

学位論文

光パケット交換ネットワークの
構成と制御に関する研究

松本 延孝

■ 内容梗概

インターネットの急速な普及によりトラフィック量は増加の一途をたどっており、ネットワーク大容量化への需要は高まる一方である。一方でパケット転送を電気処理で行う現在のネットワークアーキテクチャでは、ルータの転送容量が限界に近づいているといわれており、ネットワーク大容量化のための新しいパケット転送機構が求められている。また、既に高速・大容量ネットワークを実現する技術として光ネットワーク技術が注目され研究されており、リンク容量は波長多重等の技術によって大容量化が実現されているが、ノードにおける転送処理では光パス交換が実用化されるにとどまっており、光交換の分野においてもリンク資源共有によるより大容量な通信方式の実現が望まれている。これらの背景から、パケット通信を光領域で行う光パケット交換ネットワーク技術が期待されている。

光パケット交換では、以下のふたつの方法によるパケット転送容量の増大を見込むことができる。ひとつは、信号の変調速度の高速化による大容量化である。信号を電気に変換する場合は、信号速度は電気回路の動作速度に制限されてしまうが、光領域のまま処理することができれば、そのボトルネックを取り除くことができる。もうひとつは、波長多重による並列伝送を用いた大容量化である。電気領域で中継処理を行う場合は、波長多重リンクの各波長について電気に変換し転送処理を行う機構が必要となる。それに対し、光処理では導波路型光スイッチを用いることで全波長を一括スイッチングすることが可能となり、同等の装置サイズにおいて飛躍的な転送容量の増大を見込むことができる。

しかし、パケット信号を光領域でカットスルー転送しさえすればノードの転送容量が上がるというわけではない。パケットを転送するためには、宛先を示すラベルを読み取り、それに応じたスイッチの制御をしなければならない。くわえて、パケット交換においてはパケット衝突が起こりうるため、衝突回避機構も必要となる。こういった処理には一般的にメモリや複雑な演算を行う回路が必要となるが、現状の光デバイス技術でそういった機能を提供することは困難であり、研究的にもまだ初期段階にあるため実用化は先のことである。また、ラベル識別や制御は電気領域で行うとしても、転送データ自体は光領域でカットスルー転送されるため、制御に関する処理時間が大きくなったりばらついたりすると、転送データを待機させる処理が複雑になってしまう。そのため、IPパケット交換のように各ノードで転送時に経路表を検索するような転送方式を適用することは難しい。したがって、こうした光パケット交換における光デバイスの制約に着目した、新しいパケット転送機構が求められる。

本研究では光パケット交換ネットワークの実現に向けて、以下の2つの技術的課題に取り組む。

- 光領域でのパケット転送の実現方法
- 光領域におけるパケット転送のためのネットワーク制御の検討

これらを光デバイスの制約とネットワーク的要求に基づき、現在のデバイス技術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提示すること、またそのための要素技術に関する検討を通し今後の光パケット交換ネットワークの在り方と技術開発の方向性を示すことが本研究の主たる目的である。

第2章では、光パケット交換ネットワークのアーキテクチャについて議論する。光パケット交換ではパケット信号が光領域のまま転送されなければならないが、これを現実的かつ効率的に実現するためのアーキテクチャとして、ネットワークのための機能をネットワーク上でどのように構成し、パケット転送処理の機能をノード内でどのように構成するかについて述べる。

そのために本章では、最初に「光パケット転送においてノードで必要となる処理」と「光デバイスによって提供可能な信号処理・情報処理の機能」の整理を行う。そして、パケットの光領域でのマルチホップ転送を実現するためには転送時のラベル処理において経路表検索を省くことが必要である点を明らかにし、自己ルーティングスイッチを用いることで中継ノードでの転送処理を簡略化し経路制御はできるだけエッジノードにおいて行うというアプローチを提示する。さらに、自己ルーティングスイッチを用いた光パケット交換の、転送や制御にかかる個々の機能について、それぞれにおける要件や関連を整理し、どのような技術的課題が解決されるべきかを示す。

第3章と第4章は、パケット信号を光領域で転送するための要素技術を扱う。限られた光デバイスの機能によって、パケットの転送や衝突回避をどのように光領域で実現するかが主たる課題である。

第3章では、光パケット転送のためのラベル処理方式について述べる。自己ルーティングスイッチを用いてマルチホップ転送を行うには、予め中継ノードにおける転送制御の情報がパケットのヘッダにラベルとして記されている必要がある。また、各中継ノードでは、自身における制御情報がラベル中のどの位置に記されているかを知る必要がある。これらの要求に対し、経路上の各中継ノードにおける制御情報を通過順に並べてラベルとし、プリアンブル信号をラベルの既読部分相当だけ遅延させることで各ノードでのラベル識別位置を固定化するための光領域ラベル更新を行う方式を提案する。各中継ノードでのラベルの識別長が一定であることからプリアンブルの遅延処理は固定長の遅延線によって可能である。さらに各中継ノードでのラベル識別は位置が一定で識別長も短いことから非常に単純な論理ゲートの組み合わせのみで実現できるため、処理時間の固定化に留まらず、識別処理さえも光領域で実現できる可能性を高くするものである。

本方式に関する評価としては、自己ルーティングスイッチを用いることで課題となるヘッダ長と、光カットスルー転送で課題となる伝送信号への本方式の影響について着目する。ラベル更新においてプリアンブルを再利用する本ラベル処理方式は他の自己ルーティングスイッチを用いた方法よりもヘッダ長を短く抑えられることについて述べ、またラベル更新機構のハードウェア構成による伝送信号への影響について考察する。最後に、実証実験において光領域で所望のラベル処理が行われたことを示し、設計やコスト面もふまえて本方式の実現性について議論する。

第4章では、光パケット交換における衝突回避機構について述べる。パケット通信においては転送効率の向上のため衝突回避機構が不可欠であるが、光 RAM の実用化がされていないことが

ら、光パケット交換に適用可能なノード内衝突回避として波長変換・迂回ルーティング・遅延線バッファといった方式が研究されている。本章では、波長数増加の影響を受けず、送信元で経路指定される自己ルーティングスイッチを用いた光パケット交換に適用可能な衝突回避機構として、遅延線バッファによる衝突回避機構を対象とした性能評価について述べる。

遅延線バッファを用いた衝突回避ではパケットの遅延量が遅延線長によって決まるため、バッファの構成が衝突回避性能に大きく影響することが見込まれる。そこで現在のインターネットにおける許容範囲とされるパケット損失率 10^{-6} 以下を実現するためのバッファ構成（単位長、段数、バッファ長分布等）を、実際に利用可能な光スイッチデバイスの制約を考慮し、シミュレーションにより明らかにする。

第5章と第6章では、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のための経路制御技術を扱う。パケット転送時に参照されるラベルを構築するために、どのようにその情報を得て、それに基づきどのように効率的なネットワーキングを実現するかが主たる課題となる。

第5章では、送信元ノードで出力インタフェース識別子を用いた経路指定を行うための経路情報の広告・取得方法について述べる。第3章で述べる光ラベル処理方式では、ラベルとして経路上の各中継ノードにおける出力インタフェース識別子を通過順に並べたものを用いる。したがってラベルは宛先ノードが同一であっても経路毎に異なるため、エンド間で経路情報を知らせあうための機構について検討することが必要となる。

本章では、パスベクトル型の経路情報広告を行う場合のプロトコル拡張方法に関する検討とメッセージ量のシミュレーション評価、さらに現在のインターネット経路制御において実現されている経路制御機能との比較考察より、光パケット交換ネットワークにおける経路広告機構の特性を明らかにする。

第6章では、光パケット交換ネットワークにおける経路選択方式について述べる。通信においてどの経路を選択するかは帯域、遅延、損失率などの通信特性に影響を及ぼす。特に光パケット交換においてはノード内での衝突回避性能に限界があることから、パケット損失率を抑えることを目的とする経路選択方法について検討する。本手法では、パケットの送信の成否に基づき経路毎の選択優先度を調節する「優先度学習」を経路選択手法に適用する。これにより、送信元ノードで選択される転送経路が自律分散的にすみわけられ、衝突確率が低減される。本章では優先度学習アルゴリズムについて説明し、最短経路・ランダムに分散された経路との比較から、優先度に基づいた経路選択による衝突確率低減効果を明らかにする。

最後に、第7章では本研究の主たる成果について述べ、光パケット交換技術の残された課題と今後の展望について議論し本論文のまとめとする。

光パケット交換ネットワークの実現に際しては情報の媒体として光が持つ特殊性を意識した技術開発が必要であるという立場から、本研究では光デバイスの機能的な制約を考慮した光パケット交換ネットワークのアーキテクチャを検討し、要素技術であるパケット転送処理、衝突回避に関して光領域でそれらを実現するための手法を開発した。また、光領域のままパケット信号が転送される

ことによる転送制御の柔軟性の欠如をふまえ、光パケット交換ネットワークのための経路制御機構として求められる機能を明らかにし手法の開発を行った。本研究を通し、大規模ネットワークにおける光パケット転送の適用可能性を示すとともに、今後開発を進めるべき技術項目とその方向性を明らかにすることができた。以上より本論文における成果は、将来の超高速ネットワークインフラへの光パケット交換ネットワークの適用に向けた第一歩となるものと考えられる。

目次

内容梗概

- i -

第 1 章 序論	1
1.1 本論文の背景	2
1.1.1 光伝送技術の発展	2
1.1.2 インターネットにおける光パケット通信への期待	3
1.1.3 光デバイス技術の現状	4
1.2 本論文の目的	5
1.3 本論文の構成	6
第 2 章 光パケット交換ネットワークの構成	7
2.1 はじめに	8
2.2 光パケット通信におけるデバイスの制約	8
2.3 光パケット転送機構における機能要素	9
2.4 光パケット交換ネットワークへの自己ルーティングの適用	10
2.5 おわりに	12
第 3 章 プリアンブル遅延型ラベル処理を用いた光パケット転送	13
3.1 はじめに	14
3.2 自己ルーティングスイッチを用いた光パケット転送	14
3.2.1 Self-Routing Addressing	14
3.2.2 ARTEMIS	15
3.2.3 既存手法のインターネットへの適用における問題点	17
3.3 プリアンブル遅延型光ラベル処理による光パケット転送機構	19
3.3.1 パケットフォーマット	19
3.3.2 ノード構成	20
3.3.3 パケット転送処理	22
3.3.4 特徴	23
3.4 他の自己ルーティングを用いた光パケット転送機構との比較	23
3.4.1 ラベル長の評価	23
3.4.2 ラベル更新機構のハードウェア構成が伝送に与える影響	29
3.5 光パケット転送ノードの実装	31
3.5.1 ノードの設計	31
3.5.2 実験パラメータ	33

3.5.3	実証実験	33
3.6	おわりに	34
第4章	光ファイバ遅延線を用いた衝突回避機構の評価	37
4.1	はじめに	38
4.2	光パケット交換ネットワークにおける衝突回避機構	38
4.2.1	光パケット交換ネットワークにおけるノード内衝突回避処理	38
4.2.2	遅延線バッファを用いた衝突回避機構	39
4.3	並列型バッファによる衝突回避機構の構成	40
4.4	インターネットトラフィックにおけるバッファ構成と衝突回避性能の関係	41
4.4.1	評価項目	41
4.4.2	シミュレーション環境	42
4.4.3	トラフィックパターンに関する評価	42
4.4.4	遅延線長に関する評価	48
4.4.5	遅延線数に関する評価	52
4.4.6	ポート数に関する評価	55
4.5	おわりに	57
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	59
5.1	はじめに	60
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	60
5.2.1	経路情報広告における要求	60
5.2.2	既存の経路広告・経路制御機構	61
5.2.3	設計指針	62
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	63
5.3.1	ノードペア間の経路情報交換	63
5.3.2	トポロジーの変化に応じた修正情報の広告	64
5.4	シミュレーション評価	65
5.4.1	想定環境	65
5.4.2	経路情報メッセージ数に関する結果	65
5.4.3	経路情報メッセージ長に関する結果	68
5.5	機能拡張に関する検討	69
5.5.1	経路の隠蔽	69
5.5.2	トレースバック	69
5.5.3	マルチキャスト・高速経路切り替え	69
5.6	おわりに	70
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	71
6.1	はじめに	72
6.2	光パケット衝突の解決と回避	72

6.3	優先度学習型経路選択手法	73
6.3.1	経路優先度更新アルゴリズム	74
6.3.2	PRS の特徴	75
6.4	シミュレーション評価	76
6.4.1	シミュレーション環境	76
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	76
6.4.3	パケットの平均ホップ数への影響	76
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	78
6.4.5	トラヒック変化への対応	78
6.4.6	ベストパス数による影響	78
6.5	おわりに	81
第7章 結論		83
7.1	本研究の主たる成果	84
7.2	今後の課題と展望	85
謝辞		87
参考文献		87
発表文献		93

目次

1.1	JPIXにおけるトラフィック量の推移 (2006年12月14日現在)	3
1.2	商用ルータにおける転送容量の推移	4
2.1	光パケット交換ノードの構成	10
2.2	自己ルーティングに基づいた光パケット交換ネットワーク	11
3.1	Self-Routing Addressing	16
3.2	ARTEMIS	16
3.3	インターネットにおけるIPパケット長分布 (1997年)	17
3.4	光パケット構成とペイロードの効率	18
3.5	ヘッダフォーマット	20
3.6	パケットの構成例	20
3.7	中継ノードの構成	21
3.8	論理ゲートによるヘッダ識別回路の構成例	21
3.9	ヘッダ更新部の構成と更新処理	21
3.10	ノード数とヘッダ長の関係 ($b = 40\text{Gbps}$)	25
3.11	ノード数とヘッダ長の関係 ($b = 160\text{Gbps}$)	26
3.12	ホップ数とヘッダ長の関係 ($N = 10000, b = 40\text{Gbps}, g = 5\text{ns}$)	27
3.13	ホップ数とヘッダ長の関係 ($N = 10000, b = 40\text{Gbps}, g = 0.05\text{ns}$)	28
3.14	ヘッダ長におけるビットレート・セーフティギャップの影響 ($N = 10000$)	30
3.15	実装環境の構成	32
3.16	実証実験の想定ノードトポロジ	33
3.17	ラベル更新部の実験構成	34
3.18	パケット転送動作時の信号波形	35
4.1	光領域における衝突回避手法	39
4.2	遅延線バッファを用いた衝突回避機構	40
4.3	光ファイバ遅延線による並列バッファ型衝突回避機構	41
4.4	遅延線数とパケット損失率の関係 ($\rho=20\%, k=0.1$)	43
4.5	パケット長分布 (4波長多重)	44
4.6	遅延線数とバッファ使用率の関係 ($\rho=20\%, k=0.1$)	44
4.7	遅延線数とバッファ平均遅延の関係 ($\rho=20\%, k=0.1$)	45
4.8	パターン1における遅延線数とパケット損失率の関係 ($k=0.1$)	46
4.9	パターン2における遅延線数とパケット損失率の関係 ($k=0.1$)	46

4.10	パターン 3 における遅延線数とパケット損失率の関係 ($k = 0.1$)	47
4.11	遅延線数とパケット損失率の関係 ($\rho = 0.1$)	49
4.12	遅延線数とパケット損失率の関係 ($\rho = 0.2$)	49
4.13	遅延線数とパケット損失率の関係 ($\rho = 0.3$)	50
4.14	遅延線数とバッファ平均遅延の関係 ($\rho = 0.1$)	50
4.15	遅延線数とバッファ平均遅延の関係 ($\rho = 0.2$)	51
4.16	遅延線数とバッファ平均遅延の関係 ($\rho = 0.3$)	51
4.17	パケット損失率 10^{-6} を満たす遅延線数と遅延線長係数の関係	53
4.18	パケット損失率 10^{-6} を満たす遅延線長係数とバッファ平均遅延の関係	53
4.19	到着負荷とパケット損失率の関係 ($k = 0.1$)	54
4.20	到着負荷とバッファ平均遅延の関係 ($k = 0.1$)	54
4.21	ポート数とパケット損失率の関係 ($k = 0.1$)	56
4.22	ポート数とバッファ平均遅延の関係 ($k = 0.1$)	56
5.1	パスベクトル型の経路情報交換	63
5.2	べき法則型と Transit-Stub 型のリンク数分布	66
5.3	ノード数によるメッセージ数の変化	66
5.4	ベストパス数によるメッセージ数の変化	67
5.5	ノード数によるメッセージ長の変化	68
6.1	PRS の概要	74
6.2	トラヒック負荷に対するパケット棄却率	77
6.3	平均ホップ数への影響	77
6.4	パケット棄却率の時間推移 ($\lambda=10000$)	79
6.5	パケット棄却率の時間推移 ($\lambda=50000$)	79
6.6	パケット棄却率の時間変化	80
6.7	ベストパス数による影響 ($\lambda=50000$)	80

■ 表 目 次

1.1	炭酸ガス排出量で見た各年度の省エネルギー効果	4
3.1	記号の定義	15
3.2	評価に用いたパラメータ	24
4.1	シミュレーションの諸元	42
4.2	評価トラフィックパターン	43

■ 第1章

序論

1.1 本論文の背景

1.1.1 光伝送技術の発展

現在の情報通信に不可欠な媒体としての地位を確立している“光”であるが、通信との関わりは古く紀元前まで遡る。

はじめて光を通信に利用したのは、狼煙であると言われている。狼煙の起源についてははっきりしていないが、交易都市国家を築いていた古代フェニキア人が商取引などの合図に利用していた（紀元前9世紀頃）、中国の秦始皇帝が万里の長城において北方異民族の侵入に対する防衛の合図に利用していた（紀元前3世紀頃）などといった例がある。基本的に煙の有無により1ビットを送送するという“超低容量”通信手段ではあったが、遠距離通信手段が手紙など人の移動による方法しかなかった昔にあって、光は唯一実時間で長距離通信を実現するものであったといえてよい。

近代的な意味での通信への光の応用は、1889年にグラハム・ベル（米）が音声信号の光伝送に関して取得した特許が最初であるとされる。その技術が実用化されたのは、さらに30年程後のイギリス海軍の委託研究によってであった。光無線は電波無線よりも伝送距離が短く障害物にも弱い。盗聴が困難であるという利点により実際に陸軍で利用された。

このように、初期の光通信技術は無線技術であった。特に電波による通信技術の確立後は、容量・距離の点で及ばないことから、盗聴防止などある意味特殊用途向けの通信媒体であったといえる。

一方、有線通信としての光通信の歴史は1930年頃に起源を求められる。ガラスのような反射材を用いたライトパイプに関する特許が、1930年頃に日本で出願されている。導波路中を光が反射しながら伝播されるという意味で、今の光ファイバのアイディアの起源がこのライトパイプに求められる。その後、固体レーザーの発明（メイマン（米）、1960年）、光ファイバの原理の発明（カオ（英）、1968年）を経て、1972年にコーニング社（米）が石英ガラスにより当時としては画期的な低損失である20dB/kmの光ファイバ製造に成功したことで、光ファイバ通信の実用化への道が一気に開けることとなった。

7年後の1979年には日本電信電話公社が理論的限界に近いとされる0.2dB/kmの損失率を達成し、さらに80年代後半には光エレクトロニクスの発展もあり送受信デバイスの性能が格段に向上したことで、光通信は性能・経済性・安定性で電波・衛星通信をはるかにしのぐ広域通信技術としての地位を確立した。現在では、波長分散が小さく増幅が困難な1.3 μm 帯が近距離通信において、石英ファイバにおける損失の小さい1.5 μm 帯が長距離通信でそれぞれ広く用いられている。

さらに、最近では多重化技術の発展による大容量化も進んでいる。1996年にエルビウム添加型光ファイバ増幅器が実用化され、広帯域の信号を光領域のまま増幅することが可能となり、北米通信業者が初めて波長多重方式の光通信システムを採用した。以後、増幅器や広帯域光源技術などの発展により、2001年にはNECが40Gbps \times 273波で10.9Tbpsの伝送を達成、2006年にはNTTやLucent Technology（米）らがそれぞれ13~14Tbpsを達成した。また2005年にはNTTが1000波長を越える超高密度波長多重の伝送実験を成功させている [1]。

現在では波長多重による大容量な光回線交換ネットワークが広く用いられるようになり、トラフィック量が増大しているインターネットバックボーンには不可欠な技術となっている。また、波長多重リンクを効率的に利用するための主要技術として、GMPLSなどのパス制御技術が盛んに研究されている。

1.1.2 インターネットにおける光パケット通信への期待

上に述べたような光通信技術をはじめとするネットワーク技術の発展により、1990年代にインターネットの急速な一般普及がもたらされ、近年ではFTTHなど、エンドユーザまで広帯域な通信がサービスされるようになってきている。こうしたネットワーク環境の変化は、接続端末数の増大や利用形態の変化、またアプリケーションおよびネットワークサービスの多様化を促進した。かつてはWWWや電子メールのような静的かつテキストデータ主流の通信を行うアプリケーションがほとんどであったが、常時接続に加え広帯域アクセスが提供されるようになり、ストリーミングやファイル共有など容量の大きなコンテンツを扱うアプリケーション、メッセージやネットワークゲームのようなリアルタイム性の強いアプリケーションの利用も急激に増えている。その結果、インターネットは既に世界で10億人以上のユーザを抱えており、現在も年率18%という高い割合で成長し続けていると報告されている [2]。また、インターネットにおけるハブの役割を担うため特にトラフィックが集中する Internet eXchange では、年率2倍もの割合で転送トラフィック量が増大している図 1.1。そして、u-Japan 政策 [3] などユビキタス社会の実現に向けた取り組みが進められるなかで、今後はさらに大容量で多様な通信が展開されるようになることが想定される。

このようなトラフィックの増大と多様化への要求において、現在の光ネットワーク技術は新たな課題に直面している。

光リンクの伝送容量は、波長多重技術や変調方式の発展により現在も着実に増加している。それに対し、ルータにおけるパケット転送容量は電気による中継処理がボトルネックとなり、その転送容量が限界に近づいていることが指摘されている (図 1.2) [4]。電気による処理速度が頭打ちのためインタフェースや筐体の並列化によりノードの大容量化を図ることになるが、消費電力が膨大になってしまうため、拡張できないという問題があるためである。上記論文 [4] では、10Tbps の転送容量を実現するために 200kW の電力を要するとされている。また、2006年12月時点で世界最大の転送容量を持つルータとしてギネスに登録されている Cisco Systems 社の CRS-1 は、92Tbps の転送容量を実現するために 83 架のシャーシを並べなければならず、消費電力に加えて設置面積や空調・配線も大きな問題となる。光ファイバの原理を考案したカオは「光ファイバー 1 本の伝送路の通信容量はムーアの法則以上に早く増加する」(カオの法則 [5]) と指摘したが、装置サイズや

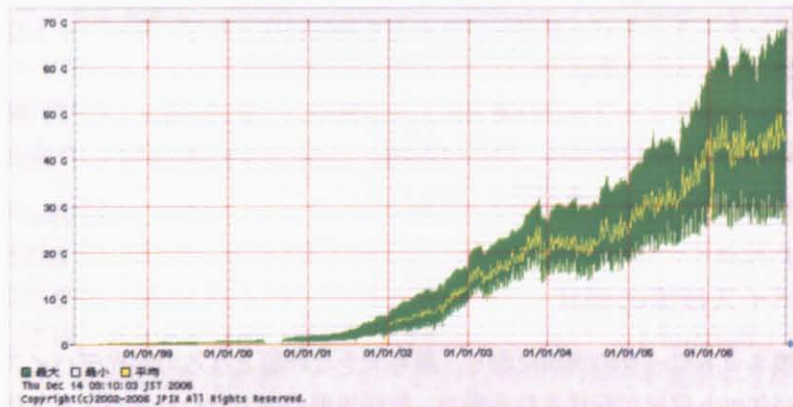


図 1.1: JPIX におけるトラフィック量の推移 (2006年12月14日現在)

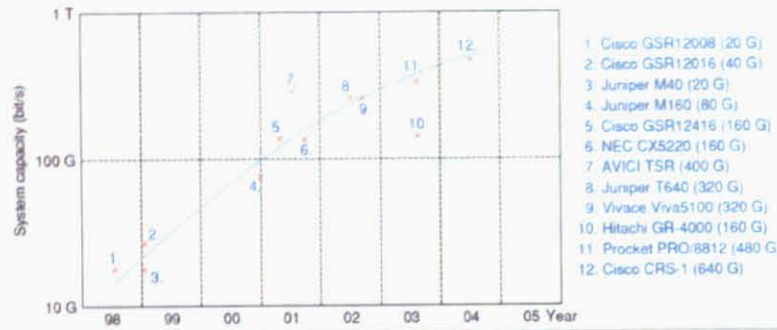


図 1.2: 商用ルータにおける転送容量の推移

表 1.1: 炭酸ガス排出量で見た各年度の省エネルギー効果

年	ルータ種類	CO ₂ 発生量
2000年	電気ルータ	488 万トン/年
2010年	光ルータ (90%)	180 万トン/年
2020年	光ルータ (95%)	163 万トン/年
2030年	光ルータ (100%)	146 万トン/年

消費電力といった現実的な実装を考えると、電気処理による転送容量はすでに増加が難しい状況に達してしまっている。

こうした現状から、パケット信号を光領域のまま転送する光パケット交換ネットワークが検討されている [6-15]。光パケット交換は、「パケット信号のペイロード部分が電気処理されないため、波長数に比例した電気処理用の回路が不要」「電気回路にビットレートが制約されないためペイロードの高速変調が可能」という光領域転送処理の利点と、「リンク資源共有による帯域の効率的利用」「シグナリング遅延やバースト生成遅延などエンド間トランスポートへの影響 [16] が少ない」というパケット転送の利点を併せ持つものである。そのため、大容量性と柔軟性を併せ持つことが求められる将来のインターネットバックボーンを支える基盤技術として、光パケット交換ネットワークは期待されている。

なお、光パケット交換ネットワークの導入による消費電力の低減効果について、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構は、現在の電気ルータが光ルータに代わった場合の炭酸ガス排出量を表 1.1 のように試算している [17]。

1.1.3 光デバイス技術の現状

光パケット交換ネットワークの実現に際し、最も大きな問題となるのが光デバイス技術の制約である。光領域でパケット信号が転送される場合、転送処理の中で行われるパケット信号の更新、スイッチング、衝突回避といった処理は、全て光領域で実現されなくてはならない。しかし、現状の光デバイス技術では提供できる機能・処理は非常に限られており、電気処理のように何でもできる

わけではない。特に RAM が無いことは、柔軟な情報の蓄積が行えないという問題、クロック同期型の論理回路を構成できないため複雑な演算処理が不可能という問題から、パケットの更新や衝突回避といった複雑な処理を極端に難しくする。光フリップフロップやファイバ型メモリに関する研究も行われているが、まだ初期段階にあるため実用化は先のことである。仮に実現したとしても、電子とは異なり外部からの作用を受けにくいという物理的特性を持つ光が情報伝達の媒体となっているため、大規模化や安定化を図ることは容易ではない。また、ラベル識別や制御は電気領域で行うとしても転送データ自体は光領域でカットスルー転送されるため、制御に関する処理時間が大きくなったりばらついたりすると、転送データを任意時間待機させる処理が必要になってしまう。

他にもデバイスの課題としては偏波特性・波長特性・温度環境など動作条件が厳しい、サイズが大きくなりがちという実装上の問題もあるが、RAM が無いというのはコストをかけても解決できない本質的な問題である。

したがって、転送にしろ制御にしろ、柔軟なバッファリングや複雑な演算処理ができないという光の大きな制約を踏まえた機構およびアルゴリズムの設計を行うことが必要となる。つまり光パケット交換ネットワークのためには、既存の IP パケットスイッチングではない、新しいパケット転送方式が求められる。

1.2 本論文の目的

本研究では、インターネットなどの大規模ネットワークに適用可能な光パケット交換ネットワークの実現に向けた技術開発に取り組む。現在のパケット転送処理と同等のことを光処理で行うのは、光デバイスで提供される機能が限られているため非常に難しい。そこで、“光デバイスの機能を考慮したネットワーキング”という新しい観点から光パケット交換ネットワークアーキテクチャを検討する。具体的には、「光デバイスの限られた機能で光パケット処理を実現するための技術」と「その機構を前提としたノードおよびネットワークの制御技術」を開発し検証することが、本研究の主眼である。

よって、本論文は以下の3点を示すことを目的とする。

- 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
- 光パケット交換ネットワークを実現するための光パケット処理方式および光パケット交換ネットワーク制御方式
- 提案アーキテクチャおよび手法の性能と実現性

アーキテクチャ的検討としては、エッジノード間のパケット転送に関わる機能をエッジノードとコアノードでどのように担うか、またそれに基づきノードにおけるパケット転送のための機能配置をどう構成するべきか、といったことについて示す。

要素技術としては、パケット交換の基本的な機能として「パケット転送処理」と「衝突回避処理」に着目し、パケット信号を光領域にとどめたままそれぞれの機能を実現するための具体的な方式を示す。

そして、シミュレーションやプロトタイプ実装により、提案アーキテクチャを構成する各要素技術に関して性能の評価と実現性の検証を行い、その有効性を明らかにする。

本研究では上に述べた検討を通し、“光パケットネットワーク”という新しい研究分野を開拓し、今後の光ネットワーク技術の研究開発に関して方向性を模索し指針を示すことを目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含み全7章から構成される。

第2章 光パケット交換ネットワークの構成

第3章 プリアンブル遅延型ラベル処理を用いた光パケット転送

第4章 光ファイバ遅延線を用いた衝突回避機構の評価

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

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

第7章 結論

第2章ではパケット交換がどのような機能で成り立っており、それらの機能を光パケット交換の実現に適した形態でどのように実現すればよいかというアーキテクチャ的検討を行う。現状の光デバイス技術では演算や情報保存を時間的に柔軟に行うことが困難であることに着目し、経路表検索を用いないパケット転送を行うことが可能な自己ルーティングスイッチを用いた始点経路制御型の光パケット交換によるアプローチを示す。

第3章から第6章では、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のための要素技術について述べる。レイヤ的な観点からは大きく“光領域のパケット処理”と“そのための制御機構”の2つを、またノードにおけるパケット処理として“パケットの転送処理”と“出力パケットの衝突への対策”という2つを実現するものとして、それぞれが位置づけられる。

第3章では、光領域でパケットを転送するためのラベル処理について述べる。光領域で高速に転送されるパケットに対し、プリアンブルを遅延させることによりラベル更新を行うことで、光領域で可能なラベル更新と簡略なラベル識別が実現できることを示す。

第4章では、光領域でパケット衝突を回避するための機構について述べる。遅延線バッファを用いた衝突回避機構では、遅延線の長さや本数といった構造的要素がパケットの衝突回避性能や通信特性に大きな影響を及ぼすであろうことから、それら構造的要素と衝突回避性能や通信特性を実トラフィックモデル他に基づいたシミュレーションにより明らかにする。

第5章では、自己ルーティングスイッチを用いた光パケット転送のラベル構築のための経路情報広告について述べる。送信元ノードにおいて経路が指定される本光パケット交換ネットワークでは、各ノードが宛先までの経路情報を全て取得する必要があることから、そのための経路情報広告のメカニズムとスケーラビリティについて述べ、さらに経路制御におけるさまざまな機能の実現方法について議論する。

第6章では、パケット衝突確率を低減するための経路選択手法について述べる。パケットの送信結果に基づく学習を各ノードが行うことで自律分散的に経路のすみわけを行い、ネットワークレベルでのトラフィック分散によるパケット衝突確率の低減を実現する手法について述べ、シミュレーション評価によりその有効性を示す。

最後に第7章で結論を述べ、本論文をまとめる。

■ 第2章

光パケット交換ネットワークの構成

2.1 はじめに

本章では、光パケット交換ネットワークのアーキテクチャについて議論する。光パケット交換ではパケット信号が光領域のまま転送されなければならないが、これを現実的かつ効率的に実現するためのアーキテクチャとして、ネットワーキングのための機能をネットワーク上でどのように構成し、パケット転送処理の機能をノード内でどのように構成するかについて述べる。

本研究では、パケット転送を光領域で実現することの難しさが光デバイスの機能的制約に起因することから、その制約を考慮し、根本からアーキテクチャを考え直す。そのためには、まず「光でできることとできないこと」「光領域で行うべきことと行わなくてもよいこと」を正確に把握し、アーキテクチャ検討における制約を明らかにすることが必要である。そのうえで、設計上もっとも制約が強い部分となる「光で単純には実現しにくい光領域で行うべき処理」をどのようにするかを考え、さらにその処理を前提に周囲の機能にはどんなことが要求されるかを整理していくことで、光パケット交換ネットワークアーキテクチャの構築を行う。

光パケット転送において最も光領域処理と親和性の低い処理は、ヘッダの識別や更新といった、転送制御に関わる処理である。情報の読み取りと経路表検索、またヘッダの書き換え処理は高度かつ柔軟な演算機能やバッファリングが必ず要求される部分であり、現在のパケット転送アーキテクチャにおける転送制御処理をそのまま光パケットに適用することは難しい。そこで、転送時に経路表の検索を行わずにマルチホップ転送を実現するため自己ルーティングの適用を検討する。

本章の構成は以下の通りである。まず2.2で、信号処理・情報処理において光デバイスで提供可能な機能および提供不可能な機能を、2.3で光パケット転送において必要な各処理が光領域で行われるべきか行われなくてもよいかを、それぞれ明らかにする。そして2.4で、パケットの光領域でのマルチホップ転送を実現するためには転送時の処理において経路表検索を省くことが必要であるという観点から、自己ルーティングの適用により中継ノードでの転送処理を簡略化し、経路制御はできるだけエッジノードにおいて行うというアプローチを示す。さらに、自己ルーティングスイッチを用いた光パケット交換の、転送や制御にかかる個々の機能について、それぞれにおける要件や関連を整理し、どのような技術的課題が解決されるべきかについて述べる。

2.2 光パケット通信におけるデバイスの制約

光信号は媒体の物性から電気信号よりも雑音に強く、また低損失な伝送路が開発されていることから、長距離大容量伝送に適している。その反面、情報処理の対象としてはさまざまな理由により非常に扱いにくいものとなっている。具体的には、下記の制約がある。

機能的制約: 電気とは異なり情報の蓄積が困難な光では、全光 RAM の実現が難しい。そのため、クロック同期を必要とする論理回路を構成することが難しい。

性能的制約: 光スイッチや光増幅器など動的に特性が変化することで光信号に作用するデバイスでは、機構上応答速度が十分ではなかったり、減衰など信号特性が悪くなるものがある。

実用上の制約: 光スイッチ・変調器・光増幅器などのデバイスコンポーネントの動作は、波長・偏波といった光波の物性的特性や温度など周囲の環境に依存することが多く、一般に動作条件

への制約が大きい。また、電気回路に比べてデバイス・回路の小型化や集積化が難しいため、システムの大規模化が困難である。

逆に光領域で可能な信号処理はどのようなものがあるかという点、ひとまず性能や実用上の制約を無視するならば、

- スイッチにより進行方向を変える
- 遅延線により固定時間遅延させる
- フィルタにより特定の性質を持った波を取り出す、または除去する
- カプラによる重ね合わせ、スプリッタによる複製を行う
- 波長変換器により波長を変える
- 光増幅器・減衰器により信号強度を変える
- 主に光波の特性（干渉、重ね合わせ等）を利用した処理で論理演算を行う

といったものがある。これらの多くは、ハードウェア的な作り込みによって実現されるため、動的かつ柔軟な制御を行うことは難しい。しかし、固定的な処理であれば光領域でもこれだけのことが行えると言える。

パケット転送を実現するために特に問題となるのが、光領域で実現可能な機能が限られることである。特に RAM や複雑な論理演算回路がないことで、現在のパケット転送で行われているような転送時の経路表検索が行えない、また転送制御を行っている間のパケットのバッファリングが柔軟にできないという制約が生じる。このことが、既存のパケット転送処理を光で同じように実現することを困難にしている。

そのため、光パケット転送を実現するためにはこういった光デバイスの制約を考慮したアーキテクチャを検討することが必要となる。

2.3 光パケット転送機構における機能要素

非同期に到着する可変長のパケットを転送するためのノードの諸機能は、概略的に図 2.1 に示す機能ブロックに分類される。転送ノードでは、入力パケットに対しパケットの検出とヘッダの識別を行い、予め構築されている転送表に基づきスイッチを適切な出力ポートに向かうよう制御する。転送されるパケットは、必要であればヘッダの更新を施したうえでスイッチされ、スケジューリングや衝突回避により同じ出力ポートに送られる他のパケットとぶつからないようにして出力される。転送表の構築は、パケットの入力とは独立に前もって行われていることが普通であり、経路情報を広告し合い、得られた情報に基づき経路を計算することで転送表が構築される。

光パケット転送では、転送されるパケット信号は電気変換されることなく出力されなければならない。そのため転送処理に関して、ヘッダ更新やスイッチング、衝突回避といった機能は光領域のまま実現される必要がある。転送制御に関わる機能は、電気変換のコストが大きくならなければ必ずしも光領域で行われる必要はない。ただし、光領域のまま転送されるパケットを柔軟にバッファリングすることはできないため、ノードの転送性能がリンク容量に対しボトルネックにならないためには、転送の制御は高速に、しかも固定時間内に終了することが要求される。

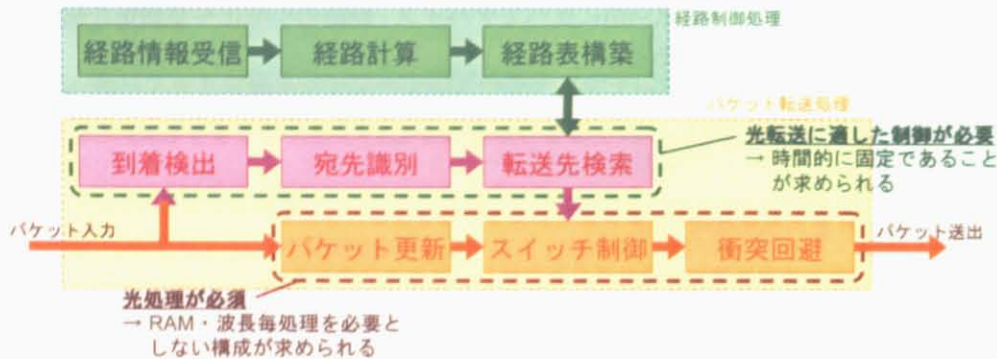


図 2.1: 光パケット交換ノードの構成

経路制御に関しては、パケットの送受信とは独立であるため、光デバイスの制約については考えなくてよい。

2.4 光パケット交換ネットワークへの自己ルーティングの適用

パケット転送における機能の中で、特に複雑な制御が必要であり光領域での実現が大きな課題となるのが、宛先識別と転送先の検索・取得、およびヘッダの更新を含む“ラベル処理”と、衝突回避である。特に、衝突回避はノード内で処理が完了するのに対し、ラベル処理はその実現方法がエンドツーエンドの伝送に、つまりネットワーク全体に大きく影響する。そこで本研究では、まず光パケット転送を実現するためのラベル処理技術に着目し、中継ノードでの転送時に経路表検索のような処理を行わないパケット転送方式である自己ルーティングを適用することにより光パケット交換ネットワークの実現を目指す。

自己ルーティングとは、中継ノードでの出力ポートに対応付けられたスイッチの制御信号（転送制御情報）をパケットヘッダに直接記述しておき、各ノードが読み取った転送制御情報に基づいて転送処理を行うことで、パケットを宛先まで届ける方式である。転送制御情報としては、マトリクススイッチへの入力信号や、各出力ポートに割り振られた識別子など、ノードローカルに解決可能かつ出力ポートと1対1対応になるビット列が用いられる。自己ルーティングの宛先識別はポート数分のパターンに対する完全一致判定を行えばよく、経路表検索とは異なり論理ゲートの組み合わせのみで処理可能である。したがって制御時間を固定化することができるため、光領域で転送されるパケットの制御も簡単になる。

インターネットバックボーン的光パケット交換ネットワークに自己ルーティングを適用する例を図 2.2 に示す。全体のネットワークは光パケット転送が行われるコアネットワークと既存のパケット網であるエッジネットワークから構成され、両者を接続するゲートウェイとしての役割をエッジノードが持つ。コアネットワークにおいて光領域のままパケットを転送する中継ノードをコアノードと呼ぶ。コアネットワークにおいては、コアノードはパケットの転送処理のみに注力し、パケットの転送経路の制御などは基本的に行わない。コアノードが提示された出力先にしたがってパケットを転送するのみであるため、エッジノードでは宛先までの全ホップにおける転送先の制御を行うことになる。

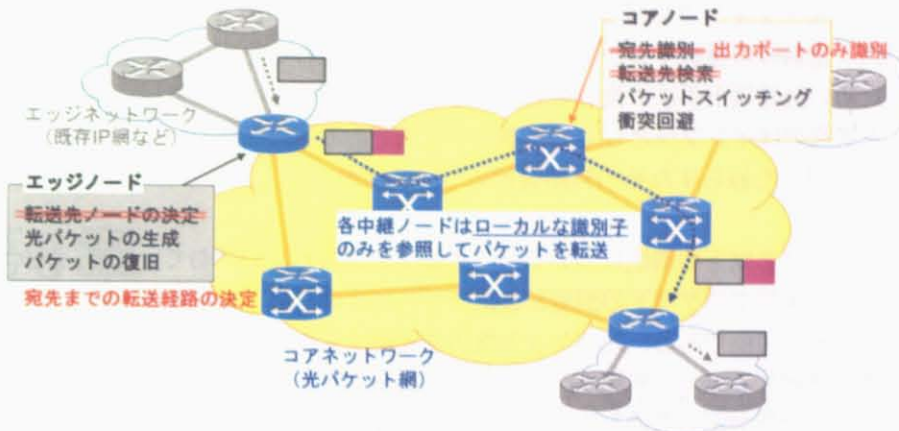


図 2.2: 自己ルーティングに基づいた光パケット交換ネットワーク

ホップ毎転送では各中継ノードが転送制御を行っていたのに対し、ここで想定するネットワークでは制御に関する機能を全てエッジノードに任せ、コアノードにおける処理を簡略にすることで、光領域でのパケット転送が実現される。

自己ルーティングを光パケット交換に適用するにあたり、要素技術として、具体的に以下の4つに着目する。

ラベル処理技術 ラベルとはヘッダ中の経路・転送情報に相当する部分のことである。自己ルーティングを用いることで、パケット転送時のラベルの識別長が短くなり識別に必要な時間も固定化できるが、マルチホップ転送ネットワークではヘッダ中に複数のノードに対する転送制御情報が書き込まれるため、それぞれのノードがどの位置の転送制御情報を参照すべきかを知る必要がある。そこでラベル処理およびパケット転送に関し、自己ルーティングを任意トポロジーのマルチホップ転送ネットワークに適用するための技術として、どのノードにおいても常にヘッダの同じ位置を参照すればよくなるような光領域ラベル更新を実現する方法について検討する。

衝突回避技術 パケット通信においてはパケットの衝突は避けられないため、衝突回避は不可欠な機能である。しかし、光 RAM が無いことから光領域で可能な衝突回避処理は限られている。パケット衝突というのはマイクロなトラフィック特性に依存する事象であり、想定環境により衝突回避機構の性能も大きく左右されるため、本研究ではインターネットへの適用を想定し、WAN の実トラフィックに対する衝突回避機構の性能の解析を行う。

経路情報の広告と構築 自己ルーティングによるマルチホップ転送を実現するためには、送信元ノードにおいて宛先ノードに至るまでの各中継ノードにおける転送制御情報を把握しておく必要がある。したがって、経路情報広告には各エッジノードにおいて全ての宛先までの転送制御情報を得られるような機構が必要となる。そこで、既存の経路広告アルゴリズムに対しどのような拡張を行えばよいかについて検討する。

経路の選択 自己ルーティングに基づいた始点経路制御を行う本パケット交換ネットワークでは、どのような経路を送信時に選択するかによって通信の性能が変わるため、効率的なネットワークを実現するための経路選択手法の検討も必要である。どのようなポリシーで経路選択を行うかは目的によるが、本研究ではインフラとしての基礎的な要求である通信品質の向上を目的とし、分散制御によりパケット損失を減らすための経路選択について検討する。

なお、ノードにおける以下の機能については、本論文では扱わないでおく。まず、パケット検出に関しては何らかの手段でパケットの到着が検出できればよいため、純粋な信号処理技術の問題として切り分けることが可能である。光パケット検出を実現するための方法は変調方式を変えるものを中心に多く研究されており、非同期パケットを扱うためには不可欠な技術であるが、ここではいずれかの手法が利用可能であるものとする。また、スイッチングに関してはすでに導波路型の全光スイッチが商用化されていることから、これも要素技術としては扱わないものとする。

2.5 おわりに

本章では、光パケット交換ネットワークの実現に向けたアーキテクチャの検討を目的として、光デバイスの機能的制約に基づいた光パケット交換ネットワークと転送ノードの構成について述べた。光デバイスの機能に基づき光領域での転送処理を実現しようとした場合、現在のパケット転送アーキテクチャにおいて最も難しいのがヘッダの処理に関わる部分と衝突回避である。特にヘッダの処理はエンド間でのパケット転送を行うというネットワーク全般に関わる部分であるため、まずは光領域パケット転送において適用可能なヘッダ処理を検討し、それにあわせて周囲の機能を設計するというアプローチをとった。そして、自己ルーティングの適用によりヘッダ処理が簡略化され、光領域でのパケット転送が現実的かつ効率的に実現できることを指摘し、自己ルーティングに基づいた光パケット交換ネットワークのための具体的な要素技術を示した。

次章以降で、このアーキテクチャに基づいたシステムのための基本的な要素技術について論じていく。