



Title	広帯域メトロネットワークおよび高性能スーパーコンピュータネットワークへの光スイッチング技術の適用に関する研究
Author(s)	尾中, 寛
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1285
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

広帯域メトロネットワークおよび
高性能スーパーコンピュータネットワークへの
光スイッチング技術の適用に関する研究

2008年1月

尾中 寛

謝辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授 北山研一博士のご指導のもと、筆者が大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻に在籍し、株式会社富士通研究所において行った研究成果をまとめたものである。本論文を結ぶにあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った北山教授に深く感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、懇切なる御検討を頂いた大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授 谷口研二博士、同専攻教授 谷野哲三博士、ならびに同専攻准教授 丸田章博博士に厚く御礼申し上げます。

さらに、本論文に対する有益なご討論、ご助言を頂いた、東京大学 先端科学技術研究センター教授 中野義昭博士、九州大学 大学院 システム情報科学研究院 情報理学部門教授 村上和彰博士、名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻教授 佐藤健一博士に厚く御礼申し上げます。

本研究の機会を与えて頂くとともに、常に激励ご指導を頂いた株式会社富士通研究所 元常任顧問 持田侑宏博士、常務取締役 津田俊隆博士、取締役 雁部洋久博士、研究所フェロー 桑原秀夫博士、ならびに、富士通株式会社フォトニクス事業本部本部長 経営執行役常務 近間輝美博士、次世代テクニカルコンピューティング開発本部本部長 木村康則博士に深く感謝いたします。

本研究の遂行に際し、システム側の協同研究者として多くの討論と試作評価に携わって頂いた株式会社富士通研究所 木下進博士、宮田英之氏、中川剛二氏、甲斐雄高氏青木泰彦博士、曾根恭介氏、瀧田裕氏、吉田節生氏に深く感謝致します。また、デバイス側の協同研究者として、筆者の達成困難な要求に快く応じて頂き、各種の光デバイスの研究開発を遂行された、同研究所 河合正昭氏、田中一弘氏、土居正治氏、宮田宏志氏、角田有紀人氏、白石崇氏、橋本直樹氏、加藤雅之氏、青木重憲氏、菅間明夫氏、佐藤桂輔氏、石井雅俊氏、森戸健博士、田中信介氏ならびに関係の皆様は深く感謝致します。

本論文の研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究である、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム「フォトニックネットワーク技術」、独立行政法人 情報通信研究機構(NICT)からの委託研究である、「フォトニックネットワークに関する光アクセス網高速広帯域通信技術の研究開発」および「高機能フォトニックノード技術の研究開発」、文部科学省からの委託研究である将来のスーパーコンピューティングのための要素技術の研究開発「ペタスケール・システムインターコネクト技術の開発」の支援のもとに行われた。これらの委託研究に共に携わり、多くの貴重なご教示を戴いた関係の皆様は深謝致します。

本論文をまとめることができたのは、光デバイス研究の路半ばで急逝された故中澤忠雄氏の功績が大きく、深く感謝するとともに、ここに謹んでご冥福をお祈りいたします。

内容梗概

本論文は、マイクロ秒からナノ秒の速度を有する高速光スイッチング技術を広帯域メトロネットワークおよび高性能スーパーコンピュータネットワークへ適用する研究成果をまとめたものであり、以下のように構成されている。

第1章は本研究の背景に関する章である。近年の情報処理量や通信容量の爆発的増大、および地球環境問題への関心の高まり等、本研究の背景と光スイッチング技術の導入への期待を説明し、各ネットワークレイヤに今後必要となる光スイッチング技術を整理する。

第2章は、光スイッチング技術の概論に関する章である。フォトニックネットワークシステムの基盤技術である光スイッチング技術のこれまでの開発動向や構成技術をまとめる。次に情報通信ネットワークの諸課題を解消し、ネットワークリソースの利用効率を高める技術として、注目されている光バーストスイッチング技術 (OBS : Optical Burst Switching)、光パケットスイッチング技術 (OPS : Optical Packet Switching) について概説し、今後の進展を整理する。また、光ファイバの伝搬時間と要求される転送効率から、研究対象であるメトロネットワーク、スーパーコンピュータネットワークに必要な光スイッチの切り換え時間と、適用可能な光デバイス技術を明確にする。

第3章は、次世代メトロコアネットワークに適用する光バーストスイッチングノードに関する章である。メトロコアネットワークは100~300km程度の距離を有しており、首都圏や関西圏などの都市間を接続するネットワークサイズである。メトロコアネットワークの領域は、従来は多重統計効果より、トラフィックは平準化されるとの予測のもとにネットワーク設計がなされていた。しかし、ユーザ側のブロードバンド環境の整備によるP2Pサービス等の増加により、メトロコア網やコア網においても、バースト的なトラフィックが増大する傾向にある。今後は、離れたデータセンタに存在するITリソースを、ネットワークを介して仮想的に一つにまとめて活用する仮想データセンタサービスなどの進展も予測されており、これに伴い、バースト状トラフィックの一層の増加が予測される。このため、従来の波長パスの制御に時間領域の粒度制御を加え、ネットワークの柔軟性を向上させることで、バースト状トラフィックに対応することが期待される。

本章では、メトロコアネットワークに要求される光バーストノードのキーデバイスである高速光マトリックススイッチについての研究成果をまとめる。メトロネットワーク用光バーストノードには、(1)マイクロ秒単位の高速切り換え、

(2)数十チャネルのポート数、(3)10dB程度の低損失、の3項目を同時に満足する光スイッチング技術が必要となる。本研究では、電気光学効果をスイッチング原理に用いることで高速性を実現し、2次元スラブ導波路内の自由空間内での光ビーム偏向で光路を切替える方式によりポート数の拡大と低損失化を実現する、導波路偏向型光スイッチを開発した。光ビームの偏向は、EO(Electro-Optic)結晶であるPLZT(Plomb Lanthanum Zirconate Titanate、ランタン添加チタン酸ジルコン酸鉛)に導波路構造を導入し、導波路上面に形成したプリズム電極に電界を印加することで実現する。PLZT光導波路はゾル・ゲル法により成膜されるが、その結晶方位を最適化することで、偏光無依存動作を実現した。2次元スラブ導波路および、光ビームのコリメートと集光を実現するレンズアレイは石英基板に一体成形されている。この石英基板には、PLZT偏向素子をはめ込む溝が形成されており、はめ込み実装により接続部分の少ない、長期安定度の高い光スイッチとして組み立てられる。8×8構成の光スイッチを試作し、1 μ sの切り換え速度、12dBの光ファイバ間挿入損失を実現した。

次に、この光スイッチを制御するサブシステム的设计試作を行った。制御サブシステムには、高速駆動回路とともに、出力パワーを制御する高速可変減衰機能、PLZT偏向素子のDCドリフトの影響や偏波依存性、波長依存性等の光スイッチ素子の特性変動を長期的に補償するキャリブレーション機能を実装した。試作した光スイッチは、波長変換器などその他のデバイスと組み合わせられ、光バーストノードの実証実験に適用された。また、8×8構成の試作結果に基づき、64×64構成の光スイッチの設計を行い、実現の目処を得た。

第4章は、次世代メトロアクセスネットワークに適用する光バースト信号に対応可能なROADM(Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer：再構成型光分岐挿入装置)ノードとそのキーデバイスである音響光学型波長可変フィルタ(AOTF：Acousto Optic Tunable Filter)に関する章である。メトロアクセスネットワークの総長は5km~50km程度であり、都市内をカバーするネットワークサイズである。このエリアでは、画像配信サーバからISP(Internet Service Provider)へのコンテンツ配信やデータセンタ間でのバックアップデータの転送など、ネットワークをバースト的に使うアプリケーションが見込まれる。このため、例えば、10Gb/sから100Gb/sの容量を持つ波長ベースのサービスを、分単位から秒単位、さらにはミリ秒単位の粒度で課金するようなシステムを構築できれば、従来に無い新しいサービスの創設が期待される。このようなサービスを実現するには、ユーザ要求に応じて瞬時に波長を切り換える光バースト信号に対応可能なROADMノードを実現する必要がある。また、新サービスを実現する最大の関門は機器の経済性にある。既に多くのサービスを提供しているアクセス系ネットワークにおいては、通信事業者から見て従来提供しているサ

サービスとの価格の整合性がとれ、かつ、ユーザサイドから見てもリーズナブルなサービス価格となる経済性が実現できなければならない。そこで、本研究では、従来、メトロアクセス系ネットワークに提供されている固定波長型 OADM ノード(波長パスは固定され、クライアントとして接続されているレイヤ 2 電気スイッチ等で経路制御を行う)の価格をベンチマークとし、これと同等の経済性で実現できる ROADM ノードの検討を行った。

一般にフォトニックネットワークにおいて、任意の対地間に波長パスを設定するには、(1)送信側の光源波長を可変させる、(2)受信側の光フィルタを可変させる、(3)送信側・受信側とも可変させる、の 3 形態がある。このうち、(1)は、メトロアクセスでの画像コンテンツ配信に不可欠な波長レベルでのブロードキャスト/マルチキャストが実現できないという課題がある。また、(3)は同一ネットワークでの波長リソースの再利用が可能であるなどの利点を持つが、構成が複雑で低コスト性が求められるメトロアクセス系には適さない。(2)の構成は波長レベルでのブロードキャスト/マルチキャストに対応可能であるが、実用的で低コスト化が可能な波長可変フィルタが実現されていないことが課題であった。本研究では、(2)の構成を実現するため、波長選択フィルタとして AOTF に着目し、その基本特性を大幅に改善し、WDM 装置で標準的な波長間隔となっている 100GHz 間隔の WDM 信号の波長選択性能を実現した。

次いで、固定波長型 OADM ノードと同等の機器コストを実現するノード構成とネットワークアーキテクチャを検討した。具体的には(1)各送信ノード毎に隣接した 4~8 波の固定送信波長をプリアサインすること、(2)これらの送信波長のライン側への合波フィルタをリングネットワークでの波長周回を防ぐリジューションフィルタと兼用する構成、(3)導波路型デバイスである AOTF の特性を活かし、4~8 素子の AOTF を集積化したモジュールの採用、により固定波長型 OADM ノードと同等の機器コストを実現する見通しを得た。

さらに、AOTF を高速に制御するために 100ns 単位で高速に可変できる Direct Digital Synthesizer 方式の RF 周波数発生器を用いた AOTF サブシステムを開発し、メトロアクセス領域での光バーストネットワークに適用可能な $12\mu s$ の高速波長選択性能を実現した。また、NMS(Network Management System)と冗長機能を実装した 3 ノード構成の実証システムを試作し、ユーザ要求によるオンデマンド波長サービスのデモンストレーションを実施した。

第 5 章は、ペタフロップス級の次世代スーパーコンピュータのネットワークに適用する超高速光パケットスイッチング技術に関する章である。ピーク性能 3 ペタフロップス、実行性能 1 ペタフロップス級のスーパーコンピュータは、ハイエンドのパーソナルコンピュータ約 500 万台分に匹敵する演算性能を持ち、これを用いた精密シミュレーション技術は、ライフサイエンスやナノテクノロジー

ジ等、広範な技術領域での応用が期待されている。このため、2011 年頃の実用化を目指してペタフロップス級のスーパーコンピュータの開発計画が日米で進められている。しかし、ペタフロップス級のスーパーコンピュータの実現には、チャレンジングな諸課題が指摘されている。一つは消費電力に対する課題である。演算プロセッサ等に 45nm あるいは 32nm の最先端プロセスを適用しても、空調設備を含めると、30MW 程度の電力が必要であると見積もられており、これは専用発電所の設置が必要となる電力量である。このため、デバイスレベルからシステムレベルに至るあらゆる構成要素で徹底的な省電力技術を開発する必要が指摘されている。

もう一つの課題は各演算プロセッサを接続するネットワークに対する課題である。例えば、実行性能 40 テラフロップスの地球シミュレータと同等のシステム構成を仮定してペタフロップス級のスーパーコンピュータを構築すると、約 1600 台のクロスバー型電気スイッチと 200 万本、総延長 60,000km もの接続ケーブルが必要となる。このような膨大な電気スイッチやケーブルは高コストであるばかりではなく、これらの機器を確実に設置し安定稼働させるには、膨大な労力と時間が必要になると考えられる。

本研究は、このような技術課題に対して、幹線系フォトニックネットワークで実用化されている波長分割多重伝送技術 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) と半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) の持つ高速スイッチング特性に着目して、WDM 化された光パケット信号を、SOA を用いた高速スイッチにより演算プロセッサ間を接続することで、スーパーコンピュータに必要なネットワーク性能を満たし、かつ、従来の電気ベースのネットワークに比較して大幅な省スペース・低消費電力性を提供することを目的としている。

第 5 章では、まず、ペタフロップス級スーパーコンピュータのネットワークに必要とされる性能を整理し、従来から提案されているスイッチアーキテクチャやデバイス技術との比較から、SOA を用いた分配選択型のスイッチアーキテクチャを構成候補として選定した。しかし、従来の構成では、100 ポート以上の大規模構成で、非選択光のクロストークの累積や光 SNR (Signal to Noise Ratio) の劣化、SOA 内部で発生する WDM 信号間の四光波混合クロストークと呼ぶ非線型光学効果が顕著となり、必要とする性能が得られないことが明らかになった。そこで、複数の SOA を用いて各 SOA を同時に制御する「多段ゲート分配選択型スイッチアーキテクチャ」を考案し、本構成により、256 ポート規模まで必要とされる性能が得られることを計算機シミュレーション及び実験で確認した。提案する多段ゲート分配選択型スイッチアーキテクチャは、多数の SOA 素子が必要となることが課題である。本構成は光スプリッタと SOA 素子が規則性をもって配置されるため、この基本構成要素 (9 つの SOA と 1 つのスプリッタ) をモノリ

シック集積した光半導体デバイスを新規に開発した。これにより、素子間の特性ばらつきが改善し、必要な素子数を大幅に減らせる見込みを得た。

光パケットスイッチのもう一つの課題として、現状では実用的な光バッファメモリが存在しないことが挙げられる。このため、光パケットスイッチ本体で発生させたクロックを全ての演算ノードに分配し、この情報に基づいて演算ノード内の電気バッファを用いて光パケットの送出タイミングを事前調整することで、光パケットスイッチには光バッファメモリを不要とする新しい同期制御方式を考案した。

以上で考案した新しいスイッチングアーキテクチャと制御方式に基づき、 2×2 構成のプロトタイプ機を設計試作した。評価の結果、5nsの高速スイッチングを実現でき、他の光学特性、ネットワーク制御特性とも、設計通りの特性が得られていることを確認し、ペタフロップス級の次世代スーパーコンピュータのネットワークに光スイッチング技術を適用できる見通しを得ることができた。

第6章では、以上の研究で得られた成果を総括し、本論文の結論を述べる。

目次

謝辞	i
内容梗概	iii
目次	ix
略語	xiii
第1章 序論	1
参考文献	8
第2章 光スイッチング技術の研究開発動向	11
2.1 緒言	11
2.2 光スイッチング技術の進展	11
2.3 光パケットサイズとスイッチング時間の関係	17
2.4 光デバイス技術	19
2.5 結言	21
参考文献	22
第3章 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチを用いた光バーストスイッチサブシステム	25
3.1 緒言	25
3.2 光バーストスイッチングノードの構成	25
3.3 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチ	27
3.3.1 光スイッチの方式選定	27
3.3.2 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチの構成	30
3.3.3 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチの試作	34
3.4 導波路偏向型光バーストサブシステムの設計試作と実験結果	39
3.4.1 光バーストサブシステムの構成	39
3.4.2 光バーストサブシステムの試作	40
3.4.3 高速光可変減衰(VOA)機能	45
3.4.4 光バーストサブシステムの評価	47
3.5 光バーストスイッチングシステムの検証実験	51
3.6 64×64光バーストサブシステムの設計	55
3.6.1 64×64 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチ	55
3.6.2 64×64 スイッチサブシステム	59
3.7 結言	60
参考文献	60

第4章 音響光学型波長可変フィルタを用いたフォトニックゲートウェイ ..	65
4.1 緒言	65
4.2 フォトニックゲートウェイ	67
4.2.1 フォトニックゲートウェイの基本構成	67
4.2.2 各種ノード構成と経済性の比較	70
4.3 音響光学型波長可変フィルタ (AOTF)	72
4.3.1 動作原理	72
4.3.2 AOTF の特性改善	73
4.3.3 AOTF サブシステム	77
4.4 フォトニックゲートウェイの設計と試作結果	80
4.4.1 プロトタイプ機の設計と試作	80
4.4.2 プロトタイプ機の特長	82
4.4.3 実証機の設計と試作結果	89
4.5 結 言	100
参考文献	100

第5章 半導体増幅器多段ゲート型光パケットスイッチネットワークの ペタスケール級スーパーコンピュータへの適用	103
5.1 緒言	103
5.2 研究の背景	103
5.3 光パケットスイッチネットワークの基本アーキテクチャ	107
5.3.1 光パケットスイッチネットワークの構成とシステム要求	107
5.3.2 光パケットスイッチネットワークの転送方式	109
5.3.3 光パケットスイッチネットワークの経路設定方式	110
5.4 光パケットスイッチの転送効率	112
5.4.1 光パケット信号転送フロー	112
5.4.2 光パケットの実効転送速度	114
5.4.3 光パケットロス率、処理遅延時間	115
5.5 光スイッチアーキテクチャ	117
5.5.1 光スイッチアーキテクチャの比較	117
5.5.2 光半導体増幅器(SOA)を用いた多段ゲート分配選択型スイッチ	120
5.6 光パケットスイッチネットワーク制御方式	126
5.6.1 光パケット変換部の全体構成	126
5.6.2 光パケット信号転送フレーム	127
5.6.3 パケット送出タイミング機構の実装	128
5.6.4 バースト送受信モジュールインタフェース	130
5.6.5 アービタ部の構成	132

5.7	光パケットスイッチネットワークを用いた場合の消費電力	135
5.8	光パケットスイッチシステムの動作実証	138
5.8.1	光パケットスイッチ実証システムの構成	138
5.8.2	光パケットスイッチ部の試作	139
5.8.3	光パケット変換部の試作	140
5.8.4	パケット送出タイミング調整機構の実装	142
5.8.5	光パケット信号転送フレーム	144
5.8.6	バースト送受信モジュールインタフェース	145
5.8.7	光パケット変換部の試作結果	146
5.8.8	光パケットスイッチ実証システムの評価結果	149
5.9	結言	154
	参考文献	154
第6章 結論		157
本論文に関する原著論文		159
A	論文誌	159
B	国際会議	159
C	その他	160

略語

ADC	Analog-to-Digital Converter	アナログ-デジタル変換回路
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	非対称デジタル加入者線
ALC	Automatic Level Control	自動レベル制御
AOTF	Acousto-Optic Tunable Filter	音響光学型波長可変フィルタ
AWG	Arrayed Waveguide Grating	アレイ導波路格子
BER	Bit Error Rate	ビット誤り率
B to B	Back to back	送受信器対向
CD	Compact Disc	コンパクトディスク
CDN	Contents Delivery Network	コンテンツ配信網
CDR	Clock Data Recovery	クロック、データ再生
CPU	Central Processing Unit	中央演算処理装置
DAC	Digital to Analog Converter	デジタル-アナログ変換回路
DC	Delivery and Coupling	分配合流
DDS	Direct Digital Synthesizer	ダイレクトデジタルシンセサイザ
DOADM	Dynamic Optical Add Drop Multiplexer	能動的な光分岐挿入装置
DSP	Digital Signal Processor	デジタルシグナルプロセッサ
DVD	Digital Versatile Disc	デジタル多目的ディスク
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	エルビウム添加光ファイバ増幅器
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory	電氣的消去型読み出し専用メモリ
EO	Electro-Optic (Effect)	電気光学(効果)
ES	Earth Simulator	地球シミュレータ
FCS	Frame Check Sequence	フレームチェックシーケンス
FET	Field Effect Transistor	電界効果型トランジスタ
FIFO	First In, First Out	先入れ先出し
FPGA	Field Programmable Gate Array	書き換え可能大規模集積回路
FTTH	Fiber To The Home	シェアードアクセスの光ファイバ加入者線
HD-DVD	High Definition-Digital Versatile Disc	高密度 DVD
HOL	Head of Line blocking	行頭ブロッキング
IDC	Internet Data Center	インターネットデータセンタ
IDT	Inter-digital Transducer	櫛形電極
IF	Interface	インタフェース
IP	Internet Protocol	インターネット・プロトコル

ISP	Internet Service Provider	インターネットサービスプロバイダ
LD	Laser Diode	半導体レーザダイオード
LVDS	Low Voltage Differential Signaling	低電圧差動信号伝送
MEMS	Micro Electro Mechanical System	微小電気機械素子
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属気相成長法
MSA	Multi-Source Agreement	ベンダ間共通仕様
NF	Noise Figure	雑音指数
NMS	Network Management System	ネットワーク運用管理システム
PBS	Polarization Beam Splitter	偏光ビームスプリッタ
POADM	Passive Optical Add Drop Multiplexer	受動的光分岐挿入装置
PON	Passive Optical Network	一本の光ファイバを分岐して複数の の加入者宅に引き込む技術
POP	Point Of Presence	通信会社との交換・接続用施設
OA	Optical Amplifier	光増幅器
OBS	Optical Burst Switching	光バーストスイッチング
OE/EO	Opto-Electric / Electro-Optic	光-電気/電気-光
OPS	Optical Packet Switching	光パケットスイッチング
OSC	Optical Supervisory Channel	光監視信号
OSW	Optical Switch	光スイッチ
O-UPSR	Optical Unidirectional Path Switched Ring	単方向パス切り替え光リング
OXC	Optical Cross-Connect	光クロスコネクタ
PD	Photo-Diode	受光ダイオード
PLZT	Plomb Lanthanum Zirconate Titanate	ランタン添加チタン酸ジルコン酸鉛
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence	疑似ランダム符号
RAM	Random Access Memory	ランダムアクセスメモリ
REG	Regenerator	再生中継機
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer	再構成型光分岐挿入装置
SAN	Storage Area Network	ストレージエリアネットワーク
SAW	Surface Acoustic Wave	表面弾性波
SBN	Strontium Barium Niobate	ニオブ酸ストロンチウムバリウム
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	半導体光増幅器
SNR	Signal to Noise Ratio	信号対雑音比
SW	Switch	スイッチ
TAW	Tell and Wait	要求からの応答を待って

TE	Transverse Electric	データを送出する制御方式 電気振動が入射面に垂直
TM	Transverse Magnetic	磁気振動が入射面に垂直
TO	Thermo-Optic (Effect)	熱光学(効果)
VOA	Variable Optical Attenuator	可変光減衰器
VOQ	Virtual Output Queuing	仮想出力キューイング
VPN	Virtual Private Network	仮想プライベートネットワーク
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重
WSS	Wavelength Selective Switch	波長選択スイッチ

第1章 序論

情報通信技術の発達により、人々の利便性は飛躍的に向上し、現在の情報システムは、産業経済と人間活動を支える社会システムの主要なインフラストラクチャとして、人々の生活の中に広く浸透している。インターネット環境の爆発的普及、ユビキタスネットワークの進展、光アクセス網の普及、動画像のアップロードと閲覧をはじめとしたコンテンツのリッチ化など、5年前には考えることも及ばなかった環境が生まれており、情報通信技術を巡る環境の変化は目を見張るものがある。図 1.1-1 に示すように、インターネットトラフィックは、年率 40%の割合で着実に伸張し続けている [1-1]。半導体レーザと光ファイバを技術基盤とした光通信技術は、電話網の拡大期である 1970 年代に登場し、その後のネットワークのデジタル化に大きな貢献を果たしてきたが、図 1.1-1 に示すインターネットのトラフィックの伸びはエルビウム添加光ファイバ増幅器を技術基盤とした、波長分割多重(WDM：Wavelength Division Multiplexing)伝送技術により支えられている [1-2]。

情報通信技術の社会に与えるインパクトは、1450 年ごろにグーテンベルグが発明した活版印刷技術に匹敵すると言われている [1-3]。活版印刷技術の発

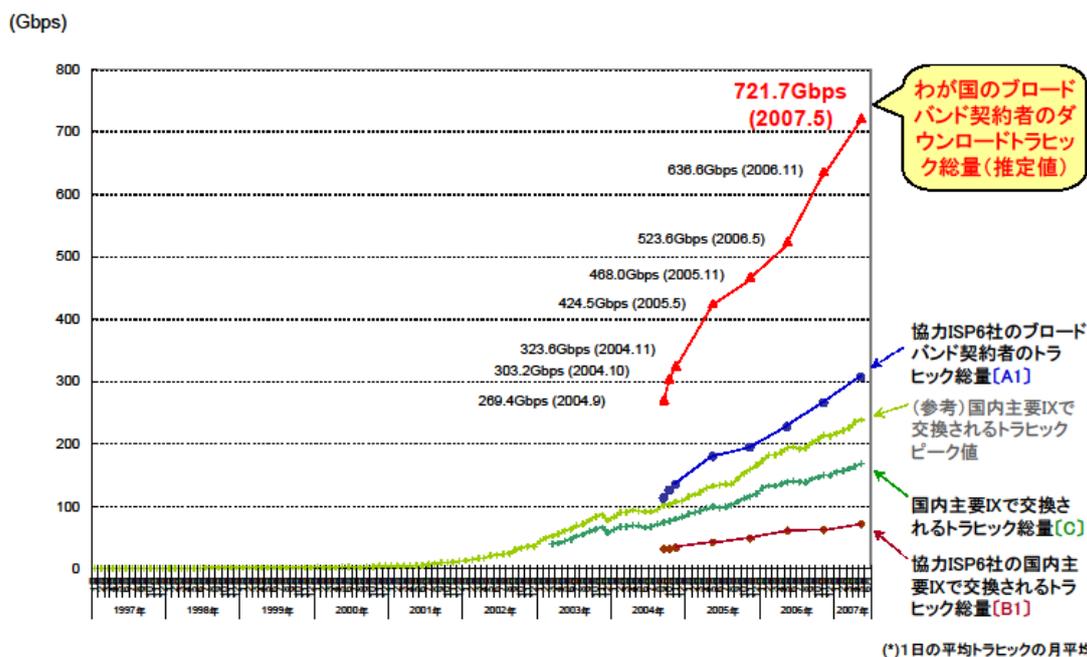


図 1.1-1 日本のインターネットトラフィックの推移

明は、ルネサンス期の情報伝搬速度を飛躍的に向上させた[1-4]。このため、科学技術の知識が体系的に文書化され、実証的知識が蓄積されることで多くのイノベーションを起こし、300年後の18世紀にイギリスにおいて産業革命をもたらした[1-5]。産業革命は蒸気機関を誕生させ、工業化社会を地球規模で発達させることで社会経済活動や人口が爆発的に増大し、現在に至っている[1-6]。

集積回路やインターネットなど、今日の情報通信の基礎となる技術が初めて開発されたのは1960年代であり、まだ、50年ほどしかたっていない。活版印刷技術の波及になぞらえるならば、現在は、ルターが訳した新約聖書が出版され、その後の宗教革命につながる、1520年ごろの段階とみなすことができる。変革の最中で生きている我々には状況の変化は混沌として見えにくいだが、後世の歴史家から見ると、情報通信技術の発展により、我々の社会や生活が真に大きく変革していくのはこれからなのであろう。

この一方で、産業革命によりもたらされた経済規模の拡大とエネルギー消費量の増大にともない、大気中に放出される温室効果ガスの増大により地球が温暖化し、自然の生態系に悪影響を及ぼすという地球環境問題が、人類が解決すべき最重要かつ至難の課題であるとされる[1-7][1-8]。

2005年には、京都議定書[1-9]が正式に議決され、代替エネルギーの開発やグリーン購入法の制定、チームマイナス6%の推進など、様々な分野で省エネルギー化への取り組みが進められている。情報通信機器に対する電力削減への要請も世界的に高まっており、省電力施策が各方面で実施されている。日本で

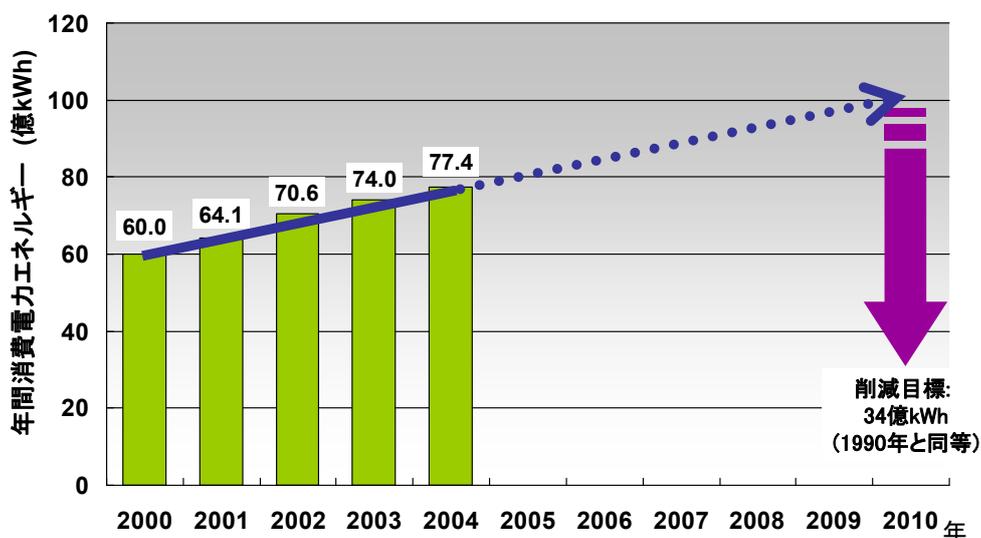


図 1.1-2 NTTにおける年間電力消費量の推移([1-11][1-12]を元に作成)

は、電力消費効率が最も良い機器（トップランナー）を削減目標とする、トップランナー基準による計算機の電力規制[1-10]が開始されており、今後、通信機器についても類似の規制が世界に先駆けて始まるものと予想される。

また、通信事業者やインターネット接続業者（ISP：Internet Service Provider）も省エネルギー化を積極的に推進しはじめている。例えば、NTTでは、図1.1-2に示すように2010年には1990年時点との比較で3倍となる年間約100億kWhの電力消費量に達すると予測しており、2010年までに電力購入量を1990年の水準である年間34億kWhに抑えることを目標としている[1-11][1-12]。

これまでのフォトニックネットワークの研究は、IPトラフィックの増大を支えることを目的とし、伝送容量とスループットや伝送距離の最大化に注力されてきた。その状況を図1.1-3に示す。1996年に筆者らにより、世界で初めてのテラビットの伝送容量が実現され[1-13][1-14][1-15]、2007年には25.6テラビットの伝送容量が実現されるに至っている[1-16]。しかしながら、今日の社会的要請を考えると、フォトニックネットワークの研究開発には、これまで培われてきた最先端のフォトニック技術に加え、省エネルギー性と新しい機能を追求していく必要がある。新しい機能とは、今後数十年の長きにわたり使い続けることができるシステムを提供するための機能であり、例えば、スケラビリティとデータ粒度などが挙げられる。また、新たな機能の実現により、

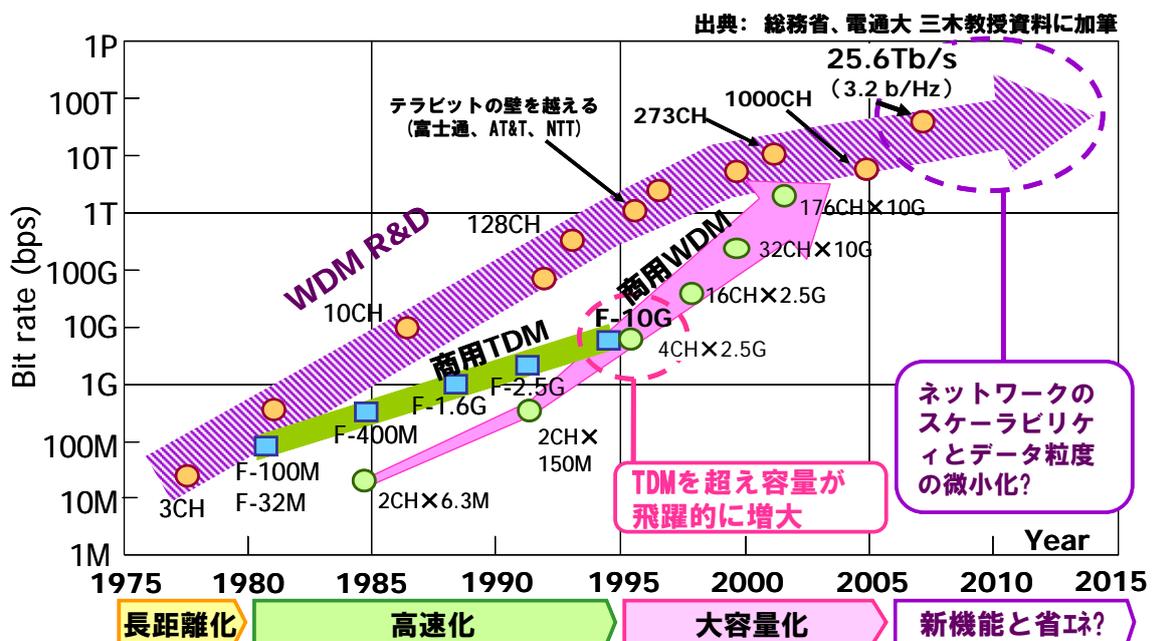


図 1.1-3 フォトニックネットワークの進展

超臨場感通信などが低廉に提供できれば、移動にともなうエネルギーロスが減るなど、社会経済活動の効率化が進み、環境負荷の間接的な低減も期待される。

このような背景に対し、筆者は、低消費電力と機能性を両立させるフォトニックネットワーク技術とその基盤技術となるスイッチング技術の研究開発を進めてきた。フォトニックネットワーク技術の開発には、システム化技術と光デバイス技術の両輪が必要であり、両者の技術的特徴を考慮した研究開発が必要である。筆者は富士通研究所において、フォトニックネットワークの様々なアプリケーションを検討し、システム化技術と光デバイス技術の橋渡しを行う立場にあった。具体的には、エンドユーザの要求から、必要されるノードアーキテクチャを検討してシステム仕様の決定を行い、さらにキーとなる光スイッチングデバイスの動作原理の選定とデバイスの仕様にブレークダウンを行うこと、また、開発された光スイッチングデバイスを取り扱いやすいサブシステムの形態にまとめ、それをシステムに組み込んで評価を行い、エンドユーザの評価をフィードバックする、というサイクルで研究を進めてきた。 幸いなこ

- システム性能を決定するキー光スイッチングデバイス開発にこだわる
⇒1つのキー光デバイスがシステム全体の性能を決定するため
- システム評価までの各段階でクオリティを追求し、同時に全体最適化も図る



図 1.1-4 光スイッチング技術の研究開発の階層構造

とに、富士通研究所には、様々な材料の研究者、光デバイス研究者が所属しており、各々のシステム要求に対して最適な光スイッチングデバイスの開発を依頼できる環境あり、図 1.1-4 に示すように、材料から、システムまで全体最適化した開発を行うことができた。

本研究では、フォトニックネットワークが持つべき、省エネルギー性と新しい機能を提案するアプリケーションとして、メトロネットワークとスーパーコンピュータのネットワークに着目した。いずれのネットワークとも、より細かいデータ粒度を取り扱う光バースト（OBS：Optical Burst Switching）あるいは光パケットスイッチング（OPS：Optical Packet Switching）と呼ばれる、マイクロ秒以下の時間粒度で光信号のスイッチングを行うシステムである。これらの方式は、原理的に帯域利用効率が向上可能であるため、古くから研究されてきた[1-17]、[1-18]、[1-19]。しかし、実際にはマイクロ秒からナノ秒単位で動作する実用的な光スイッチがないこと、また、信号衝突回避手段として必要となる光メモリが在在しないため、小規模な実験や理論的な研究を中心に進められてきた。本論文では、このような状況を打破するため、メトロネットワークとスーパーコンピュータのネットワークという具体的なアプリケーション

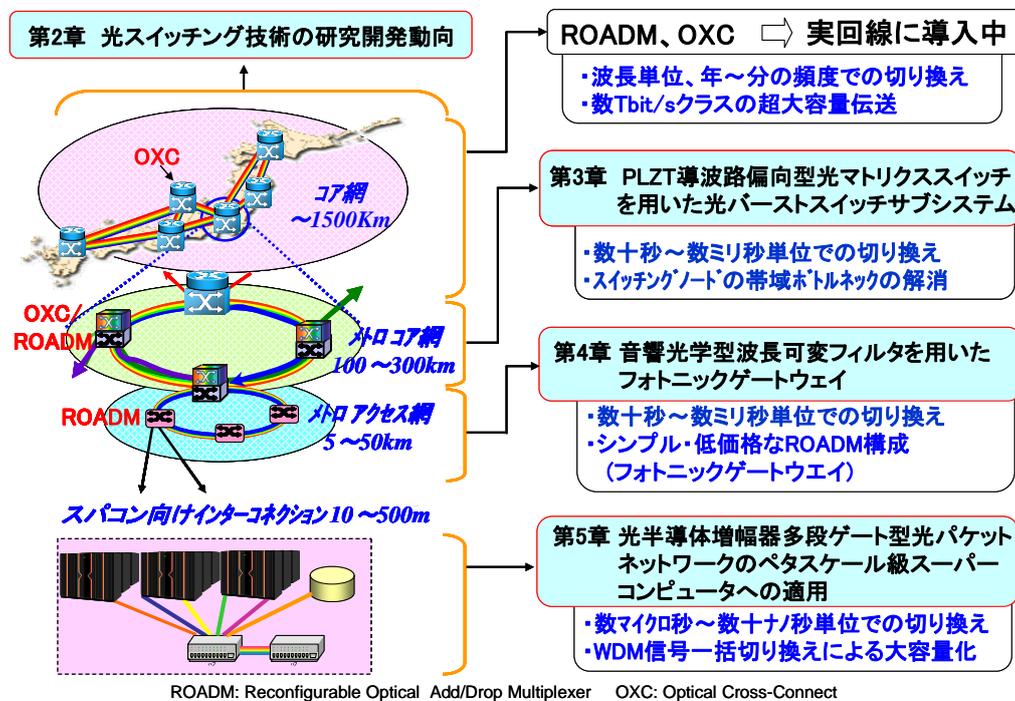


図 1.1-5 光スイッチング技術の適用分野と本論文の章立て

ョンを設定し、それらのネットワークに最適化されたフォトニックスイッチングノードのアーキテクチャと実用レベルの光スイッチング技術を開発し、システム実証実験を通じてその有効性を確認した成果についてまとめる。図 1.1-5 にフォトニックネットワークの構成と光スイッチング適用分野を本論文の章立てとともに示す。フォトニックネットワークは、全国をカバーするコア網、都市間を接続するメトロコア網、都市内を接続するメトロアクセス網の3つの階層から構成されている。コア網は1500km程度のネットワークサイズを有している。このネットワークに流入するトラフィックはコアルータにより、データの行き先毎に集約が行われるが、トラフィック量が多いため、多重統計効果が有効に機能し、波長パス単位の管理でも十分効率的な運用が可能である。このため、2章で説明するように、現在、波長パス単位の切り替え機能を持つROADM(Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer：再構成対応型光分岐挿入装置)、OXC(Optical Cross-Connect：光クロスコネクト)装置の導入が開始されている。

メトロコア網は、100～300km、メトロアクセス網は、5～50km程度が典型的なネットワークサイズであるが、導入地域や利用形態により、ネットワークサイズの相互のオーバーラップを生じる場合もある。これらのネットワークでは、IDC(Internet Data Center)間のデータ転送などバースト的なデータを取り扱う頻度が高く、現在は、電気のスイッチ(レイヤ2)やルータ(レイヤ3)がトラフィックの制御を行っており、フォトニックネットワーク(レイヤ1)はこれらの上位レイヤのデータを転送するパイプラインの役割を担っている。バースト的なトラフィックの転送制御がフォトニックネットワークで直接行われるようになれば、電気スイッチやルータを排除もしくはより小型の装置の配備で対応でき、ネットワークの簡素化や省電力化が可能となる。そこで、本研究では、メトロネットワークの領域に光バーストスイッチング技術を導入することを目的として、フォトニックノードアーキテクチャと必要な光デバイスを研究し、3章と4章にその成果をまとめた。

本研究では、光スイッチング技術のもう一つの適用分野として、スーパーコンピュータネットワークに着目した。具体的には、2003年から2005年に世界最速を誇っていた地球シミュレータの後継機として、理化学研究所が中心となって検討を進めている、地球シミュレータの約100倍の性能を持つペタフロップス級の高性能スーパーコンピュータ[1-20]の計算機ノード間を接続するネットワークを研究対象として想定した。現在のスーパーコンピュータは数百台から数千台規模の計算機をネットワークで接続しており、ネットワークの帯域、レイテンシー、利用効率などの通信性能がスーパーコンピュータ全体の性能を決定する要素となっている。このような高性能スーパーコンピュータ用ネットワークに、波長分割多重伝送技術と半導体光増幅器(SOA：Semiconductor

Optical Amplifier)を用いた超高速スイッチング技術を組み合わせることで、必要な性能を達成するとともに、スイッチノードや接続ケーブルなどのハードウェア量を大幅に削減し、かつ、消費電力を低減させることを研究目的としている。以下に本論文の構成を示す。

まず、2章では、フォトニックネットワークシステムの基盤技術である光スイッチング技術のこれまでの開発動向や構成技術をまとめる。次に、フォトニックネットワークの制御に時間的粒度の概念を採り入れ、波長資源の利用効率を高める技術として注目されている光バーストスイッチング技術、時間的にさらに粒度の細かいスイッチングを行い、多重統計効果を生み出す光パケットスイッチング技術について概説し、今後の進展を整理する。また、光ファイバの伝搬時間と要求される転送効率から、研究対象であるメトロネットワーク、スーパーコンピュータネットワークに必要な光スイッチの切り換え時間と、適用可能な光デバイス技術を明確にする。

3章では、メトロコアネットワークに適用する光バーストスイッチングデバイスに必要な $1\mu\text{s}$ 程度の高速スイッチング特性、10dB程度以下の低挿入損失、64チャンネル規模までのポート数拡張性、の3つの要件を同時に満足するスイッチングデバイスとして、PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチを提案し、その構成とサブシステムの研究開発、システム実証実験の結果について述べる。

4章は、次世代メトロアクセスネットワークに適用する光バースト信号に対応可能なDOADM(Dynamic Optical Add/Drop Multiplexer)として、音響光学型波長可変フィルタ(AOTF: Acousto Optic Tunable Filter)を用いた「フォトニックゲートウェイ」を提案し、この開発成果について述べる。200km以上のリング長と最大10ノードを収容可能なフォトニックゲートウェイの実証機を試作し、良好な伝送特性とプロテクション機能の動作を確認した。

5章は、複数の計算ノードが実装されている計算ラック間における通信を行う際に、異なる信号が変調されている複数の光波長を光の領域で多重・分離する波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)技術によるテラビット/秒級の超広帯域ネットワークと、各計算機ノードでWDM光パケット信号を生成し、スイッチ部分において、WDM信号をOE/E0変換することなく光信号のままの一括切替が可能で、かつ、100~256ポート程度のポート数を有する光パケットスイッチング技術について述べる。

6章は、本論文の結論であり、本研究で得られた成果の総括を行う。

参考文献

- [1-1] 総務省総合通信基盤局編, "我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握", 2007年8月
- [1-2] 中川 清司, 相田一夫, 中沢正隆, 萩本和男, "光増幅器とその応用", オーム社, 1992年
- [1-3] 公文俊平, "情報通信革命と21世紀情報文明の成立"
http://www.glocom.ac.jp/proj/kumon/paper/1997/97_05_30.html
- [1-4] E. L. アイゼンステイン著, 別宮貞徳訳, "印刷革命", みすず書房, 1988年
- [1-5] 山本義隆, "十六世紀文化革命 1, 2", みすず書房, 2007年
- [1-6] Gregory Clark, "Farewell to Alms: A Brief Economic History of the World", Princeton University Press, (Feb. 2007).
- [1-7] アル・ゴア著, 枝廣順子訳, "不都合な事実", ランダムハウス講談社, 2007年
- [1-8] ノーベル平和賞公式 Web:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/peace/laureates/2007 参照
- [1-9] 環境省 Web:
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html> 参照
- [1-10] 財団法人省エネルギーセンタ Web:
http://www.eccj.or.jp/top_runner/index_contents_j.html 参照
- [1-11] NTT 西日本 Web :
<http://www.ntt-west.co.jp/corporate/2010-e/> 参照
- [1-12] NTT グループ CSR 報告書 2005 p.30
- [1-13] H. Onaka, H. Miyata, G. Ishikawa, K. Otsuka, H. Ooi, Y. Kai, S. Kinoshita, M. Seino, H. Nishimoto, and T. Chikama, "1.1 Tb/sWDM transmission over a 150 km 1.3 μ m zero-dispersion single-mode fiber," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC1996)*, San Jose, PD19 (Feb. 1996).
- [1-14] A. H. Gnauck, A. R. Chraplyvy, R. W. Tkach, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, Y. Sun, R. M. Jopson, F. Forghieri, R. M. Derosier, C. Wolf, and A. R. McCormick, "One terabit/s transmission experiment," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC1996)*, San Jose, PD20 (Feb. 1996).
- [1-15] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M. Saruwatari, H. Takahashi, M. Yamada, T. Kanamori, and H. Ono, "100 Gbit/s 10 channel OTDM/WDM

transmission using a single supercontinuum WDM source,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC1996)*, San Jose, PD21 (Feb. 1996).

- [1-16] Cabriel Charlet, Jeremie Renaudier, Haik Madoyan, Oriol Bertran Pardo, and Sebastien Bigo, "12.8Tb/s Transmission of 160 PDM-QPSK (160 x 2 x 40 Gbit/s) Channels with Coherent Detection over 2,550km,” in *Proc. 33rd European Conference on Optical Communication (ECOC2007)*, Berlin, Germany, PD1.6 (Sept. 2007).
- [1-17] C. Qiao, Y. Chen, and J. Staley, "The potentials of optical burst switching (OBS),” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2003)*, Atlanta, TuJ5 (Feb. 2003).
- [1-18] D J Blumenthal, and M Masanovic, "LASOR (Label Switched Optical Router): Architecture and Underlying Integration Technologies,” in *Proc. 31rd European Conference on Optical Communication (ECOC2005)*, Glasgow, U.K., paper2.1.1 (Sept. 2005).
- [1-19] A.. H. Ganuck, G. Charlet, P. Tran, P. J. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Buroows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma, "25.6-Tb/sC+L-B and Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals,” in *Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC2007)*, Anaheim, CA., PDP19 (March 2007).
- [1-20] 理化学研究所 次世代スーパーコンピュータ 開発実施本部
Web: http://www.nsc.riken.jp/index_j.html 参照

第2章 光スイッチング技術の研究開発動向

2.1 緒言

本章では、フォトニックネットワークシステムの基盤技術である光スイッチング技術のこれまでの開発動向や構成技術をまとめる。次に、情報通信ネットワークの諸課題を解消し、ネットワークリソースの利用効率を高める技術として注目されている、光バーストスイッチング技術（OBS：Optical Burst Switching）、光パケットスイッチング技術（OPS：Optical Packet Switching）について概説し、今後の進展を整理する。また、光ファイバの伝搬時間と要求される転送効率から、研究対象であるメトロネットワーク、スーパーコンピュータネットワークに必要な光スイッチの切り換え時間と、適用可能な光デバイス技術を明確にする。

2.2 光スイッチング技術の進展

ネットワークサービスの多様化が進展し、膨大なトラフィックの収容が必要

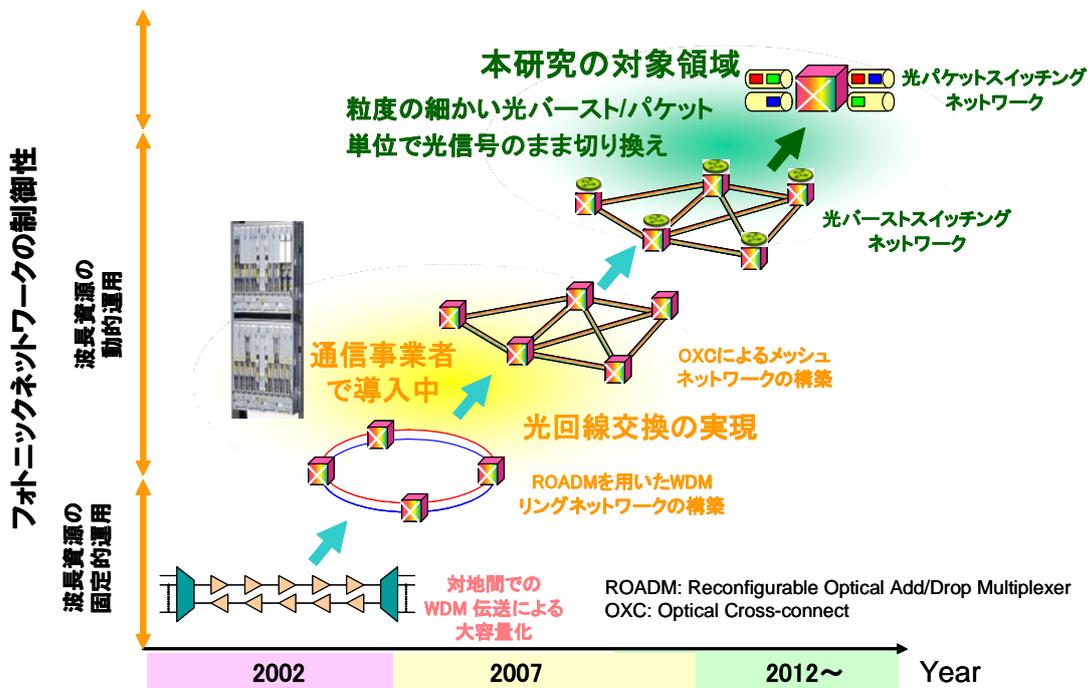


図 2.2-1 フォトニックネットワーク技術の進展（文献[2-6]を基に作成）

となる将来のネットワークにおいては、ノードの処理性能が重大なボトルネックとなる可能性が指摘されており[2-1]、近年、研究開発が進展している各種光スイッチング技術を用いて、電子回路スイッチの代わりに各種ノード処理を行わせることにより、電子回路スイッチでは得られない高速大容量のネットワークが実現できないかという試みが国内外の研究機関で進められている[2-2]、[2-3]、[2-4]、[2-5]。図 2.2-1 に、これらの状況を踏まえたフォトニックネットワーク技術の進展を示す。フォトニックネットワーク技術は、第1段階である、対地間(Point to Point)の WDM ネットワークの導入、第二段階である、波長パス(波長回線)を活用するネットワークの導入、第三段階として、波長パスの時間的な粒度を小さくし、動的な波長パスの割り当てを行うネットワークの導入、という3段階で区分される。

第一段階では、図 2.2-2 に示すように、一本の光ファイバに波長分割多重さ

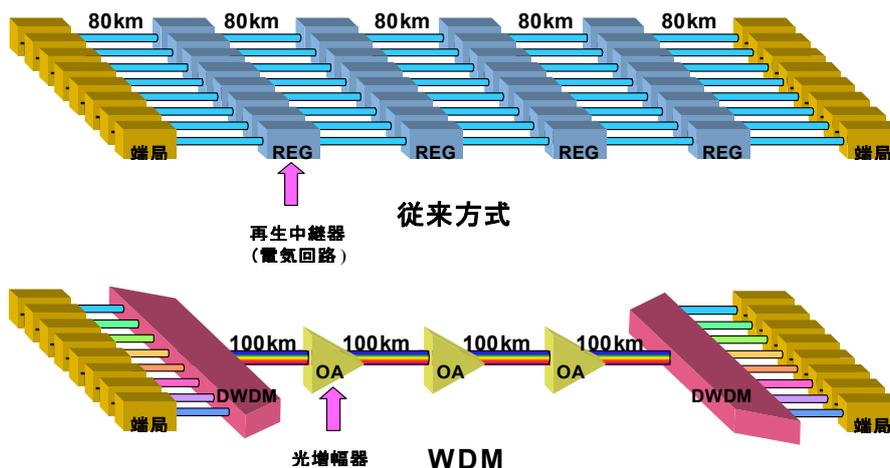


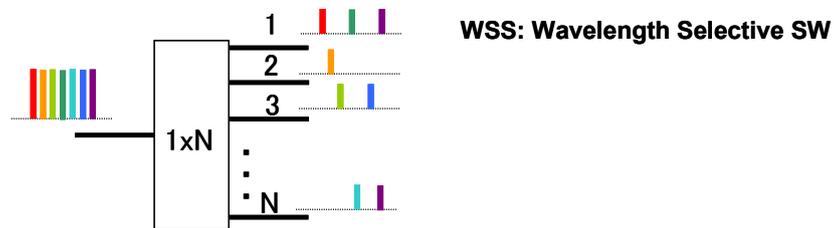
図 2.2-2 WDM 伝送技術による大容量化と経済化

れた信号を一括して一台の光ファイバ増幅器により中継伝送する技術が導入された。複数の波長で光ファイバと光ファイバ増幅器を共有することで、伝送容量の拡大と装置の簡便化、伝送コストの低減が実現できるところに大きな特徴がある。ただし、波長資源を固定的に使用するものであり、新たな波長を増設する場合は、人手により機器を設置する必要があった。

2005 年ごろからは、第二段階である、波長パスを活用するネットワークの構築

が進められている。通信事業者は、ROADM(Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer)と呼ばれるネットワーク機器がメトロ網を中心に導入されている。ROADMを用いると、遠隔操作により、波長パスを自在に切り替えることができるため、ネットワークの運用コストを低減することが可能となる。また、最新のROADMはWSS(Wavelength Selective Switch)と呼ばれる光スイッチング技術が用いられており、複数のWSSを組み合わせることで、OXC(Optical Cross

〔機能〕入力波長多重信号から任意の波長を選択して、任意の出力ポートに出すことができるスイッチ



〔構成〕 WDM信号を分光し、MEMSミラーで波長毎に出力を選択

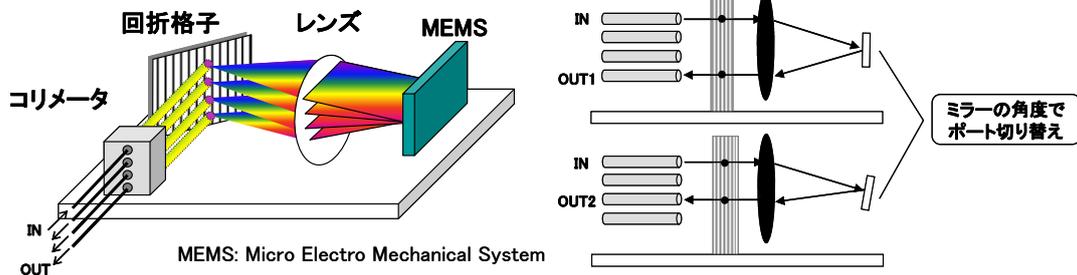


図 2. 2-3 波長選択スイッチ(WSS)の構成

Conext)の機能を持たせることができ、リングネットワーク構成から、メッシュネットワーク構成にサービスを中断することなく拡張することが可能である。図 2. 2-3 に WSS の構造、図 2. 2-4 に WSS を用いた ROADM の OXC への拡張方法を示す。

ユビキタスネットワークなどの新たなネットワーク環境では、膨大な数の端末やセンサを運用管理する必要が生じる。アクセスポイントやネットワークノードの数も膨大になり、ネットワーク内では、通信を行うために必要な波長パ

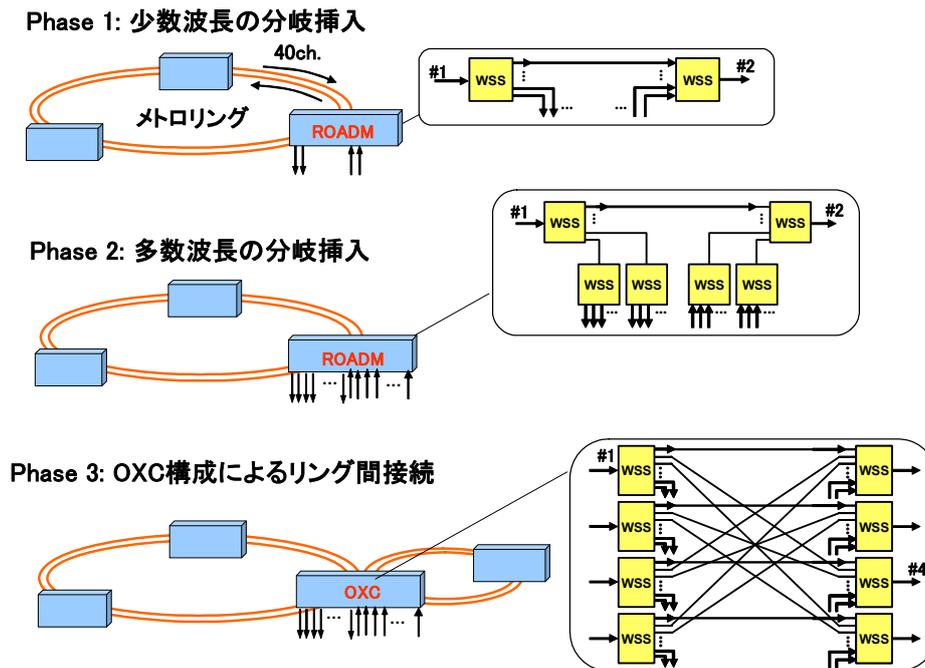


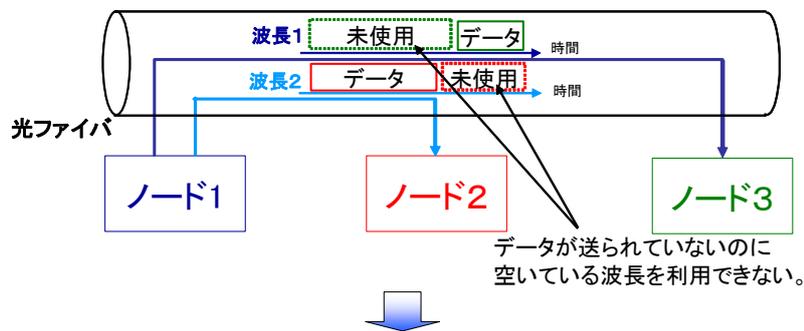
図 2.2-4 WSS を用いた ROADMs の OXC への拡張

ス数が大幅に増加することが予想される。しかし、一本の光ファイバで効率的に使用できる波長数はそれほど多くはない。現在使用されている波長帯は、Cバンドと呼ばれる波長 1530~1560nm の帯域と、Lバンドと呼ぶ 1570~1600nm の帯域であり、それぞれ 80 波の波長を配置するのが一般的である。これはエルビウム添加光ファイバ増幅器の利得帯域に由来している。ラマン効果を用いた光増幅器を用いると、この帯域制限を取り除くことはできるが、数百 km 程度のネットワークサイズを想定すると、信号伝達に必要な光 SNR(Signal to Noise Ratio)と光ファイバ中の非線形光学効果に起因する伝送特性の劣化、さらには、光ファイバや光コネクタのパワー耐力限界などの物理的制約から、一本の光ファイバ中で多重化できる波長数を大幅に増加させることは困難と考えられる。この状況に対応するには、空間多重度の向上(光ファイバの追加敷設)、周波数利用効率を高めた変復調方式開発や高性能誤り訂正技術などの伝送技術の開発とともに、必要なタイミングで動的に波長パスの割り当てを行い、波長資源を効率的に用いるフォトニックネットワークの運用面の革新も必要となる。フォトニックネットワークの進展の第三段階では、波長領域と時間領域の両面で光信号の動的な制御を行うことで、データを効率良く転送する技術を導入する。動的な波長パス割り当ての動作原理を図 2.2-5 に示す。光信号を動的に割り当てる手法は二つ提案されている。一つは光バーストスイッチング

(OBS : Optical Burst Switching)であり、もう一つは光パケットスイッチング(OPS : Optical Packet Switching)と呼ばれる。これらの構成を光スイッチングノードの構成とともに図 2.2-6 に示す。

光波長パス(回線)ネットワークは、波長パスの設定要求が出されると、ネットワークのオペレーションシステムを介して光スイッチが制御される。波長パス

光パス(回線)ネットワーク



光バースト(OBS)/光パケット(OPS)ネットワーク

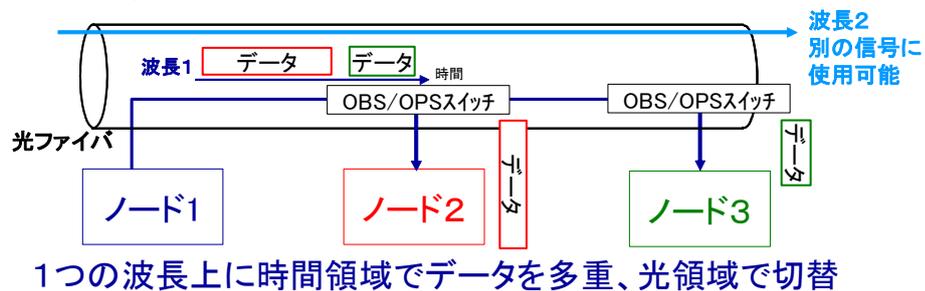


図 2.2-5 光信号のバースト/パケット化による動的な波長割り当て制御

の設定は時間から年単位で行われる。

光バーストスイッチネットワークは、同一ノードに向かう IP パケット信号をまとめて、光のかたまり（光バースト）を生成してフォトニックネットワーク内を転送し、光ノードでは、光バースト信号ごとにスイッチングを行う。制御信号は主信号への重畳、または別線を用いて伝送し、主信号よりも先に光ノードに到着させる。光ノード内の制御部では、解析した結果をもとにあらかじめスイッチングの設定を行い、主信号の到着に備える。このため、光ノード内

に光メモリを必要としないことが特徴である。同一タイミングで別の入力から到着した同じ波長の光バースト信号が、同じ出力光ファイバに接続する要求がある場合には、波長変換器を用いて片方の波長を変える、あるいは、片方の信

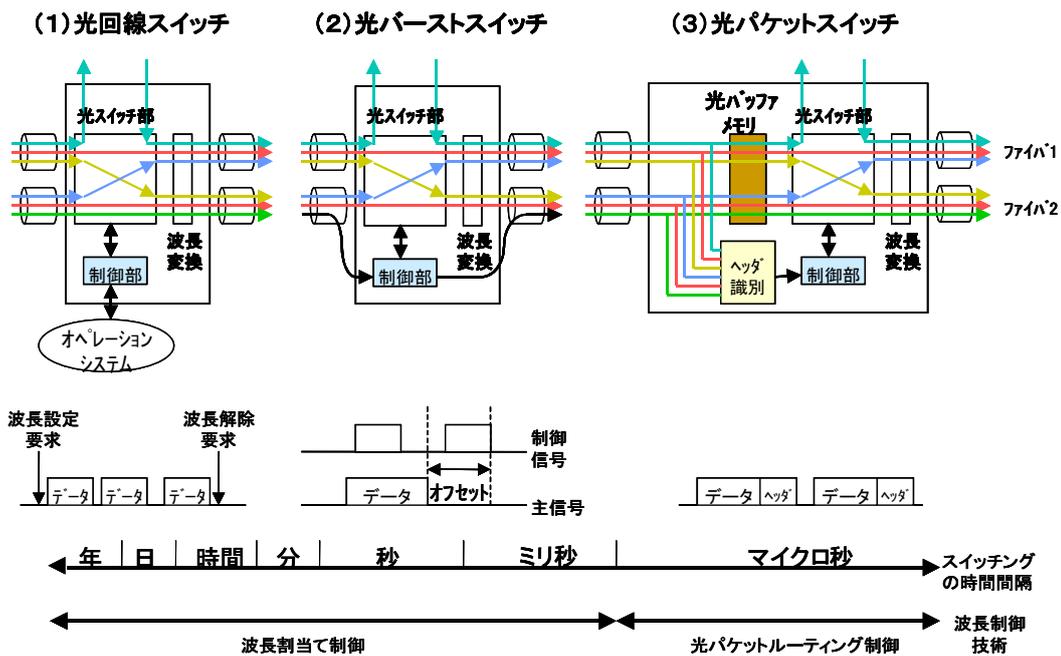


図 2.2-6 各種光スイッチングノードの構成

号を一旦別のノードに転送し、タイミングをずらして伝送する、などの光バースト信号間の衝突回避制御が行われる。波長の割り当てと解除の間隔はミリ秒～秒程度の時間間隔で行われ、光スイッチの切り替え時間としてはマイクロ秒レベルの速度が要求される。

光パケットスイッチネットワークは、IP パケット信号を光のパケット信号に変換してフォトニックネットワーク内を転送し、光パケットスイッチによって光パケット単位のルーティングを行うものである。光パケット信号ではヘッダに宛先に応じたアドレスが付与されており、このアドレス情報に基づいて光パケットスイッチを制御する。すなわち、通信に先立って接続の確立を必要としない、コネクションレス型の転送方式を用いる。各光パケットスイ

スイッチノードは連携してアドレス情報に基づいたルーティングテーブルを自律的に作成／更新する。光ノード内には、光バッファメモリがあり、ヘッダ処理の間の光信号の一時的な記憶と衝突回避制御に用いられる。10Gb/s～100Gb/sの伝送速度を前提とすると、次節で説明するように、光パケット信号のパケット長は、ミリ秒からマイクロ秒になるため、光スイッチの切替時間としてはナノ秒レベルの速度が要求される。

光パケットスイッチネットワークは、従来、電気ルータ内で行われていたパケット交換を、光/電気変換を行わず、光信号のまま処理することで、電気ルータの処理能力の限界を打破し、同時に省電力化を達成することが目的である。しかし、大容量光バッファメモリの開発や超高速大規模スイッチの実現など、技術的な難易度は最も高い。

2.3 光パケットサイズとスイッチング時間の関係

光バースト/パケットネットワークに適用する光スイッチの切り替え速度は、想定するアプリケーションやネットワークサイズに大きく依存するが、これを図 2.2-7 を用いて明らかにする。スイッチ切り替え要求速度は、転送効率、伝送速度、伝送距離、最小パケット長の相互関係とコネクショ手法で与えられる。図 2.2-7 の横軸はスイッチ切り替え時間であり、同時に伝送距離から見積もられる伝搬遅延時間を示している。高信頼な通信ネットワークでは、データ転送前にコネクションを確立することが多いことを想定し、伝搬遅延時間は、伝送距離を 2 倍(制御信号の往復)したことを想定している。例えば、光ファイバ中の伝搬遅延は $5 \mu\text{s}/\text{km}$ であるので、1km の伝送距離を $10 \mu\text{s}$ の伝搬遅延時間上にプロットしている。縦軸は、最小パケット長であり、同時に 10Gb/s で伝送した際にそのパケット長で伝送できる代表的な媒体の容量を示している。 η は転送効率であり、ネットワークを効率的に使うためにできるだけ高く設定される。 η と最小パケット長を決めると、要求されるスイッチング時間が決定される。例えば、 η を 0.99 に設定し、高精細画像の転送を想定して最小パケット長を 1ms とした場合に必要なスイッチング時間は $10 \mu\text{s}$ となる。また、イーサフレームの転送を想定し、最小パケット長を $1 \mu\text{s}$ とした場合は、10ns のスイッチング時間が必要となる。これらの数値は、2.2 節で説明した光パケットスイッチネットワークなど、コネクションレス型の通信方式での光スイッチ切り替え要求時間である。

通信を開始するのに先立ってコネクションを確立する場合は、光ファイバの伝搬遅延時間を考慮する必要がある。例えば、伝送距離が 100km のメトロコア網(都市間網)を考えると、伝搬遅延時間は 1ms となる。すなわち、コネクションを確立するのに 1ms の時間を要するので、転送効率を高くしようとすると、最小パケットサイズを大きく設定する必要がある。この場合には、 η を 0.99 に設定すると、最小光パケット長は、約 1 秒となる。また、要求されるスイッチ切り替え速度は、伝搬遅延時間よりも十分短い時間、例えば、1桁早い速度を必要とする。

以上の考察から、本研究で検討するメトロネットワーク向け光バーストスイッチネットワーク、およびスーパーコンピュータ向け光パケットスイッチネットワークに要求されるスイッチ切り替え速度を検討する。これらのネットワークは、高い信頼性と品質を維持するため、コネクション型のシステムを想定する。このため、10km から 200km 程度の伝送距離となるメトロネットワーク向け光バーストスイッチネットワークの伝搬遅延時間は 5ms から 500 μ s であり、これに適用する光スイッチ切り替え速度は、500 μ s から 50 μ s 程度が必要となる。また、10m~数百 m の伝送距離が想定されるスーパーコンピュータ向け光

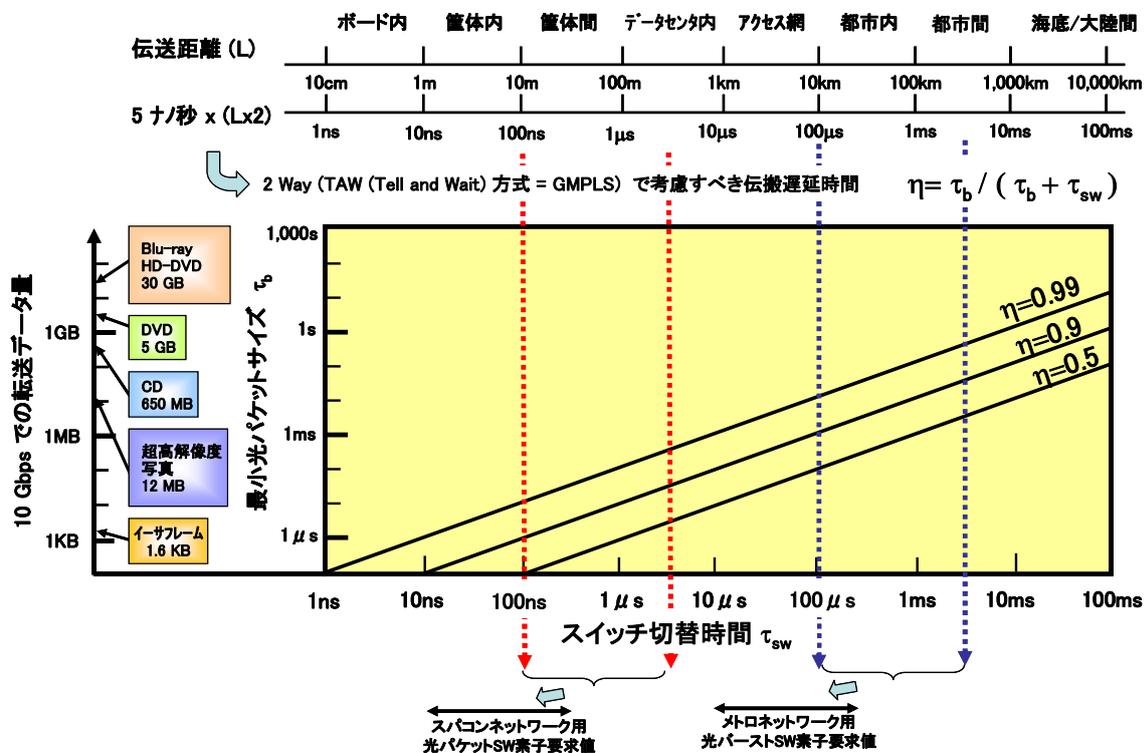


図 2.2-7 光パケットサイズとスイッチ切り替え時間(文献[2-7]を基に作成)

パケットスイッチネットワークでは、必要な伝搬遅延時間は、100ns から $5\mu\text{s}$ であり、これに適用する光スイッチ単体の切り替え速度の要求値は、10ns から 500ns と見積もることができる。

2.4 光デバイス技術

図 2.2-8 に、伝搬方式、切替え原理、部品材料の視点から整理した光スイッチの構成原理を示す。光スイッチには、空間を使って接続を切り替える空間接続型と導波路を用いて切り替える導波路接続型がある。空間接続型は、光ファイバ、プリズム、ミラーを移動させる機械式により主に実現されており、波長依存性、ビットレート依存性が低く、損失、クロストークが小さいという特徴がある。導波路接続型は、導波路に Y 分岐構造、干渉構造、クロスポイント構造等のスイッチエレメントが形成されている。石英、ポリマ、ニオブ酸リチウム、増幅機能のある光半導体等が材料として研究開発されている。導波路接続型は可動部分がないものの、波長依存性や偏波依存性の影響が出やすく、損失・クロストークが大きくなる傾向がある。図 2.2-9 に、現在提案されている代表的な光スイッチのスイッチ速度とポート数を整理した。一般的に、切り替え速度とポート数にはトレードオフが存在する。例えば、MEMS 型などは切り替え速度がミリ秒程度と遅いが、1000 ポートに迫るポート数が報告されている。逆に、非線形光学効果を用いた光スイッチはピコ秒以下のスイッチ速度を実現できるが、現状はポート数は 1~2 程度であり、入力光信号を ON/OFF できるゲートスイッチの機能の実現にとどまっている。また、光スイッチの駆動電力と動作速度もトレードオフの関係があり、高速スイッチを実現するには、大きな電力を必要とする。

本研究では、2.3 節で考察した結果に基づき、メトロネットワークには、 $10\mu\text{s}$ の切り替え速度が実現できる音響光学効果を用いた AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter)、および、電気光学効果を用いた導波路偏向型光スイッチ、また、スーパーコンピュータ用光パケットスイッチネットワークには、10ns 程度のスイッチ速度が実現可能な光半導体増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) の適用を検討する。それぞれのスイッチ技術の選択理由については、各章であらためて詳細に検討する。

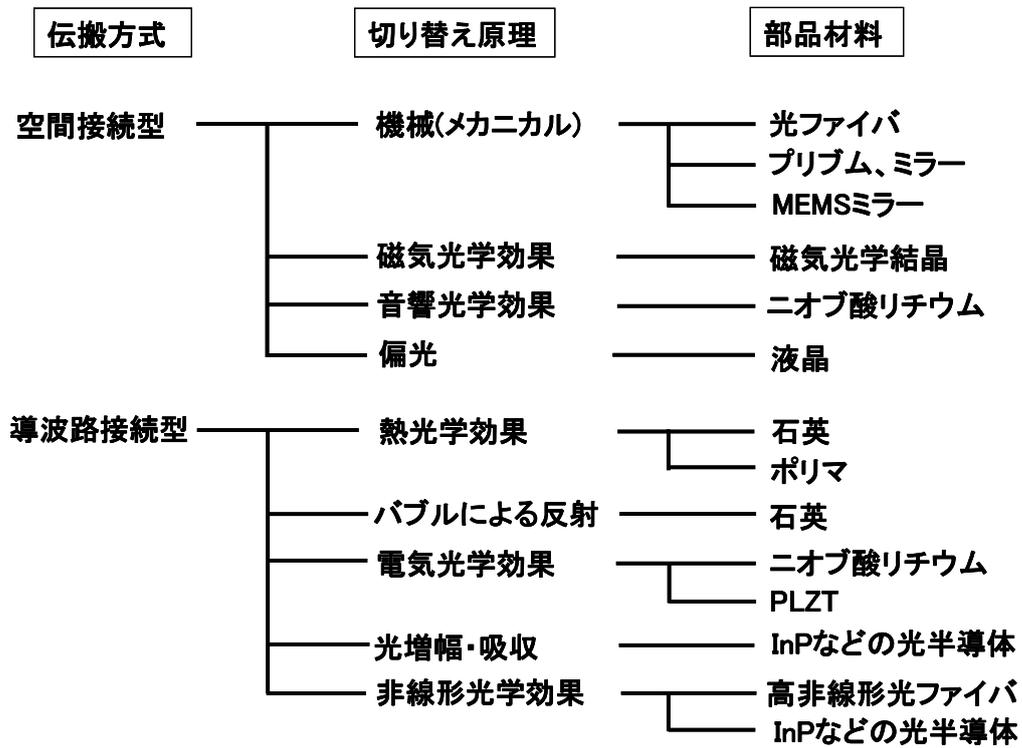


図 2.2-8 光スイッチの構成原理

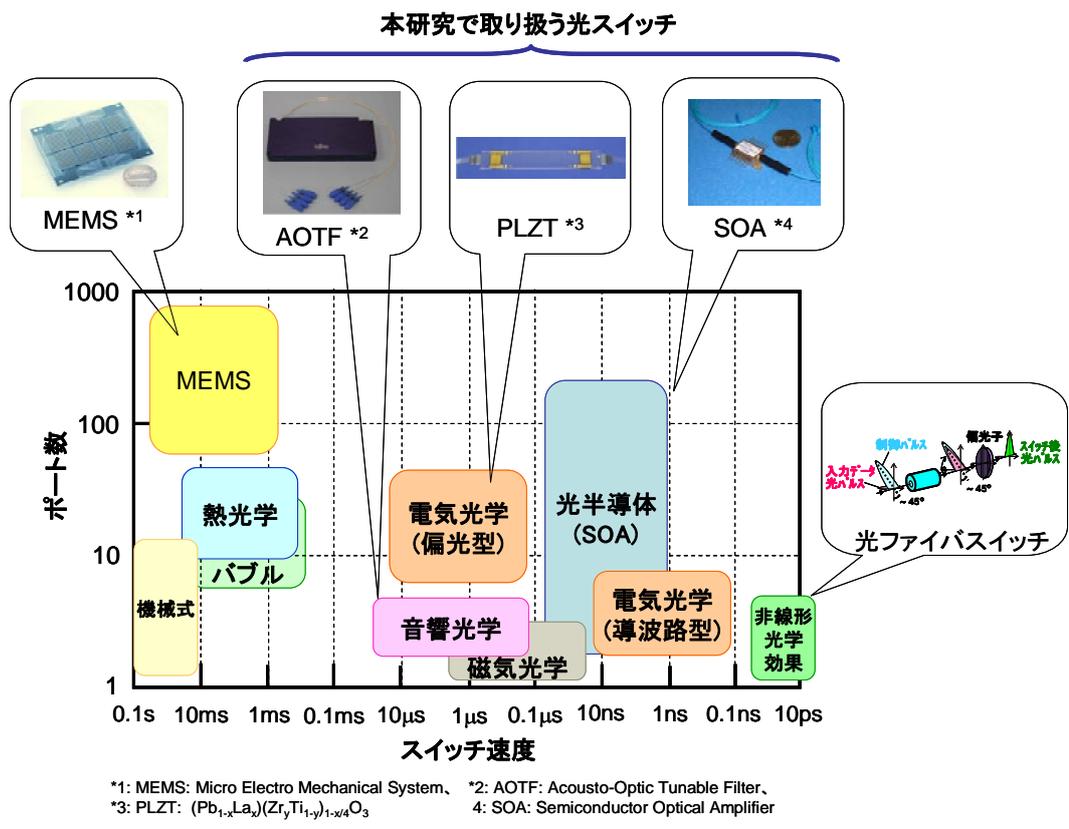


図 2.2-9 光スイッチのスイッチ速度とポート数

2.5 結言

本章では、フォトニックネットワークシステムの基盤技術である光スイッチング技術のこれまでの開発動向や構成技術をまとめ、研究対象としているメトロネットワーク、スーパーコンピュータ用ネットワークに適したスイッチ技術を整理し、以下の知見を得た。

- (1) フォトニックネットワーク技術の進展を整理し、今後のトラフィックの増大に対応するためには、有限な波長資源を有効に使うため、動的な波長パスの割り当てを行う光バーストスイッチ技術、さらに時間的粒度の小さな光パケットスイッチ技術が必要であることを示した。
- (2) ネットワーク内の転送効率と光パケットサイズ、および伝搬遅延時間から光スイッチの切り替え要求速度を考察し、研究対象である、メトロネットワーク用光バーストスイッチには $500 \sim 50 \mu\text{s}$ 、スーパーコンピュータネ

ットワーク用光パケットスイッチでは、500～10ns のスイッチ切り替え速度が必要であることを明確にした。

- (3) 各種の光スイッチ技術を整理し、ポート数とスイッチ切り替え速度の関係を明確にした。(2)で得た結果に基づき、メトロネットワークには、音響光学効果を用いた AOTF と電気光学効果を用いた導波路偏向型光スイッチを、また、スーパーコンピュータ用光パケットスイッチネットワークには、光半導体増幅器(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)の適用を検討する。

参考文献

- [2-1] Ken-ichi Kitayama, Tetsuya Miki, Toshio Morioka, Hideaki Tsushima, Masafumi Koga, Kazuyuki Mori, Soichiro Araki, Ken-ichi Sato, Hiroshi Onaka, Shu Namiki, and Tomonori Aoyama, "Photonic Network R&D Activities in Japan—Current Activities and Future Perspectives," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.23, No.10, pp.3404 – 3418 (Oct. 2005).
- [2-2] N. Kataoka, N. Wada, K. Sone, Y. Aoki, H. Miyata, H. Onaka, and K. Kitayama; "Field Trial of Data-Granularity-Flexible Reconfigurable OADM with Wavelength-Packet-Selective Switch," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.24, No.1, pp.88 - 94 (Jan. 2006).
- [2-3] S. J. Ben Yoo, "Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.24, No.12, pp.4468 – 4492 (Dec. 2006).
- [2-4] N. Wada, H. Harai, and F. Kubota, "Optical packet switching network based on ultra-fast optical code label processing," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E87C, No.17, pp.1090–1096 (July 2004).
- [2-5] D J Blumenthal, and M Masanovic, "LASOR (Label Switched Optical Router): Architecture and Underlying Integration Technologies," in *Proc. 31rd European Conference on Optical Communication (ECOC2005)*, Glasgow, U.K., paper2.1.1 (Sept. 2005).
- [2-6] 超高速フォトリックネットワーク開発推進協議会編, “フォトリックネットワーク革命” 2002年
- [2-7] M. Koga, “Challenges to System Control Technology for Optical Burst Data Switching on Photonic MPLS Network,” in *Proc. 16th International Conference on Optical Fiber Sensor (OFS-16)*, Nara,

Japan, WS1-3 (Nov. 2003).

第3章 PLZT導波路偏向型光マトリックススイッチを用いた光バーストスイッチサブシステム

3.1 緒言

メトロコアネットワークのトラフィック増大に対応するため、従来の波長パス制御・管理に時間領域の粒度制御を加えた光バーストスイッチング(OBS : Optical Burst Switching) [3-1]、[3-2]を適用することが期待される。本研究では、メトロコアネットワークへOBSを導入することを目指した偏向型光マトリックススイッチサブシステムについて述べる。

3.2 光バーストスイッチングノードの構成

提案する光スイッチサブシステムを用いた光バーストスイッチングノードの構成例を図3.2-1に示す[3-3]。複数の方路から入力されたWDM信号は、それぞれAWG(Arrayed Waveguide Grating)によって波長毎に分波され、光マトリックススイッチに入力される。高速電子回路によって実現されたラベルコントローラが、各光バースト信号のラベルを読み取り、ルーティングテーブルに

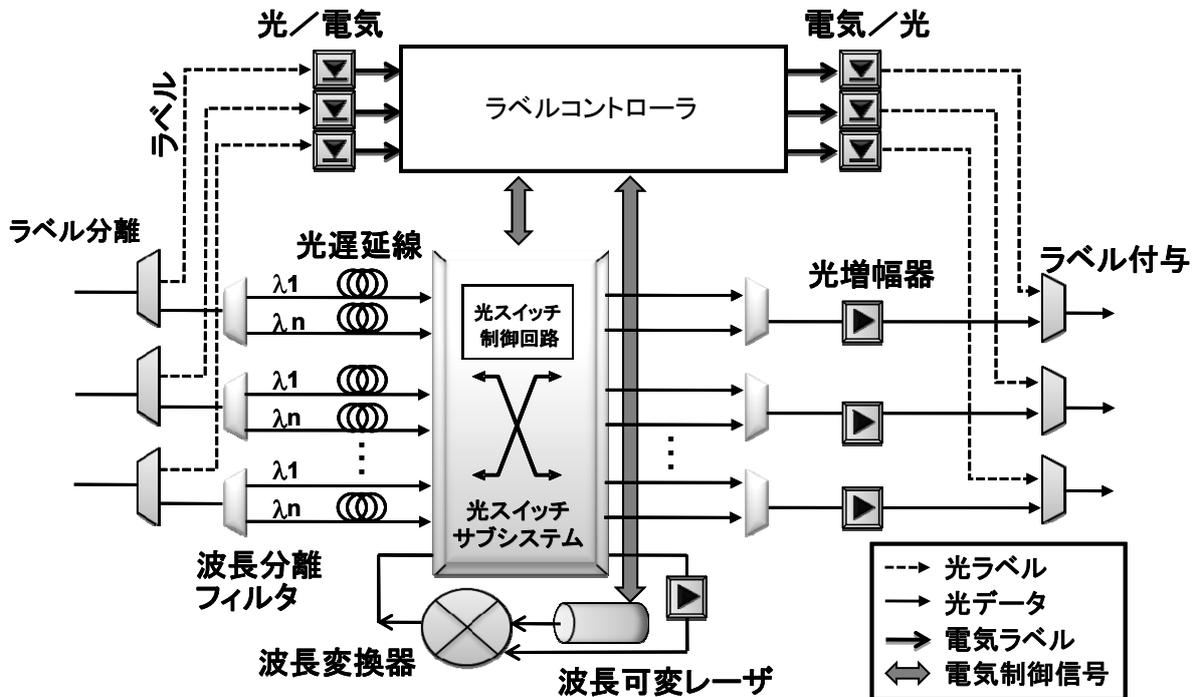


図 3.2-1 光バーストスイッチングノードの構成例

従って、光スイッチサブシステムへ接続を要求する。光スイッチサブシステムとは、光マトリックススイッチとその制御回路を一体化したものであり、ラベルコントローラの要求に応じて光マトリックススイッチを制御する。

光バースト信号は複数ノードから入力され、複数ノードに分配されるため、同時に同一波長のバースト信号が同一出力ポートへのルーティングを要求することもある。このような場合には、ラベルコントローラが一方のバースト信号を波長変換器へ接続し、波長を変換した後に所定の出力ポートへルーティングする。本構成は、同時に全バースト信号の衝突を非常に少なくすることができるため、波長変換器の数量はNよりも十分に少なくすることができる[3-4]。このような共有型波長変換器を適用できることは、光マトリックススイッチを用いるメリットの一つである。

このノード構成における、光スイッチサブシステムへ要求される特性を表3.2-1にまとめる。本ノードでは、 $10\mu\text{s}$ 程度のガードタイムでスイッチングを行うことから[3-5]、光スイッチサブシステムの応答速度は、3.4.3項で説明する光可変減衰（VOA：Variable Optical Attenuation）制御を行わない場合には $1\mu\text{s}$ 以下とし、VOA制御を行う場合においても $10\mu\text{s}$ 以下をそれぞれ目標とする。またスイッチング後の光バースト信号は、光バースト対応光増幅器で増幅を行うため、スイッチ部の損失は10 dB程度が許容される。ポート間出力レベルは、VOA機能を用いた出力値一定制御（ALC：Automatic Level Control）を行うが、その制御精度は、OBSノード内の波長変換器の入力ダイナミックレンジの制限と受信端での光バースト受信器の入力ダイナミックレンジの制限や光SNRの均一化の要求から、 $\pm 0.5\text{ dB}$ 以下を目標値とする。

表 3.2-1 光スイッチサブシステムの目標仕様

項目	目標値
入出力ポート数	64 × 64 (試作は8 × 8)
スイッチング速度	< 1 μs (VOAなしの場合) < 10 μs (VOAありの場合)
挿入損失	~10 dB (光スイッチ部)
ポート間出力レベル差 (ALC誤差)	< $\pm 0.5\text{ dB}$
サイズ	19 インチラック 2U サイズ 440(W) × 500(D) × 88(L) mm
消費電力	150 W 以下

3.3 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチ

3.3.1 光スイッチの方式選定

本項では、既に実用化されているものを含め、これまで研究開発されてきた光スイッチ方式について比較検討を行い、最も適した方式を選定する。

図 3.3-1 に示す機械的に光ファイバを動かして接続を切り換える光スイッチは、光ファイバ同士を近接対向させる光結合で低損失化が容易であり、既に実用化されている。しかし、単一モジュールでの大規模化は難しく、多数のモ

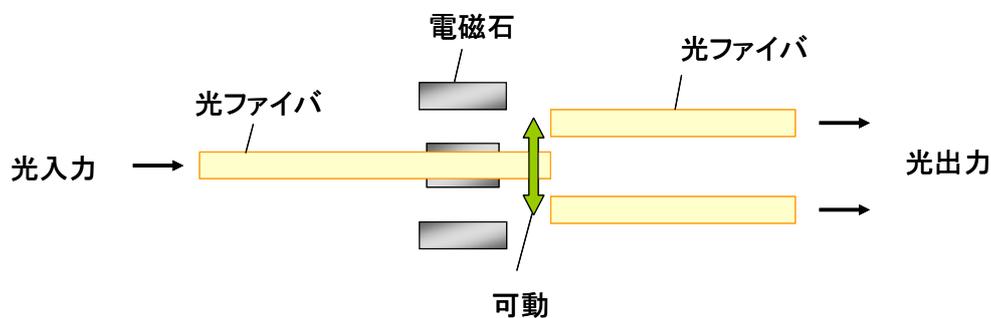


図 3.3-1 光ファイバ切り換え式光スイッチ

ジュールを多段に接続すると、コスト、スペース的に大掛かりな構成になってしまう。また、機械的な動作を伴うため、高速化には限界があり、スイッチング速度はミリ秒程度にとどまる[3-6]、[3-7]、[3-8]。

図 3.3-2 に MEMS ミラーの角度調整で光ファイバアレイ間の接続形態を切り換える構成を示す。MEMS ミラー型スイッチは、近年多くの研究開発が報告され[3-9]、[3-10]、[3-11]、実用レベルに到達している。しかし、可動部が存在するため、特にポート数が多くミラーの振り角が大きくなると、スイッチング速度はミリ秒レベルまでが限界と考えられる。挿入損失は数 dB 以下のものも実現されているが、マイクロ秒レベルの高速化が困難である点で、候補とはならない。

非機械方式の光スイッチも多くの方式が検討されている。電気光学効果をもつ LiNbO_3 結晶基板に光導波路でマッシュツェンダ干渉計を形成し、それを多段に繋ぎ合わせたマトリックススイッチを図 3.3-3 に示す。ナノ秒レベルの高速切り換えが可能であるが、 $n \times n$ ポートの非閉塞スイッチを実現するために

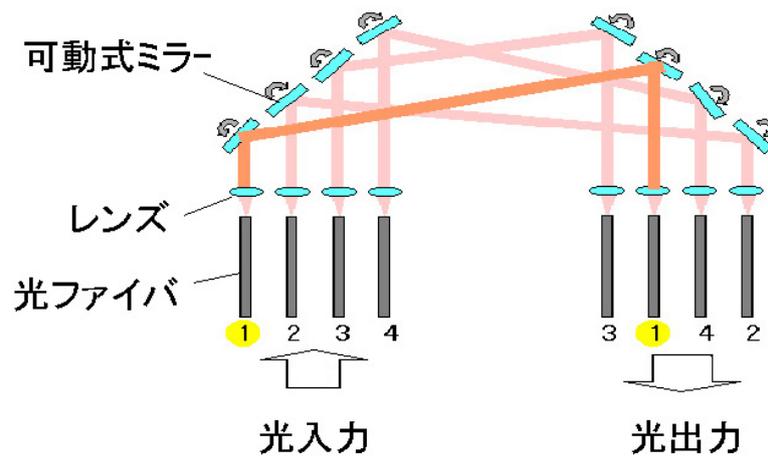


図 3.3-2 MEMS 式光スイッチ

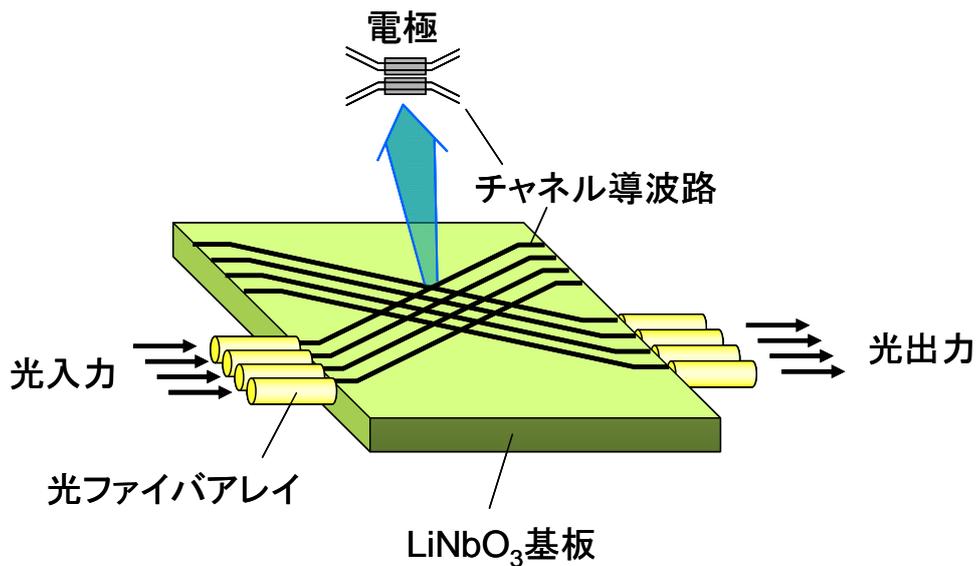


図 3.3-3 LiNbO₃マトリックス光スイッチ

は、多数のスイッチを多段に繋いだ構成が必要になり、多ポート化するほど基板サイズが大きくなって、光損失も増大する。また、光の伝搬経路によって光損失が異なる状況が生じてしまうなどの問題がある[3-12]。

光導波路マトリックススイッチでは、屈折率を変える原理として、電気光学

効果ではなく、加熱による屈折率変化（熱光学効果）を利用した方式[3-13]、[3-14]や、光導波路交差部における気泡発生と消失で全反射と透過の制御を行うことで経路を切り換える方式[3-15]、[3-16]、[3-17]、[3-18]、[3-19]があり、実用レベルのものが開発されている。しかし、これらのスイッチにおいても、高速性とポート数の規模拡大に関して問題が残る。

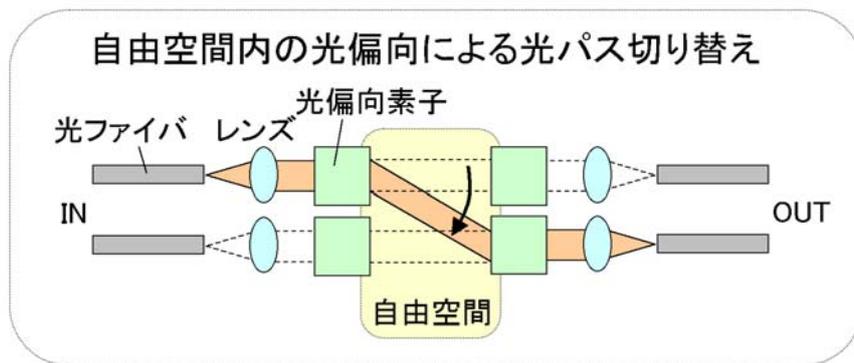


図 3.3-4 高速マトリックス光スイッチの構成概念図

以上に示したこれまでの開発状況を踏まえ、メトロコアネットワークに適用する OBS 用マトリックススイッチの構成を考察する。まず、高速切り替えを実現するために電気光学効果を利用することが必須となる。更に、挿入損失の光経路依存が少ない構成、多ポート化が容易で小型にできる構成といった観点から、MEMS 方式と同様に自由空間での光偏向を利用する方式が適していると考えられる。更に、光学系を一体集積化し易い構成にする目的で、自由空間をスラブ導波路形態とし、二次元自由空間内の光偏向で光路を切り換える方式が最適であるとの結論に達した。このように、これまで提案されている光スイッチの長所を導波路上に集約させた、本研究で提案する新しい光スイッチの概念図を図 3.3-4 に示す。

電気光学効果を用いた光偏向の手段については、種々の方式が検討されている。例えば、長さを徐々に変えた短冊状の電極を配列し、印加する電圧を調整することで位相変調量を制御し、通過する光ビームの進行方向を変える方式[3-20]、[3-21]、表面弾性波による回折格子の周期を変えることで光の偏向角を変化させる方式[3-22]、三角形の電気光学結晶プリズムを電極で挟み、電

圧印加によって屈折率を変化させて光を偏向させるようにしたもの[3-23]、などがあげられる。

前者の2方式は光の回折を利用した方式であり、ノイズの原因となり得る高次回折光が発生し、それらを問題にならないレベルに抑制することが難しいと判断した。これに対して、光の屈折を利用した方式は、高次光の発生はなく、高効率化が可能な方式として期待できる。このため、光偏向部として、三角電極を用いる方法を選定した。以上の考察の結果を図 3.3-5 にまとめる。以下、本研究で選定した光スイッチ方式を、「導波路偏向型光スイッチ」と称することにする。

3.3.2 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの構成

図 3.3-6 に本研究で提案する光スイッチの構成を示す[3-24]。スイッチ全体を伝搬損失が低い石英製の二次元スラブ導波路で構成する。スラブ導波路の両側に入力ポート、出力ポートをアレイ状に配置し、スラブ導波路内で二次元の光ビームを偏向させて、入力側の任意のポートから出力側の任意のポートに光路を切り換えられるようにする。また、入力ポート、出力ポートには、光ファイバとの接続が可能なチャンネル光導波路を設けている。スラブ導波路内で光を偏向するためには、伝搬距離に応じた光ビーム幅が必要であるため、入力ポー

方式	高速性	拡張性	偏波無依存	損失	装置サイズ
電気光学 (EO)	○	○	○ < 0.5 dB	多ポート 有利	多ポート 有利
		○	×	少ポート 有利	少ポート 有利
		< 1 μs	~ 64 × 64		
熱光学 (TO)	×	×	○		
		~ 8 × 8			
反射	×	○	< 0.5 dB	多ポート 有利	多ポート 有利
	~ 1 ms	> 100 × 100			

図 3.3-5 駆動原理による光スイッチの基本特性の比較

トのチャンネル導波路を通った光を平行光に変換するための二次元コリメータレンズをポートごとに設けている。集光された平行光ビームを偏向するための

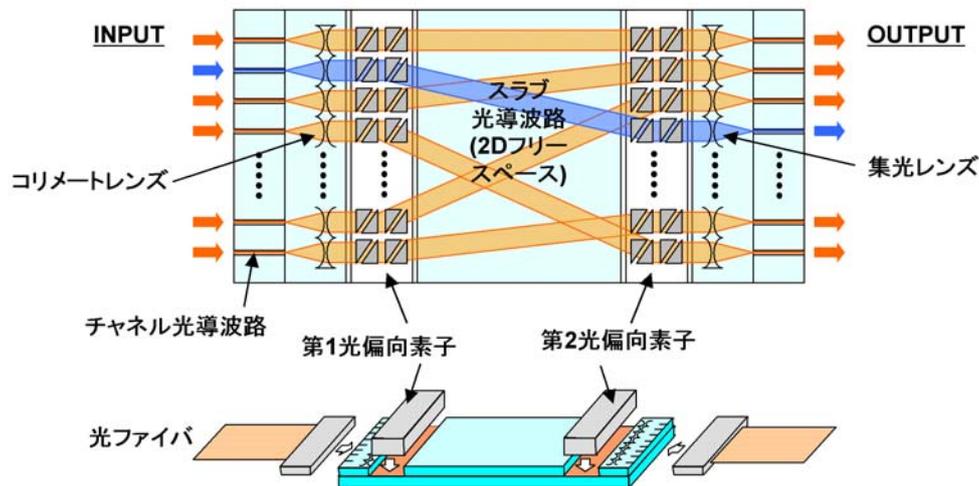


図 3.3-6 導波路偏向型光スイッチの構成

光偏向素子として、電気光学(E0: Electro-Optic)材料で構成した導波路上部にプリズム状の三角電極を形成した構造を設ける。光偏向素子の動作原理を図 3.3-7 に示す。

プリズム電極に電圧を印加すると、電極下部の導波路の屈折率が変化し、ビームを偏向させることが可能となる。電極への印加電圧を制御することで偏向角を調整することができる。光偏向素子は、スラブ導波路を挟んで入力側、出力側の2箇所に設け、入力側で偏向した光ビームを出力側の光偏向素子で元の角度に戻す。図 3.3-8 にマイクロレンズの構造を示す[3-25]。石英スラブ光導波路にレンズ状の溝を形成し、石英より低屈折率のポリマを充填することにより、二次元の凸レンズ機能を実現できる。

図 3.3-9 に平行型と放射型と呼ぶ、2種類の光路設計手法を示す。平行型のマトリックススイッチは、偏向素子に駆動電圧を印加しない場合に全てのポートで光が通る「ノーマリ ON」型のスイッチとなる。本構成は、光学結合のアライメントが容易で組み立てが簡単にできる利点がある。放射型は、各ポートがスラブ導波路の中心に向かって放射状に対向した構成になっており、偏向素子

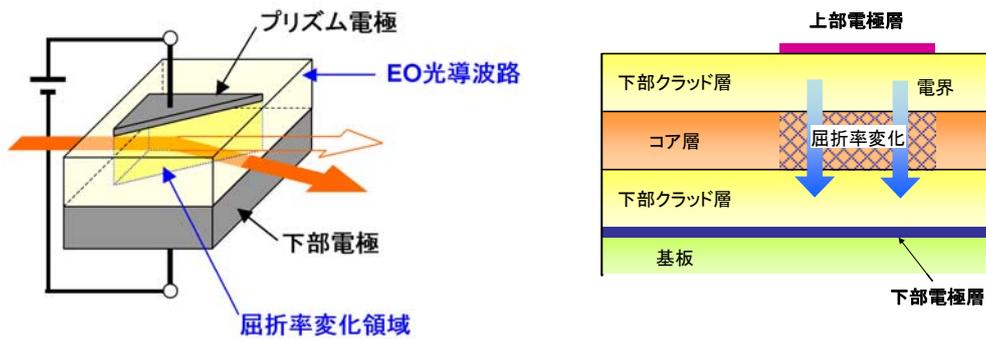


図 3.3-7 光偏向素子の動作原理と構造

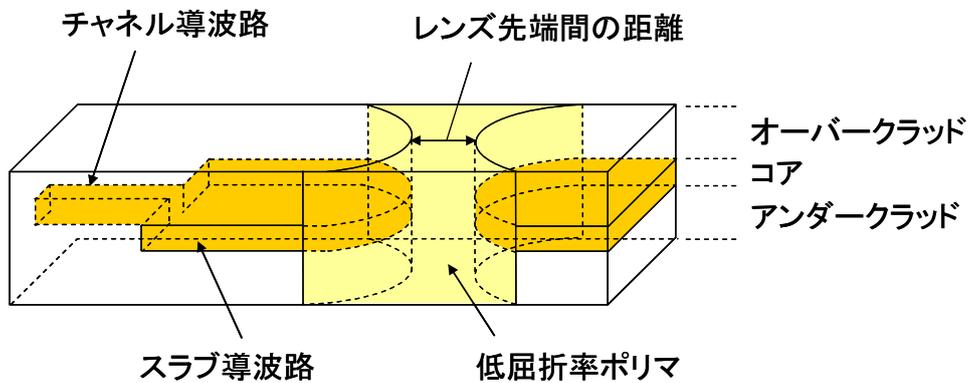


図 3.3-8 マイクロレンズの構造

に駆動電圧を印加しない場合に全てのポートで光が通らない「ノーマリ OFF」型のスイッチとなる。光学結合のアライメントには、光導波路と光ファイバのアライメントと偏向素子への印加電圧の最適化を同時に行う必要があり、組み立て工程が複雑になる課題がある。

平行型マトリックススイッチ構成でスイッチ規模を拡張する場合、単純に横幅を例えば4チャンネルから8チャンネルに広げると、最も外側に位置するポートでは8チャンネル分の角度を曲げる必要があるため、偏向角が2倍必要となり、最大駆動電圧は2倍以上に増加してしまう。一方、放射型の場合、全チャンネルの入力ビームが電圧無印加状態で出力ポートの中心(8×8構成の場合、ポート4とポート5の間)に向くように各ポートの傾きを徐々に変えた放射状構造を持つ。このレイアウトでは、左右にスイッチ規模の半分(4チャンネル分)の振

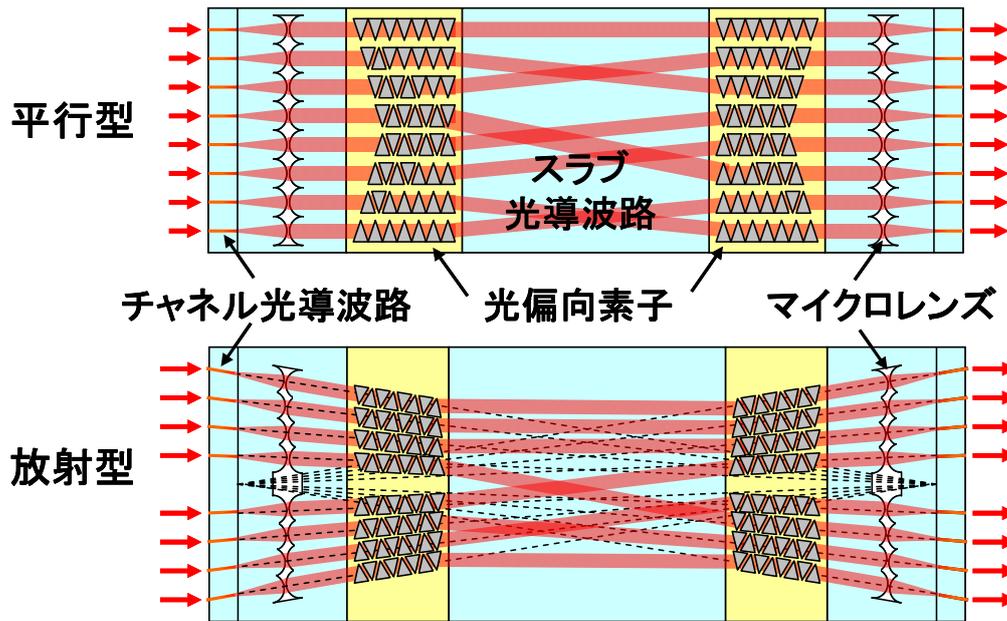


図 3.3-9 並行型と放射型の導波路偏向型光スイッチ構成

れ角を確保すればよいため、最大駆動電圧を半減することができる。本研究では、多ポート化に有利であること、スイッチ部の故障が発生した場合の影響の波及を考慮して、駆動電圧が低く、ノーマリ OFF 型の動作となる放射型のスイッチ構成を採用する。

導波路偏向型光スイッチでは、集光され平行ビームとなった入力光が第一の光偏向素子で出力ポートの方向に曲げられ、スラブ光導波路内を伝搬した後、第二の光偏向素子で角度を戻して集光レンズの光軸に垂直に入射され、チャンネル光導波路のコアに低損失に結合される。出力ポートを切り換える途中では、他の出力ポートを光ビームは横切ることになり、この際のクロストークについて検討する必要がある。出力ポートを切り換える途中で他ポートへのクロストークが発生しない動作のことを「ヒットレス動作」と呼び、MEMS 型 SW など、自由空間に光ビームを伝搬される形式のスイッチに共通の課題である。導波路偏向型光スイッチでは、コリメートの焦点距離やチャンネル光導波路の間隔の最適化により、受信したい入力ポートに対応した電圧が出力ポートの偏向素子に印加されていない場合は、チャンネル光導波路のコア上に結像しない、あるいは、コア上に光ビームが存在しても、光導波路の基本モードから角度ずれを意図的に発生されることができ。シミュレーションの結果では、-47dB の大きな結合損失を得ることが確認され、ヒットレス動作の実現が可能である。

表 3. 2-2 に光偏向素子に用いる電気光学材料の比較を示す。本研究では、偏向素子の材料として、PLZT(Plomb Lanthanum Zirconate Titanate、ランタン添加チタン酸ジルコン酸鉛)[3-26]を採用した。PLZT は比較的大きな E0 係数を有しており、駆動電圧の低減が可能であること、組成比の変化により 1%程度の屈折率差を得ることができるため、クラッド-コア-クラッド構造の導波路構造が作り込めること、などの利点を持つ材料である。また、強誘電体メモリ等の技術によりスパッタリング法、MOCVD 法、ゾル-ゲル法等の製膜技術がある程度確立されていることなどの利点もある。LiNbO₃ は比誘電率が小さいことから高速動作が可能であり、外部変調器として実用化されている材料であるが、屈折率変化が小さいことが欠点である。電気光学ポリマ[3-27]は比誘電率が 4 程度と非常に小さく、150GHz を超える高速動作が可能な材料である。また、結晶に比べ光導波路構造を作り易く、成膜コストを低くできるメリットもあるが、信頼性に課題が残る。SBN[(Sr、Ba)Nb₂O₆]は屈折率変化係数が大きく大変魅力的な材料であるが、成膜方法の確立が必要である。

3. 3. 3 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの試作

前節で考察した導波路偏向型光マトリックススイッチの基本構成を基に、8

表 3. 2-2 電気光学材料の比較

	LiNbO ₃	PLZT(8/65/35)	SBN	ポリマ
電気光学係数 (pm/V)	31	600	1340	120
屈折率	2.2	2.3	2.345	1.55
比誘電率	30	4,650	250	4
電界屈折率変化係数 (pm/V)	165	3,650	8,640	223

×8 規模の光スイッチを試作した。図 3. 3-10 に光偏向素子とその電極構造を示す。各ポート毎に 3 種類のプリズム状の三角電極を有している。1 つは上側（光入力方向から見て左側）偏向用、1 つは下側（光入力方向から見て右側）偏向用、もう 1 つはポート間の結合効率を微調整して、スイッチングする際に光可変減衰 (VOA : Variable Optical Attenuation) 機能を実現するための VOA 用電極である。上下側のどちらかの電極に所定の電圧を印加することによ

り、ビームを偏向させることが可能となる。

さらに同じ駆動電圧で比較した場合、1つのプリズム電極で偏向させるよりも、プリズム電極を多段構成にして偏向させるほうが、より大きな偏向角が得られるため、上下側偏向用電極の配置はともに多段構成とした。VOA用電極では大きな偏向角は必要ないため、三角電極1つの構成となっている。

図 3.3-11 に PLZT 光偏向素子の構造を示す。Nb をドーピングした導電性の SrTiO₃ (チタン酸ストロンチウム) 基板の上に、コアとクラッドの組成をそれぞれ、PLZT(8/65/35) と PLZT(11/65/35) とする合計膜厚 9.0 μm の 3 層の PLZT (Δ

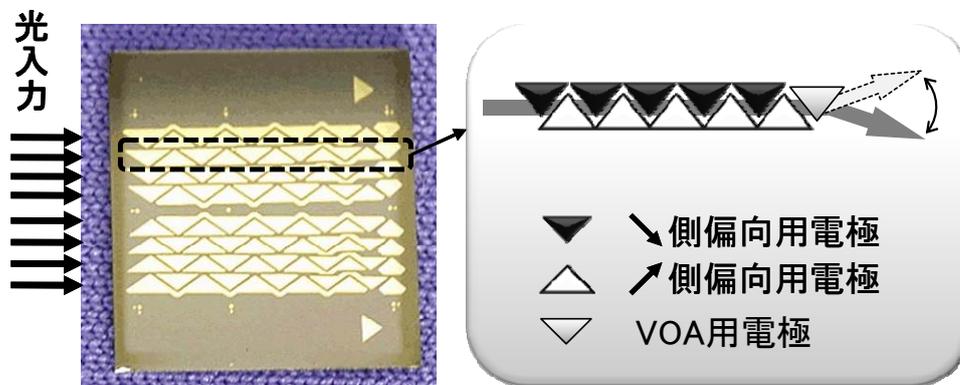


図 3.3-10 光偏向素子とその電極構造

=0.5%) をゾル-ゲル法により成膜したのち、表層に三角形のプリズム電極を形成している。PLZT の電気光学効果の偏向依存性について各種の結晶方位を調査した結果、(100) 方位にエピタキシャル成長させた PLZT 結晶が非常に小さい偏波依存性を有することが確認できている [3-28]。

図 3.3-12 に PLZT 偏向素子の偏向特性の一例を示す。電圧印加により電極下部の PLZT 光導波路の屈折率を変えてビームを偏向させられること、入力偏波方向に依存することなく一定の偏向角が得られることを実験で確認した。

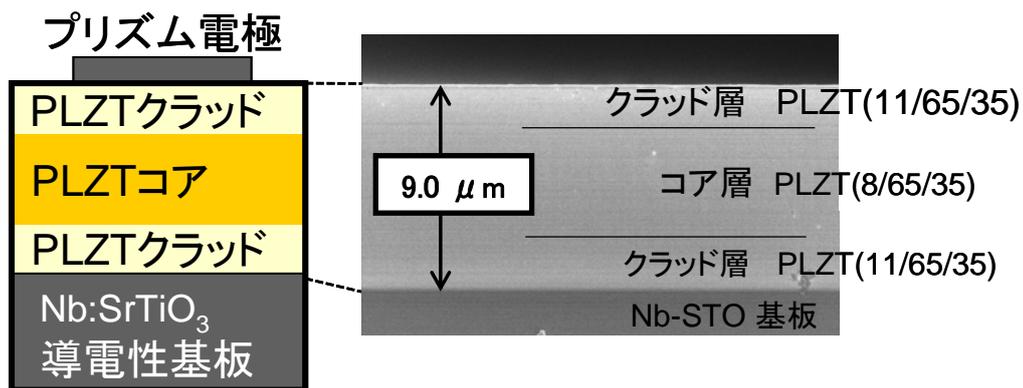


図 3.3-11 PLZT 光偏向素子の構造

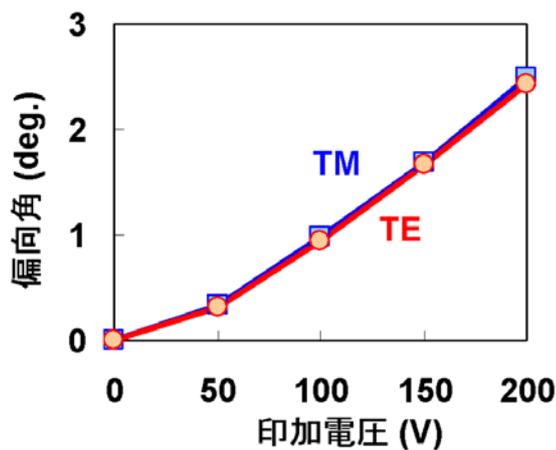


図 3.3-12 PLZT 偏向素子の偏向特性例

次に、石英光導波路部の設計パラメータについて述べる。石英導波路は PON (Passive Optical Network) を用いた光アクセスシステム向けのスプリッタとして 6 インチウェハでの量産技術が確立している。6 インチウェハに対して、1 枚のウェハから 4 チップをとることを考えると、石英導波路部分の全長は 130 mm と見積もられる。導波路レンズの焦点距離は 7 mm であり、放射状にす

るためのチャンネル光導波路長 4 mm を合わせて 11 mm 程度の領域を導波路系の入出力両側に設けることになる。残りの 108mm が偏向素子 2 ヶ所分とスラブ光導波路に割付られるサイズである。2 個の PLZT 偏向素子をそれぞれ 12 mm 角とし、スラブ光導波路の概略長を 84 mm とすると、この長さを伝搬する平行光ビームウェスト径は、0.2~0.3mm の幅が必要である。このビーム幅を考慮してプリズム電極の幅は 0.5mm としている。隣接する電極間の間隔は、電界を膜厚方向に集中させるため、PLZT 膜厚 (9 μ m) よりも十分大きい 0.1mm とした。また、入力ポートの間隔はヒットレス動作が得られるように 0.8mm に設定した。以上の設計パラメータにより、スラブ光導波路内の偏向角は全角で最大 3.3 度 (偶数ポートであるため、半角は 1.6 もしくは 1.7 度) となる。この偏向角度が PLZT 偏向素子に要求される偏向角度となる。

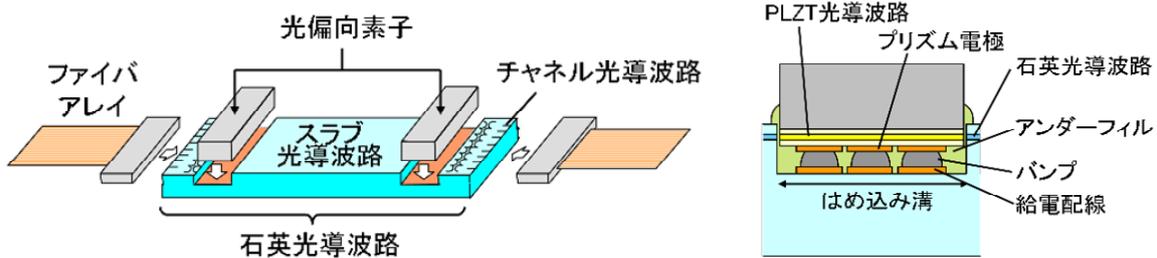


図 3.3-13 PLZT 偏向素子の実装方法

組み立て方法について述べる。導波路偏向型光スイッチは図 3.3-13 に示す計 7 つの部材から構成されるが、実装のための光学的アライメントを簡略化し、実装後の部品の位置ずれを抑えて長期安定度の向上を図るため、スラブ光導波路、レンズアレイ、チャンネル光導波路が一体形成されている石英基板に設けた 2 個の溝に光偏向素子を搭載する、はめ込み実装法を採用している。素子ははめ込み溝の底面の表面には給電配線を形成してある。光偏向素子を、PLZT 光導波路表面に形成したプリズム電極が給電配線に対向するようにフェイスダウンで溝にはめ込み、プリズム電極と給電配線はバンパで接続する。全体構造の補強と信頼性確保、光の結合効率の向上を兼ねて、透明なアンダーフィル材で接合域を封止している。

以上の手法を用いて作製した 8×8 および 10×10 導波路偏向型光マトリックススイッチを図 3.3-14 に示す。10×10 マトリックススイッチ挿入損失は 12.4

dBであった。図 3.3-15 に実験用の高速・高電圧発生器を用いて測定したデバイス単体のスイッチング特性(ch1→ch8)を示す。スイッチング時間は立ち上がり $0.35 \mu\text{s}$ 、立ち下がり $0.2 \mu\text{s}$ であった。スイッチング速度は、PLZT 素子自身もつ $1\sim 2 \text{ nF}$ の静電容量 (C) と、Nb-STO 導電性基板、配線が持つ $100\sim 300 \Omega$ の抵抗値 (R) による RC 時定数で決定される。立ち上がり波形において、駆動電圧よりも光応答が遅延している理由は、所定の角度まで光ビームを偏向させてポート結合が完全に成立する寸前まで光応答が見えないことによる。

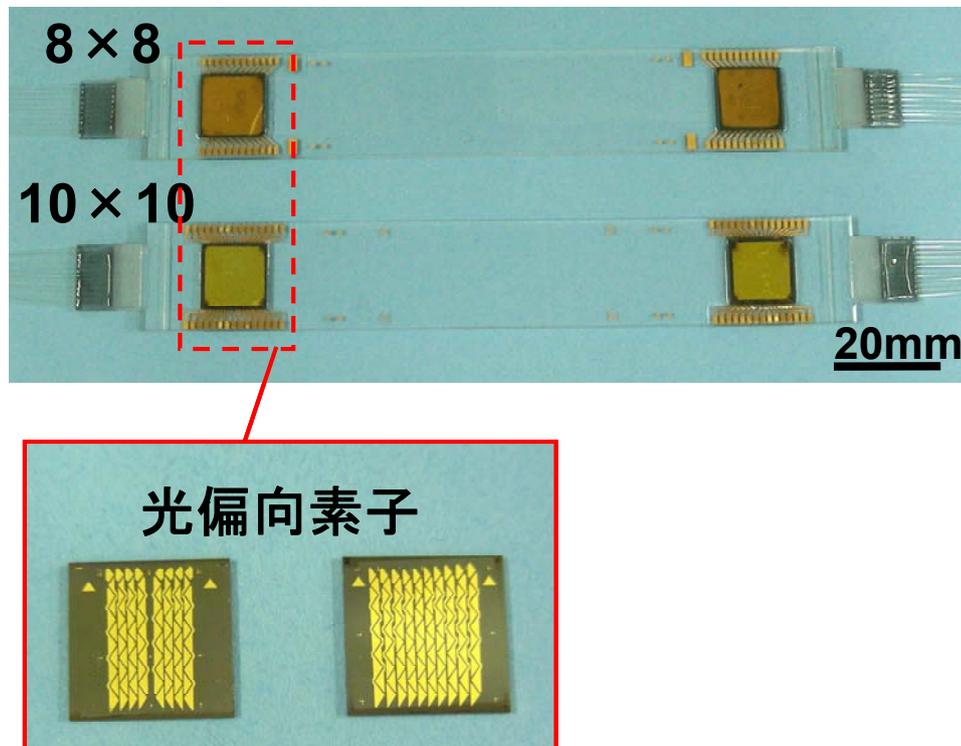


図 3.3-14 導波路偏向型光マトリックススイッチの外観

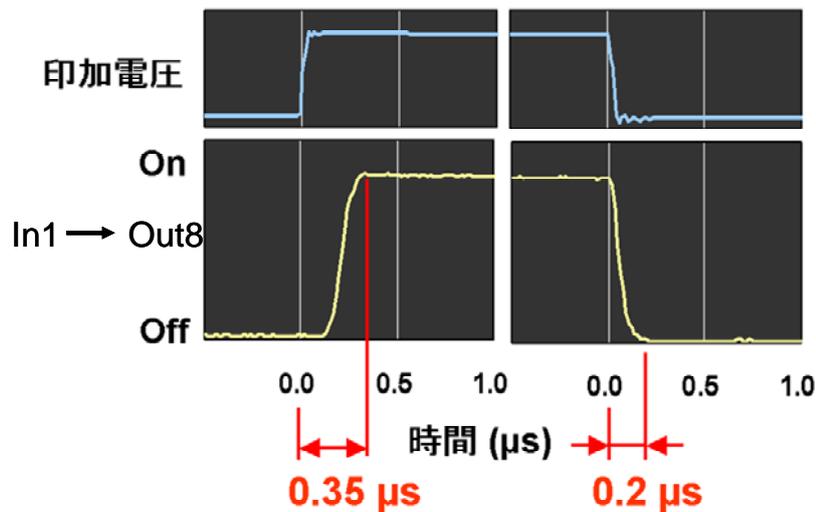


図 3.3-15 導波路偏向型光マトリックススイッチの応答特性

3.4 導波路偏向型光バーストサブシステムの設計試作と実験結果

3.4.1 光バーストサブシステムの構成

PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを制御するためには、各種の制御電子回路とファームウェアが必要である。これらと、PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを一体化し、光バーストスイッチに適用する際の取り扱いと外部とインタフェースの利便性を向上させたものを導波路偏向型光バーストサブシステムと呼ぶことにする。図 3.4-1 に導波路偏向型光バーストサブシステムの構成を示す。

導波路偏向型光バーストサブシステムは、(1)PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを駆動する Driver ボード、(2)各種制御を行うための光信号を検出するための光電変換器を集積化した Monitor ボード、(3)Monitor ボードからの信号をデジタル信号に変換する AD 変換器、Driver ボードにアナログ信号を出力するための DA 変換器、ラベルプロセッサとのインタフェース部などを搭載した FPGA ホード、(4)光バースト信号が入力されない場合に PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチのキャリブレーションを行うための L バンド帯の参照光源、の 4 つのコンポーネントから構成される。

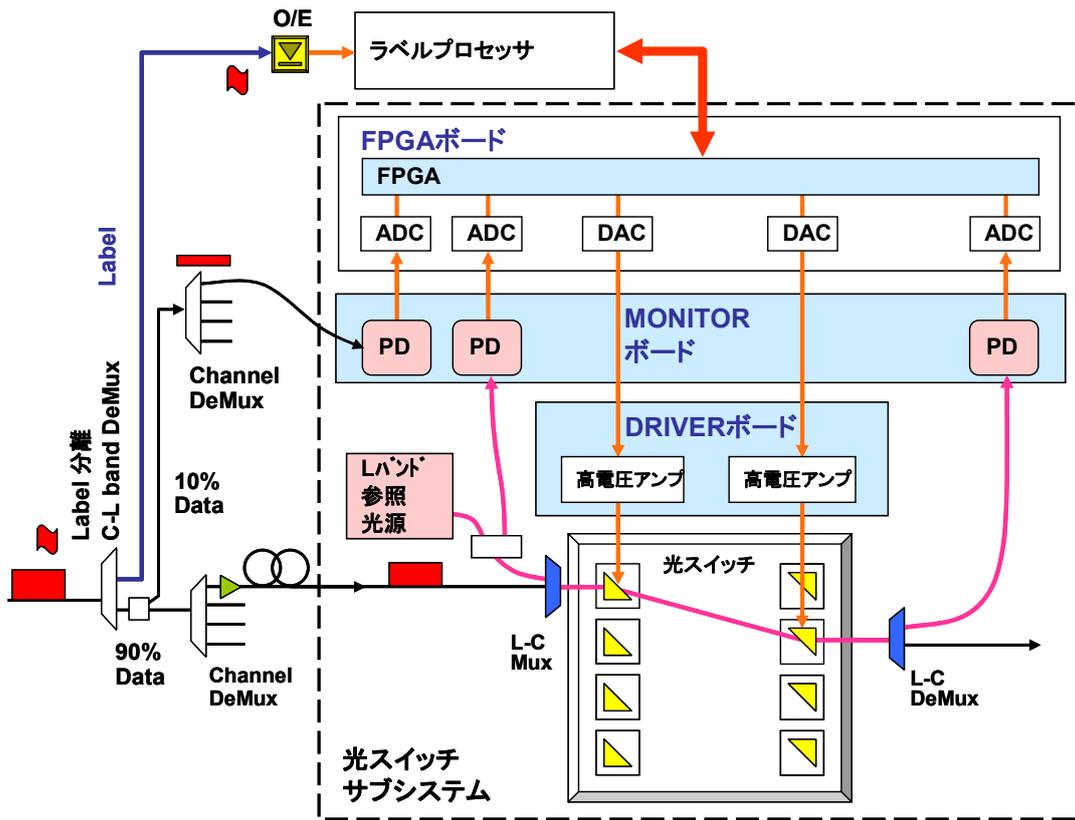


図 3. 4-1 導波路偏向型光バーストサブシステムの構成

3. 4. 2 光バーストサブシステムの試作

(1) Driver ボード

PLZT 導波路偏向型スイッチの偏向素子は、図 3. 3-10 に示したように、上側への偏向電極、下側への偏向電極、および可変減衰 (VOA) 制御電極、の 3 つの電極から構成される。8×8 マトリックススイッチでは、入出力合わせて偏向素子は 16 個となり、駆動すべき電極数は、48 となる。また、必要な駆動電圧は約 300V であり、これを数 μs 程度の速度で印加する必要がある。

図 3. 4-2 に Driver ボードの外観を示す。本ボードには、光スイッチ駆動用の高速・高電圧増幅器を 24 個搭載しており、これを 2 枚使用することで 8x8 スイッチを駆動させる。光偏向素子は強誘電体であるため、電極とグラウンド間に数 nF のキャパシタ成分が存在するため、駆動電圧の応答速度が低下する。高速・高電圧増幅器は、この寄生容量成分を補償する位相補正回路、電極に溜まった電荷を強制的に放電する回路の付加により、1 μs の応答速度を得ている。これは、スイッチサブシステム内の駆動電圧を生成する高電圧増



図 3.4-2 Driver ボードの外観

幅器のサイズや消費電力を考慮し、最大 300V を出力する際の電圧立ち上げ・立ち下げ時間を実用上十分な速度に制限している数値である。

(2) Monitor ボード

Monitor ボードには、光スイッチ部の入出力におけるバースト信号検出、信号光パワーモニタ、および基準光源のモニタ機能が内蔵されている。8×8 スイッチの入出力ポート、後述の L バンド帯の基準光のモニタなど、合計 32 ポートのモニタを内蔵している。50dB 以上のダイナミックレンジと $1\mu\text{s}$ 以下の高速応答の両立、高圧駆動回路からの雑音抑圧などが技術的課題である。図 3.4-3 に Monitor ボードの外観を、図 3.4-4 に Monitor ボードの光電変換回路の直線性と応答速度を示す。

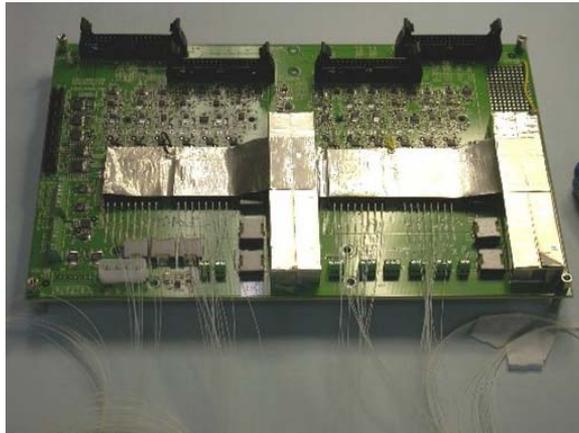


図 3.4-3 Monitor ボードの外観

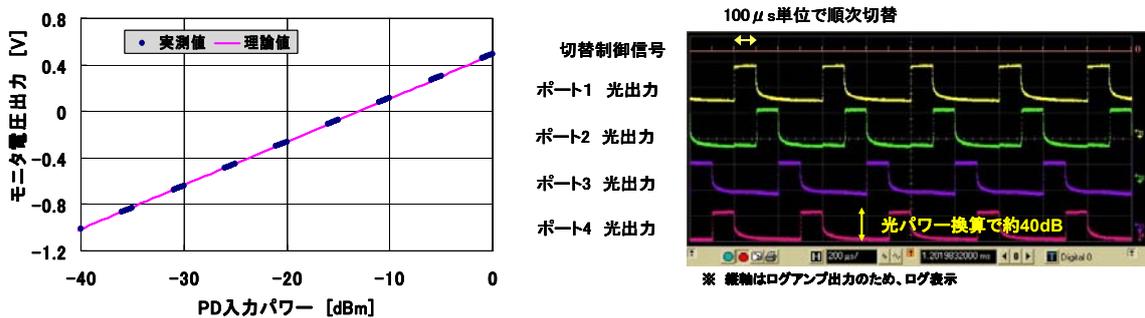


図 3.4-4 Monitor ボードの光電変換回路の直線性と応答速度

(3) 参照光源ボード

PLZT 偏向素子の DC ドリフトの影響や偏波依存性、波長依存性等の光スイッチ素子の特性変動を長期的に補償しつつ、高速スイッチング動作と VOA 動作を安定して行うため、L-band 波長帯の参照光源を搭載して、光スイッチの入出力パワーを逐次モニタしつつ制御パラメータを補正するキャリブレーション機能を搭載した。このキャリブレーション機能を光バースト信号が到来していない空きポート（未使用ポート）に対してのみ周期的に自動で行う。光

バースト信号が到来し、パス接続を行っているポート（使用ポート）に対しては、補正キャリブレーション動作を行わず、信号光を用いて制御パラメータを最適値に追い込むフィードバック制御を行っているため、使用、未使用

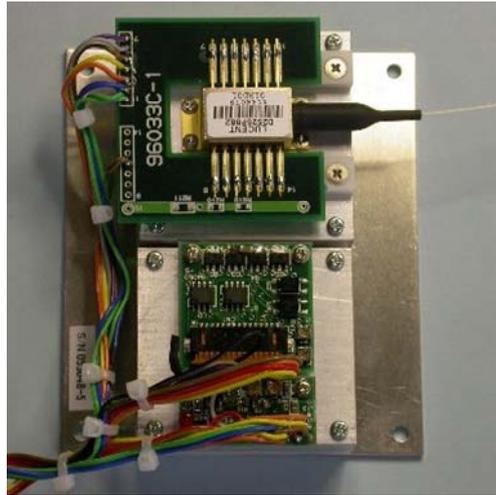


図 3.4-5 参照光源ボードの外観

のポート状態に依存せず、常に安定したスイッチング動作を実現することが可能となる。図 3.4-5 に参照光源ボードの外観を示す。

(4) FPGA ボード

FPGA ボードは、大規模 FPGA (ALTERA 社製 Stratix 1S80) 1 個、小規模 FPGA 8 個及び 48 個の 10bit DA コンバータ、32 個の 12bit AD コンバータにより構成される。大規模 FPGA 内部には、CPU コアを 9 つと、ファームウェアを搭載しており、光スイッチ切り替え処理、VOA 処理、装置内部監視制御及びラベルプロセッサインタフェース処理を司る。DA コンバータは Driver ボードに接続され、高速・高電圧増幅器を駆動する。AD コンバータは、Monitor ボードに接続され、各種光信号を検出する。DA コンバータ、AD コンバータともに高速性が必要なことから、パラレルインタフェースを採用しているが、これらとの接続だけで合計ピン数が 1000 本に達するため、ピンネックにより大規模 FPGA に直接接続できない。このため、1 つの小規模 FPGA で、数個の DA コン

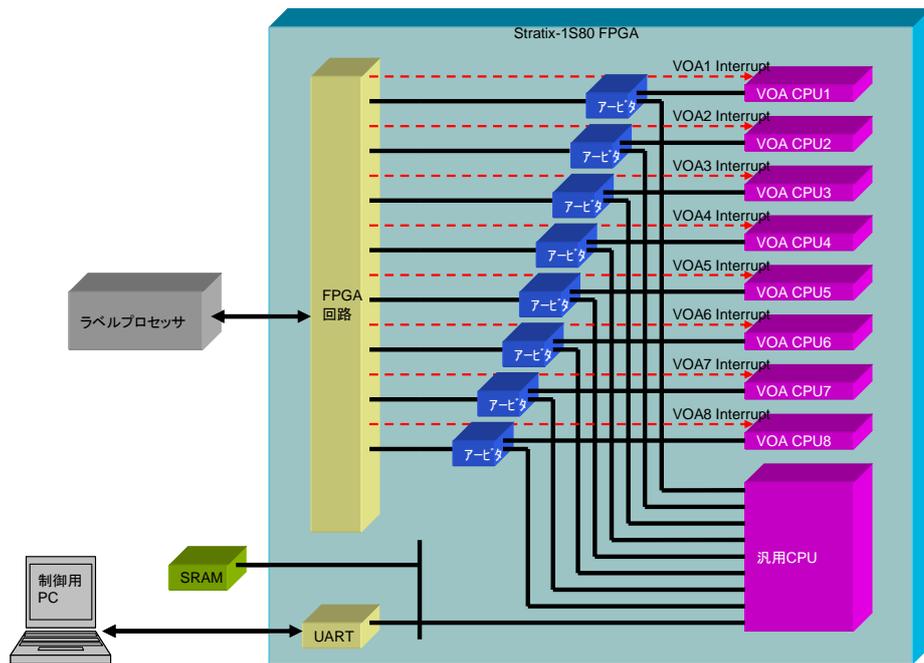


図 3. 4-6 大規模 FPGA 内の制御 CPU の構成

バータ、AD コンバータを制御する構成を採り、高速化を保ちつつ、大規模 FPGA のピンネックを解消している。

大規模 FPGA に搭載した 9 つの CPU は、図 3. 4-6 に示すように、アービタとともに各ポートに 1 個ずつ搭載され、各ポートに入力されるバースト光信号の処理を独立して制御する。このため、複数パスを同時に接続する要求を受信した場合にも、光バーストサブシステムとしては、内部処理の優先順位をつけること無く、高速な処理が可能となる。残りの 1 つはラベルプロセッサとの通信とサブシステム全体の制御を行っている。大規模 FPGA は 79040 のロジックエレメントを有しているが、このうち 60, 400 を使用しており、76 % の高い利用率となっている。図 3. 4-7 に FPGA ボードの外観を示す。

(5) サブシステム筐体

8×8 導波路偏向型光マトリックススイッチを収容する筐体、この筐体と上記の 5 つのボードを収容した光バーストサブシステムの筐体の外観を図 3. 4-8 に示す。光バーストサブシステムの筐体は標準 19 インチラック 2U サイズ(440 W×500 D ×88 L mm)である。



図 3.4-7 FPGA ボードの外観

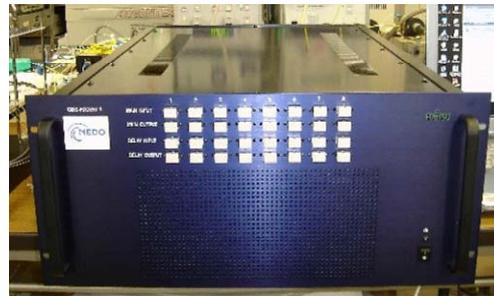
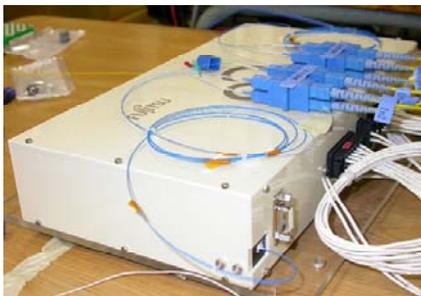


図 3.4-8 スwitchの收容筐体(左)と光バーストサブシステムの筐体(右)

3.4.3 高速光可変減衰 (VOA) 機能

PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチには、図 3.4-9 に示すように光バーストノードを通過する光信号の出力パワーを光バースト単位で高速に調整する、高速光可変減衰 (VOA) 機能のための専用電極 (VOA 電極) を出力側偏向素子に有する。この電極への印加電圧を調整して光をわずかに偏向させ、出力側の PLZT 偏向素子と出力側導波路レンズ間の結合効率を調整して VOA 機

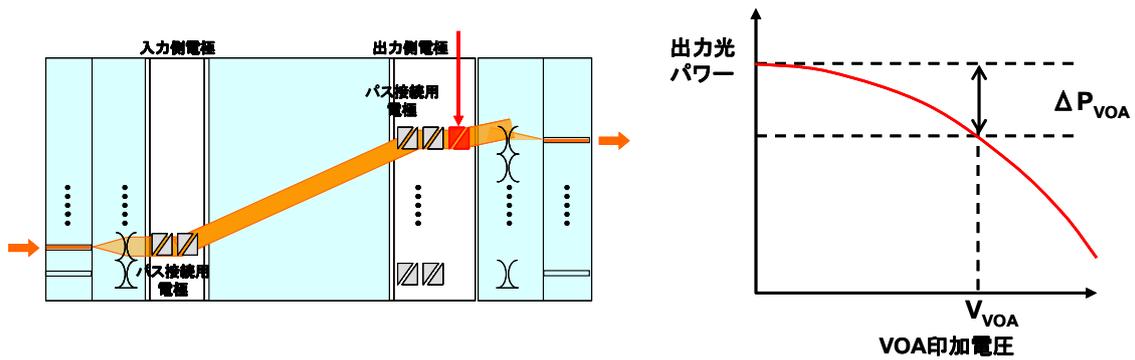


図 3.4-9 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの構造と VOA 制御

能を実現する [3-29]、[3-30]。

VOA 切替処理は、大きく 2 つの手順に分かれる。1 つは、VOA キャリブレーション処理で、もう 1 つは VOA スイッチング処理である。光バーストスイッチでは、出力パワー調整に光バースト信号自身を用いてフィードバック制御を行うと、光バースト信号の前縁部に、調整を行う際に発生するパワー変動を与えてしまう。このため、VOA 制御はフィードフォワード制御を行う必要があり、VOA キャリブレーションは正確に減衰量を設定するための処理である。それぞれの制御手順を以下に説明する。

(1) VOA キャリブレーション処理

光バーストサブシステムは、内蔵した参照光源と出力側パワーモニタを用いて印加電圧と光減衰量の関係を取得し、これを FPGA 内のレジスタに保持するキャリブレーション処理を周期的に自動で行う機能を持つ。参照光源として L バンド LD 光を搭載し、C バンド-L バンド合/分波器 (CL-Mux) を使用して C バンドの主信号と結合している。L バンド LD 光を参照光源に用いているため、主信号へのクロストークは生じない。なお、本キャリブレーション処理は未使用パスにおいて随時実施し、FPGA 内のレジスタ値を常に最新の値に更新している。この動作により、環境変動に追従した高い制御正確性を実現することが可能である。また、主信号を回線交換的に長時間に亘って出力し続けている出力ポートは、主信号のパワーをモニタして出力パワーを一定にするフィードバック制御を行う。

(2) VOA スイッチング処理

VOA スイッチング動作は、光遅延線で光バースト信号を遅延させる前に光パワーを先読みし、所望の光出力パワーとなるように光減衰量を計算し、その

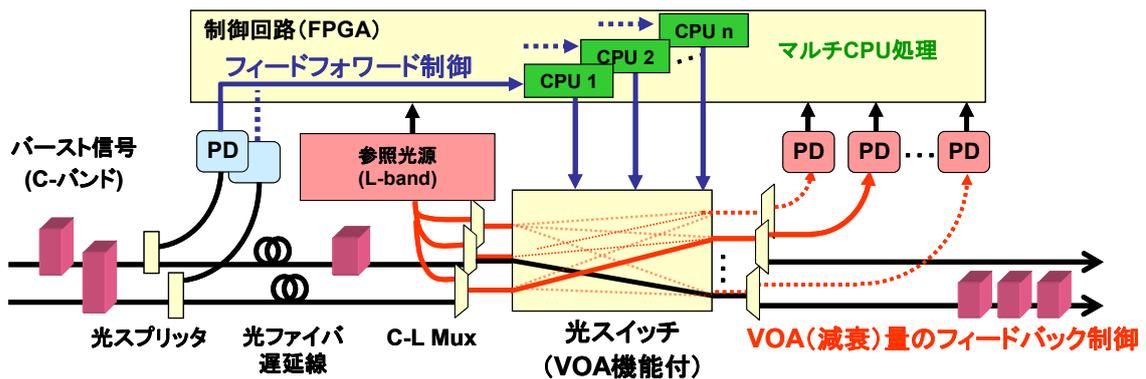


図 3. 4-10 光スイッチサブシステムの構成と VOA 切り替え処理

光減衰量を電圧値に変換して各電極へ所定の電圧を印加し直す動作のことであり、光バースト信号が到着する前に全ての動作を完了させる必要がある。つまりノード内遅延時間は光遅延線で制約されるため、光遅延線での遅延時間よりも早く VOA スイッチング動作を終了させ、光バースト信号の到来を待ち受けておく必要がある。VOA 処理の流れを図 3. 4-10 を用いて説明する。

1. 接続要求コマンドをラベルコントローラから受信すると、接続する入力側・出力側の偏向素子に所定の電圧を印加する。
2. 並行して、入力バースト信号光パワーをモニタし、設定した出力パワーを得るための VOA 電極の印加電圧を計算する。
3. 入力した光バースト信号光は、光ファイバ遅延線を通り、ラベルコントローラとの通信時間や光スイッチの制御に必要な時間だけ待機させる。
4. 2. で求めた電圧を VOA 電極に印加し、出力パワーが所定の値に調整された光バースト信号が光スイッチから出力される。

以上の処理を光ファイバ遅延線により、光バースト信号光に遅延を与えている間に実行する。

3. 4. 4 光バーストサブシステムの評価

まず、入力ポート 1 に信号を入力し、出力ポート側を順次切り替えて 8 ポートの連続スイッチング特性を評価した結果を図 3. 4-11 に示す。この結果は、ラベルコントローラから光スイッチサブシステムを制御して得たものであるが、ラベルコントローラと光スイッチサブシステム間の通信時間は 100ns 以

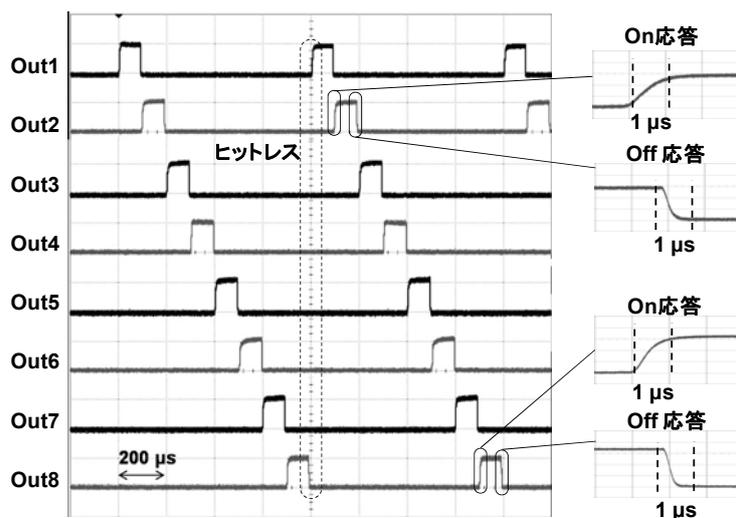


図 3.4-11 8×8 光バーストサブシステムのスイッチング特性

下であるため、ラベルコントローラ経由の制御においても $1.0\mu\text{s}$ のスイッチング応答を実現している。また出力ポート 2 と 8 のどちらに対しても、ほぼ均一なスイッチング特性が得られている。光スイッチサブシステムのスイッチング速度は、図 3.3-15 に示した 8×8 スイッチ単体の持つスイッチング速度である $0.35\mu\text{s}$ と比較して約 3 倍遅くなっているが、駆動回路の応答速度 $1\mu\text{s}$ に一致している。

スイッチング時に他ポートへ漏れ込むクロストークについても、図 3.4-11 に示すように、Out8→Out1 へ切り替える際、Out2 から Out7 までのポートへ漏れ光が観測されていないことから、ヒットレス動作を実現していることを確認した。同様に残りの 7 ポートからの入力光に対しても、ヒットレス動作を確認している [3-31]。

次に、VOA を動作させたときのスイッチング特性を評価した。その結果を図 3.4-12 に示す。光スイッチサブシステムがラベルコントローラから接続要求信号を受信後、最初にポート接続を行うための最適電圧を印加し、その後 VOA 量を計算して電極への印加電圧を変更し、光出力パワーが目的値に安定するまでの時間は $8.0\mu\text{s}$ であった。また、図 3.4-6 で説明したように、各ポートに専用 CPU とアービタを持つ構成のため、複数のポートを同時に制御できていることが分かる。VOA 制御に必要な時間の内訳は、VOA 量計算のためのファームウェア処理時間が $6.5\mu\text{s}$ 、VOA 電極のスイッチング時間が $1.5\mu\text{s}$ である。ラベルコントローラがラベル信号を解読し、光スイッチサブシステムへポー

ト接続要求を送出するまでの時間は $2\mu\text{s}$ 以下であるため、今回のVOAスイッチング時間 $8\mu\text{s}$ とあわせて、OBSノードとして $10\mu\text{s}$ 以下のスイッチング動作を確認した。

図3.4-12の測定結果は、VOAの演算時間を測定するために連続光を入力して測定したものである。この図では、VOAの調整過程で光パワーレベルが連続

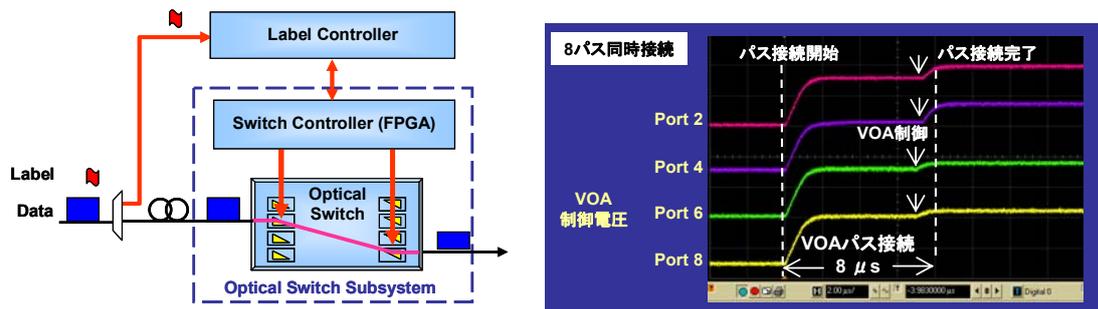


図 3.4-12 8×8 光バーストサブシステムの VOA 制御特性

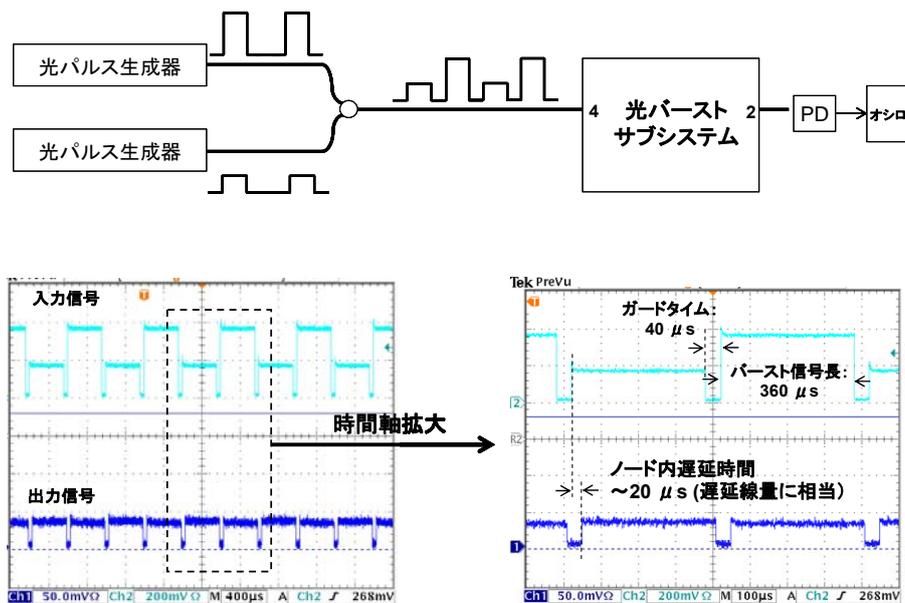


図 3.4-13 光バースト信号に対する VOA 制御特性

的に変化しているように見えるが、実際の光バースト信号のパワーがこのように変化するわけではない。そこで、図 3.4-13 に示す測定系を用いて、光バースト信号を模擬した VOA 制御実験を行った。本実験では、2つの光パルス生成器からそれぞれ異なる光パワーのパルス列を発生させ、それを時間調整して合波させることで、時間軸上で交互に光パワーの異なる光バースト信号(ただし、データは乗っていない)を生成した。その光バースト信号を光スイッチの入力ポート 4 へ入力し、出力ポート 2 へスイッチングする。出力されたバースト信号を PD で受光し、電気波形をオシロスコープで観測した。入力バースト信号(図中の上半分)は信号長 $360\mu\text{s}$ 、ガードタイム $40\mu\text{s}$ 間隔となるように調整して入力し、交互にパワーが異なるバースト信号としている。光スイッチを透過した後の出力信号(図中の下半分)は、VOA 制御が機能し、パワーが一定に調整されていることがわかる。時間軸を拡大した図では、光バーストサブシステムを通過することにより、 $20\mu\text{s}$ の遅延が発生していることが見て取れる。これは光バーストノードとして、図 3.4-10 に示すように $20\mu\text{s}$ に相当する距離の遅延線(光ファイバ)を挿入しているためである。

光可変減衰 (VOA) 機能は、電圧制御によって光スイッチ内の PLZT 偏向素子の偏向角を微調整し、ポート結合効率を制御することで実現している。そのため、ポート結合されなかった成分は迷光となって、光スイッチ内部に散乱し伝送特性を劣化させることが懸念される。素子レベルのスタティックな評価では、任意のポートを接続した状態で、かつ VOA 制御を行った場合、その隣接ポートへ漏れ込むクロストークは 60 dB 以上を確保していることを確認している。そこで自ポートへ漏れ込む迷光の影響を評価するため、光減衰量をノード仕様の 6 dB まで変化させ、誤り率特性を評価した。送信信号は 40Gb/s - NRZ、PRBS 31 段を使用し、入力ポート 1-出力ポート 5 間で評価を行った。ノード内で VOA 機能を使用して、光減衰量を変化させると、ノードの出力パワーが変化するが、評価の際に受信機入力パワーが変化しないようにノード出力に 1 波用光増幅器を挿入し測定を行った。図 3.4-14 に受信波形とあわせて符号誤り率 (BER : Bit Error Rate) 評価結果を示す。

受信波形、BER 特性のいずれにおいても Back to back との差はなく、均一で良好な特性が得られている。以上の結果から、VOA 機能を使用しても伝送特性を劣化させることなく 40 G/s 伝送が可能であることを実証した。

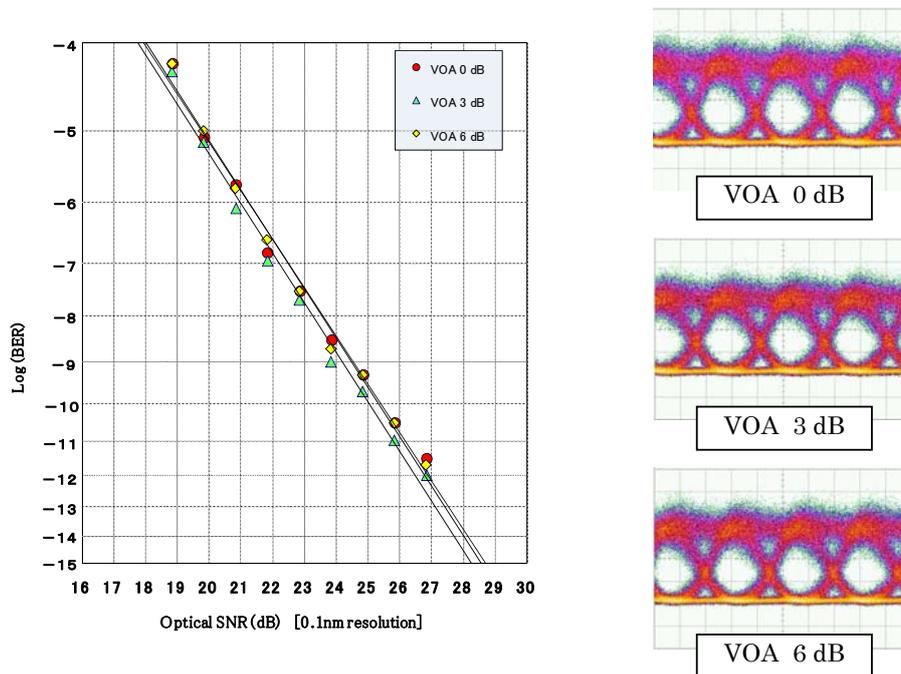


図 3.4-14 光可変減衰 (VOA) 量の違いによる符号誤り率 (BER) 特性と受信光波形

3.5 光バーストスイッチングシステムの検証実験

3 ノードから構成される光バーストスイッチングネットワークテストベッドを用いて、本研究で開発した光バーストスイッチングサブシステムの動作検証を実施した。図 3.5-1 にネットワークテストベッドの構成を、図 3.5-2 にネットワークテストベッドの外観を示す。本研究で開発した光バーストスイッチングサブシステムは各ノードの中段に設置されている。この試験ネットワークにおいて、40Gb/s のペイロード信号で符号誤り率を測定したところ、光バーストスイッチングノードを 2 台または 3 台経由しても、パワーペナルティなくエラーフリー伝送可能であることが確認された。図 3.5-3 に経路迂回による自律的信号衝突回避試験の構成を示す。Node 1 で信号衝突が発生した場合、遅れて Node 1 に到着した光バースト信号は Node 1 の光ラベルプロセッサに書き込まれた転送テーブルに従って Node 2 に経路迂回される。さらに迂回 Node 2 においても信号衝突を意図的に発生させることができる構成となっている。評価結果を図 3.5-4 に示す。信号衝突が起こった場合、入力信号 (a) の一部は Node 2 に経路迂回され (c)、本来の宛先ノードである Node 3 に到着している ((d) の実線楕円内)。但し、Node 2 においてさらに信号衝突が発

生した場合は、そこで廃棄されている（(d)の破線楕円内）。平均負荷率に対してフレーム損失確率をプロットすると、信号衝突回避を行わない場合と比べて大幅にフレーム損失確率が低減しており、経路迂回による信号衝突回避の有効性が実証された[3-32]、[3-33]。

本研究で開発した光バーストスイッチングサブシステムは数カ月間の試験ネットワークでの運用や国内外でのデモンシレーションに供しており、その安定動作が確認されている。

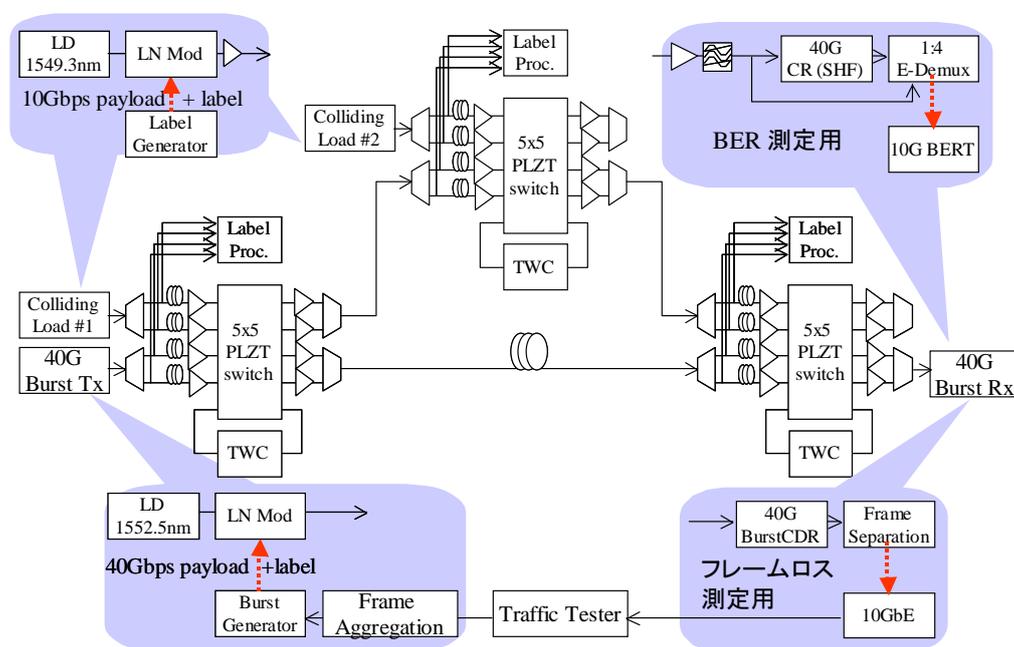


図 3.5-1 3ノードから構成される光バーストスイッチネットワークテストベッドの構成

光バーストサブシステム

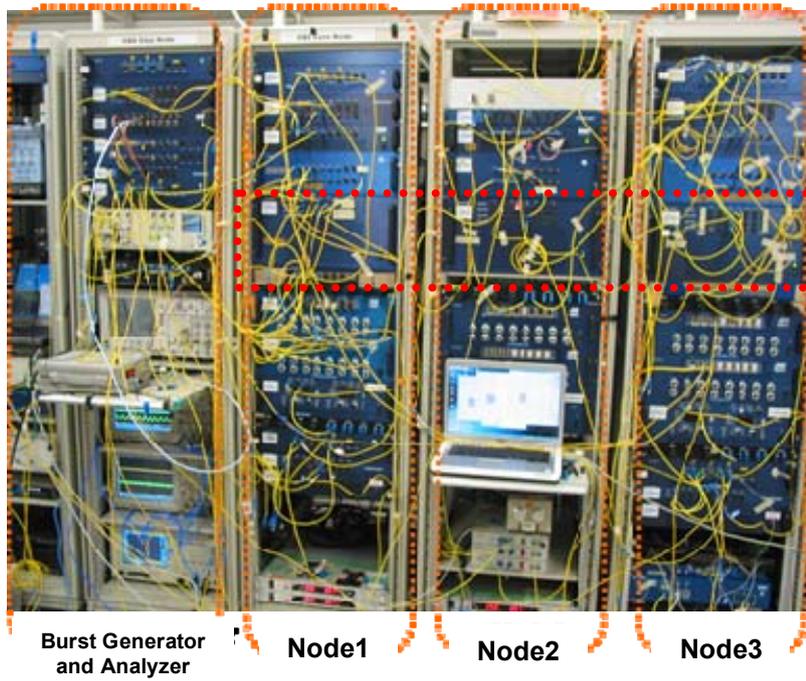


図 3.5-2 光バーストスイッチネットワークテストベッドの外観

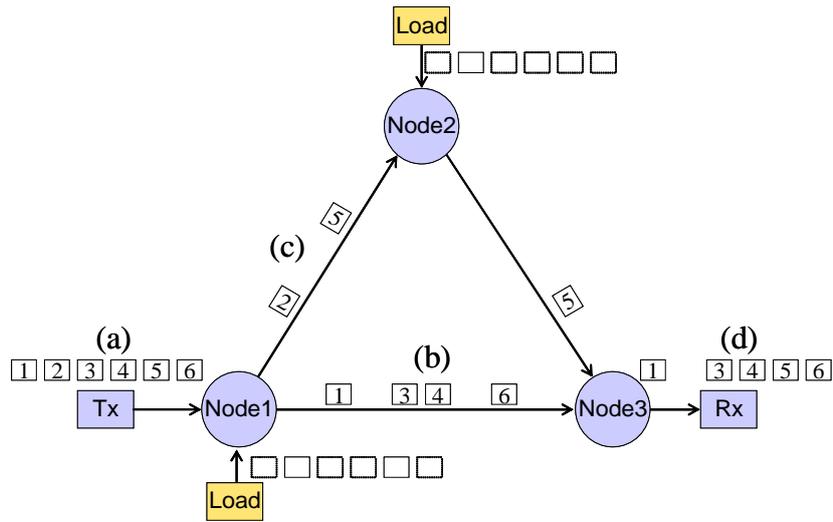


図 3.5-3 経路迂回による自律的衝突回避実証試験の構成

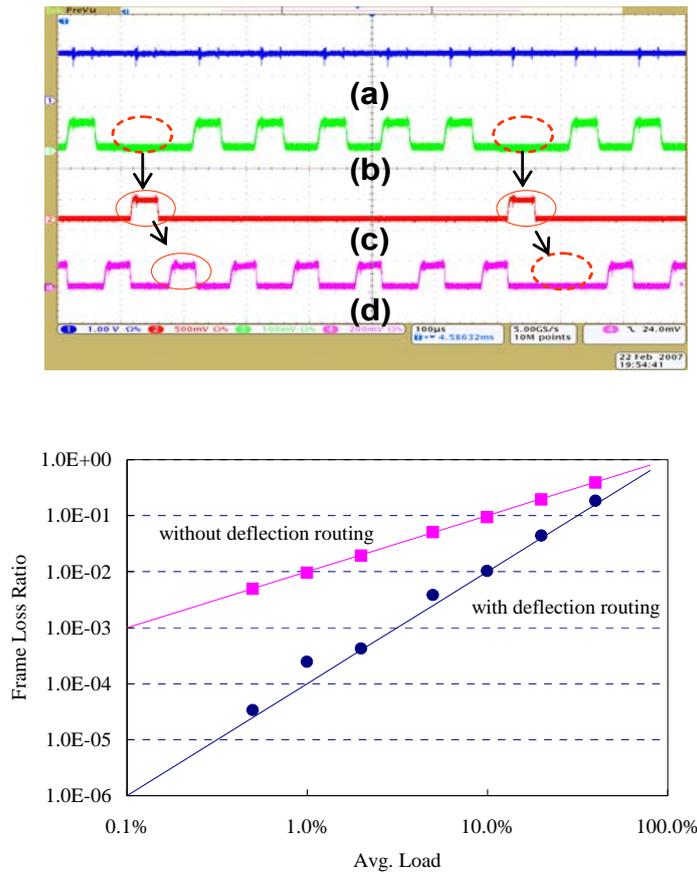


図 3.5-4 経路迂回による自律的信号衝突回避試験結果

3.6 64×64 光バーストサブシステムの設計

メトロコアネットワークに光バーストスイッチングを導入するには、64 ポート規模の高速マトリックススイッチが必要となる。本論文で提案した導波路偏向型光マトリックススイッチは、入出力ポート間を石英スラブ光導波路内の 2 次元自由空間を伝搬するコリメートビームで接続する構造であり、この部分にはポート数を制約する固定的な構造を必要としない。したがって、入出力部のポート並列度を増すことでチャンネル数を拡張できるという長所がある。しかし、チャンネル数に比例して光の偏向角も増やす必要があり、最大駆動電圧も上昇する課題がある。試作した 8×8 スイッチの最大駆動電圧は 300V であるため、同一の設計手法で 64×64 に拡張すると最大駆動電圧を 8 倍に引き上げる必要がある、2400V もの駆動電圧が必要となってしまう。このため、駆動電圧の低減がポート数拡大に際しての最大の課題である。本節では、8×8 スイッチの設計結果と開発途中で得られた知見から、64×64 規模の導波路偏向型マトリックススイッチとサブシステムの設計を行い、これらの実現性について論ずる。

3.6.1 64×64 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチ

64×64 スイッチを実現するためには、8×8 スイッチと同程度の駆動電圧を達成することが必要である。このため、本研究の過程で得られた下記に示す複数のアプローチを同時に適用する。

第一の手段は、偏向素子長サイズの拡大である。光偏向素子をビームの伝搬方向に長くできれば、同じ電圧でも大きな偏向角が得られる。8×8 スイッチの光偏向素子は、PLZT 膜の 1 インチ ϕ の成膜プロセスを適用し、12mm 角で設計しているが、最近確立できた 2 インチ ϕ 成膜プロセスの適用により長さを 25mm まで拡大することで、電圧を 50% 低減できる。

第二の手段は、PLZT 偏向素子の性能向上である。PLZT 光導波路は、薄いほど光導波路に電界を集中できるため、駆動電圧を低減することができる。閉じ込めが強く再現性に優れた高 Δ 化 (2.1%) された PLZT 膜構成を採用し、8×8 スイッチの膜厚 12 μm を 7.5 μm まで薄くすることで、電圧を 38% 低減できる。また、PLZT の E0 係数は La 濃度を制御することで調整可能であるが、E0 係数の上昇に伴って特性が不安定となり、製膜歩留りが低下していた。実験では、単層構成で 45pm/V まで実現できることがわかっているが、8×8 スイッチに適用された PLZT 偏向素子の E0 係数は、製造性を考慮して 30pm/V としていた。プロセスの最適化によりこれを 40pm/V まで向上させることは技術的に可能であり、これにより駆動電圧を 25% 低減できる。

第三の手段は、石英基板のサイズ拡大である。石英スラブ光導波路を長くすれば、偏向角の幅が同じでもカバーできるチャンネル数を増やすことができる。8×8 スイッチでは、6 インチのウェハを適用しているが、最近開発された 8 イ

インチのウェハを用いることで、必要な駆動電圧を 25%低減できる。

これらの手法を表 3.6-1 にまとめた。3 つの手法を同時に適用することで、0.174 倍の駆動電圧の低減効果が得られる。すなわち、駆動電圧の低減策を

表 3.6-1 64×64 スイッチ実現のための駆動電圧の低減手段

駆動電圧の低減手段	具体的な手法	低減効果
(1)偏向素子長の拡大	1インチφ: 12mm → 2インチφ: 25mm	0.5
(2)PLZT偏向素子の 性能向上	高Δ化、膜厚の減少 12μm →7.5μm	0.62
	La濃度最適化 EO係数: 30pm/V →40pm/V	0.75
(3)石英基板のサイズ拡大	6インチ → 8インチ	0.75
低減効果の累積		0.174

64×64スイッチの駆動電圧推定値: $300V \times 8 \times 0.174 \div 420V$

導入した 64×64 スイッチの駆動電圧は、8×8 スイッチの駆動電圧 300V の約 1.4 倍となる 420V と見積もることができる。400V 台の駆動電圧を実現すれば、高耐圧 FET 等の駆動素子の選択肢が広がり、実用的なサイズと消費電力で駆動回路が実現できる。

スイッチング速度については、若干遅くなることが予想される。スイッチング速度は三角プリズム電極の寄生容量に依存するが、スイッチ規模を大きくすると偏向角も大きくする必要があり、それに応じて三角プリズム電極面積や多段数も大きくなる。64×64 スイッチの場合、PLZT 光偏向素子長、膜厚、ビーム幅の関係から、8×8 スイッチと比較して、電極容量が最大 3.5 倍に増加する。したがって、スイッチ単体のスイッチング速度も 3.5 倍遅い $1.2\mu s$ になると推測される。

挿入損失は偏向素子長に比例して大きくなる。スイッチ素子長を 130 mm から 180 mm へ長くしたことで、入力・出力ポートの PLZT 偏向素子長の合計は 12 mm 角×2 から 25 mm 角×2 へ、計 26 mm 増加する。石英スラブ光導波路（導波路レンズ含む）も 24 mm 増加するが、石英光導波路は極めて損失が小さく、この部分の損失増大は無視できる。現状の 8×8 と同等のプロセスで製作した PLZT 光導波路で 64×64 の光偏向素子を形成した場合、挿入損失として 3dB の増加が見込まれ、約 15dB の挿入損失となることが予想される。現状では、ゾル・ゲル法により PLZT 光導波路をスピコート成膜する際、ストリエーションと呼ばれる縞状の屈折率分布の発生が確認されている。ストリエーションの発生状況を図 3.6-1 に示す。この不均一な屈折率分布をなくすことにより、ビーム形状の乱れを抑圧でき、その結果、チャンネル光導波路との結合損失を現状の計 5 dB から計 2 dB 以下まで改善できることをシミュレーションで確認している。今後、PLZT 成膜プロセスを改善し、ストリエーションを抑圧できれば、偏向素子を 25mm 角化した場合でも 64×64 スイッチは 8×8 スイッチとほぼ同等の損失 12 dB で実現できる見通しである。



図 3.6-1 PLZT 偏向素子のストリエーション
(右の明るい部分はプリズム電極)

以上の考察に基づき設計した 64×64PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチのレイアウトを図 3.6-2 に示す。25mm に拡大した偏向素子を入出力ポートに 2 個ずつ配置する。8 インチウェハを適用することで、スイッチサイズは 180mm×75mm となる。表 3.6-2 に 64×64 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの推定特性をまとめた。

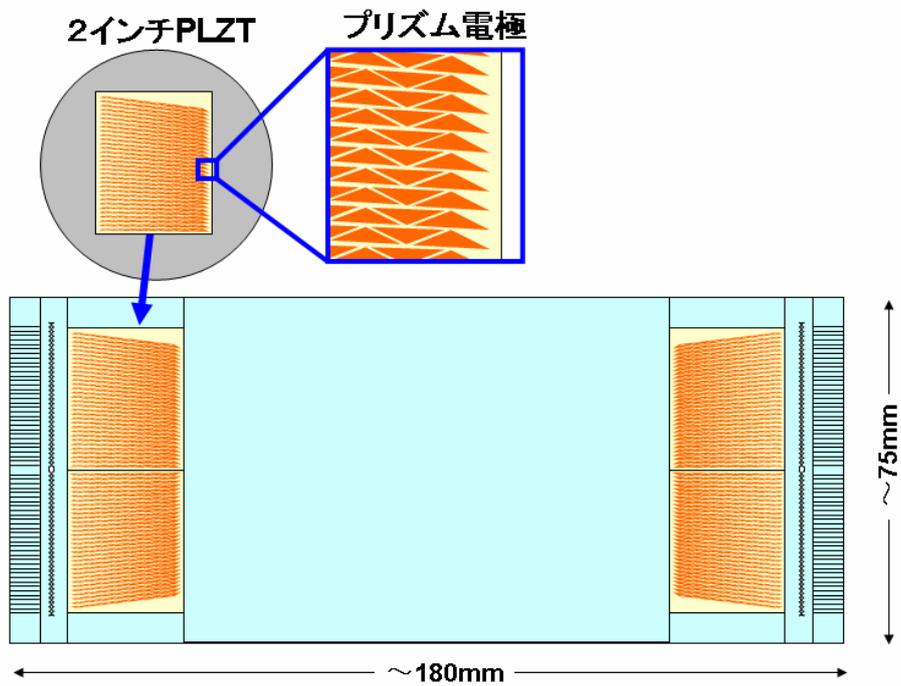


図 3.6-2 64×64 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの構成

表 3.6-2 64×64 PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチの推定特性

項目	諸元	
	8×8 (実測)	64×64 (推測)
光偏向素子 材料 サイズ	PLZT 12 mm角	PLZT 25×50mm
挿入損失 (dB)	12	12~15
最大駆動電圧 (V)	300	420
SW速度 (μ s)	0.35	1.2
外形サイズ (mm)	130×20	180×75
光路設計	放射状構造	
実装技術	はめ込み実装	

3.6.2 64×64 スイッチサブシステム

サブシステムについても、64×64 スイッチを制御する構成について検討を行った。64×64 スイッチサブシステムは、8×8 スイッチサブシステムの8倍の電子回路数が必要となる。光スイッチ駆動回路では、8×8 スイッチの1.4倍の電圧が必要になるが、放熱構造と基板実装設計を最適化することで、現状の8×8と同じサイズで実現可能となり、現状と同じ19インチラック5Uサイズ(約220 mm高)で実現可能と考える。消費電力については、制御回路の最適化とFPGAの低電圧化により、1 kW程度と予想される。

スイッチング速度については、スイッチ単体が持つスイッチング速度と駆動回路の応答速度で決定される。64×64 スイッチ単体が持つスイッチング速度は、前項で述べたように $1.2\mu\text{s}$ と予想される。駆動回路の応答速度は、駆動電圧が1.4倍上昇するに比例し、8×8 スイッチの $1.0\mu\text{s}$ から $1.4\mu\text{s}$ になると予想される。従って、サブシステムとしてのスイッチング速度は駆動回路の速度で律速され、 $1.4\mu\text{s}$ になると見積もられる。この数値は、目標とするVOAなしの場合のスイッチング速度である $1\mu\text{s}$ をわずかながら満足できていないが、重要な速度はバースト信号間のガードタイムである $10\mu\text{s}$ 内にスイッチングすることであり、VOAありの場合のスイッチング速度 $10\mu\text{s}$ 以下は、十分実現可能である。

3.7 結言

本章では、光バーストネットワークを将来のメトロコアネットワークに適用する際に必要となる高速マトリックススイッチとして、PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを提案し、その構成について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) メトロコアネットワーク向けの光バーストスイッチングシステムに必要な $1\mu\text{s}$ 程度の高速スイッチング特性、10dB 程度以下の低挿入損失、64 チャンネル規模までのポート数拡張性、の 3 つ要件を同時に満足するスイッチングデバイスとして、PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを提案した。
- (2) 8×8 規模の PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを設計・試作し、スイッチ単体として 350ns のスイッチング速度、12.4dB の挿入損失を確認し、提案した構成を用いることで高速マトリックススイッチが実現できることを示した。
- (3) PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチとこれを制御する電子回路を一体化した光バーストサブシステムを開発した。サブシステムには、光ノード内での光バースト信号の出力パワーを一定制御する高速光可変減衰 (VOA) 機能を実装し、その有効性を示した。
- (4) 光バーストサブシステムを 3 ノード構成の光バーストスイッチ試験ネットワークに適用し、サブシステムの安定動作と自律的信号衝突回避の実験に成功した。
- (5) 光スイッチの駆動電圧を低減するための 3 つの手法を示し、これを組み合わせることで、 64×64 規模の PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチとそのサブシステムが実現できることを示した。

参考文献

- [3-1] C. Qiao, Y. Chen, and J. Staley, "The potentials of optical burst switching (OBS)," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2003)*, Atlanta, TuJ5 (Feb. 2003).
- [3-2] Z. Pan, H. Yang, M. Funabashi, Z. Zhu, and S. J. Ben Yoo, "Experimental Demonstration of Multicast in an Optical-label

Switching Router with Mixed Data Rates of 10 Gb/s and 2.5 Gb/s," in *Proc. 31rd European Conference on Optical Communication (ECOC2005)*, Glasgow, U.K., Th.2.4.1 (Sept. 2005).

- [3-3] A. Al Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, M. Tanemura, Y. Nakano, R. Inohara, K. Nishimura, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, Y. Miyazaki, T. Miyahara, T. Hatta, K. Motoshima, K. Kagimoto, T. Kurobe, A. Kasukawa, H. Arimoto, S. Tsuji, and H. Uetsuka, "40/10Gbps bit-rate transparent burst switching and contention resolving wavelength conversion in an optical router prototype," in *Proc. 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006)*, Cannes, France, Th.4.1.6 (Sept. 2006).
- [3-4] A. Al Amin, 清水克宏, E. Gouardes, 竹中充, 中野義昭, “波長変換共有型光バーストスイッチングノードの設計と縦続接続性の評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS6-1 (2005年9月).
- [3-5] H. Onaka, "Current status of electro-optic modulators and switches based on ferroelectric materials," in *Proc. 30th European Conference on Optical Communication (ECOC2004)*, Stockholm, Sweden, Tu4.6.3 (Sept. 2004).
- [3-6] 長岡新二, “自己保持型 1×2 単一モード光ファイバスイッチ,” 電子情報通信学会秋季大会, C-200 (1990年9月).
- [3-7] 小林啓邦, 梶塚秀治, 堀中拓郎, “メカニカル光スイッチ技術,” 沖テクニカルレビュー, 第200号 Vol.71 No.4, pp.78-81 (2004年10月).
- [3-8] 堀野正也, 佐藤和恭, 林幸夫, 三田正裕, 西山俊一, “ファイバ切換式平面型光スイッチの開発,” 電子情報通信学会論文誌(C), Vol.J83-C, No.8, pp.681-688 (2000年8月).
- [3-9] H. Toshiyoshi and H. Fujita, "Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix," *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.5, No.4, pp.231-237 (Dec.1996)
- [3-10] H. Laor, "Construction and performance of a 576x576 single-Stage OXC," in *Proc. 12th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS'99)*, Piscataway, NJ, Vol.2, WK1, pp.481-482 (Nov. 1999).
- [3-11] D. T. Neison, V. A. Aksyuk, S. Arney, N. R. Basavanhally, K. S. Bhalla, D. J. Bishop, B. A. Boie, C. A. Bolle, J. V. Gates, A. M. Gottlieb, J. P. Hickey, N. A. Jackman, P. R. Kolodner, S. K. Korotky, B. Mikkelsen, F. Pardo, G. Raybon, R. Ruel, R. E. Scotti, T. W. Van

- Blarcum, L. Zhang, and C. R. Giles, "Fully Provisioned 112x112 Micro-Mechanical Optical Crossconnect with 35.8Tb/s Demonstrated Capacity," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2000)*, Baltimore, Maryland, PD12-1 (March 2000).
- [3-12] H. Okayama and M. Kawahara, "Prototype 32×32 optical switch matrix," *IEE Electronics Letters*, Vol.30, No.14, pp.1128-1129 (July 1994).
- [3-13] M. Okuno, K. Kato, Y. Ohmori, and T. Matsunaga, "Improved 8x8 Integrated Optic Matrix Switch using Silica-Based Planar Lightwave Circuit," in *Proc. 4th Optoelectronics Conference (OEC'92)*, Chiba, 17A4-2 (July 1992).
- [3-14] M. Okuno and H. Takahashi, "Recent progress in optical switches based on planar lightwave circuit technology," in *Proc. IEEE/LEOS Summer Topical Meeting*, Quebec, Canada, WD2 pp.55-56 (July 2002).
- [3-15] M. Makihara, M. Sato, F. Shimokawa, and Y. Nishida, "Micromechanical Optical Switches Based on Thermocapillary Integrated in Waveguide Substrate," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.17, No.1, pp.14-18 (Jan. 1999).
- [3-16] M. Makihara, F. Shimokawa, and K. Kaneko, "Strictly Non-blocking NxN Thermo-Capillarity Optical Matrix Switch using Silica-based Waveguide," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2000)*, Baltimore, Maryland, TuM2-1 (March 2000).
- [3-17] J. E. Fouquest, "Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid-containing planar lightwave circuit," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2000)*, Baltimore, Maryland, TuM1-1 (March 2000).
- [3-18] 金子和政, "メカニカル光クロスコネク ト技術," 電子情報通信学会技術研究報告 PS-2004, Vol.4, pp.19-24 (2004年4月).
- [3-19] T. Shibata, M. Okuno, T. Goh, M. Yasu, M. Itoh, M. Ishii, Y. Hibino, A. Sugita, and A. Himeno, "Silica-based 16×16 optical matrix switch module with integrated driving circuits," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2001)*, Anaheim, CA., WR1 (March 2001).
- [3-20] H. Okayama and M. Kawahara, "Experiment on deflector-selector optical switch matrix," *IEE Electronics Letters*, Vol.28, No.7,

pp.638-639 (March 1992).

- [3-21] E. Shekel, A. Feingold, Z. Fradkin, A. Geron, J. Levy, G. Matmon, D. Majer, E. Rafaely, M. Rudman, G. Tidhar, J. Vecht, and S. Ruschin, "64 × 64 fast optical switching module," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2001)*, Anaheim, CA., TuF3 (March 2002).
- [3-22] A.Kar-Roy and C.S.Tsai "8×8 symmetric nonblocking integrated acoustooptic space switch module on LiNbO₃," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.4, No.7, pp.731-734 (July 1992).
- [3-23] V.J. Fowler and J.Schlafer, "A survey of laser beam deflection techniques," *Proceedings of the IEEE*, Vol.54, No.10, pp.1437 - 1444 (Oct. 1966).
- [3-24] 尾中寛, 甲斐雄高, 瀧田裕, 菅間明夫, 青木重憲, 佐藤桂輔, アルアミン・アブドゥッラー, 種村拓夫, 中野義昭, "PLZT 導波路偏向型光マトリクススイッチを用いた光バーストスイッチサブシステム," 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J91-B, No. 3 (2008年3月掲載予定).
- [3-25] K. Tsukamoto, A. Sugama, Y. Wakino, T. Miyashita, and M. Kato, "Simple Micro-lens with Polymer-Filled Trench in Slab Waveguide," *FUJITSU Science Technology Journal*, Vol.38, pp.54-63 (June 2002).
- [3-26] J. R .Busch, S. D. Ramamurthi, S. L. Swartz and V. E. Wood, "Linear electro-optic response in sol-gel PZT planar waveguides," *IEE Electronics Letters*, Vol.28, No.17, pp.1591-1592 (Aug. 1992).
- [3-27] Larry Dalton, "Breaking the Bandwidth Bottleneck in Telecommunications and Information Processing New Electro-Optic Materials," in *Proc. 10th Foresight Conference on Molecular Nanotechnology*, Bethesda, Maryland, pp.412-413 (Oct 2002).
- [3-28] A. Sugama M. Ishii, T. Akahoshi, K. Sato, M. Doi, T. Shiraishi, M. Kato, and H. Onaka, "Electro-optic beam-deflection switch for photonic burst switching," in *Proc. 30th European Conference on Optical Communication (ECOC2004)*, Stockholm, Sweden, Mo4.6.3 (Sept. 2004).
- [3-29] Y. Kai, Y. Takita, Y. Aoki, A. Sugama, S. Aoki, and H. Onaka, "4×4 high-speed switching subsystem with VOA (<10μs) using PLZT beam-deflector for optical burst switching," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2006)*, Anaheim, CA., OFJ7 (March 2006).
- [3-30] 瀧田裕, 甲斐雄高, 青木泰彦, 菅間明夫, 青木重憲, 尾中寛, "高速

VOA 制御機能付 4x4 光バーストスイッチサブシステム,” 電子情報通信学総合大会, B-10-37 (2006 年 3 月).

- [3-31] A. Sugama, T. Aakahoshi, K. Sato, S. Aoki, Y. Kai, Y. Takita, M. Kato, and H. Onaka, “Integrated 8x8 electro-optic high-speed switch for optical burst transport networks,” in *Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC2007)*, Anaheim CA., OWV2 (March 2007).
- [3-32] A. Al Amin, M. Takenaka, T. Tanemura, K. Shimizu, R. Inohara, K. Nishimura, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, H. Onaka, H. Uetsuka and Y. Nakano , "Experimental Validation of Deflection Routing in a 3-Node Optical Burst Core Network with 40Gb/s Edge Nodes," in *Proc. 33rd European Conference on Optical Communication (ECOC2007)*, Berlin, Germany, Paper 1.6.2 (Sept. 2007).
- [3-33] Abdullah Al Amin, Mitsuru Takenaka, Takuo Tanemura, Katsuhiko Shimizu, Ryo Inohara, Kohsuke Nishimura, Masashi Usami, Yutaka Takita, Yutaka Kai, Hiroshi Onaka, Hisato Uetsuka and Yoshiaki Nakano, "Demonstration of Deflection Routing with Layer 2 Evaluation at 40Gb/s in a 3-Node Optical Burst Switching Testbed," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.20, No.3, pp.178-180 (Feb. 2008).

第4章 音響光学型波長可変フィルタを用いたフォトニックゲートウェイ

4.1 緒言

メトロアクセスネットワークは、企業ネットワークをはじめ、今後、広く普及が期待される ISP (Internet Service Provider)、IDC (Internet Data Center)、CDN (Contents Delivery Network)、SAN (Storage Area Network) 等のビジネスを支える重要なネットワークである。本ネットワークは、多様な事業者の様々な広帯域サービスが多くユーザに提供される領域であるが、エンドユーザに近いネットワークであるため、サービス内容の変更や通信拠点の移設、増設が頻繁に発生し、データ転送需要が日毎、時間毎に変動する領域である。そのため、メトロアクセスネットワークでは、広帯域パスを各拠点の転送要求に応じて柔軟に経路変更し、かつ、それを廉価に提供する必要がある。現在のメトロアクセスネットワークは、このような機能を電気のスイッチ(レイヤ2)やルータ(レイヤ3)で実現している。

今後のトラフィックの増大に対応するため、10Gb/s から 100Gb/s という容量を持つ波長ベースのサービスを、分単位から秒単位、さらにはミリ秒単位の粒度で課金するようなシステムを構築できれば、地域に分散したサーバ、ストレージ等の IT 資源をオンデマンドで接続し、これらを仮想化して利用する、ユーティリティコンピューティングなど、従来に無い新しいサービスの創設が期待される。このようなサービスを実現する次世代メトロアクセスネットワーク用ノード装置は、以下の要件を満たす必要があると考えられる。

- (1)データ伝送中心の多様なサービス (VPN、SAN、CDN、波長貸し、FTTH 等)、とそれを支える多様なインタフェース (GbE/10GbE、OC-48/192、FDDI、ESCON 等)を收容する、トランスペアレントなネットワーク用ノード装置であること。
- (2)低コスト光送受信モジュールやレイヤ 2/レイヤ 3 スイッチが適用されるため、これらと整合が取れ、極めて高い経済性と高信頼を有するノード装置であること。
- (3)要求に応じた迅速な波長パス設定が、煩雑な現場作業を伴わずに、クリックアンドプロビジョニングで実現可能なノード装置であること。
- (4)光信号を複数のノードに分配するマルチキャスト機能、全ノードに一斉配信するブロードキャスト機能を有すること。
- (5)ユーザ要求に応じて瞬時に波長を $10\mu\text{s}$ 程度で切り換える光バースト信号に対応可能であること。

本章では、これらの要件を満たし、必要な機能と経済性を最適化したノード装置を「フォトニックゲートウェイ」と新たに命名し、その検討を行う。

フォトニックゲートウェイの具体的な適用例を図 4.1-1 に示す。フォトニックゲートウェイは、オフィス街の企業、ビル間の接続、各地域の POP (Point Of Presence) からユーザサイトへの配信ネット、地方自治体等のコミュニティネットとして利用される。必要とされるネットワークサイズは、大都市での企業間、放送局間、コミュニティネットワーク、コンテンツデリバリネットワーク、

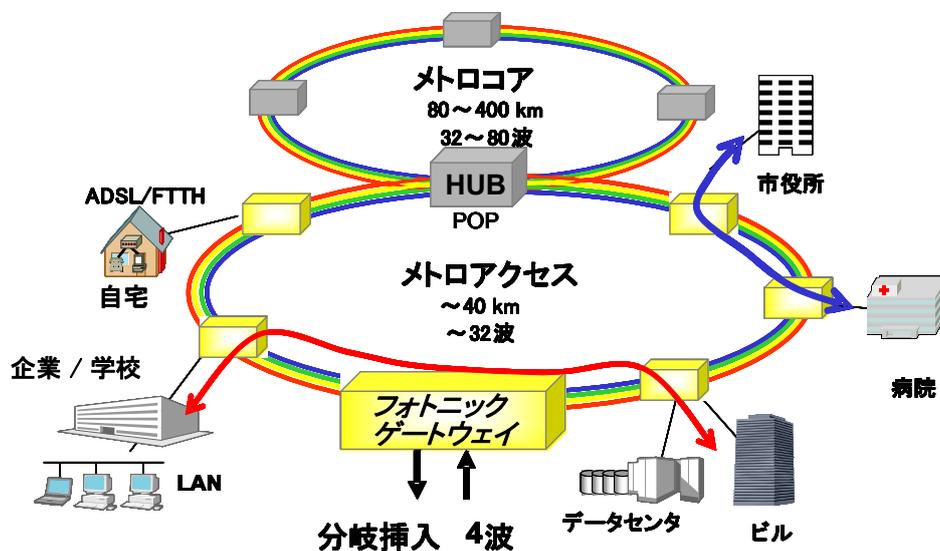


図 4.1-1 フォトニックゲートウェイの適用例

データセンタ間接続には数十 km の範囲での応用が想定され、拠点が離れ分散した地方都市での利用やディザスタリカバリ等の応用で離れたデータセンタ間を接続する場合は、200km 程度の伝送距離が必要となる。また、通信拠点となるノード数は 8 程度、1つのノードで平均的に分岐挿入される波長は 4 波程度と考えられる。また、トラフィックが一極集中する拠点や、POP でのバックボーン接続との拠点には、16~32 波長程度を処理するハブノードを導入する。

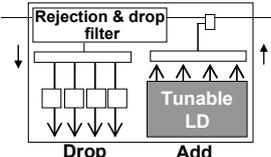
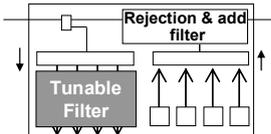
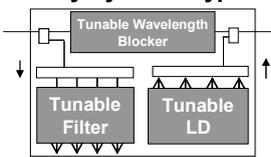
4.2 フォトニックゲートウェイ

4.2.1 フォトニックゲートウェイの基本構成

前節で述べたように、本論文で想定する次世代メトロアクセスネットワークは、4~8 波を処理する多数のフォトニックゲートウェイとハブの役割を果たし、16~32 波程度を扱う大規模ノードで構成されるリングネットワークである。このため、フォトニックゲートウェイは、入力ポート、出力ポートとも1つである OADM(Optical Add Drop Multiplexer)の構成となる。本節では、フォトニックゲートウェイに最適な OADM の基本構成、適用する光デバイスについて考察する。

波長パスに切り替えが可能な OADM の構成と、これをフォトニックゲートウェイに適用する場合の得失を表 4.2-1 に示す。任意のノード間に波長パスを設

表 4.2-1 波長パスを動的に切り替える OADM の構成

	Architecture	Advantages	Disadvantages
A	 <p>Rejection & drop filter Drop Add Tunable LD</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Simple configuration 	<ul style="list-style-type: none"> • No reuse of wavelength • High cost
B	 <p>Rejection & add filter Tunable Filter</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Simple configuration • Broadcast/Multicast • Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> • No reuse of wavelength
C	 <p>Tunable Wavelength Blocker Tunable Filter Tunable LD</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reuse of wavelength • Broadcast/Multicast 	<ul style="list-style-type: none"> • Complicated configuration • High cost

定するには、構成 A：送信側の光源波長を可変させる構成、構成 B：受信側の光フィルタを可変させる構成、構成 C：送信側・受信側ともに可変させる構成、の3形態がある。このうち、構成 A は、メトロアクセスでの画像コンテンツ配信に不可欠な波長レベルでのブロードキャスト/マルチキャストが実現で

きないという課題がある。また、構成Cは同一ネットワーク内での波長リソースの再利用が可能であるなどの利点を持つが[4-1]、構成が複雑で高い経済性が求められるフォトニックゲートウェイには適さない。一方、構成Bは波長レベルでのブロードキャスト/マルチキャストに対応可能であり、次世代メトロアクセスネットワークにはもっとも適した構成と考えるが、これまで実用的な波長可変フィルタが開発されていなかった。

本研究では、構成Bの課題であった波長可変フィルタとして、音響光学型波長可変フィルタ(AOTF：Acousto Optic Tunable Filter)に着目した。4.4節で述べるようにその基本特性を大幅に改善し、WDM装置で標準的な波長間隔となっている100GHz間隔のWDM信号の波長選択性能とマイクロ秒単位の高速度切り替え性能を実現し、フォトニックゲートウェイに適用する。

本研究で提案する、構成Bをベースにしたフォトニックゲートウェイの基本構成を図4.2-1に示す。分岐部は光カプラとAOTF型波長可変フィルタ、挿入

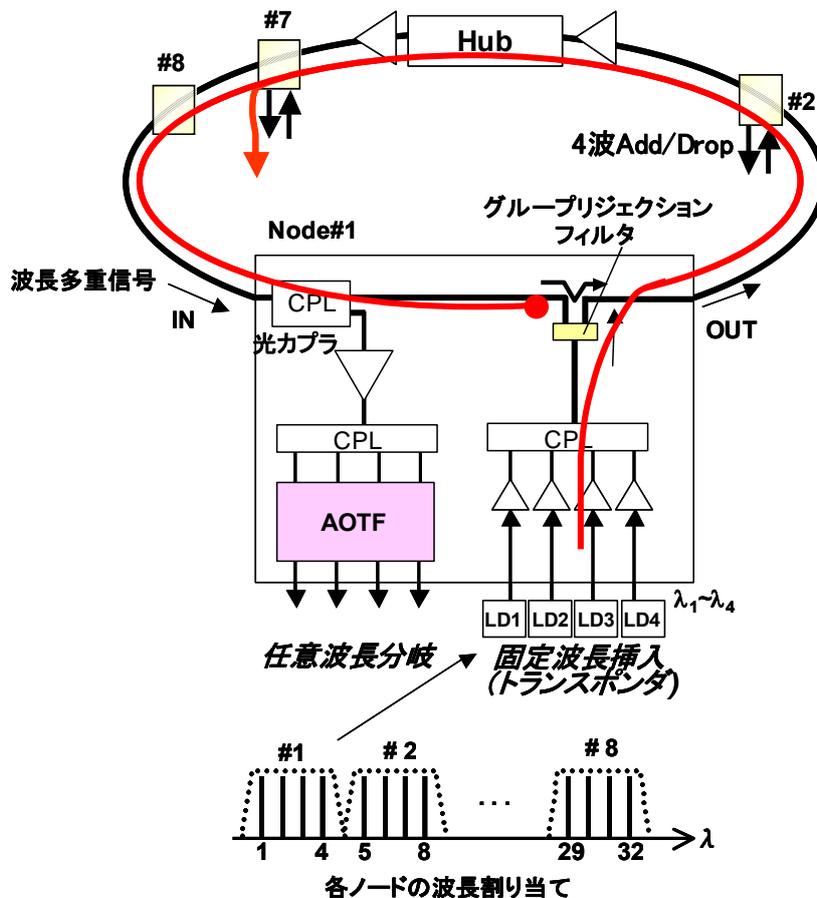


図 4.2-1 フォトニックゲートウェイの基本構成

部は固定波長光源を搭載したトランスポンダとグループリジェクションフィルタで構成される。挿入部の固定波長光源は予め決まった波長グループを各ノードに割り当てる。これらの挿入光はグループリジェクションフィルタの挿入ポートから低損失で伝送路に合波される。伝送路の挿入光は一周した後、多重周回と挿入光との干渉を避けるため、自ノードのグループリジェクションフィルタで終端される。

提案する構成は、送信ノード毎に隣接した 4~8 波の固定送信波長をグルー

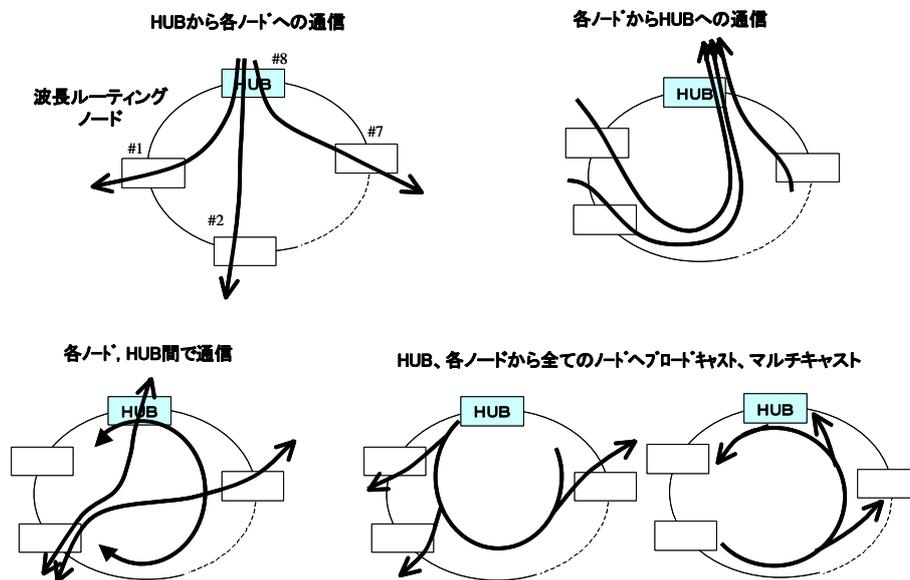


図 4.2-2 フォトニックゲートウェイの通信接続機能

ピングしてプリアサインすること、これらの送信波長のライン側への合波フィルタをリングネットワークでの波長周回を防ぐリジェクションフィルタと兼用させることが構成上の大きな特徴である。また、AOTF デバイスは、広い波長域 (~100 nm) に互って高速に波長選択が可能であり、さらに光導波路デバイスで複数チャネルの集積化が可能であるため、小型化、低廉化が可能である。

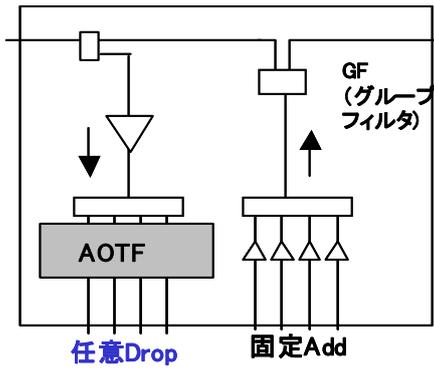
図 4.2-2 にフォトニックゲートウェイの通信接続機能を示す。フォトニックゲートウェイは AOTF の選択波長をソフトウェアで制御し、波長分割多重信号中の所望ノードからの波長のみを選択受信する。本ノードでは挿入部の波長は

固定であるが、分岐部 AOTF の任意波長選択機能により任意ノード間を波長パス単位で柔軟に接続設定可能となる。また、複数のノードで同一波長を AOTF により選択することで波長レベルのマルチキャスト、ブロードキャストも可能となる。

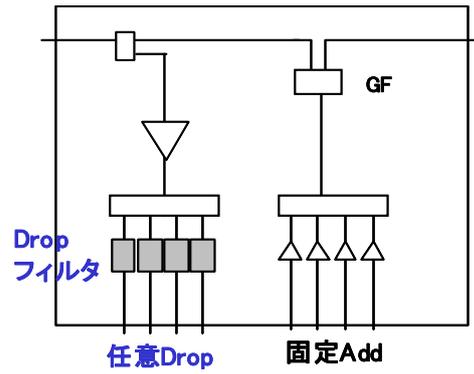
4.2.2 各種ノード構成と経済性の比較

本項では、提案するフォトニックゲートウェイの優位性を部品コストの観点から具体的に検証する。比較した構成は、①AOTF を使用した構成(フォトニックゲートウェイ)、②機能を①とほぼ同じとした誘電体多層膜型波長可変フィルタを使用した構成、③波長可変レーザを使用した構成、④MEMS (Micro Electro Mechanical System)を使用した構成、である。これらの各種光デバイスを使用した構成を図 4.2-3 に示す。フォトニックゲートウェイと同機能を持つ構成は、ノードの送信部あるいは受信部のどちらかに波長選択機能を有しているが、②は受信部側、③は送信部側に波長選択機能を持ち、④の MEMS 型は光合分波器と MEMS スイッチとの組み合わせでこの機能を実現している。ただし、③の波長可変レーザ型は、各ノードに予め決められた固定波長フィルタを搭載し、宛先ノードの固定フィルタの波長に合わせて送信元ノードの波長を发出するため、同一波長を複数ノードに配信するマルチキャスト、ブロードキャスト機能が実現できない。これら 4 つ構成の部品コストを図 4.2-4 に示す。この図は、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイのコストを 1 とした相対コストを示している。また、全ての構成で共通に使われる光トランシーバなどは除外し、構成上の差分が発生する光部分のみの比較を行っている。同図より、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイは他構成より低廉になることが分かる。これは、波長可変レーザ、MEMS、光合分波器のコストが集積化された AOTF よりも相対的に高いためであり、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイは、波長可変レーザ型の $2/3$ 、MEMS 型の $1/2$ のコストで実現可能である。

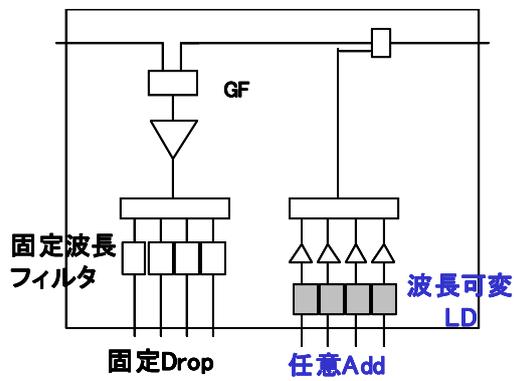
図 4.2-5 はフォトニックゲートウェイと市販のメトロアクセス用システムとの機能ならびに経済性を比較したものである。この図は横軸に 1 ノードあたりの分岐挿入波長数を、縦軸にはネットワークのフレキシビリティをとっており、上に行くほどネットワーク運用管理が容易となる。現在の主流は POADM(Passive Optical Add Drop Multiplexer)と呼ぶ固定波長型の製品である。また、ごく最近になってフレキシビリティが向上した ROADM(Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer)が製品化されつつある。フォトニックゲートウェイは、分岐挿入波長数は少ない構成であるが、機能的には一番高度な DOADM(Dynamic Optical Add Drop Multiplexer)と呼ぶ波長パスの遠隔切替えが可能な機能を備えている。その上で、固定波長型の既存システムと同等の低廉性を実現可能であることが分かる。



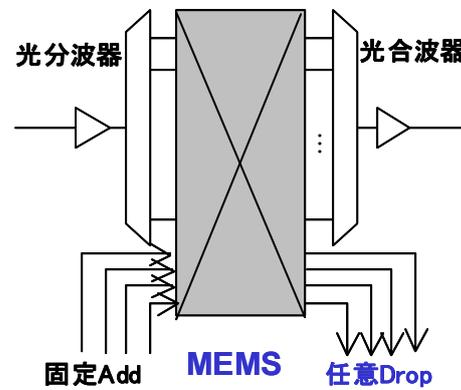
①AOTF 型(フォトニックゲートウェイ)



②誘電体多層膜型波長可変フィルタ型



③波長可変レーザ型



④MEMS 型

図 4. 2-3 各種光デバイスを使用したノード構成

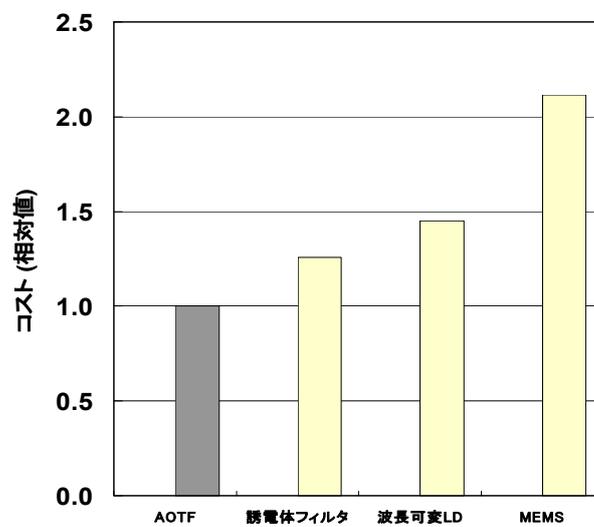


図 4. 2-4 各構成の経済性比較

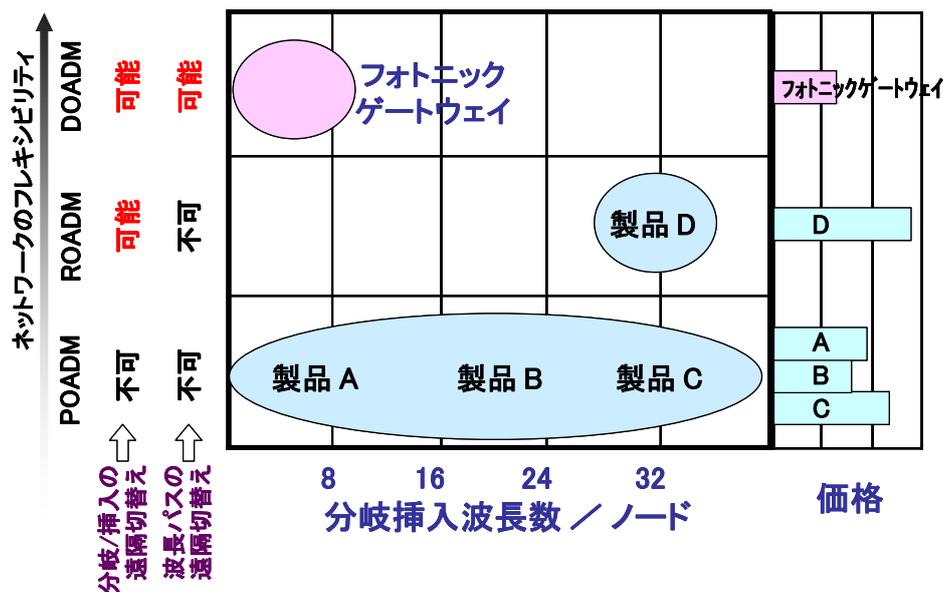


図 4.2-5 既存システムとの経済性比較

以上のように、本研究で提案する構成は、実用域まで必要な機能を絞り、集積化デバイスの特性を活かすことで、メトロアクセスネットワークに適した経済性の高いノード構成であることを明らかにした。

4.3 音響光学型波長可変フィルタ (AOTF)

4.3.1 動作原理

音響光学型波長可変フィルタ (AOTF : Acousto Optic Tunable Filter) は、音響光学効果 (Acousto optic effect) を光波の制御に用いた波長可変フィルタである。本研究では、図 4.3-1 に示す、X カット- ニオブ酸リチウム (Xcut-LiNbO₃) を基板とした導波路型の AOTF を用いる。基板の表面には、1.55 μm 帯の光がシングルモードとなるように、Ti のパターンニング・拡散を行い光導波路が形成されている。また、基板上には、表面弾性波 (SAW : Surface Acoustic Wave) を発生させる楕形電極 (IDT : Inter-digital Transducer) と誘電体薄膜の SAW 導波路が形成されている。楕形電極に、170MHz 前後の RF 信号を印加すると、SAW が励振される。SAW が伝搬している直線の光導波路内では、音響光学効果により、特定の波長の偏波モードが回転する。このため、光導波路の出口に偏光ビームスプリッタ (PBS : Polarization Beam Splitter) を配置することにより、波長選択性を得ることができる。AOTF による選択波長 λ

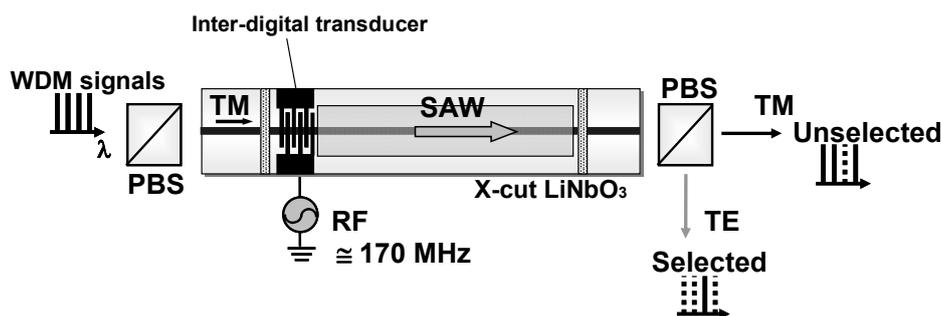


図 4.3-1 AOTF の基本構成

は式 4.3.1 により与えられる。ここで、 n_o と n_e は、それぞれニオブ酸リチウムの常光、異常光に対する屈折率であり、 Λ は SAW の周期である。

$$\lambda = (n_o - n_e) \Lambda \quad (4.3.1)$$

4.3.2 AOTF の特性改善

システムに適用する AOTF は基本構成に加え、特性改善のための様々な工夫がこらされている。まず、図 4.3-2(a) に示すようにニオブ酸リチウムに導波路型の PBS が集積化され、AOTF の偏光無依存動作を実現した。また、SAW ガイドを光導波路に対して斜めに形成することで、伝搬中の光波と SAW の相互作用の導波路長手方向に対する重みづけが実現され、AOTF の透過帯域幅の狭帯域化が実現された[4-2]、[4-3]。さらに、図 4.3-2(b) に示すように、SAW を TE 導波路と TM 導波路に個別に整形し、かつ、2 段継続接続する構成をとることで、100GHz 間隔の WDM 信号に対応する高性能な AOTF を実現している。図 4.3-3 に改良された AOTF の波長選択特性を示す[4-4]。TM 偏光、TE 偏光ともほぼ同一の波長選択特性が得られており、偏光無依存動作を実現している。また、透過半値幅は 0.5nm であり、10Gb/s の信号を劣化なしにフィルタリングすることが可能である。サイドローブと透過ピークのレベル差は、27dB 以上を確保している。また、100GHz 間隔で多重化された WDM でクロストークが効果的に抑圧できるように、サイドローブのディップ位置が透過中心波長から、100GHz 間隔となるように設計パラメータが最適化されている。図 4.3-4 に、AOTF の波長チューニング特性を示す。AOTF は、100nm 以上のチューニング領域を有しており、一つのデバイスで C バンド帯と L バンド帯に対応することが可能であることが分かる。また、100nm のチューニング領域全域でサイドローブ特性の

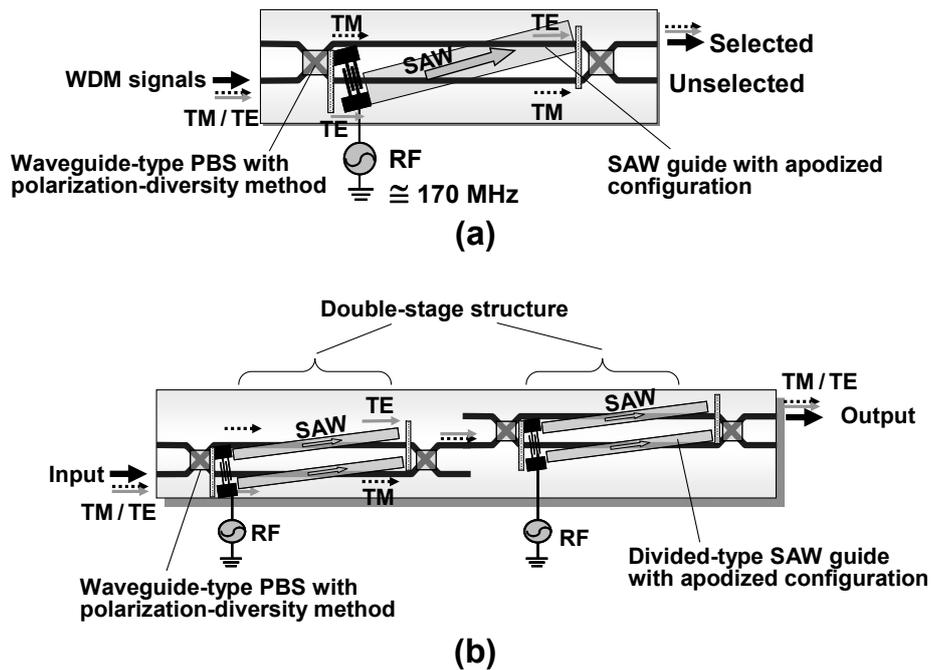


図 4.3-2 PBS と重みづけ SAW ガイドを形成した AOTF の構成

変化が無い事、40dB 以上の遮断特性を持つことが確認できる。

図 4.3-5 に AOTF の駆動 RF パワー特性を示す。AOTF に印加する RF 周波数を 15MHz 変化させることで、100nm のチューニング領域が実現できること、印加する RF パワーは 20mW 以下と極めて低いことが分かる。特に、SAW ガイドを 2 つに分割して光導波路上に配置する分割 SAW ガイドを考案し、SAW の利用効率を向上することによって、C バンド帯と L バンド帯ともに 10mW 以下の駆動電力を実現している。AOTF のチューニング領域の両端で所用 RF パワーが上昇しているのは、この領域で印加する RF 周波数に対する楕形電極のインピーダンスミスマッチに起因する。図 4.3-6 に AOTF の挿入損失特性を示す。100nm のチューニング域全域での光ファイバ間の最大挿入損失は 3.8dB であり、C バンド帯と L バンド帯に限定すると、3.5dB の挿入損失が得られている。図 4.3-7 に 4 チャンネル AOTF アレイチップの構成とモジュールの外観を示す。導波路型デバイスの特性を活かすため、4 チャンネル分の AOTF を同一基板上から切り出し、一つの筐体に収容している。AOTF の作成歩留りを向上させることで、1 チャンネルあたりの AOTF のコストを低減することが可能である。

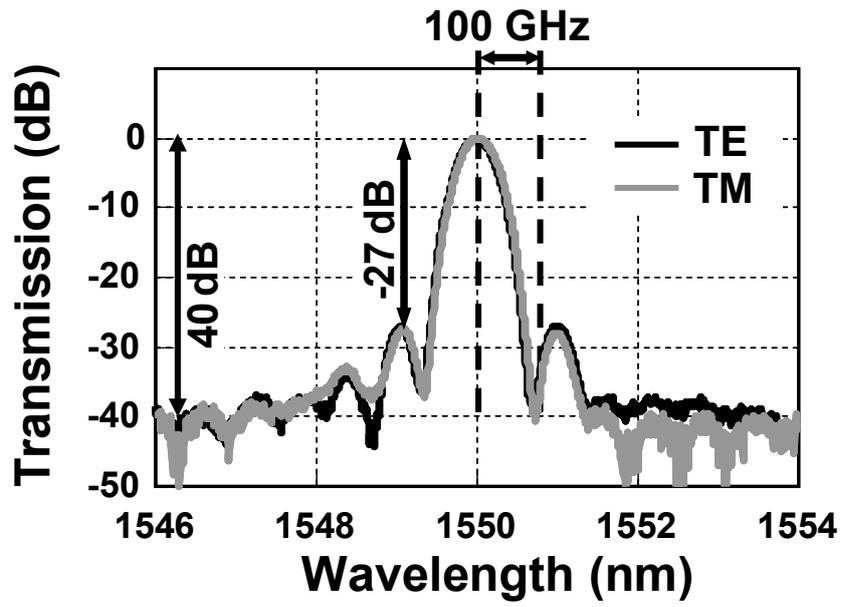


図 4.3-3 AOTF の波長選択特性

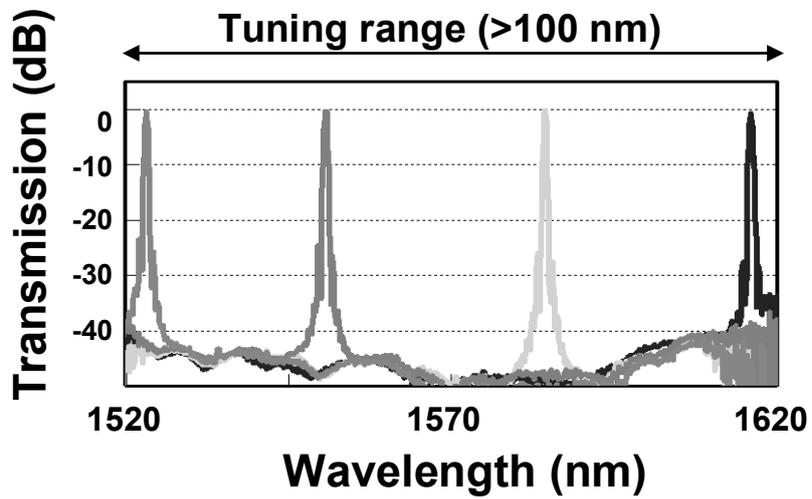


図 4.3-4 AOTF の波長チューニング特性

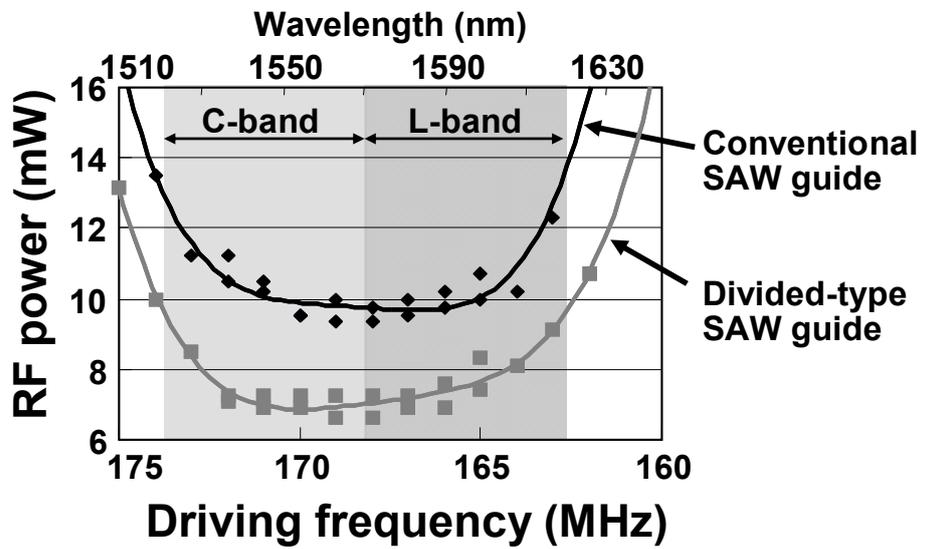


図 4.3-5 AOTF の駆動 RF パワー特性

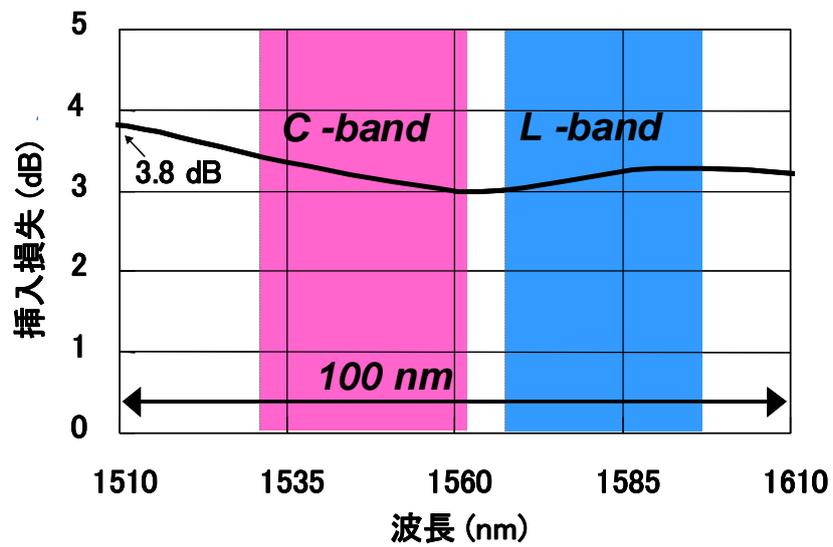


図 4.3-6 AOTF の挿入損失特性

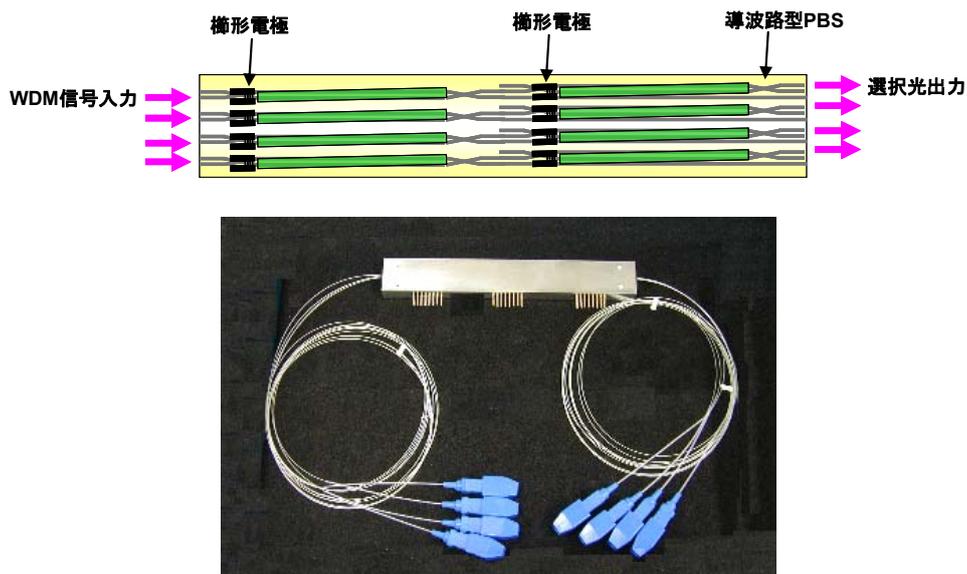


図 4.3-7 4チャンネル AOTF アレイチップの構成とモジュールの外観

4.3.3 AOTF サブシステム

AOTF の特長を最大限に活かし、安定動作させるためには、波長選択開始時の高速 RF 周波数切り替え、波長サーチ、選択後の RF 周波数トラッキング制御および、制御回路の高速小型化が必要である。これらの AOTF を制御するための電子回路、ファームウェアなどを AOTF モジュールと同一筐体の実装したものを AOTF サブシステムと呼称する。AOTF サブシステムの構成を図 4.3-8 に示す。本サブシステムは光カプラ、AOTF モジュール、モニタ回路、制御演算回路、RF 駆動回路から構成されており、波長分割多重信号の中から任意の 4 波長を独立して同時に選択することが可能である [4-5]。

AOTF の制御は 175 MHz 近傍の電気 RF 信号を印加することにより行う。制御 RF 信号の周波数と AOTF により選択される波長は 1 対 1 に対応しており、周波数を変化させることにより任意の波長を選択することができる。波長選択動作時には、AOTF は所望の波長を検出する必要があり、波長選択後はその波長を逃すことなく常に選択し続ける必要がある。しかし、AOTF は温度変動により選択波長と制御信号周波数の関係が変化する特性を持っている。温度変化に対する制御周波数変化は約 100 kHz/°C である。制御周波数に対する選択波長変化は約 0.8 nm/100 kHz であり、1°C の AOTF の温度変化で 0.8 nm (100 GHz) の選択波長誤差が生じる。すなわち、100 GHz 間隔の波長分割多重信号を処理する場合、1°C の AOTF の温度変化で隣接チャンネルを誤って選択することになる。

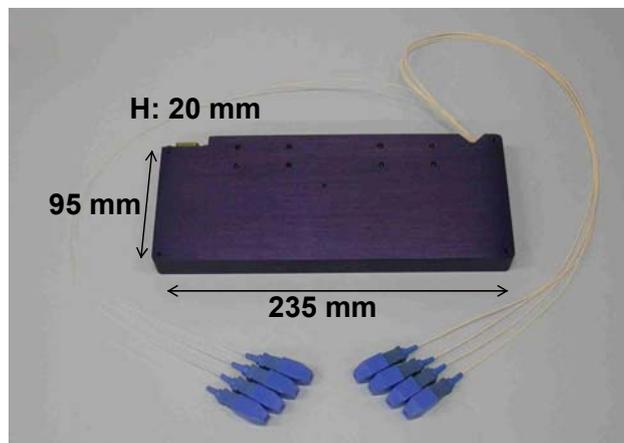
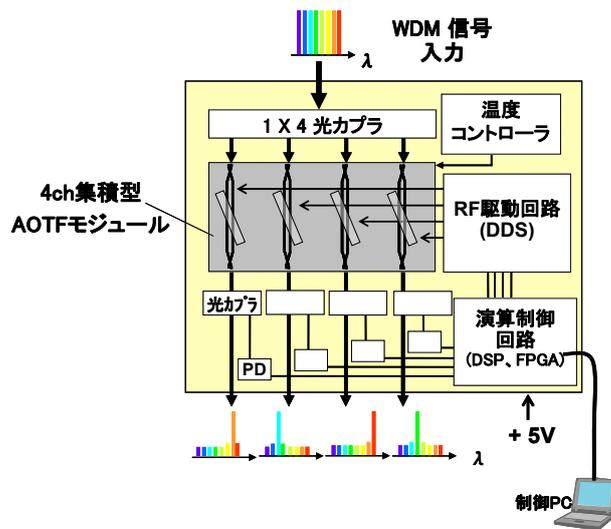


図 4.3-8 AOTF サブシステムの構成と外観

また、送信光源の波長揺らぎによる選択信号自身の波長変化が選択波長エラーの原因ともなる。選択波長の誤りはルーティング装置としては致命的であり、誤りなく正確に所望の波長を選択する制御が必須になる。AOTF の高速波長選択特性を十分に活かすためには、RF 駆動回路の高速周波数切り替えを実現する必要がある。このため、RF 駆動回路として高速動作可能な DDS (Direct Digital Synthesizer)、演算制御回路として DSP、FPGA を用いた高速演算回路を設計した。さらに、波長サーチ処理等ファームアルゴリズムも新規に開発した。これら施策により回路の小型化、波長選択スイッチング動作の高速化、波長選択安定性の向上を図ることができた。

試作した RF 駆動回路モジュールの周波数切り替え速度を図 4.3-9 に示す。

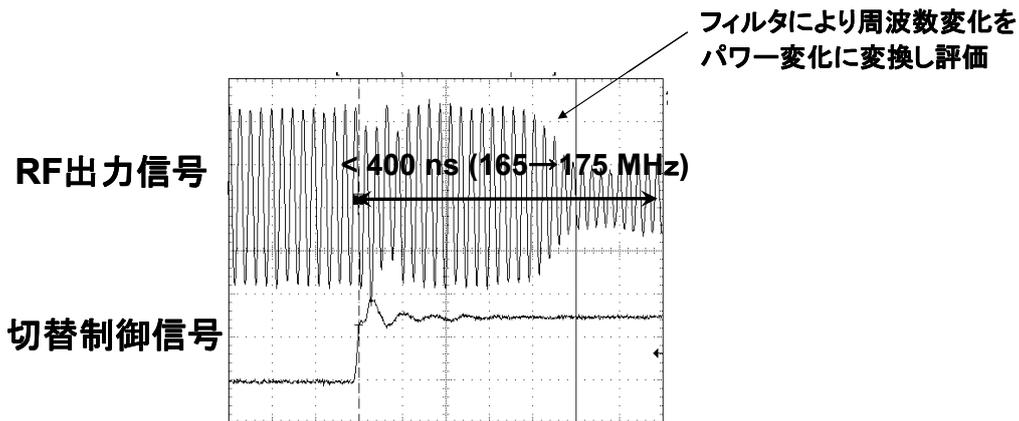


図 4.3-9 RF 駆動回路の周波数切り替え速度

ここでは周波数 165 MHz から 175 MHz への切り替え速度を測定した。周波数の変化を判別するためオシロスコープの入力部にフィルタを挿入し、フィルタの透過スロープを利用し周波数の変化を振幅の変化に変換して測定した。周波数切り替え速度は 400 ns と AOTF の動作速度よりも十分高速な値を実現することができた。

AOTF サブシステムの波長切り替え速度の測定結果を図 4.3-10 に示す。この応答速度は、DSP により RF 駆動回路を制御した場合の、AOTF によるドロップ

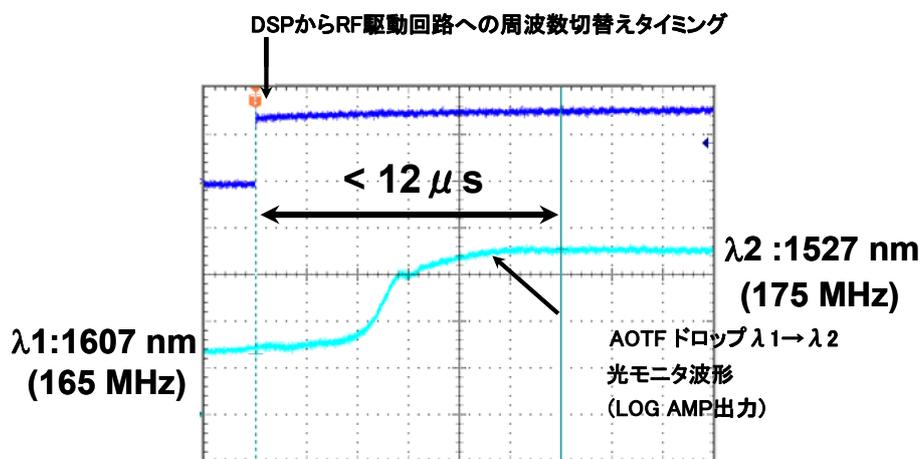


図 4.3-10 AOTF サブシステムの波長切り替え速度

光波長切り替え速度であり、AOTF サブシステムで選択可能な最長波長 λ_1 (1607 nm) から最短波長 λ_2 (1527 nm) への切り替え速度を測定している。その結果、DSP からの周波数切り替えタイミングから波長切り替えまで $12\mu\text{s}$ で制御できることを確認した。

$12\mu\text{s}$ という切り替え速度は、AOTF 素子単体の応答速度にほぼ一致し、これはニオブ酸リチウム基板の SAW 伝搬速度で決定される速度である。この高速切り替え特性は、メトロアクセスネットワークにおいて、効率的で柔軟な光バーストスイッチングシステムを構築するために十分な速度であり、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイは、波長単位でのネットワーク接続をオンデマンドで提供する回線接続の機能から、バーストスイッチング接続までをシームレスに、かつ、高い経済性で提供することが可能である。

4.4 フォトニックゲートウェイの設計と試作結果

4.4.1 プロトタイプ機的设计と試作

本研究で提案するフォトニックゲートウェイの動作と有効性を検証するため、基本機能のみを実装したプロトタイプ機的设计試作を行った[4-6]。図 4.4-1 にプロトタイプ機の構成を示す。本プロトタイプ機では、入力した波長

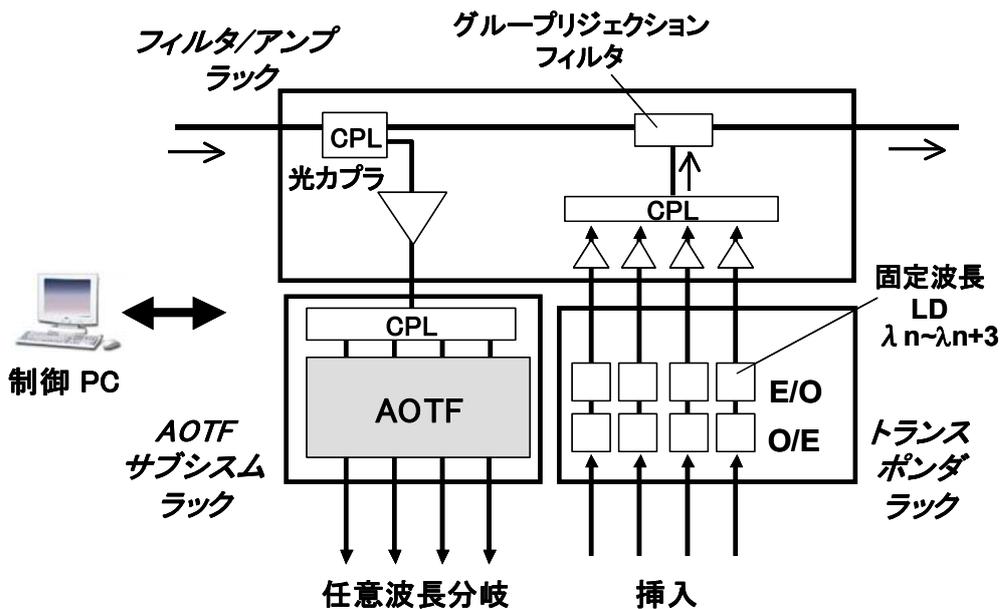


図 4.4-1 プロトタイプ機の構成

分割多重信号は光カプラにより分割され、一方は AOTF サブシステムラックへ、他方はグループリジェクションフィルタに入力される。AOTF サブシステムラックは波長分割多重信号の中から任意の 4 波長を選択する機能を有している。グループリジェクションフィルタは自ノード挿入光の伝送路への合波とともに、伝送路リング上を周回した自ノード挿入光を終端する機能を持つ。ここでは、100 GHz 間隔、4 スキップ 1 型のグループリジェクションフィルタ（4 波

表 4.4-1 プロトタイプ機の主要諸元

項目	諸元	備考
最大容量	320 Gb/s (10 Gb/s×32 波)	4スキップ1型グループリジェクションフィルタ使用時
インタフェース	2.5G/10G/GbE/10GbE	2.5G 2R (プロト機)
最大リング長	40 km (10 Gb/s時)	リング内光増幅器1箇所、分散補償器無しの場合
使用波長帯域	C-Band	
分岐挿入波長数	4波/ノード	
最小波長間隔	0.8 nm (100 GHz)	
プロテクション機能	—	未実装

グループでフィルタリングし、グループ間は1波長分空き領域があるフィルタ)を適用した。挿入信号光はトランスポンダ内で一旦光/電気変換され、各ノードに割り振られた固定波長レーザの光を変調する。プロトタイプ機のトランスポンダは 2.5Gb/s トランシーバモジュールを搭載している。

本プロトタイプ機は、光波長パスの切り換え、制御回路のパラメータ設定が全て外部端末より遠隔操作可能で柔軟性、保守性、操作性が高いものとなっている。また、本プロトタイプ機は、100 GHz 間隔、32 波の波長分割多重信号の中から 4 波長の分岐挿入が可能である。伝送速度としては、2.5Gb/s と 10Gb/s、最大リング長 40km を想定してフォトニックゲートウェイ内の光レベルを設計した。



図 4.4-2 プロトタイプ機外観



フィルタ/アンプラック

AOTF サブシステムラック

トランスポンダラック

図 4.4-3 プロトタイプ機内部

なお、基本伝送性能の検証を目的とするため、プロテクション機能は省略している。表 4.4-1 にプロトタイプ機の主要諸元をまとめた。図 4.4-2 に試作したプロトタイプ機の外観、図 4.4-3 にその内部をそれぞれ示した。プロトタイプ機はフィルタアンプラック、AOTF サブシステムラック、トランスポンダラックの計 3 ラックで構成される。1 ラックは幅 19 インチ、高さ 1U(44 mm)の小型サイズとなっており、既存の電気スイッチ、ルータに簡易にアドオン可能な大きさとなっている。

4.4.2 プロトタイプ機の特徴

(1) 波長ルーティング動作

まず、試作したプロトタイプ機の波長ルーティング動作の評価を行った。本

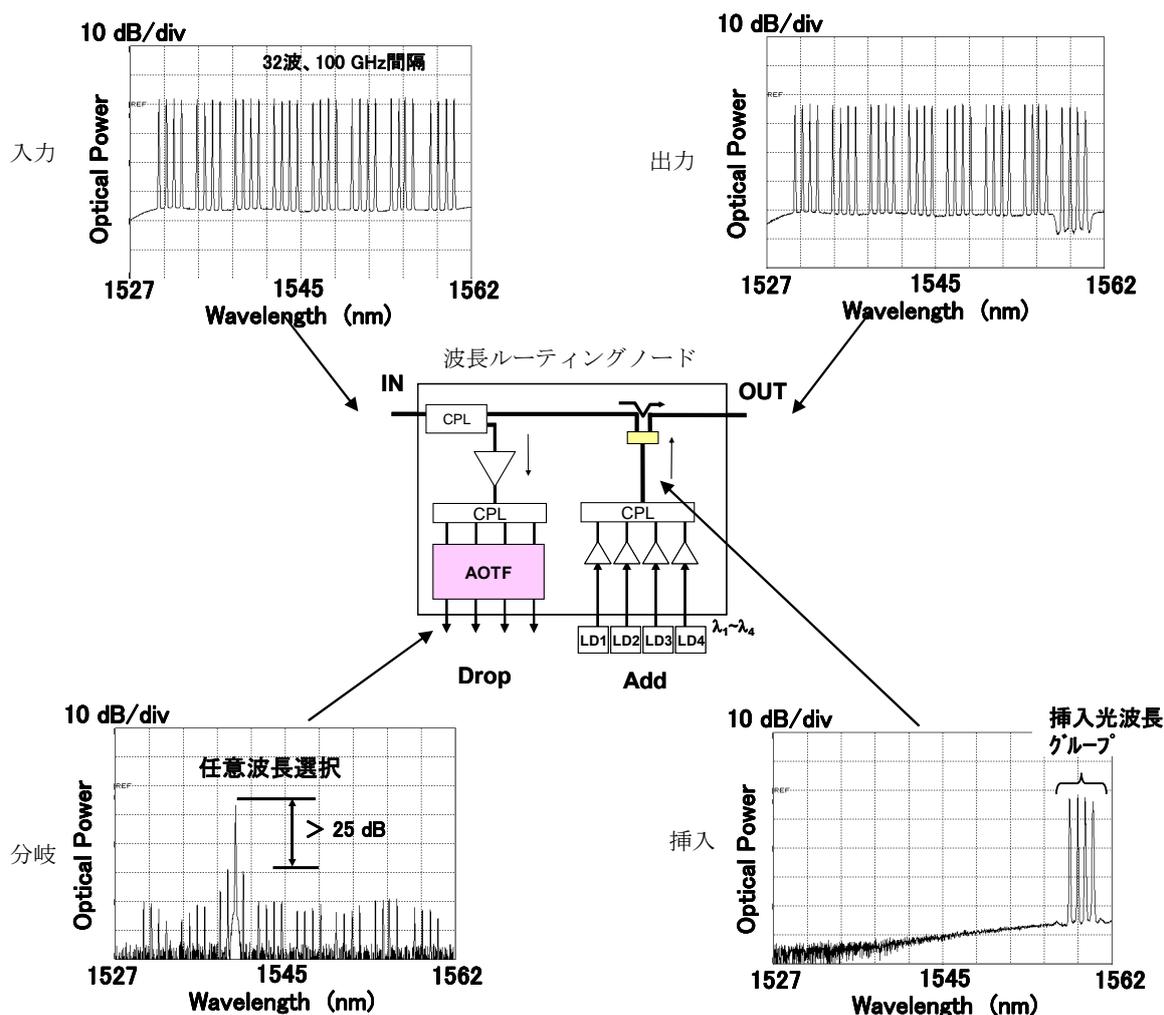


図 4. 4-4 プロトタイプ機の波長ルーティング動作

ノードの各部の光スペクトルを図 4. 4-4 に示す。入力は 32 波長、挿入光は最長波長側の 4 波グループを挿入している。AOTF により選択される分岐波長としては、100 GHz 間隔波長分割多重信号の任意の波長選択が可能であり、さらに、ピーク波長トラッキング制御により、隣接チャネルクロストークは常時 25 dB 以上が得られた。このクロストーク量は伝送品質に影響を与えない十分小さな値である。

次に、本ルーティングノードによる波長選択速度を測定した。図 4. 4-5 に示すように、15 ms で切り替え可能であることを確認した[4-7]。また、光源の波長揺らぎがあった場合でも、所望波長の検出が可能であること、選択後に波長が変動した場合でも、常に所望の波長を追従するトラッキング動作を確認し

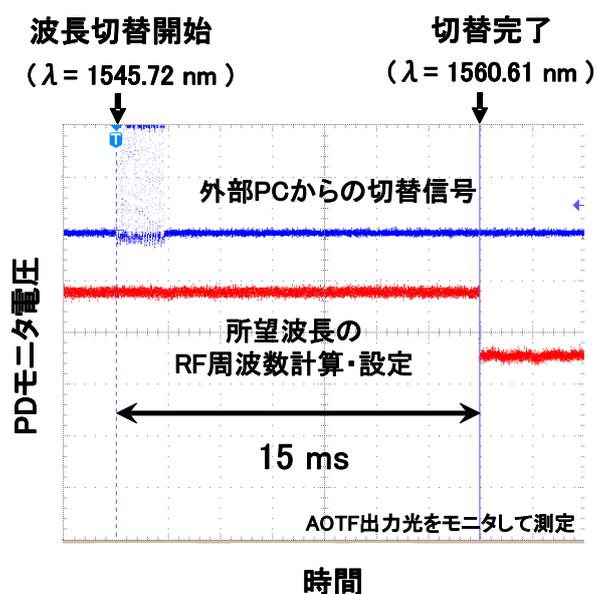


図 4.4-5 プロトタイプ機の波長選択速度

た。また、4ポート同時にトラッキング制御した場合でも、1ポート選択時と同等の切り替え速度が得られた。なお、15msはプロトタイプ機内部の制御コンピュータに市販の組み込み型PCを適用したために応答が遅くなっている。この部分を3章で示したようにFPGAなどで専用設計すれば、 $12\mu\text{s}$ の波長切り替え速度を持つAOTFサブシステムの応答速度を損なわない速度にすることは容易である。

(2) 波長分割多重信号間の光パワー制御

プロトタイプ機では、光ハブ部を除いて伝送路リング上の損失を補償するための高価な光増幅器を削除している。この構成では、ほとんどの区間が光増幅器を介さずに接続されるため、複数のノードを通過し到達する光信号は、各ノードの通過損、伝送路損を受け、減衰しながら伝送される。図4.4-6を用いてこの問題を説明する。ここではノード損失、スパン損失は同一とし、各ノードに長波長側から順次挿入波長を割り当てると仮定した。また、分かりやすくするため、ノード#8以降は光信号は周回しないものとして図示している。図4.4-6から明らかなように、遠くのノードからの挿入波長ほど光パワーが小さくなり、これによるパワーばらつきが生じる。このような波長分割多重信号間のパワーばらつきが発生すると、パワーばらつきが受信器のダイナミックレンジを超える場合や、小さな光パワーの波長の選択受信時に大きな光パワーの波

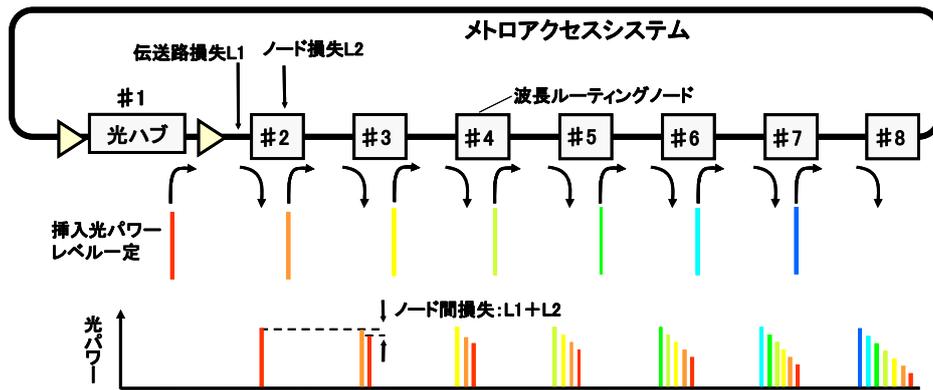


図 4.4-6 波長分割多重信号間パワーばらつきの発生
(挿入光パワーが各ノードで同じ場合)

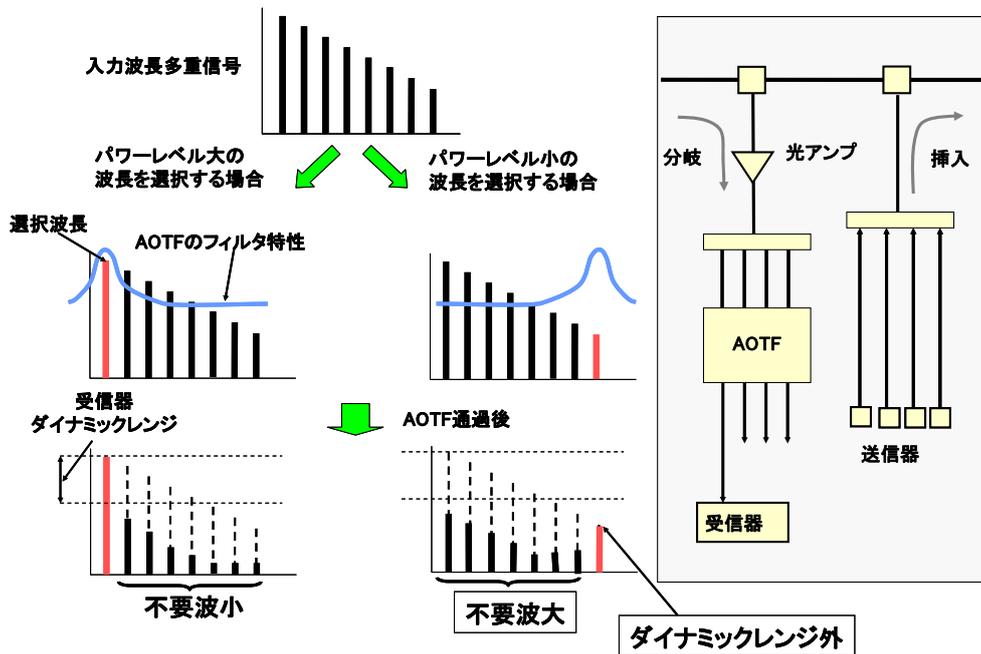


図 4.4-7 波長分割多重信号間のパワーばらつきに起因する伝送劣化

長が不要波となり、十分低いクロストークを確保できないことにより、伝送劣化が発生する。この様子を図 4. 4-7 に示す。

そこで、今回は、図 4. 4-8 に示す波長分割多重信号間のパワーばらつきを平坦化する手法を用いた。本手法では、光増幅器を搭載した光ハブ(ノード#1)

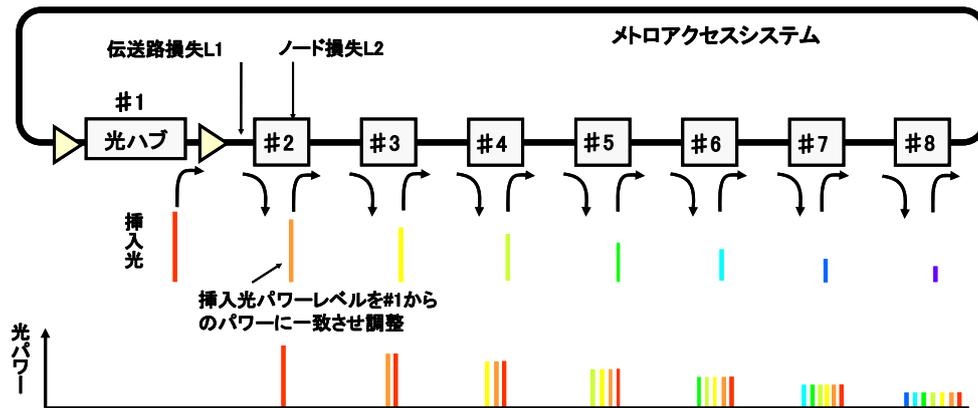


図 4. 4-8 波長分割多重信号間のパワーばらつきを平坦化する手法

を起点とし、各ノードの挿入光パワーは、ノード#1 から送出される光パワーレベルと一致するように調整する。本手法を用いると、ノードを進む毎に波長分割多重信号の平均パワーが低下するが、AOTF の直前に置かれた光増幅器によって増幅されるため、全ての波長が受信可能となる。また、光ハブに近いノードからの挿入光の OSNR(光信号対雑音比)は劣化するが、最も遠いノードの OSNR は本手法の適用に関わらず同一となる。そのため、最大伝送距離は最も遠いノードの挿入光 OSNR で制限される。OSNR 制限よりもパワーばらつきによる影響が大きいため、本手法の適用により最大伝送距離(最大ノード数)の拡大が可能となる。

プロトタイプ機の分岐挿入動作および、波長分割多重信号間のばらつきを平坦化する手法の有効性の確認を行うために伝送特性の評価を行った。実験系を図 4. 4-9 に示す。使用したは、試作したプロトタイプ機 3 ノードと光部品(光カプラ、グループリジェクションフィルタ)のみを接続しノードとした 5 ノードで、これらを組み合わせ、計 8 ノードで伝送実験を行った。実験系は、リング長 SMF 40km、波長間隔 100 GHz、波長数 32 波、伝送速度 2.5 Gb/s、1 ノー

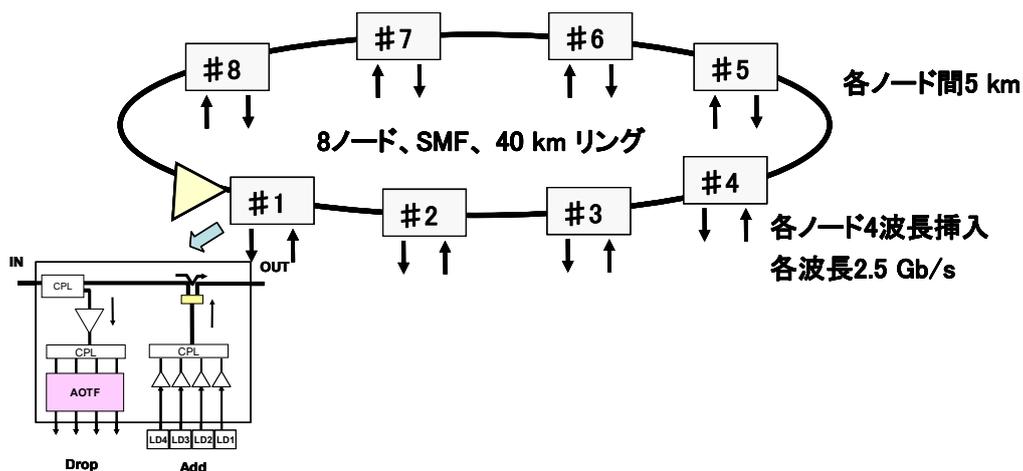


図 4. 4-9 パワーばらつき平坦化手法の有効性確認のための実験系

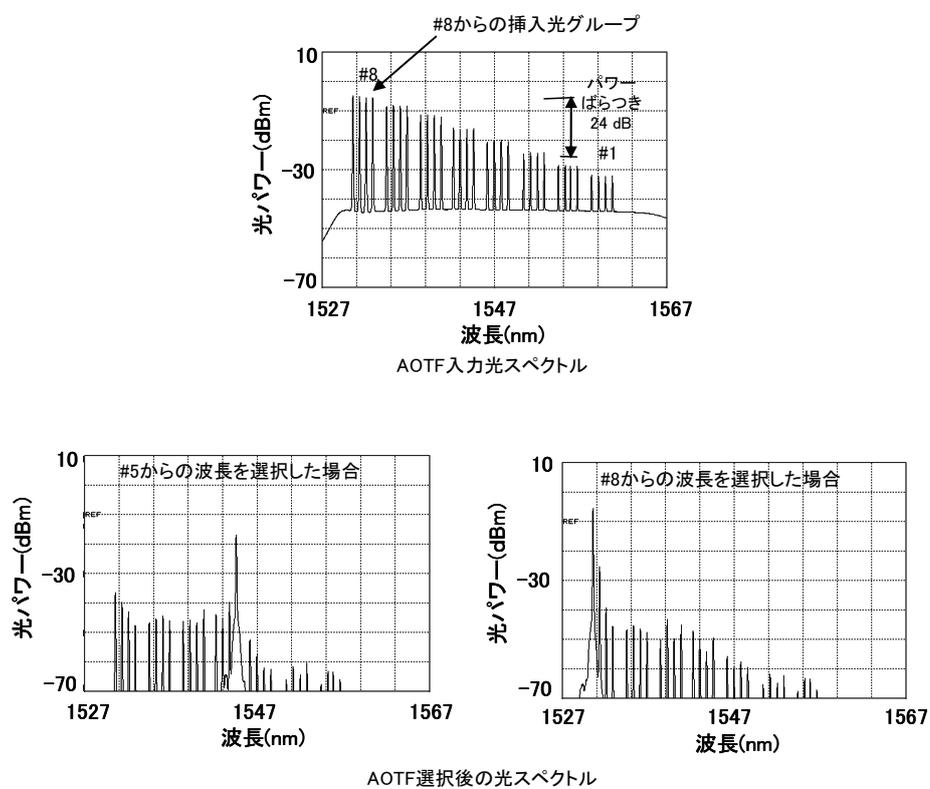


図 4. 4-10 各ノードに均一の挿入光パワーを入力した場合の光スペクトル

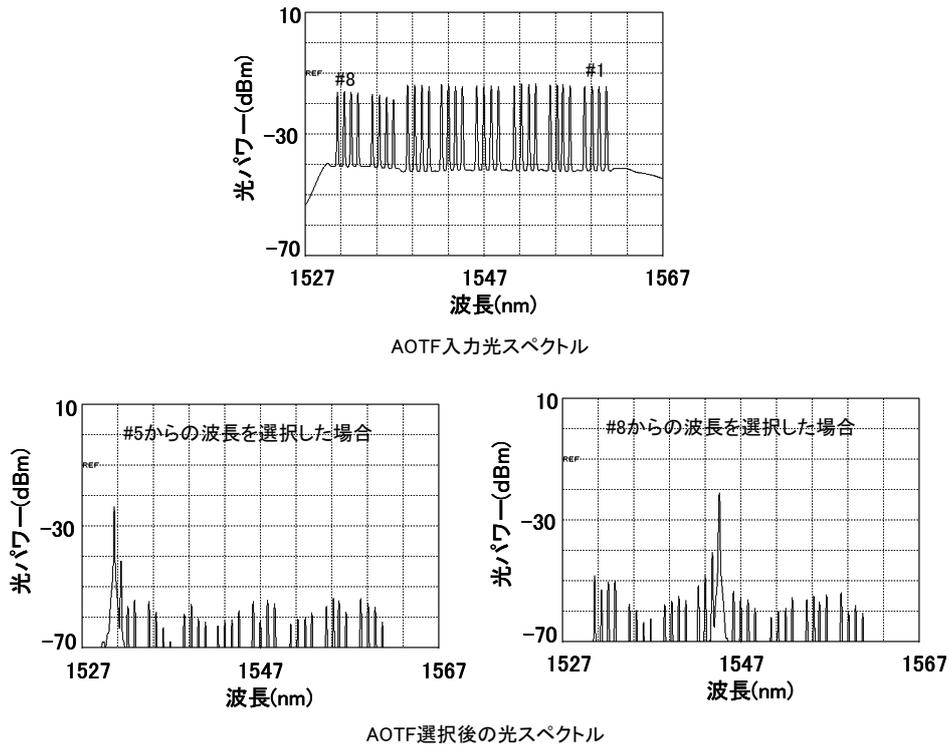


図 4.4-11 本平坦化手法を用いた場合の光スペクトル

ド当たりの挿入波長数 4、ノード間隔 5 km でリングの一箇所に光増幅器を挿入した。

各ノードにおいて、均一の挿入光パワーを入力した場合の#1 ノードでの AOTF 入力光スペクトル、AOTF 選択後の光スペクトルを図 4.4-10 に示す。ここでは、AOTF によりノード#5 とノード#8 からの挿入波長を選択した。この場合、AOTF 入力部での光波長分割多重信号間のパワーばらつき（ノード#2～ノード#8 間）は最大で 24 dB 以上となった。

次に、本平坦化手法を用いた場合の光スペクトルを図 4.4-11 に示す。平坦化制御により、AOTF 入力部での波長分割多重信号間のパワーばらつきはほぼ零となることが分かる。さらに、各ノードにおいて均一の挿入光パワーを入力した場合と本平坦化手法を用いた場合の符号誤り率（BER）特性を測定した。測定結果を図 4.4-12 に示す。各ノード均一挿入光パワーの場合には、各ノードからの挿入光をノード#1 で受信した時の BER 特性を示している。本平坦化手法を用いた場合は、最悪の OSNR になるノード#8→ノード#7 間における BER 特性

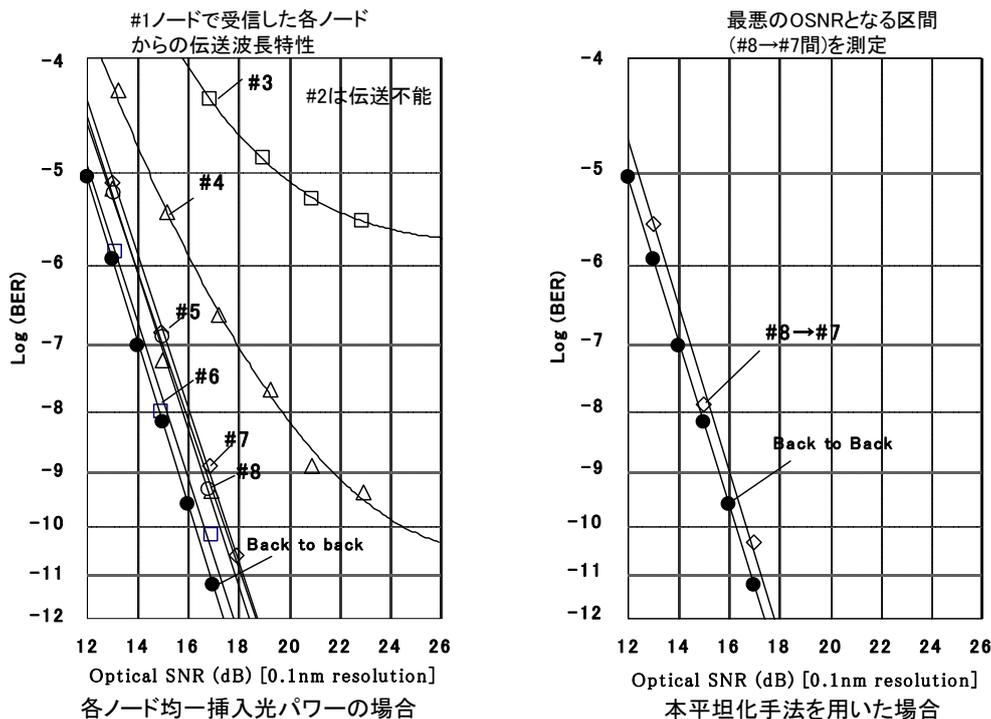


図 4.4-12 各ノード均一挿入光パワーと本平坦化手法を用いた場合の伝送特性

を示している。なお、ここでは、本プロトタイプ機の光分岐挿入動作に起因する伝送特性劣化は観測されなかった。

各ノード均一挿入光パワーの場合、ノード#1 に対して近傍に位置するノード#5～ノード#8 は BER 特性に大きな劣化は観測されなかったが、これらより遠い3ノード分の波長は受信不能であった。本平坦化手法を用いた場合、光パワーばらつきによる劣化はなく、最悪の OSNR の場合でも受信可能であり、全てのノード波長が伝送可能であることが分かった。本実験結果から本平坦化手法により設置可能なノード数を5から8に拡張できることが分かり、その有効性を確認することができた。

4.4.3 実証機的设计と試作結果

(1) 実証機の構成

本研究で検討しているフォトニックゲートウェイは、ネットワーク内の任意ノード間を、接続要求に応じて波長パス単位で自在に接続設定可能であること、波長パスレベルでマルチキャスト/ブロードキャストが可能、という特長を持

っている。本特長を活かす応用として企業間、放送局間、コミュニティネットワーク、コンテンツデリバリネットワーク、データセンタ間等が考えられる。これらは、数十 km の伝送距離の範囲で応用が多いと考えられるが、拠点が離れ分散した地方都市での利用やディザスタリカバリ等の応用で離れたデータセンタ間を接続する場合、100km 以上の伝送距離が必要となる。このため、プロトタイプ機で得られた成果を基に、200km 程度までの長距離に対応するフォトニックゲートウェイの実証機的设计と試作を行った[4-8]。

すでに述べたように、プロトタイプ機ではドロップ部に光カプラを、アッド部にグループリジェクションフィルタを用いて波長信号のアッド・ドロップを行っている。ドロップ部には、任意の波長を AOTF で選択可能にするために、光カプラで分岐した信号を WDM 増幅器により増幅している。この構成ではノード透過損失を小さくし、伝送路上に高価なインライン光増幅器を搭載せず、また、分散補償光ファイバを使用しないことで低廉化を図っている。このため、プロトタイプ機の構成は、40km 程度の伝送距離に最適であると考えられる。しかし、100km 以上の伝送距離を実現するには、伝送路上にインライン光増幅器が不可欠となる。そこで、実証機では、プロトタイプ機と同等の低廉性で伝送距離を伸ばした構成について検討を行った。

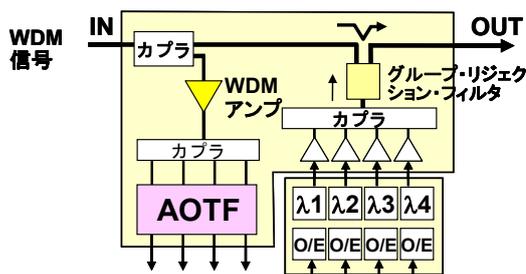
表 4. 4-2 長距離伝送のためのフォトニックゲートウェイ基本構成の優劣比

	ノード構成	ドロップ光の電力を高くする(ドロップアンプ不要)	アッド光の電力を増幅(アッドアンプ不要)	アッド光とスルー光のアンプ入力電力をそろえる	備考
1		○	×	×	
2		×	×	×	
3		×	○	○	
4		△	×	×	
5		○	○	○	本構成
6		×	△	○	

CPL : 光カプラ

表 4.4-2 に示すようにフォトニックゲートウェイを増幅部、ドロップ部、アッド部に分け、これらの配置を組み合わせた 6 種類の構成について光伝送特性のシミュレーションと経済性の比較検討を行い、最適な構成を決定した。フォトニックゲートウェイの構成の簡素化と低廉化のために、1 台の WDM 増幅器を用いることを前提とし、この増幅器によって、ドロップ光のパワーレベル維持、アッド光のパワー増幅機能、アッド光とスルー光のパワーを均一化するという必要な機能を実現性という観点で優劣を比較すると、表 4.4-2 の構成 5 に示すアッド部を前段、ドロップ部を後段に配置し、アッド部とドロップ部の間に増幅部を配置する構成が最もよいことが分かった。以上の検討結果から、フォトニックゲートウェイの実証機では、アッド⇒ドロップの順に配置し、アッドとドロップの間に WDM 増幅器を配置する構成とした。図 4.4-13 にプロトタイプ機と実証機の構成の違いを示す。

プロトタイプ機



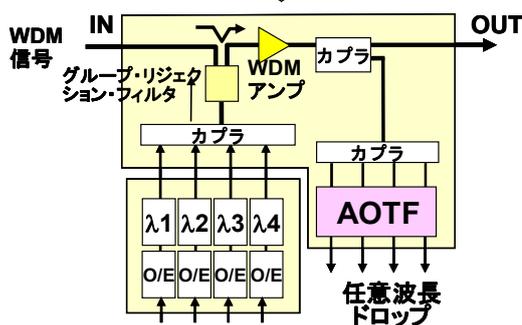
変更のポイント

- アッド部とドロップ部の位置を交換
- アッド部とドロップ部の間に WDM アンプを配置



実証機

レイアウト変更



追加コストなしに伝送距離の長尺化を実現

図 4.4-13 プロトタイプ機と実証機の構成比較

フォトニックゲートウェイの実証機の構成を図 4.4-14 に示す。グループリジエクションフィルタをガードバンドが不用な 4 スキップ 0 フィルタ型に変更することで、100 GHz 間隔、40 波の波長分割多重信号の中から任意波長の分岐挿入を可能としている。また、リングネットワークで一般的に用いられている障害発生に対応する冗長機能である O-UPSR (Optical Unidirectional Path Switched Ring) が実現できるよう、各種サブシステム 2 系統を実装した。O-UPSR 方式の動作を図 4.4-15 に示す。本方式では、ノード装置を冗長化し、リング

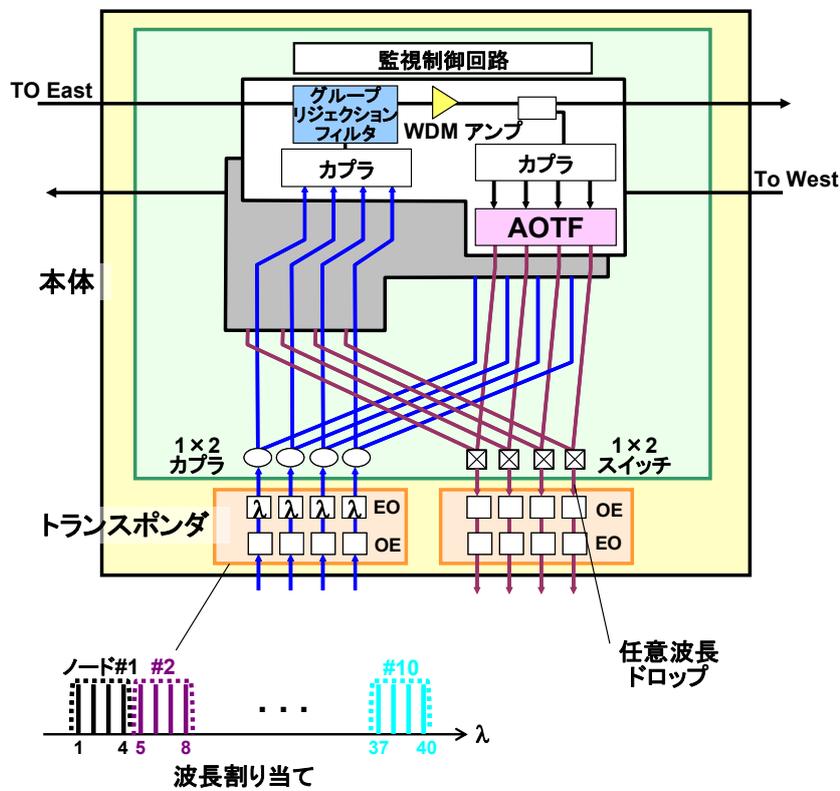


図 4.4-14 フォトニックゲートウェイの実証機の構成

上の左右両方向 (East、West 方向) に光信号を伝送する。現用系リンクに障害が発生した場合、受信器直前の光信号の有無を検出し、光スイッチで逆方向予備系の信号に切替える。本方式は、ネットワーク全体を制御する NMS (Network Management System) を介することなく、各ノードで自律的に制御が可能である

ため、複雑なプログラム制御が不要で高速なプロテクションが可能である。図 4.4-16 に フォトニックゲートウェイの実証機の外観を、表 4.4-3 フォトニックゲートウェイの実証機の主要諸元をそれぞれ示す。伝送距離は最大 200km を目標とし、ネットワークに挿入可能なフォトニックゲートウェイ数は最大 10 台としている。

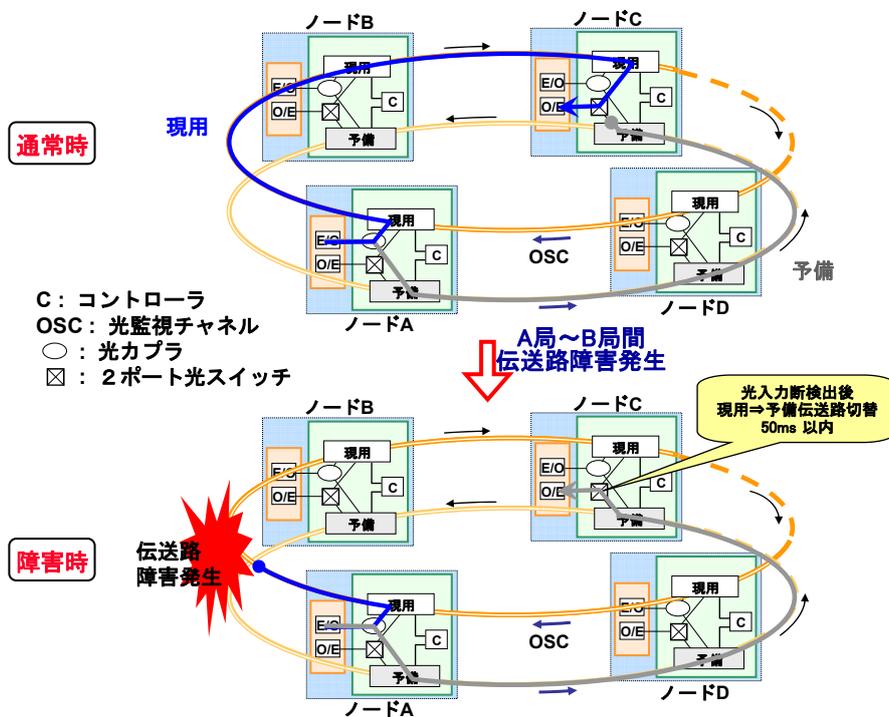


図 4.4-15 0-UPSR 方式によるプロテクション動作

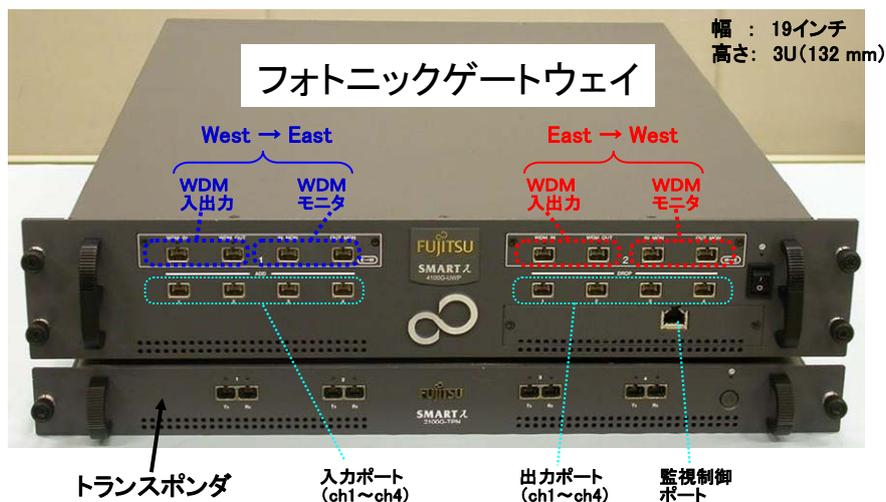


図 4.4-16 フォトニックゲートウェイの実証機の外観

表 4.4-3 フォトニックゲートウェイの実証機の主要諸元

大項目	小項目	内容	備考
システム	物理トポロジ	リング構成	
	分岐挿入ポート数	4ポート	
	リング内最大ノード数	10ノード	
	最大リング長	~ 200km	
	ノード間伝送方式	二芯単方向伝送	
	最大波長数	C-band 40波 波長間隔0.8nm(周波数間隔100GHz)	
	ノード間ファイバ種別	シングルモードファイバ(SMF)	
	プロテクション機能	中継回線冗長機能(O-UPSR)	
インタフェース	伝送速度	100Mbps~2.4Gbps	トランスポンダ交換で10Gbpsまで対応可能
	伝送条件	2R トランスペアレントモード	
その他	電源	AC100V-240V(単相)	
	装置サイズ	19インチラック W480×H88×D550(本体2U) W480×H44×D400(トランスポンダ1U)	
	監視制御	集中監視制御方式(NMSを用いて管理)	
	制御プロトコル	SNMP(Simple Network Management Protocol)	

(2) 実証機の伝送特性評価

長距離伝送を可能とするフォトニックゲートウェイの実証機を用いて、ターゲットとしている 200km 程度までの伝送特性について評価を行った。伝送特性評価のためのリングネットワークの構成を図 4.4-17 に示す。評価には、試作した実証機 4 台とフォトニックゲートウェイを模擬するためのダミーグループリジェクションフィルタブロックを接続している。実際の接続構成は図 4.4-18 に示すように、ノードの現用と予備のポートを使用し、これらを組み合わせ、合計 10 ノード相当で最大 320km までの伝送実験系を形成した。伝送速度は伝送速度 2.5Gb/s としている。図 4.4-19 に伝送特性の評価結果を示す。320km における 10^{-9} 以下のエラーフリー伝送が確認できた。Back-to-back (B to B) と 320km 伝送後の符号誤り率 (BER) 特性を比較すると、0.2dB のペナルティが発生しているが、このペナルティは分散による波形劣化によるものと考えられる。

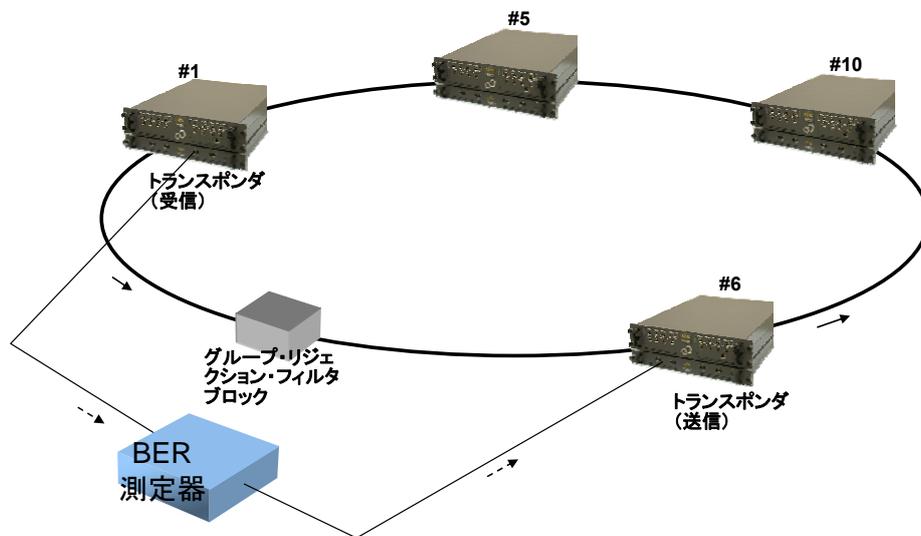


図 4.4-17 伝送特性評価のためのリングネットワークの構成

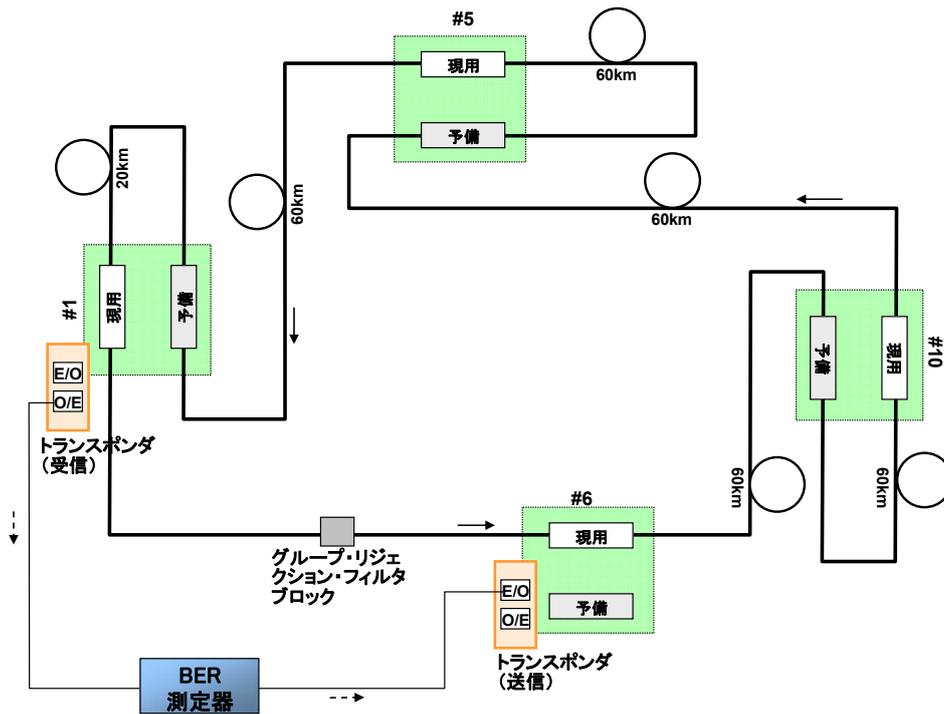


図 4. 4-18 伝送評価系の詳細構成

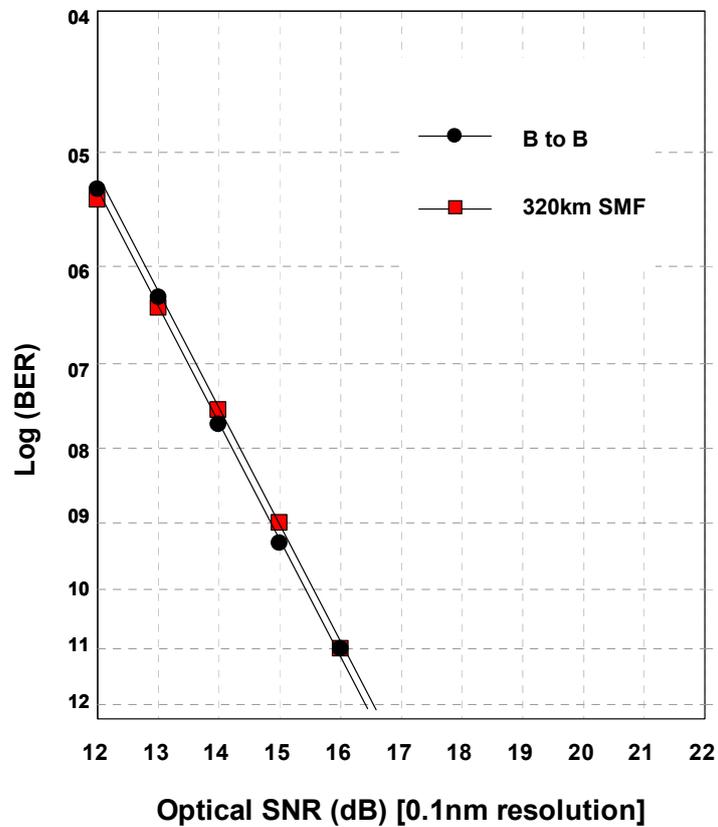


図 4. 4-19 フォトニックゲートウェイの実証機の伝送特性の評価結果

(3) 総合実証実験

本研究により検討を進めたフォトニックゲートウェイと、これを用いたメトロアクセスネットワークを総合的に検証するための実証実験を実施した。検証実験の機器構成を図 4.4-20 に示す。機器構成は、フォトニックゲートウェイの実証機 3 台をノード区間 60km の光ファイバで接続した全長 180km のリングネットワークである。実証実験では、ネットワーク制御端末からの設定により、所望のノード間での波長パス接続の動作と、一斉同時配信を行う波長マルチキャストの動作を行い、光スペクトルの変化を観察することにより、上記の動作が要求通りに実現されていることを確認した。図 4.4-21 に実証実験における波長選択動作の確認の一例[4-9]、図 4.4-22 に光ファイバ破断を想定した、プロテクション動作の検証結果を示す。また、図 4.4-23 には、総合実証実験の実験装置の構成を示す。

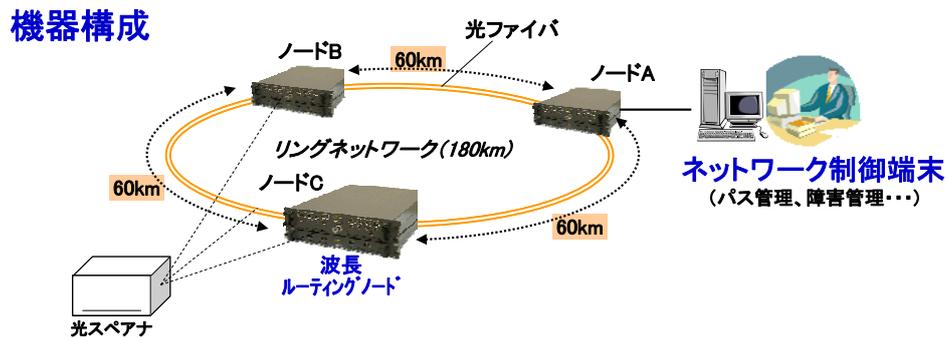


図 4.4-20 実証実験における機器構成

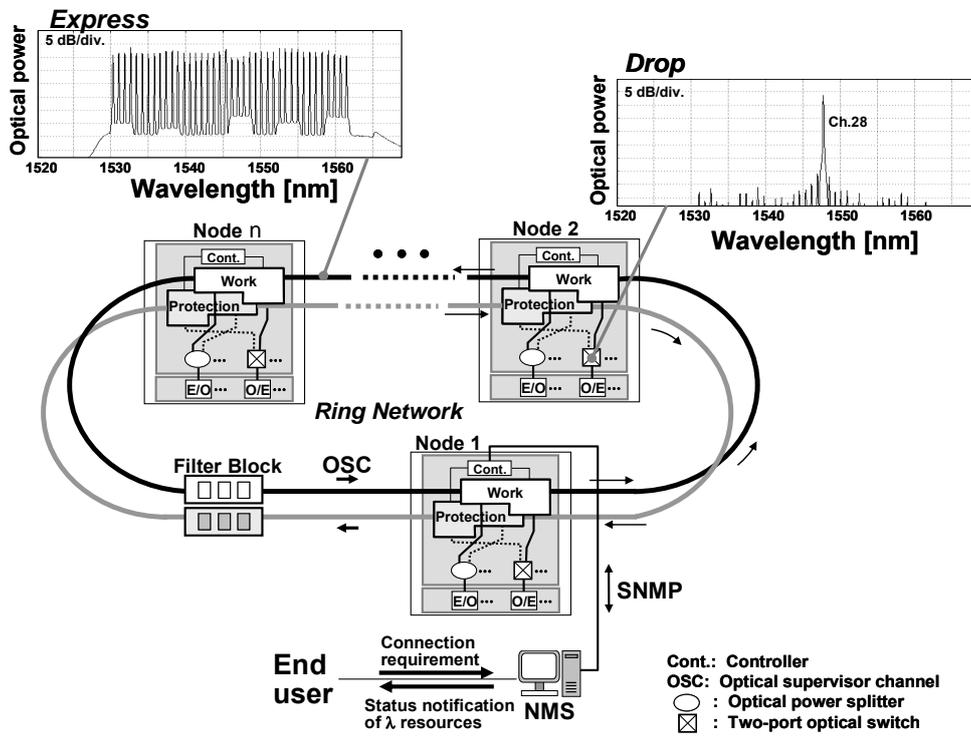


図 4.4-21 実証実験における波長選択動作の確認

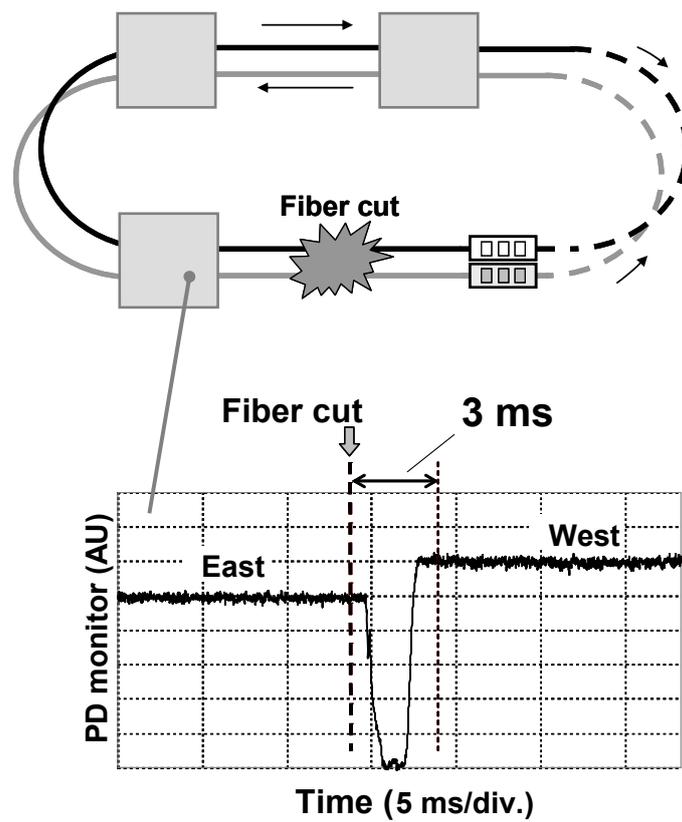


図 4.4-22 実証実験におけるプロテクション機能の確認

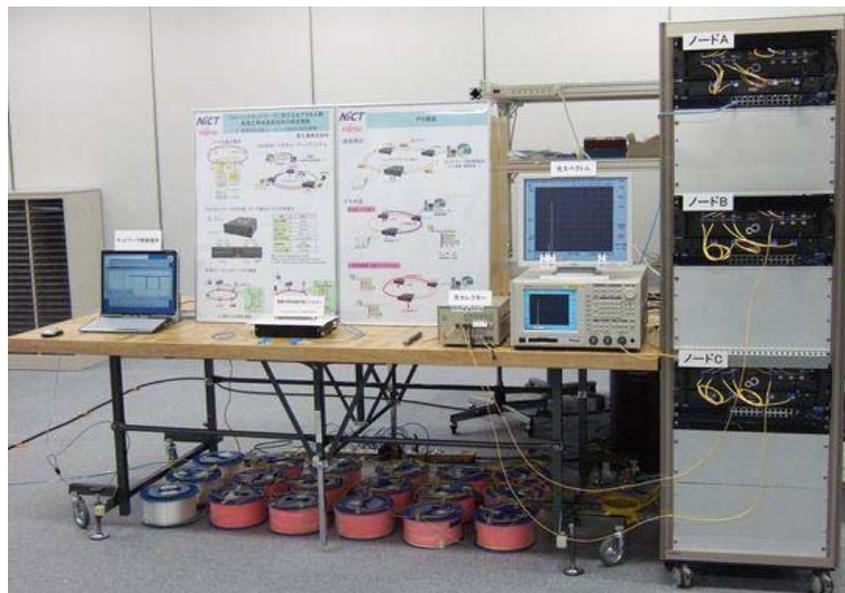


図 4.4-23 総合実証実験の実験装置の構成

4.5 結言

本章では、次世代メトロアクセスネットワークに適用する光バースト信号に対応可能な DOADM (Dynamic Optical Add/Drop Multiplexer) である「フォトニックゲートウェイ」を提案し、その構成について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 音響光学型波長可変フィルタ (AOTF) を用いたフォトニックゲートウェイの基本構成を提案し、他の光デバイスを用いた構成、ならびに既存の固定波長型 OADM よりも高い経済性を有することを明らかにした。
- (2) AOTF モジュールとこの制御回路、ファームウェアを一体化した小型の AOTF サブシステムを開発した。AOTF を駆動する RF 発振回路の周波数切り替え速度として 400ns を実現し、AOTF サブシステムとして、AOTF デバイス単体の動作速度限界である $12\mu\text{s}$ の波長切り替え速度を実現した。これにより、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイは、波長オンデマンドサービスから光バーストスイッチングネットワークまでシームレスに適用できることを明らかにした。
- (3) AOTF サブシステムを用いたフォトニックゲートウェイのプロトタイプ機を試作した。WDM 信号間のパワーレベル平坦化手法を適用することで、40km の良好な伝送特性と全てのノード間の光波長ルーティング動作を確認した。
- (4) 200km 以上のリング長と最大 10 ノードを収容可能なフォトニックゲートウェイの実証機を試作した。本実証機は障害発生に対応するプロテクション機能を有しており、320km の良好な伝送特性とプロテクション機能の動作を確認した。

参考文献

- [4-1] Miyata H., Kaito Y., Kai Y., Onaka H., Nakazawa T., Doi M., Seino M., Chikama T., Kotaki Y., Wakao K., Komiyama M., Kunikane T., Yonetani H., and Sakai Y., "Fully dynamic and reconfigurable optical add/drop multiplexer on 0.8 nm channel spacing using AOTF and 32-wave tunable LD module," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2000)*, Baltimore, Maryland, Vol.4, pp.287–289 (March 2000).

- [4-2] Tadao Nakazawa, Shinji Taniguchi, and Minoru Seino, "Ti: LiNbO₃ Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF), *FUJITSU Science Technology Journal*, Vol.35, No.1, pp. 107-112 (July 1999).
- [4-3] T. Nakazawa, M. Doi, S. Taniguchi, Y. Takasu, and M. Seino, "Ti:LiNbO₃ AOTF for 0.8 nm Channel- Spaced WDM," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC1998)*, San Jose, CA., PD1 (Feb.1998).
- [4-4] H. Miyata, S. Aoki, T. Nakazawa, and H. Onaka, "AOTF with low loss and low crosstalk for 100-GHz channel spacing WDM systems," in *Proc. 28th European Conference on Optical Communication (ECOC2002)*., Copenhagen, Denmark, No.2.3.3 (Sept.2002).
- [4-5] 野口雅司, 甲斐雄高, 上野智弘, 宮田英之, 尾中寛, "音響光学型チューナブルフィルタ(AOTF)制御の高速化," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-40 (2002年9月).
- [4-6] Yutaka Kai, Kyosuke Sone, Tomohiro Ueno, Masaji Noguchi, Hiroshi Miyata, Tadao Nakazawa, Hideyuki Miyata, and Hiroshi Onaka, "Photonic Gateway with μ s-order Wavelength Path Control for Metro Access Networks," in *Proc. 29th European Conference on Optical Communication (ECOC2003)*, Rimini, Italy, We3.4.4 (Sept. 2003).
- [4-7] 中川剛二, 甲斐雄高, 宮田宏志, 宮田英之, 中澤忠雄, 尾中寛, 上野智弘, 野口雅司 "AOTFを用いたメトロ向け光ゲートウェイ," 電子情報通信学会技術報告, CS2003-11 (2003年11月).
- [4-8] Goji Nakagawa, Yutaka Kai, Kyosuke Sone, Yutaka Takita, Keiji Miyazaki, Tomohiro Ueno, Masaji Noguchi, Hiroshi Miyata, Hideyuki Miyata, and Hiroshi Onaka, "Compact Photonic gateway for Dynamically Path-controlling Metro Access Networks," in *Proc. The 10th Opto Electronics and Communications Conference (OECC2005)*, Seoul, Korea, 5B2-4 (July 2005).
- [4-9] 吉田節生, 瀧田裕, 曾根恭介, 青木泰彦, 甲斐雄高, 宮崎啓二, 上野智弘, 野口雅司, 中川剛二, 宮田宏志, 宮田英之, 木下進, 尾中寛, "AOTFを用いた遠隔波長パス設定可能な光ゲートウェイの開発," 電子情報通信学会総合大会, B-10-28 (2006年3月).

第5章 半導体増幅器多段ゲート型光パケットスイッチネットワークのペタスケール級スーパーコンピュータへの適用

5.1 緒言

ペタフロップス級の次世代スーパーコンピュータを構築する際には、その通信ネットワーク部分のハードウェア量、消費電力の増加が大きな問題となる。本章では、(1)異なる信号が変調されている複数の光波長を、光の領域で多重・分離する波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術を用いて、複数の計算ノードが実装されている計算ラック間の通信をテラビット/秒級の超広帯域で接続すること、(2)各計算機ノードで WDM 光パケット信号を生成し、スイッチ部分において、WDM 信号を OE/E0 変換することなく光信号のまま一括切替えを行う、100~256 程度の大規模なポート数を有する光パケットスイッチング技術について述べる。

5.2 研究の背景

スーパーコンピュータは、膨大な計算処理を行うための大規模なハードウェアやソフトウェアを備えており、有限要素法や境界要素法などに基づく構造解析、気象予測、分子動力学、計算天文学、金融工学のような大規模数値解析によるシミュレーションに利用される。計算機自体の性能向上が急激であることから、スーパーコンピュータの定義は時代により大きく変化するが、現在では、1.5 テラフロップス以上の演算性能を持つ計算機をスーパーコンピュータと位置付けている。ペタフロップス級のスーパーコンピュータは 2007 年時点で実現されているスーパーコンピュータの 10 倍以上の演算性能を持つ。ペタフロップス級のスーパーコンピュータが実現できると、分子レベル、遺伝子レベルの創薬シミュレーションと生体レベルの解析を一体化させた人体統合シミュレーションが半日程度で完了することが可能となるため、各個人に最適化されたテーラーメイドの医療の実現が期待されている。また、図 5.2-1 に示すように、自動車開発や半導体材料の解析、未踏科学の探究、計算機科学や IT 分野の人材育成など、幅広い周辺分野への応用が期待されており、2010~2012 年頃にピーク性能 3~10 ペタフロップス、実効性能 1~3 ペタフロップスのスーパーコンピュータの開発競争が日米間で繰り広げられている [5-1]、[5-2]。ペタフロップス級のスーパーコンピュータを構築する際には、そのネットワークのハードウェア量、消費電力がシステム構築する際の大きな問題となる。表 5.2-1 に現在運用されている地球シミュレータ [5-3] を基に同じ設計思想に



図 5.2-1 ペタフロップス級のスーパーコンピュータへの期待

基づいて概算したペタフロップス級システムの装置規模をまとめる。構成は計算ノード全てがクロスバースイッチによって接続され、電気ケーブルによる配線、電気回路によるスイッチングを前提としている。その際のネットワークシステムのサイズとして、640 ポートのクロスバースイッチが 1600 架、ケーブルに関しては 60,000km、1 ノードあたりの通信帯域として 2.46Tb/s という数値が概算され、これら全てを電気技術でまかなうことは、非常に困難である。特に、このような膨大な電気スイッチやケーブルは高コストであるばかりではなく、これらの機器を確実に設置し安定稼働させ続けるには、膨大な労力と時間が必要になると考えられる。

細径、軽量である光ファイバを伝送媒体として用いる光通信技術は、電気ケーブルの持つ帯域幅・伝送距離の制限をはるかに凌駕する広帯域、低損失特性を有するため、長距離幹線系公衆網を中心に発展を続ける一方で、近年では 10 ギガビットイーサネットなど、ギガビットを超えるネットワーク技術の登場により、その適用領域を高速計算機間ネットワーク、大容量ストレージ網などへと広げている。しかし、光通信技術を用いて計算機間のネットワークを構築する場合には、各計算機、スイッチ内では電気信号を処理し、信号転送のみを光で行うため、電気信号を光信号にまた、光信号を電気信号に変換する、光

電気/電気光変換 (Opto-Electric / Electro-Optic、以下 OE/EO と記す) モジュールが、各計算機、スイッチ間で必要であり、ペタスケール規模のシステムネットワークに適用すると、莫大な数のモジュールが必要となるため、OE/EO モジュール数の増加に伴う消費電力の増大、送受信モジュール数の増大が問題となってくる。

表 5. 2-1 地球シミュレータから推定されるペタフロップスシステムのネットワーク規模

	クロスバースイッチ (640x640ポート)	電気ケーブル	1ノードあたりの 通信帯域
地球シミュレータ (ES)	130台(65架)	83,200本 2,400km	98.4Gbit/s
ペタフロップスシステム (ESから概算)	3202台(1601架)	2,080,000本 60,000km	2.46Tbit/s

1章および2章で述べたように、スイッチ装置における OE/EO モジュール数を削減する手段として、光信号を光のまま切り替える光スイッチ技術を導入することが、幹線網の技術において導入が開始されており、従来の光スイッチ技術としては MEMS (Micro-Electro Mechanical System)、液晶、電気光学効果を持つ光導波路型、等が提案されている [5-4]。これらの技術は、例えば MEMS を用いるスイッチでは、1000 ポート以上のスイッチ規模は実現できるが、切り換え速度はミリ秒と遅い。光導波路型では、ピコ秒単位の切り換え速度が実現できるが、10 程度のポート数しか実現されておらず、ペタスケール級スーパーコンピュータネットワークに必要なナノ秒単位の高速スイッチング特性と数十~100 ポート以上の多ポート化を両立できる、光パケットデータ転送、スイッチ制御技術、スイッチハードウェア技術については確立されていない。

本研究は、上記の問題に鑑み、長距離幹線網で広く導入されている、異なる信号が変調されている複数の光波長を、光の領域で多重、分離する波長分割多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 技術によるテラビット/秒級の超広帯域ネットワークと、各計算機ノードで WDM 光パケット信号を生成し、

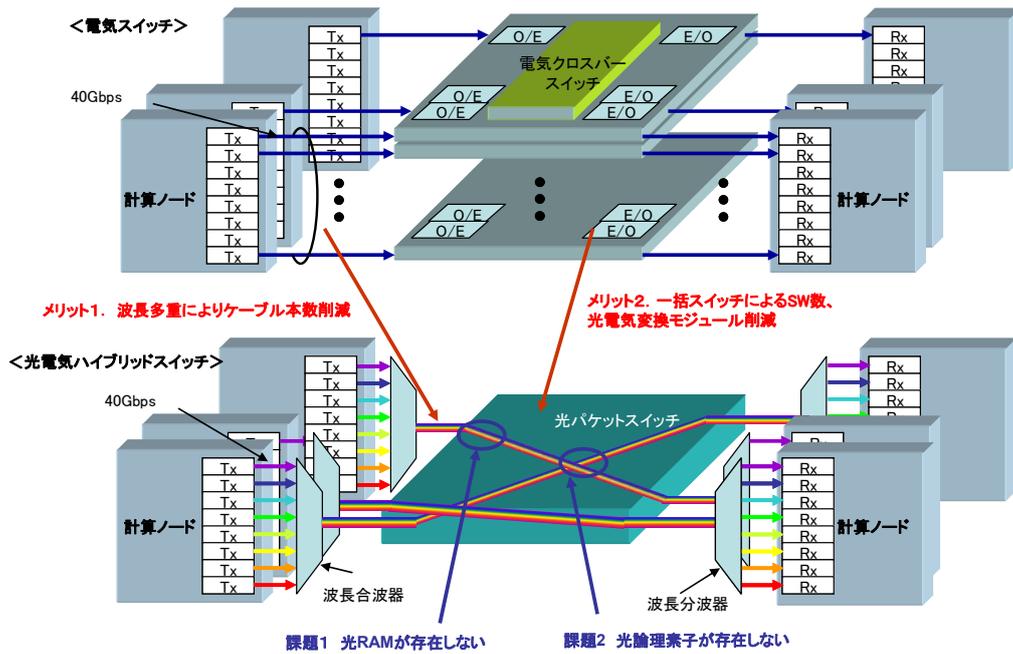


図 5.2-2 光パケットスイッチ技術の持つ利点とその実現課題

スイッチ部分において、WDM 信号を OE/E0 変換することなく光信号のままでの一括切替えが可能で 100~256 ポート程度のポート数を有する光電気ハイブリッドパケットスイッチ(以下、光パケットスイッチと記す)の要素技術を開発することを目的とし、広帯域波長分割多重光パケット信号を高効率で転送、交換を可能とする新しい光スイッチング方式の要素技術を確認するものである。

これらの技術により、広帯域化した転送データ(ペイロード)を電気信号に変換することなく、ナノ秒単位での高速一括切替えが可能となる。その結果、光ファイバケーブルと光スイッチ機器が各々数千本、数十台規模にまで大幅に削減され、それに伴い、占有面積、消費電力、コストの大幅な削減と信頼性の向上が可能となる。

ペタスケール級のスーパーコンピュータに光パケットスイッチを導入する上での利点と課題を図 5.2-2 に示す。光スイッチング技術を導入することの利点として、

- 1) 波長分割多重技術によるケーブル数の削減
- 2) スwitch部分における光電気変換素子が不要

という物量、消費電力を削減する上では大きなメリットがある一方で、光信号

と電気信号との間での大きな違いとして、

- 1) 実用的な光メモリ素子(光 RAM)がない
- 2) 光信号のまま信号処理が可能な論理回路がない

という大きな2点の課題が存在する。これらの課題を克服する新たな光パケット転送方式と高速光パケットスイッチング技術を確立することが本研究の目的である。

5.3 光パケットスイッチネットワークの基本アーキテクチャ

5.3.1 光パケットスイッチネットワークの構成とシステム要求

本研究において開発を行う、光パケットスイッチネットワークの概念構成を図 5.3-1 に示す。1つの計算機ノード群は、1ラックで構成され、この中に複数の計算ノードを収容している。波長分割多重技術によって広帯域化されたリンクを用いて転送される光パケット信号と、それらパケット信号を交換する光パケットスイッチを用いて、これらの計算ノード群間のネットワークを実現し、一方、計算ラック内部のインターコネクトについては電気スイッチを介して行うものである。ペタスケールクラスの次世代計算機システムを構築するシステム構成として、次のような計算機構成が想定される。例えば、1計算機あたりの計算速度が500ギガフロップスで、1台の計算機ノード群ラックあたり200台の計算ノード、つまり1計算ラック群あたり100テラフロップスの計算速度を有する計算ノードラック群が、100台接続されることにより、ピーク性能として10ペタフロップス級の高速計算機が構成可能となる。この際の1ラックあたりに必要とされる通信帯域としては、10TByte/s程度の帯域が必要となり、システム全体でのスイッチング容量として、1PByte/sクラスのスイッチング容量が必要となる。これらのシステム規模を考慮した際に、目標となる光パケットスイッチネットワークの主要諸元を表 5.3-1 にまとめる。

1スイッチの容量として12.5TByte/s (125GByte/s×100ポート)を実現することによって、80台の光パケットスイッチと、16,000本の光ファイバケーブルによって、10ペタフロップス級の光パケットネットワークを構成することが可能となる。なお、表 5.3-1の数値は、一例であり、光パケットネットワークに最も高い要求を与えられた場合の数値例である。具体的な数値は、計算機ノードの到達性能や計算機の構成に依存し、これらは現在、本研究と並行して検討されており、様々な検討条件をお互いに提示している。このため、本論文中には、計算条件に多少バラツキがあることに注意しておく。

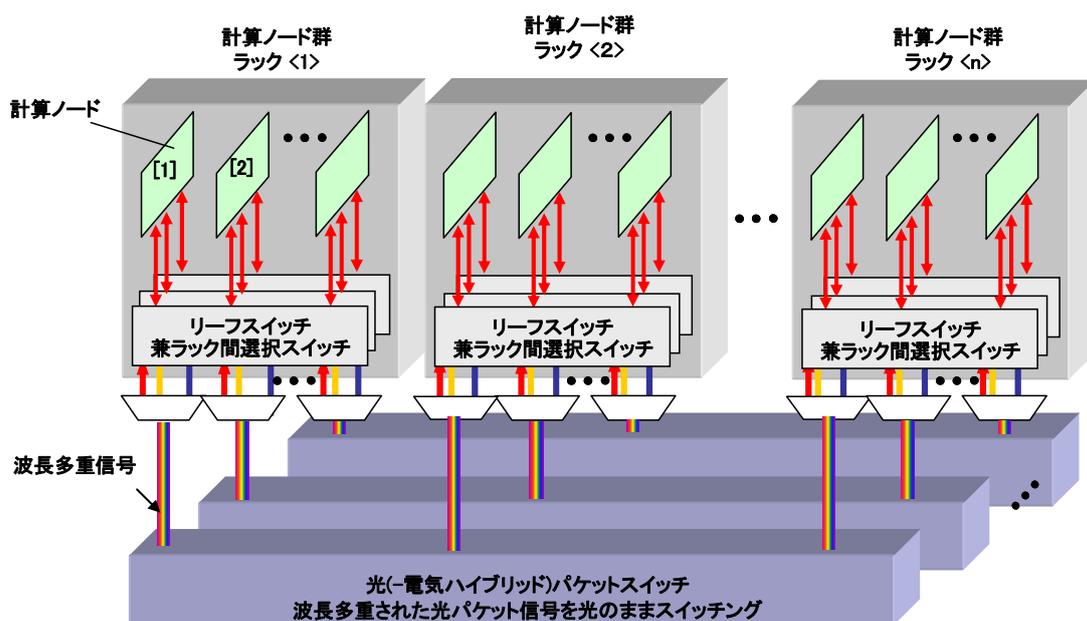


図 5.3-1 光パケットスイッチネットワークの概念構成

表 5.3-1 10 ペタフロップスを実現する光パケットシステムの目標数値例

項目	特性
スイッチ容量	12.5 TByte/s (100 Tbit/s)
最大SWポート数	100 ポート以上
ファイバ1芯あたりの伝送/ 交換容量	125 GByte/s (5 GByte x 25波長) 1 Tbps (40 Gbps x 25波長)
Bisection 帯域	100 Gbyte/s (800 Gbps) 転送効率80%
スイッチ遅延時間	<1 μs
最小パケット長	~1500 Byte
ガードタイム (スイッチ切替時間)	10 ns以下
消費電力	~700 kW 以下 (電気SW構成から~50%削減)
サイズ	数十ラック程度 (電気SW構成から~50%削減)

5.3.2 光パケットスイッチネットワークの転送方式

光パケット信号の転送方式としては、転送フレーム単位での同期を行い、固定長パケットを転送する方式と、データについてはシステム内において非同期で、かつ、転送データは可変フレーム長である構成が考えられる。その構成例を図 5.3-2 に示す。非同期、可変長フレーム転送の場合、システム内において高精度の同期制御が必要なく、電気スイッチにおいては、スイッチ入力部におけるバッファ処理などを利用できるため、広く用いられている。しかしながら、実用に耐えうるバッファ素子のない光信号においては、非同期で到着された信号をスイッチ部分で退避させることが困難である。一方、同期、固定長フレー

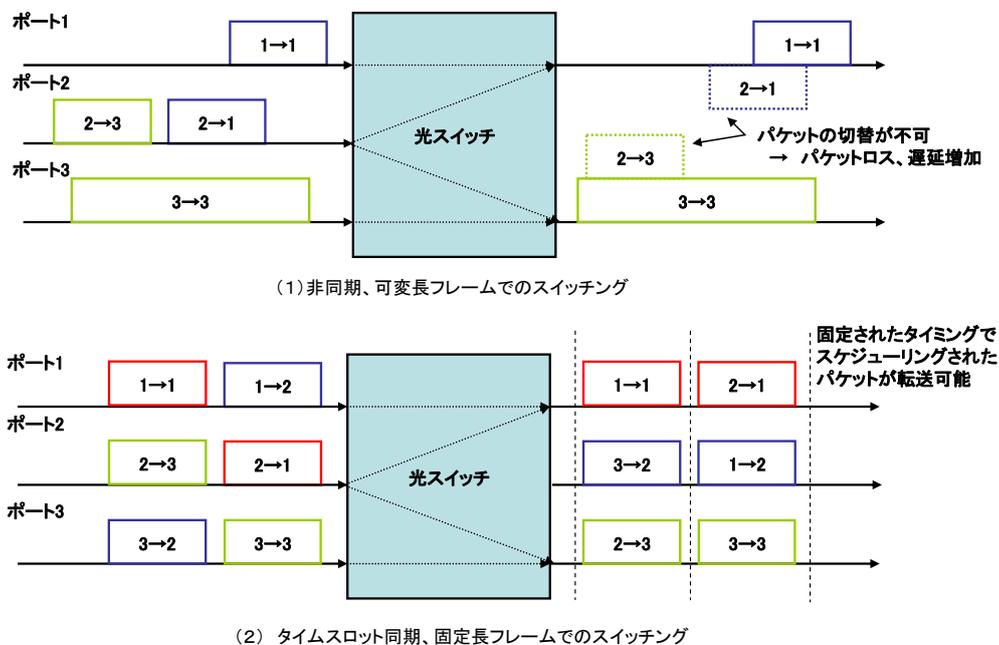


図 5.3-2 光パケット転送方式の比較

ムでのスイッチングは、時間領域で多重された回線のスイッチ構成に近く、スイッチ部にバッファを持たない構成において有効である一方、固定フレーム長以下のサイズの信号を転送する際には、その集成等を行う必要があり、パケット転送効率の低下を招く恐れがある。上記の特徴をふまえて、光パケットネットワークへ適用した際の得失を表 5.3-2 にまとめる。スーパーコンピュータネ

ネットワークでは、ネットワーク転送の遅延時間が重要な性能指標である。非同期、可変長方式では、パケットの衝突が発生する場合、実用的な光バッファ、メモリ素子が存在しないために、パケットを再送する再送制御が必要になる。

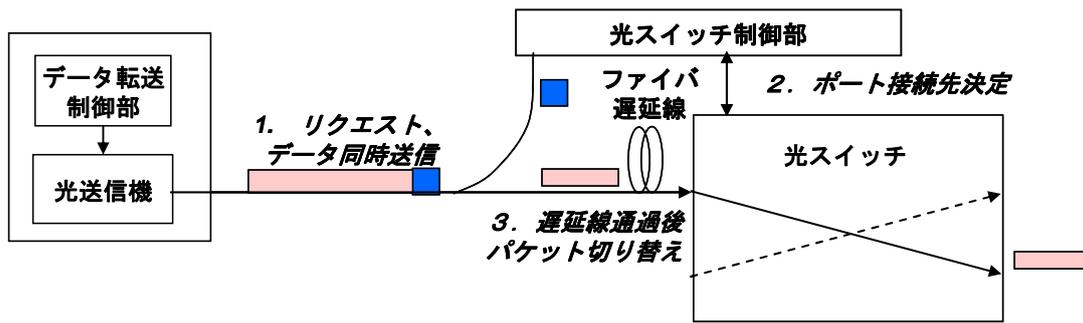
表 5.3-2 光パケット転送、交換方式の比較

	パケット衝突回避 =遅延時間	帯域利用率	高精度 システム同期	バルク データ転送
同期、固定長	○	○	×(必要)	△
非同期、可変長	×	△	○(不要)	○

その際の処理時間がそのまま遅延時間に影響を及ぼしてしまう。高精度のシステム同期など、技術的課題はあるが、光パケットの転送方式としては同期、固定長フレームでの転送方式が優位である。

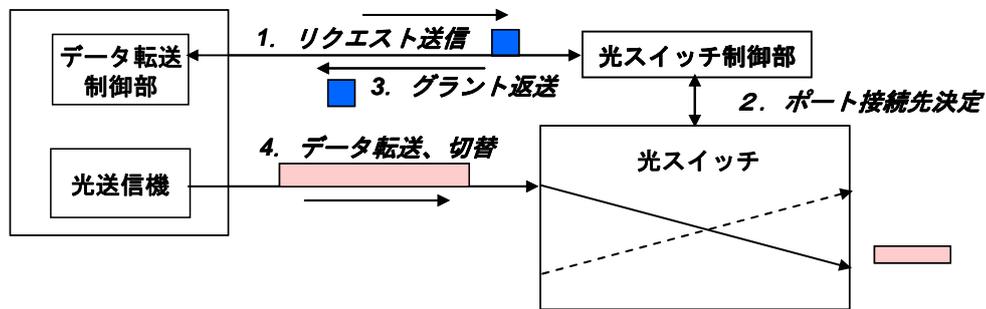
5.3.3 光パケットスイッチネットワークの経路設定方式

光パケット信号の経路決定方式としては、接続先計算ノードなどのアドレス情報と、データペイロードを同一の信号帯域内（インバンド）で転送し、スイッチ部においてアドレス情報を読み取り、ポート間での調停、パケット転送を行うインバンド方式と、アドレス情報とデータ主信号は別リンクで光スイッチ部に送り、制御チャンネルを介して経路設定を行った情報をもとにデータ転送を行うアウトバンド方式が考えられる。それぞれの経路設定方式を図 5.3-3 に示す。インバンド方式では、データとアドレス情報を同時に送るために、経路決定を行う間、データを光スイッチ側で退避させておき、アドレス情報をすべてスイッチ内で処理するために、パケット送信ノード側とは転送データの送信可否についての通信を行う必要がなく、経路設定に必要となる制御チャンネルは送信ノード側からスイッチ側への 1 方向のみの転送処理で完了することができる。一方、アウトバンド方式では、制御チャンネルを介して経路設定のためのデータのやり取りを行った後に、パケットの転送を行うために、制御チャンネルが送信ノードと光スイッチの間で双方向の転送が必要となり、その間の処理時間がデータ転送までの処理遅延となってしまうデメリットがある。しかしながら、



1. データと制御信号を同一帯域内 (in-band) で転送
- 2-1. 光スイッチ制御部でリクエスト処理
- 2-2. リクエスト処理の間、遅延線内で光信号は待避
3. データのスイッチング

(1) インバンド制御方式



1. リクエスト信号をデータ転送前に送信。データは送信機側電気メモリに待避
- 2-1. 光スイッチ制御部でリクエスト処理
3. 経路決定後、送信機側にグラント(許可)返信
4. データ転送、スイッチング

(2) アウトバンド制御方式

図 5.3-3 光パケット信号の経路設定制御方式の比較

光スイッチ技術においては、光信号を光信号のまま処理できる大規模論理回路が存在しないため、異なるポート間でのパケット衝突回避のためには、いったん電気信号に制御パケットを変換して、ポート間での調停処理を行う必要があるため、最終的には高速な光電気変換回路が必要となってしまいます。また、パケットの衝突を回避し、調停を行った通りにパケットを転送するためには、バッファ素子のみではなく、光の RAM 素子が必要になるため、インバンドでの転送方式を採用することは、現実的ではない。アウトバンド転送方式は、双方向での経路設定処理が必要となるが、電気メモリ技術を活用することが可能であることから、電気技術による柔軟な経路設定と、波長分割多重技術によって広帯域化されたデータ信号を交換する利点を持つ。このため、アウトバンド転送

方式のほうが、スーパーコンピュータネットワークには有効である。

以上の 5.3.2 および、5.3.3 項における検討結果より、本開発においては、同期固定長フレームを用いた光パケット転送と、アウトバンドでの経路設定方式を採用することとし、光パケット生成部、光スイッチ制御部の基本構成の検討、光パケットスイッチに適用可能なスイッチ技術の検討を行う。

5.4 光パケットスイッチの転送効率

5.3 節で検討したように、同期、固定長フレームを用いた光パケットの転送および、アウトバンドでのパケット経路決定方式を採用することを前提にして、光パケットスイッチにおける、実効転送速度、パケット損失率、遅延時間など、各種光スイッチの基本特性を明らかにする。

5.4.1 光パケット信号転送フロー

図 5.4-1 に光パケット信号転送方式の転送フローの概要を示す。まず、各計算ノードからノード群間に渡り転送される信号が Leaf スイッチを介して光パケット変換部に転送される。これらの信号は、行き先毎のアドレス情報(イーサネットの MAC アドレスなど)によって振り分けられて、それぞれ光パケットスイッチの転送先ポートごとに割り当てられたキュー(VOQ : Virtual Output Queue)に格納される。光パケット変換部において、これらの VOQ 情報を管理するトラフィックマネージャ部が、VOQ に格納されたパケット情報を基に転送先ポートへの接続要求を、光スイッチ制御を行うアービタ部に転送する。この際、データ信号と、経路設定要求は別波長の光信号で波長分割多重されて転送されることにより、1 芯の光ファイバで転送することが可能である。アービタにおいて、各計算ノード群から転送されてきた接続要求に対して経路決定処理を行い、決定された接続先情報、転送タイミングを各計算ノード群へ返送する。各計算ノード群の光パケット変換部は、アービタからの設定情報を基に、VOQ に格納されている転送データを読み出し、光パケット信号に変換し、光パケットスイッチへの転送を行う。この際、アービタで決定された経路情報は、光スイッチにも転送され、所望のタイミングで、所望のポートに接続するように光スイッチの設定が行われ、各光パケット変換部から送出された光パケット信号は光スイッチ部でスイッチングされて、接続先の計算ノード群へ転送される。

パケット転送および、制御チャネル処理シーケンスを図 5.4-2 に示す。制御信号とデータ信号はそれぞれ独立しており、それぞれのパケット経路決定(アービトレーション)を行っている間に、次の経路決定を行うことが可能であり、パイプライン的にパケット経路決定、パケット転送処理が可能となる。この際、計算機ノード群の光パケット変換部において、光パケットは制御チャネルの往

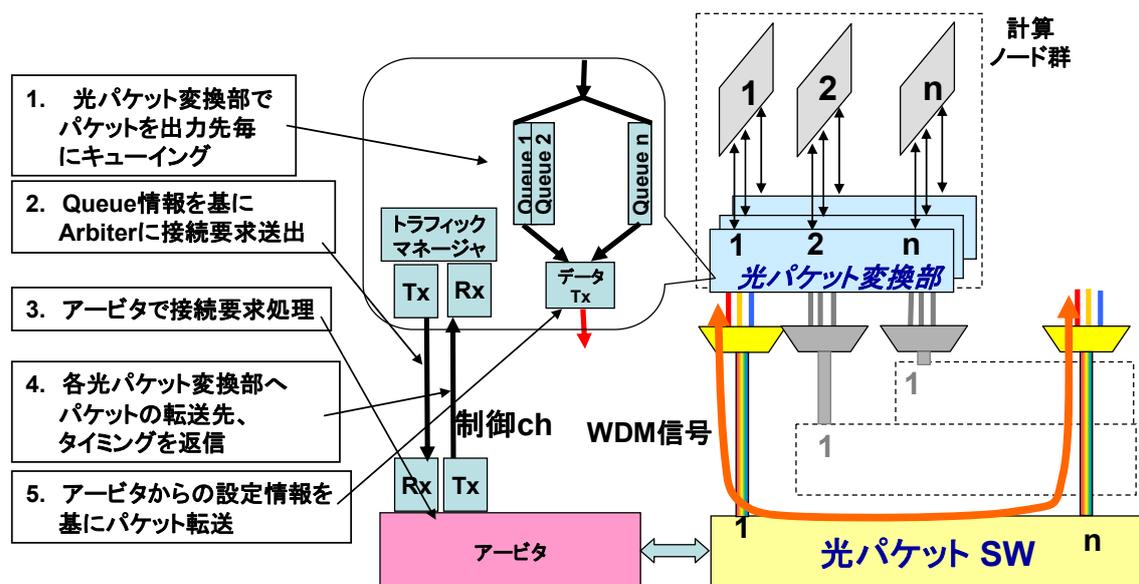


図 5. 4-1 光パケット信号転送フロー

復伝搬遅延時間とアービタでの経路決定に要する時間と、系統的に必要となるパケット間隔（ガードタイム）の処理が完了するまで、光パケット変換部のVOQにより転送処理を待つ必要がある。ガードタイムとして系統的に考慮に入れるべき項目としては、光スイッチの切替え時間、各光パケット変換部から送出される光パケット信号が光スイッチまでに到着するまでのスキュー、および外的要因によるシステム変動、例えば、温度変化などに伴う、光ファイバ中の屈折率変化による、光パケット信号の光スイッチへの到着時間変動が考えられる。また、光パケットの転送間隔は経路設定のアービトレーションに要する時間とガードタイムによって決定され、アービトレーション時間とガードタイムの短縮化を図ることによって、転送間隔（=最小転送パケット長に相当）を短くすることが可能となる。

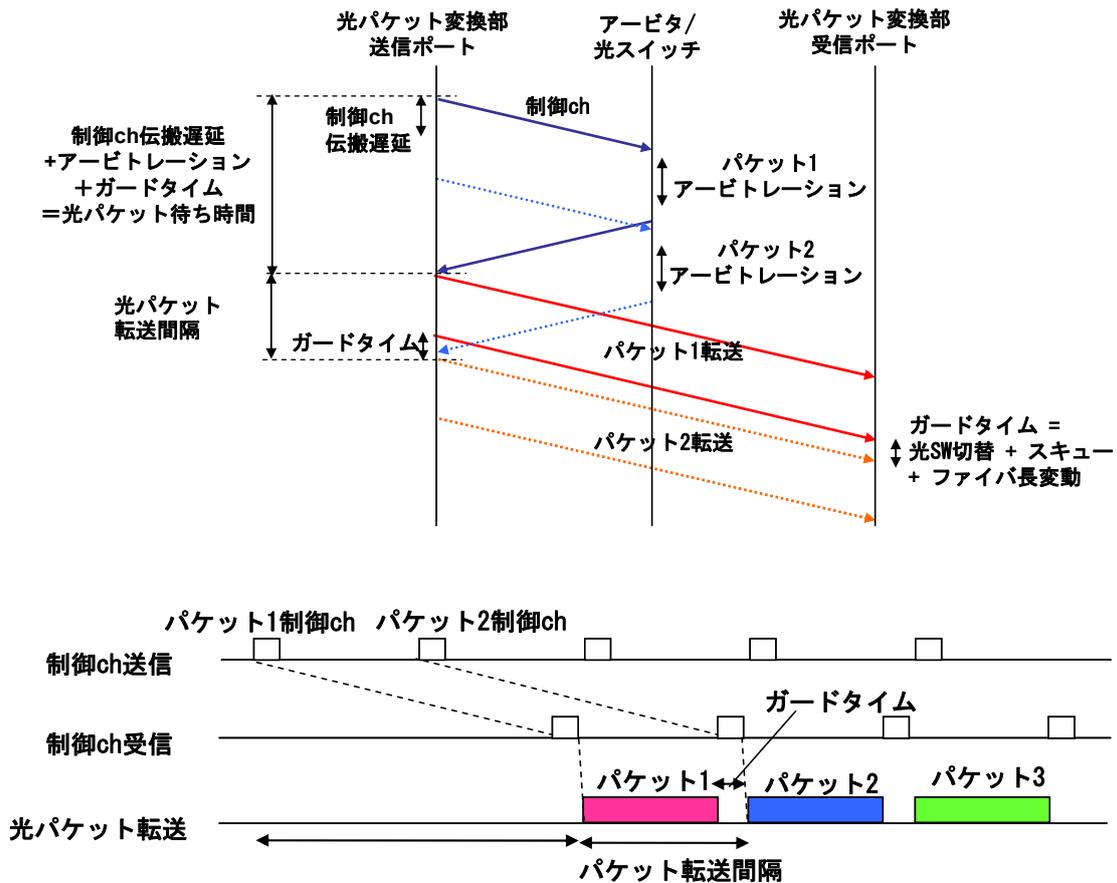


図 5. 4-2 パケット転送シーケンスとパケット変換部でのデータ送出
タイミング

5. 4. 2 光パケットの実効転送速度

前節で述べた光パケット転送シーケンスでは、光信号パケット長、アービトレーション時間の間には、トレードオフの関係がある。光パケット長を短くすると、アービトレーションに要する時間が短くなり、大規模なスイッチへの適用が困難になる一方で、アービトレーション時間が長くなると、短いパケットを転送した際の実効転送レートが下がってしまう。その関係を図 5. 4-3 に示す。横軸はアービトレーションに要する時間で、縦軸はパケットの実効転送効率である。パケットの実効転送効率は、図中にあるように、 $\text{パケット転送効率} = [\text{パケット転送サイズ}] / [\text{パケット転送間隔} (= \text{アービトレーション時間})]$ の関係で与えられ、リンク速度としては 320Gb/s (20Gb/s × 16 波長分割多重) を想定している。アービトレーションに要する時間として 100 ポート規模のスイッチの場合では、アルゴリズムなどにも依存するが、論文値 [5-5] および既存のプロセ

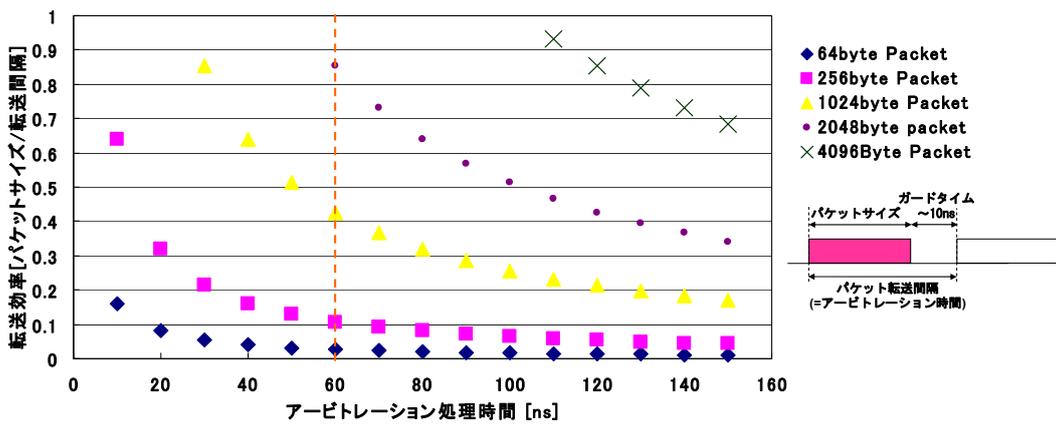


図 5.4-3 光パケット信号の実効転送効率

ス技術を用いたデバイスでのポート決定処理速度から概算すると、60ns が必要であり、光パケット信号の転送間隔は、60ns 程度が必要であると見積られる。また、光スイッチのガードタイムとしては、光スイッチの切り替え時間、スキューなどに対するマージンを考慮すると 10ns 程度が妥当であると考えられ、この際、320Gb/s のリンク速度で、64 バイト長のパケットを転送した際に要するパケット転送時間は $64 \times 8 (\text{ビット}) / 320 \text{Gb/s} = 1.6 \text{ns}$ の転送時間でパケットの転送が完了するために、パケット転送効率としては $1.6 \text{ns} / 60 \text{ns} = 0.03$ 、実効伝送ビットレートは $320 \text{G} \times 0.03 = 9.6 \text{Gb/s}$ となり、波長分割多重による広帯域化の効果がほとんど得られていない状況になる。光パケット変換部においてパケットの集成を行うことで、光パケット長を 2048 バイトとして、それ以下のパケット長のデータを 2048 バイト長のフレームにマッピングすることによって、実効転送速度は、0.86 程度まで改善することが可能となる。パケット長を伸ばすことで、さらに実効転送効率は改善される。次節以降では、リンク速度を 320Gb/s、光パケット長を 2048 バイトとした際の、パケット転送特性（パケット損失率、処理遅延時間）のシミュレーションを行う。

5.4.3 光パケットロス率、処理遅延時間

一般的に有限容量のメモリを持つシステムでのパケット損失率、処理遅延時間は、マルコフ過程を用いる待ち行列理論によりその特性を計算することが可能である[5-6]。今回のケースでは、計算ノードからのデータ入力（トラフィック負荷）に対して、光スイッチへの出力ポートの（出線数は 1）とし、固定パケット長単位でデータの転送処理を行うモデルを想定している。図 5.4-4 にパ

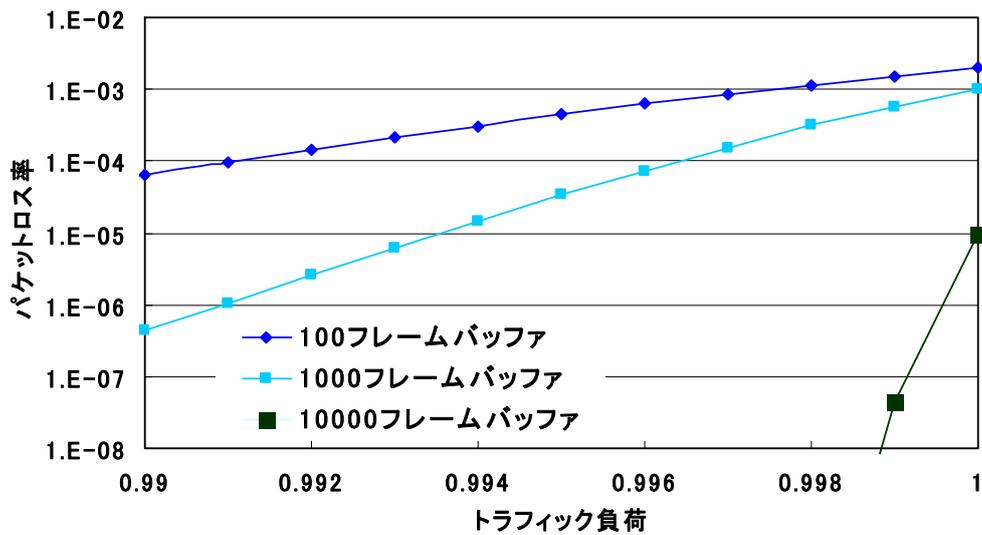


図 5. 4-4 2048 バイト長でのパケット損失率とバッファサイズの関係

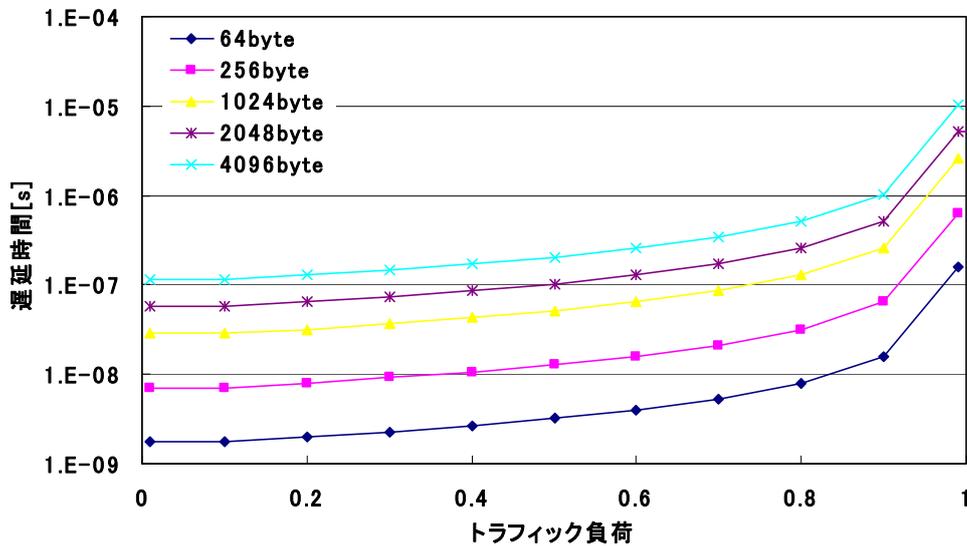


図 5. 4-5 パケット処理時間とフレーム長の関係

ケット長を 2048 バイトとした場合のトラフィック負荷と、パケット損失率、および、光パケット変換部に実装するバッファサイズの関係を示す。バッファサイズとして、100%のトラフィック負荷時に 99.999%の確率で転送を行うには 10,000 フレーム分(2,048x10,000=20.48MB)のメモリが必要であることが見積もられる。また、パケット処理による遅延時間とトラフィック負荷の関係を図 5.4-5 に示す。2048 バイトの転送フレームでバッファリングすることによる処理遅延時間は数百ナノ秒から 1 マイクロ秒であると見積もられる。

上記のシミュレーションにより、パケット転送処理の高効率化には、短いパケット長のスイッチを取り扱うことが有効であることが明らかである。しかし、光スイッチのみの構成においては、短いパケット長を扱うことによって、アービトレーション時間の制約によるポート数の減少などの課題や、数ナノ秒単位のガードタイムが無視できない構成のためパケット転送効率がある値以上、改善されないなどの本質的な課題が存在する。

上記の検討結果から、光パケットスイッチ部は、広帯域のリンクを用いてバルクデータを一括転送、交換する方式に適しており、コレクティブ通信などに用いる、小サイズのデータについては、別途、演算機能などを有する高機能スイッチネットワークを介して接続する構成が、ペタスケールシステムに適したシステムであると考えられる。

5.5 光スイッチアーキテクチャ

5.5.1 光スイッチアーキテクチャの比較

表 5.5-1 に現在までに検討されている光スイッチアーキテクチャとそのパケットスイッチ技術への適用についての比較表を示す。多ポート光スイッチに用いられるアーキテクチャとしては、(1)単一ステージマトリックススイッチ、(2)多段 Clos 型スイッチ、(3)分配選択型スイッチの大きく 3 つの形態に分けられる。単一ステージ型スイッチでは、少ないデバイス数で、大規模スイッチが実現可能である一方、装置の拡張性においては、スイッチ単位での、拡張、交換となるため、少数ポート単位での拡張が不可能であり、また、スイッチ中の 1 ポートに障害が発生した場合には、他の正常運用されているすべてのチャネルを交換する必要があるため、装置拡張の柔軟性や、インサービスでの保守などの点に欠点がある。大規模単一ステージに適用可能な技術としては、MEMS 型や液晶型、電気光学効果などを用いる、自由空間を伝搬する空間ビームの向きをスイッチ素子によって偏向するデバイスがある。MEMS 型、液晶型では多ポート化が可能ではあるものの、その動作原理が微小ミラーの機械的動作や、液晶素子の配向変化のために応答速度がミリ秒と遅く、現在実用化が進んでいる波長パスをベースとするフォトニックネットワークにおいて導入が開始さ

れているが、高速スイッチの実現には不向きである。また、電気光学効果を用いるものは3章で述べたように、数百ナノ秒程度の高速動作が可能であるが、数ナノ秒単位の高速動作を実現するには、非常に高い動作電圧が必要となる。また、高速波長可変レーザと周回性のアレイ導波路型回折格子(AWG: Arrayed Waveguide Grating)の組み合わせによって、波長可変レーザの高速切替え制御を行うことによって、波長情報に相当するAWGの出力ポートを切り替えることでスイッチを行う構成が提案されている[5-7]。波長可変レーザの高速制御は長期信頼性などの観点から複雑であり、また、スイッチポート数が波長数によって、転送速度がAWGの透過帯域特性によってそれぞれ制限されてしまい、波

表 5.5-1 光スイッチアーキテクチャの比較

アーキテクチャ	特徴	適用可能な光SW技術	速度	ポート数	光パケットスイッチへの適用性
単一ステージマトリックススイッチ	長所 ・初期導入時において、多ポートを実現するため、少ないスイッチ素子数で大規模スイッチが実現 短所 ・スイッチ単位での拡張、交換のため、拡張時の柔軟性に乏しく、単一ポートでの障害発生で全ポートの交換が必要	MEMS型	ミリ秒	大	×
		液晶型	ミリ秒	中	
		電気光学効果偏向型	マイクロ秒	中	×
		周回性AWG型 + 波長可変レーザ	ナノ秒	中	△
多段Clos型	長所 ・電気パケットSWで一般的、中間段でバッファを持つことにより柔軟なSW拡張性とパケット転送特性を持つことが可能 ・SWを多段化することで光信号特性の劣化が発生し、現実的なバッファ素子を持たない光SWでは電気スイッチで得られるメリットが得られない	マツハツエンダ型	ナノ秒 (EO効果)	小	×
		方向性結合器型	ナノ秒 (EO効果)	小	
		交点反射型	ナノ秒	小	
分配選択型	長所 ・光信号レベルでの分岐によるブロードキャスト、マルチキャストが可能で、ポート単位での装置拡張が可能 短所 ・全ポートへの信号の分岐・合流が必要なため、内部での光損失が大きくなり、選択するデバイス数が増加する。	1:n SW切替 & カプラ合流 (Delivery & Coupling型)	ナノ秒 (EO効果)	中	○
		可変フィルタ選択型	マイクロ秒	中	△
		SOAゲート選択型	ナノ秒	中	○

長分割多重化による広帯域化に適用することが困難である。

多段 Clos 型スイッチは、中間段においてバッファを持つことによって、ポートの拡張性と、優れたパケット転送効率を実現できる特徴から、一般的に電気パケットスイッチにおいて広く使われている。これを光スイッチに適用した場合には、スイッチを多段接続することによる光信号特性の劣化が顕著になり、また実用的なバッファ素子がない光スイッチ技術においては、電気パケットスイッチで得られる特徴を得ることが不可能である。これらの多段 Clos 網に適用可能なスイッチ技術としては、高速動作特性を有するものは電気光学効果を用いるものが多く、光学結晶に起因する挿入損失や、スイッチング特性の偏光依存性によってトランスペアレントなネットワークには適用することが困難である。また、偏光依存性、挿入損失が小さい石英材料を用いたスイッチでは、その切替えが温度変化による材料中の屈折率変化を用いるため、デバイス中への熱伝導特性がスイッチ速度を決定するため、ミリ秒程度のスイッチ速度に制限されてしまう。

分配選択型スイッチ構成では、光信号を一旦分配し、選択素子によってオンオフ、波長選択、スイッチングを処理するために、光信号レベルでのブロードキャストやマルチキャストが実現でき、またその特性からポート単位での拡張が可能な構成となっている。その一方で、光信号を分岐挿入するためには、内部で光カップラを用いるため、ポート数が増加すると、光信号の分岐、合流による損失が増加してしまう欠点があり、またカップラ部ではノイズ成分が累積してしまうために光信号への影響が大きくなる。分配選択型のスイッチでは、1:n スイッチと光カップラを用いる分配合流型 (DC : Delivery & Coupling) 型の構成があり、1:n SW を実現する技術としては、電気光学効果を用いるもの、熱光学効果を用いるものが適用可能であるが、電気光学効果を用いるものは偏光依存性が大きく、また熱光学効果を用いるものは切替え速度がミリ秒程度と、一長一短である。また、波長分割多重された信号が各出力ポートへ分配され、その中から所望の 1 波長を選択する波長可変フィルタ型では、現在までに実現されている波長可変フィルタとしては 4 章で述べたように、その動作速度はマイクロ秒レベルであり、カップラによって多ポート化した場合には、分岐合流損失を補償する必要がある。また、複数の波長を同時に選択可能な波長可変フィルタは実現されていない。半導体光増幅器をゲート素子として用いる場合には、ナノ秒単位のオンオフ制御が可能であり、また増幅機能を有するため、光カップラによる分岐損失を補償することも可能である。光ゲート素子としては変調器などで用いる電界吸収型のゲート素子も考えられるが、高速動作特性は有するものの、カップラでの損失に加えてスイッチ単体での挿入損失を含めると、大規模化することは困難である。

上記の比較検討から、本研究においては、高速動作が可能なスイッチング特

性、偏光依存性、拡張性、制御の容易性、波長分割多重信号の一括切替えが可能、などの点から、半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) を光ゲートスイッチとして用いる分配選択型スイッチ構成をベースに検討を進めていく。この方法は、SOA の増幅機能により多ポート化した際の光損失補償が可能であることや注入電流の制御による利得/吸収特性を用いた高速かつ高い消光比のオン・オフスイッチ動作が可能である。

5.5.2 半導体光増幅器(SOA)を用いた多段ゲート分配選択型スイッチ

SOA を用いた光ゲートスイッチの動作原理を図 5.5-1 に示す。SOA は InP 基板上に活性層が形成されており、電流注入により光学利得を発生する。駆動する電流の ON/OFF により、光信号のゲート制御が可能となる。SOA は従来から光

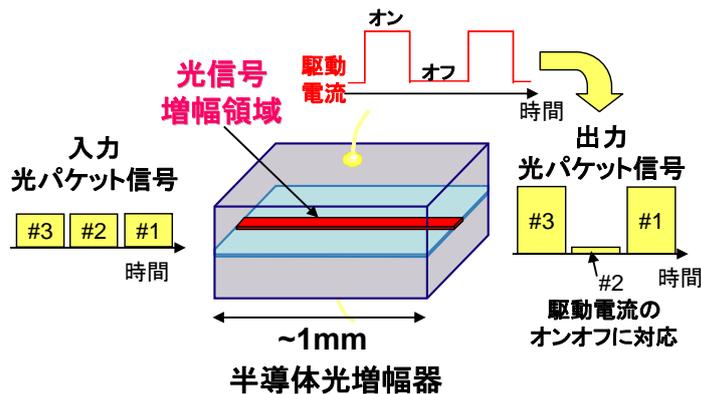


図 5.5-1 半導体光増幅器(SOA)による光ゲートスイッチ

スイッチ素子技術として検討が進められていたが、利得 (スイッチング) 特性の偏波依存性、高速信号に対するパターン効果、WDM (Wavelength Division Multiplexing) 信号に対する四光波混合などの非線形光学効果による光信号波形の劣化などに課題が残されており、高い光 SNR (Signal to Noise Ratio) を得るための光スイッチ内での光特性の検討を基に、SOA 素子の要求仕様の明確化と、これらの諸特性を実用レベルに改善し、かつ、SOA 素子のモジュール化・サブシステム化技術の開発が研究課題となる。また、分配選択型アーキテクチャは光信号を一旦すべてのポートに分岐し、そこから選択された信号を合流し

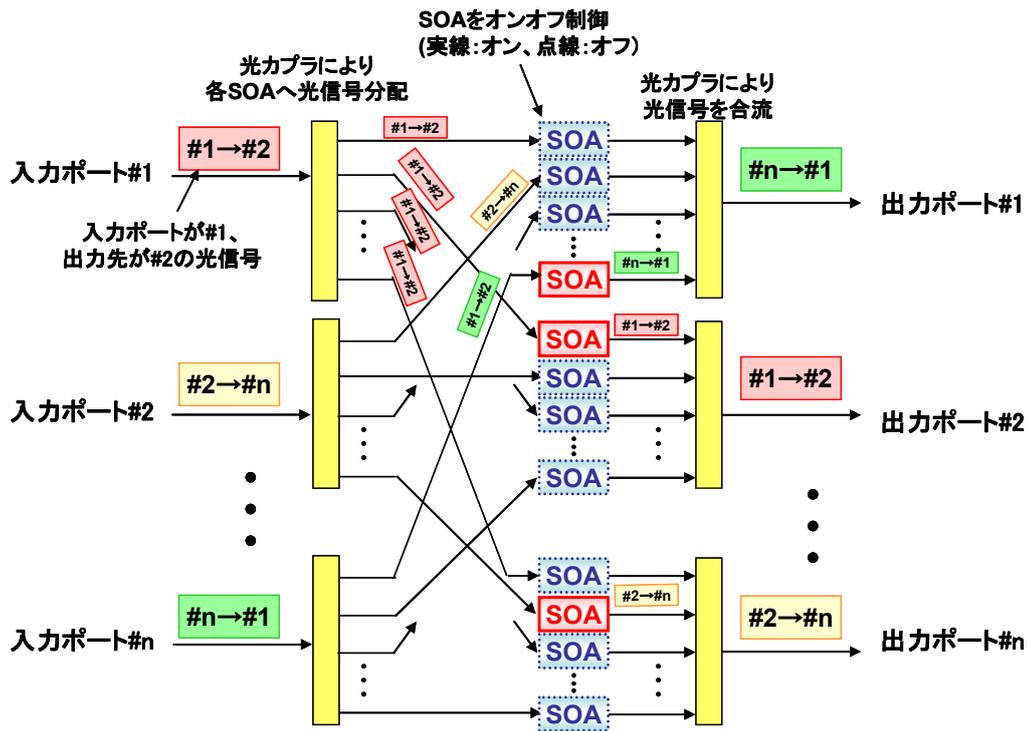


図 5. 5-2 SOA を用いた分配選択型スイッチの基本構成

てくる構成のため、分岐損失の増加や合流カプラ部での雑音成分の累積ため、16ポート程度の規模にとどまっていたが、これらを100ポート以上にまで拡張可能とする光方式の検討も研究課題となる。SOAをゲート素子として用いる分配選択型スイッチの基本構成を図5.2-2に示す。スイッチの動作原理は、入力ポートより、入射された光信号が、分配用光カプラにより入出力ポート数に相当する数の光信号に分岐され、所望のポートのSOAのみをオン状態とし、また、その他のポートのSOAはオフ状態とし、各SOAからの出力をカプラによって合流することで、接続すべき入力ポートの光信号のみを選択（増幅）して、出力ポートへ結合する。

分配選択型スイッチアーキテクチャは、一旦光信号をスイッチポートに相当する数に分岐する必要があり、そこからSOAによって選択された信号を光カプラで合流する構成となるため、スイッチ内部で高い光信号対雑音比を実現する構成と、多ポートから合流してくる信号間での高いクロストーク抑圧特性が必要となる。この際、現在までに検討されているようなSOAゲートスイッチを1段のみで用いた場合の問題点を図5.5-3に示す。

SOAは増幅特性を有するので、挿入損失を補償することは可能であるが、ポ

ポート数が 256 ポート規模になると、入力カプラ、出力カプラでそれぞれ 24dB の分岐挿入損失が発生する。これらを 1 段 SOA ゲートで補償することはデバイス原理的に不可能であり、スイッチ内部の損失が 20dB 以上になってしまう。

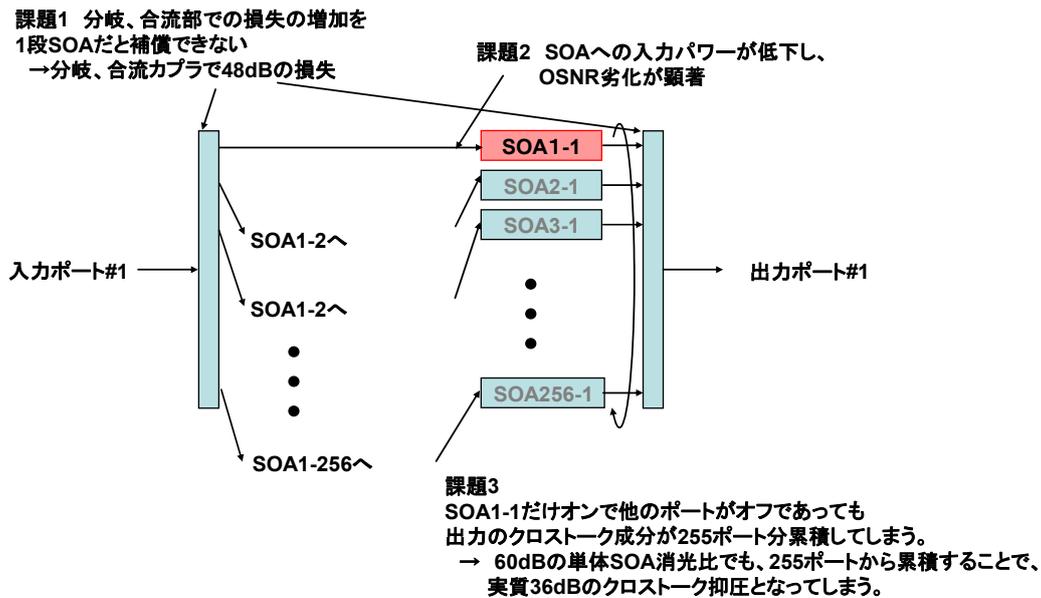


図 5.5-3 1 段 SOA ゲートスイッチによる多ポート化の課題

さらに、分岐カプラを通った後で減衰された光信号が SOA に入射されるために、SOA 透過後の OSNR の劣化が顕著になってしまう。そのうえ、合流側においては、SOA からの自然放出光やゲートオフの状態でも消去しきれないレベルのノイズが他の 255 ポートから混入してしまうために、光スイッチ 1 段の消光比特性が -60dB 程度確保可能であっても、他の 255 ポートからの雑音成分が累積されてカプラで合流することを考えると、-24dB の雑音成分が累積されることとなり、実質のクロストークとしては 36dB 程度の特長になってしまう。このため、1 段 SOA ゲートで 256 ポート規模のスイッチを構成し、フォトニックノードに適用することは、不可能である。

上記の課題を解決する構成として本研究で提案する多段 SOA ゲートを用いる分配選択型 256 ポートスイッチの構成を図 5.5-4 に示す [5-8]、[5-9]、[5-10]。256 ポート分配側においては、スイッチングなどの高速動作が必要ないため過

渡応答特性は特配慮されていない、一般的な高出力光ファイバ増幅器（EDFA：Erbium Doped Fiber Amplifier）を採用し、分配する際の光損失を補償する構成とする。一方、合流側においては、スイッチングに高速動作が必要とされるため、SOAを信号選択、および、他ポートからの漏れ光成分を抑圧するための雑音抑圧素子として多段配置し、スイッチングされる経路上にあるSOAを同期させて動作させることで、高速動作と多ポート特性を両立させるスイッチ構成を実現することが可能である。今回考案した、多段SOAゲート型を採用することにより、スイッチを多段制御する複雑性が増えるもののOSNR劣化を抑制するために高い信号光レベルを維持することが可能であるため、十分なスイッチ内部での信号伝送特性が実現でき、また、クロストークなどの雑音成分に関しては等価的に合流されるポート数を、SOAを多段にすることで削減することが可能となり、隣接ポート間での高いクロストーク抑圧特性を得ることが可能となる。

また、図 5.5-4 に示すように、多段SOAゲートによる配選択型スイッチは、光スプリッタとSOA素子が規則性をもって配置されるため、この基本構成要素、例えば、合流用光カップラとその前後にあるSOAをInP基板上にモノリシック集積化を行い、1モジュールに集積する形態が考えられる。表 5.5-2 に、集積型選択スイッチと従来技術を用いる多段スイッチ構成の比較を示す。このような構成をとることによって、光ファイバと半導体との結合点および光の反射点が削減されることで、半導体導波路および光ファイバ間のモード不整合による光損失の低減、利得特性のリプル特性などを低減するためのアイソレータの点数削減による、部品点数の削減、過剰損失などの低減効果が期待される。

光スイッチアーキテクチャより検討した多段SOAゲート配選択型スイッチの光レベルダイヤグラムおよびOSNRを図 5.5-5 に、その際のスイッチ特性への要求仕様を表 5.5-3 にまとめる。

40Gb/sの伝送速度を仮定し、送信側のOSNRを45dBとした際に、SOAの雑音指数（NF：Noise Figure）から、スイッチ出口でのOSNRは30dB以上確保する必要がある。光レベルダイヤおよびOSNRの検討から、SOAへ要求されるデバイス特性として、光信号の線形出力+6.0dBm以上、カップラ損を補償するための利得として、14.0dB以上、消光比として57.5dB以上の特性が、1チャンネルあたりのSOAに必要なことを明確化した。また、SOAゲートの多段化数を増大することで、256ポート以上への拡張も可能である。

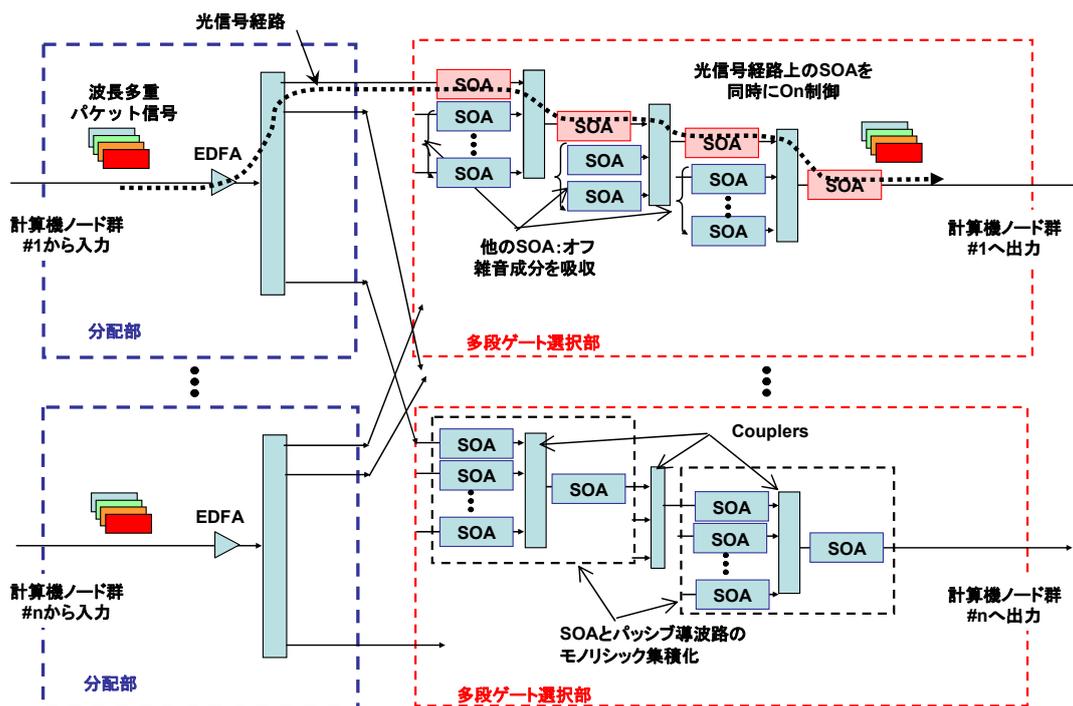


図 5.5-4 多段 SOA ゲートによる 256 ポート分配選択型スイッチの構成

表 5.5-2 集積型選択スイッチの構成とその特長

	集積型選択スイッチ	従来技術による多段スイッチ
構成	<p>点線部を半導体導波路で集積化</p>	
光損失	<p>27dB損失をSOAで補償 半導体、光ファイバ結合点2点(各5dB) アイソレータ2点(各1dB) カプラ損失(15dB, ファイバ型+4dB)</p>	<p>35dB損失をSOAで補償 半導体、光ファイバ結合点4点(各5dB) アイソレータ4点 カプラ損失11dB</p>

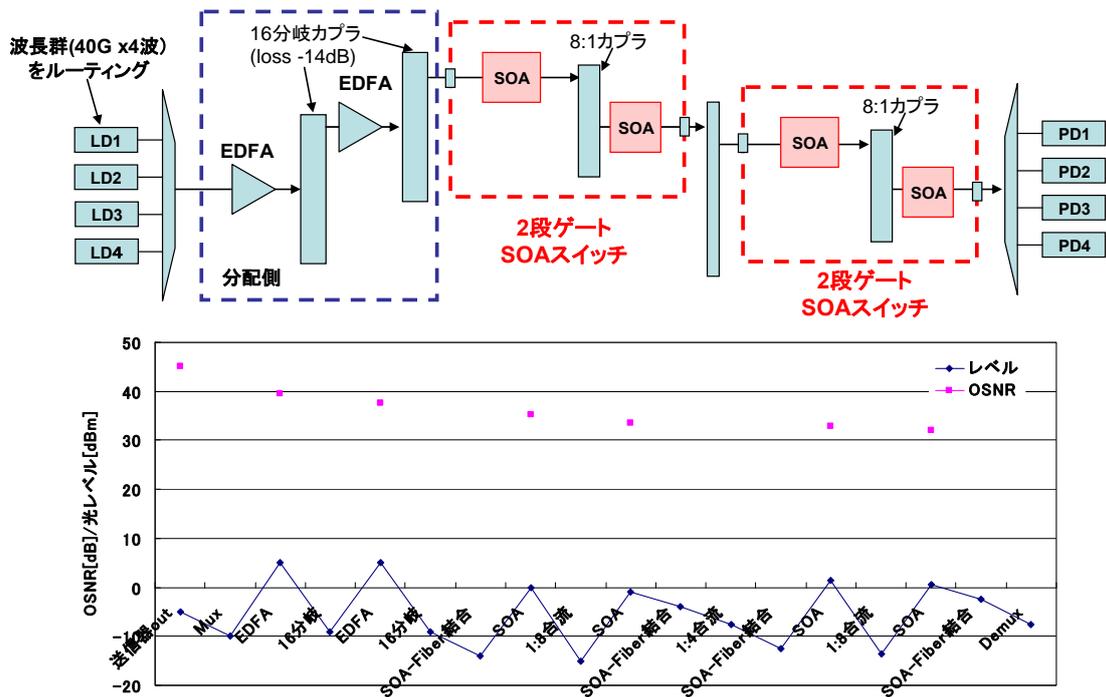


図 5.5-5 256 ポートの分配選択型スイッチの光レベルダイヤグラムと OSNR

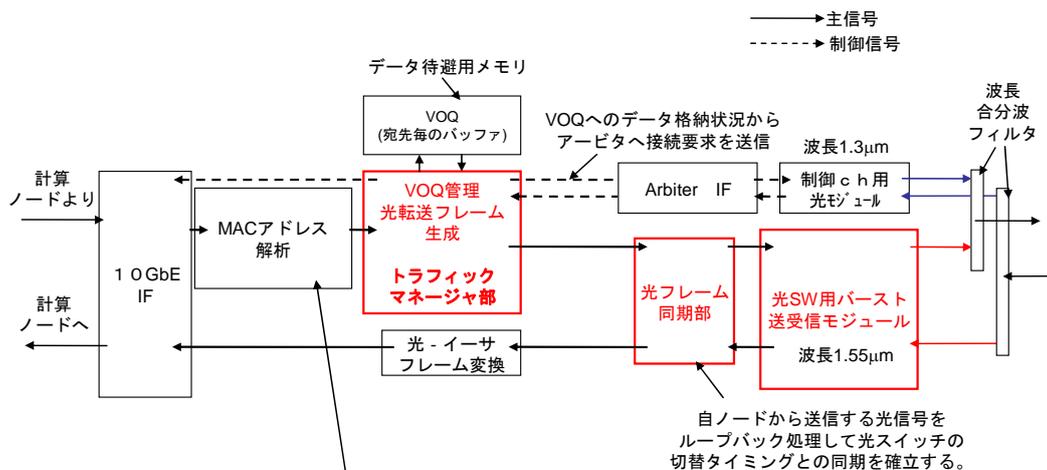
表 5.5-3 SOA への主な要求仕様

項目	単位	特性
線形領域 最大出力	dBm	+6.0 0dBm/ch, 4波WDM C band
利得	dB	14.0
利得チルト ポート間出力偏差	dB	±2.0
消光比	dB	57.5 (入力レベル-14dBm/ch)
雑音指数	dB	4.5

5.6 光パケットスイッチネットワーク制御方式

5.6.1 光パケット変換部の全体構成

光パケット変換部の全体構成を図 5.6-1 に示す。実際の計算機の信号フレームは、まだ確定していないため、設計試作段階においては、計算機側からの信号はイーサネットフレームを用いることにする。従って、データは、イーサネットフレーム中の MAC アドレスに基づいて転送されることとなる。光パケット変換部(トラフィックマネージャ部)では、計算ノード側より転送されてくるデータを、転送先の MAC アドレスを識別することによって、それに対応する光スイッチの転送先ポートごとに、光パケット変換部内に実装されている VOQ (Virtual Output Queue) にデータを格納する。その後、Queue にデータが格納されたことをトリガにして、Queue 情報を基に制御チャネル (Arbiter Interface) を介してアービタへ光スイッチ接続要求の送出を行う。アービタからは経路決定の後、所望の接続ポートへの光パケット信号送出の許可 (Grant) が送出され、光パケット変換部では、Grant を受領後、VOQ から転送データを読み出し、光転送フレームに相当するデータを、光スイッチ用送信モジュールを介して光スイッチへ転送する。また、別の計算機ノードから、光パケットスイッチによって転送されてきたデータは、バーストモードでの光信号受信が可能な光受信機において受信され、光転送フレームから、イーサネットのフレームに変換され、計算ノード側へ送出される。この際、データ用の信号は波長 $1.55\mu\text{m}$ 、アービタ間の制御信号は波長 $1.3\mu\text{m}$ の光信号を用いて、それらは波長合分波用フィルタによって、多重、分離される。なお、光転送フレー



切替先のラック (SWポート) はEther MACにマッピングされている。
Ether MACアドレスを元に切替先の光スイッチポート(ラック)を選択。

図 5.6-1 光パケット変換部構成

ムの詳細および光転送フレームの同期制御部、バースト送受信部とのインタフェース規定については次節以降において記述する。

5.6.2 光パケット信号転送フレーム

光パケット信号を生成する際のフレームフォーマットを図 5.6-2 に示す。複数のイーサネット信号フレームを集成し、1つのパケット信号として転送を行うため、イーサフレーム格納部には、格納されているフレームの内部での分割状況や、格納されているフレームのデータ長を表す格納フレーム情報部を、イーサネットフレーム毎に付加し、イーサフレーム格納部に VOQ に格納された順にマッピングしていく。イーサフレーム格納部よりも長いジャンボフレームを取り扱う際には、転送先において分割されたジャンボフレームの再構成を容易に行うために、分割されたジャンボフレームのフラグメンテーション情報も、格納フレーム情報部を用いて転送される。イーサフレーム格納部の前には、光スイッチの切替え時間を保証するためのスイッチ切替えガードタイム部と、光パケットフレームの先頭を検出するためのフレーム検出コードが付加される。フレーム検出コードは、光スイッチでのスイッチ切替えタイミングと、光パケット変換部からパケット信号を送出する際のタイミングとを同期させるため

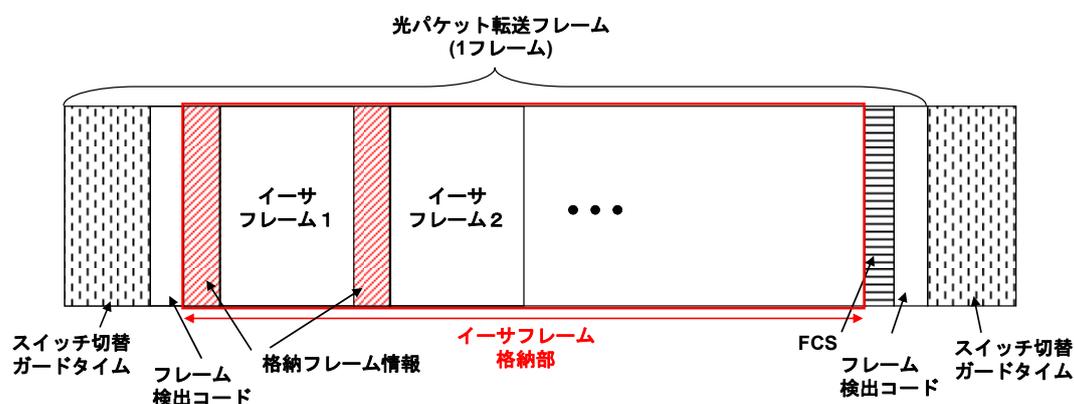


図 5.6-2 光パケット信号転送フレーム

に用いられ、その詳細は、次節で説明する。また、イーサフレーム格納部の後には、光パケット信号転送後でのフレーム内部での誤り検出を行うための、FCS(Frame Check Sequence)用データと、フレームの最後尾を意味するフレー

ム検出コードが付加されて、1つの光パケット転送フレームが構成される。

5.6.3 パケット送出タイミング機構の実装

光パケットを送出するシーケンスについては、既に記述したように、各計算ノード群の光パケット変換部から接続要求をアービタに送出し、各光パケット変換部からの接続要求に対する調停処理をアービタ部で行い、その返答結果を、再度、光パケット変換部に送出して、その返答結果を基に光パケット変換部から光パケット信号が光スイッチに送出されることとなる。この際、アービタにシステムの基準クロックとなるマスタクロックを配置し、各光パケット変換部との間の制御チャンネルの信号を、このクロックを用いて生成し、各パケット変換部へ分配して、その信号からクロック再生を行うことで、(光スイッチを含む)アービタと各光パケット変換部については、同一のクロック源によって動作することが可能となる。このクロックを基準に各光パケット変換部、光ス

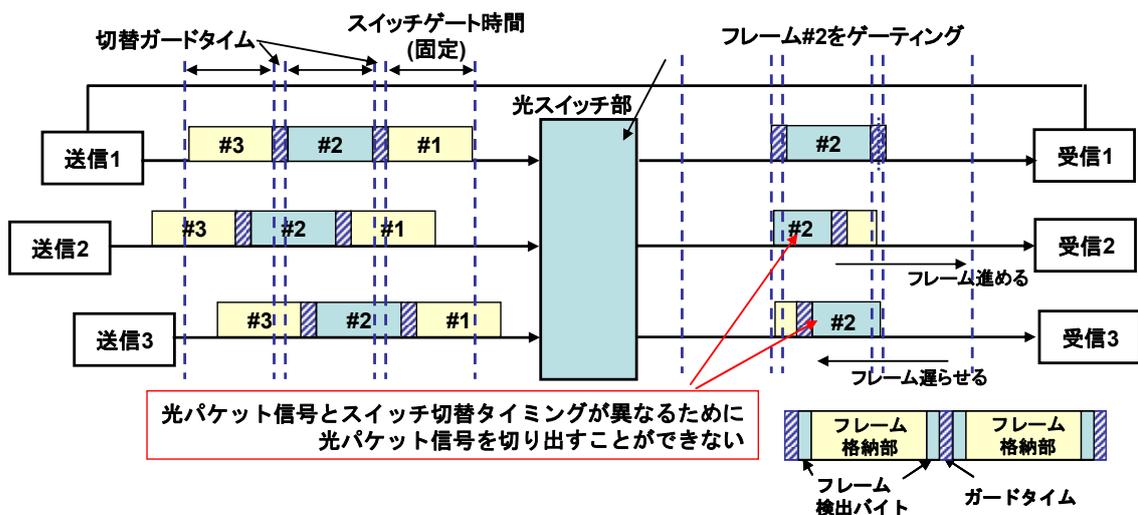


図 5.6-3 光パケット信号の到着タイミングずれ

スイッチはパケット切替え、パケット転送を行うが、各ノードと光スイッチを結ぶ光ファイバ長は各ノードでばらつきがあり、光ファイバ長 1m あたり 5ns の伝搬遅延時間が生じるため、図 5.6-3 に示すように、各計算ノード群から光スイッチまで光パケット信号が到着するまでの時間にスキューを生じてしまう。固

定長フレームで送出される光パケット信号を切り替えるために、光スイッチにおいては、どの入出力ポートに対しても、図中の破線で書かれた同一のタイミングで切替え処理を行い、任意の入出力ポート間に光パケット信号が同一のタ

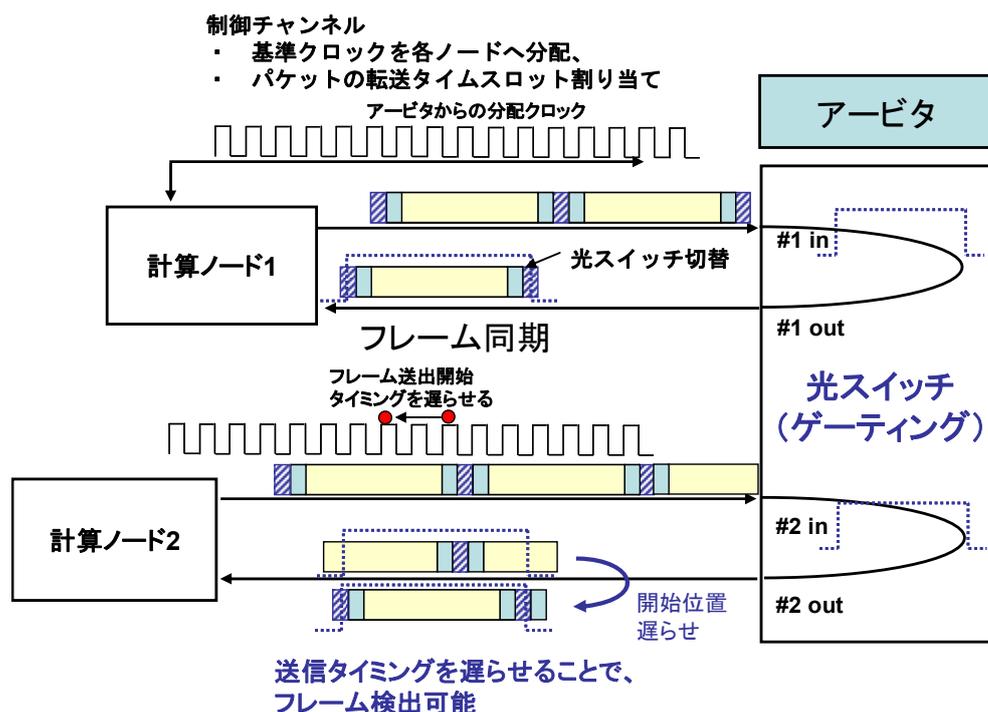


図 5.6-4 光スイッチとパケット信号との同期確立処理

タイミングで到着し、かつ光パケットの切替えタイミングと、その到着のタイミングがパケット間のガードタイムに許容される範囲内で同期が取れた場合には、全ポートにおいて、固定長フレームの切替えが可能となる。送信部1から送信されている光パケット信号列と光スイッチの切替えタイミングは、光信号のフレーム切替えを行うタイミングでの同期が取れているために、図中の光パケット信号中の斜線部で示されるガードタイム内で切替えが行われるので、#2

の packets が切り出されているが、送信部2、3から送信されたパケット信号と光スイッチの切替えタイミングは、送信2から送られたものに対しては切替

えタイミングが早く、また送信 3 から送られたデータに対しては光スイッチの切替えタイミングは遅いため、#2 のフレームを切り出すことができない。そのため、実システムの運用開始前に、スキュー補正のフェーズを行う必要がある。

この問題を解決する光スイッチと、転送フレーム間での同期確立シーケンスを図 5.6-4 に示す。光スイッチにおいては、アービタから供給されるクロックを元に、破線で示されている、転送光パケット 1 フレーム分をゲーティングするタイミングでのスイッチ動作を行い、各ポートに接続されている光パケット変換部との間でループバック系を構成する。前節で説明したように、光フレーム中に信号フレーム検出バイトを予め埋め込むことにより、光パケットの転送タイミングと、ゲートスイッチの切替えのタイミングが完全に同期されていない状況下では、光パケットの一部が、受信側でフレームの先頭が検出できずに受信不可になる、あるいはフレームの最終部分の検出が不可能になってしまう。そのため、受信機においてゲーティングされているタイミングで光パケットがスイッチ内を通過するように受信機側から、送信機側へ、スキュー量(先頭検出不可かフレーム端検出不可か)をフィードバックすることで制御を行う。先頭、およびフレーム後部の識別信号の両方の識別部を検出するまで制御を繰り返すことで、送信タイミングの調整を完了させる。送信タイミングは各ポート独立に制御することが可能であるため、運用中に 1 ポートのみ障害が発生した場合においても、他のポートに影響を与えることなく、同期の確立が可能となる。

5.6.4 バースト送受信モジュールインタフェース

光パケット変換部から光スイッチに送信される信号および、光スイッチから転送され光パケット変換部において処理される信号は、光バースト送受信モジュールを介して、光電気変換が行われる。そのインタフェースの構成を図 5.6-5 に示す。光パケット生成部とのインタフェースは送信、受信用の基準クロックと、低速の平行データ信号と、その信号に同期したクロック信号が相互接続され、光バーストモジュール内部において、低速の平行信号が高速のシリアル信号に電気段において多重化され、さらに光パケット信号へ変換されて光スイッチ部へ送出される。この際、送信光信号は、ガードタイム部分をパケット受信時の信号同期のためのプリアンプルとして使用するため、フレーム間に全く光がない状態で送信されるのではなく、1 と 0 の繰り返しパターンがフレーム間を埋めている状態になる。一方、光スイッチから転送されてくる信号は、ガードタイム内で切り替え処理が行われるために、ガードタイム部分が切り替え処理によって切り落とされるたパケット的な信号となって、光バーストモジュールに入射される。光パケット信号の転送ビットレートは、計算ノ

ードのインタフェースとして想定している 10 ギガビットイーサネットの信号に対して、ガードタイムなどを付加したフレームを転送するために 10.72Gb/s に転送速度を上昇させており、光パケット変換部との間では 16 並列 670Mb/s

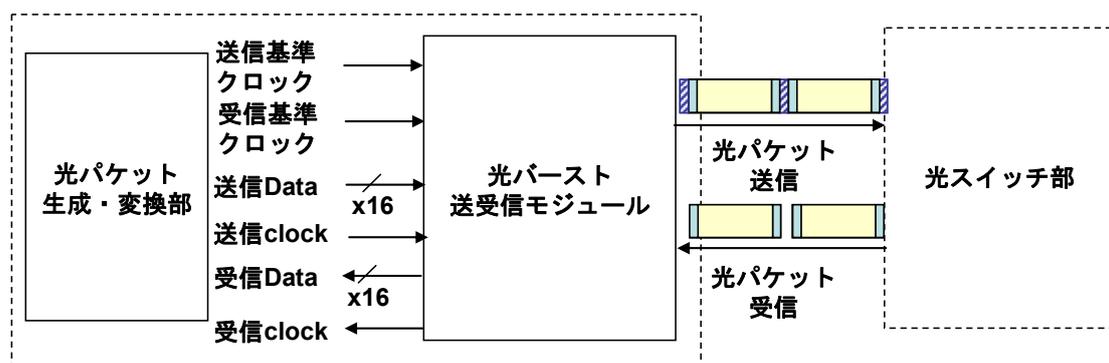


図 5.6-5 光バーストモジュールと光パケット生成変換部とのインタフェース

パラレルデータ転送を行っている。この際に、受信される光パケット信号はフレーム単位での同期はされているものの、フレーム間でのビット単位での信号位相同期は行われていないために、各光パケット信号毎にクロック再生を行い、そのクロックを基にデータ再生を行う必要がある。また、パケット毎に位相が異なるため、光パケット部との間でのクロックの移し替えを行う必要がある。バーストモジュール受信側の構成を図 5.6-6 に示す。光スイッチから転送されたデータはバーストモジュール内のフォトディテクタによって光信号から電気信号に変換され、変換された電気信号の一部は、パケットごとに瞬時応答クロック再生部において、クロック再生が行われる。再生されたクロックを用いて、D フリップフロップ回路においてデータ信号を再生することにより、到着する位相が異なるパケット信号が入射されてもデータ再生が可能となる。その後、10.72Gb/s の高速信号は分離部において 16 分割されて 670Mb/s パラレル信号に変換され、また、FIFO バッファにおいて、光パケット生成部から供給する受信基準クロックに、クロックを移し替えて転送される構成となる。

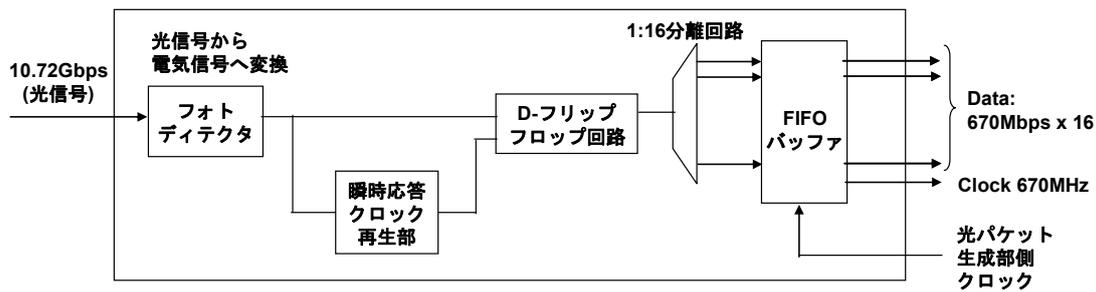


図 5.6-6 バーストモジュール受信側インタフェースの詳細

5.6.5 アービタ部の構成

アービタ部の基本構成を図 5.6-7 に示す。各光パケット変換部から送付されてくるポート接続要求、および各光パケット変換部に送信許可を送る光パケット変換部インタフェース、接続要求処理、経路決定、送信許可返答処理を行うアービタ部、および光パケット信号の経路決定結果を基に光スイッチを駆動させる光スイッチインタフェース部から構成される。また、アービタ内に実装される基準クロック源を用いて、光パケット変換部における光送受信モジュールを駆動し、各光パケット変換部において、受信信号からクロック再生を行うことによって、アービタを基準とするシステムクロック同期網を構成する。

光パケット変換部からの接続要求は、光パケット変換部インタフェースにより終端、アービタ部へ転送され、アービタ部において、各ポート間での接続要求に対する調停処理を行い、その結果を、光スイッチ制御部、および、光パケット変換部インタフェースを介して、光パケットスイッチの各機能部に、光スイッチのポート接続スケジュールを転送する。

図 5.6-8 にアービタ部における課題である Head of Line blocking (HOL) の課題を示す。HOL とは、各スイッチポートからの接続要求において、要求処理用のバッファが、宛先ごとに割り振られていない構成の際に発生する。接続要求バッファの先頭にある要求が処理されない限り、他のポートが利用可能である状況にもかかわらず、要求バッファ内の要求が処理されず実効的にスイッチ内のスループットが下がってしまう問題である。本課題を克服するために、2 段ラウンドロビンを用いたアービタ構成を、光パケットスイッチにおいて用いる。その構成を図 5.6-9 に示す。1 段目のラウンドロビンにおいて、接続要求の宛先を参照し、ラウンドロビンをかけることによって、接続要求処理が起きていない接続先ポートに対して、バッファ先頭以外の接続要求を処理すること

が可能となり、HOLの影響を抑えることが可能となる。2段目のラウンドロビンにおいて、1段目のラウンドロビンから転送されてきた接続要求に対して、送信元の情報参照して接続調停を行い、その結果をそれぞれ光パケット変換部インタフェース、光スイッチインタフェースへ転送する。

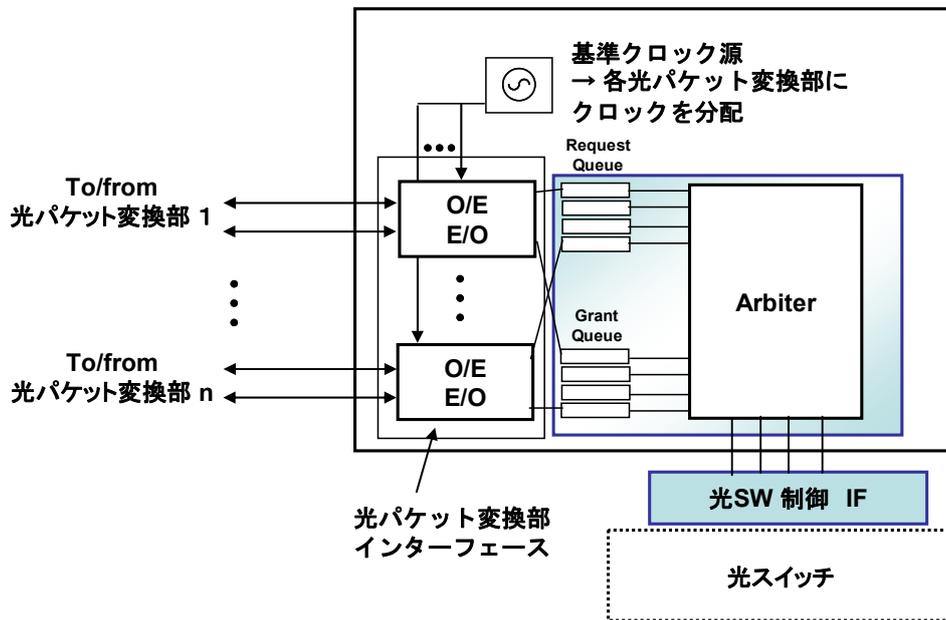


図 5.6-7 アービタ部の構成

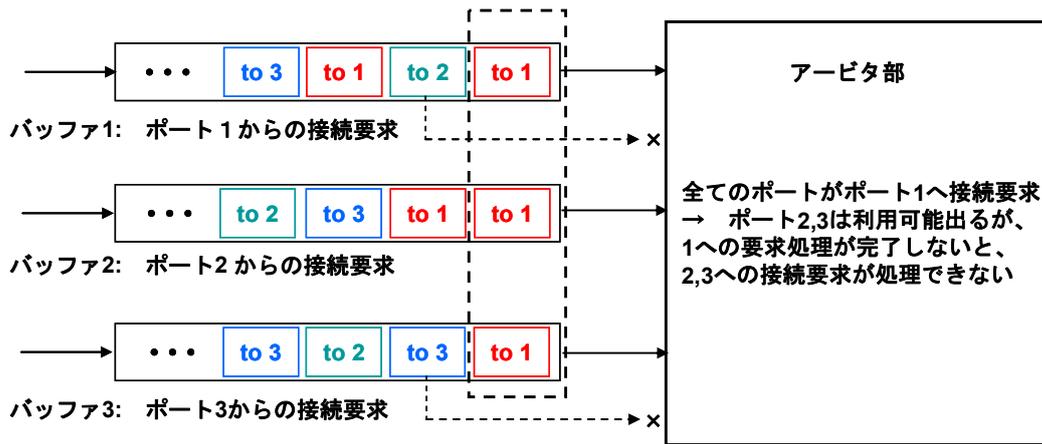


図 5.6-8 Head of Line blocking (HOL)によるスループット低下

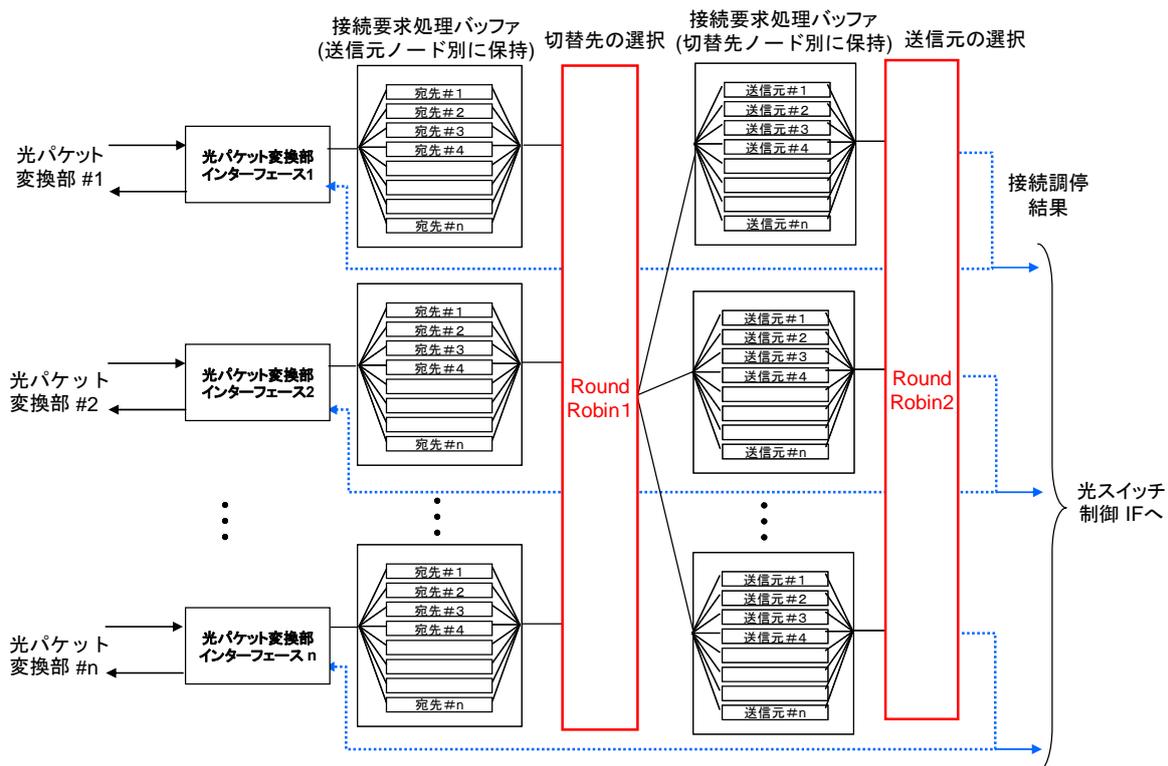


図 5.6-9 2段ラウンドロビンの構成

5.7 光パケットスイッチネットワークを用いた場合の消費電力

前節までに検討した光パケットスイッチアーキテクチャを前提として光パケットスイッチを用いた場合と、電気スイッチ技術を用いた場合のシステムサイズおよび消費電力の比較を行う。それぞれのスイッチの構成を図 5.7-1 に示す。電気スイッチの構成は光リンクによって、計算ノード、スイッチ間が接続されて、スイッチ部においては光/電気変換の後に、スイッチ処理が行われ、電気光変換が行われ計算ノードにデータが転送される構成であり、光パケットスイッチは、光スイッチ制御部において光スイッチのポート間接続情報が決定された後に、計算ノード側で波長分割多重された信号がスイッチ側に転送され、所望の接続先ポートに転送され、計算ノード側に転送される構成となっている。そのため、波長分割多重による光パケットスイッチを導入することで、スイッチ側の OE/E0 モジュール数を削減することが可能である一方で、光スイッチ制御部、波長合分波器分の消費電力、コストが上乘せされることとなる。システ

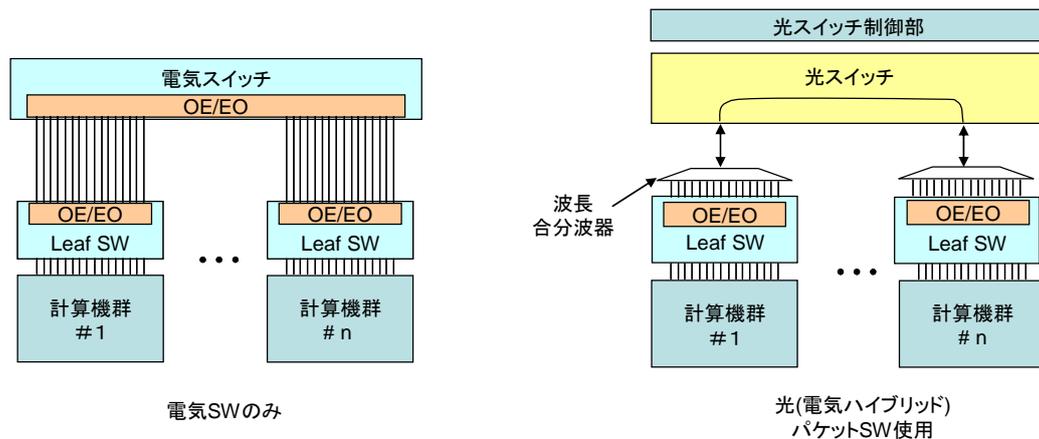


図 5.7-1 電気スイッチ（光接続）と光スイッチ構成の比較構成

ム規模としては、実行速度として 1 ペタフロップス級のシステムを想定しており、ビットレートとしては 1 波長（送受信機間）あたり、20Gb/s として、波長分割多重技術によって 16 波長を束ねることによって 320Gb/s のリンクが構成されて光パケットスイッチにおいて一括切替えが行われる構成である。OE/E0 モジュールの消費電力、コスト、および電気スイッチについては、2010 年前後に実現されるであろう半導体プロセスによる性能を想定して概算して

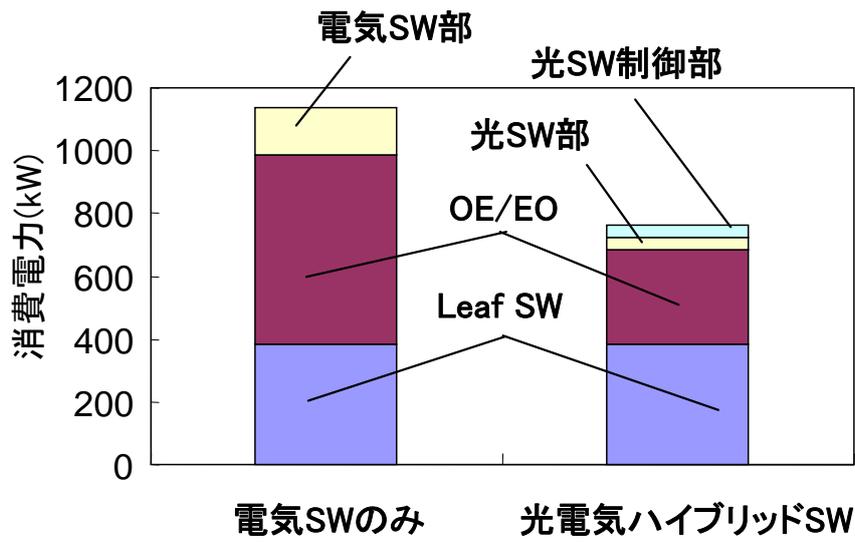


図 5.7-2 電気スイッチ（光接続）と光スイッチ構成の消費電力の比較

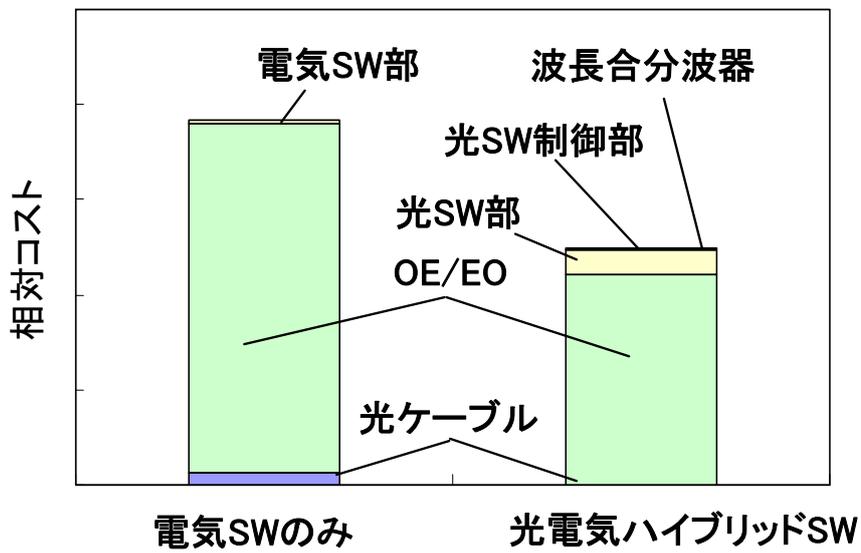


図 5.7-3 電気スイッチ（光接続）と光スイッチ構成の相対コスト比較

いる。図 5.7-2 に消費電力の比較を示す。両構成において、計算機ノード側におけるスイッチ部分および OE/E0 モジュール数は同じであるために、その部分に関する消費電力については差分が生じないものの、スイッチ側においては、OE/E0 モジュールの削減効果および、波長分割多重技術による一括スイッチングによって、消費電力を3分の2に削減することが可能である。また、同様の構成でのコスト比較を図 5.7-3 に示す。コスト比較には計算機ノード側の電気スイッチのコストは含まれず、光スイッチ用部品と、その制御部のコストを概算して求めている。波長合分波器や光スイッチ制御部の光パケットスイッチに付随する機能ブロックが増加されるが、光モジュールの削減効果によって、相対コストとしても3分の2に削減することが可能となる。これらの比較結果を、

表 5.7-1 光パケットスイッチと電気スイッチの比較

	光 (-電気ハイブリッド) パケットSW使用	電気SWのみ	光パケット技術 による効果
Leaf SW台数	960	960	-
Spin SW台数	64 (320Gb/s 一括切替)	1024 (20Gb/s,16ポートSW)	1/16
ファイバ数	7,680	122,880	1/16
概算消費電力 (kW)	723	1,138	2/3
ラック数	64	128 OE/E0を含む	1/2

表 5.7-1 にまとめる。ラック間を接続するスイッチの数は広帯域化されたリンクを一括処理することで、電気スイッチと比較してその台数が16分の1となり、あわせて必要となる光ファイバ数も波長分割多重の効果によって削減される。以上の結果から、光パケットスイッチをペタスケールシステムに導入することによって、システムサイズおよび、消費電力削減の効果が期待できることを明らかにした。

5.8 光パケットスイッチシステムの動作実証

5.8.1 光パケットスイッチ実証システムの構成

本研究において開発を行う、光パケットスイッチの概略を図 5.8-1 に示す。複数の計算ノードから構成される計算ノード群が1ラック内に実装される構成において、波長分割多重技術によって広帯域化されたリンクを用いて転送される光パケット信号と、それらパケット信号を交換する光パケットスイッチを用いて、これらの計算ノード群間のネットワークを実現し、一方、計算ラック内部のインターコネクットについては電気スイッチを介して行うものである。本スイッチシステムの実証のために、2組の計算機ノードラック、2×2構成の光パケットスイッチ、アービタから構成される光パケットスイッチ実証システムを試作した。以下にその試作結果を示す。

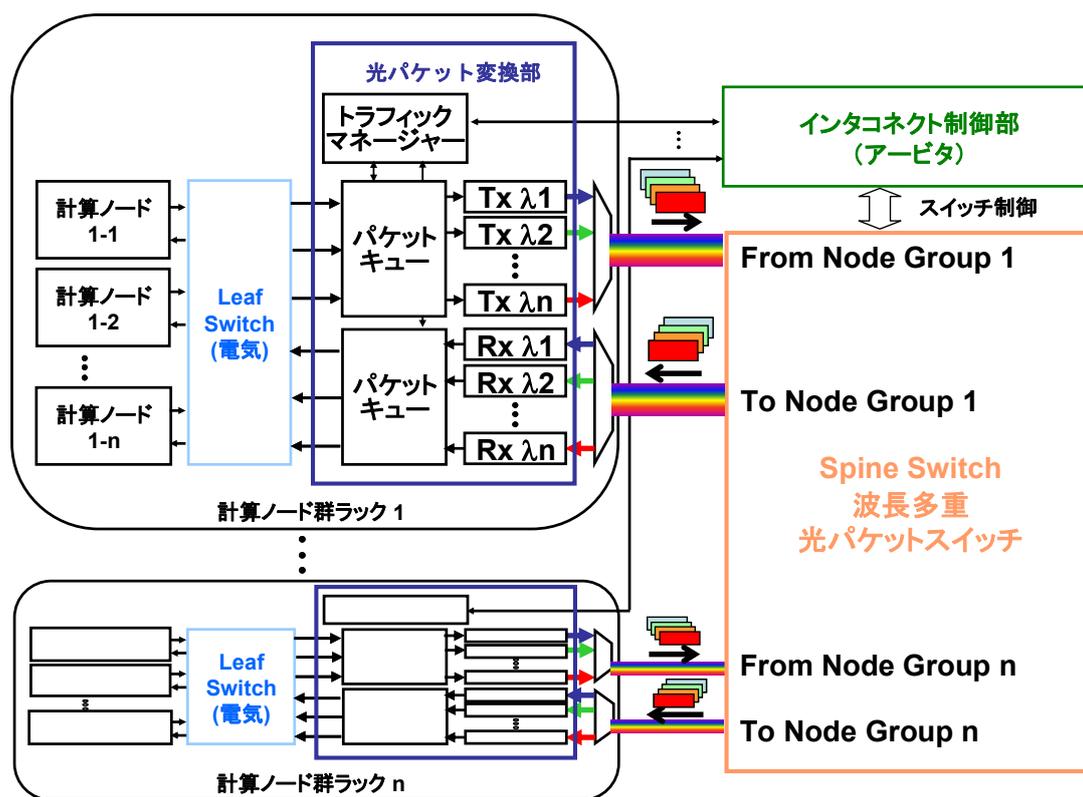


図 5.8-1 スーパーコンピュータ用光パケットスイッチネットワークの構成

5.8.2 光パケットスイッチ部の試作

図 5.8-2 に光スイッチサブシステムの構成を示す。光スイッチ部は、アービタ部の光スイッチインタフェースからの信号を処理し光スイッチを駆動する制御部と、半導体光増幅器 (SOA) による光ゲートスイッチを 4 台用いる 2 入力、2 出力構成の光スイッチ部から構成される。アービタ部から信号を受け取った光制御部では、それぞれ接続ポート間に対応する SOA 駆動回路を制御して光スイッチの切替えを行う。図 5.8-3、図 5.8-4 に光スイッチの信号切替え特性を示す。それぞれのポートにおいて、光スイッチの立ち上がり、立ち下がり時間において要求仕様を満足する 10ns を実現することができた。

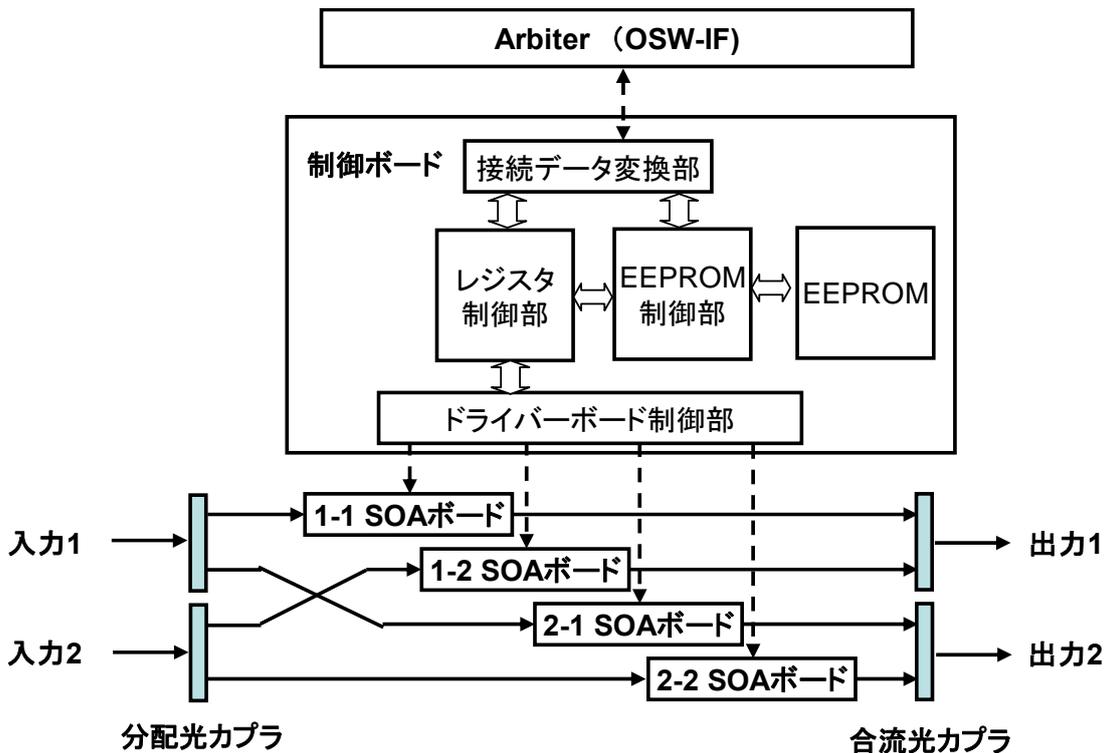


図 5.8-2 2 × 2 光パケットスイッチサブシステムの構成

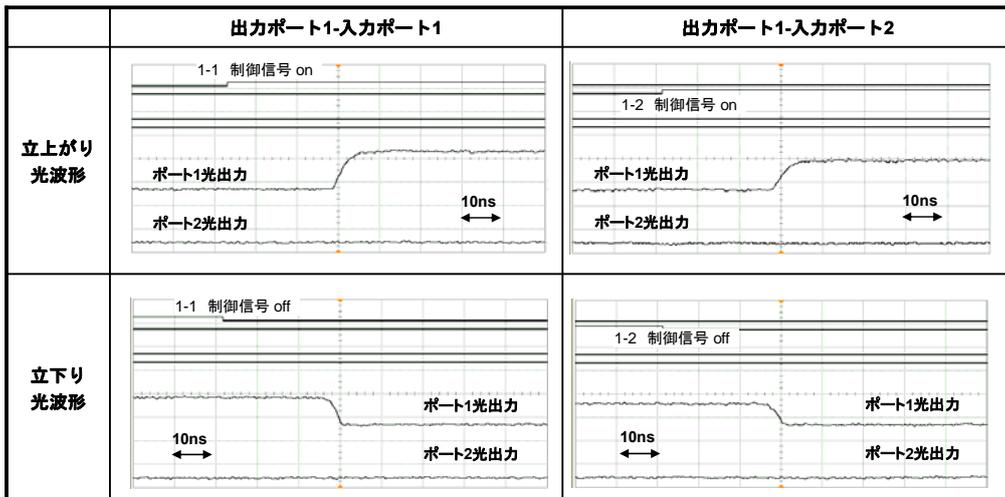


図 5.8-3 光スイッチ切替え特性(出力ポート 1)

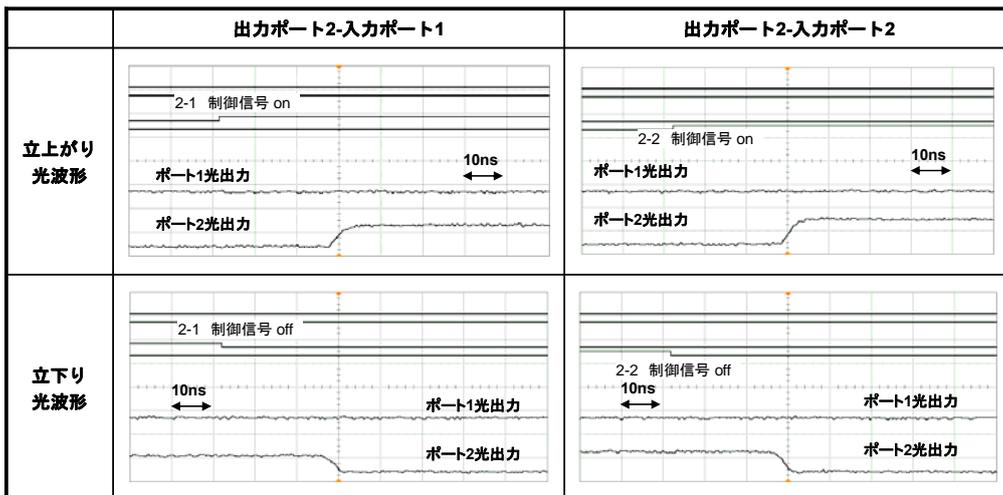


図 5.8-4 光スイッチ切替え特性(出力ポート 2)

5.8.3 光パケット変換部の試作

図 5.8-5 に光パケット変換部のブロック図を示す。光パケット変換部でのデータフローは、まず、各計算ノードからノード群間に転送される信号が Leaf スイッチを介して光パケット変換部に転送される。これらの信号は、行き先毎のアドレス情報(イーサネットの MAC アドレスなど)によって振り分けられて、それぞれ光パケットスイッチの転送先ポートごとに割り当てられたキュー

(VOQ : Virtual Output Queue)に格納される。実証システムにおいては、計算機からのデータではなく、光パケット変換部に用いる FPGA 内部で生成された擬似信号を元に光パケットスイッチ動作の実証を行うことにしている。

光パケット変換部において、これらの VOQ 情報を管理するトラフィックマネージャ部が、VOQ に格納されたパケット情報を基に転送先ポートとの接続要求を、光スイッチ制御を行うアービタ部に転送する。この際、データ信号と、経路設定要求は別波長の光信号で波長分割多重されて転送されることにより、1 芯の光ファイバで転送することが可能である。アービタにおいて、各計算ノード群から転送されてきた接続要求に対して経路決定処理を行い、決定された接続先情報、転送タイミングを各計算ノード群へ返送する。各計算ノード群の光パケット変換部は、アービタからの設定情報を基に、VOQ に格納されている転送データを読み出し、光パケット信号に変換し、光パケットスイッチへの転送を行う。この際、アービタで決定された経路情報は、光スイッチにも転送され、

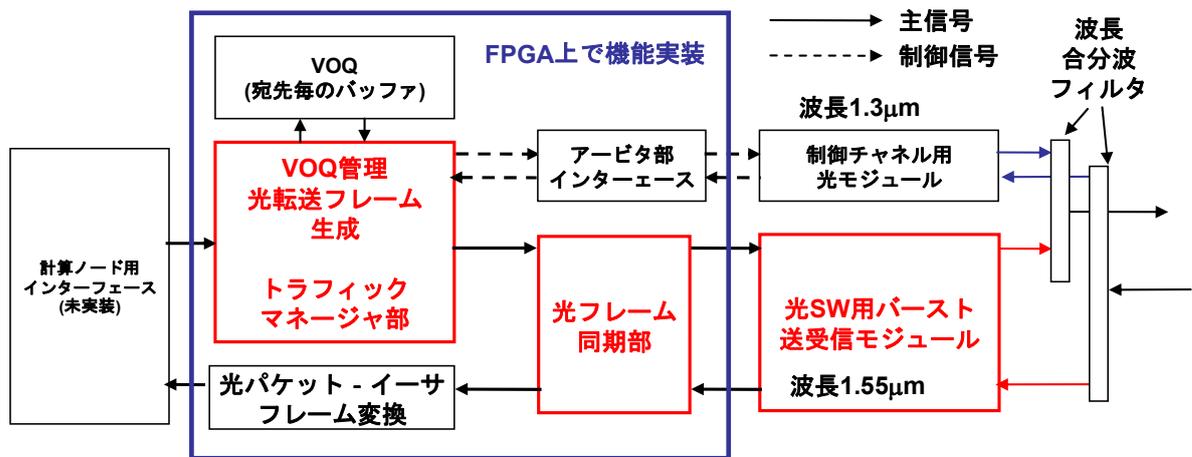


図 5.8-5 光パケット変換部の試作機構成

所望のタイミングで、所望のポートを接続するように光スイッチの設定が行われ、各光パケット変換部から送出された光パケット信号は光スイッチ部でスイッチングされて、接続先の計算ノード群へ転送される。

光パケット変換部から送出される光パケットデータ信号とアービタインタフェースから送出される制御信号はそれぞれ独立しており、パケット転送処理

を行っている間に、光パケット部に蓄積されている光パケット信号の経路決定を行うことが可能であり、パイプライン的にパケット経路決定、パケット転送処理が可能となる。この際、光パケット変換部において、光パケットは制御チャネルの往復伝搬遅延時間とアービタでの経路決定に要する時間と、システム的に必要となるパケット間隔（ガードタイム）の処理が完了するまで、光パケット変換部のVOQで転送処理を待つ必要がある。ガードタイムとしてシステム的に考慮に入れるべき項目としては、光スイッチの切替え時間、各光パケット変換部から送出される光パケット信号が光スイッチに到着するまでのスキュー、および外的要因によるシステム変動、例えば、温度変化などに伴う光ファイバ中の屈折率変化による、光パケット信号の光スイッチへの到着時間変動が考えられる。また、この際の光パケットの転送間隔は経路設定のアービトレーションに要する時間とガードタイムによって決定され、アービトレーション時間とガードタイムの短縮を図ることによって、転送間隔（= 最小転送パケット長に相当）を短くすることが可能となる。

5.8.4 パケット送出タイミング調整機構の実装

光パケットを送出するシーケンスについては、既に記述したように、各計算ノード群の光パケット変換部からの接続要求をアービタに送出し、各光パケット変換部からの接続要求に対する調停処理をアービタ部で行い、その返答結果を再度、光パケット変換部に送出して、その返答結果を基に光パケット変換部から光パケット信号が光スイッチに送出されることとなる。この際にアービタに、システムの基準クロックとなるマスタクロックを配置し、各光パケット変換部との間の制御チャネルの信号を、このクロックを用いて生成し、各パケット変換部へ分配し、その信号からクロック再生を行うことで、アービタ（光スイッチを含む）と各光パケット変換部については、同一のクロック源によって動作することが可能となる。このクロックを基準に各光パケット変換部、光スイッチはパケット切替え、パケット転送を行うが、各ノードと光スイッチを結ぶ光ファイバ長は各ノードでばらつきがあり、光ファイバ長1mあたり5nsの伝搬遅延時間が生じるため、図5.6-3に示したように、各計算ノード群から光スイッチまで光パケット信号が到着するまでの時間にスキューを生じてしまう。そこで、図5.6-4示すパケット送出タイミング調整機構を実装した。

図5.8-6に光スイッチと、転送フレーム間での同期確立のフロー図を示す。光パケット信号の転送には、光パケット変換部のシステムパラメータ設定などの初期化モードの処理が完了した後、光パケット変換部、アービタ部、光スイッチ部が連動して、位相調整モードに移行する。位相調整モードにおいては、光スイッチ部はアービタから供給されるクロックを元に、図5.6-4の破線で示されている、転送光パケットフレームをゲーティングするタイミングでのスイ

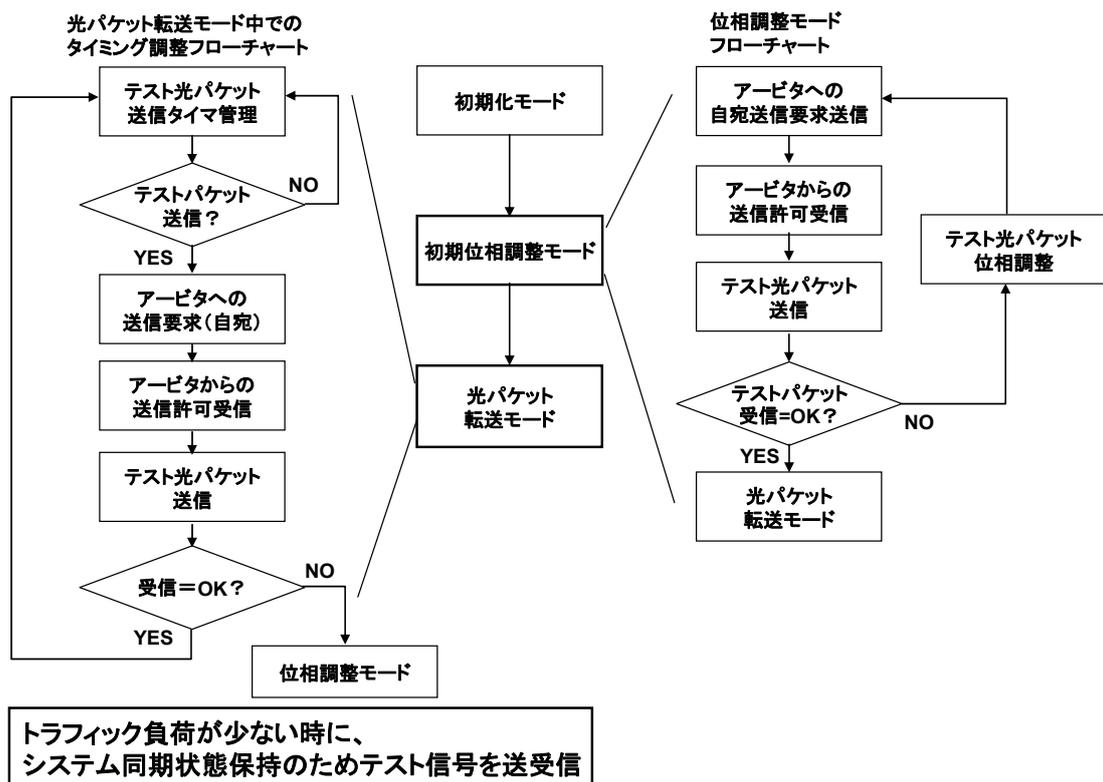


図 5.8-6 光スイッチとパケット信号との同期確立処理

スイッチ動作を行い、各ポートに接続されている光パケット変換部との間でループバック系を構成する。この際、光フレーム中に信号フレーム検出バイトを予め埋め込むことにより、光パケットの転送タイミングと、ゲートスイッチの切替えのタイミングが完全に同期されていない状況下では、光パケットの一部が受信側でフレームの先頭が検出できずに受信不可になる、あるいはフレームの最終部分の検出不可になってしまう状況を判定することが可能となる。その際の手順としては、光パケット変換部は、アービタ部へ自ノード宛の接続要求を送出し、その接続許可を受信後、上記の光パケット信号を光スイッチ部に対して送出处理を行う。光スイッチを通過してループバックされてきた光パケット信号の受信状態から、位相調整状況を判定し、光パケットが受信可能な状況では、光パケット転送モードに移行し、システムとして実運用状態に入る。また、受信不可の場合には、光パケットの送信タイミングをシフトさせることで、受信可能となるまで、位相調整動作を繰り返す。送信タイミングは各ポート独立に制御することが可能であるため、運用中に1ポートのみの障害が発生した場合

においても、他のポートに影響を与えることなく、同期の確立が可能となる。
 また、光パケット転送モード中の実運用下においても、周期的にパケット送
 出の合間に図 5.6-4 に示すようなテストパターンを送出することで、実運用中
 においても位相調整を行うことが可能な動作フローを採用している。

5.8.5 光パケット信号転送フレーム

光パケット信号を生成する際のフレームフォーマットを図 5.8-7 に示す。複
 数のイーサネット信号フレームを集成し、1つのパケット信号として転送を行
 うため、イーサフレーム格納部には、格納されているフレームの内部での分割
 状況や、格納されているフレームのデータ長を表す格納フレーム情報部を、イー
 サネットフレーム毎に付加し、イーサフレーム格納部に VOQ に格納された順
 にマッピングしていく。イーサフレーム格納部よりも長いジャンボフレームを
 取り扱う際には、転送先において分割されたジャンボフレームの再構成を容易
 に行うために、分割されたジャンボフレームのフラグメンテーション情報も、
 格納フレーム情報部を用いて転送される。これらのフラグメンテーション情報

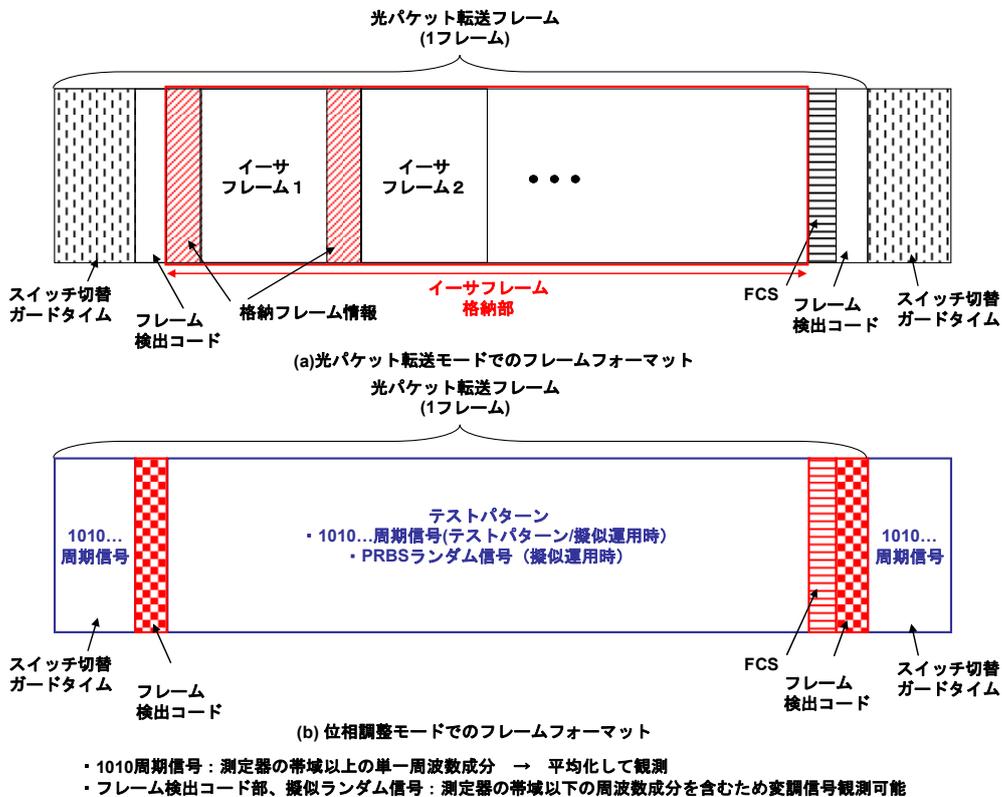


図 5.8-7 実証システムの光パケット転送フレーム

は、アービタの要求を送信する際に連続切替えのための情報として、アービタに送出される。また、5.6.2項で説明したように、イーサフレーム格納部の前には、光スイッチの切替え時間を保障するためのスイッチ切替えガードタイム部と、光パケットフレームの先頭を検出するためのフレーム検出コードが付加される。フレーム検出コードは、光スイッチでのスイッチ切替えタイミングと、光パケット変換部からパケット信号を送出する際のタイミングとを同期させるために用いられ、その詳細は、次節で説明する。また、イーサフレーム格納部の後には、光パケット信号転送後でのフレーム内部での誤り検出を行うための、FCS(Frame Check Sequence)用データと、フレームの最後尾を意味するフレーム検出コードが付加されて、1つの光パケット転送フレームが構成される。また、位相調整モードの際には、実際のデータ部分は1010…の周期信号が埋め込まれている。測定結果については、5.8.8項で説明する。

5.8.6 バースト送受信モジュールインタフェース

光パケット変換部から光スイッチに送信される信号および、光スイッチから転送され光パケット変換部において処理される信号は、スイッチから送出されてくる光パケット信号のビット単位の位相はランダムであるため、それらのデータを受信するための瞬時応答 CDR(Clock Data Recovery)機能を有する光バースト送受信モジュールを介して、光電気変換が行われる。光バーストモジュールの主要諸元を表5.8-1に示す。光パケット信号の光波長は1552.52nmで、ビットレートは10.72Gb/s、光パケット信号生成部とのインタフェースは、光モジュールの標準コネクタ規格である300pin MSAコネクタを介して、670MHz、

表 5.8-1 光バーストモジュールの主要諸元

項目	単位	仕様値 (典型値)
光波長	nm	1552.52
ビットレート	Gb/s	10.72
出力強度	dBm	+7.0
受信感度	dBm	-3.5
電気インターフェース		670MHz LVDS x16
光コネクタ		SCコネクタ
電気コネクタ		300pin MSAコネクタ

16 並列信号、送受信用クロックで接続されている。

5.8.7 光パケット変換部の試作結果

光パケット変換部の試作を行い、その基本機能である、光パケット信号と光スイッチ切替えタイミングとの同期を行うための位相調整機能の評価を行った。図 5.8-8 に位相調整動作の FPGA 上での動作確認結果、図 5.8-9～図 5.8-12 に、位相調整機能の光パケット信号での動作状態を示す。この際、光スイッチは後述するナノ秒単位でスイッチ動作が可能である高速光スイッチを使用している。位相調整フェーズでは、位相調整用のフレーム検出コードが検出されるまで、テストパターンの送信タイミングを調整し、フレームを検出した段階で、送信開始の最適点を検出するフェーズに移行し、最終的な送信タイミングを確定後、光パケット転送モードに移行する。今回試作の 2x2 ポート構成において、それぞれのポートに接続される光パケット変換部が個別にアービタとの間で送信タイミングの調整を図ることで、それぞれのポートが独立に送信タイミングの調整を行うことが可能であることを確認した。

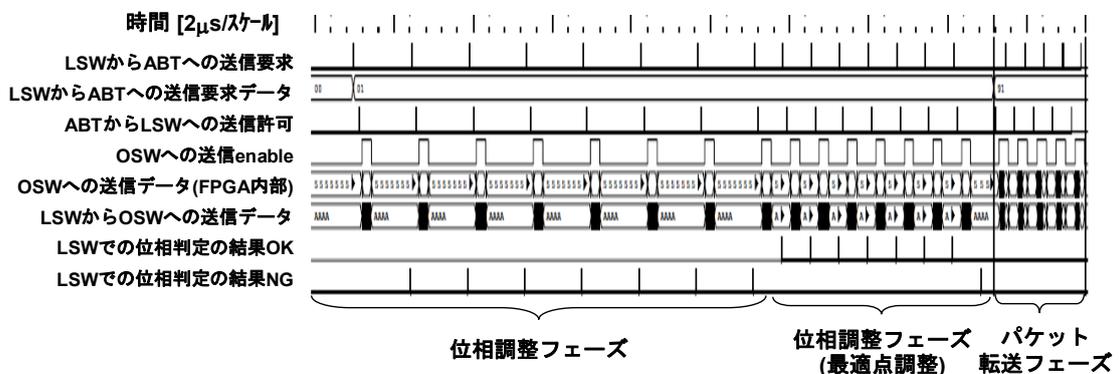


図 5.8-8 FPGA 部での位相調整動作

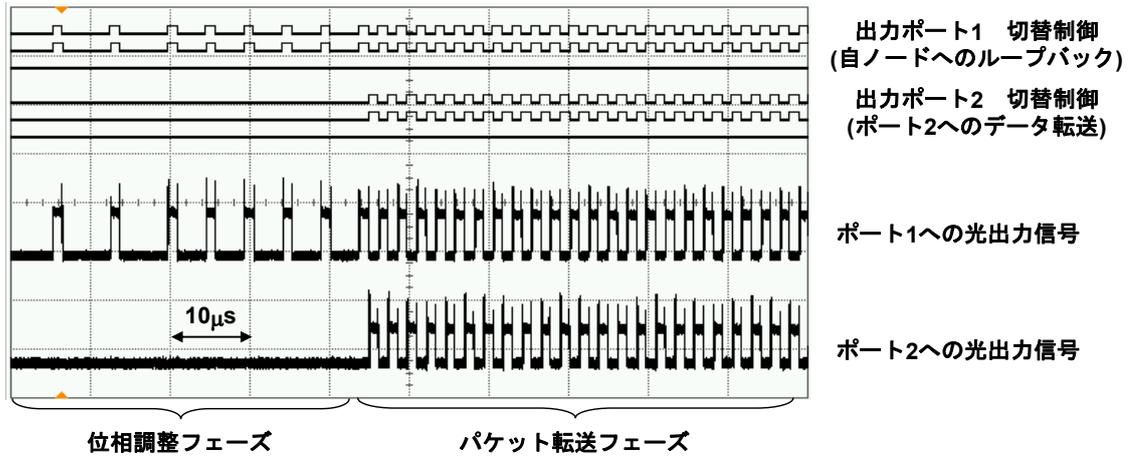


図 5.8-9 位相調整動作 光スイッチポート 1

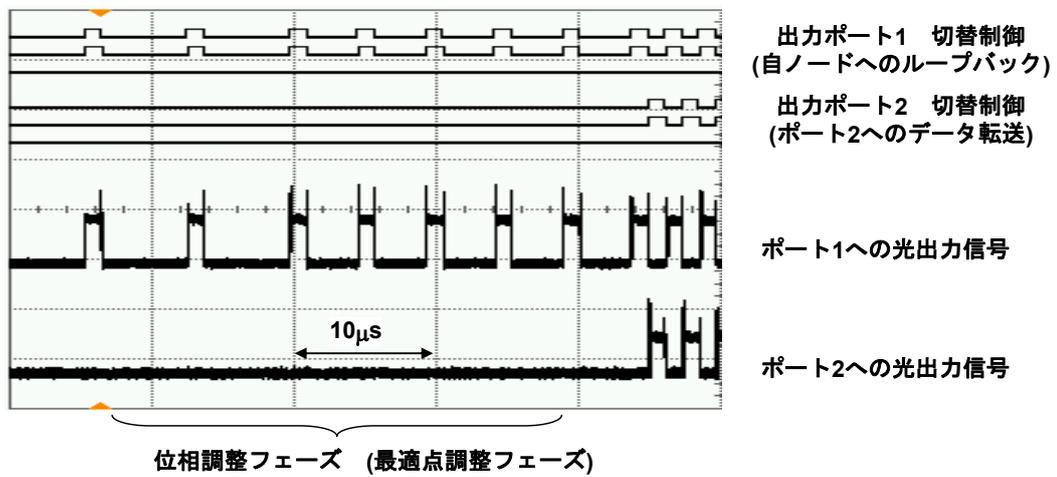


図 5.8-10 位相調整 最適点調整フェーズ (ポート 1)

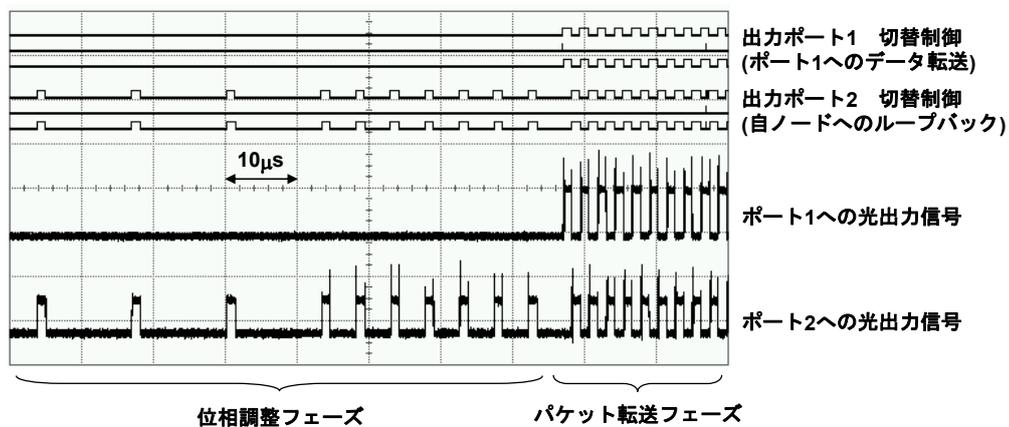


図 5.8-11 位相調整動作 光スイッチポート 2

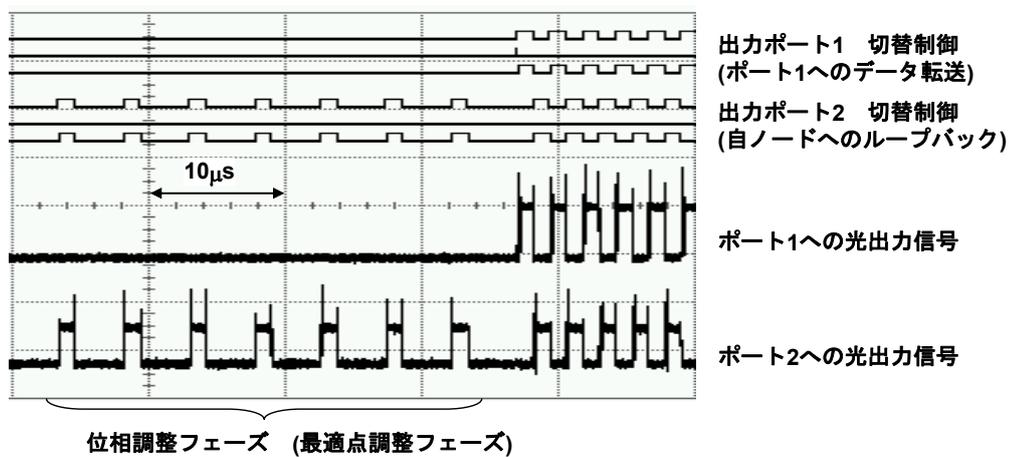


図 5.8-12 位相調整 最適点調整フェーズ (ポート 2)

5.8.8 光パケットスイッチ実証システムの評価結果

試作した光パケットスイッチシステムの構成、試作システム全体写真をそれぞれ図 5.8-13、図 5.8-14 に示す。また、機能ブロックの試作機内部構成を図 5.8-15～図 5.8-17 に示す。擬似的に配置された 2 台の計算機ラック間を接続

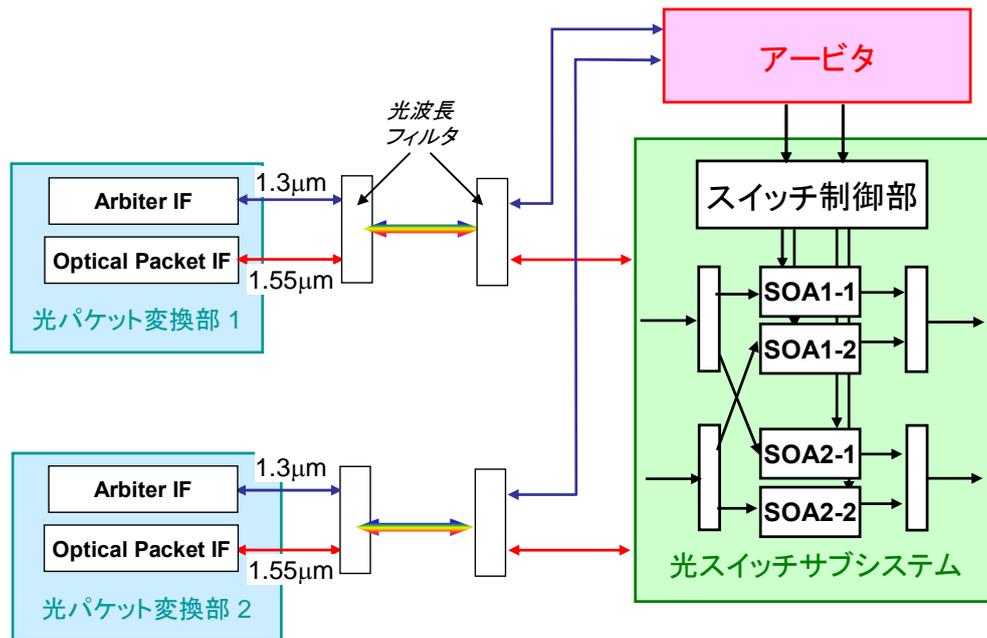


図 5.8-13 光パケットスイッチの実証システム構成

するネットワーク部分に、光パケットスイッチを適用しており、各計算機ラックに光パケット変換部、光スイッチ部と制御を行うアービタ部が中央に配置されている。それぞれの試作機は 19 インチ幅ラックに搭載可能であり、それぞれ試作ユニットの高さは 1U (アービタ部)、2U (光パケット変換部、光スイッチ部) となっている。システム動作の評価は、位相調整後のシステム動作、および光パケット変換部での送受信データ間での誤り特性 (Frame Check Sequence 部でのビット誤り検出状況) を用いて評価を行っている。

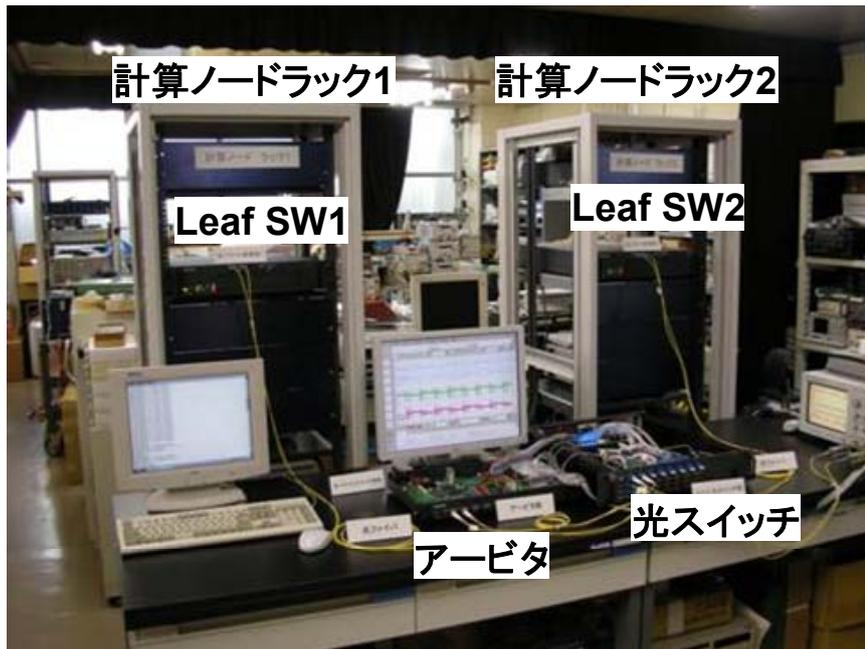


図 5.8-14 光パケットスイッチの実証システム外観



図 5.8-15 アービタ部内部構成



図 5.8-16 光パケット変換部内部構成

図 5.8-18～図 5.2-20 に光パケットスイッチのスイッチ動作のオシロスコープトレースを示す。これらのオシロスコープトレースは、それぞれアービタから光スイッチへのスイッチポート enable 信号、光スイッチ制御部から光スイッチ駆動部への制御信号、および光スイッチの出力ポートから送出される光パケット信号を、2つのポートについて示している。1.2 μ s 周期のアービタからの制御信号に基づいて光スイッチが駆動され、位相調整機能によって送信タイミングが調整された光パケット信号がシステムに同期して、10ns の切替え速度を持つ光スイッチ部において切り替えられている動作が確認される。この動作確認により、光パケットスイッチを実現する上での基本動作である、光パケット信号の位相調整、パケット単位でのシステム同期技術を試作機において実証した[5-11]。

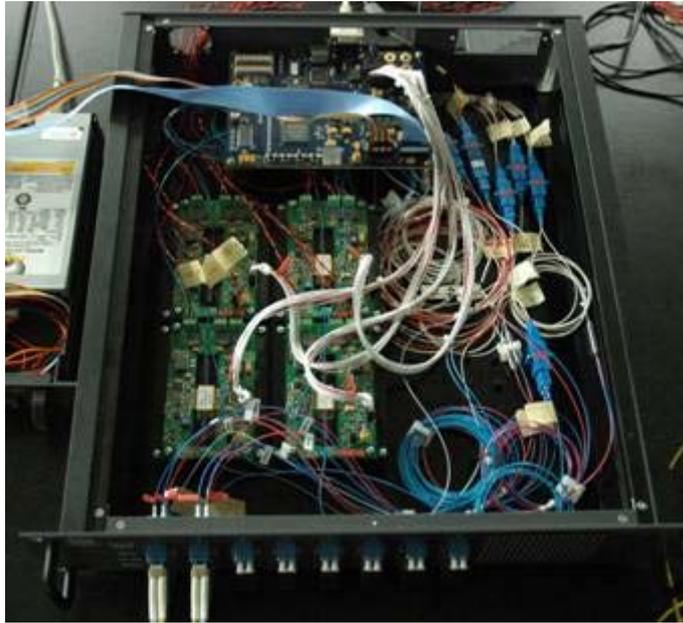


図 5.8-17 光スイッチ部内部構成

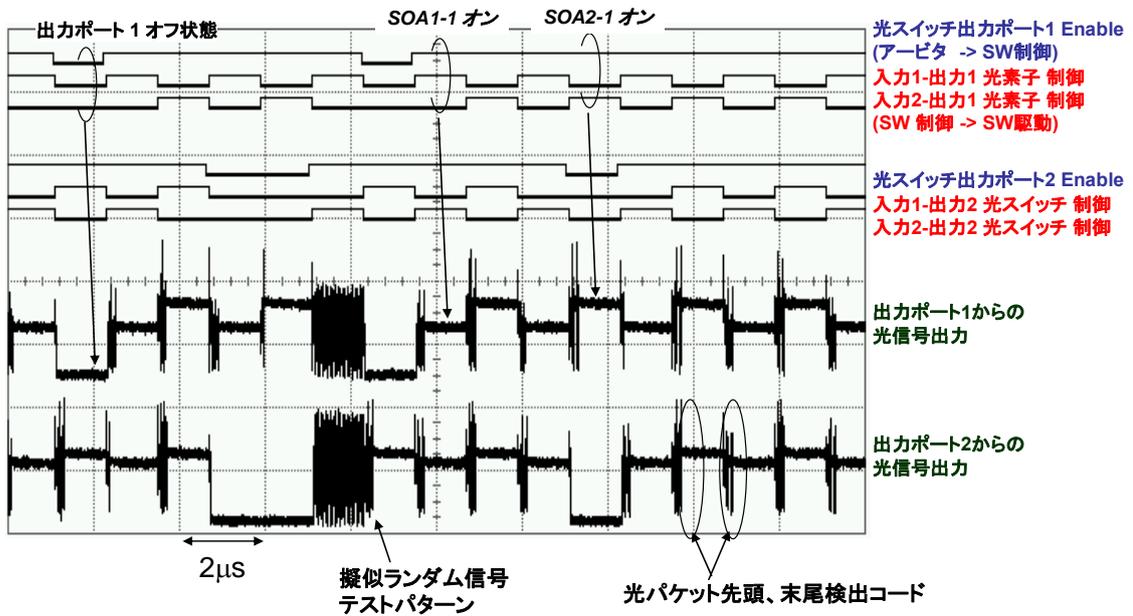


図 5.8-18 光パケット切替え特性 その1

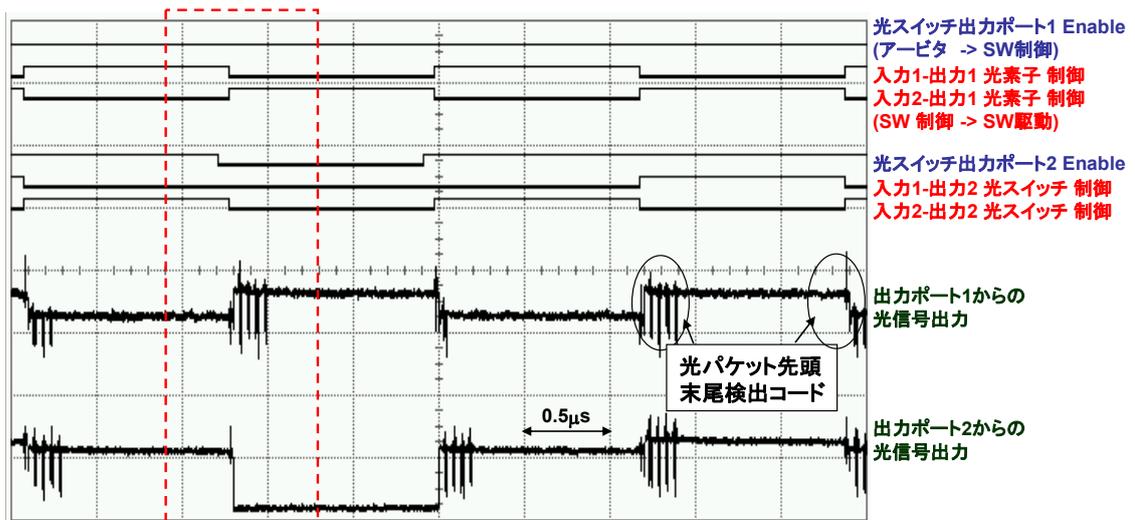


図 5.8-19 光パケット切替え特性 その2

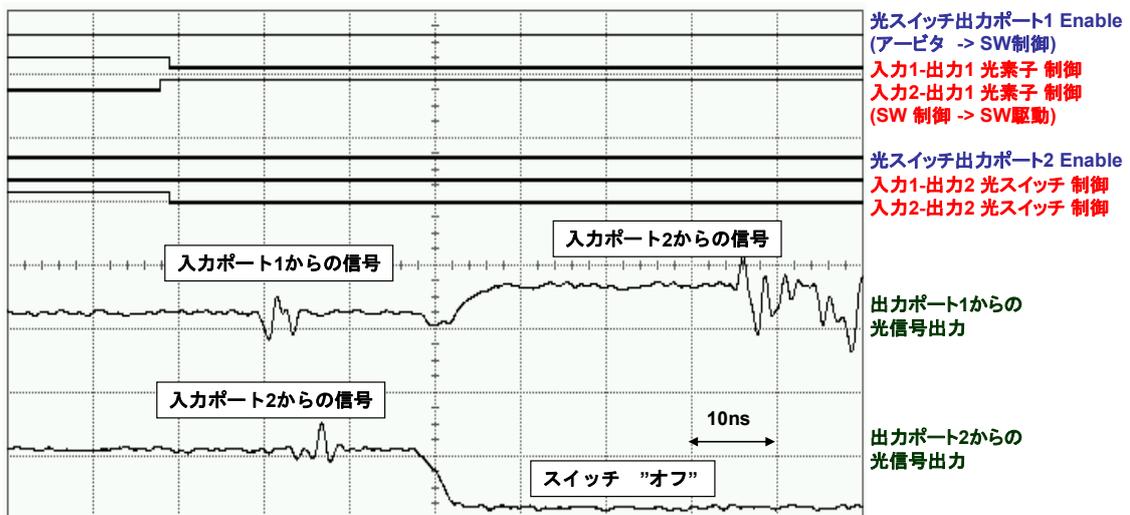


図 5.8-20 光パケット切替え特性 その3
 (図 5.8-19 の点線部拡大)

5.9 結言

本章では、ペタスケール級スーパーコンピュータネットワークに光パケットスイッチングシステムを適用することを提案し、以下の知見を得た。

- (1) 波長分割多重技術によって広帯域化された光リンクと光パケットスイッチ技術を適用するため、各種光スイッチアーキテクチャとこれに用いる光スイッチング素子を比較した結果、光半導体増幅器(SOA)を用いた多段ゲート型構成を新たに提案した。本構成により、10ns 以下の高速スイッチング特性と 100 ポート以上の拡張性を実現することができ、ペタスケール級スーパーコンピュータネットワークへの適用可能性を示した。
- (2) 光パケット信号の転送方式として、信号フレーム同期、固定長フレームによるパケット転送と、アウトバンド経路制御によるパケット経路制御方式が有効であることを示し、これらの方式を用いた場合のパケット損失率とバッファサイズの関係とパケット処理時間とフレーム長との関係を計算により明らかにした。
- (3) 提案した光パケットスイッチネットワークを用いることで、電気スイッチを適用した場合に比較して、消費電力を 3 分の 2、スイッチラック数などのハードウェアを 2 分の 1 に削減可能であることを明らかにした。
- (4) 光パケットスイッチシステムの制御を行うアービタ部、計算機ノードからの電気信号を光信号に変換する光パケット変換部の試作と評価を行い、光パケットスイッチングシステムの実証システムを構築した。本システムで 10ns の高速スイッチ動作と $1.2\mu\text{s}$ 長の光パケット信号の切替えに成功した。

参考文献

- [5-1] トマス スターリング, ポース.H.スミス, ポール メッシナ著, 小林達, 栗本武訳, “ペタフロップス・コンピュータ,” 筑波大学出版会, 1997 年
- [5-2] 谷 啓二編 “ペタフロップス・コンピューティング,” 培風館, 2007 年
- [5-3] 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター WEB: <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/ES/hardware.html> 参照

- [5-4] S. Ide, K. Mori, T. Akashi, Y. Sakai, T. Yamabana, Y. Ishii, O. Tuboi and M. Kawai, "High-speed 80x80 MEMS optical switch module with VOA," in *Proc. 29th European Conference on Optical Communication (ECOC2003)*, Rimini, Italy, Mo 3.5.1 (Sept. 2003)
- [5-5] C. Minkenber, Ilias Iladis, and Francois Abel, "Low-latency pipelined Crossbar Arbitration," in *Proc. IEEE Global Communication Conference (Globecom2004)*, Dallas, Texas, p.1174 (Nov. 2004).
- [5-6] 大石進一, "待ち行列理論", コロナ社, 2003年
- [5-7] D J Blumenthal and M Masanovic, "LASOR (Label Switched Optical Router): Architecture and Underlying Integration Technologies," in *Proc. 31rd European Conference on Optical Communication (ECOC2005)*, Glasgow, paper 2.1.1 (Sept. 2005).
- [5-8] 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," in *Proc. 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006)*, Cannes, France, Tu4.6.6 (Sept. 2006).
- [5-9] Hiroshi Onaka, Susumu Kinoshita, and Yasuhiko Aoki, "Petascale Sstem Interconnection Using WDM Optical Packet Switching," in *Proc. International Conference on the Optical Internet and Australian Conference on Optical Fibre Technology (COIN-ACOFT2007)*, Melbourne, Australia ,MoC2-3 (June 2007).
- [5-10] H. Onaka, S. Kinoshita, and Y. Aoki, "WDM Optical Packet Interconnection for Petascale Ultra-High-Performance Computing Systems," in *Proc. IEEE/LEOS 2007 Photonics in Switching (PS2007)*, San Francisco, CA, TuB2.2 (Aug. 2007).
- [5-11] Kyosuke Sone, Yasuhiko Aoki, Goji Nakagawa, Yutaka Kai, Setsuo Yoshida, Yutaka Takita, Susumu Kinoshita, and Hiroshi Onaka, "Optical Packet Interconnect System Using High-Speed SOA Switch for Peta-scale Computing System," in *Proc. 12th Optoelectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007)*, Yokohama, Japan, 13A1-5 (July 2007).

第6章 結論

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科 電子情報エネルギー工学専攻に在籍し、株式会社富士通研究所において行った、広帯域メトロネットワークおよび高性能スーパーコンピュータネットワークへ適用する光スイッチング技術に関する研究についてまとめたものである。以下に本研究で得られた成果を総括して述べる。

- (1) フォトニックネットワーク技術の進展を整理し、今後のトラフィックの増大に対応するためには、有限な波長資源を有効に使うため、動的な波長パスの割り当てを行う光バーストスイッチング技術、さらに時間的粒度の小さな光パケットスイッチング技術が必要であることを示した。また、ネットワーク内の転送効率と光パケットサイズ、および伝搬遅延時間から光スイッチの切り替え要求速度を考察し、研究対象である、広帯域メトロネットワーク用光バーストスイッチには $500\sim 50\mu\text{s}$ 、高性能スーパーコンピュータネットワーク用光パケットスイッチでは、 $500\sim 10\text{ns}$ のスイッチ切り替え速度が必要であることを明確にした。各種の光スイッチ技術を整理し、ポート数とスイッチ切り替え速度の関係を示した。この結果より、広帯域メトロネットワークには、音響光学効果を用いた AOTF および電気光学効果を用いた導波路偏向型光スイッチが、高性能スーパーコンピュータ用光パケットスイッチネットワークには、光半導体増幅器(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)の適用がそれぞれのネットワークで用いる光スイッチとして適していることを示した。
- (2) 広帯域メトロコアネットワーク向けの光バーストスイッチングシステムに必要な切替え時間 $1\mu\text{s}$ 程度の高速スイッチング特性、 10dB 程度以下の低挿入損失、 64 チャンネル規模までのポート数拡張性、の3つ要件を同時に満足するスイッチングデバイスとして、PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを提案し、そのスイッチ構成を明確にした。次に、 8×8 規模の PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを設計・試作し、スイッチ単体として 350ns のスイッチング速度、 12.4dB の挿入損失を確認し、提案した構成を用いることでほぼ要求性能を満足するスイッチが実現できることを示した。また、PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチとこれを制御する電子回路を一体化した光バーストサブシステムを開発した。サブシステムには、光ノード内での光バースト信号の出力パワ

一を一定制御する高速光可変減衰 (VOA) 機能を実装し、その有効性を示した。試作した光バーストサブシステムを 3 ノード構成の光バーストスイッチ試験ネットワークに適用し、サブシステムの安定動作と自律的信号衝突回避の実験に成功した。さらに、光スイッチの駆動電圧を低減するための 3 つの手法を示し、これらを組み合わせることで、64×64 規模の PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチとそのサブシステムが実現できることを示した。

- (3) 広帯域メトロアクセスネットワーク向けの光バーストスイッチングシステムとして、音響光学型波長可変フィルタ (AOTF) を用いたフォトニックゲートウェイの基本構成を提案し、他の光デバイスを用いた構成、ならびに既存の固定波長型 OADM よりも高い経済性を有することを明らかにした。次に、AOTF モジュールと制御回路、ファームウェアを一体化した小型の AOTF サブシステムの開発成果を示した。AOTF を駆動する RF 発振回路の周波数切り替え速度として 400ns を実現し、AOTF サブシステムとして、AOTF デバイス単体の動作速度限界である $12\mu\text{s}$ の波長切り替え速度を実現した。これにより、AOTF を用いたフォトニックゲートウェイは、波長オンデマンドサービスから光バーストネットワークまでシームレスに適用できることを明らかにした。開発した AOTF サブシステムを用いたフォトニックゲートウェイのプロトタイプ機と実証機を試作し、320km の良好な伝送特性と最大 10 ノードの収容可能性、プロテクション機能の動作をそれぞれ確認した。
- (4) 高性能スーパーコンピュータ用ネットワークに波長分割多重技術によって広帯域化された光リンクと光パケットスイッチ技術を適用することを検討し、各種光スイッチアーキテクチャとこれに用いる光スイッチング素子を比較した結果、光半導体増幅器 (SOA) を用いた多段ゲート型構成光スイッチを新たに提案した。本構成を適用することで、電気ベースのスイッチ技術に比較して、消費電力を 3 分の 2、スイッチラック数などのハードウェアを 2 分の 1 に削減可能であることを明らかにした。次に、光パケットスイッチングシステムの信号転送方式として、信号フレーム同期、固定長フレームによるパケット転送と、アウトバンド経路制御によるパケット経路制御方式が有効であることを見出した。2×2 光パケットスイッチ、アービタ部、光パケット変換部の試作と評価を行い、光パケットスイッチングシステムの実証システムを構築した。本システムで、10ns の高速スイッチ動作と $1.2\mu\text{s}$ 長の光パケット信号の切替に成功し、提案した光パケットスイッチの動作を確認した。

本論文に関する原著論文

A 論文誌

- [1] Hiroshi Onaka, Hideyuki Miyata, Yutaka Kai, Setsuo Yoshida, Kyosuke Sone, Yutaka Takita, Yukito Tsunoda, Hiroshi Miyata, Goji Nakagawa, "Compact Photonic Gateway for Dynamic Path Control Using Acousto-optic Tunable Filter," *Optical Switching and Networking*, Vol.5 (March 2008) 採録決定.
- [2] 尾中寛, 甲斐雄高, 瀧田裕, 菅間明夫, 青木重憲, 佐藤桂輔, アルアミン・アブドゥッラー, 種村拓夫, 中野義昭, "PLZT 導波路偏向型光マトリクススイッチを用いた光バーストスイッチサブシステム," 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J91-B, No.3 (2008年3月) 採録決定.
- [3] N. Kataoka, N. Wada, K. Sone, Y. Aoki, H. Miyata, H. Onaka, and K. Kitayama, "Field Trial of Data-Granularity-Flexible Reconfigurable OADM with Wavelength-Packet-Selective Switch," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.24, No.1, pp. 88 – 94 (Jan. 2006).

B 国際会議

- [1] H. Onaka, "Current status of electro-optic modulators and switches based on ferroelectric materials (**Invited**)," in *Proc. 30th European Conference on Optical Communication (ECOC2004)*, Stockholm, Sweden, Tu4.6.3 (Sept. 2004).
- [2] 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," in *Proc. 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006)*, Cannes, France, Tu4.6.6 (Sept. 2006).
- [3] Hiroshi Onaka, Susumu Kinoshita, and Yasuhiko Aoki, "Petascale System Interconnection Using WDM Optical Packet Switching (**Invited**)," in *Proc. International Conference on the Optical Internet and Australian Conference on Optical Fibre Technology (COIN-ACOFT2007)*, Melbourne, Australia, MoC2-3 (June 2007).
- [4] H. Onaka, S. Kinoshita, and Y. Aoki, "WDM Optical Packet Interconnection for Petascale Ultra-High-Performance Computing

Systems (**Invited**)," in *Proc. IEEE/LEOS 2007 Photonics in Switching (PS2007)*, San Francisco, CA., TuB2.2, (Aug. 2007).

C その他

- [1] A. A. Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, T. Tanemura, R. Inohara, K. Nishimura, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, Y. Miyazaki, T. Miyahara, T. Hatta, K. Motoshima, T. Kagimoto, T. Kurobe, A. Kasukawa, H. Arimoto, S. Tsuji, H. Uetsuka, and Y. Nakano, "Optical Burst Switching Router with 40-,10-Gb/s Bit-Rate Transparent Contention Resolution", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.19, No.10, pp.726 - 728 (May 2007).
- [2] Abdullah Al Amin, Mitsuru Takenaka, Takuo Tanemura, Katsuhiko Shimizu, Ryo Inohara, Kohsuke Nishimura, Masashi Usami, Yutaka Takita, Yutaka Kai, Hiroshi Onaka, Hisato Uetsuka and Yoshiaki Nakano, "Demonstration of Deflection Routing with Layer 2 Evaluation at 40Gb/s in a 3-Node Optical Burst Switching Testbed," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.20, No.3, pp.178-180 (Feb. 2008).
- [3] H. Miyata, Y. Kaito, Y. Kai, H. Onaka, T. Nakazawa, M. Doi, M. Seino, T. Chikama, Y. Kotaki, K. Wakao, M. Komiyama, T. Kunikane, H. Yonetmi, and Y. Sakai, "Fully Dynamic and Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer on 0.8 nm Channel Spacing using AOTF and 32-Wave Tunable LD Module," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2000)*, Baltimore Maryland, PD40 (March 2000).
- [4] Miyata H, Aoki S, Nakazawa T, and Onaka H, "AOTF with Low Loss and Low Crosstalk for 100-GHz Channel Spacing WDM Systems," in *Proc. 28th European Conference on Optical Communication (ECOC2002)*, Copenhagen, Denmark, 2.3.3 (Sept. 2002).
- [5] Yutaka Kai, Kyosuke Sone, Tomohiro Ueno, Masaji Noguchi, Hiroshi Miyata, Tadao Nakazawa, Hideyuki Miyata, and Hiroshi Onaka, "Photonic Gateway with μ s-order Wavelength Path Control for Metro Access Networks," in *Proc. 29th European Conference on Optical Communication and 14th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication (ECOC-IOOC2003)*, Rimini, Italy, We3.4.4 (Sept. 2003).
- [6] Yasuhiko Aoki, Yutaka Kai, Tomohiro Ueno, Yaojun Qiao, Zhang Yinying, Yuefeng Ji, Hideyuki Miyata, Hiroshi Miyata, Tamio Saito, and Hiroshi

- Onaka, " High-speed Wavelength Selective Optical Burst Switch Using Acousto-optic Tunable Filter," in *Proc. 9th OptoElectronics and Communications Conference / 3rd Conference on Optical Internet (OECC/COIN2004)*, Yokohama, Japan, PDP2-4 (July 2004).
- [7] A. Sugama, M. Ishii, T. Akahoshi, K. Sato, M. Doi, T. Shiraishi, M. Kato, and H. Onaka, "Electro-optic beam-deflection switch for photonic burst switching," in *Proc. 30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004)*, Stockholm, Sweden, Mo4.6.3 (Sept. 2004).
- [8] N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, H. Miyata, F. Kubota, H. Onaka, and K. Kitayama, "Demonstration of Data Granularity-Adjustable Ring Network Using Wavelength-Tunable and Packet-Selective OADM," in *Proc. 30th European Conference on Optical Communication (ECOC2004)*, Stockholm, Sweden, Th2.6.2 (Sept. 2004).
- [9] N. Kataoka, N. Wada, F. Kubota, K. Sone, Y. Aoki, H. Miyata, H. Onaka, and K. Kitayama, "Field Trial of Granularity-Flexible Reconfigurable OADM with Wavelength-Packet-Selective Switch Using Concurrent Generation Technique of Optical Code Label and Payload Data," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2005)*, Anaheim, CA., PDP41 (March 2005).
- [10] Goji Nakagawa, Yutaka Kai, Kyosuke Sone, Yutaka Takita, Keiji Miyazaki, Tomohiro Ueno, Masaji Noguchi, Hiroshi Miyata, Hideyuki Miyata, and Hiroshi Onaka, "Compact Photonic-Gateway for Dynamically Path-controlling Metro Access λ Networks," in *Proc. 10th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2005)*, Seoul, Korea, 5B2-4 (July 2005).
- [11] Y. Kai, Y. Takita, Y. Aoki, A. Sugama, S. Aoki, and H. Onaka, "4×4 high-speed switching subsystem with VOA (<10 μ s) using PLZT beam-deflector for optical burst switching," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2006)*, Anaheim, CA., OFJ7 (March 2006).
- [12] N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, "40Gbit/s Packet-Wavelength-Selective, Reconfigurable Optical Add/drop Multiplexing Using Label- Selectivity- Enhanced Optical En/Decoder and Wide-Passband AOTF," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*

- (*OFC/NFOEC2006*), Anaheim, CA., OTuG5 (March 2006).
- [13] A. A. Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, R. Inohara, K. Nishimura, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, T. Miyahara, T. Hatta, K. Motoshima, and Y. Nakano, "Label-based path switching and error-free forwarding in a prototype optical burst switching node using a fast 4×4 optical switch and shared wavelength conversion," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2006)*, Anaheim, CA., OFO5 (March 2006).
- [14] Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, A. Sugama, S. Aoki, and H. Onaka, "10-Gbps experimental demonstration of high-speed switching nodes using EO beam-deflection switch," in *Proc. 11th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2006)*, Kaohsiung, Taiwan, 7C2-1 (July 2006).
- [15] N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, "Field Trial of 640Gbit/s-Throughput, Granularity-Flexible, 3-node Optical Network using Packet-Selective ROADMs Prototypes," in *Proc. 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006)*, Cannes, France, Tu4.6.4 (Sept. 2006).
- [16] A. Al Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, M. Tanemura, Y. Nakano, R. Inohara, K. Nishimura, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, Y. Miyazaki, T. Miyahara, T. Hatta, K. Motoshima, K. Kagimoto, T. Kurobe, A. Kasukawa, H. Arimoto, S. Tsuji, and H. Uetsuka, "40/10Gbps bit-rate transparent burst switching and contention resolving wavelength conversion in an optical router prototype," in *Proc. 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC 2006)*, Cannes, France, Th.4.1.6 (Sept. 2006).
- [17] A. Al Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, K. Nishimura, R. Inohara, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, M. Ono, Y. Kondo, N. Sugimoto, Y. Urino, H. Uetsuka, and Y. Nakano, "Over 10 Hops Cascadability of Optical Labels and Demonstration of Burst Add/Drop Function in Cascaded Optical Burst Switching Routers," in *Proc. 10th international Symposium on Contemporary Photonic Technology(CPT2007)*, Tokyo, Japan, G-4 (Jan. 2007).
- [18] A. Sugama, T. Akahoshi, K. Sato, S. Aoki, Y. Kai, Y. Takita, M. Kato, and H. Onaka, "Integrated 8x8 Electro-optic High-speed Switch for Optical

- Burst Transport Networks,” in *Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC2007)*, Anaheim CA., OWV2 (March 2007).
- [19] Kyosuke Sone, Yasuhiko Aoki, Goji Nakagawa, Yutaka Kai, Setsuo Yoshida, Yutaka Takita, Susumu Kinoshita, and Hiroshi Onaka, "Optical Packet Interconnect System Using High-Speed SOA Switch for Peta-scale Computing System,” in *Proc. 12th Optoelectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007)*, Yokohama, Japan, 13A1-5 (July 2007).
- [20] N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, "Field Trial of 640Gbit/s-Throughput, Granularity-Flexible, 3-node Optical Network using Packet-Selective ROADM Prototypes,” in *Proc. Photonics in Switching 2007 (PS2007)*, San Francisco, CA., TuA2.1 (Aug. 2007).
- [21] A. A. Amin, K. Shimizu, M. Takenaka, R. Inohara, K. Nishimura, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, H. Onaka, T. Miyahara, Y. Miyazaki, T. Hatta, K. Motoshima, K. Ono, M. Kondo, Y. Kageyama, J. Sugimoto, N. Urino, Y. Uetsuka, and Y. Nakano, "Multi-hop Transmission with Wavelength Conversion for Collision Resolution in PLZT Matrix Switch-based Optical Burst Switching Node Prototype,” in *Proc. Photonics in Switching 2007 (PS2007)*, San Francisco, CA., WA3.3 (Aug. 2007).
- [22] A. Al Amin, M. Takenaka, T. Tanemura, K. Shimizu, R. Inohara, K. Nishimura, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, H. Onaka, H. Uetsuka and Y. Nakano, "Experimental Validation of Deflection Routing in a 3-Node Optical Burst Core Network with 40Gb/s Edge Nodes,” in *Proc. 33rd European Conference on Optical Communication (ECOC2007)*, Berlin, Germany, Paper 1.6.2 (Sept. 2007).
- [23] 中川剛二, 甲斐雄高, 宮田宏志, 宮田英之, 中澤忠雄, 尾中寛, 上野智弘, 野口雅司, “AOTF を用いたメトロ向け光ゲートウェイ,” 電子情報通信学会通信方式研究会 (CS) , CS2003-11, pp.13-17 (2003年5月).
- [24] 片岡伸元, 和田尚也, 曾根恭介, 青木泰彦, 宮田英之, 尾中寛, 北山研一, “データ粒度可変光波長/パケット分岐挿入ノードフィールド実験,” 電子情報通信学会 光通信システム研究会 (OCS) , OCS2005-24, pp.73-78 (2005年5月).
- [25] 清水克宏, アルアミン アブドゥッラー, 竹中充, 猪原涼, 西村公佐, 堀内幸夫, 宇佐見正士, 瀧田裕, 甲斐雄高, 青木泰彦, 尾中寛, 宮原利治, 八田竜夫,

- 本島邦明,中野義昭, "高速光スイッチと共有型波長変換器を用いた光バーストスイッチングノードの開発," 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会(PN), PN2005-58, pp.65-70 (2005年12月).
- [26] 高良秀彦, 大原拓也, 鈴木和宣, 盛岡敏夫, 古賀正文, 青木泰彦, 曾根恭介, 宮田英之, 宮田宏志, 尾中寛, "スーパーコンティニウム光源と音響光学可変フィルタを用いた C+L 帯 80ch 広帯域 Add/Drop 実験—NICT けいはんなオープンラボにおける連携実験—," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-80 (2004年9月).
- [27] 曾根恭介, 青木泰彦, 上野智弘, Yaojun Qiao, Yinying Zhang, Yuefeng Ji, 宮田宏志, 宮田英之, 齊藤民雄, 尾中寛, "AOTF を用いた高速波長可変光バーストスイッチ," 電子情報通信学会総合大会, B-12-2 (2005年3月).
- [28] 瀧田裕, 甲斐雄高, 青木泰彦, 菅間明夫, 青木重憲, 尾中寛, "高速 VOA 制御機能付 4x4 光バーストスイッチサブシステム," 電子情報通信学会総合大会, B-10-37 (2006年3月.)

