrated Architecture for WDM-based Optical Networks

Notimitsu TSUTSUI<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †{n-tsutsui,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology multiplexes optical signals that take different wavelengths into the optical fiber, and offers a high bandwidth transmission. As an application of the WDM technology to the Internet, several network architectures have been discussed; packet-based architecture such as IP over WDM and path-based architecture that establish a lightpath between nodes on-demand basis. In this paper, we consider a packet/path integration for WDM-based optical networks. The main advantage of the packet/path integration is to enjoy strengths of both packet switching paradigm and circuit switching paradigm. We evaluate the performance of packet/path integrated network via computer simulations with respect to the latency, which is defined from when a data transfer request arises to when the data transfer completes, and then demonstrate that the latency much depends on the allocation of wavelength resources to the packet switched network. We therefore develop an wavelength allocation algorithm which are based on the queue length of buffer in packet switched network. Computer simulations show that our algorithm lowers the latency of the packet/path integrated network even when the arrival rate of data transfer requests drastically changes.

**Key words** packet/path integration, IP over WDM, circuit switching, wavelength routing, Transmission Control Protocol (TCP), latency

## 1. はじめに

Wavelength Division Multiplexing (WDM) 技術 [1] は、光ファイバに波長の異なる複数の光信号を同時に多重し伝送することで、大容量のデータ転送が可能となる技術である。

WDM 技術を用いた通信形態として様々な方式が考えられている [2]~[4]。IP-over-WDM [2], [3] では、WDM の波長ルーティングを用いて光パスを設定することで仮想ネットワークポロジ (VNT) を構築し、IP ネットワークでは VNT 上において、パケット交換により IP パケットを転送する。光パスは、IP ネットワークの視点では仮想的なリンクであり、光パス上の IP パケットの処理は不要となる。従って、IP ルータの処理負荷を低減しつつ、WDM による大容量通信が可能となる。しかし、他ユーザのトラヒックと競合し、パケット棄却や遅延が増加する [5]。一方、通信要求が発生した際に送受信ノード間に光パスを設定し、光パス上でデータ転送を行い、データ転送後に光パスを開放するパス交換型のデータ転送方式が検討されている [4]。パス交換型のデータ転送方式では、波長資源を占有してデータを転送するため、光パス上では任意の転送プロトコルを利用することができる。従って、例えば [6] などの高スループットを提供可能な転送プロトコルを用いることで効率の良い通信が可能となる。しかし、通信要求発生から光パスが確立されるまでの遅延時間の影響により、通信要求の負荷が高くなるとともに光パスの確立に失敗する確率が高くなる。パケット交換型とパス交換型の通信形態にはそれぞれ長所と短所があり、最適な通信形態はネットワークを利用するアプリケーションに大きく依存する。現状のインターネットは、パケット交換原理にもとづく通信形態が主流であるが、トラヒックの増大や関連技術の進展にともない様々な課題が顕在化している。例えば、1) パケット交換により高い回線利用率を達成するためには、ルータのバッファの大容量化と高速化が重要となるが、回線容量の増大とともに必要量の確保が難しい、2) パケット交換はバッファリングを前提としており、その結果、通信品質の保証が困難となっている、3) また、通信品質をある程度保証するためには、回線容量やルータ処理能力のオーバプロビジョニングが必須となる、4) パケット毎に宛先探索等の処理が必須となるため、パケット数の増加とともに消費電力も増大する、5) 回線容量の増大にともない、パケットのヘッダ処理速度も向上させる必要があり、それにともないインタフェースコストが増大する、などが挙げられる。従って、単にパケット交換型もしくはパス交換型のネットワークを構築するのみでは、近年の多様なアプリケーションやサービスが必要とする通信品質への要求・要望を満たすことは困難であり、パケット交換型ネットワークとパス交換型ネットワークを融合し、それぞれの長所を生かすことが可能なパケット/パス統合ネットワークを構築することが重要であると考えられる。

我々は、このような観点からパケット/パス統合ネットワークの構築に向け、その性能評価に取り組んでおり、パケット交換ネットワークとパス交換ネットワークに対してそれぞれ波長を割当てることで実現するパケット/パス統合ネットワークを検討

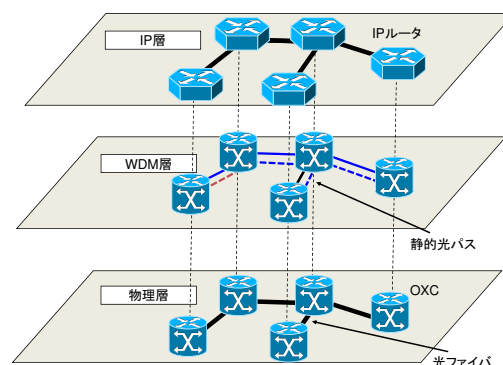


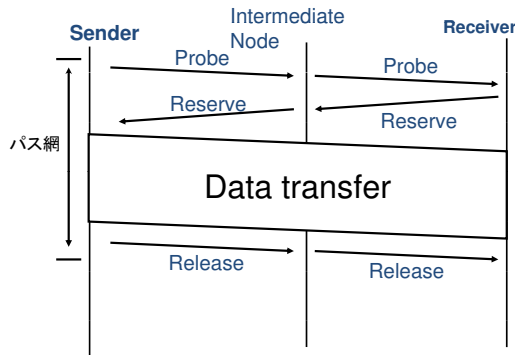
図1 ネットワークアーキテクチャ (パケット交換ネットワーク)

している。文献 [7] では、M/M/1/K 待ち行列と反復計算に基づく近似解析手法を用いて、パケット/パス統合ネットワークの性能を評価し、リクエスト到着率やデータサイズなどの違いがネットワークスループット性能に与える影響を明らかにしている。しかし、そこでは定常状態でのネットワークスループットが議論されるのみであり、ユーザが享受するネットワーク性能については明らかになっていない。そこで、本稿では、ユーザに対して通信品質の評価指標として、データ転送要求が発生してからデータ転送が完了するまでの時間 (以降では、レイテンシと呼ぶ) を用いてパケット/パス統合ネットワークの性能を評価する。まず、ネットワーク運用前にパケット交換ネットワークおよびパス交換ネットワークにそれぞれ波長を割り当てる静的波長割当方式を対象として、様々な割当波長数でのレイテンシを計算機シミュレーションにより評価する。その結果、トラヒック負荷に依存して最適な割当波長数が定まることがわかった。また、パケット交換ネットワークのみを用いてデータ転送を行う場合に比べて、統合ネットワークのレイテンシが、抑えられることが分かった。そこで、様々なトラヒック負荷でレイテンシを低減するために、割当波長数を動的に変更可能なパケット/パス統合ネットワークを検討し、その性能を明らかにする。まず、割当波長数を動的に変更可能なノードアーキテクチャの一例を提示する。次に、パケット交換ネットワークのバッファ長の平均キュー長にもとづき割当波長数を変化させる動的波長割当方式を示し、これによりトラヒック量に変化が生じた場合にも、レイテンシが低減されることを示す。

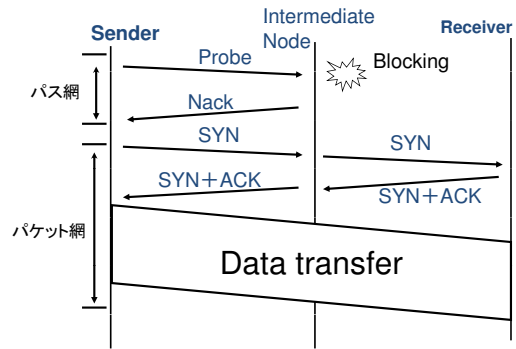
本稿の構成は以下の通りである。2章において、パケット/パス統合ネットワークのアーキテクチャを説明する。3章では、波長を静的に割り当てた場合のパケット/パス統合網の性能評価を行う。4章では、3章の結果にもとづき、動的に波長を割り当てることでレイテンシを低減する。動的に波長を割当可能なノードアーキテクチャの一例を提示し、また、波長数割当手法を述べるとともに数値結果を示す。最後に、5章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. パケット/パス統合ネットワーク

本稿で対象とするパケット/パス統合ネットワークは、パケット交換ネットワークとパス交換ネットワークにそれぞれ波長を



(a) 光パス確立に成功する場合



(b) 光パス確立に失敗する場合

図3 パケット/パス統合ネットワークにおけるデータ転送完了までの制御フロー

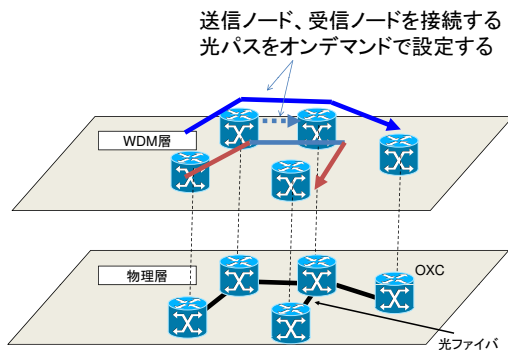


図2 ネットワークアーキテクチャ (パス交換ネットワーク)

割当て、それぞれのネットワークで独立して動作する (図1, 2). パケット/パス統合ネットワークの各ノードは、IP ルータと光クロスコネクタ (OXC) により構成される。また、ネットワークのエッジノードには IP パケットを送信可能なネットワークインタフェースと、光パスに利用可能な波長を出力するネットワークインタフェースがあるものとする。

パケット交換ネットワークでは、割り当てられた波長を用いてノード間に光パスを設定し、Virtual Network Topology (VNT) を構成する。ノードにパケットが到着すると、VNT 上での次ノードへと転送される。一方、パス交換ネットワークでは、エッジノード間にデータ転送要求が発生すると、オンデマンドで送受信ノード間に光パスを設定する。本稿では、RSVP [8] 型のシグナリングにより経路上の各 OXC を設定することで光パスを設定する。

エッジノードには二つのネットワークインタフェースがあり、データ転送要求が発生した際に、パケット交換ネットワークもしくはパス交換ネットワークを選択してデータを転送することが可能である。ネットワークの選択方法については様々な方式があるが、結局のところトラヒック特性に依存すると考えられるため、本稿では下記の簡単な選択方法を用いる [7]。パケット/パス統合網においてデータ転送要求が発生した場合、送信ノードはまずパス交換網による通信を試みる。送受信ノード間の光パス設定に成功した場合、設定された光パスの帯域を全て使用

してデータを転送する。光パス設定に失敗した場合は、パケット交換ネットワークを用いて TCP によるデータ転送を行う。上述の制御によるタイムチャートを図3に示す。光パス確立に失敗する場合は、シグナリングのための遅延が生じることになる。この遅延を削減するためには、パケット交換ネットワークとパス交換ネットワークの両方に並行して制御パケットを送信する方式が考えられるが、他方式の評価は今後の課題としたい。なお、以降の3章および4章の数値結果で示すように、シグナリングのための遅延はレイテンシにはほとんど影響しないことを確認している。

### 3. パケット/パス統合ネットワークのレイテンシ評価 - 静的波長割当の場合 -

#### 3.1 評価環境

評価で用いるネットワークを図4に示す。ネットワークは、送信ノード (Sender)、受信ノード (Receiver)、および、ルータ (Router) からなり、ダンベル型で構成される。ルータ間には WDM 技術により  $W$  波長が多重され、送信ノードから受信ノードにトラヒックが転送される。本評価では、送信ノードとルータとの間のリンクの帯域は十分に大きいとする。すなわち、ルータ間のリンクがボトルネックリンクとなる。ルータには、256MB の出力バッファが1つあるものとし、パケット交換ネットワークで利用する。出力バッファでは FIFO (First-In First-Out) に基づいてパケットが処理され、バッファ溢れが生じると Drop-Tail によりパケットを棄却する。送信ノードは、パケット交換ネットワークを用いてパケットを転送する際には、TCP Tahoe を用いてパケットを転送し、パス交換ネットワークを用いる場合は、光パスを排他的に利用できることから、すべての帯域を用いてデータを転送する。その他のシミュレーションパラメータは、表1の通りである。

#### 3.2 評価指標

パケット/パス統合ネットワークにおいて、データ転送要求が発生してからデータ転送完了までの時間をレイテンシとして定義し、その平均値を評価指標として用いる。平均レイテンシは、以下の式を用いて算出する。

表 1 パラメータ設定

ノード数	120 ODpair
ファイルサイズ	1Gbit の指数分布
OXC 設定遅延	0
リンク伝搬遅延	10ms
1 波長の帯域	10Gbps
波長予約方式	バックワード方式
トポロジ	ダンベル型
到着間隔分布	指数分布
波長多重数	8
バッファサイズ	256MB

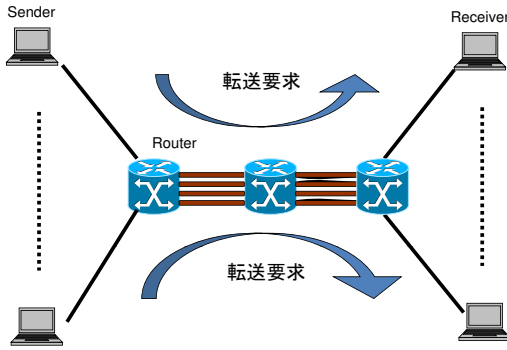


図 4 ダンベル型ネットワーク

$$L = \left( \sum_{i=1}^{n_c} P_i + \sum_{k=1}^{n_p} B_k + \sum_{k=1}^{n_p} T_k \right) / (n_c + n_p). \quad (1)$$

$n_c, n_p$  は、パケット/パス統合ネットワークで発生したデータ転送要求のうち、それぞれパス交換ネットワーク、パケット交換ネットワークでシミュレーション時間内にデータ転送が完了した数である。

$P_i$  は、 $i$  番目にパス交換ネットワークで、転送要求が発生してから、パス交換ネットワークでデータ転送が完了したリクエストの転送遅延時間を表わす。 $B_k$  は、 $k$  番目に転送要求が発生してから、パス交換ネットワークの資源が利用できず、パケット交換ネットワークに転送要求を発生させるまで、 $T_k$  は、 $k$  番目にパケット交換ネットワークで TCP コネクション設定が開始されてから、データ転送が完了したリクエストの転送遅延時間である。

### 3.3 シミュレーション結果

ボトルネックリンクの  $W$  波長のうち、パス交換ネットワークに割り当てる波長数を変化させた時のパケット/パス統合ネットワークの平均レイテンシを図 5 に示す。本シミュレーションでは、シミュレーション開始時にパス交換ネットワークに割り当てる波長数を定め、シミュレーション中は波長割当数は変更していない。また、図中には、ボトルネックリンクに到着するデータ転送要求の到着率を 9.6 requests/s (以降、低負荷)、および、28.8 requests/s (以降、高負荷) とした場合の結果を示している。低負荷 (図 5 の LowLoad) の場合、パス交換ネットワークに割り当てる波長数が増えるほど、パス交換ネットワークで収容されるリクエスト数が増加し、レイテンシが低下していることがわかる。一方、高負荷 (図 5 の HighLoad) では、パス

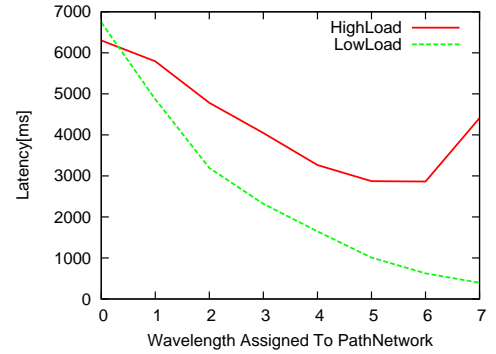


図 5 パケット/パス統合ネットワークの平均レイテンシ

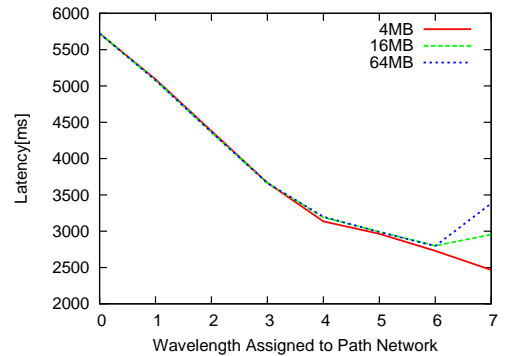


図 6 バッファサイズの変更によるレイテンシの変化

交換ネットワークに割り当てる波長数が 5 波長もしくは 6 波長の場合に、平均レイテンシが最も低くなっている。これは、パス交換ネットワークに多くの波長を割り当て、収容されるリクエスト数を増やすことで、レイテンシは低減させるものの、パケット交換ネットワークの帯域が十分確保されず、TCP コネクション間でのパケットの競合が起き、パケット交換ネットワークのレイテンシが増大するためである。このことは、トラヒックの負荷やトラヒック特性に応じて最適な割当波長数が定まることを意味しており、レイテンシを低減するためには、ネットワーク環境に応じて動的に割当て波長数を変更することが望ましい。そこで、4 章において、動的に割当て波長数を変更するため手法を示し、レイテンシが確実に低減されることを示す。

次に、パケット/パス統合ネットワークにおいて、ルータのバッファサイズを小さく抑えられることを示すために、ルータのバッファサイズを 4MB、16MB、64MB のそれぞれに対し平均レイテンシを求めた結果を、図 6 に示す。横軸の値は、パス交換ネットワークへの割当波長数である。ここでは、ボトルネックリンクに到着するデータ転送要求は、38.4 requests/s としている。この図から、パス交換ネットワークの割当波長数が 7 の場合、バッファサイズが小さい方がレイテンシが低くなる。これは、バッファサイズが大きい場合はキュー内パケット数が多くなり、その結果 TCP のレイテンシが大きくなるためである。また、パケット交換ネットワークのみを用いてデータ転送を行う場合 (図 6 の横軸が 0) に比べて統合ネットワークのレイテンシは、約 25% 程度に抑えられることが分かった。

#### 4. パケット/パス統合ネットワークのレイテンシ評価 – 動的波長割当の場合 –

前章では、静的に波長を割当てた場合のパケット/パス統合ネットワークのレイテンシを示した。その結果、最適な波長割当て数はトラフィック負荷に依存することが明らかとなった。そこで、本章では、パス交換ネットワークへの波長割当て数を動的に変更する手法を示し、その有効性を評価する。まず、4.1節では、動的に波長割当てが可能なノードアーキテクチャの一例を示し、続いて4.2節および4.3節において動的波長割当手法を述べ、シミュレーション結果を示す。

##### 4.1 ノードアーキテクチャ

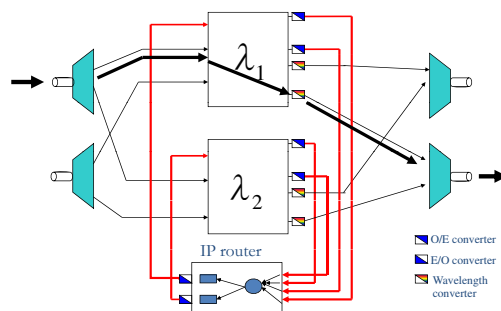
計算機シミュレーションで想定するノードアーキテクチャを図7に示す。簡単化のため、図7では、ノードに対して入力リンク数および出力リンクは2とし、波長多重数を2としている。図7(a)は、パス交換ネットワークを用いてデータを転送する場合の光信号の経路を示しており、光パス上のパケットはIPルータで処理されることなく入力ポートから出力ポートへと転送される。図7(b)は、パケット交換ネットワークを用いてデータを転送する場合のパケットの経路を示しており、入力ポートのある特定の波長に到着するパケットは、電気信号に変換されてバッファに蓄えられる。バッファ内ではIPの経路処理が行われ、再度、電気信号から光信号に変換されて、任意の出力ポートに転送される。ノードの制御部では、IPルータのバッファ利用状況を観測し、キュー長の情報を用いて波長割当て数を決定する。割当て波長数の変更は、光クロスコネクタの出力をIPルータもしくは出力ポートへと切り替えることによって実現する。本稿では、IPルータのポート数および光クロスコネクタのポート数は必要十分数あるものとしている。

##### 4.2 動的波長割当手法

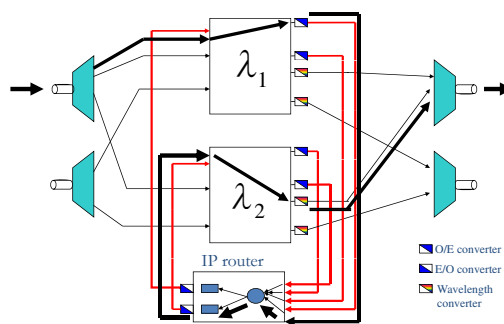
パケット交換ネットワークおよびパス交換ネットワークに割当てられる波長数を決定するアルゴリズムは以下の通りである。

- Step. 1: 一定時間ごとにバッファのキュー長を計測し、平均値を求める
- Step. 2: Step. 1で計測したキュー長がバッファサイズの80%以上の場合、Step. 3へ。30%以下の場合、Step. 4へ。それ以外はStep. 1へ。
- Step. 3: パス交換ネットワークに割り当てている波長数を1減らし、パケット交換ネットワークに割り当てている波長数を1増やす。Step. 1へ
- Step. 4: パス交換ネットワークに割り当てている波長数を1増やし、パケット交換ネットワークに割り当てている波長数を1減らす。Step. 1へ

本アルゴリズムでは、パケット交換ネットワークのキュー長を観測し、平均キュー長が大きい場合には、パケット交換ネットワークを用いて転送されるパケットが多いと判断し、パケット交換ネットワークに割り当てられる波長数を増やし、キュー内パ



(a) パス交換ネットワークとして用いる場合



(b) パケット交換ネットワークとして用いる場合

図7 ノードアーキテクチャ

ケット数を削減する。また、平均キュー長が小さい場合には、パケット交換ネットワークに割り当てられる波長数を減じている。

##### 4.3 シミュレーション結果

パケット/パス統合ネットワークにおいて、動的に割当て波長数を変更することの効果を実験シミュレーションにより明らかにする。シミュレーション環境は、3.1節と同じとしている。ただし、本シミュレーションにおいては、データ転送要求の平均到着率は通常時は4.8 requests/sとし、シミュレーション中に2回高負荷(28.8 requests/s)の状態を発生させている。高負荷となる期間は、200sから280s、および、500sから580sとしている。

図8に、シミュレーション時刻に対する平均キュー長を示す。平均キュー長は20sごとに算出している。図8(a)は、シミュレーション開始時に7波長をパス交換ネットワーク、1波長をパケット交換ネットワークにそれぞれ割当て、シミュレーション中は割当て波長数を変更していない。この図を見ると、200sおよび500sにデータ転送要求が増加し、それにもとない平均キュー長が大きく増加している。一方、動的波長割当手法を適用した場合(図8(b))は、平均キュー長の上昇が抑えられていることがわかる。図9は、パケット交換ネットワークを用いて転送された各TCPコネクションのレイテンシを示した結果である。この図から、動的波長割当手法を適用することでパケット交換ネットワークのバッファのキュー長が低く抑えられ、TCPコネクションのレイテンシが低減されていることがわかる。パ

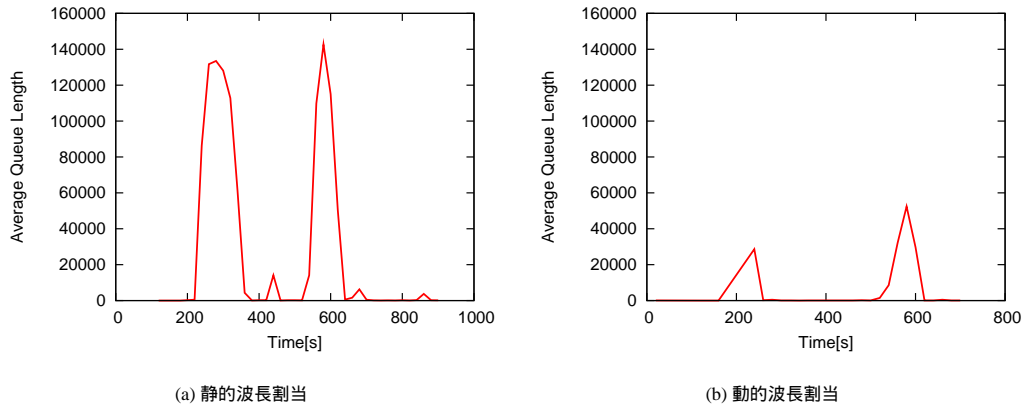


図 8 平均キュー長の時間変化

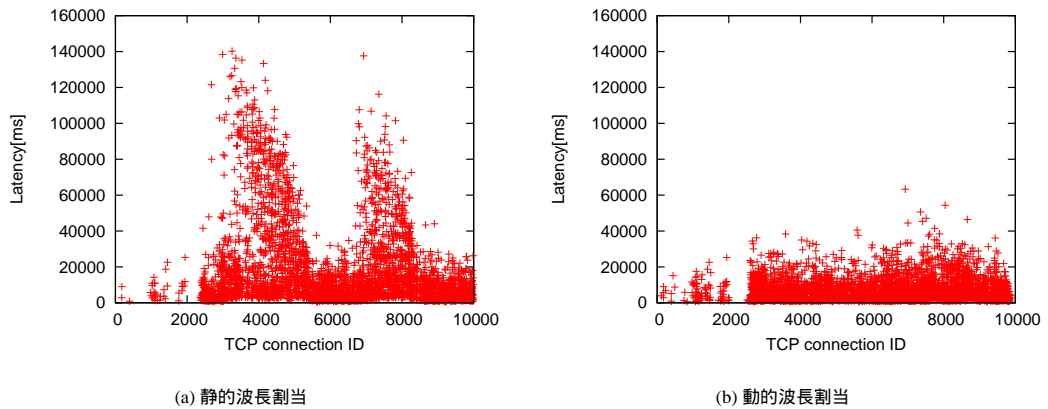


図 9 各 TCP コネクションのレイテンシ

ス交換ネットワークを用いたデータ転送のレイテンシは同一であるため、TCP コネクションのレイテンシを低減することで、パケット/パス統合ネットワークのレイテンシも低減される。

## 5. おわりに

本稿では、パケット交換ネットワークとバス交換ネットワークに対してそれぞれ波長を割り当てることで実現するパケット/パス統合ネットワークの性能を評価した。割り当て波長数を固定とした場合に、データ転送要求が発生してからデータ転送が完了するまでの時間であるレイテンシを求めた結果、パケット/パス統合ネットワークはパケット交換ネットワークと比較して 25 イズが小さい場合、バッファで生じる遅延が小さくなり、レイテンシが低減されることもわかった。次に、様々なトラフィック負荷におけるレイテンシを低減するために、バッファのキュー長にもとづいて動的に波長割り当て数を変更する手法を考案し、計算機シミュレーションによりレイテンシが低減されることを示した。本稿では、ダンベル型のトポロジを対象として性能評価をおこなったが、今後は EON トポロジなどのより大きいネットワークに適用可能な動的波長割り当て手法を検討し、評価する必要がある。

## 文献

[1] C. S. R. Murthy and M. Gurusamy, *WDM OPTICAL NETWORKS*.

PRENTICE HALL, 2002.

[2] M. Kodialanm and T. V. Lakshman, "Intergrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 358–366, Apr. 2001.

[3] 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.

[4] H. Zang, J. P. Jue, L. Sahasrabudhe, R. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 100–108, Sept. 2001.

[5] S. Lin and N. McKeown, "A simulation study of IP switching," in *Proceedings of ACM SIGMCOM1997*, pp. 15–24, Sept. 1997.

[6] M. Veeraraghavan, X. Zheng, W. chun Feng, H. Lee, E. K. Chong, and H. Li, "Scheduling and transport for file transfers on high-speed optical circuits," *Journal of Grid Computing*, vol. 1, pp. 395–405, Dec. 2003.

[7] M. Ohashi, S. Arakawa, and M. Murata, "Implementation and evaluation of fast lightpath setup method in wavelength-routed WDM networks," in *Proceedings of SPIE APOC 2006*, vol. 6354, pp. 63541V–1 – 63541V–9, Sept. 2006.

[8] H. Zhang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength routed optical WDM networks," *Optical Networks*, vol. 1, pp. 47–59, Jan. 2000.