

■ 第5章

始点経路制御による光パケット交換
ネットワークのための経路広告機構

5.1 はじめに

本章では、第3章で述べた光パケット転送機構において用いられる転送表を構築するための経路情報交換手法について述べる。

光パケットの始点経路制御に基づいた転送では、中継ノードが宛先情報を参照せず経路決定も行わないため、送信元エッジノードが宛先までの経路を厳密に指定しなければならない。したがって、十分なスケーラビリティを保ち、経路更新が素早く、送信元エッジノードでの柔軟な経路選択を可能とする経路情報交換手法が求められる。これらの要求を満たすためのアプローチとして、本章に述べる手法では、各エッジノードが複数のベストパスを保持し、トポロジの変化をトリガとしてパスペクトル型の経路情報をプロアクティブに交換する。シミュレーションでは、本手法におけるメッセージ量に関して評価し、本手法の大規模ネットワークにおける適用可能性について示す。

以下では、5.2では、光パケットのソースルーティングにおける要求とそれに基づいた経路情報交換手法の設計について述べ、5.3で、具体的な経路情報交換アルゴリズムを説明する。5.4では、本経路情報交換手法のシミュレーションによるメッセージ量評価について述べる。そして、5.5で現在のインターネットにおける経路制御の機能に関し、同等の機能の実現方法について考察する。最後に、5.6で本章をまとめる。

5.2 出力物理ポート参照を用いた始点経路制御型パケット転送機構における経路情報広告

5.2.1 経路情報広告における要求

第3章で述べた光パケット転送機構では、中継ノードでの転送処理を簡略化する目的から、送信元エッジノードで宛先までの経路を厳密に指定し、中継ノードでは送信元で指定されたノード固有の情報のみを参照して転送を行う。

光パケットには、送信元エッジノードで宛先までの経路を厳密に指定するラベルを付与するため、全てのエッジノードに経路の更新情報を伝達することが不可欠である。したがって、高いスケーラビリティを保持する経路情報交換手法が必要となる。

中継ノードでは、ノード固有の出力ポート情報のみを参照し、宛先ホストや宛先エッジノードの識別情報を参照しないため、高負荷時や障害時に宛先に応じてトラフィックを制御することができない。障害発生時には、障害箇所を通るように指定されたすべてのパケットが障害箇所においてすべて失われてしまうため、使用不能な経路情報を素早く更新することが求められる。また、各ノードにおける柔軟な経路選択によってトラフィックを制御できるような手法も必要となる。

以上より、経路情報交換手法に対する要求は以下のようにまとめられる。

- 高いスケーラビリティを保つ
- 素早い経路更新を実現する
- 柔軟な経路選択をサポートする

なお、経路情報を収集する手法は大きくオンデマンド型とプロアクティブ型に分類できるが、通信開始までの遅延を考慮し、ここでは経路情報をプロアクティブに収集する手法を用いる。

5.2.2 既存の経路広告・経路制御機構

一般的にプロアクティブに経路構築を行う経路制御プロトコルは、ディスタンスベクトル型とリンクステート型、そしてパスベクトル型に分類される [39]。しかし、ディスタンスベクトル型では、各ノードにおいて次ホップと宛先までのコスト情報しか知ることができないため、経由する全ての中継ノードの出力ポートを指定するソースルーティングは実現することができない。それに対し、リンクステート型とパスベクトル型の経路情報広告は宛先ノードまでの中継情報を共有することが可能であるため、本光パケット転送機構に適用可能である。そこで、5.2.1 で述べた要求に基づいて、リンクステート型とパスベクトル型の比較検討を行う。

スケーラビリティ

現行のインターネットでは、階層化やエリア分割を行い、境界ルータが各階層やエリア内の経路を再度指定することで、トポロジ変化による経路の更新情報が伝わる範囲を限定し、高いスケーラビリティを実現している。しかし、光パケットのソースルーティングでは中継ノードが経路の再指定を行わない。そのため、全エッジ間で情報を共有する必要があり、階層化やエリア分割を行っても結局全体に情報を伝播させるため、既存のネットワークほど高い効果が得られるわけではない。

また、リンクステート型ではトポロジの変化が発生する度に、全てのノードが最短パス優先アルゴリズムに基づいて最短パスツリーを再計算するため、ノードへの CPU 負荷が非常に高い。特に、複数のエリアに分割できないという制約下では、再計算の回数を減らすことはできないため、スケーラビリティを確保することは難しい。

それに対し、パスベクトル型では、トポロジの変化が影響を及ぼす経路情報だけを更新すればよく、必要最小限の経路情報を交換し更新を行うことによって、各ノードにおける経路の再計算量を抑えることが可能である。

経路更新速度

現行のホップバイホップルーティングは、経路が収束していない状況では、ノード間で経路表の整合性が取れていないため、宛先までの到達性が確保されない [40]。しかし、ソースルーティングでは、複数のベストパス（実際の転送に用いる経路）を保持することができるため、トポロジ変化による影響のない他のベストパスを利用して通信を行うことによって、到達性が確保される。

即ち、宛先までの到達性の確保にかかる時間は、使用不能経路を削除するまでの時間となるため、アルゴリズムに依らない。したがって、使用不能な経路の削除と更新された経路情報の広告を別々に扱い、前者を可能な限り素早く伝播させて更新を行う方法が求められる。このような更新方法によって、宛先までの到達性の確保にかかる時間を短縮することができる。

ただし、保持する全ての経路に影響があるようなトポロジ変化では、到達性確保までの時間がアルゴリズムによって異なる。リンクステート型では、更新情報に基づいて、各ノードが最短パスツリーを再計算する時間が必要である。一方、パスベクトル型では、隣接ノードから新たな経路が広告されてこなければならない。したがって、1つのトポロジ変化が影響を及ぼす経路が少なくなるような経路選択方法が重要である。

経路選択

現行のホップバイホップルーティングでは、中継ノードにて宛先の識別情報を参照するため、パケット毎やフロー毎にトラヒックを制御することが可能である。それに対し、本ソースルーティングでは宛先の識別情報を参照しないため、一度送信された光パケットを中継ノードで制御することはできない。しかし、前述のように各エッジノードでは宛先毎に複数のベストパスを保持することができる。そこで、送信元エッジノードでベストパスを効率的に使い分けることが求められる。以下では、ポリシーに基づく経路選択と計算コストに関してアルゴリズムの比較を行う。

リンクステート型は、各ノードで完全なネットワークトポロジを把握し、送信エッジノードで完全な制御が行えるため、宛先までのコストが最小となる経路を選択できる。ただし、リンクステート型では、各ノードは全ての隣接ノードに対して自らの接続関係とコストのみを記載した同一の経路情報を広告するため、中継ノードのポリシーを反映した経路制御を行うことは困難である。また、複数のベストパスを保持するためには、その数だけの最短パスツリーを構築する必要があり、その数に比例して計算量が増大する。

一方、パスベクトル型では、エッジノード、中継ノードを問わず、ポリシーやさまざまなパス属性(ホップ数や遅延、帯域幅、優先度など)に基づいてベストパスや隣接ノードに広告するパス(以下、広告パス)を選択できる。即ち、隣接ノードや隣接ノードが接続するエッジネットワークに応じて、広告すべき経路情報を柔軟に制御することができる。複数のベストパスや広告パスを保持するためには、受け取った経路情報内から複数の経路を選択する必要があり、その数に応じて計算量が増大するが、最短パスツリーを構築する計算量よりは少ない。

5.2.3 設計指針

リンクステート型とパスベクトル型のアルゴリズムの性能の優劣は、ネットワークトポロジによって変化するため、一概にはどちらが適しているとは言えない。しかし、リンクステート型は、エリア分割を行わず複数のベストパスを持つことが求められる環境下では、ネットワーク規模の拡大に伴い計算量が大きく増大するためスケーラビリティに難がある。それに対し、パスベクトル型では、同環境下でも効率的な経路情報の交換によって、より高いスケーラビリティを実現することができる。したがって、ネットワークの拡張性を考慮し、ここではパスベクトル型アルゴリズムを用いることとする。

以上の検討から、光パケットのソースルーティングを実現するため、プロアクティブにパスベクトル型の経路情報交換を行う。以下に、経路情報交換手法を設計する上での指針をまとめる。

- 経路情報の交換は変更があったものに限定する。
- 使用不能な経路の削除は素早く行う。
- 経路選択に必要な付加情報は経路情報に含める。
- 各中継ノードではポリシーに応じて出力ポート毎に広告パスを選択する。
- 各エッジノードでは複数のベストパスを選択し、利用する。

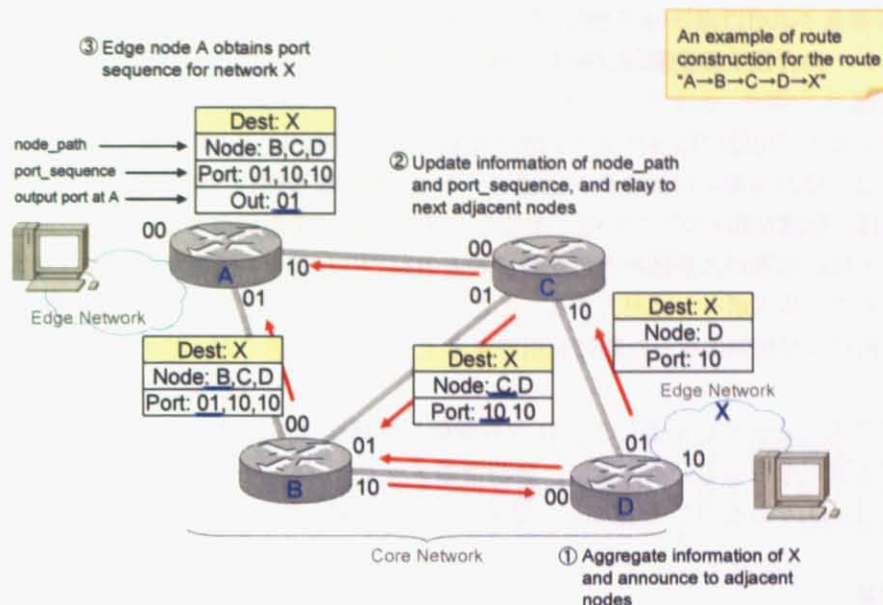


図 5.1: パスベクトル型の経路情報交換

5.3 出力物理ポート参照型光パケット交換ネットワークのためのパスベクトル型経路情報広告手法

本手法は、トポロジの変化をトリガとしてパスベクトル型の経路情報をプロアクティブに交換する。全ての経路情報は 5.3.2 に述べるトリガに基づく更新によって交換されるが、まず、5.3.1 で、基本的な経路情報の交換方法を示す。

ここでは、パス属性に含める情報やベストパス選択手法については言及しないが、必要に応じて経路情報メッセージに付加情報を含め、ポリシーやさまざまなパス属性に基づいてベストパスや広告パスの選択を行う。また、以下で述べる経路情報の交換は隣接ノード間で行われるものとする。

5.3.1 ノードペア間の経路情報交換

パスベクトル型の経路情報交換を行う本手法は、新たにエッジノードが追加された場合、以下のよう動作する。

経路情報の広告

経路情報を広告するエッジノードは、エッジネットワーク内の宛先識別情報（ここでは、接続している IP ネットワークのプレフィックス）と出力ポート情報、および各ノードを一意に識別し得る固有のノード ID を付加する。この経路情報メッセージを、ポリシーに合致する全ての隣接ノードに対して広告する。

図 5.1 の例では、X 宛の経路情報がノード D から広告され、ノード C およびノード B を経由してノード A に到達するまでの流れを示している。ノード D が接続している IP ネットワークのプ

レフィクス X と X への出力ポート “10”，そして自ノード ID である “D” を付加した経路情報メッセージをポリシーに合致する全隣接ノードに対して広告している。

経路情報の転送

経路情報メッセージを受け取ったノードは、まず、ループ検出によって不要な経路情報を破棄する。具体的には、経路情報に付加された通過ノード ID 情報を参照し、自ノードの ID が既に含まれている場合は、経路がループしていると判断し、その経路情報を破棄する。残った経路情報の中から隣接ノード毎に広告パスが選択され、自ノード ID と出力ポート情報を付加し、パス属性の更新を行ったうえで、該当ポートに出力する。ここで、広告パスとして選択されなかった全てのメッセージは、広告パスが無効になった際に利用できるよう保持しておくが、他のノードには転送されない。

図 5.1 の例では、ノード C において、D から受信した経路情報に対し、ループ検出や隣接ノード毎に広告パス選択を行っている。次に、経路情報メッセージにノード D への出力ポートである “10” と自ノード ID である “C” を付加し、隣接ノードに転送している。ノード B でも同様の処理を行っている。

経路情報の収集

各ノードでは以上のように、他のエッジノードから広告され、中継ノードによって転送された経路情報を受信する。受信した経路情報には、宛先までに経由する出力ポート情報列が記されている。これらの経路情報の中から宛先毎に最大ベストパス数だけ経路を選択し、実際のパケット転送に用いる。

5.3.2 トポロジーの変化に応じた修正情報の広告

本手法では、ネットワークの拡張や構成変更、障害などによるトポロジ変化の検知をトリガとして、更新すべき経路情報のみを交換する。具体的なトポロジ変化としてはリンクやエッジネットワークの追加やノード・リンクの削除を想定している。以下、それぞれに関する具体的な更新方法について述べる。

ノード・リンクの追加

ネットワークの拡張や障害からの復旧によって新たなリンクが追加された際には、追加されたリンクの両端のノードが新たなリンクに対しての広告パスを選択し、互いに交換する。交換後、それぞれのノードでは、ベストパスおよび広告パスを再計算し、変更があった広告パスは隣接ノードに転送を行う。新たな経路情報が転送されてきたノードも同様の処理を行う。

ノードの追加は複数のリンクを追加することと同等である。ただし、追加するノードがエッジノードの場合、5.3.1 に述べたように経路情報の広告を行う。この結果、新たなリンクや新たなノードを利用した経路を各エッジノードが利用可能になる。

ノード・リンクの削除

リンク削除の場合は、両端のノードが当該リンクを含む経路を削除させるための更新メッセージを全隣接ノードに広告する。ノード削除の場合、予定された削除であればそのノードが自らを含む経路を削除させるメッセージを広告することができる。しかし、障害による削除の場合、隣接ノードがノード削除であるかどうかを判断できないため、リンク削除として扱われる。

更新メッセージを受信した各ノードでは、メッセージに変更を加えることなく全隣接ノードに転送を行う。ただし、更新メッセージの固有 ID を参照し、重複して受信したメッセージは破棄する。各ノードでは、更新メッセージに基づいて保持している経路を削除する。削除されたベストパスや広告パス数分、残る経路情報内から次に最適な経路を選択する。そして、広告パスに新たに追加された経路情報を隣接ノードに広告する。

このように、各ノードでの経路情報の更新を行う前に、削除すべき経路情報を載せた更新メッセージを伝播させることによって素早い経路の削除と経路情報の更新を実現する。

5.4 シミュレーション評価

パスベクトル型の経路情報交換手法では、ネットワーク内で交換される経路情報メッセージの数が多くなると、経路情報による消費帯域の増大や計算量による CPU 負荷、経路収束遅延を引き起こす。したがって、本手法がネットワークに与える影響を明らかにするため、経路情報メッセージ数およびメッセージ内の可変長部分の長さをシミュレーションによって評価した。

5.4.1 想定環境

トポロジとしては、冪法則トポロジの一種である GLP (Generalized Linear Preference) モデル [41] に基づいた性質の異なる 2 種類のを、BRITE [42] により生成して用いた。1 つ目は、平面的でノードが一様分散された冪乗則の性質を持つトポロジ (以下、pl (power-law) 型) であり、2 つ目は階層的で 2 層とも冪乗則に従うトポロジ (以下、ts (transit-stub) 型) である。以降の結果では、種類別に 5 つのトポロジを同条件で生成し平均を取った。なお、pl 型と ts 型のノードあたりのリンク数の分布は図 5.2 に示す通りであり、平均リンク数はそれぞれ 1.8 と 1.2 程度である。

リンク遅延は BRITE で導出したノード間距離に比例したものをを用いるが、リンクの属性としてのみ扱い、経路情報の伝送にかかる遅延は全て同じとした。また、全てのノードがエッジノードとして経路情報の広告するものと仮定した。

なお、簡単のためベストパスと広告パスは同一のものとした。また、ベストパスはホップ数の少ない順または遅延の小さい順に選択し、ホップ数や遅延が同一の際には新しく広告された経路を選択した。

5.4.2 経路情報メッセージ数に関する結果

このモデルネットワークにおいて、(a) 全経路情報の交換、(b) あるリンクの削除、および (c) 追加、を行った際にネットワーク内で交換される総メッセージ数を明らかにした。図 5.3 では、ベストパス数を 3 とし、ノード数を変化させたときのメッセージ数の変化を、図 5.4 では、ノード数を 500 とし、ベストパス数を変化させたときのメッセージ数の変化を示している。なお、(b) と (c) に関しては全リンクに対して情報更新の発効を行ない平均メッセージ数をとっている。以下、ノード数を N と表す。

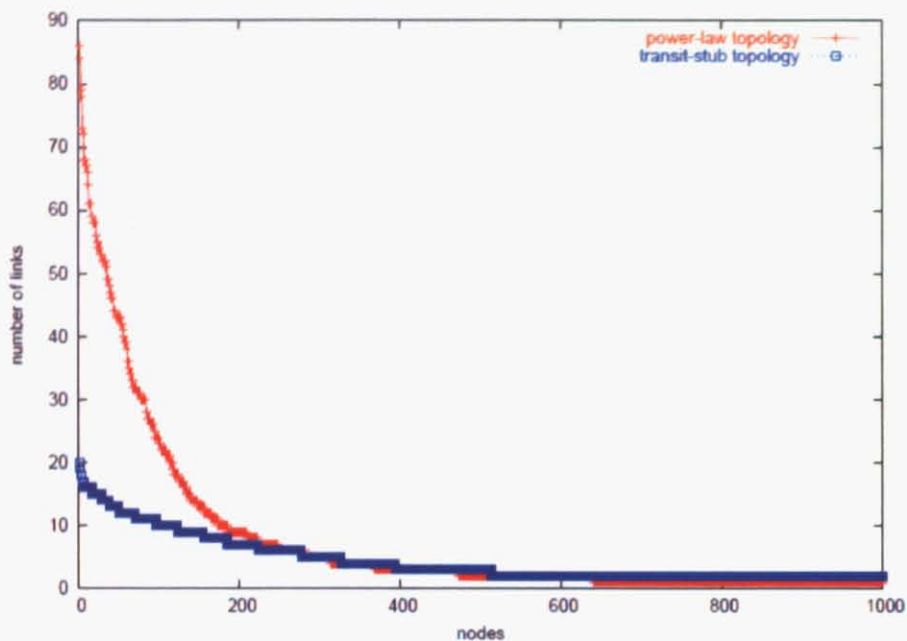


図 5.2: べき法則型と Transit-Stub 型のリンク数分布

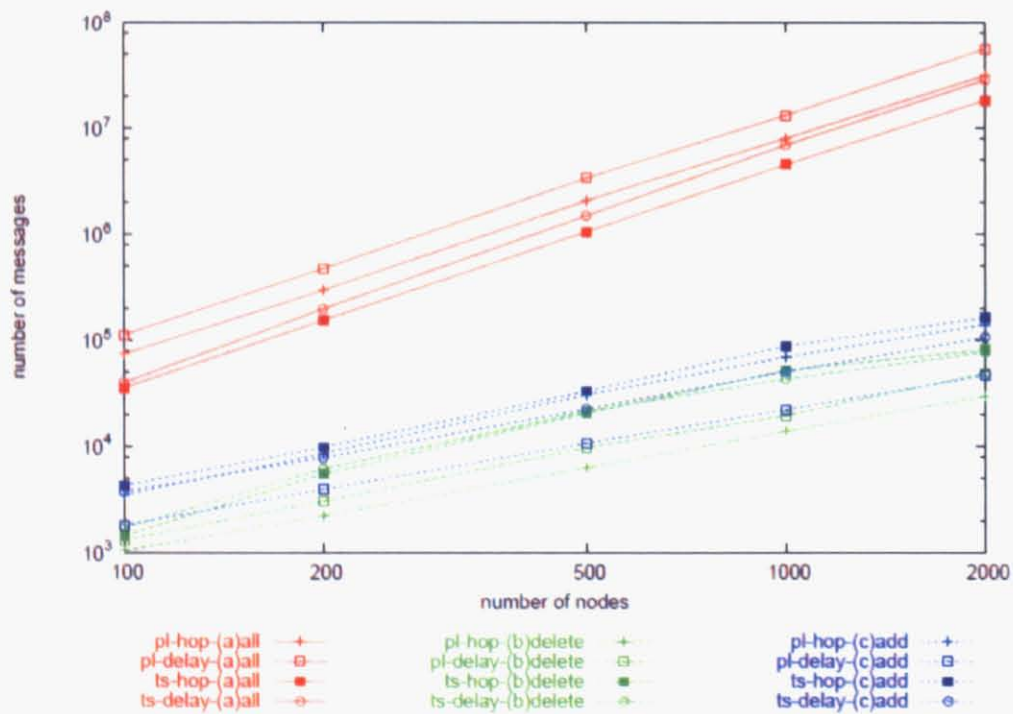


図 5.3: ノード数によるメッセージ数の変化

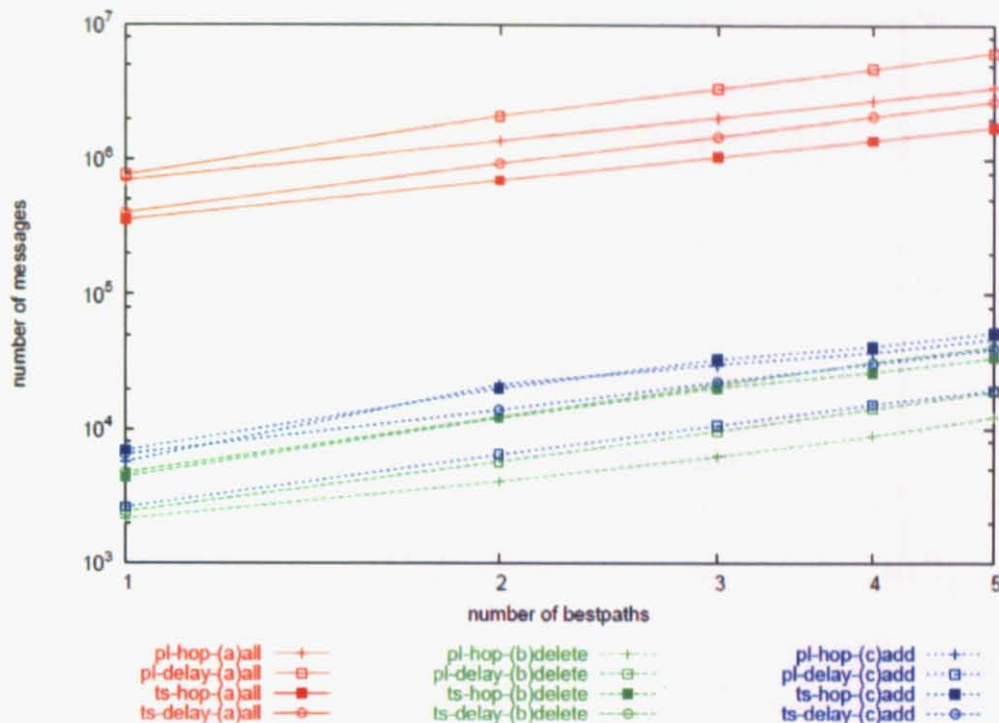


図 5.4: ベストパス数によるメッセージ数の変化

多項式近似の結果，図 5.3 の (a) では $O(N^2)$ でメッセージ数が増加しているのに対し，(b) や (c) では $O(N)$ 程度での増加に留まっている。(a) は，1 回の交換でそれまでに発生した全てのトポロジ変化に対応可能であり，1 回のトポロジ変化によるメッセージ数を示す (b) や (c) とは単純には比較できない。しかし，例えば pl 型トポロジでノード数を 2000 とし遅延を基にして経路を選択する場合は，全経路情報の 1 更新間隔内に 1100 回以上ものトポロジ変化が起こらない限り，(b) や (c) が (a) を上回ることはない。これは有線ネットワークでは非現実的な回数であり，定期的に全経路を更新する手法に比べ，更新すべき経路情報のみを交換する本手法の方が効率的である。また，図 5.4 からわかるように，メッセージ数はベストパス数に対して線形に増加している。しかし，ベストパス数が増加するとベストパス数分の経路の選択肢が存在しないノードが増加する。また，ベストパスの中で選択優先度の低い経路ほど入れ替えが頻繁に発生する。したがって，線形に増加しているという結果は，これらによるメッセージ数増減が同程度であるということの意味している。

次にトポロジの種類によるメッセージ数の違いについて述べる。ts 型より pl 型がネットワーク内の総リンク数が多いことによって，(a) では pl 型の方がメッセージ数が多くなっている。一方，(b) や (c) では pl 型より ts 型のメッセージ数が多くなっている。これは，総リンク数が少ないことによって逆にトポロジ変化が影響を与える範囲が広がっているためである。

最後に，経路選択ポリシーによるメッセージ数の違いについて述べる。本シミュレーションではノード間の伝送遅延を同一としているため，経路は遅延の小さい順ではなくホップ数が少ない順にノードに到着する。また，ホップ数が整数であるのに対し，BRUTE によって生成した遅延は有効数字が大きく高精度な値である。したがって，遅延を選択基準に用いる場合，ホップ数が少ない

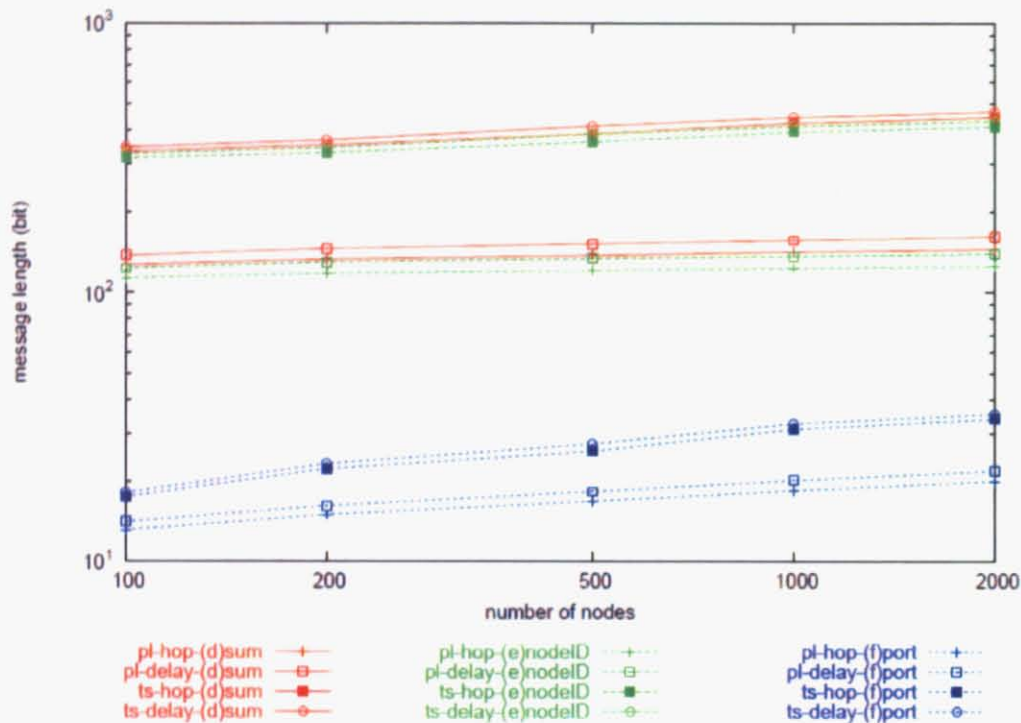


図 5.5: ノード数によるメッセージ長の変化

めに先に到着した経路と後から到着したより遅延の小さい経路とのベストパスの入れ替えが頻繁に発生する。また、ホップ数が同一のものはノードに同時に到着するため、同一ホップ数でのベストパスの入れ替えは発生しない。これらの理由により、(a) や (b) では遅延を用いる方がメッセージ数が多くなっている。(c) では、ホップ数が同一であることによる入れ替えが頻繁に生じ、ホップ数を用いる方がメッセージ数が多くなっている。

5.4.3 経路情報メッセージ長に関する結果

図 5.5 では、ノード数を変化させたときの (d) 出力ポート情報列とノード ID 列の合計、(e) ノード ID 列、および (f) 出力ポート情報列の変化を示している。なお、ノード ID は 32 ビットとし、各ノードの出力ポート情報は全ての出力ポートを識別し得る最小のビット数とした。また、ネットワーク内で交換される全てのメッセージ長の平均をとっている。ベストパス数を変化させたときのメッセージ長の変化に関するシミュレーションも行ったが、ベストパス数とメッセージ数の変化の関係が図 5.4 と同じ傾向を示したためここでは省略する。

また、(d),(e),(f) 全てにおいて pl 型の方がメッセージ長が短くなっている。これは、pl 型では、ts 型に比べ平均リンク数が多く、5.4.1 で示したように多数のリンクを持つノードが存在するトポロジであるため、平均ホップ数が少なくなっているからである。

5.5 機能拡張に関する検討

本手法は、厳密な始点経路制御を行うためにエッジ間で必要な情報を広告し共有するための手法であるが、実際のインターネット経路制御においてはより高度な制御が行われる。本節では、特に本光パケット転送機構で実現が困難な機能について、どのような拡張や代替的なアプローチが必要となるかについて述べる。

5.5.1 経路の隠蔽

通常、ISPなどのネットワーク運営者はAS内の経路を外部に公開していない。ひとつは、隠蔽し抽象化された情報を用いることで内部の変化に際しシームレスに通信サービスを提供し続けられること、また経路表のエントリ数を削減できるといった運用の効率化のためであり、もうひとつは、内部のトポロジーが知られてしまうとDoS攻撃などを効率的に行われてしまうというセキュリティ上の大きな理由による。

本章で検討した経路情報広告手法では中継ノードID列からトポロジーが復元可能であるが、例えば光ネットワーク上におけるASのような領域を定義したときに、境界ノード間での経路広告は“中継ノードIDとそのノードにおける出力ポート識別子”の代わりに“中継パスの識別情報とそのパスに対応する出力ポート識別子列”を用いて行うなど、階層化することで経路の隠蔽はある程度可能である。

それでもパケットの転送時に用いるラベルは出力ポート識別子列によって構成されているため、詳細に転送表を調べればある程度物理トポロジーが復元されてしまう可能性はあるが、各識別子のビット数が不定・不明であるので、その解釈は容易ではない。

5.5.2 トレースバック

送信元を詐称していてもパケットの送信源を追跡できるようにするための技術がトレースバックである。

光領域でのビット単位の信号書き換えは非常に難しい。そのため、もし光パケットの生成ノードが信用できる場合はそれほど難しい問題とはならない。光パケットの生成時に、生成ノードのIDをオプション情報として付加すればよい。逆に光パケットの生成ノードが信用できない可能性がある場合は、パケットへの情報書き込みができず、転送時に参照する情報もそのノードにおける転送制御識別子のみであることから、トレースバックの実現はかなり難しい問題となる。

5.5.3 マルチキャスト・高速経路切り替え

本機構ではローカルな識別子を並べてパケット転送を行うため、ひとつのラベルに複数の経路を割り当てることは不可能である。そのため、光領域でのヘッダ書き換えを行わない限り、ルータレベルマルチキャストを行うことはできない。また、そのラベルはグローバルな宛先を示すものではないため、経路を切り替えるためにはペイロードを復元するなどして宛先を得る必要がある。よっ

て同様に、光領域でのヘッダ書き換えを行わなければ高速経路切り替え (fast reroute) も不可能である。

これは転送機構上の問題であり、経路制御をどのように拡張しても解決できない問題である。本転送機構を用いたネットワークでこれらを実現するためには、一旦電気領域に変換してから処理することが必要となる。

5.6 おわりに

本章では、光パケットの簡略な転送処理を実現するルーティング機構について述べ、その要求を満たすトリガに基づいてパスペクトル型の経路情報を交換する手法を示した。また、この手法の性能に関してシミュレーションによる評価を行った。トポロジや経路選択ポリシーに依存して多少性能が変わるが、本手法での経路情報メッセージ数はノード数やベストパス数に対して線形に増加し、経路情報内のノード ID 列や出力ポート情報列の長さはノード数に対して対数的に増加することがわかった。

今後の検討課題としては、以下の点が挙げられる。

経路情報の誤りや損失への対処法

経路情報に誤りが生じた場合は、チェックサム等を利用した検出によって対応可能である。損失に関しては、経路情報の転送方法や転送における信頼性の確保の仕方について十分に検討する必要がある。

ベストパスおよび広告パス選択手法

本章で示した経路情報交換手法では、ポリシーやパス属性によって柔軟な経路選択を可能としている。適用するポリシーやパス属性に含める情報、およびそれに基づいたベストパスや広告パスの選択手法に関して、応用にあわせた具体的な検討が求められる。

■ 第6章

始点経路制御ネットワークにおける優先度学習型経路選択手法

6.1 はじめに

光パケット交換ネットワークでは、光メモリに実用化の目処がたっていないため、これに代わるパケットの衝突回避手法が大きな課題となっている。パケットの衝突が発生した場合にそれを解決する方法としては波長変換、迂回ルーティング、遅延線バッファの利用などが検討されているが、光領域での処理は電気領域に比べ柔軟性に欠けるため、電気で行うほどの性能をあげることはできない。したがって、経路制御的なアプローチによりネットワークレベルで衝突確率を低減させることも、効率的なパケット転送のためには必要となる。

5に述べた始点経路制御機構では、送信元ノードに経路制御の機能が集約されており、宛先までのパケットの伝送経路を厳密に指定するため、効率的にトラヒックを分散できる。また、経路の周回を未然に防ぐことが可能であり、送信元・宛先ノードペアに対して同時に複数の伝送経路を提供できる。したがって、この複数の伝送経路の選択方法を工夫することでトラヒックの集中を回避し、衝突確率自体を低減することが可能である。

本章では、送信元ノードにおける経路選択手法にそれまでの送信結果・通信状況に基づいた経路優先度学習を適用することを検討する。本手法では、パケットの棄却時にフィードバックパケットを生成し、元のパケットの送信元に送信することによって学習を行う。これにより、各ノードでの自律的な制御によりトラヒックが分散され、ネットワーク全体におけるパケット衝突確率が低減される。

本章の構成を以下に示す。6.2で光パケットネットワークにおけるノードレベル衝突回避の限界について述べ、ネットワークレベルのサポートが必要であることを指摘する。6.3では、複数の伝送経路を適切に選択するための優先度学習に基づく経路選択手法に関して述べ、その特徴を整理する。さらに、光ネットワークシミュレータを実装し、本手法の効果と影響の評価を行った結果について6.4で述べる。最後に6.5で本章のまとめと今後の課題を述べる。

6.2 光パケット衝突の解決と回避

光パケットネットワークでは、スイッチ内で複数のパケットが同時に同一出力ポート同一波長を利用しようとした際にパケットの衝突が発生する。電気メモリの機能を光信号のまま実現する実用的な光RAMがないことからこれに代わる様々な衝突回避手法の検討が行われている [29, 43]。

それらは、大きく「中継ノードにおける衝突回避手法」と「送信元ノードにおける衝突回避手法」に分類することができる。前者は、中継ノードにおけるパケット転送時に衝突が発生した場合にそれを解決しパケットの損失を防ぐための手法であり、4.2.1に述べた波長変換、迂回ルーティング、遅延線バッファなどがこれにあたる。後者はパケット送信時の経路選択によりトラフィックを分散させたりすることで、ネットワークレベルでの衝突確率自体を低減させるための手法である。

前述したように波長変換や迂回ルーティングは光パケット転送の高速化・大容量化の技術と親和性が低い。また、遅延線バッファは制御の柔軟性が電気処理の場合に比べて低いことから、電気的RAMを用いる場合ほど高い性能を上げられない。したがって、光パケット転送における中継ノードでの衝突回避処理の効果は限られており、ネットワークレベルでの衝突確率低減も重要となる。

送信元ノードにおける衝突回避手法は、同一経路内でトラフィックを制御することによって衝突確率を減らす方法と経路制御によってトラフィックを分散させて衝突確率を減らす方法に分けることが

できる。

同一経路内のトラヒック制御としては、電気エッジルータを共通バッファとして用い、光ルータの出回線の状況に応じて電気エッジルータから入力されるトラヒックの抑制を行う手法がある [44]。この手法は、光ルータの輻輳からの回復を早め、以降バッファされるパケットを減少させることができるため、パケット棄却率も減少する。しかし、これは同一の伝送経路を用いるため、ネットワーク全体のパケット棄却性能の改善には限界がある。

一方、経路制御によってトラヒックを分散させる方法は、経路制御方式に大きく依存する。従来のホップバイホップによる経路制御では、各ノードで経路決定が行われるため、意図したとおりにトラヒックを分散することは困難である。これに対し、始点経路制御型光パケットネットワークでは、送信元ノードに経路制御の機能が集約されており、宛先までのパケットの伝送経路を厳密に指定するため、効率的にトラヒックを分散できる [45]。また、全経由ノードの情報を含めた経路情報を交換するので、各宛先ノードに対し周回を発生することなく複数のベストパスを提供することができる。これらを適切に選択することによってトラヒックを分散させ、ネットワーク全体のパケット棄却率を低減できる。

以下、宛先までの複数のベストパスから適切にパケットの伝送経路を選択する方法として、経路優先度学習を用いた方法（以下、PRS: Priority-based Route Selection）を検討する。優先度学習は、光パス交換ネットワークの波長選択 [46] や光バーストネットワークの経路制御 [45] において、分散的な波長のすみわけを行いトラフィックを分散させるための手法として用いられている。

6.3 優先度学習型経路選択手法

PRSにおいては、各ノードは全ての宛先ノードに対して経路優先度情報を保持する。そして、自身のパケット伝送の統計結果から各経路の優先度を学習する。すなわち、パケット棄却率の高い経路ほど優先度を減少させ、逆にパケット棄却率の低い経路ほど優先度を増加させる。パケット送信要求が発生した際、送信元ノードは、宛先ノードに対する自身の経路優先度情報に基づき、伝送経路を選択する。これによって、ネットワーク全体としてのパケット棄却率の低減を図る。

経路優先度の学習は、パケットの伝送結果をフィードバックパケットを用いて送信元ノードへ伝達することによって行われる。全てのパケット伝送結果、すなわちパケット伝送の成功と失敗の両方の情報をフィードバックすることで伝送の統計結果を正確に反映することができる。しかし、光パケットネットワークでは、制御チャンネルが存在しないため、フィードバックパケットを通常のパケットと同様にインバンドで伝送しなければならない。したがって、両方の情報をフィードバックする場合には、全送信パケットと同数のフィードバックパケットがネットワーク内を流れることになってしまい、負荷が非常に高い。そこで、フィードバックパケットによる負荷を抑えるため、中継ノードにおいてパケットが棄却された場合にのみフィードバックを行う。

図 6.1 に、PRS の概要を示す。このように $A \rightarrow C \rightarrow D$ という経路でパケットを伝送する際に、C にて棄却が発生した場合には、C でフィードバックパケットを生成し、パケットの送信元である A 宛に送信する。A では、フィードバックパケットを受信すると、対応する経路の優先度を減少させる。以上のように、伝送経路に優先度を与えて経路選択を行うことによって、各送受信ノードペア間で伝送経路のすみ分けが達成される。これにより、トラヒック負荷が分散し、パケット棄却率の低減が実現される。

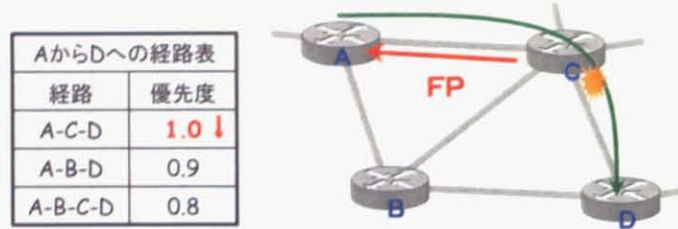


図 6.1: PRS の概要

6.3.1 経路優先度更新アルゴリズム

パケットの送信元ノード x では、フィードバックパケットを受け取ると、宛先ノード y への経路 z を用いて送信したパケットが棄却されたという情報を抽出する。そして、以下に示す経路優先度更新の式に基づいて優先度 $P(x, y, z)$ が更新され、経路 z の優先度は低くなる。以下の式 (6.1) で $P(x, y, z)$ は $0 \leq P(x, y, z) \leq 1$ を満たすものとする。また、 $Q(T)$ は1回のフィードバックによって変化する $P(x, y, z)$ の量を決める値である。

$$P(x, y, z) = \frac{Q(T) - 1}{Q(T)} \times P(x, y, z) \quad (6.1)$$

パケット伝送失敗時のみ経路優先度の更新を行うと、パケット伝送が成功した回数に関わらず、累積のパケット棄却数が多ければ多いほど経路優先度は低くなってしまふ。そこで、 T 秒毎に全ての経路優先度を以下の式 (6.2) に基づいて更新することによって、各経路優先度はパケット伝送の統計結果に基づいた値となる。以下に示す式 (6.2) において R は目標パケット棄却率、 $C(x, y, z)$ は T 秒間の実際のパケット棄却率を表し、式 (6.3) において $N(\text{dropped})$ は棄却パケット数、 $N(\text{sent})$ は送信パケット数を表す。

$$P(x, y, z) = P(x, y, z) + (1 - P(x, y, z)) \frac{R}{C(x, y, z)} \quad (6.2)$$

$$C(x, y, z) = \frac{N(\text{dropped}) + 1}{N(\text{sent})} \quad (6.3)$$

式 (6.1) において $Q(T)$ は式 (6.2) による更新間隔である T の値によって変化させる。 $Q(T)$ の値が大きいくほど経路優先度の変動幅は小さくなり、逆に $Q(T)$ の値が小さいほど経路優先度の変動幅は大きくなるため、 T の値が大きいくほど $Q(T)$ を大きく設定する必要がある。また、 $Q(T)$ を T に基づく固定値とすることにより、逐一学習を行うことが可能になり、動的なトラヒックやトポロジの変化に適応できる。

$C(x, y, z)$ は式 (6.3) のように表され、 T 秒間の棄却パケット数に 1 を足した数を送信パケット数で割ったものとなる。ここで棄却パケット数に 1 を足しているのは、棄却パケット数が 0 であったときにも、送信パケット数に応じて優先度が増加するようにするためである。また、 $C(x, y, z)$ が R を超える値となった時には、式 (6.2) の更新によって $P(x, y, z)$ が 1 を超える可能性がある。そこで、 $0 < P(x, y, z) < 1$ を満たすべく、 $P(x, y, z)$ が 1 を超える場合には $P(x, y, z) = 1$ と設定し直す。

6.3.2 PRS の特徴

PRS は以下のような特徴を持つ。

複数伝送経路利用によるトラヒック分散

本手法では、複数伝送経路を優先度学習に基づいて効率的に利用することによってトラヒック分散を行っている。これによって本手法の目的であるネットワーク全体のパケット棄却率の低減が実現できる。しかしながら、最短経路のみを用いてトラヒックを伝送する場合に比べ、複数の伝送経路を用いることで、パケットが経由する平均ホップ数や平均遅延が増大してしまうことが考えられる。特に光ネットワークでは、伝送や転送処理におけるパワー損失や分散などによる信号品質の劣化を補償するコストが高いため、平均ホップ数の増加は大きな問題となる。

逐一学習を行う

実ネットワークでは、ネットワークポロジやトラヒックの変化に伴って、各経路のパケット棄却率状況も変化する。本手法では、式 (6.1) や式 (6.2) においてパケット棄却の発生や一定期間のパケット棄却率に応じて常に経路優先度を増減させることにより、このようなネットワーク状況の変動への対応を可能としている。しかし、フィードバックパケットをデータパケットと同様に伝送を行うため、常にフィードバックパケットによる負荷が発生する。すなわち、フィードバックパケットの棄却やフィードバックパケットとの衝突によるデータパケットの棄却が継続して発生するということである。

他ノードの情報を取得しない

本手法では、自ノードで送信したパケットの伝送結果のみに基づいて経路優先度の更新を行ったり、パケット棄却時のみフィードバックパケットを生成したりすることによって、交換する情報量を削減し、フィードバックの負荷を抑えている。しかし、自ノードにおける情報のみならず他のノードにおける伝送結果の情報を取得して経路優先度を設定することを行うことで、理想的なトラヒック分散が可能となり、パケット棄却率低減効果も大きくなると考えられる。つまり、交換情報量とトラヒック分散によるパケット棄却率低減効果はトレードオフの関係にある。したがって、自ノードにおける情報のみを用いることでパケット棄却率の低減効果が薄れてしまう可能性もある。

機能追加を行わない

パケット棄却発生ノードではフィードバックパケットが生成されるが、全てのノードには経路情報を送受信する機能が備わっているため、ノードへの新たな機能の追加は不要である。ただし、フィードバックパケットの送信先を決定するため、棄却パケットの送信元ノードを知る必要がある。また、更新すべき経路優先度を特定するため、棄却パケットの伝送に用いた経路の情報をフィードバックパケットに含める必要がある。出力ポート情報列を用いたラベルでは、中継ノードで送信元ノードの情報や伝送に用いた経路の情報を得ることはできない。したがって、各パケットには出力ポート情報列のラベルに加え、送信元ノードの ID および伝送経路の ID を含めることが求められる。これにより、光パケットネットワーク内でデータパケットに付与される情報が増加し、ネットワークの利用効率が落ちてしまう。

6.4 シミュレーション評価

PRSの性能評価を行うため、始点経路制御機構におけるパケット転送処理と経路情報交換の機能を備えた光ネットワークシミュレータの実装を行った。その上で、さらにPRSを実装し、PRSの効果や影響を定量的に明らかにするためのシミュレーションを行った。

6.4.1 シミュレーション環境

シミュレーションを行うにあたって、その環境を以下のように設定した。

冪乗則に従う100ノードのトポロジーを用い、各リンク帯域は10Gbpsとした。ノードは各出力リンクに対し深度3のファイバ遅延線によるバッファを持つものとし、スケジューリングにはパケット到着情報のみを用いたため各バッファ内ではパケットは固定長として扱われている。ネットワーク内のフロー数は常に300に維持するようにし、各フローでは送信元ノードでパケットがポアソン生起するものとした。各フローではポアソン到着式における平均到着率 λ を変化させることによって各フローのトラヒック量を調整した。また、事前に経路情報の交換を行い、伝送経路はホップ数の少ないものから順に3つ選択した。

優先度学習アルゴリズムにおいては、 T を0.01秒、 $Q(T)$ を100とし、 R を 10^{-6} と設定した。すなわち、式(6.1)と式(6.2)はそれぞれ以下に示す式(6.4)と式(6.5)のようになる。なお、全ての $P(x, y, z)$ は1を初期値とした。

$$P(x, y, z) = 0.99 \times P(x, y, z) \quad (6.4)$$

$$P(x, y, z) = P(x, y, z) + (1 - P(x, y, z)) \frac{10^{-6}}{C(x, y, z)} \quad (6.5)$$

6.4.2 トラヒック負荷に対するパケット棄却率の低減効果

図6.2は、各パケットが(a)最短ホップ数の伝送経路を選択したとき、(b)複数の伝送経路をラウンドロビン方式で選択したとき、および(c)PRSにより学習した結果を用いて最も優先度の高い伝送経路を選択したときのトラヒック負荷とパケット棄却率の関係を示している。

図6.2より、PRSは最も低いパケット棄却率となっており、(a)の場合に比べて80%から30%程度のパケット棄却率に抑えられていることが示された。また、(b)に比べ、パケット棄却率が低減されていることから、複数の伝送経路に対して単純にトラヒックの分散を行うよりもPRSを用いる方がさらに効果が上がるということが示された。

6.4.3 パケットの平均ホップ数への影響

ここでは複数の伝送経路を利用することによってパケットの平均ホップ数に与える影響を調べた。図6.3は、経過時間に対する各パケットが選択した経路のホップ数の平均を示したものである。

図6.3において、最短経路のみを用いた場合の平均ホップ数は約3.77となっているのに対し、PRSを用いた場合の平均ホップ数は $\lambda=10000$ の時に約3.81、 $\lambda=50000$ の時に約3.87となり、そ

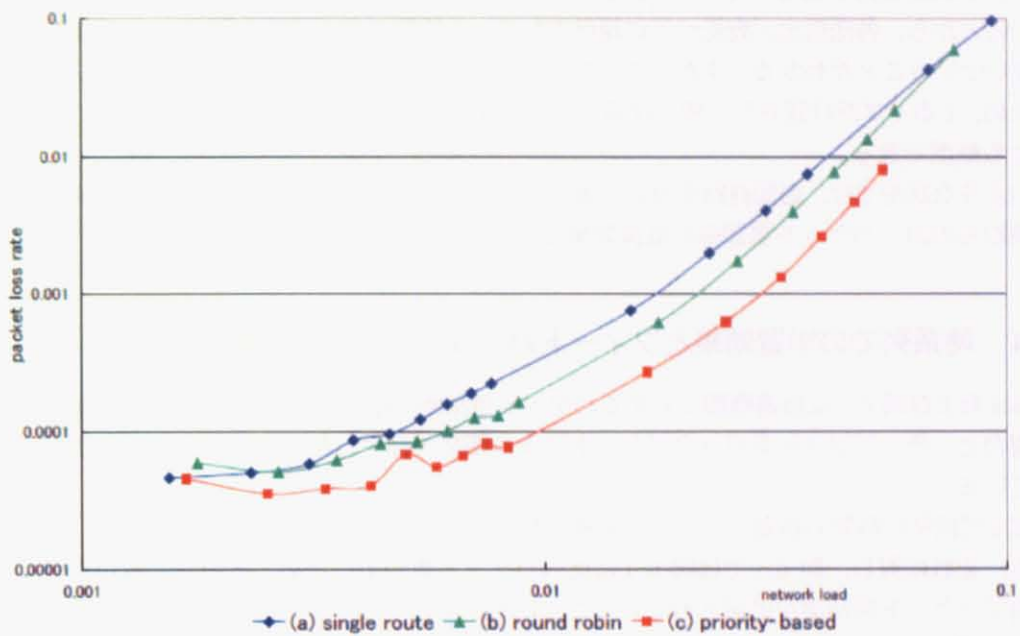


図 6.2: トラフィック負荷に対するパケット棄却率

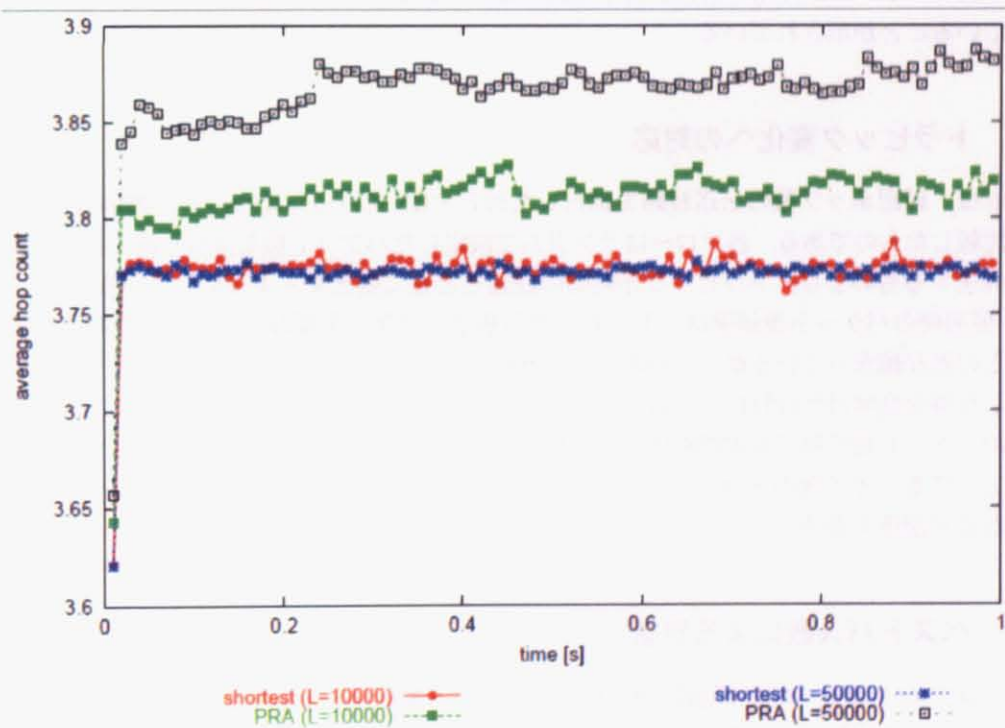


図 6.3: 平均ホップ数への影響

それぞれ約 1.06%と約 2.65%平均ホップ数が増加していることが示された。平均ホップ数の増加率が小さいことから、各送信元／宛先ペアに提供されている複数の伝送経路の間でホップ数は大きく異なるということがわかる。また、このことからホップ数が経路から順にベストパスを選択しているため、1ホップだけ迂回し、残りは同一リンクを使用するような経路が多く含まれているということも推測できる。

このような状況では、最短経路を用いた場合に比べて信号の劣化や損失の増大に大きな差が出なくて済むものの、パケット棄却率の低減効果は十分に発揮されない。

6.4.4 時系列での学習効果とフィードバックパケットの影響

図 6.4 および図 6.5 は経過時間に対するパケット棄却率の推移を示しており、最短経路のみを用いた場合と、そしてフィードバックパケットによる衝突が発生しないものとした場合の PRS を比較している。

図 6.4 では特に時間の経過に伴って、学習が進み、パケット棄却率が低減していることが示されている。それに対し、図 6.5 では図 6.4 に比べパケット数が多いため、その分学習が素早く進み、短時間でパケット棄却率が低減されていることがわかる。

また、図 6.4 および図 6.5 より、フィードバックパケットによる衝突が PRS によるパケット棄却率の低減効果を悪化させているということがわかる。しかし、その影響は PRS による棄却率の低減量に比べれば少ないということが示された。さらに、特に図 6.5 において、フィードバックパケットの衝突がない場合に比べ衝突がある場合には、学習速度が低下し、徐々にパケット棄却率が低減していることが示されている。

6.4.5 トラヒック変化への対応

図 6.6 は、最短ホップ数の伝送経路を選択した時と PRS を行った場合の 60 秒間のパケット棄却率を比較したものである。各フローはランダムで決定したパケット数を送信し終わると新たなフローを発生するものとし、トラヒックが時間の経過とともに変化するようにしている。

PRS 使用時のパケット棄却率は、トラヒックが変化しパケット棄却率が増減した時に最短経路使用時との差が縮まっているが、その後徐々に差が大きくなっている。これは、トラヒックの変化に対応した優先度学習が行われていることを示している。また、41 秒から 42 秒時点にかけて PRS 使用時のパケット棄却率が最短経路使用時を超えており、経路優先度の学習によってすみ分けが行われたとしても、その後のトラヒックの変化次第では一時的に PRS 使用時の方がパケット棄却率が高くなる可能性もあることを示している。

6.4.6 ベストパス数による影響

図 6.7 は、 $\lambda=50000$ の時の経過時間に対するパケット棄却率を示しており、ベストパス数が 1, 2, 3, 5 の場合を比較している。

図 6.7 から、ベストパス数が多いほど学習に要する時間が長く、学習後のパケット棄却率低減効果も高いということが確認できる。しかし、ベストパス数が 3 の時と 5 の時の差は非常に小さい。

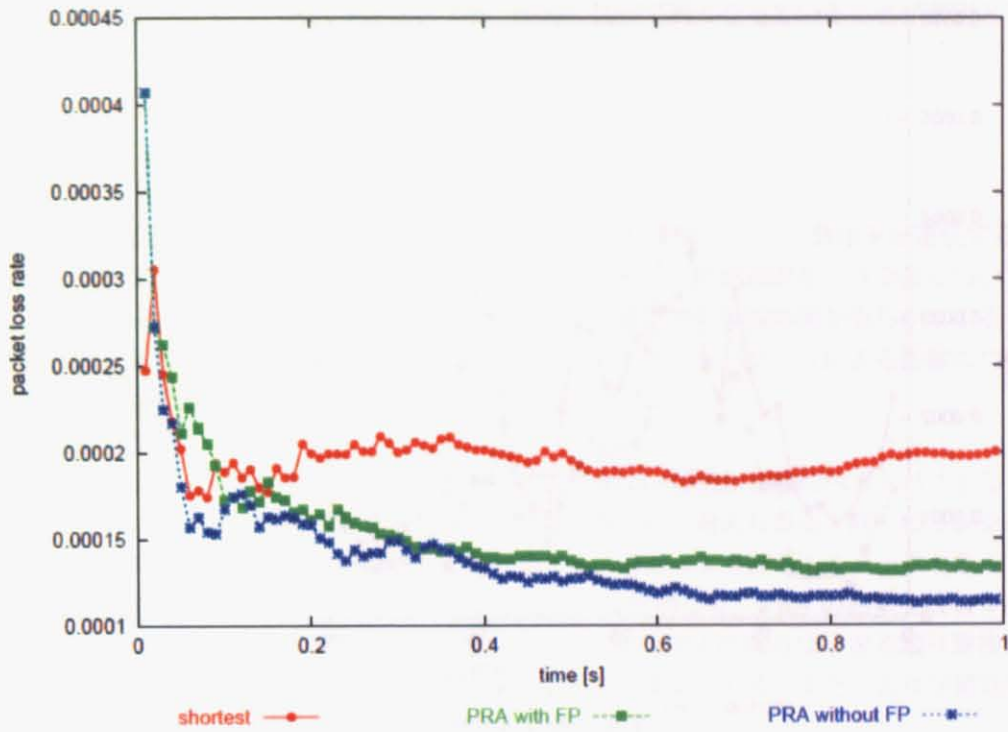


図 6.4: パケット棄却率の時間推移 ($\lambda=10000$)

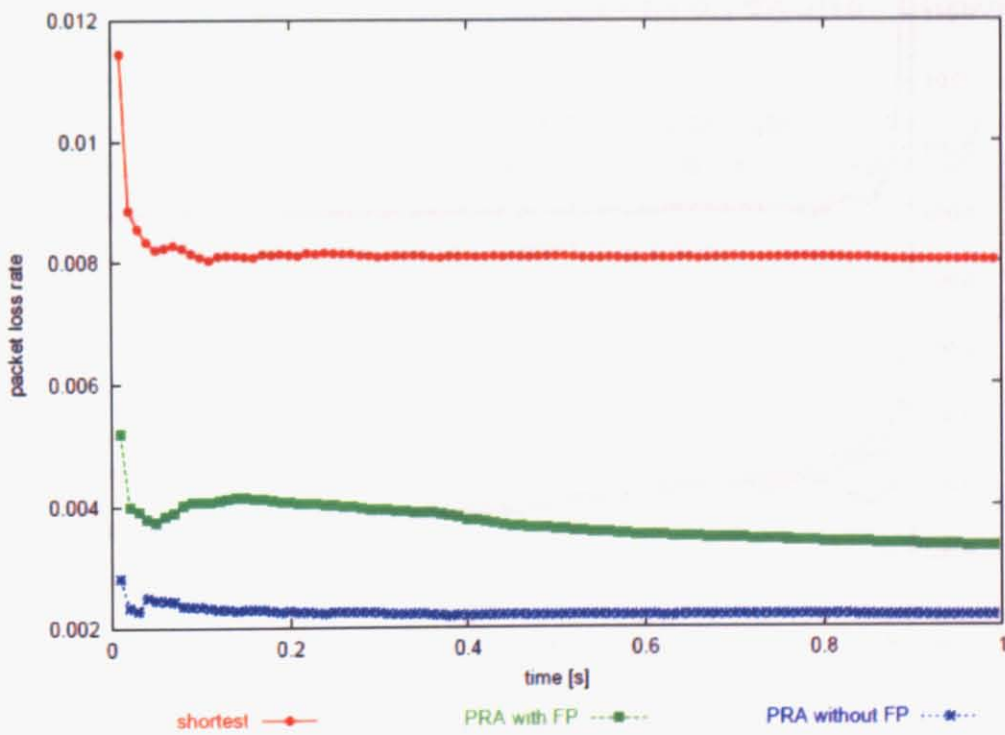


図 6.5: パケット棄却率の時間推移 ($\lambda=50000$)

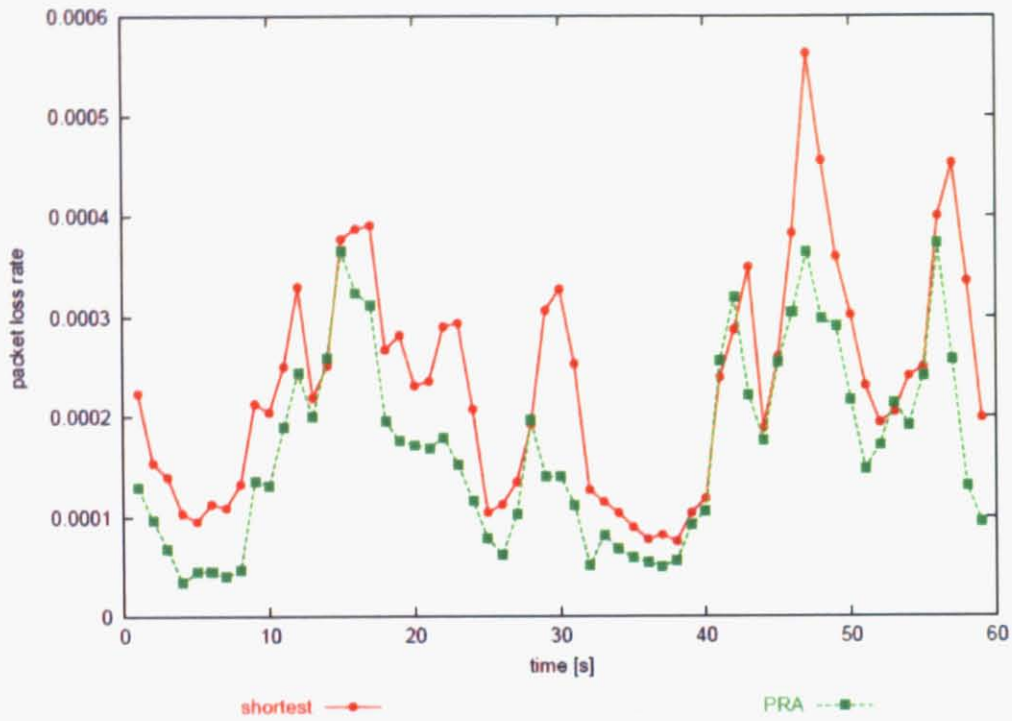
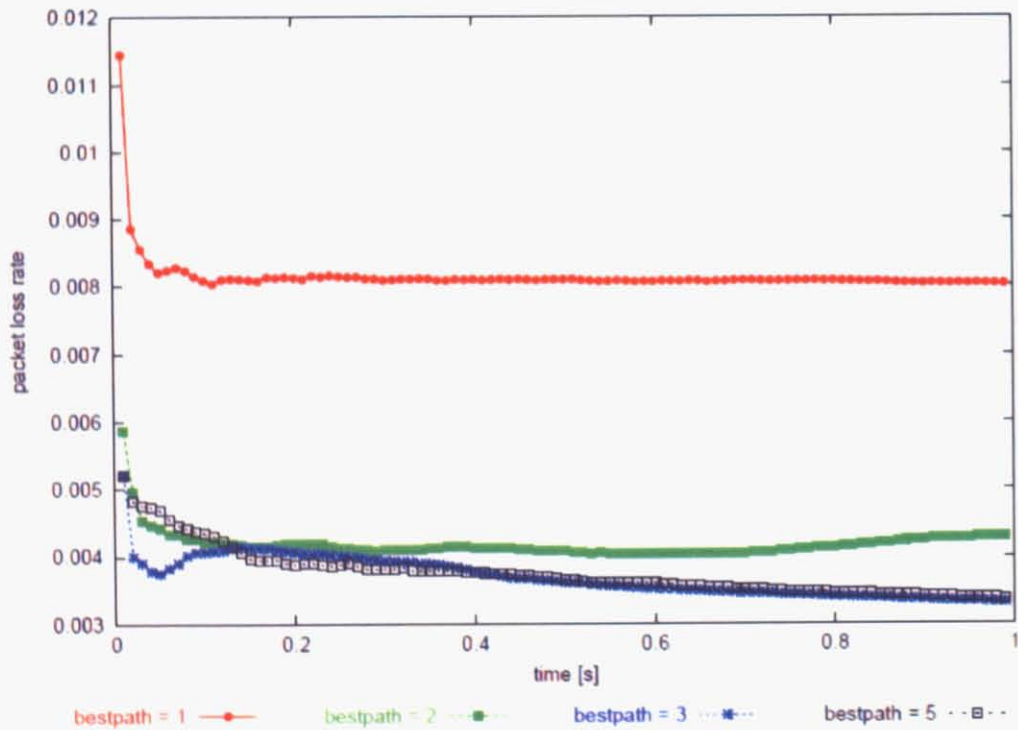


図 6.6: パケット棄却率の時間変化

図 6.7: ベストパス数による影響 ($\lambda=50000$)

これは、どちらの場合も同じ経路の優先度が他の経路に比べて高くなっていることが要因として考えられる。

6.5 おわりに

本章では、始点経路制御型光パケットネットワークにおいて低パケット棄却率を達成するため、それまでの送信結果・通信状況に基づいて経路優先度を学習し、経路選択を行う手法について述べた。また、シミュレーションにより本手法によるパケット棄却率の低減効果を明らかにするとともに、複数伝送経路利用による平均ホップ数の増加やフィードバックパケットによる影響について明らかにした。今後解決すべき課題としては、以下の点がある。

PRS の効果の改善

本章におけるシミュレーションの際には、ホップ数が少ない経路から順にベストパスとして選択したため、複数の経路間で重複利用するリンクが多数存在したと考えられる。同一のリンクを経由する経路間で優先度学習を行い経路選択をしたとしても、そのリンクがボトルネックとなっている限りパケット棄却率を大きく改善することはできない。したがって、PRS の効果を改善するためには、ベストパスや広告パスの選択手法が重要となる。特に PRS の場合はできる限り重複リンクを減らすことによってトラヒックの分散効果を高めることが求められる。また、より学習効果の高い経路優先度更新アルゴリズムに関する検討も必要である。

パケットの順序逆転や伝送遅延増加

本手法では、特に優先度の学習段階において同一フローのパケットであっても複数の経路が利用されることとなる。このような状況においては、パケットの順序逆転が発生する。また、最短経路のみを用いて伝送を行う場合に比べ、平均的な伝送遅延は増加すると考えられる。これらの影響に関しても評価を行う必要がある。

フィードバック手法の検討

棄却発生ノードでフィードバックパケットを生成するために必要な情報が元のパケットから得られるようなラベル割当手法や、経路情報のパス属性にパケット棄却率の情報を載せ、宛先を特定せずに経路情報を広告するフィードバック手法などによって利用効率を低減することなくフィードバックを行うことも可能であり、これらに関する検討も必要となる。

■ 第7章

結論

7.1 本研究の主たる成果

本研究では、ユビキタス社会・次世代ネットワークといった将来のネットワーク環境を支える新しい光パケットネットワークアーキテクチャの構築を目標に、研究開発を行った。

アーキテクチャとはすなわち“機能の配置と連携の定義”である。これまでの電気処理を前提とするネットワークシステムにおいては個別の機能の実現は容易であることから、システムの性能・汎用性・拡張性といった要求に基づいたトップダウンなアーキテクチャ検討が行われてきた。しかし、光領域での処理は電気のように柔軟に行うことはできないため、全ての機能要素を自由に実現できるとは限らない。そのため、光システムにおけるアーキテクチャ検討では、デバイスの制約に基づいたボトムアップなアプローチが必要であり、光ならではの制約の克服が光パケット交換ネットワークの実現に向けた命題であるといえる。

本研究では、光デバイスの制約を考慮した光パケットネットワークアーキテクチャを検討するにあたり、パケット転送に必要な機能のそれぞれについて「光領域で可能であること、不可能であること」「光領域で行うべきこと、行わなくてよいこと」を明らかにするところから検討を試みた。

光パケットネットワークの大前提として、転送されるパケット信号は光領域のまま処理されなくてはならない。同時に、パケット転送を行う際にはパケット毎に転送処理および衝突回避という複雑な処理を行うことが必要となる。そこで、アーキテクチャ構成の起点として、まず光領域のままパケットを処理するための機構の検討を行った。光領域でのパケット転送を実現するための技術としては、自己ルーティングとプリアンブル遅延型ラベル更新によりノードでの中継処理を単純化するというアプローチによる、大規模ネットワークに適用可能な光パケット転送機構を開発した。光領域での衝突回避技術としては、遅延線バッファを用いた時間次元での衝突回避に着目し、バッファの構成およびスケジューリングアルゴリズムがどのように性能に影響するかを実ネットワークモデルを用いて評価した。これら光領域パケット処理技術の研究においては、スイッチや固定長遅延など現在利用可能な光デバイスの限られた機能だけを利用してパケットを転送するための技術を確立し、光でやるゆえの利点・欠点の評価からその特性を明らかにした。

次いで、それら光領域でのパケット処理技術に対し、ネットワーク制御に関して必要となる機能の検討を行った。ひとつは自己ルーティングを用いた光パケット転送について、出力インタフェース識別子を用いた始点経路制御機構を開発した。もうひとつは、RAMが無いことに起因するノード内衝突回避機構の限界に対し、ネットワークレベルでの衝突確率低減による解決を試みるものとして、優先度学習による分散型経路選択手法の適用を検討した。これら制御技術に関する研究では、光パケット転送ネットワークでは制御機構へどのような要求があるか、またどのようなアプローチで解決すべきかを明らかにするとともに、既存のネットワークで行われている制御との機能・性能に関する比較評価を行った。

これら要素技術の検討を通し、光パケット交換ネットワークアーキテクチャに基づいたシステムが既存のパケット網と異なりどのような特性を持つかを明らかにした。また、評価・実装を通して実ネットワークへの適用における問題点を挙げ、今後の研究および技術開発の方向性を示した。

これまでの光パケットネットワーク技術の研究は、ノードにおけるパケットスイッチングを実現するための光コンポーネントの開発とノードでの光領域転送処理に主眼が置かれており、いわば光パケット“スイッチング”技術を中心とするものであった。それに対し本研究では、大規模ネットワークへの適用という観点から、ラベル処理に関する現実的問題やネットワークレベルでの制御に

関する技術課題の検討を行った。すなわち、ネットワークと光デバイスの双方における視点に基づき光パケット“ネットワーキング”技術の開発に取り組んだ。新しい試みであったといえる。

以上をふまえて、本研究の主たる成果は以下の3点にまとめられる。

光パケット交換ネットワークアーキテクチャの検討と要素技術の開発 光デバイスの機能的制約に着目し、また光デバイスの特性とパケット転送に求められる機能の整理を通して、大規模ネットワークに適用可能かつ現在の光デバイス技術の水準で実現可能な光パケット交換ネットワークアーキテクチャを構築した。そして、要素技術として光領域パケット処理技術および始点経路制御に基づいたネットワーク制御技術の開発を行い、光パケット転送ノードと光パケットネットワークの構成を示した。

シミュレーションおよび実装による特性評価と実現可能性の検証 シミュレーション評価により、光パケット交換ネットワークの特性を明らかにした。プリアンプル遅延型ラベル更新による光パケット転送機構に関しては、既存の光パケット転送機構とネットワーク効率の観点で比較し、本機構の利点を示した。遅延線バッファを用いた衝突回避機構に関しては、現在のインターネットにおいて要求されるパケット損失率を基準に実トラフィックデータを用いて評価を行い、インターネット適用時における特性を示した。始点経路制御のための経路広告機構に関しては、ネットワーク規模と制御メッセージ数の関係の定量的な評価により、大規模ネットワークへの適用可能性を示した。優先度学習型経路選択手法に関しては、パケット損失率の改善率の評価により手法の有効性を示した。また、ノードのプロトタイプ実装により、光パケット転送機構における光領域ラベル更新処理とパケット転送の動作を確認し、本機構の実現可能性を検証した。

今後の光パケット交換ネットワーク技術研究のあり方の示唆 ネットワークと光デバイスの双方を考慮する視点に基づいた光パケット“ネットワーキング”技術の検討により、今後の光パケット交換ネットワーク技術の研究に対して、光ネットワークにおけるシステム設計のアプローチを示した。また、光デバイスの特性を考慮し、現在のデバイス技術で実現可能な光パケット交換ネットワークアーキテクチャを示し、今後の具体的な要素技術開発にひとつの指針を与えた。

以上より、本研究は将来の超高速ネットワーク基盤への光パケット交換ネットワークの適用の道を開くものであり、更なる情報化社会の発展に向け大きく寄与するものである。また、これまでパケットスイッチング技術の研究開発にとどまっていた光パケットネットワーク分野にネットワーキングという視点を持ち込んだことで、光ネットワーキングにおける新しい研究分野を切り拓き、本研究分野における将来への展望を示した点でも、本研究は意義深いものであるといえる。

7.2 今後の課題と展望

本研究で行った光パケット交換ネットワークのアーキテクチャと基礎的な要素技術の検討をふまえ、今後の実用化とより効率的なネットワーキングに向けて取り組むべき課題としては以下が挙げられる。

エッジノード処理に関する検討 本論文では中継ノードにおける処理を中心に述べてきたが、エッジノードにおいてどのような処理や制御を行うかについても詳細に検討する必要がある。

例えば、現在のインターネットでは主に制御パケットとしてサイズの小さなパケットが大量に流れているが、大容量リンクにおいては小さいパケットが帯域を十分に使い切れなかったり、またTCPなどのトランスポート制御が大容量通信向けになっていないという問題がある。その一方で大容量通信に対する需要も確実に存在し大きくなってきている。こういった背景から、エッジノードでの通信制御に関しても、光・大容量という想定を加味した新しい手法が求められる。

また、ホップ毎転送制御で実現できていたことを、エッジでの制御のみでどのように実現するかについても検討が必要である。具体的には、マルチキャストや高速経路切替 (fast reroute) といった機能がこれにあたる。どちらもラベルのスイッチが必要であるため、現状ではいずれも一旦電気に変換して処理せざるを得ないが、その場合には、例えば電気処理を行うエッジノードをどのように選択すると効率的かといった類のことにに関して手法を示していく必要がある。

光デバイス性能の改善 本論文により、ノードの基本的な処理に関しては現在の光デバイス技術で十分実現可能であることが示されたが、その性能はまだ十分ではないといえる。

本研究で検討してきた光パケット交換ネットワークの場合、ペイロード転送の大容量化は波長多重により比較的簡単に実現できるが、ヘッダ長の縮小、伝送距離の伸張、波長・偏波依存性など、それぞれを実現するためには光デバイスの性能改善が不可欠である。特に、光ファイバの損失がほぼ理論限界となっている現在、全光信号再生など信号劣化をどのように克服するかは全光ネットワーク技術における共通の重要課題である。

また最近では、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) やフォトニック結晶などを用いて、光メモリをはじめとする様々な機能を実現することが盛んに研究されている。光は、媒体の物性的違いから情報保存が電気に比べて格段に非効率であるため、光デバイスが電気にとって代わるということはないと思われる。しかし、それでもこれまでの光情報処理にある程度のパラダイム変化をもたらす可能性はあり、光デバイス技術の発展は大きな課題であると同時に期待される分野ともなっている。

謝辞

博士課程の研究にあたり、多くの方にお世話になりましたこと、心より感謝いたします。なかでも以下の方々にはひとかたならぬ御協力をいただきました。深く御礼申し上げます。

指導教員の森川博之教授には、卒論生として研究室に配属されて以来6年間の長きにわたり御指導いただき、本当にありがとうございました。また、昨年本学を御退職された青山友紀元教授（現慶應義塾大学教授）にも旧青山・森川研究室の頃より5年の間、大変お世話になりました。お二方には、幅広い知識と豊富な経験に基づく有益な御助言により、研究の方向を誤らず常に一步先へと進んでいけるよう御指導、御鞭撻をいただきました。同時に、様々な社会的経験を積む機会を作ってくださいましたおかげで、大学院生として非常に充実した時間を送ることができました。心より感謝いたしております。

また、研究活動を進めるうえでの環境整備に御配慮いただき、特に学生だけではとてもこなせない事務関連の手続きに関して常にお世話になりました本研究室所属の秘書である川北敦子氏、宮島史子氏にも、感謝いたします。

川田雅人氏、川原圭博氏、今泉英明氏、金子晋丈氏には、直接研究上の御指導をいただきました。有益な議論と親身なアドバイスをいただきましたこと、誠にありがとうございました。特に本論文の主題である光パケット交換ネットワークの研究を進めるにあたって、今泉氏、金子氏には本当にお世話になりました。全く新しい分野への挑戦という状況のなかで、山積みであった研究上の悩みを共有つつ、進むべき道を一緒に模索していただきましたこと、深く感謝いたします。

丸山達也氏、斉藤哲也氏、渡部克弥氏、北田亘氏にも、要素技術の手法検討や評価を中心に、本研究の進行にあたり多大な御助力をいただきました。それにより、困難な課題であったにも関わらず成果を残すことができたこと、また日頃の議論を通して様々な手掛かり・切っ掛けを得られたことに、感謝します。

また、デバイスに関する知識が乏しかった著者および上記の共同研究者の方々に、光デバイスの専門家として多くの有益な御助言をいただき、また実装や実験において大変お世話になりました。本学先端科学技術研究センターの竹中充氏、アブドゥラ・アル・アミン氏、種村拓夫氏に深く御礼申し上げます。

そして日々の研究室生活を楽しく過ごせたこと、森川研究室の全ての方に感謝いたします。特に、卒論生時代より6年間、苦楽を共にしてきた川西直氏、猿渡俊介氏には、折にふれて研究に関する議論をしたり、その他の雑務においても相談にのっていただいたりと、大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

最後に、これまで筆者を支え育ててくれた両親に、心から感謝します。

2006年12月15日 松本 延孝

参考文献

- [1] Takuya Ohara, Hidehiko Takara, Takashi Yamamoto, Hiroji Masuda, Toshio Morioka, Makoto Abe, and Hiroshi Takahashi. Over 1000 channel, 6.25 GHz-spaced ultra-DWDM transmission with supercontinuum multi-carrier source. In *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference 2005 (OFC/NFOEC2005)*, Vol. 3, p. 3, Anaheim, USA, March 2005.
- [2] Ben Macklin. Worldwide online access: 2004-2010. eMarketer, May 2006.
- [3] 総務省. 平成 17 年度 ICT 政策大綱, August 2004.
- [4] T. Kurimoto, H. Kojima, I. Inoue, and S. Urushidani. Multilayer service network architecture for next-generation core network. Technical Report 11, NTT, November 2004.
- [5] George Gilder, Richard Vigilante, and Charles Burger. Cao's law. In *Gilder Technology Report*, Vol. 5, 2000.
- [6] Rodney S. Tucker and Wen De Zhong. Photonic packet switching: An overview. *IEICE Transactions of Communications*, Vol. E82-B, No. 2, pp. 254–264, February 1999.
- [7] D. K. Hunter and I. Andonovic. Approaches to optical Internet packet switching. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 38, No. 9, pp. 116–122, September 2000.
- [8] D. J. Blumenthal, J. E. Bowers, L. Rau, Chou Hsu-Feng, S. Rangarajan, Wang Wei, and K. N. Poulsen. Optical signal processing for optical packet switching networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, No. 2, pp. S23–S29, February 2003.
- [9] Mike J. O' Mahony, Dimitra Simeonidou, David K. Hunter, and Anna Tzanakaki. The application of optical packet switching in future communication networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, No. 3, pp. 128–135, March 2001.
- [10] C. Guillemot, M. Renaud, P. Gambini, C. Janz, I. Andonovic, R. Bauknecht, B. Bostica, M. Burzio, F. Callegati, M. Casoni, D. Chiaroni, F. Clerot, S. L. Danielsen, F. Dorgeuille, A. Dupas, A. Franzen, P. B. Hansen, D. K. Hunter, A. Kloch, R. Krahenbuhl, B. Lavigne, A. Le Corre, C. Raffaelli, M. Schilling, J. C. Simon, and L. Zucchelli. Transparent optical packet switching: the european ACTS/KEOPS project approach. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 2117–2134, December 1998. CNET, Lannion.

-
- [11] W. A. Vanderbauwhede and D. A. Harle. Architecture, design, and modeling of the opsnet asynchronous optical packet switching node. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 7, pp. 2215–2228, July 2005. Dept. of Comput. Sci., Univ. of Glasgow, UK.
- [12] N. Wada, H. Harai, and F. Kubota. 40Gbit/s, multihop optical packet routing using optical label processing based packet switch prototype. In *Optical Fiber Communication Conference 2004 (OFC 2004)*, Vol. 2, p. 3, February 2004.
- [13] Gabriella Cincotti, Naoya Wada, Satoshi Yoshima, Nobuyuki Kataoka, and Ken'ichi Kitayama. 200Gchip/s, 16-label simultaneous multiple-optical encoder/decoder and its application to optical packet switching. In *Optical Fiber Communication Conference 2005 (OFC/NFOEC2005)*, March 2005.
- [14] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, and S. Humphries. WDM optical IP tag switching with packet-rate wavelength conversion and subcarrier multiplexed addressing. In *Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference (OFC'99)*, Vol. 3, pp. 162–164, February 1999.
- [15] J. Gripp, D. Stiliadis, J. E. Simsarian, P. Bernasconi, J. D. Le Grange, L. Zhang, L. Buhl, and D. T. Neilson. IRIS optical packet router. *OSA Journal of Optical Networking*, Vol. 5, No. 8, pp. 589–597, July 2006. invited paper.
- [16] Sireen Malik and Ulrich Killat. Impact of burst aggregation time on performance in optical burst switching networks. In *Proceeding of Conference on Optical Network Design and Modeling*, pp. 19–25, February 2005.
- [17] 独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構電子・情報技術開発部. フォトニックネットワーク技術の開発, February 2004.
- [18] R. Van Caenegem, D. Colle, J. Cheyns, E. Van Breusegem, M. Pickavet, and P. Demeester. All-optical label swapping versus label stripping: A node dimensioning point of view. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC2004)*, Vol. 4, pp. 940–941, September 2004.
- [19] X. C. Yuan, V. O. K. Li, C. Y. Li, and P. K. A. Wai. A novel self-routing address scheme for all-optical packet-switched networks with arbitrary topologies. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 329–339, February 2003.
- [20] E. Kehayas, K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, K. Christodoulopoulos, K. Vlachos, and H. Avramopoulos. Artemis: 40-Gb/s all-optical self-routing node and network architecture employing asynchronous bit and packet-level optical signal processing. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 8, pp. 2967–2977, August 2006.
- [21] WAN packet size distribution. available at <http://www.nlanr.net/NA/Learn/packetsizes.html>, June 1997.

-
- [22] 太田昌孝. 全光データパスルータの構成要素. 電子情報通信学会技術研究報告, PN2005-30, August 2005.
- [23] Albert-Laszlo Barabasi and Reka Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509–512, October 1999.
- [24] T. Hirooka, K. Hagiuda, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa. 160 gbit/s-600 km otdm transmission using time-domain optical fourier transformation. In *32th European Conference on Optical Communication 2006 (ECOC2006)*, No. Tu1.5.4, September 2006.
- [25] Hideaki Furukawa, Naoya Wada, Hiroaki Harai, Makoto Naruse, Hideki Otsuki, Michiaki Katsumoto, Tetsuya Miyazaki, Katsuya Ikezawa, Akira Toyama, Naoki Itou, Hiroshi Shimizu, Hiroshi Fujinuma, Hatsushi Iiduka, Gabriella Cincotti, and Kenichi Kitayama. All-optical multiple-label-processing based optical packet switch prototype and novel 10Gb ethernet / 80 (8λ × 10) Gbps-wide colored optical packet converter with 8-channel array burst-mode packet transceiver. In *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2007 (to be presented)*, 2007.
- [26] J. M. H. Elmirghani and H. T. Mouftah. All-optical wave-length conversion: technologies and applications in DWDM networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 38, No. 3, pp. 86–92, March 2000.
- [27] Xi Wang, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. Burst optical deflection routing protocol for wavelength routing WDM networks. *SPIE Optical Networks Magazine*, Vol. 3, No. 6, pp. 12–19, November 2002.
- [28] Y. Shimazu and M. Tsukada. Ultrafast photonic atm switch with optical output buffers. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 265–272, February 1992.
- [29] D. K. Hunter, M. C. Chia, and I. Andonovic. Buffering in optical packet switches. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 2081–2094, December 1998. Dept. of Electron. & Electr. Eng., Strathclyde Univ., Glasgow.
- [30] Z. Pan, H. Yang, Z. Zhu, J. Cao, V. Akella, S. Butt, and S. J. B. Yoo. Demonstration of variable-size packet contention resolution and packet forwarding in an optical-label switching router. *IEEE Photonic Technology Letters*, Vol. 16, No. 7, pp. 1772–1774, July 2004.
- [31] S. Yao, S. J. B. Yoo, and B. Mukherjee. A comparison study between slotted and un-slotted all-optical packet-switched network with priority-based routing. In *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC 2001)*, Vol. 2, pp. TuK2-1–TuK2-3, March 2001.
- [32] Tao Zhang, Kejie Lu, and J. P. Jue. Differentiated contention resolution for QoS in photonic packet-switched networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22, No. 11, pp. 2523–2535, November 2004. Dept. of Comput. Sci., Univ. of Texas, Richardson, TX, USA.

-
- [33] D. K. Hunter, I. Andonovic, and M. C. Chia. Multi-stage optical buffered switch for IP traffic. In *Proceedings of SPIE Conference on All-Optical Networking*, Vol. 3843, pp. 90–98, September 1999.
- [34] 山口貴詩, 馬場健一, 村田正幸, 北山研一. フォトニックパケットスイッチにおける WDM ファイバ遅延線バッファのためのパケットスケジューリング. 電子情報通信学会技術研究報告, IN2001-116, December 2001.
- [35] N. Ogashiwa, Hiroaki Harai, Naoya Wada, F. Kubota, , and Y. Shinoda. Multi-stage fiber delay line buffer in photonic packet switch for asynchronously arriving variable-length packets. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E88-B, No. 1, pp. 258–265, January 2005.
- [36] L. Tancevski, A. Ge, G. Castanon, and L. Tamil. A new scheduling algorithm for asynchronous, variable length IP traffic incorporating void filling. In *Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference (OFC'99)*, Vol. 3, pp. 180–182, February 1999.
- [37] L. Tancevski, S. Yegnanarayanan, G. Castanon, L. Tamil, F. Masetti, and T. McDermott. Optical routing of asynchronous, variable length packets. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 10, pp. 2084–2093, October 2000. Alcatel Corp. Res. Center, Richardson, TX, USA.
- [38] R. Bush and D. Meyer. Some Internet Architectural Guidelines and Philosophy. RFC 3439, IETF, December 2002.
- [39] L. Subramanian, M. Caesar, C. T. Ee, M. Handley, M. Mao, S. Schenker, and I. Stoika. Towards a next generation inter-domain routing protocol. In *Proceedings of HotNets-III*, November 2004.
- [40] C. Labovitz, A. Ahuja, A. Bose, and F. Jahanian. Delayed internet routing convergence. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 9, No. 3, pp. 293–306, June 2001.
- [41] Tian Bu and D. Towsley. On distinguishing between internet power law topology generators. In *Proceedings of IEEE 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, Vol. 2, pp. 638–647, August 2002.
- [42] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta, and J. Byters. BRITE: An approach to universal topology generation. In *Proceedings of 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOT 2001)*, pp. 346–353, August 2001.
- [43] S. Yao, B. Mukherjee, S. J. B. Yoo, and S. Dixit. A unified study of contention-resolution schemes in optical packet-switched networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 672–683, March 2003.

-
- [44] 佐々木純, 高橋達郎. エッジルータを共通バッファとして用いる光パケットルータのトラヒック制御法. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J87-B, No. 7, pp. 963–971, July 2004.
- [45] Daisuke Ishii, Naoaki Yamanaka, and Iwao Sasase. Self-learning route selection scheme using multipath searching packets in an obs network. *OSA Journal of Optical Networking*, Vol. 4, No. 7, pp. 432–445, July 2005. invited paper.
- [46] 橋口知弘, 王溪, 森川博之, 青山友紀. WDM ネットワークにおける波長優先度を用いた波長予約方式. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-B, No. 3, pp. 611–621, March 2005.

発表文献

- [47] 川原圭博, 松本延孝, 森川博之, 青山友紀. ピアツーピアネットワーク型仮想環境における更新情報共有手法. 電子情報通信学会総合大会 2002, B-7-54, March 2002.
- [48] 川原圭博, 松本延孝, 森川博之, 青山友紀. ネットワーク型仮想環境のための分散通信アーキテクチャ. 電子情報通信学会技術研究報告, IN2001-229, March 2002.
- [49] 松本延孝, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀. ピアツーピアネットワーク型仮想環境のためのピア発見機構. 電子情報通信学会総合大会 2002, B-7-51, March 2002.
- [50] Yoshihiro Kawahara, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. A peer-to-peer message exchange scheme for large scale networked virtual environments. In *Proceedings of 8th IEEE International Conference on Communications Systems (ICCS2002)*, 3A-04-04, November 2002.
- [51] 松本延孝, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀. 大規模仮想環境のためのホスト情報を考慮したピア発見機構. 電子情報通信学会技術研究報告, IN2002-43, July 2002.
- [52] 松本延孝, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀. ピアツーピアを用いた大規模ネットワーク型仮想環境の評価. 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2003, B-7-78, September 2003.
- [53] Yoshihiro Kawahara, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. A peer-to-peer message exchange scheme for large scale networked virtual environments. *Telecommunication Systems*, Vol. 25, No. 3-4, pp. 353-370, 2004.
- [54] 松本延孝, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀. 大規模仮想環境のためのスケーラブルな通信アーキテクチャの評価. 日本ソフトウェア科学会 SPA2004, March 2004.
- [55] 松本延孝, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀. ピアツーピアを用いた大規模仮想環境におけるネットワーク分断の修復. 電子情報通信学会総合大会 2004, B-6-193, March 2004.
- [56] Nobutaka Matsumoto, Yoshihiro Kawahara, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. A scalable and low delay communication scheme for networked virtual environments. In *1st IEEE International Workshop on Networking Issues in Multimedia Entertainment (NIME2004)*, November 2004.
- [57] 松本延孝, 丸山達也, 金子晋丈, 森川博之, 青山友紀. 中継ルータのアドレス部分処理による光パケットルーティング. 電子情報通信学会総合大会 2005, B-12-20, March 2005.

- [58] 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 森川博之, 青山友紀. 光パケットルーティングのためのブロードキャストを用いた経路情報広告手法. 電子情報通信学会総合大会 2005, B-12-19, March 2005.
- [59] 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 光パケットのソースルーティングに適した経路情報交換手法. 電子情報通信学会技術研究報告, PN2005-28, August 2005.
- [60] 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 光パケットルーティングにおけるトリガ更新型経路情報交換手法. 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2005, B-12-28, September 2005.
- [61] 松本延孝, 丸山達也, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 簡略な転送処理による光パケットルーティング. 電子情報通信学会技術研究報告, PN2005-43, October 2005.
- [62] 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 始点経路制御型光パケットネットワークへの経路優先度学習の適用. 電子情報通信学会技術研究報告, PN2005-114, March 2005.
- [63] 松本延孝, 丸山達也, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 始点経路制御型光パケットネットワークノードエミュレータの設計. 電子情報通信学会総合大会 2006, B-12-31, March 2006.
- [64] 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 始点経路制御型光パケットネットワークにおける優先度学習に基づいた経路選択手法. 電子情報通信学会総合大会 2006, B-12-29, March 2006.
- [65] 北田亘, 丸山達也, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之, 青山友紀. 光パケット衝突回避手法における取得情報の違いによる棄却性能差の評価. 電子情報通信学会総合大会 2006, B-12-30, March 2006.
- [66] Nobutaka Matsumoto. Optical packet routing. In *The International Conference on IP + Optical Network (iPOP2006) (Exhibition)*, June 2006.
- [67] Nobutaka Matsumoto. A simple label processing scheme for optical packet switched network. In *The Joint International Conference on Optical Internet and Next Generation Network (COIN-NGNCON 2006)*, July 2006.
- [68] 渡部克弥, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之. 簡略な光パケット転送を実現するラベル更新部の実装. 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2006, September 2006.
- [69] 渡部克弥, 松本延孝, 金子晋丈, 今泉英明, 森川博之. プリアンブル遅延型ラベル更新手法を用いた光パケット中継ノードの構成. 電子情報通信学会技術研究報告, PN2006-36, October 2006.
- [70] 松本延孝, 渡部克弥, 斉藤哲也, 今泉英明, 森川博之. 自己ルーティングスイッチを用いた光パケット交換ネットワークにおけるヘッダ長の評価. 電子情報通信学会技術研究報告, March 2007.

-
- [71] 斉藤哲也, 渡部克弥, 松本延孝, 今泉英明, 森川博之, 羽鳥光俊. 多波長光パケットネットワークにおける遅延線バッファを用いた衝突回避機構の評価. 電子情報通信学会技術研究報告, March 2007.
- [72] 今泉英明, 渡部克弥, 斉藤哲也, 松本延孝, 種村拓夫, アブドゥラーアルアミン, 竹中充, 中野義昭, 森川博之. 多波長光パケット交換と光回線交換を用いたハイブリッドネットワークに関する考察. 情報通信学会技術研究報告, March 2007.
- [73] 渡部克弥, 斉藤哲也, 松本延孝, 種村拓夫, 今泉英明, アブドゥラーアルアミン, 竹中充, 中野義昭, 森川博之. PLZT 型光スイッチを用いた 80Gb/s 多波長光パケット転送実験. 電子情報通信学会技術研究報告, March 2007.
- [74] 松本延孝, 渡部克弥, 斉藤哲也, 今泉英明, 森川博之. プリアンブル遅延型ラベル更新処理を用いた光パケット転送機構のヘッダ長に関する評価. 電子情報通信学会総合大会 2007, (発表予定) of B-12-7, March 2007.
- [75] 渡部克弥, 松本延孝, 今泉英明, 竹中充, 中野義昭, 森川博之. PLZT 型光スイッチを用いた 80Gb/s 多波長パケット交換の検証. 電子情報通信学会総合大会 2007, (発表予定) of B-12-5, March 2007.
- [76] 斉藤哲也, 渡部克弥, 松本延孝, 今泉英明, 森川博之, 羽鳥光俊. 実トラフィックパターンを用いた多波長光パケット交換における衝突回避機構の評価. 電子情報通信学会総合大会 2007, (発表予定) of B-12-2, March 2007.
- [77] 今泉英明, 渡部克弥, 斉藤哲也, 松本延孝, 種村拓夫, アブドゥラーアルアミン, 竹中充, 中野義昭, 森川博之. 多波長光パケットと波長パスを組み合わせたハイブリッド型光ネットワーク. 電子情報通信学会総合大会 2007, (発表予定) of B-12-1, March 2007.
- [78] Nobutaka Matsumoto, Katsuya Watabe, Tetsuya Saito, Hideaki Imaizumi, and Hiroyuki Morikawa. Preamble delaying label update mechanism for self-routed optical packet switching networks. In *ONDM2007 (submitted)*, 2007.
- [79] Katsuya Watabe, Tetsuya Saito, Nobutaka Matsumoto, Takuo Tanemura, Hideaki Imaizumi, Abdullah Al Amin, Mitsuru Takenaka, Yoshiaki Nakano, and Hiroyuki Morikawa. 80Gb/s multi-wavelength optical packet switching using PLZT switch. In *ONDM2007 (submitted)*, 2007.
- [80] Hideaki Imaizumi, Katsuya Watabe, Tetsuya Saito, Nobutaka Matsumoto, Takuo Tanemura, Abdullah Al Amin, Mitsuru Takenaka, Yoshiaki Nakano, and Hiroyuki Morikawa. Hotaru: a novel concept of hybrid optical network architecture combining multi-wavelength packet and circuit. In *ONDM2007 (submitted)*, 2007.