

# 修 士 論 文

## 波長資源配分比可変型ハイブリッド光 交換ノードの設計と実装

指導教員 森川 博之 教授



東京大学大学院工学系研究科  
電気工学専攻

氏 名 37-076419 高木 衛

提 出 日 平成 21 年 2 月 4 日

# 目次

---

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	既存手法と問題点	4
2.1	はじめに	5
2.2	光ネットワーク	5
2.3	関連研究	7
2.4	おわりに	9
第 3 章	多波長光パケット交換を用いたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャ	10
3.1	はじめに	11
3.2	パス/多波長光パケット混在型ハイブリッド光ネットワーク	11
3.3	共有波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノード	16
3.4	おわりに	21
第 4 章	ハイブリッド光交換ノードにおける実証実験	22
4.1	はじめに	23
4.2	静的境界モデルを用いたハイブリッド光交換ノードの検証	23
4.3	動的境界モデルを用いたハイブリッド光交換ノードの検証	28
4.4	おわりに	34
第 5 章	多波長光パケット交換における実証実験	35
5.1	はじめに	36
5.2	衝突回避機構付き多波長光パケット交換の検証	36
5.3	電流注入全反射型光スイッチを用いた多波長光パケット交換の検証	40
5.4	SOA スイッチを用いた多波長光パケット交換およびハイブリッド光交換ノードの 検証	45
5.5	おわりに	53
第 6 章	結論	54

---

6.1	本研究の主たる成果 . . . . .	55
6.2	今後の課題 . . . . .	56
	謝辞	57
	参考文献	58
	発表文献	60

# 目次

2.1	光パス交換ネットワーク	6
2.2	光パケット交換ネットワーク	6
3.1	従来の光パケットと多波長光パケット	12
3.2	従来の光パケット交換ノードと多波長光パケット交換ノード	12
3.3	多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光ネットワーク の概念	14
3.4	ハイブリッド光ネットワーク適用例	14
3.5	共有波長資源配分モデル	15
3.6	波長レイアウトおよび Tunable LBPF による動的境界モデルの実現	16
3.7	$N \times N$ ハイブリッド光交換ノード	18
4.1	静的境界モデルを適用した実験環境構成図	24
4.2	アイパターン	25
4.3	波形・スペクトル結果	26
4.4	Bit Error Rate	26
4.5	動的境界モデルを適用した実験環境構成図	29
4.6	波形結果 (Scenario A)	31
4.7	波形結果 (Scenario B)	31
4.8	スペクトル結果 (Scenario A)	31
4.9	スペクトル結果 (Scenario B)	31
4.10	アイパターン (Scenario A)	32
4.11	Bit Error Rate (Scenario A)	32
5.1	衝突回避機構付き多波長光パケット交換における実験環境構成図	37
5.2	入力パケット・スペクトル	38
5.3	波形結果	38
5.4	アイパターン	39
5.5	電流注入全反射型光スイッチによる多波長光パケット交換構成図	41
5.6	波形結果	42

5.7	スペクトル結果 . . . . .	43
5.8	アイパターン . . . . .	43
5.9	Bit Error Rate . . . . .	43
5.10	SOA スイッチによる多波長光パケット交換構成図 . . . . .	46
5.11	スペクトル結果 (入力パワー : 11.5dBm) . . . . .	47
5.12	スペクトル結果 (入力パワー : 1.5dBm) . . . . .	48
5.13	CH6 におけるアイパターン . . . . .	48
5.14	Bit Error Rate(gain:0dB,3dB,7dB,9dB) . . . . .	49
5.15	SOA スイッチを用いたハイブリッド光交換ノード構成図 . . . . .	50
5.16	波形結果 (Scenario A) . . . . .	51
5.17	波形結果 (Scenario B) . . . . .	51
5.18	スペクトル結果 (Scenario A) . . . . .	52
5.19	スペクトル結果 (Scenario B) . . . . .	52

# ■ 表目次

---

2.1	各光ネットワークの比較 . . . . .	7
4.1	実験パラメータ (静的境界モデルにおけるハイブリッド光交換ノード) . . . . .	24
4.2	各シナリオにおける波長数・波長帯 . . . . .	30
4.3	実験パラメータ (動的境界モデルにおけるハイブリッド光交換ノード) . . . . .	30
5.1	実験パラメータ (衝突回避機構付き多波長光パケット交換) . . . . .	37
5.2	実験パラメータ (電流注入全反射型光スイッチによる多波長光パケット交換) . . . . .	41
5.3	実験パラメータ (SOA スイッチによる多波長光パケット交換) . . . . .	46
5.4	各シナリオにおける波長数・波長帯 . . . . .	50

# ■ 第 1 章

---

序論

## 1.1 研究の背景と目的

近年，インターネットユーザの増加，アクセスリンクの広帯域化，動画配信や P2P のようなアプリケーションの一般化によりインターネットトラフィックが急激に増加している．さらに，高精細動画配信，遠隔手術，オンライン格闘ゲームのような新しいアプリケーションの登場も予想され，トラフィックの増加は今後も継続していくと考えられる．このように増加し続けるトラフィックを光ファイバ上で転送するために，伝送の面では WDM 技術，多値変調技術の研究が進められており，1 ファイバにおける最大転送容量は 20Tb/s を超える [2]．しかし交換の面では，パケット毎に処理を行う現状の電気ルータの送受信速度は 50Gb/s 程度に留まっている [3]．したがって，中継ノード毎に光信号から電気信号への変換である O/E/O (光電) 変換を行う現在のネットワークにおいて，広帯域化を図るには多数の電子デバイスを用いて複雑な並列処理を行う必要がある．特に，上述した 20Tb/s を超える帯域を 2×2 電気ルータ (Cisco CRS-1) においてスイッチング処理の実現を想定すると，40 台以上の並列処理が必要となり，その際の消費電力は 700kW 以上となる．このようなデータ転送機構では，消費電力やデバイスコストの増大が問題視されている [4, 5]．それに対し，光ネットワークではデータの光電変換を省略して転送するため，増加し続けるトラフィックの転送を低消費電力かつ最小限のデバイスコストで実現することができる [6]．そのため，光ネットワークは将来のネットワークとして期待されており，光パケット交換ネットワーク (Optical Packet Switching : OPS)[7, 8]，光バースト交換ネットワーク (Optical Burst Switching : OBS)[9]，光パス交換ネットワーク (Optical Circuit Switching : OCS)[10] と広く研究が行われている．しかし，上述したように今後多様なサービス・アプリケーションの出現が予想されるため，将来のネットワークへの要件は広帯域性，低消費電力だけでは不十分であると考えられる．即ち将来のネットワークには，多様なサービス・アプリケーションを実現する上で求められる帯域や遅延，ジッタ保証が必要不可欠となる．

このような観点から，将来のネットワークでは，(1) 広帯域性，(2) 低消費電力，(3) QoS 保証を含む多様なアプリケーションの支援，の 3 要件を満たすネットワークアーキテクチャが必要となる．これらの要件を満たす技術として，インターネットと同様の通信方式であるパケット交換を低消費電力で実現する光パケット交換ネットワークが注目されている．光パケット交換とは，パケット毎に光領域でデータの転送を行う交換技術である．光パケット交換にて通信品質の保証を実現するには，インターネットと同様に Queueing による IntServ/DiffServ が考えられる．しかし，実用的な光 RAM が存在しない現状では，長さの異なる複数の光ファイバによるバッファ (Fiber Delay Line : FDL) を利用した Queueing が主な手法となる．このような FDL を用いたバッファでは，任意時間の Queueing が困難なため，通信品質の完全な保証を実現することができない．即ち，現状の光パケット交換技術では将来のネットワーク要件である QoS 保証を含む多様なアプリケーションの支援を実現することができない．そこで将来のネットワーク要件を満たすためには，通信品質の保証が可能な光パス交換ネットワークが必要不可欠となる．光パス交換とは，シグナリングにより宛先までの帯域を占有することで QoS 保証を実現する交換技術である．また，トラ

フィックフローへ光パスを割り当てることにより、パケット毎の処理を省略するので超低消費電力の実現が可能となる。しかし、光パス交換では、光パス確立時間による遅延の増加、光パスの占有による帯域利用効率の低下が問題となる。また、品質保証の必要ない通信に関しては、安価なベストエフォート型の通信方式が求められると考えられる。このように、光パケット交換や光パス交換のような単一の転送パラダイムのみでは将来のネットワーク要件を満たすことができないため、新しいネットワークアーキテクチャが必要となる。

そこで筆者らは、中継ノード構成における波長数無依存性、高帯域利用効率、ベストエフォート型の通信が可能である多波長光パケット交換 [11] と、通信品質保証、低消費電力を可能とする光パス交換を組み合わせたハイブリッド型光ネットワークアーキテクチャを検討している。多波長光パケット交換とは、宛先を示すラベルは特定波長へ符号化し、ペイロードは複数波長に亘って符号化した多波長光パケットを波長依存性のない光スイッチを用いて一括転送を行う交換方式である。本ネットワークは光パス交換による WDM ネットワークを基礎とし、光パスにて割り当てられていない波長群を多波長光パケット交換に利用する。これにより、光パス交換によって通信品質保証を提供しつつ、多波長光パケット交換によって光パス設定を供わない帯域利用効率の高い通信を実現する。さらに、2 つの転送パラダイムで共有している波長資源の配分比率を動的に変更することにより、光パス交換で利用されていない波長が多波長光パケット交換で利用可能となるため、帯域利用効率を向上させることができる。これにより、高い帯域利用効率を維持したまま将来のネットワーク要件として考えられる広帯域性、低消費電力、QoS 保証を含む多様なアプリケーションの支援、の 3 要件を満たすネットワークアーキテクチャを実現することができる。

このようなハイブリッド光交換ノードを実現するにあたり様々な要素技術および光デバイスの検証実験が必要となる。多波長光パケットでは、同一波長にラベル・ペイロードを符号化する従来の光パケットとは異なり、パケット長が  $1/\text{波長数}$  と短くなる。そのため、従来の光パケットに対応したスイッチング速度である光スイッチでは、スイッチングを行うために必要なパケット間ギャップの割合が増加し、帯域利用効率の低下を招く。このパケット間ギャップの問題は、波長数の増加、高ビットレート化を考慮するにあたり大きな問題となる。そのため、多波長光パケット交換における光スイッチには、従来の光パケット交換における光スイッチと比較して、より高速なスイッチング速度が要求される。また多波長光パケット交換では多波長を一括して扱うため、高速なスイッチング速度が要求されるだけでなく、偏波依存性、波長間クロストークも考慮しなければならない。そこでビットレート、波長数、波長間隔といったパラメータを考慮しつつ、複数の光スイッチを用いた実証実験を通して、各光スイッチにおける多波長光パケット交換への適用性の検証を行う必要がある。さらに、波長資源配分可変型ハイブリッド交換ノードを実現する上で、FDL を用いた多波長光パケットの衝突回避技術、宛先情報を保持するラベルの更新技術、光パス/多波長光パケットへの共有波長資源の動的な配分の実証を行う必要がある。

本論文は、将来のネットワークに求められる要件を高い帯域利用効率を維持したまま実現する波長資源配分可変型ハイブリッド光交換ノードの設計・実装について述べる。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、以下の各章によって構成される。

第 1 章 序論

第 2 章 既存手法と問題点

第 3 章 多波長光パケット交換を用いたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャ

第 4 章 ハイブリッド光交換ノードにおける実証実験

第 5 章 多波長光パケット交換における実証実験

第 6 章 結論

第 2 章では、広帯域かつ低消費電力が期待されている光ネットワークについて述べた後、既存のハイブリッド光ネットワークおよびその問題点について述べる。そして、検討しているハイブリッド光ネットワークとの相違点について詳述する。

第 3 章では、検討しているハイブリッド光交換ノードに用いる多波長光パケット交換について述べるとともに、ハイブリッド光ネットワークアーキテクチャに関して詳述する。また、本交換ノードの特徴である、動的境界モデルによる波長資源配分方法、波長レイアウトについても述べる。

第 4 章では、静的境界モデルにおけるハイブリッド光交換ノードの実証実験について述べた後、本交換ノードの特徴である動的境界モデルを適用したハイブリッド光交換ノードの実証実験について述べる。

第 5 章では、これまで実装を進めてきた PLZT 型光スイッチによる衝突回避機構を備えた多波長光パケット交換の実証実験について述べる。また、多波長光パケット交換に適していると考えられる電流注入全反射型光スイッチ、SOA スイッチによる光スイッチ検証実験について述べ、今後の課題について述べる。

最後に第 6 章で本研究の成果についてまとめ、今後の展望を記す。

## ■ 第2章

---

### 既存手法と問題点

## 2.1 はじめに

広帯域かつ低消費電力なネットワークの実現を目的として、中継ノードにおいて光領域でのデータ転送を実現することにより低消費電力化が可能と期待されている光ネットワークの研究が広く行われてきた。しかし、既存の光ネットワークでは各転送パラダイムの特性により、今後出現しうる多様なアプリケーションの支援を行うことは困難となる。そこで将来のネットワーク要件として考えられる、広帯域性、低消費電力、多様なアプリケーションの支援を満たすネットワークアーキテクチャの実現を目的に様々なハイブリッド光ネットワークアーキテクチャの研究が行われている [12, 13, 14]。本章では、代表的な光ネットワークの転送方式およびハイブリッド光ネットワークにおける関連研究について述べ、検討しているハイブリッド光ネットワークとの比較を行う。

## 2.2 光ネットワーク

光ネットワークはデータの転送を行う中継ノードにて、光電変換を伴う電気処理を省略し、データ転送処理を光領域で実現するネットワークである。光領域で転送処理を実現するため、広帯域な通信を低消費電力で実現することができると期待されている。さらに、電子デバイスによる処理を行わないため、ペイロード部分のビットレートおよび変調フォーマットに依存しない交換ノードの構築が可能となり、非常に高い拡張性を有することができる。このような特徴を持つ光ネットワークは、(1) 光パス交換ネットワーク (OCS)、(2) 光バースト交換ネットワーク (OBS)、(3) 光パケット交換ネットワーク (OPS) の 3 つに大別される。光パス交換および光パケット交換の図を図 2.1、図 2.2 に、それぞれの特徴を以下に示す。

光パス交換ネットワークは、電話回線などの回線交換ネットワークと同様に通信前にシグナリングを行い、宛先までの経路の帯域を確保した上で、光領域の通信を行う転送方式である。光パス交換は、シグナリングにより宛先までの帯域を占有できるため、データロスが無く遅延の少ない品質の高い通信を行うことが可能である。よって光パス交換はストリーミングやオンラインゲーム、遠隔手術のような時間的制約が生じるアプリケーションに用いられる。しかし、宛先までの経路の帯域を確保しているにも関わらず、転送するトラフィック量が少ない状況では、帯域利用効率の低下を招く。また、宛先までの経路の帯域を確保する光パス確立に要する時間による遅延という問題も生じる。

光バースト交換ネットワークは、宛先までの経路の帯域を一定期間予約し、その期間内のみ帯域を占有して通信する転送方式である。光バースト交換は、帯域の占有が一定期間のみとなるため光パス交換と比較して、高い帯域利用効率を実現することができる。また、帯域の予約において宛先からの帯域予約の確認応答 (ACK) を必要としないため、帯域を確保するまでの時間が光パス交換よりも短くなる。しかし、常に帯域を占有できるわけではないため、衝突回避機構が必要となり確実な QoS 保証が困難となる。さらに、インターネットとの親和性の点から光バースト交換に適したアプリケーションが存在しないという問題点もある。

光パケット交換ネットワークは、インターネットに代表されるパケット交換ネットワークを光領域で実現する転送方式である。すなわち、常に他の通信トラフィックと帯域を共有して通信することが可能である。光パケット交換は、常に帯域を共有した通信を行うため光パス交換・光バースト交換以上に高い帯域利用効率を実現することができる。一方、現在の IP ネットワークと同様に遅延やジッタ、帯域の保証といった QoS 保証が困難という問題がある。また、パケット衝突によるデータロス、経路を指定しないことによる遅延・データ順序入れ替わりのような問題も生じる。そのため、データ転送などの時間的制約の影響がほとんど生じないアプリケーションに用いられる。それぞれの特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1 および上述したように、それぞれ単一の転送パラダイムにはメリット・デメリットが存在し、適したアプリケーションも限定されるため、将来のネットワーク要件を満たすことができない。そのため、それぞれ異なる転送パラダイムを組み合わせせたハイブリッド光ネットワークが注目されている。

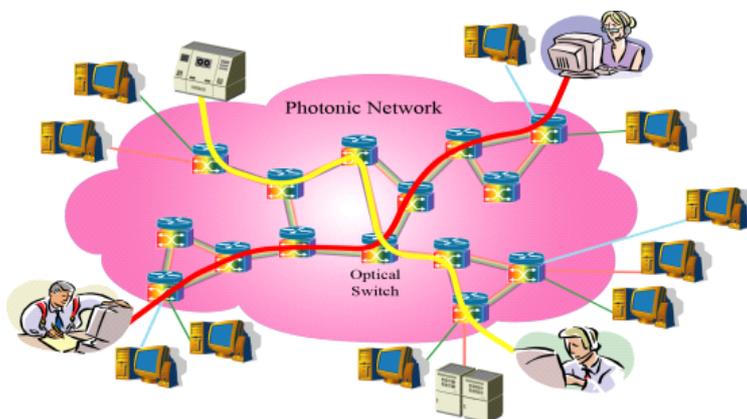


図 2.1 光パス交換ネットワーク

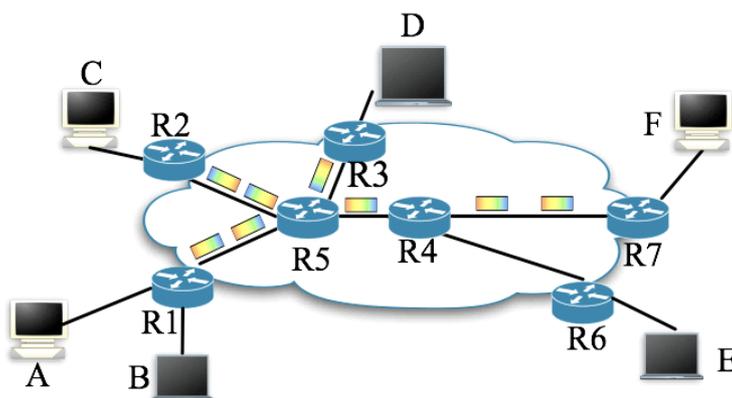


図 2.2 光パケット交換ネットワーク

表 2.1 各光ネットワークの比較

	帯域利用効率	QoS 保証	遅延	衝突回避機構	インターネットとの親和性
光パス交換	低い	可能	大	不要	低い
光バースト交換	高い	不可能	中	必要	低い
光パケット交換	非常に高い	不可能	なし	必要	低い

## 2.3 関連研究

これまでのハイブリッド光ネットワークの関連研究として、QoS 保証パケットとベストエフォートパケットを用いた方式 [12]、光パス交換と光バースト交換を用いた方式 [13]、光パケット交換と光パス交換を用いた方式 [14] が挙げられる。QoS 保証パケットとベストエフォートパケットを用いた方式は QoS 保証パケットをある一定のパケット間ギャップを持たせて光パス上で転送し、そのギャップにホップバイホップで転送されるベストエフォートパケットを挿入し転送するネットワークアーキテクチャである [12]。これにより、2 種類の通信サービスクラスの提供を可能とする。光パス交換と光バースト交換を用いた方式は交換ノードにおいて各転送パラダイムに適した異なる性質の光スイッチを組み合わせることにより、光パス交換と光バースト交換を同時に提供するネットワークアーキテクチャである [13]。光パケット交換と光パス交換を用いた方式は波長毎に定められた処理を行う AWGR (Arrayed Waveguide Gating Router) を用い、柔軟かつ動的な設定を可能とすることにより、光パケット交換と光パス交換を同時に提供するネットワークアーキテクチャである [14]。

しかしながら、これらの従来手法には、波長数増加に対する交換ノードの拡張性、マルチキャストが困難、低帯域利用効率という点が問題となる。[14] では宛先を示すラベルとペイロードを同一波長へ符号化する従来の光パケットを利用するため、中継ノードにおいて波長毎の処理が必要となり、ポート数 × 波長数に比例したデバイス数が必要となる。[12, 13] においても同様に中継ノードにて波長毎の処理が必要となるため、ポート数 × 波長数に比例したデバイス数が必要となる。そのため従来手法では、波長数増加による広帯域化を図る際に、交換ノードの変更が必要となるため拡張性が低くなる。また従来手法では、波長毎の処理を前提とするため、制御の複雑化、信号品質の劣化という点からマルチキャストは困難となる。さらに、[12] では常に各パケット間にギャップを持たせた転送を行うので、QoS 保証パケットの有無に関わらず、ベストエフォートパケットで利用可能な帯域が一定となり、帯域利用効率の低下を招く。

これらの関連研究に対して、筆者らが検討している多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャでは波長数増加に対する拡張性の向上、マルチキャスト、高帯域利用効率を実現する。本ネットワークでは、一括して複数波長の転送処理ができる多波長光パケット交換に対応することにより、光パケット交換では中継ノードの波長数無依存化

が可能となる。これにより、中継ノードにおけるデバイス数がポート数のみに比例するため、波長数増加に対する拡張性を高くすることができる。またマルチキャストに適しているが、従来多くのデバイス数を必要とするブロードキャストアンドセレクト方式に対して、実用的なデバイス数のみで対応が可能となるため、制御の複雑化、信号品質の劣化を伴わずにマルチキャストを実現することができる。さらに、多波長光パケット交換と光パス交換で共有する波長資源の配分を動的に行うことにより、高い帯域利用効率を維持したまま将来のネットワーク要件を満たすことができる。

## 2.4 おわりに

本章では，広帯域かつ低消費電力な通信が期待されている光ネットワークについて述べるとともに，既存手法として挙げられるハイブリッド光ネットワークアーキテクチャとその問題点について詳述した．また，その問題点の解決方法として検討しているハイブリッド光ネットワークアーキテクチャの特徴について述べ比較を行った．

## ■ 第3章

---

多波長光パケット交換を用いたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャ

## 3.1 はじめに

従来のハイブリッド光ネットワークアーキテクチャの問題点に対して、多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャを検討している。本ネットワークアーキテクチャは、光パス交換にて QoS 保証を、多波長光パケット交換にて安価なベストエフォート型の通信を提供することにより、将来のネットワーク要件である (1) 広帯域性、(2) 低消費電力、(3) QoS 保証を含む多様なアプリケーションの支援を満たす。また、光パス交換と多波長光パケット交換にて利用する波長資源を共有することにより、ユーザの要求に応じて各転送パラダイム間における波長数を動的に変化させることができるため、高い帯域利用効率を維持しつつ将来のネットワーク要件を満たすネットワークを実現することができる。

本章では、検討している多波長光パケット交換を用いたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャについて詳述する。3.2 節では、多波長光パケット交換をはじめ、共有波長資源配分モデル、波長レイアウト等の本ネットワークの特徴について述べる。3.3 節では、本ネットワークを実現する交換ノードおよび要素技術について述べる。

## 3.2 パス / 多波長光パケット混在型ハイブリッド光ネットワーク

本節では、3.2.1 節にてベストエフォート型の通信を提供する多波長光パケット交換および従来の光パケット交換との比較から本ネットワークの特徴について述べる。また、3.2.2 節ではパス / 多波長光パケット混在型ネットワークでの共有波長資源配分モデルを、3.2.3 節では波長レイアウトについて述べる。

### 3.2.1 本ネットワークの特徴

本ネットワークは、光パスネットワークを基礎とした WDM ネットワークにおいて、光パス交換に使われていない波長群を多波長光パケット交換に利用することで、光パス交換によって QoS 保証を提供しつつ、多波長光パケット交換によって光パス設定を行わないベストエフォート型の通信路を提供する。なお、多波長光パケット交換とは、単一のペイロードを多波長に亘り分割・構成した多波長光パケットを波長依存性のない光スイッチで一括交換する交換方式である [15]。図 3.1 に従来の光パケットと多波長光パケットの比較を、図 3.2 にそれぞれにおける交換ノードの比較を示す。

図 3.1 (a) で示すように、従来の光パケットはラベル、ペイロードが同一波長に符号化されており、各波長ごとに独立して構成されている。そのため、従来の光パケット交換技術では転送処理を担う中継ノードにおいて、光領域で転送処理を行う際に波長数  $\times$  ポート数に比例した光デバイス (光スイッチ、衝突回避機構など) が必要となる。これは図 3.2 (a) に示すように、転送処理を行うために 1 ファイバ上に合波された状態の各々の入力パケットを波長毎に分波し、転送処理を行わな

なければならないためである。

一方，図 3.1 (b) で示すように，多波長光パケットはヘッダを特定波長に，ペイロードを複数波長に亘って符号化して構成されている．そのため多波長光パケット交換技術では，個々の波長に分割された部分ペイロード群を波長依存性のない光スイッチを用いて一括で転送することができる．これにより，図 3.2 (b) に示すように，光デバイス数がポート数のみに依存する光パケット交換ノードの実現が可能となる．すなわち，多波長光パケット交換を光パケット交換に適応することにより，光パケット交換においては中継ノードの波長数無依存化が可能となるため，波長数増加に対してロバストなネットワークを実現することができる．

デバイス数を大幅に削減可能とする多波長光パケット交換により，従来多くのデバイス数を必要とするブロードキャストアンドセレクト方式に対して，実用的なデバイス数のみで対応が可能となるため，制御の複雑化，信号品質の劣化を伴わずにマルチキャストを実現することができる．

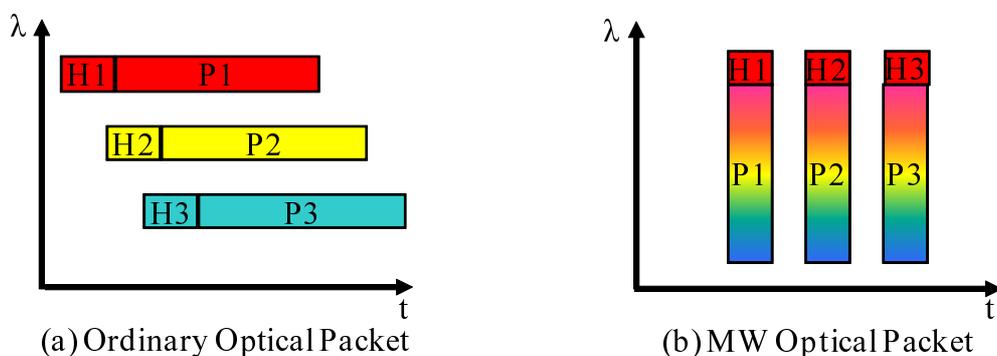


図 3.1 従来の光パケットと多波長光パケット

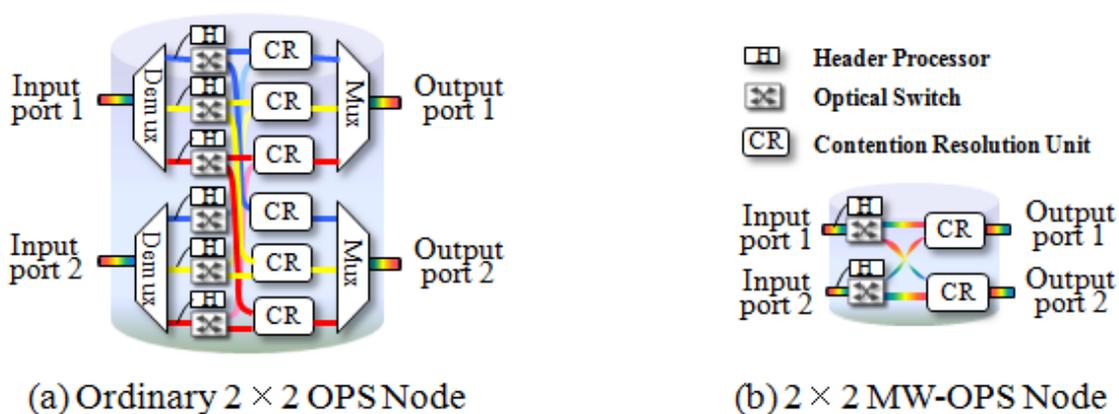


図 3.2 従来の光パケット交換ノードと多波長光パケット交換ノード

また，2つの転送パラダイム間にて波長資源を共有し，配分比率を動的に変化させることによりネットワーク全体での波長利用効率を向上させることができる．この特徴により，各転送パラダイ

ムにて利用可能な波長数がリンク毎に異なる状況が生じるため、経路差および波長数差による通信品質の違いを利用して同一転送パラダイム内でも複数の通信サービスクラスを定義することが可能となる。図 3.3 に本ネットワークの概念図を、図 3.4 に本ネットワーク適用例を示し、同一転送パラダイム内での複数の通信サービスクラスの定義について説明する。図 3.4 に示すように、本ネットワークは A から E までのユーザノードと R1 から R5 のエッジノード、R6 から R8 のコアノードから構成される。最大利用可能な波長数は各リンク 4 波長であるが、これ以外に多波長光パケットのラベル用に 1 波長確保されている。なお、各リンクの伝送遅延は等しいと仮定する。

ユーザは品質保証の必要な通信に関しては光パス交換を利用し、インタラクティブ性の高い通信に関しては多波長光パケット交換を利用する。エッジノードは、ユーザノードからの要求により光パスを設定し、ユーザノードから受け取ったパケットに応じて、光パスおよび多波長光パケットによる転送を行う。多波長光パケットの場合、自ノードで保持している経路表から宛先までの経路を決定し、その経路で利用可能な空波長数を調べる。その後、ユーザノードから受け取ったパケットをその利用可能波長数分に分割し、各波長にペイロードとして符号化する。そして、宛先情報を含んだラベルを  $\lambda_0$  に付加し、多波長光ペイロードと合波し多波長光パケットを生成する。コアノードではユーザの要求に応じて、各転送パラダイムにて利用可能な波長数の変化に対応しつつ光パス / 多波長光パケットの交換を光領域で実現する。また、空波長数や経路情報の交換はリンクステート型経路制御プロトコルを利用して行う。

図 3.4 では、すでに最小遅延経路を用いて R1 から R4、R3 から R4 へ光パスが設定され、残りの波長で多波長光パケット交換が行われている。各パケットの図には (A E, #  $\lambda = 2$ , RT=R1,6,8,4) として、始点・終点のノード名、利用可能波長数、利用経路が示されている。多波長光パケットで利用可能な波長数は、経路上の最小空波長数であり、経路によって異なる。例を挙げると、パケット (a) は R1-R6 間に 3 波長、R8-R5 間に 4 波長空きがあっても、経路上の最小空波長数である R6-R8 間の 2 波長しか利用できない。したがって必ずしも全ての空波長を効率敵的に利用できるわけではない。

しかし、このような多波長光パケットで利用可能な波長数の相違は、上述のように複数の異なる通信品質の提供を可能にする。特に同一エッジノード間に多くの光パスが最小遅延の経路を用いて設定される場合、他の経路では遅延は大きい利用可能波長数が多い可能性が高い。この例だと、パケット (a) と (e) は両方とも A から D へのパケットであるが、(a) は実行帯域となる利用可能波長数は少ないが遅延の小さい経路、(e) は遅延は大きい波長数が多い経路をそれぞれ利用している。

更にパケット (c) のように動的に転送経路を変更することで、障害発生時や輻輳時、利用可能波長数がパケットの符号化された波長数よりも多ければ迂回経路を利用できる。ジッタを許容できるアプリケーションは、この機能を使うことでパケット棄却率を下げるができる。このような複数の通信品質は、IP Precedence と同様に、ユーザノードが各パケット送出時に指定することが可能である。

以上のように、2 つの転送パラダイムによる通信品質だけでなく波長数や経路を利用した複数の通信品質の提供により、広帯域かつ低消費電力なネットワークが可能となり、多様なアプリケー

ションへの対応も実現することができる。次節では、本ネットワークを実現する共有波長資源配分モデル、波長利用方法である波長レイアウトについて述べる。

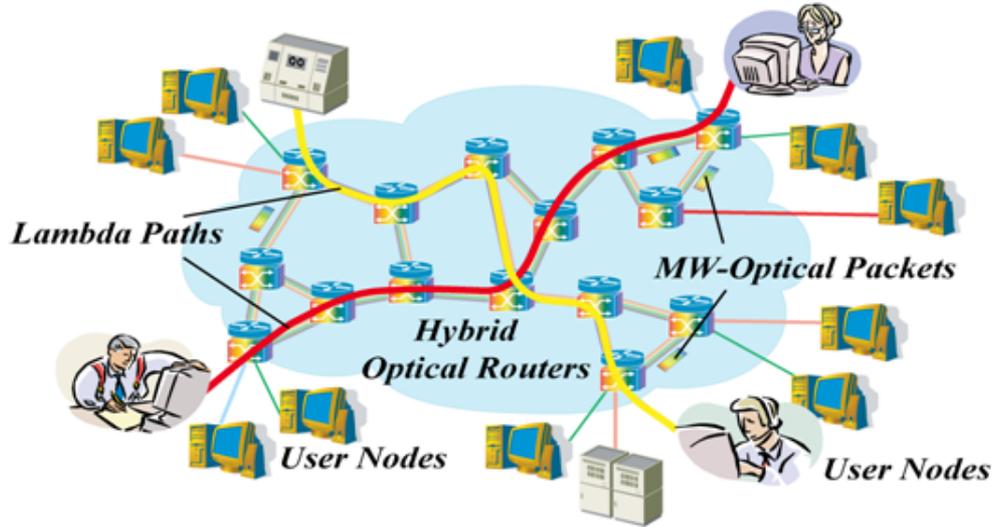


図 3.3 多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光ネットワークの概念

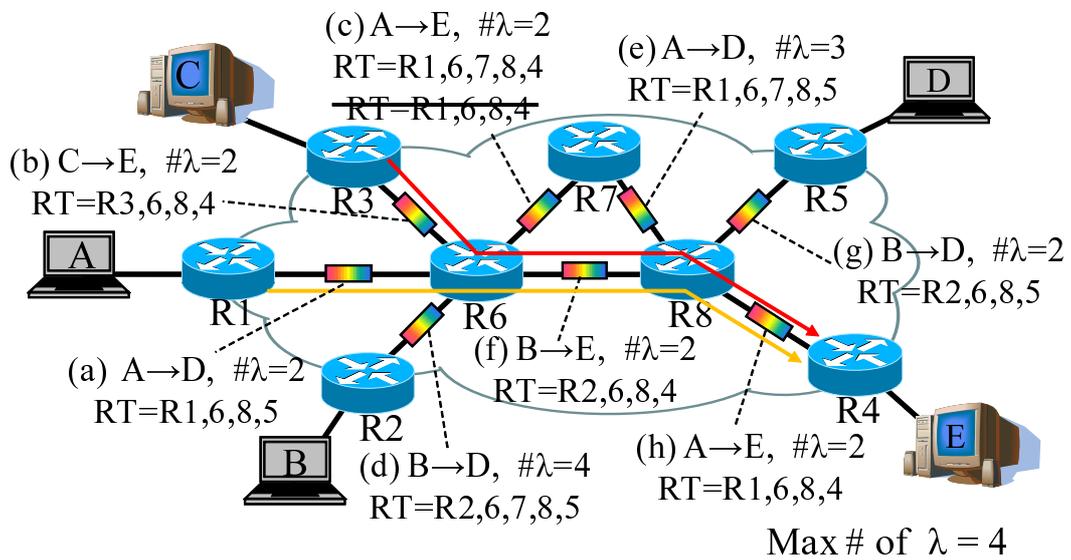


図 3.4 ハイブリッド光ネットワーク適用例

### 3.2.2 共有波長資源配分モデル

本ネットワークにおいて、多波長光パケット交換および光パス交換にて利用する波長資源は両転送パラダイムにて共有されており、それぞれの転送パラダイムで使用する波長資源の選択方法は、共有波長資源配分モデルにて決定される。このような共有波長資源の配分モデルの選択は、ネットワークの特性に大きな影響を与える。

ハイブリッド光ネットワークを実現するハイブリッド光交換ノードでは、光パス/多波長光パケットの混在した信号から両者を分離し、それぞれ独立して交換する必要がある。この際、光パスと多波長光パケットで使用される波長が無秩序に混在していると分離処理が複雑となる。このような観点から、多波長光パケットにて使用する波長は一括処理が可能となる連続配分とする。連続配分となるハイブリッド光ネットワークの波長資源配分モデルは図 3.5 に示すように 2 種類に分類できる。

(a) 静的境界モデル (Static Border Model) は光パス交換と多波長光パケット交換の境界を固定することにより、波長資源配分比率を一定にする波長資源配分モデルである。静的境界モデルは波長資源配分比率を固定しているため管理が容易である。しかし波長資源配分が固定されているため、たとえ光パスに配分された波長資源を一切使っていないくても、多波長光パケットでその資源を使うことができず、波長利用効率が低下する。

(b) 動的境界モデル (Dynamic Border Model) は、両転送パラダイム間の境界を変化させることにより、波長資源配分比率を動的に変更する波長資源配分モデルである。動的境界モデルは光パス交換で使用していない波長群を多波長光パケット交換で利用できるため、帯域利用効率の向上が期待できる。一方で、光パス要求に応じて動的に波長資源配分比率を変更するため、(1) 波長割当アルゴリズムが複雑化、(2) 多波長光パケットが通過する経路で利用可能な波長数の変化を各エッジノードが検出する必要性、という 2 点を考慮しなければならない。本ネットワークでは、光パス交換のデメリットとなる帯域利用効率の低下を抑圧する目的として動的境界モデルを適用する。

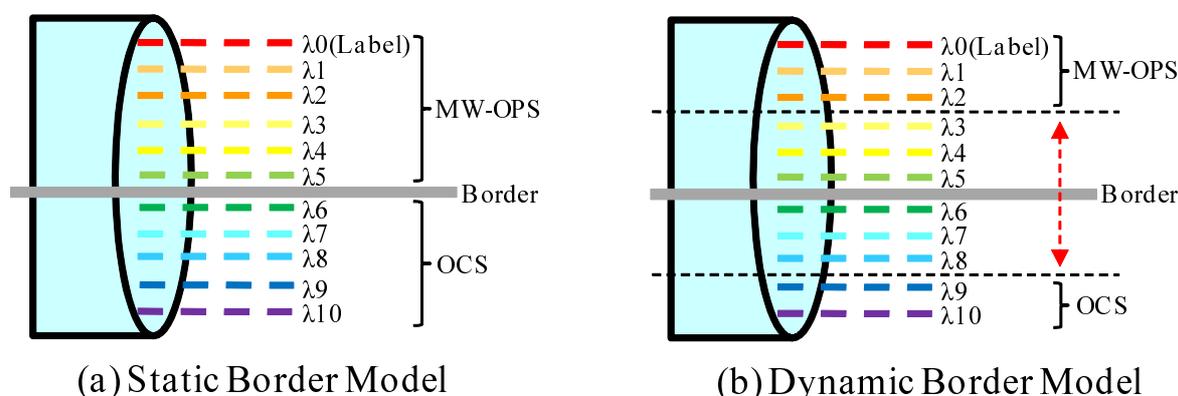


図 3.5 共有波長資源配分モデル

### 3.2.3 波長レイアウト

図 3.6 は本稿で採用する波長レイアウトおよび動的境界モデルを実現する Tunable LBPf (Long-wavelength BandPass Filter) の動作概要である。ここで、 $\lambda_0$  は多波長光パケット用ラベル、 $\lambda_W$  は光パス交換にて利用可能な最長の波長、 $\lambda_{MAX}$  は多波長光パケット交換にて利用可能な最長の波長である。 $\lambda_0$  はファイバ内の波長群の中で最も短い波長であり、ラベル抽出を行う FBG (Fiber Bragg Grating) の対応波長帯によって決定される。また、 $\lambda_W$  は光パス交換を行う光スイッチの規模に依存して決定される。一方で、 $\lambda_{MAX}$  は多波長光パケットで利用可能な最長の波長であり、Tunable LBPf および多波長光パケット交換を行う光スイッチの対応波長帯によって決定される。 $W < MAX$  の場合は  $MAX-W$  分の波長が多波長光パケット専用の波長資源として用いることができる。波長資源を光パスと多波長光パケットとに区分する境界は、1 から  $W$  の間を動的に動かすことができる。

Tunable LBPf は、光パス / 多波長光ペイロードが混在した入力信号から多波長光ペイロードのみを透過させる。透過範囲の境界を 1 から  $W$  の間で変化させることにより、光パス交換および多波長光パケット交換で利用する波長資源配分比率を動的に変更する。このように、多波長光ペイロードの抽出を波長毎に処理せず一括して行うことが可能となる。これにより、本ネットワークアーキテクチャは中継ノード構成の変更を伴うことなく多波長光パケット用波長の追加を行うことができるため高い拡張性を有する。

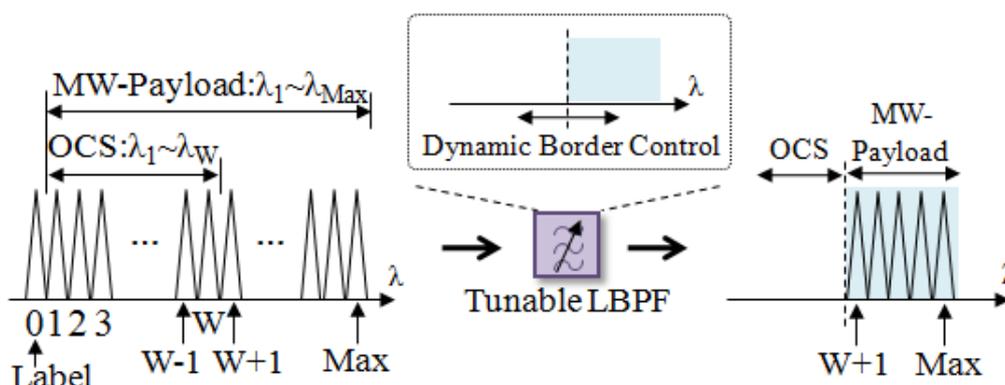


図 3.6 波長レイアウトおよび Tunable LBPf による動的境界モデルの実現

### 3.3 共有波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノード

本節では、3.3.1 節にて 3.2 節で詳述したハイブリッド光ネットワークを実現する  $N \times N$  交換ノードについて述べる。また、3.3.2 では交換ノードを実現する上で重要となる光スイッチおよび要素技術に関して述べる。

### 3.3.1 交換ノードの設計

共有波長資源配分比可変型  $N \times N$  ハイブリッド光交換ノードにおける構成図を図 3.7 に示す。交換ノードは主にラベル交換機構 (Label Swapper), 光パス交換機構 (Circuit Switch), 多波長光パケット交換機構 (MW-Packet Switch) の 3 機構で構成される。また, 交換ノードは大きく 2 つの光スイッチから構成される。一方はスイッチ切替速度が遅いが規模性のある MEMS 光スイッチ, 他方はスイッチ切替速度の速い光スイッチである。MEMS 光スイッチは, 光パス交換の機能を持つ。高速光スイッチは, ブロードキャストアンドセレクト方式による多波長光パケット交換の機能を持つ。図 3.7 にある,  $1 \times M, 1 \times (M+1)$  の光スイッチが該当する。また, 図 3.7 における  $N, W, M$  はそれぞれ交換ノードにおけるポート数, 光パス交換での最大波長数, 衝突回避部 (Contention Resolution) のファイバ遅延線 FDL (Fiber Delay Line) の段数を表す。

入力ポートから入力された光信号は, カプラ A においてラベル交換機構と光パス交換機構へ分岐される。ラベル交換機構では 1 つめの FBG によりラベルは反射ポートへ, ラベル以外の信号 (多波長光ペイロード / 光パス) は透過ポートへ出力されることにより, ラベルの抽出がおこなわれる。多波長光ペイロードと光パスが混在した信号は Tunable LBPF により, 多波長光ペイロードのみ透過される。その後, ラベル抽出時と同様に FBG により新ラベルの付与が行われる。抽出されたラベルは PD (Photo Detector) による O/E 変換後にコントローラにて解析が行われる。その後コントローラにより解析結果に基づいてラベル生成器 (Label Generator) および多波長光パケット交換機構における光スイッチの制御が行われる。多波長光パケット交換機構ではカプラによるブロードキャスト, 光スイッチによるセレクトでのブロードキャストアンドセレクト方式にて多波長光パケット交換, 衝突回避が行われる。衝突回避は長さの異なる光ファイバを用いて構成したファイバ遅延線 (FDL) によって行い, 多波長光パケット同士の衝突によるパケット棄却率を低減させる。一方, AWG および MEMS スイッチから構成される光パス交換機構では, AWG にて各波長へ分波された後, MEMS スイッチにて光パス交換が行われる。光パス交換機構, 多波長光パケット交換機構から出力された信号は, カプラ B で合波された後出力される。光パス要求に応じた制御が必要である MEMS, Tunable LBPF は GMPLS プロトコルスイートの RSVP-TE により制御される。また, 経路制御情報, 各転送パラダイムにて利用可能な波長数などの情報は OSPF-TE により伝播される。

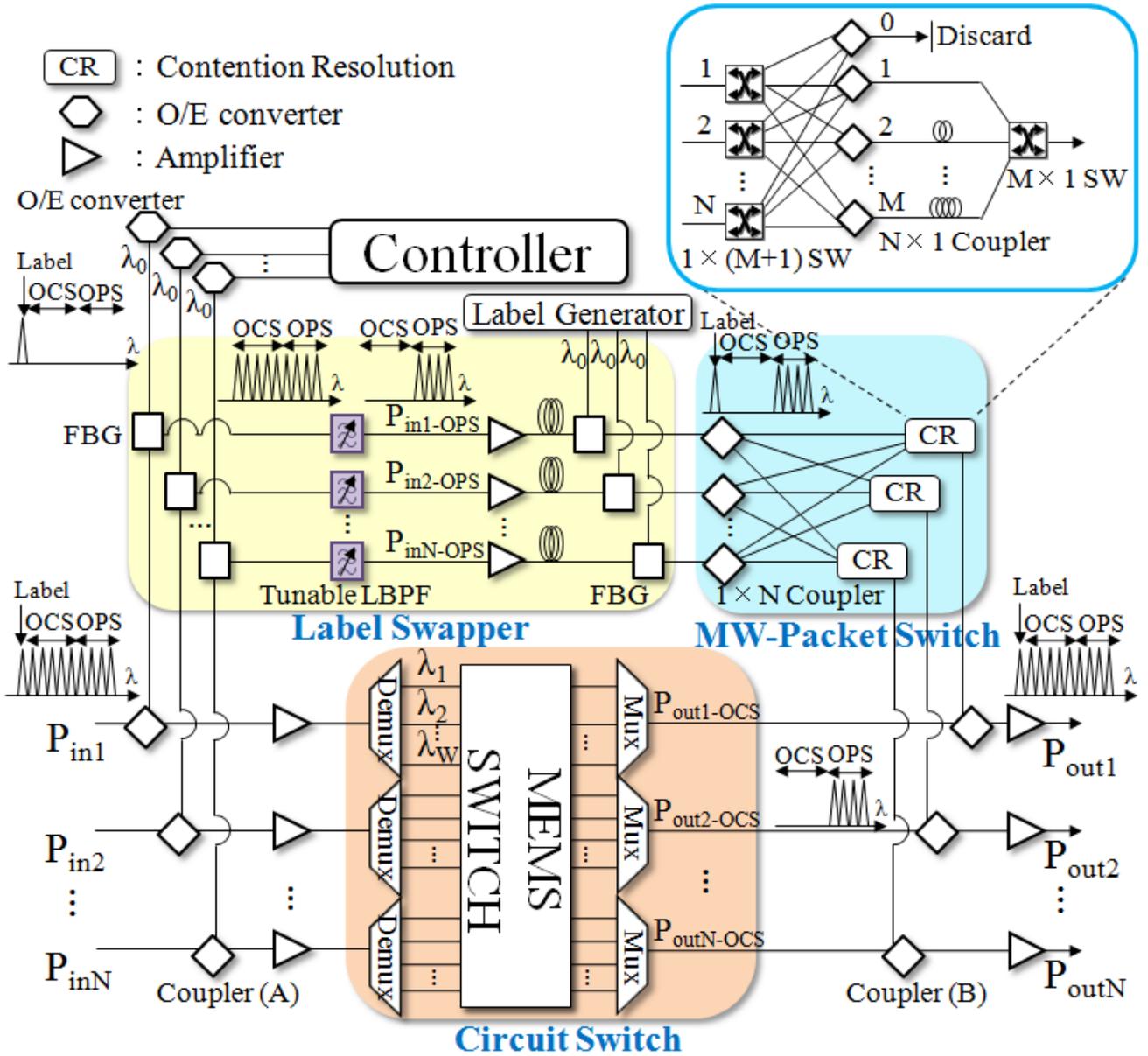


図 3.7 N x N ハイブリッド光交換ノード

### 3.3.2 ハイブリッド光交換ノード実現に向けた課題

これまで述べたハイブリッド光交換ノードを実現するにあたり，多波長光パケット交換における光スイッチの評価，衝突回避技術，ラベル更新技術，ハイブリッド光ネットワークの実証が課題となる．また，様々な光デバイスを組み合わせて交換ノードの設計・実装を行っているため，実証実験による実現性の実証が重要となる．以下では，それぞれの課題について述べる．

#### 光スイッチ評価

光パス交換に適用される光スイッチには，規模性，低損失，ms 単位でのスイッチング速度が求められる．これらを満たす光スイッチには MEMS スイッチや PLC スイッチが挙げられ，これらの光スイッチを用いて実現性が示されている．一方，多波長光パケット交換に適用される光スイッチには，多波長を一括して扱う点，パケット長が  $1/\text{波長数}$  と短くなる点から波長無依存性，低偏波依存性，高速なスイッチング速度，規模性が求められる．SOA スイッチ，LN スイッチ，PLZT 型光スイッチ，電流注入全反射型光スイッチは多波長光パケット交換を実現する上で十分なスイッチング速度を備えており，実現性も示されている [15, 16, 17, 18, 19]．しかし，各スイッチにおいて特性が大きく異なり，多波長光パケット交換に適した光スイッチも示されていないため，多様な光スイッチにてビットレートや波長間隔，波長数を変化させて評価を行うことが必要となる．また，SOA スイッチでは非線形効果の影響もあるため入力パワーや利得による出力パワーのような項目も評価しなければならない．このようなパラメータを検証実験結果より総合的に考慮し，現時点における多波長光パケット交換に適した光スイッチを明確にし，交換ノードへの再設計へ反映させる必要がある．

#### 衝突回避技術

従来の電気領域で転送処理を行うスイッチでは，RAM (Random Access Memory) を利用した store-and-forward 技術により，柔軟なパケットの衝突回避を実現している．しかし，現在は実用的な光 RAM が存在しないため，光領域での store-and-forward 技術が困難となっている．そのため，光パケット交換にてパケット同士の衝突が生じた際には，異なる光領域での衝突回避手法が必要となる．衝突回避手法は主に，波長領域 [20]，空間領域 [21]，時間領域 [22, 23, 24, 25] の 3 手法に大別される．以下にそれぞれの衝突回避手法および多波長光パケットネットワークとの親和性について述べる．

波長領域の衝突回避は，波長変換器を用いて，衝突時に一方の波長を他の空き波長へ変換することによって衝突を回避する手法である．波長変換器を用いるので，他の衝突回避手法と比較してコストが高いという問題があるが，余分な遅延やジッタ，光信号の劣化，順序逆転が発生しないという利点がある．しかし多波長光パケット交換では，1 つのパケットが多波長を用いて構成されるため，本手法を適用するには波長毎に波長変換を行う必要がある．そのため，波長変換による衝突回

避手法は多波長光パケットネットワークに適さない。

空間領域の衝突回避は、衝突発生時に宛先ポートとは別に空いているポートへ出力することによって衝突を回避する手法である。本手法では、ジッタや順序逆転によるエンド間での通信品質の劣化、衝突回避後の他ノードにおける新たな衝突の発生といった問題が生じる。これらの問題により、制御が複雑になってしまうため、空間領域での衝突回避は光ネットワークにおいて適さない。

時間領域の衝突回避は、光スイッチと FDL (Fiber Delay Line) の組み合わせによる光バッファを用い、パケットに適切な遅延を与えて衝突回避を行う手法である。光バッファでの制御は、電気 RAM と比較して自由度が低く、離散的な遅延のみの提供となるが、パケット長が短くなる多波長光パケットネットワークには適している。また、空間領域における衝突回避手法と比較してもジッタ、順序逆転の影響も少ない。

以上のように、波長変換の適用が困難な多波長光パケットネットワークでは FDL と光スイッチを用いた時間領域の衝突回避手法が一番適している。しかし、FDL での衝突回避の実現性は示されていないため、実証実験にて実現性を示す必要がある。

## ラベル更新技術

ラベル更新技術とは、光パケットネットワークにおいて宛先を示すラベルを交換ノードにて解析した後、次ノードでの用いるラベルを新しく付加する技術である [26]。複数ホップの転送が不可欠となる光パケットネットワークにおいて、宛先を示すラベルの解析後に行うラベル更新は重要となる。

## ハイブリッド光ネットワークの実証

ハイブリッド光ネットワークを実現するために、静的境界モデルによる多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光交換ノードの実証、動的境界モデルによるハイブリッド光交換ノードの実証の 2 点の実証が必要となる。静的境界モデルでは図 3.7 における Coupler(A) を FBG で代替し、光パス用の波長のみ交換ノード入力後すぐに抜き出すことで実証する。動的境界モデルにおいては、静的境界モデルにおいて Tunable LBPF および MEMS スイッチを用いることにより実現する。Tunable LBPF を用いた際、フィルタの性能が交換ノードの特製に大きく関与してくるため、BER・アイパターン測定による実現可能な波長間隔の検証を行う必要がある。また、テストベッド構築に向け、動的境界モデルを実現する MEMS および Tunable LBPF の Ethernet による制御を実現しなければならない。本論文では、4 章にてラベル更新技術の実証とともに実証実験について述べる。

## 3.4 おわりに

本章では，ネットワークの観点および交換ノードの観点から，検討している多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光ネットワークアーキテクチャについて詳述した．特に，3.3.2 節では，本ネットワークアーキテクチャを実現する上での課題について詳述した．次章以降，課題として述べたハイブリッド光ネットワークの検証，多波長光パケット交換における衝突回避機構，光スイッチ評価について行った実証実験について述べる．

## ■ 第4章

---

# ハイブリッド光交換ノードに おける実証実験

## 4.1 はじめに

本章では，3 章にて述べたハイブリッド光交換ノード実現の検証実験について論じる．4.2 節では，静的境界モデルを用いた検証実験を通して，ハイブリッド光ネットワークの実現性について述べる．4.3 節では，動的境界モデルを用いた検証実験について述べ，検討している共有波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実現性について述べる．なお，本章において多波長光パケット交換機構に用いる光スイッチは，これまで実装を進めてきた PLZT 型光スイッチを用いる．

## 4.2 静的境界モデルを用いたハイブリッド光交換ノードの検証

本節では，多波長光パケット交換と光パス交換を組み合わせたハイブリッド光交換ノードの実証およびラベル更新技術の実証を目的に行った実証実験について述べる．なお，本節で述べる実証実験では，ハイブリッド光交換ノードの実証を目的としているため，静的境界モデルを適用する．

### 4.2.1 交換ノードの実装および実証実験

実験環境の構成図を図 4.1 に，実験パラメータを表 4.3 に示す．実験環境は，信号生成機構， $1 \times 2$  交換ノード，検証機構 (オシロスコープ) で構築される．

信号生成機構では，PLZT 型光スイッチを用いて 25Mb/s NRZ 信号 (“111” or “101”) の多波長光パケット用ラベルを 1 波長分生成した．また，7 波長分の光を AWG(Arrayed Waveguide Grating) にて合波し，PPG(Pulse Pattern Generator) で制御した LN( $LiNbO_3$ ) Modulator を用いて 40Gb/s の  $2^7-1$  PRBS 信号に変調した．その内 1 波長分を光パスとし，残りの 6 波長は AWG と長さの異なるファイバを用いて各波長毎とのビット列相関の解消を行い，AO Modulator により 300ns のエンベロープを切り出すことで，240Gb/s 多波長ペイロードとした．これらの信号を 1 ファイバ内に多重し，多波長光パケットと光パスの混在した信号を生成した．

$1 \times 2$  交換ノードは，ラベル処理機構，光パス交換機構，多波長光パケット交換機構で構成される．入力信号は，FBG(Fiber Bragg Grating) により光パスと多波長光パケットに分離される．さらに多波長光パケットは FBG によりラベルと多波長ペイロードに分離され，ラベルはラベル処理機構に送られる．ラベル処理機構では，光電変換器 (PD) による光電変換の後，FPGA による電氣的なラベル解析と，光源と PLZT 型光スイッチによる新ラベルの付与が行われる．また，多波長光ペイロードは新ラベルを付与された後，多波長光パケット交換機構に送られる．多波長光パケット交換機構では，カプラによるブロードキャストと PLZT 型光スイッチによるセレクトが行われ，パス-多波長光パケット合波用のカプラに送られる．一方，光パスは AWG により各波長に分波され，MEMS によって波長毎に交換される．そして，再び AWG によって合波された後，パス-多波長光パケット合波用のカプラに送られる．

検証機構のオシロスコープでは，入出力波形の観測，アイパターンの観測，BER の測定を行う．

本実証実験では静的境界モデルを適用するため、光パスで用いる波長数を 1 波長に限定し、カプラおよび波長・帯域幅可変フィルタによって行う光パスと多波長光パケットの分離を FBG で行った。また、初期的実装のため衝突回避部は省略した。

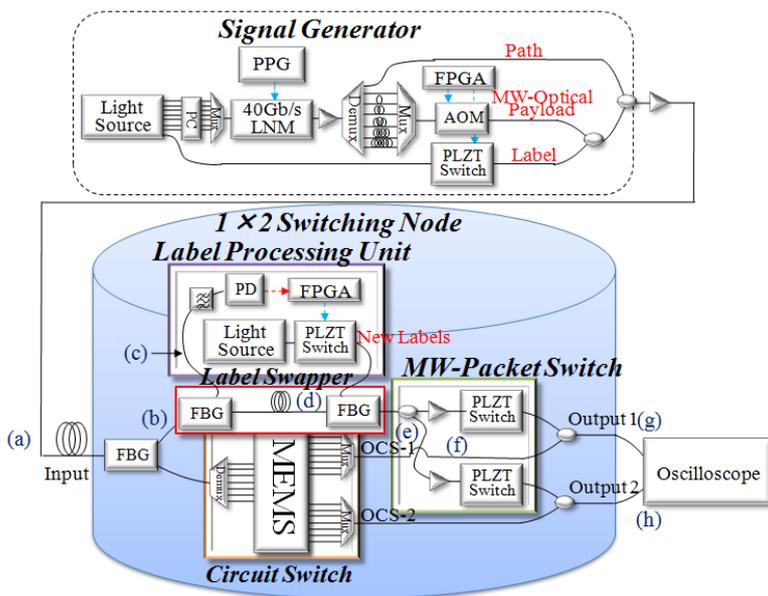


図 4.1 静的境界モデルを適用した実験環境構成図

表 4.1 実験パラメータ (静的境界モデルにおけるハイブリッド光交換ノード)

	Label	Path	Payload
Bit rate	25Mb/s NRZ	40Gb/s NRZ	240Gb/s NRZ(40Gb/s×6λ)
Data length	120ns	Continuous	300ns
Data signal	“101” or “111”	$2^7-1$ PRBS	$2^7-1$ PRBS
Number of wavelength	1	1	6
Range of wavelength	1557.36nm	1555.75nm	1546.12-1554.12nm(200GHz Spacing)

#### 4.2.2 実験結果および考察

図 4.1 の (a) ~ (h) における波形およびスペクトルを図 4.3 に示す。本実験では、ラベル更新技術の実現性を実証する目的として、ラベル “111” および “101” の多波長光パケットは、それぞれ新ラベル “100”、“110” が付与された後、出力ポート 1、出力ポート 2 より出力されるとした。また、光パスは出力ポート 1 より出力されるとした。

図 4.3(a) は、入力パケットの波形とスペクトルを示している。波形の上段はラベルを拡大したものである。(b) は光パス-多波長光パケット分離用 FBG 直後のスペクトルになっており、光パス用の波長のみ抑圧されているのがわかる。(c) はラベル-多波長光ペイロード分離用 FBG 直後のスペクトルおよびバンドパスフィルタ直後の波形となっている。FBG だけではラベル以外の波長を十分に抑圧できなかったため、光電変換器の直前にバンドパスフィルタを適用した。(d) は新ラベル付加前の波形とスペクトル、(e) は新ラベル付加後の波形とスペクトルを示している。(f) は光パス交換後の波形とスペクトルになっており、光パスのみが流れているのが確認できる。(g)、(h) はそれぞれ出力ポート 1、2 の出力波形とスペクトルになっている。出力ポート 1 には、ラベル“111”の多波長光パケットが新ラベル“100”を付与されて出力されており、出力ポート 2 には、ラベル“101”の多波長光パケットが新ラベル“110”を付与されて出力されている。また、光パスは出力ポート 1 のみに出力されている。これらの結果から、交換ノードの実現性、およびラベル更新技術の実現性を確認した。

交換ノードの伝送品質を評価するために、アイパターンと BER(Bit Error Rate) を測定した。結果を図 4.2、図 4.4 に示す。図 4.2 では十分なアイ開口を確認し、図 4.4 ではパワーペナルティは約 2dB であることを確認した。これにより、本交換ノードにおいてエラーフリー伝送の実現性を確認した。

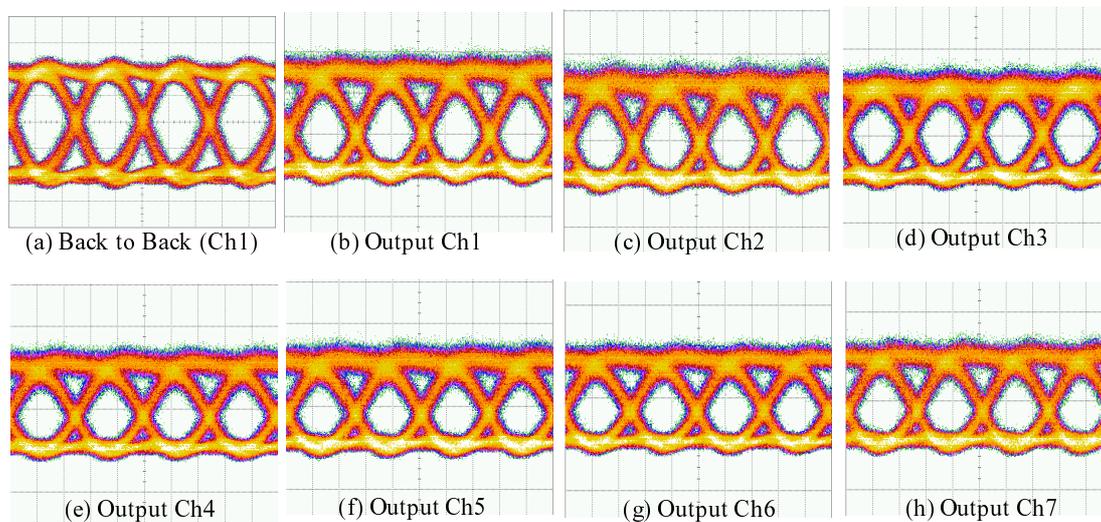


図 4.2 アイパターン

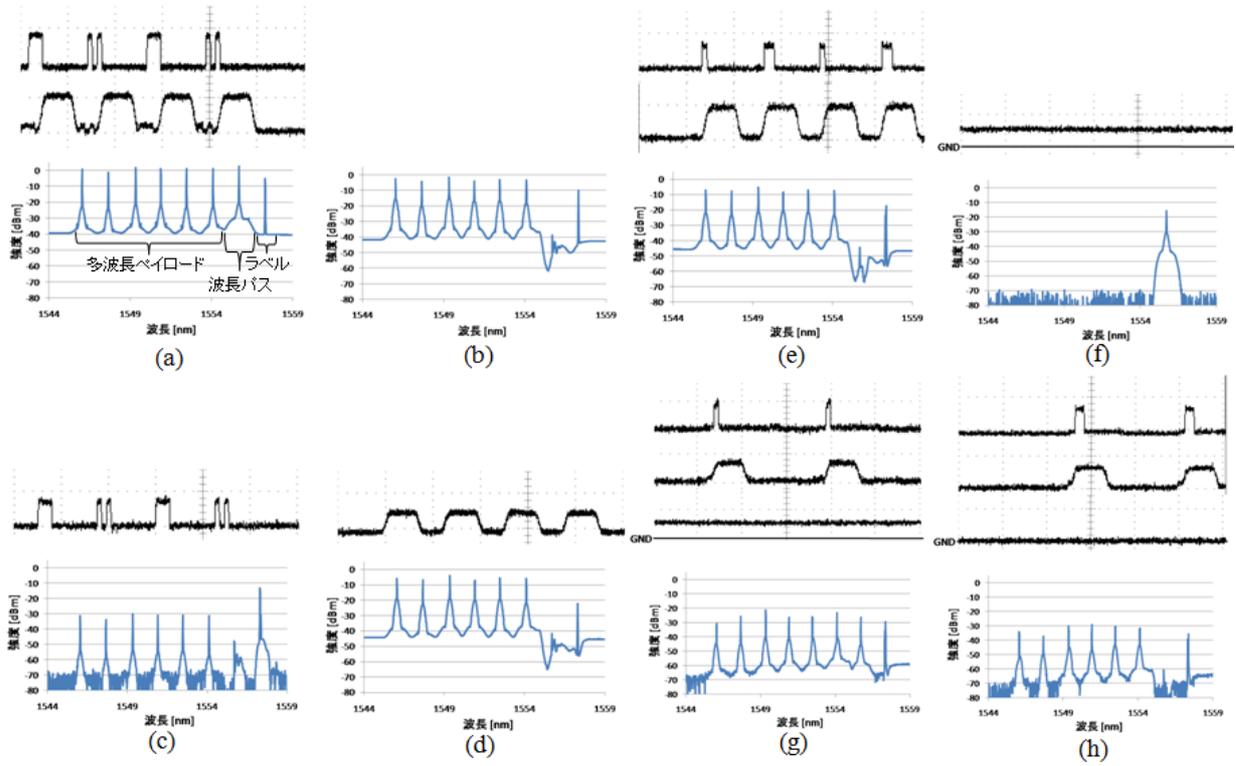


図 4.3 波形・スペクトル結果

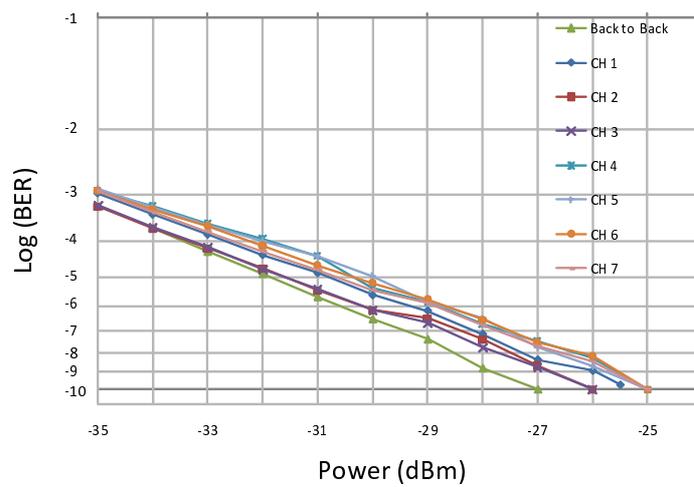


図 4.4 Bit Error Rate

### 4.2.3 結論

本節では、静的境界モデルを適用したハイブリッド光交換ノードの実現性の実証を目的として行った 280Gb/s ( $10 \lambda \times 40\text{Gb/s}$ ) 交換実験について述べた。実験結果から、ラベル更新技術の実現性、静的境界モデルを適用したハイブリッド光交換ノードの実現性、本交換ノードにおけるエラーフリー伝送の実現性を実証した。

### 4.3 動的境界モデルを用いたハイブリッド光交換ノードの検証

本節では、動的境界モデルを用いる共有波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実証を目的として行った実証実験について述べる。本実証実験は、前節同様 PLZT 型光スイッチを用いる。

#### 4.3.1 交換ノードの実装および実証実験

3章で述べた交換ノードの原理検証を行うため、 $1 \times 2$  交換ノードを実装し、以下のシナリオにて 400 ( $10\lambda \times 40$ ) Gb/s 交換実験を行った。

(A) 320 ( $8\lambda \times 40$ ) Gb/s MW-OPS, 80 ( $2\lambda \times 40$ ) Gb/s OCS

(B) 200 ( $5\lambda \times 40$ ) Gb/s MW-OPS, 200 ( $5\lambda \times 40$ ) Gb/s OCS

なお、本実証実験では Tunable LBPf として C バンド帯にて利用可能である WBTF (Wavelength and Bandwidth Tunable Filters) を用いた。WBTF の設定を柔軟に変更することにより、共有波長資源配分比率の動的な変更を実現する。

実験環境構成図を図 4.5 に示す。実験環境は信号生成機構、 $1 \times 2$  ハイブリッド光交換機構の 2 機構から構成される。以下  $P$  を多波長光パケットにおける波長数、 $C$  を光パスにおける波長数とする。

信号生成機構では、PLZT 型光スイッチを用いて 25 Mb/s NRZ 信号 (“111” or “101”) を 1 波長分生成し、多波長光パケット用ラベルとする。また、10 波長分の光 (100 GHz 間隔) を合波し、PPG (Pulse Pattern Generator) で制御した  $LiNbO_3(LN)$  変調器を用いて 40 Gb/s の  $2^7 - 1$  PRBS 信号へ変調する。変調された光信号は、AWG と長さが異なるファイバを用いて波長間のビット列相関を無くす。その後、各シナリオにて設定した光パス数  $C$  を除く波長に対して、AOM (Acoustic Optical Modulator) により 300 ns のエンベロープに切り出すことで、 $P \times 40$  Gb/s の多波長光ペイロードの生成を行う。最後に、これらの信号をカプラにより 1 ファイバ内に多重することで、多波長光パケット、光パスの混在した信号を生成した。

$1 \times 2$  ハイブリッド光交換機構は、ラベル交換機構、ラベル処理機構、光パス交換機構、多波長光パケット交換機構で構成される。入力信号はカプラによりラベル交換機構と光パス交換機構へ分けられる。ラベル交換機構では、FBG により入力信号からラベルが抽出され、ラベルはラベル処理機構へ、ラベル以外の信号は WBTF へ送られる。WBTF は光パスと多波長光ペイロードが混在した信号から多波長光ペイロードのみを透過する。ラベル処理機構では、PD はラベルを電気信号へ変換し、FPGA へ送る。FPGA はラベルの解析を行い、解析結果に基づいて多波長光パケット交換機構における PLZT 型光スイッチの制御を行う。また、ラベル処理機構にて光源と PLZT 型光スイッチにより新ラベルの生成が行われ、ラベル交換機構における FBG にて、WBTF で透過された多波長光ペイロードとの合波が行われる。新ラベル付与後は多波長光パケット交換機構へと送られる。

多波長光パケット交換機構では、カブラによるブロードキャスト、PLZT型光スイッチによるセレクトを用いたブロードキャストアンドセレクト方式によるパケット交換が行われ、光パス・多波長光パケット合波用カブラへ送られる。なお、[18]にて $2 \times 2$ 多波長光パケット交換ノードにおける衝突回避機構の検証を行っているため、本実証実験では衝突回避機構の実装は行わなかった。

一方、光パス交換機構ではAWGにより各波長に分波され、MEMSによって波長毎に交換される。そして、再びAWGによって合波された後、光パス・多波長光パケット合波用カブラへ送られる。

ラベル“111”およびラベル“101”の多波長光パケットはそれぞれ、新ラベル“100”、“110”が付与された後、出力ポート1、出力ポート2より出力されるとした。また、偶数チャンネルおよび奇数チャンネルの光パスはそれぞれ、出力ポート1、出力ポート2へ出力されるとした。実験パラメータを表4.2、4.3に示す。なお、本実証実験では、PCからEthernetを利用して共有波長資源の動的な配分比率変更を実現するMEMS、WBTFの制御を行った。

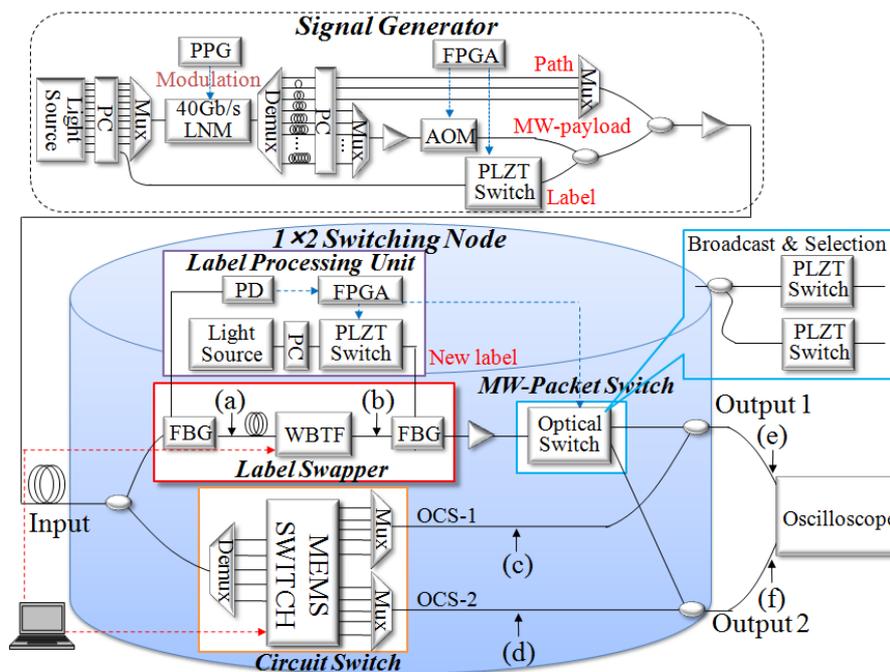


図 4.5 動的境界モデルを適用した実験環境構成図

#### 4.3.2 実験結果および考察

入出力ポートの波形結果を図4.6、図4.7に、図4.5の(a)~(f)におけるスペクトル結果を図4.8、図4.9に示す。波形結果より、ラベル“111”、“101”の多波長光パケットはラベルに従って、それぞれ出力ポート1、出力ポート2へ正しく出力されていることがわかる。光パスでは偶数チャンネル(Ch6, 8, 10)、奇数チャンネル(Ch7, 9)がチャンネル番号に従って、それぞれ出力ポート1、出

表 4.2 各シナリオにおける波長数・波長帯

	Label	Scenario A		Scenario B	
		Payload	Path	Payload	Path
波長数	1	8	2	5	5
波長帯 (チャンネル)	1549.32 (Ch0)	1551.72 - 1557.36 (Ch1 - Ch8)	1558.18 - 1558.98 (Ch9 - Ch10)	1551.72 - 1554.94 (Ch1 - Ch5)	1555.75 - 1558.98 (Ch6 - Ch10)

表 4.3 実験パラメータ (動的境界モデルにおけるハイブリッド光交換ノード)

	Label	Payload	Path
Bit rate	25Mb/s NRZ	$P \times 40\text{Gb/s NRZ}$	40Gb/s NRZ
Data length	120ns	300ns	連続
Data signal	“111” or “101”	$2^7 - 1$ PRBS	$2^7 - 1$ PRBS

力ポート 2 へ正しく出力されていることがわかる。図 4.8, 図 4.9 の (a)(b) はそれぞれ WBTF 前後のスペクトル結果を示している。図 4.8 では、多波長光ペイロード (Ch1 ~ Ch8) のみ、図 4.9 では、多波長光ペイロード (Ch1 ~ Ch5) のみが透過されており、WBTF によりシナリオに適した動作が実現されていることがわかる。(c)(d) は光パス交換機構後の出力ポート 1 および出力ポート 2 のスペクトル結果を示しており、MEMS により光パスのみ正しく交換されていることがわかる。(e)(f) は光パスと多波長光パケットの合波後のスペクトル結果を示している。これらの結果より、共有波長資源の動的な配分比率変更が可能なハイブリッド光交換ノードの実現性を確認した。

交換ノードの伝送品質を評価するために、アイパターンと BER (Bit Error Rate) を測定した。結果を図 4.10, 図 4.11 に示す。図 4.10 では全てのチャンネルにおいて十分なアイ開口を確認し、図 4.11 ではパワーペナルティはおよそ 2dB 以下であることを確認した。また、シナリオ B および出力ポート 2 においても同様に良好な結果を得ることができた。これらの結果より、共有波長資源配分可変型ハイブリッド光交換ノードにてエラーフリー伝送が実現できることを確認した。

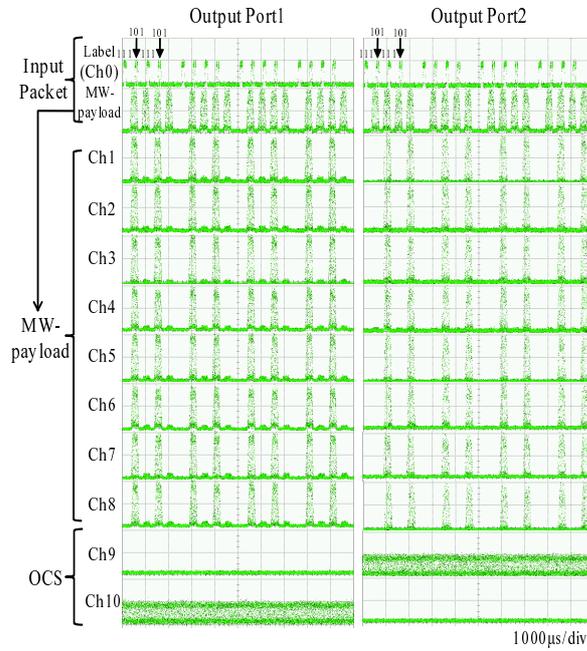


図 4.6 波形結果 (Scenario A)

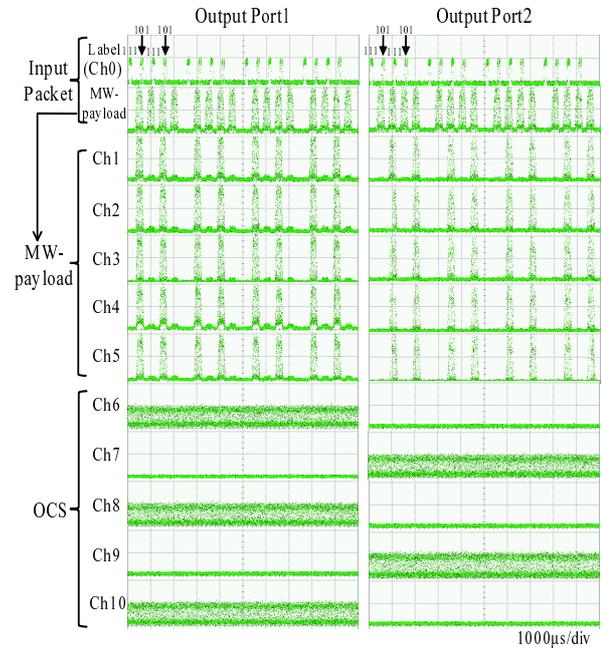


図 4.7 波形結果 (Scenario B)

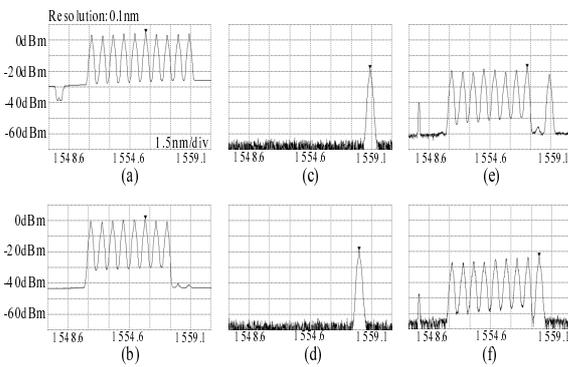


図 4.8 スペクトル結果 (Scenario A)

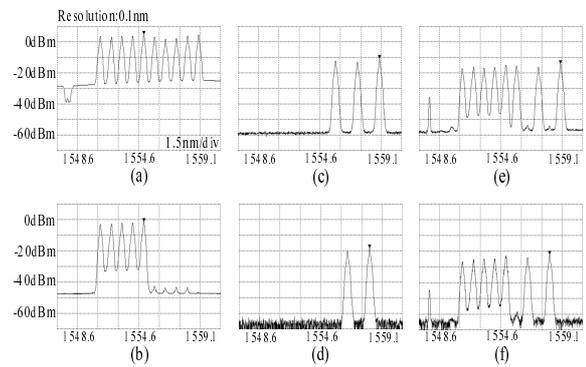


図 4.9 スペクトル結果 (Scenario B)

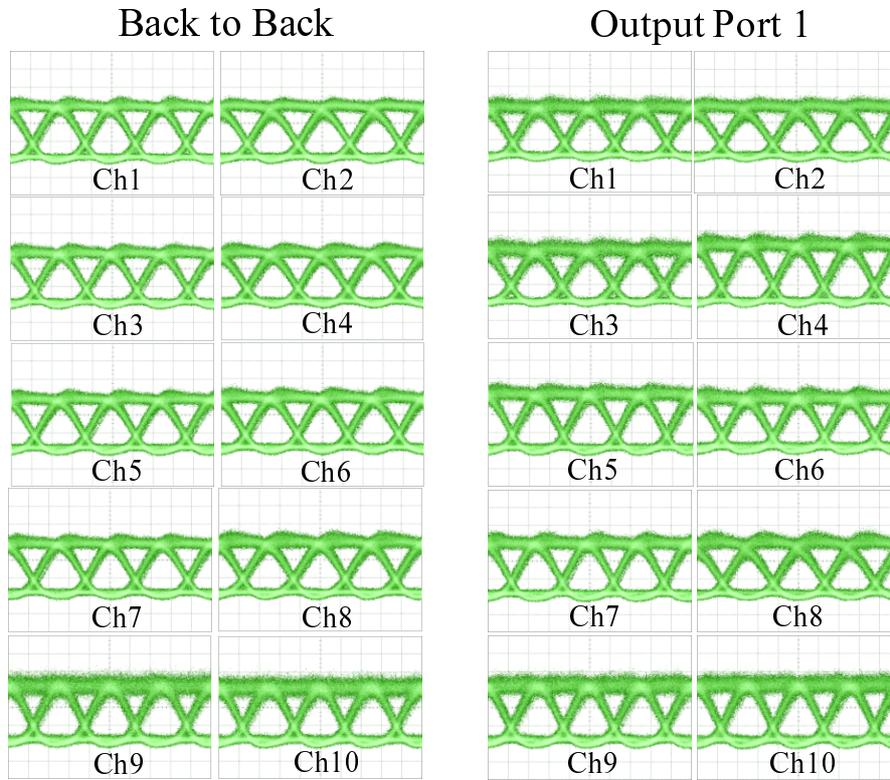


図 4.10 アイパターン (Scenario A)

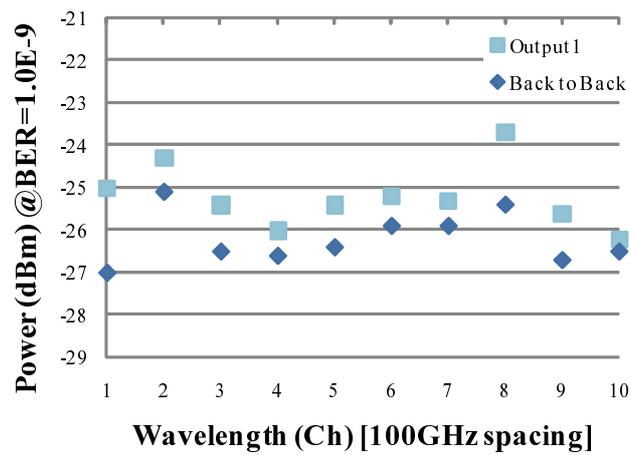


図 4.11 Bit Error Rate (Scenario A)

### 4.3.3 結論

本節では、QoS 保証型サービスとベストエフォート型サービスを帯域利用効率の大幅な低下を招くことなく同時に提供する、共有波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実証を目的として行った 400Gb/s ( $10\lambda \times 40\text{Gb/s}$ ) 交換実験について述べた。実験結果より、検討しているハイブリッド光交換ノードの実現性を確認するとともに本交換ノードにおけるエラーフリー伝送の実現可能性を確認した。また、100GHz 間隔における波長間隔の実現性、WBTF の最大透過帯域により、多波長光パケット交換にて利用可能な波長数が 8 波長であることを確認した。

## 4.4 おわりに

本章では、これまで実装を進めてきた PLZT 型光スイッチにおける静的境界モデルおよび動的境界モデルを適用したハイブリッド光交換ノードの実証実験について述べた。また実験結果から実現性およびエラーフリー伝送の実現可能性を実証した。また動的境界モデル適用時において、Tunable LBPF として利用した WBTF の最大透過帯域より 8 波長の多波長光パケット交換が可能であることを確認した。今後は、多波長光パケット交換機構における光スイッチおよび Tunable LBPF の最大透過帯域を考慮することにより、波長数増加による広帯域化が可能であると思われる。

## 第 5 章

---

# 多波長光パケット交換における 実証実験

## 5.1 はじめに

本章では、3.3.2 節で述べた衝突回避技術、ラベル更新技術、複数の光スイッチにおける評価について詳述する。5.2 節では、4 章同様に PLZT 型光スイッチにて実装を行った Feed-Foward 型入力バッファ付き多波長光パケット交換について述べる。その後、5.3 節、5.4.1 節にて電流注入全反射型光スイッチ、SOA スイッチの特徴について述べ、各光スイッチによる多波長光パケット交換検証実験について述べる。

## 5.2 衝突回避機構付き多波長光パケット交換の検証

本節では、衝突回避機構を備えた多波長光パケット交換の実現性を示す目的として行った実証実験について詳述する。5.2.1 節では、衝突回避機構を備えた多波長光パケット交換ノードの実装について述べ、5.2.2 節では実験結果・考察について述べる。

### 5.2.1 交換ノードの実装および実証実験

実験環境構成図を図 5.1 に示す。実験環境は多波長ペイロード生成機構およびラベル生成機構から成る信号生成機構、 $2 \times 2$  多波長光パケット交換ノードの 2 機構から構成される。

多波長光ペイロード生成機構では、8 波長分の光 (100GHz 間隔) を合波し、PPG (Pulse Pattern Generator) で制御した  $LiNbO_3$  (LN) 変調器を用いて 40Gb/s の  $2^7 - 1$  PRBS NRZ 信号へ変調する。変調された光信号は、AWG と長さが異なるファイバを用いて波長間のビット列相関を無くす。その後、カプラにて信号を分け、AOM (Acoustic Optic Modulator) を用いて 300ns のエンベロープに、PLZT 型光スイッチを用いて 200ns のエンベロープに切り取る。そして、切り取られたエンベロープを多波長光ペイロードとする。

ラベル生成機構は、カプラおよび PLZT 型光スイッチ 2 台から構成され、PLZT 型光スイッチにより 25Mb/s NRZ 信号 (“111” or “101”) を 1 波長分生成し、多波長光パケットのラベルとする。ラベル 1 波長と多重化された 8 波長の多波長光ペイロードにより、320Gb/s (40Gb/s  $\times$  8 波長) の多波長光パケットとする。

$2 \times 2$  多波長光パケット交換ノードはラベル処理機構、衝突回避機構、多波長光パケット交換機構で構成される。入力信号はカプラによりラベル処理機構へ分岐される。ラベル処理機構では、バンドパスフィルタによりラベルと多波長光ペイロードの分離を行う。PD は抽出されたラベルを電気信号へ変換し、FPGA へ送る。FPGA はラベルの解析を行い、ラベルの解析結果に基づき、衝突回避および出力ポートの決定を行う。そして、衝突回避機構および多波長光パケット交換機構における PLZT 型光スイッチの制御を行う。

衝突回避機構は Feed-Foward 型入力バッファを適用し、 $1 \times 2$  PLZT 型光スイッチ、 $2 \times 1$  PLZT 型光スイッチ、ファイバ遅延線 (FDL) で構成される。ラベル処理機構にて多波長光パケットの衝

突を検知した際には、後から入力された多波長光パケットを FDL へ出力し、1 パケット分遅延させることにより衝突を回避する。そして、衝突回避後は多波長光パケット交換機構へ送られる。

多波長光パケット交換機構は  $2 \times 2$  PLZT 型光スイッチで構成される。ラベル処理機構から得られた制御信号に基づいて、多波長光ペイロードを指定の出力ポートへスイッチングする。

本パケット交換ノードではラベル “101” および “111” の多波長光パケットはそれぞれ出力ポート 1, 出力ポート 2 へ出力されるとした。実験パラメータを表 5.1 に示す。

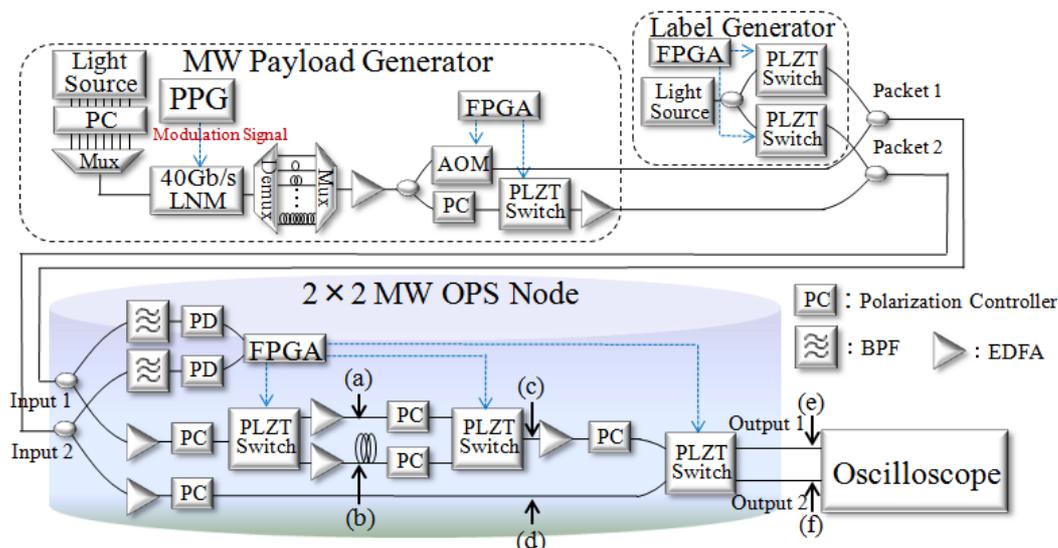


図 5.1 衝突回避機構付き多波長光パケット交換における実験環境構成図

表 5.1 実験パラメータ (衝突回避機構付き多波長光パケット交換)

	Label	Payload
Bit rate	25Mb/s NRZ	40Gb/s NRZ
Data length	120ns	200ns or 300ns
Data signal	”111” or ”101”	$2^7 - 1$ PRBS
Number of wavelength	1	8
Range of wavelength	1549.30nm	1551.72nm ~ 1557.36nm

### 5.2.2 実験結果および考察

実証実験の結果を図 5.2 ~ 図 5.4 に示す。図 5.2 (a) は上部 2 段が入力ポート 1 を下部 2 段が入力ポート 2 を示し、図 5.2 (b) は入力スペクトルを示す。また、図 5.3 は図 5.1 (a) ~ (f) における波形結果を、図 5.4 はそれぞれ入力・出力アイパターンを示す。

図 5.2 (a) より，入力ポート 1, 2 における 4 番目の多波長光パケット（ラベル “101”）が同宛先に，同時刻で到着しており，それぞれ衝突することがわかる．この時，図 5.3 (a), (b) より，4 番目の多波長光パケットが衝突回避のため FDL へ出力されていること，(c), (d) より FDL に出力された多波長光パケットが 1 パケット分遅延され，正しく衝突回避が行われていることが確認できた．また (e), (f) より，ラベルに従って全ての多波長光パケットが正しく交換されていることを確認した．図 5.4 における出力アイパターンにて十分なアイ開口を観測することができた．

以上の結果より，Feed-Foward 型入力バッファにおける衝突回避機構を備えた多波長光パケット交換が PLZT 型光スイッチによって実現可能であることを確認した．入力アイパターンにおいて一部波形劣化が見られるのは，ペイロード生成機構において使用した AWG の周波数帯域が 25GHz であったことが原因であると考えられる．これは 40Gb/s による変調を行った際に，AWG の周波数帯域の 25GHz 以上にスペクトルが広がってしまったためである．この影響により，本実証実験ではエラーフリー伝送を実証することができなかった．以上により，低損失かつ高規模性の光スイッチによる多波長光パケット交換の実現が必要となる．

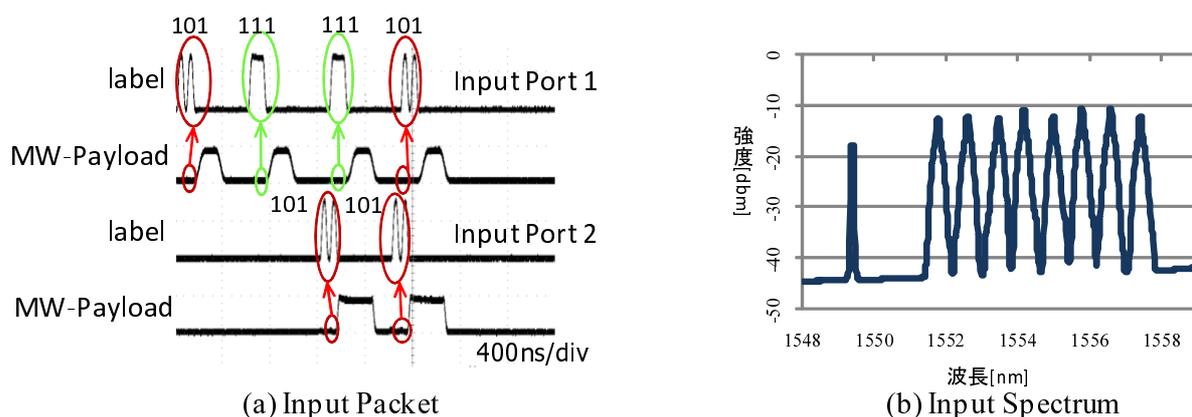


図 5.2 入力パケット・スペクトル

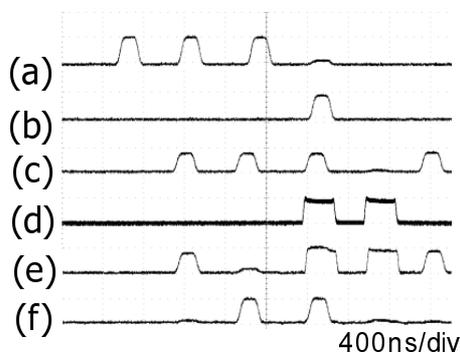


図 5.3 波形結果

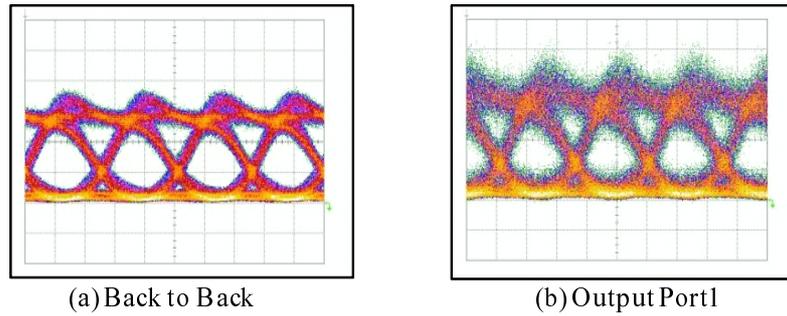


図 5.4 アイパターン

### 5.2.3 結論

本節では、Feed-Foward 型入力バッファによる衝突回避機構を備えた多波長光パケット交換ノードを実装し、320Gb/s 多波長光パケット交換の実証実験について述べた。実験結果より FDL による衝突回避機構の実現性を確認した。PLZT 型光スイッチを用いた本実証実験では、光スイッチの損失を保証するための増幅器によるアンプを原因とした ASE ノイズが生じ、エラーフリー伝送を実証することができなかった。本実証実験より、PLZT 型光スイッチが多波長光パケット交換に最適であるとは言えず、複数の光スイッチによる評価の必要性がある。

## 5.3 電流注入全反射型光スイッチを用いた多波長光パケット交換の検証

3.3.2 節および 5.2 節の結果より、多波長光パケット交換ノードを実現する光スイッチは帯域利用効率の面から高速なスイッチング速度が、多波長を一括して扱う面から波長無依存性、低偏波依存性、多段接続の面から低損失が求められる。多波長光パケット交換に適したスイッチング速度を備えた光スイッチとして SOA スイッチ、LN スイッチ、PLZT 型光スイッチが挙げられる。しかし、SOA スイッチでは ASE (Amplified Spontaneous Emission) ノイズによる OSNR (Optical Signal-Noise Ratio) の低下が問題となる。また、LN スイッチでは SOA スイッチよりも高速なスイッチングが可能となるが、偏波無依存化には高い駆動電圧が必要となる。さらに直流電流を加えると屈折率が安定しなくなる DC ドリフト現象問題もある。また、PLZT 型光スイッチでは偏波無依存化が困難、損失という問題がある。それに対して、本実証実験で用いた電流注入全反射型光スイッチは高速なスイッチングが可能 ( $< 2\text{ns}$ )、偏波無依存性、波長無依存性、変調方式無依存性、ビットレート無依存性、高消光比といった特徴を備えているため、多波長光パケット交換に適していると考えられる。また、SOA スイッチにおける温度制御、LN スイッチにおけるバイアス制御が不要である点も実現性を考慮するにあたり適している。しかし、電流注入全反射型光スイッチでの多波長光パケット交換の実現性は示されておらず、最大波長多重数やクロストークなど多波長光パケット交換特有の影響を調べる必要があった。

本節では、電流注入全反射型光スイッチを用いた多波長光パケット交換の実証実験について述べ、実現性について考察する。

### 5.3.1 交換ノードの実装および実証実験

電流注入全反射型光スイッチを用いた多波長光パケット交換ノードの実現性を実証するために交換ノードの実装および評価を行った。図 5.5 に実験環境構成図を、表 5.2 に実験パラメータを示す。実験環境は主に信号生成部と  $1 \times 2$  多波長光パケット交換ノード部から構成される。信号生成部では、PLZT 型光スイッチを用いて  $25\text{Mb/s}$  NRZ 信号 (“111” or “101”) を 1 波長分生成しラベルとする。また 5 波長分の光の合波を行い、 $\text{LiNbO}_3$  (LN) Modulator によって  $40\text{Gb/s}$  の  $2^7 - 1$  PRBS 信号に変調する。変調された光信号は、AWG と 1m 毎に長さが異なるファイバ (1m ~ 5m) により各波長毎とのビット列相関を無くす。その後、AOM (Acoustic Optical Modulator) により 300ns のエンベロープに切り出すことで、 $40\text{Gb/s} \times$  波長数の多波長光ペイロードとする。最後に、カプラにより多波長光ペイロードとラベルを合波し、多波長光パケットとする。

$1 \times 2$  多波長光パケット交換ノードは主にラベル交換機構、制御機構、多波長光パケット交換機構の 3 機構で構成される。ラベル交換機構では、1 つめの FBG によりラベルは反射ポートへ、多波長光ペイロードは透過ポートへ出力されることにより、ラベルの抽出が行われる。抽出されたラベルは PD による O/E 変換後、制御機構にて FPGA により電氣的に解析される。制御機構は解析

結果に基づき，新ラベル生成のための光スイッチの制御および多波長光パケット交換機構における光スイッチの制御を行う．なお，新ラベルの付与はラベル抽出時と同様にFBGを用いて行う．なお，5.2 ([18]) にて2×2多波長光パケット交換ノードにおける衝突回避機構の検証を行っているため，本実証実験では衝突回避機構の実装は行っていない．

ラベル“111”，“101”の多波長光パケットはそれぞれ新ラベル“110”，“100”が付与されるとした．新ラベル付与後の多波長光パケットはそれぞれ，出力ポート1，出力ポート2より出力されるとする．

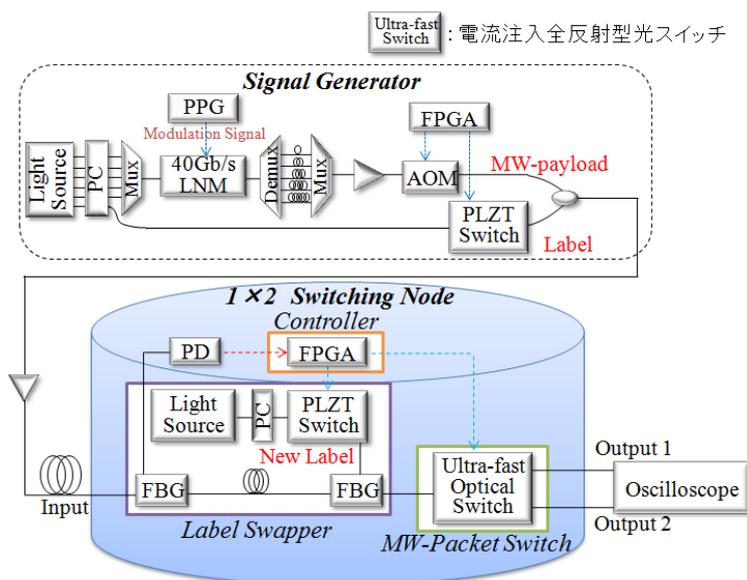


図 5.5 電流注入全反射型光スイッチによる多波長光パケット交換構成図

表 5.2 実験パラメータ (電流注入全反射型光スイッチによる多波長光パケット交換)

	Label	Payload
Bit rate	25Mb/s NRZ	200Gb/s NRZ ( $5\lambda \times 40\text{Gb/s}$ )
Data length	120ns	300ns
Data signal	“111” or “101”	$2^7 - 1$ PRBS
# of $\lambda$	1	5
Range of $\lambda$	1549.32nm (Ch0)	1551.72nm (Ch1) - 1554.94nm (Ch5)

### 5.3.2 実験結果および考察

入出力ポートの波形結果，スペクトル結果，アイパターンおよび BER (Bit Error Rate) をそれぞれ図 5.6，図 5.7，図 5.8，図 5.9 に示す．図 5.6(a) より，ラベル“111”の多波長光パケットは

ラベル “110” へ更新された後，出力ポート 1 のみへ出力されていることが確認できる．また，図 5.6(b) よりラベル “101” の多波長光パケットはラベル “100” へ更新された後，出力ポート 2 のみへ出力されていることが確認できる．図 5.7 のスペクトル結果からも入力および出力のスペクトルを確認することができる．また，図 5.8 における出力アイパターンは入力アイパターンと比べ十分なアイ開口を確認することができる．図 5.9 からパワーペナルティが 4dB 以下であることが確認できる．以上により，電流注入全反射型光スイッチを用いた多波長光パケット交換においてエラーフリー伝送の実現性を示した．

本実証実験にて使用した電流注入全反射型光スイッチでは，40Gb/s 信号におけるエラーフリー伝送を実現するための最大波長多重数は 5 波長であることが確認できた．これは電流注入全反射型光スイッチの最大入力パワーが制限されていることにより，波長数増加に伴い 1 波長あたりの信号強度が低下してしまったためであると考えられる．また，40Gb/s 信号にてエラーフリー伝送を実現するためには OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) が 30dB 以上必要であることを確認することができた．以上の結果より電流注入全反射型光スイッチでは，波長数増加に伴う広帯域化を考慮するにあたり最大多重可能波長数が限られるため適さないと考えられる．

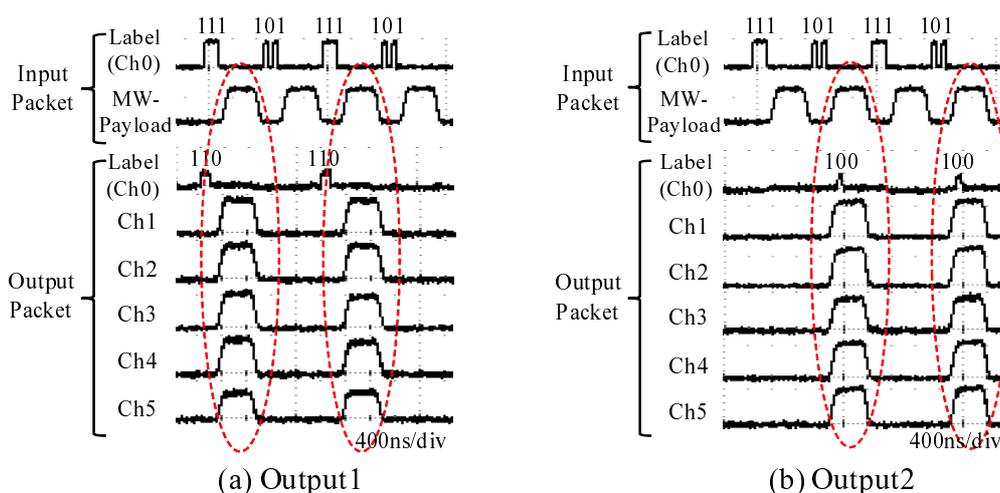


図 5.6 波形結果

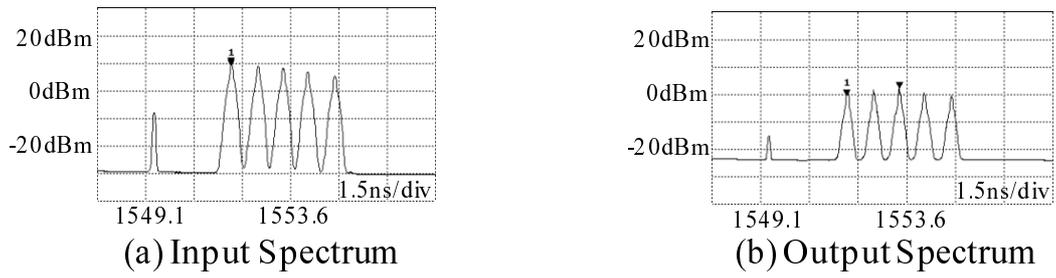


図 5.7 スペクトル結果

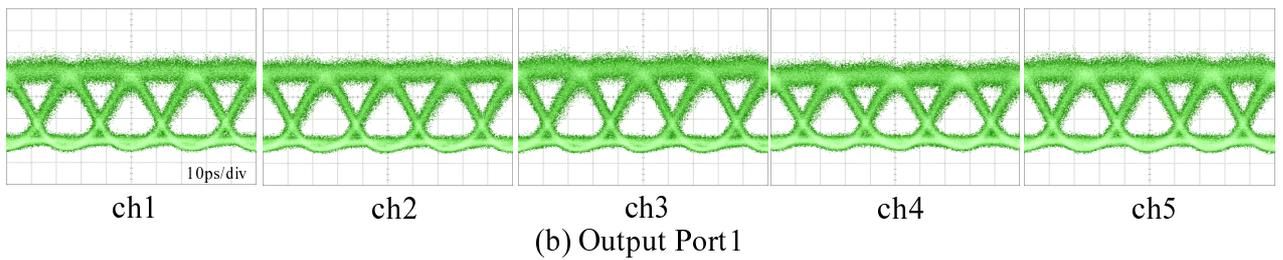
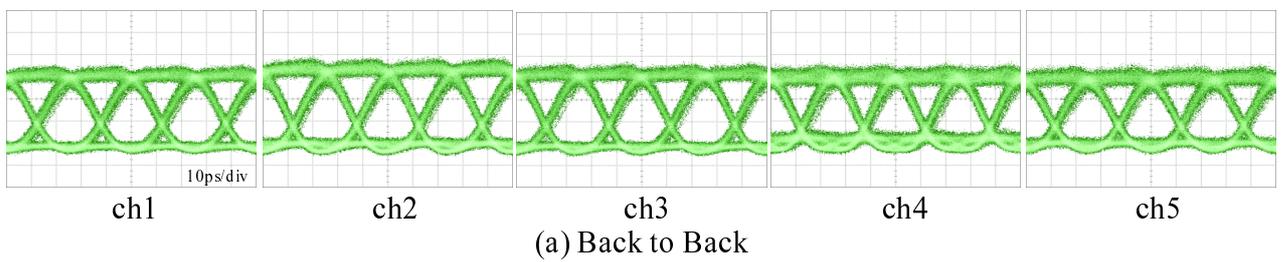


図 5.8 アイパターン

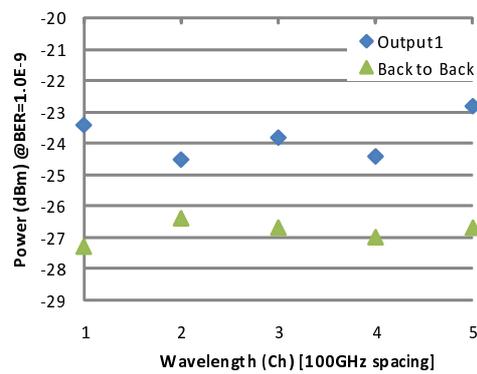


図 5.9 Bit Error Rate

### 5.3.3 結論

本節では、多波長光パケット交換において要求される高速スイッチングが可能な電流注入全反射型光スイッチを用いて行った多波長光パケット交換の実証実験およびラベル更新技術の実証実験について述べた。実験結果より、最大多重可能波長数の検証、200Gb/s 多波長光パケット交換におけるエラーフリー伝送の実現性を示した。

## 5.4 SOA スイッチを用いた多波長光パケット交換およびハイブリッド光交換ノードの検証

3.3.2 節および 5.2 節, 5.3 節から, 多波長光パケット交換に適用される光スイッチには, 高速なスイッチング速度のみならず, 波長無依存性, 低偏波依存性, 低損失, 規模性が求められる。これまでは PLZT 型光スイッチおよび電流注入全反射型光スイッチにて実装を進めてきたが, 大規模化を考慮するにあたり規模性が問題であった。また, PLZT 型光スイッチでは損失による多段接続性が, 電流注入全反射型光スイッチでは多重可能波長数が課題であった。これに対して, SOA ゲートおよびカプラを用いたブロードキャストアンドセレクト型光スイッチは高速なスイッチング速度 ( $<1\text{ns}$ ), 高消光比だけでなく, 大規模化を達成できるため, 多波長光パケット交換に適していると考えられる。しかし, SOA スイッチでは, 入力信号強度, 波長間隔, ビットレートにより非線形効果現象が生じる。そのため, SOA スイッチを用いた多波長光パケット交換技術の実現には, それぞれのパラメータを総合的に考慮し, BER などの測定による伝送品質の評価が重要となる。

本節では, 5.4.1 節にて従来の SOA スイッチと比較して低 NF かつ非線形効果の影響が少ない SOA スイッチを用いて行った多波長光パケット交換の評価実験について述べる。また, 5.4.2 節では SOA スイッチを用いたハイブリッド光交換ノードの基礎的な検証実験について述べる。

### 5.4.1 多波長光パケット交換の検証

本節では, SOA スイッチの多波長光パケット交換への適用性を検証する目的として行った SOA スイッチの評価実験について述べる。本検証実験は, 100GHz 間隔における 480Gb/s ( $40\text{Gb/s} \times 12\lambda$ ) の WDM 光信号を用い入力信号強度, 利得を総合的に考慮して行った。

#### 5.4.1.1 交換ノードの実装および実証実験

SOA スイッチを用いた多波長光パケット交換ノードの実現性の実証を目的として交換ノードの実装および評価を行った。図 5.10 に実験環境構成図を, 表 5.3 に実験パラメータを示す。実験環境は多波長光パケット交換機構のみカプラおよび SOA ゲートを用いてブロードキャストアンドセレクト方式の SOA スイッチを実装した。また, SOA ゲートの前後には SOA ゲートにおいて反射波による発振を抑圧するためにアイソレータを用いた。その他の実験環境構成は 5.3 節で実装した環境と同様であり, 主に信号生成部と  $1 \times 2$  多波長光パケット交換ノード部から構成される。なお, 本実証実験は SOA スイッチの非線形交換の影響を測定し, 多波長光パケット交換への適用性を評価することを目的として行ったため, 波形レベルのパケット交換検証は行っていない。ただし, 電流注入全反射型光スイッチと等しい条件にて評価を行うためラベル信号の入力および FBG による新ラベル信号の入力を行った。

非線形交換の影響を評価するため, SOA スイッチにおける入力パワーを複数設定し (11.5dBm, 1.5dBm), それぞれにおいて利得を変化させ (0dB, 3dB, 7dB, 9dB) 測定を行う。交換ノードを

1×2, 1×4, 1×8 へと大規模化するに従い, 各交換ノードにおいてカブラの総数が増える. そのためカブラ通過数は 1~3 個となるため 3~9dB の損失が生じる. 利得値は規模性を考慮し, 損失補償を可能とする値に設定する. なお, 2×2, 4×4 と拡張した際の損失はそれぞれ 6dB, 12dB となる.

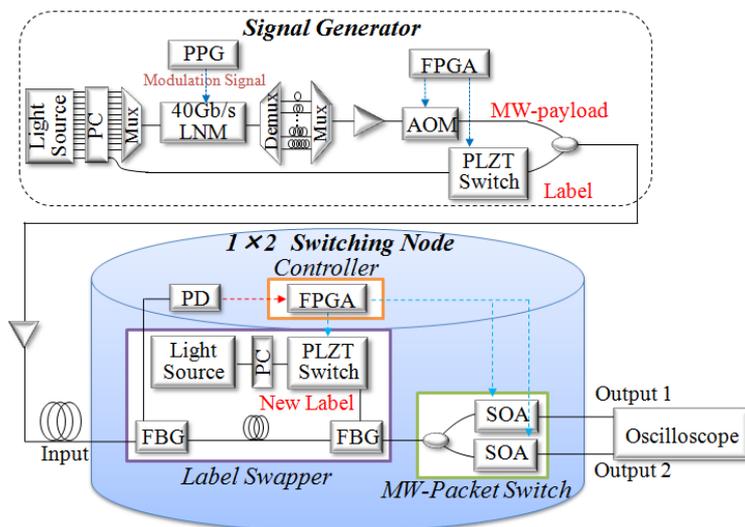


図 5.10 SOA スイッチによる多波長光パケット交換構成図

表 5.3 実験パラメータ (SOA スイッチによる多波長光パケット交換)

	Label	Payload
Bit rate	25Mb/s NRZ	480Gb/s NRZ (12λ × 40Gb/s)
Data signal	“111” or “101”	2 <sup>7</sup> - 1 PRBS
# of λ	1	12
Range of λ	1551.72nm (Ch0)	1553.33nm (Ch1) - 1562.23nm (Ch12)

#### 5.4.1.2 実証実験結果および考察

図 5.11 に SOA スイッチにおける入力パワー 11.5dBm, 利得 0dB~7dB 際のスペクトル結果を, 図 5.12 に入力パワー 1.5dBm, 利得 9dB 際のスペクトル結果を示す. また図 5.11, 図 5.12 における (a)~(f) に対応するアイパターンを図 5.13 に示す. 図 5.11, 図 5.13 より, (b) では利得が 0dB 際には非線形効果の影響が現れていないことが確認できる. (c) においてはスペクトル結果からは非線形効果が多少影響していることが確認できるが, アイパターンからは良好なアイ開口が確認できる. しかし, 利得が大きい (d) においてはスペクトル結果, アイパターンともに非線形効果の影響が大きいことがわかる. また, SOA において注入可能な最大電流値を注入した際に (d)

である．一方，9dB と最大の利得値である図 5.12，図 5.13(f) ではスペクトル結果，アイパターンともに非線形効果の影響は見られなかった．図 5.14 に Back to Back および各利得における BER の測定結果を示す．なお，多波長光パケット交換に使用した 12 波長 (CH1 ~ CH12) のうち非線形効果の影響が最も大きくなるとされる CH6 のみ測定を行った．スペクトル，アイパターン結果同様に，非線形効果の影響が少ない場合 (利得:0dB,3dB,9dB) においては，エラーフリー伝送の実現性を確認することができた．一方，SOA ゲートへの注入電流および出力パワーが最大となる場合 (入力パワー:11.5dBm，利得:7dB) においてはエラーフリー伝送を実現することができなかった．以上の結果より，SOA ゲートへ注入する電流値および出力パワーで非線形効果の影響が大きく変化すると思われる．

本検証実験で用いた SOA スイッチは従来の SOA スイッチと比較して，非線形効果の抑圧という特徴を備えているため，多波長光パケット交換に適していると考えられる．すなわち，SOA スイッチへの入力パワーを抑圧して用いることにより，多段接続および規模性を生かすことができる．しかし，検討している波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの特徴である波長数の動的な変化を考慮するにあたり，出力パワーの問題が生じる．これは，波長数の変化に伴い非線形効果が現れる出力パワーを超える場合がありえるためである．このようなハイブリッド特有の問題を解決するに当たり，SOA スイッチの制御も今後課題として捉えなければならない．

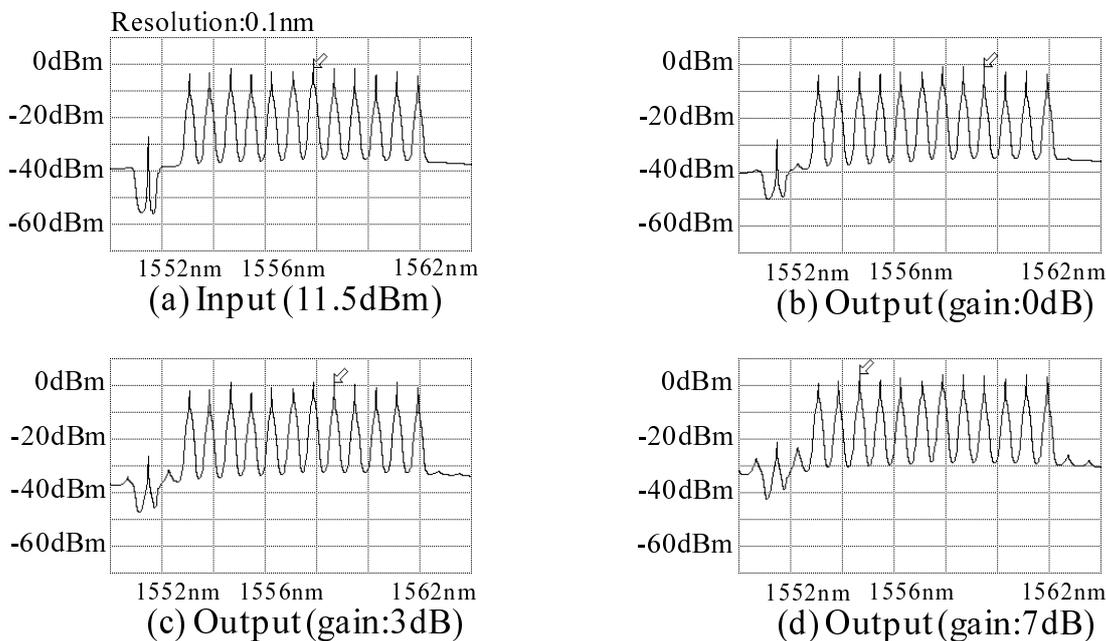


図 5.11 スペクトル結果 (入力パワー : 11.5dBm)

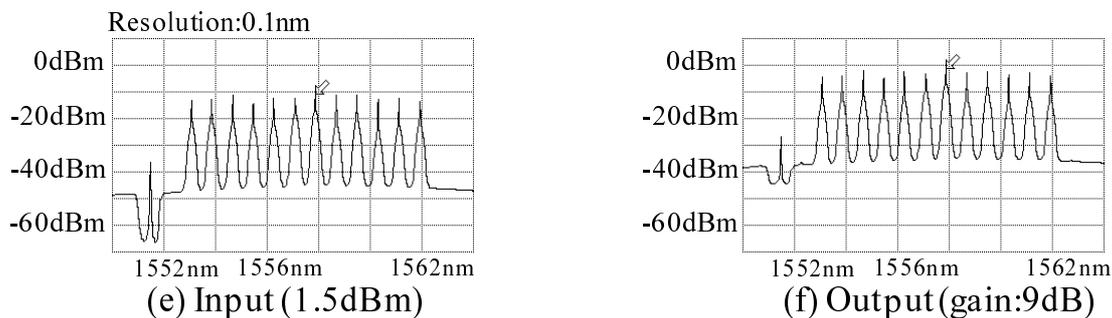


図 5.12 スペクトル結果 (入力パワー : 1.5dBm)

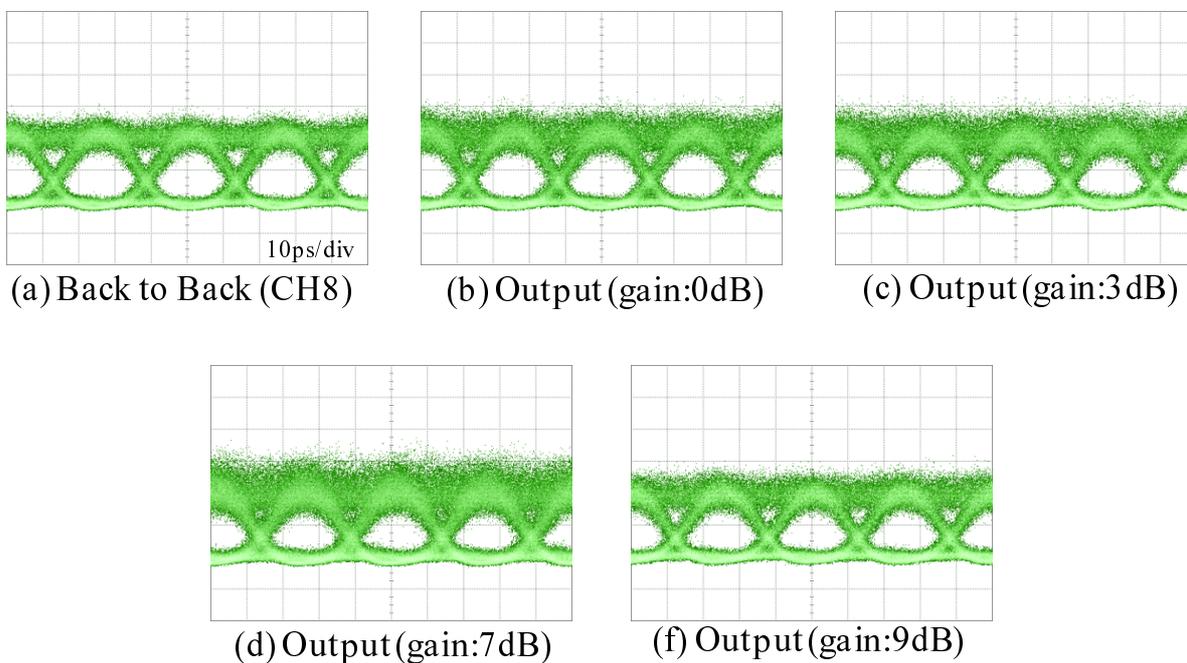


図 5.13 CH6 におけるアイパターン

#### 5.4.2 ハイブリッド光交換ノードの検証

本節では、5.4.1 節にて多波長光パケット交換の適用性を示した SOA スイッチを用い、波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実現性を検証する目的として行った実証実験について述べる。本実証実験は、SOA スイッチの評価実験と同様の波長帯を用いて行ったが、無変調であるため基礎的な実証実験となる。

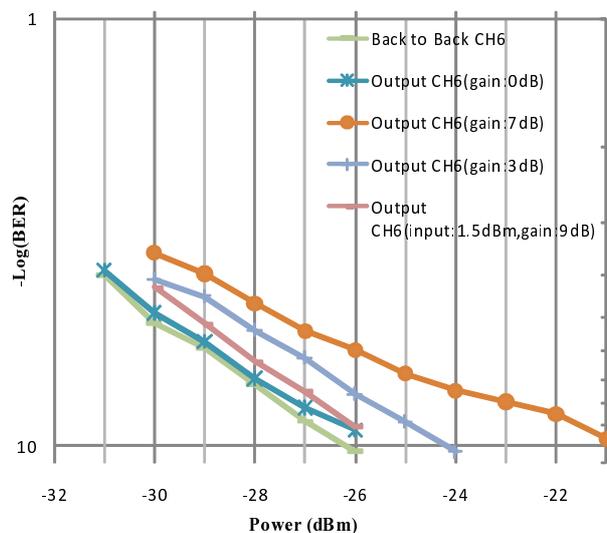


図 5.14 Bit Error Rate(gain:0dB,3dB,7dB,9dB)

#### 5.4.2.1 交換ノードの実装および実証実験

本実証実験では、信号生成機構と  $1 \times 2$  交換ノードを実装して実験を行う。実験構成を図 5.15 に示す。

信号生成機構では、多波長光パケットおよび光パスの混在した入力信号を生成する。25Mb/s NRZ 信号 (“111” or “101”) を 1 波長分 (CH0:1551.72nm) 生成し、多波長光パケット用ラベルとする。また、100GHz 間隔にて 12 波長 (CH1 ~ 12:1553.33nm ~ 1562.23nm) を生成し、多波長光ペイロードまたは光パスとして利用する。このうち多波長光ペイロードの信号は、AOM (Acoustic Optical Modulator) により 300ns の長さのエンベロープに切り出され、光パスの信号と合波される。これらの信号をカプラにより一本のファイバ内に多重することで、入力信号を生成する。

$1 \times 2$  交換ノードは、4.3 節同様にラベル交換機構、ラベル処理機構、光パス交換機構、多波長光パケット交換機構で構成される。交換ノードの動作においても 4.3 節で行った実証実験と同様である。なお、ラベル処理機構での解析結果に基づいて FPGA は多波長光パケット交換機構における SOA スイッチの制御を行う。

ラベル “111” およびラベル “101” の多波長光パケットはそれぞれ、新ラベル “100”, “110” が付与された後、出力ポート 1, 出力ポート 2 により出力される。また、奇数チャネルおよび偶数チャネルの光パスはそれぞれ、出力ポート 1, 出力ポート 2 へ出力される。

共有波長資源配分比の動的な変更を検証するため、以下のシナリオにて検証実験を行なった。

(A) 4 波長 MW-OPS (CH1 ~ CH4), 8 波長 OCS (CH5 ~ CH12)

(B) 8 波長 MW-OPS (CH1 ~ CH8), 4 波長 OCS (CH9 ~ CH12)

また、本実証実験でも MEMS および WBTF の制御は PC から Ethernet を利用して行った。

表 5.4 各シナリオにおける波長数・波長帯

	Label	Scenario A		Scenario B	
		Payload	Path	Payload	Path
波長数	1	4	8	8	4
波長帯 (チャンネル)	1551.72 (Ch0)	1553.33 - 1555.75 (Ch1 - Ch4)	1556.55 - 1562.23 (Ch5 - Ch12)	1553.33 - 1558.98 (Ch1 - Ch8)	1559.79 - 1562.23 (Ch9 - Ch12)

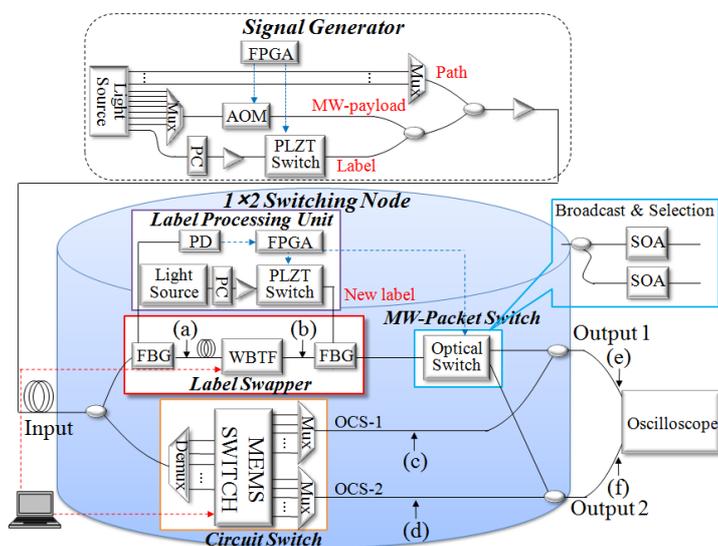


図 5.15 SOA スイッチを用いたハイブリッド光交換ノード構成図

#### 5.4.2.2 実験結果および考察

図 5.18, 図 5.19 に各シナリオにおけるスペクトル結果を, 図 5.16, 5.17 に入力パケット, 波形結果を示す. 4.3 節で述べた動的境界モデルを用いた実証実験と同様に各シナリオにおけるスペクトル結果より動的な波長資源の配分が実現できていることが確認できる. 波形結果からは, 多波長光パケットはラベルに従って, それぞれ出力ポート 1, 出力ポート 2 に正しく出力されたことが分かる. 光パスはチャンネル番号に従って, 奇数チャンネルは出力ポート 1 に, 偶数チャンネルは出力ポート 2 に正しく出力されたことがわかる. また, CH5 ~ CH8 はシナリオ A では光パス交換を, シナリオ B では多波長光パケット交換を実現しており, 両転送パラダイム間において共有波長資源配分比の動的な変更が実現できたことが確認できる. また, SOA スイッチにて波形レベルでの多波長光パケット交換の実現性を確認することができる.

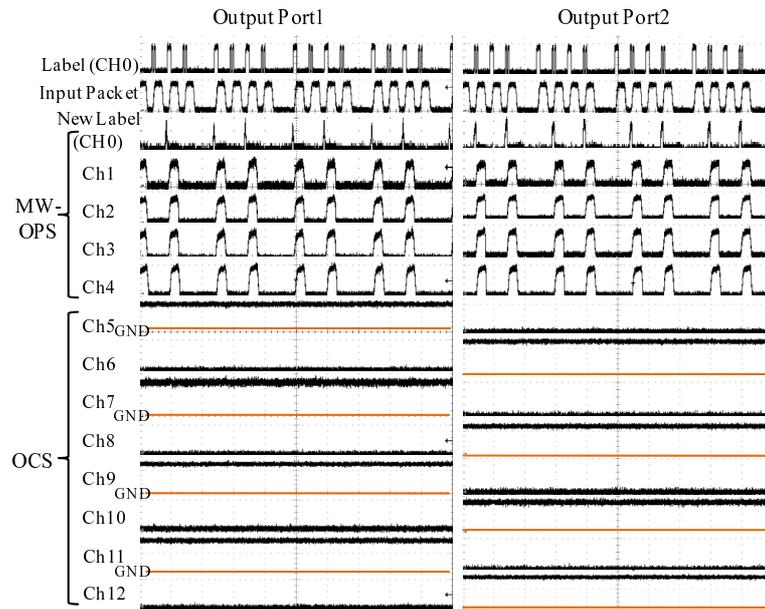


図 5.16 波形結果 (Scenario A)

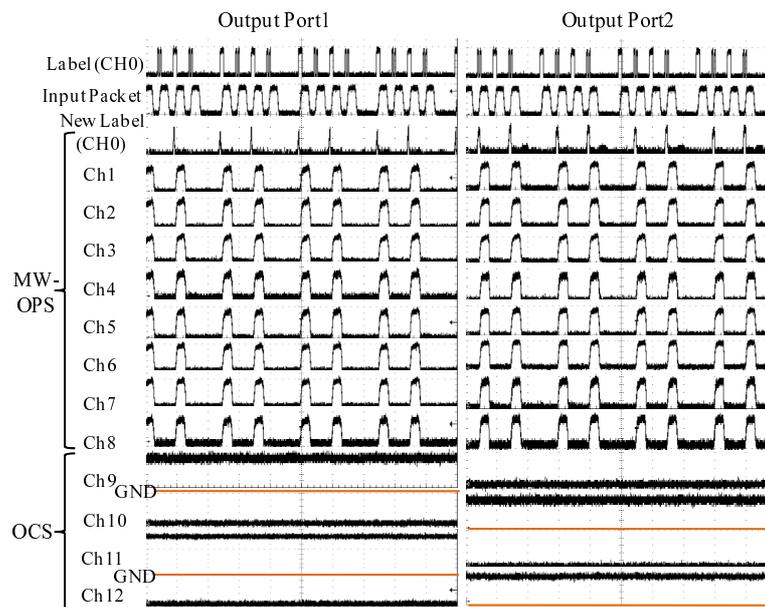


図 5.17 波形結果 (Scenario B)

### 5.4.3 結論

本節では、SOA スイッチによる多波長光パケット交換への適用性について述べ、SOA スイッチを用いた波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの初期的な実証実験について述べた。ま

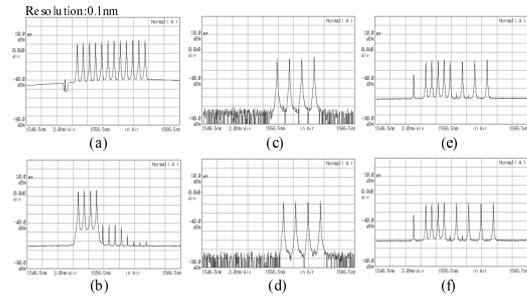


図 5.18 スペクトル結果 (Scenario A)

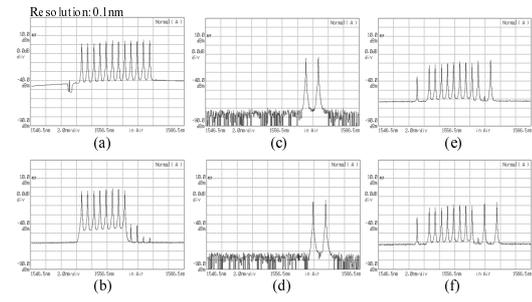


図 5.19 スペクトル結果 (Scenario B)

た、実験結果より SOA スイッチ適用時の課題についても述べた。

## 5.5 おわりに

本章では、波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードを実現する上で重要となる多波長光パケット交換機構に関する実証実験について述べた。これまで実装を進めてきた PLZT 型光スイッチを用いて、衝突回避機構の実証実験を行い、実現性および多段接続性の限界を示した。また、多波長光パケット交換に適していると考えられる電流注入全反射型光スイッチ、SOA スイッチの評価を行い SOA スイッチの適用性および課題を示した。さらに、SOA スイッチを用いて波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの初期的な実証実験を行い、SOA スイッチによる交換ノードの実現性を示した。

## ■ 第 6 章

---

結論

## 6.1 本研究の主たる成果

本論文では、将来のネットワーク要件として求められる広帯域性、低消費電力、多様なアプリケーションへの適用性を高い帯域利用効率にて実現できる波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの設計と実装を行い、実証実験により交換ノードの実現性を示した。また、本交換ノードを実現する上で重要となる多波長光パケット交換機構において、複数の光スイッチを用いて検証実験を行い今後の光スイッチ開発・交換ノード設計への指針を示した。

ハイブリッド光ネットワークの実証においては、静的境界モデルおよび動的境界モデルを適用して実証実験を行った。実証実験により最大透過可能波長数、100GHz の波長間隔による実装、エラーフリー伝送を示した。また、動的境界モデルを実現する MEMS 光スイッチ、WBTF の GMPLS 制御へ向け Ethernet による制御を実現した。

多波長光パケット交換機構においては PLZT 型光スイッチ、電流注入全反射型光スイッチ、SOA スイッチを用いて実証実験を行い、各光スイッチにおける課題および実現可能性を示した。PLZT 型光スイッチは偏波無依存化の困難さに加え、損失補償による多段接続性の困難さが、電流注入全反射型光スイッチは OSNR の低下による最大多重可能波長数が課題となった。SOA スイッチにおいては、従来課題とされてきた非線形効果の影響を出力パワーおよび利得の調整により影響が無い程度まで抑圧することが可能となることを確認し、SOA スイッチによる波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実現性の確認をした。また、SOA スイッチ適用の際のハイブリッド光ネットワークに固有の課題を明らかにした。

今後、トラフィックの増加やアプリケーションの多様化により、光ネットワークへの期待はますます大きくなると考えられる。また、光デバイスおよび光ネットワーク技術のさらなる発展により、新たなデバイス・技術を用いてネットワークアーキテクチャの検討を行う必要があると考えられる。そのような時に、本研究で示した波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実現性および課題が、今後のネットワークおよび光デバイスへの研究へ貢献出来れば幸いである。

## 6.2 今後の課題

本研究では、波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードの実証、各光スイッチにおける多波長光パケット交換の評価から提案している交換ノードの実現性および課題を明確にした。今後は、従来のネットワークと検討しているハイブリッド光ネットワークの境界となるエッジノードの設計・実装が課題となる。また、シミュレーションによる既存手法との性能評価をはじめ、GMPLS プロトコルの拡張およびエッジノード実装によるテストベッドを用いた性能評価が必要不可欠となる。

また、5.4.1 節で述べたように波長資源配分比可変型ハイブリッド光交換ノードにおいて、SOA スイッチを適用すると動的な波長数変化により、出力パワー変化が生じ、非線形効果の影響が大きくなる可能性が出てくる。そこで、波長数変化に伴う出力パワー制御機構を含めた交換ノードの設計、実装による実現性の実証を行う必要がある。さらに、偏波無依存化が実現可能な LN スイッチを用いて波長光パケット交換適用性の評価を行うと共に、アーキテクチャ的な面からも最適な光スイッチの検討を行っていきたい。

## 謝辞

---

研究を進めていく過程だけでなく生活の面におきましても、常日頃より有益かつ適切な御指導・御鞭撻を頂きました森川 博之教授，南 正輝准教授に深く感謝いたします。特任講師の今泉 英明さんには本研究のあらゆる局面において非常に適切な助言または叱咤激励を頂きました。光グループとして2年間楽しく研究を進めることができました。ここに深く感謝いたします。また、共同研究として実験室・実験設備を提供して下さった中野 義昭教授，実験のみならず修士論文においても有益な助言を下された種村 拓夫講師に深く感謝いたします。様々な助言のみならず研究への姿勢を学ばせて頂いた猿渡 俊介助教，研究を行う環境の整備および購入物品における会計処理に尽力して下さった秘書の川北 敦子さん，石崎 智子さんに感謝いたします。

本研究を進めていく上で適切なアドバイスをして頂くとともに，研究生生活においてウイニングイレブンによる楽しみを与えて下さった客員研究員の川西 直さん，博士課程2年の鈴木 誠さんに深く感謝いたします。また，本研究室OBの渡部 克弥さんには私が修士1年の一年間，研究室での過ごし方から研究に対する姿勢，内容，進路に至るまであらゆることに対して御指導頂きました。卒業後も私生活のみならず研究に関しても幾度となく励まし，相談に乗って頂きました。ここに深く感謝いたします。博士課程3年の玉 載旭さん，李 斗煥さん，同2年の森戸 貴さん，荒木 靖宏さん，司 化さん，修士過程1年の大原 壮太郎君には研究を進めていく上で様々な形でお世話になりました。深く感謝いたします。共に光グループとして議論してくれただけでなく，支えてくれた同期の町田 啓太君，2年間苦楽を共にした千家 雅之君，力武 紘一郎君，ペドロ モラレス君に深く感謝いたします。良い同期に恵まれたおかげで2年間を乗り切ることができました。また，実験やデモに協力してくれた修士課程1年の李 慧さん，卒論生の岡村 悠貴君に感謝いたします。

森川研究室で過ごした2年間は非常に忙しく厳しいものではありませんでしたが，多くの研究室のメンバーに支えて頂き，非常に充実した研究生生活を送ることができました。直接名前を挙げることは致しませんが，研究室の皆様は心より感謝いたします。

最後に今まで支えてくれた友人や家族に深い感謝の意を述べたいと思います。

皆様，本当にありがとうございました。

平成 21 年 2 月 4 日

## 参考文献

---

- [1] A. H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P. Wiinzer, C. Doerr, J. Centanni, E. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma, "25.6Tb/s C+L-Band Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals," OFC2007, PDP19, 2007.
- [2] H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, H. Fukuyama, "20.4-Tb/s ( $204 \times 111$ Gb/s) Transmission over 240 km Using Bandwidth-Maximized Hybrid Raman/EDFAs," OFC2007, PDP20, 2007.
- [3] M. Daikoku, I. Morita, H. Taga, H. Tanaka, T. Kawanishi, T. Sakamoto, T. Miyazaki, and T. Fujita, "100Gbit/s DQPSK Transmission Experiment without OTDM for 100G Ethernet Transport," OFC2006, PDP36, 2006.
- [4] T. Asami, et al. "Energy Consumption Targets for Network Systems," ECOC2008, Tu.4.A.3, 2008.
- [5] R. S. Tucker, et al. "Optical Packet-Switched WDM Networks – A Cost and Energy Perspective," OFC2008, OMG1, 2008.
- [6] "Vertically Integrated Center for Technologies of Optical Routing towards Ideal Energy Saving," [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2008/pr20081001/pr20081001.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20081001/pr20081001.html), Oct. 2008.
- [7] D. K. Hunter, I. Andonovic, "Approaches to optical internet packet switching," IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 2, pp. 116-122, 2000.
- [8] Mike J, O. Mahony, D. Simeonidou, D. K. Hunter, and A. Tzanakaki, "The application of optical packet switching in future communication networks," IEEE Communications Magazine, vol. 39, no. 3, pp. 128-135, 2001.
- [9] Y. Sum, T. Hashiguchi, V. Minh, X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Design and Implementation of an Optical Burst-Switched Network Testbed," IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 11, pp. 48-55, 2005.
- [10] K. Sato, S. Okamoto, and H. Hadama, "Network integrity enhancement with optical path layer technologies," IEEE J.Sel. Areas Commun, vol. 12, no. 1, pp. 30-47, 2003.
- [11] 太田昌孝, "全光データパスルータの構成要素," 信学技報, PN2005-30, 2005.
- [12] S. Bjornstad, et al. "Packet switched hybrid optical networks," ICTON2004, vol. 1, pp. 29-32, 2004.
- [13] G. Zervas, et al. "Demonstration of Novel Multi-Granular Switch Architecture on an

- Application-Aware End-to-End Multi-Bit Rate OBS Network Testbed,” ECOC2007, PDS3.2, 2007.
- [14] F. Xue, and S.J. Ben Yoo. “High-Capacity Multiservice Optical Label Switching for the Next Generation Internet,” IEEE Opt. Communications, 42, S16-S22, 2003.
- [15] K. Watabe, T. Saito, N. Matsumoto, T. Tanemura, H. Imaizumi, A. Amin, M. Takenaka, Y. Nakano, and H. Morikawa, ”80Gb/s Multi-wavelength Encoded Optical Packet Switching Experiment using PLZT Optical Switch,” ONDM2007, pp. 11-20, 2007.
- [16] H. Onaka, Y. Aoki, K. Sone, G. Nakagawa, Y. Kai, S. Yoshida, Y. Takita, K. Morito, S. Tanaka, and S. Kinoshita, “WDM Optical Packet Interconnection using Multi-Gate SOA Switch Architecture for Peta-Flops Ultra-High-Performance Computing Systems,” ECOC2006, Tu 4.6.6, 2006.
- [17] H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, et al. “All-Optical Multiple-Label-Processing Based Optical Packet Switch Prototype and Novel 10Gb Ethernet /80 (80 Lambda  $\times$  10) Gbps-Wide Colored Optical Packet Converter with 8-Channel Array Burst-Mode Packet Transceiver,” OFC2007, OWC5, 2007.
- [18] K. Watabe, M. Takagi, K. Machida, T. Tanemura, H. Imaizumi, Y. Nakano, and H. Morikawa, “320Gb/s Multi-wavelength Optical Packet Switching with Contention Resolution Mechanism using PLZT Switches,” OFC2008, OThA5, 2008.
- [19] K. Ikezawa, S. Iio, et al. “Demonstration of Modulation Format Free and Bit Rate Free Characteristics of 2ns Optical Switch for Optical Routers,” OFC2008. JWA31, 2008.
- [20] D. Careglio, et al. “Quality of Service in a Multi-Fiber Optical Packet Switch,” Photonics in Switching, 2006.
- [21] V. M. Vokkarane, et al. “Prioritized Burst Segmentation and Composite Burst-Assembly Techniques for QoS Support in Optical Burst-Switched Networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp. 1198-1209, 2003.
- [22] 山口貴詩, et al. “フォトリックパケットスイッチにおける WDM ファイバ地沿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, pp. 15-22, 2001.
- [23] JungYui Choi, et al. “Service differentiation using hybrid shared optical buffers in transparent optical networks,” Optics Express, Vol. 14, pp.5079-5091, 2006.
- [24] C. Develder, et al. “Strategies for an FDL Based Feed-Back Buffer for an Optical Packet Switch with QoS Differentiation,” COIN2002, 2002.
- [25] M. Yang, et al. “A QoS Supporting Scheduling Algorithm for Optical Burst Switching DWDM Networks,” GLOBECOM vol. 1, pp. 86-91, 2001.
- [26] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, S. Humphries, “All-optical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, no. 11, pp. 1497-1499, 1999.

## 発表文献

---

- [1] H. Imaizumi, K. Watabe, M. Takagi, K. Machida, A. Watanabe, and H. Morikawa, “A Hybrid Optical Network Architecture Concept Combining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching (HOTARU),” The Conference on IP + Optical Network (IPOP2007), June. 2007. (demo)
- [2] 高木衛, 渡部克弥, 町田啓太, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “PLZT 型光スイッチを用いたフィードフォワード型入力バッファ付き 320Gb/s 多波長光パケット交換の実証実験,” 電子情報通信学会研究報告, フォトニックネットワーク研究会 (PN2007-78), Mar. 2008.
- [3] 渡部克弥, 高木衛, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “多波長光パケット交換を用いたパス/パケット混在型光ネットワークにおける交換ノードの設計と実装,” 電子情報通信学会研究報告, フォトニックネットワーク研究会 (PN2007-75), Mar. 2008.
- [4] 高木衛, 渡部克弥, 町田啓太, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “PLZT 型光スイッチを用いた衝突回避機構付き 320Gb/s 多波長光パケット交換の検証,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-9, Mar. 2008.
- [5] 渡部克弥, 高木衛, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “ハイブリッド型光ネットワークを実現する交換ノードの設計と実装,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-16, Mar. 2008.
- [6] K. Watabe, M. Takagi, K. Machida, T. Tanemura, H. Imaizumi, Y. Nakano, and H. Morikawa, “320Gb/s Multi-Wavelength Optical Packet Switching with Contention Resolution Mechanism using PLZT Switches,” OFC2008, OThA5, Feb. 2008.
- [7] H. Imaizumi, M. Takagi, K. Machida, H. Li, D. E. Rianto, Y. Okamura, and H. Morikawa, “A Hybrid Optical Network Architecture Concept Combining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching (HOTARU),” The Conference on IP + Optical Network (IPOP2008), June. 2008. (demo)
- [8] 高木衛, 渡部克弥, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “動的な波長資源割当可能なハイブリッド光交換ノードの実証実験,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-5, Sep. 2008.
- [9] 高木衛, 李慧, 渡部克弥, 今泉英明, 種村拓夫, 中野義昭, 森川博之, “共有波長資源配分比率可変型 400Gb/s ハイブリッド光交換ノードの実証実験,” 電子情報通信学会研究報告, フォトニックネットワーク研究会 (PN2008-40), Dec. 2008.
- [10] 李慧, 高木衛, 今泉英明, 森川博之, “SOA スイッチを用いた共有波長資源配分比率可変型ハイブリッド光交換ノードの検証実験,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-14, Mar. 2009.(発表予定)

- 
- [11] M. Takagi, H. Li, K. Watabe, H. Imaizumi, T. Tanemura, Y. Nakano, and H. Morikawa, "400Gb/s Hybrid Optical Switching Demonstration Combining Multi-Wavelength OPS and OCS with Dynamic Resource Allocation," OFC2009, OTuA6, Mar. 2009.(発表予定)
- [12] M. Takagi, H. Imaizumi, T. Tanemura, S. Iio, M. Suehiro, Y. Nakano, and H. Morikawa, "200Gb/s Multi-Wavelength Optical Packet Switching with 2ns Ultra-fast Optical Switch," OECC2009, 2009.(投稿予定)