

平成16年度
研究開発成果報告書

統合的管理機能を有する高効率
全光ネットワークの研究開発

委託先：(株)東芝

平成17年5月

情報通信研究機構

平成16年度 研究開発成果報告書

「統合的管理機能を有する高効率全光ネットワークの研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発体の全体計画	5
2-1	研究開発課題の概要	5
2-1-1	光ネットワークアーキテクチャの研究開発	7
2-1-2	高効率光変復調の研究開発	8
2-1-3	高速・高安定光周波数制御の研究開発	11
2-2	研究開発目標	14
2-2-1	最終目標（平成18年3月末）	14
2-2-2	中間目標（平成16年3月末）	14
2-3	研究開発の年度別計画	15
3	研究開発体制	17
3-1	研究開発実施体制	17
4	研究開発実施状況	18
4-1	光ネットワークアーキテクチャの研究開発	18
4-1-1	研究開発の概要	18
4-1-2	パケット順序逆転防止方式	19
4-1-3	ネットワークアーキテクチャと波長競合	26
4-1-4	リンク障害対策の検討	36
4-1-5	光ネットワークアーキテクチャのまとめ	37
4-2	高効率光変復調の研究開発	38
4-2-1	研究開発の概要	38
4-2-2	光周波数利用効率0.8bit/s/Hzにおける光ADM部の光フィルタ構成の検討	38
4-2-3	連続波長切り替えSG-DBRレーザによる1.07bit/s/Hz波長多重信号のチャンネル切替実験	38
4-2-4	高効率光変復調のまとめ	42
4-3	高速・高安定光周波数制御の研究開発	43
4-3-1	研究の概要	43
4-3-2	SG-DBR-LDの光周波数制御系	43
4-3-3	光周波数の長期的な安定性	46
4-3-4	エタロンの温度補償方法	47
4-3-5	高速・高安定光周波数制御のまとめ	50
4-4	総括	50
5	参考資料・参考文献	51
5-1	研究発表・講演等一覧	51
5-2	参考文献	53

1 研究開発課題の背景

FTTHに代表されるブロードバンドインターネットアクセス、モバイル通信、企業の情報化戦略等により IP パケットを中心とした情報トラフィックが飛躍的に増加している。莫大な情報トラフィックのニーズに応じ、波長多重技術が飛躍的に進歩した。その結果、バックボーンネットワークにおいて、1本の光ファイバに毎秒テラビットのデータを伝送することが可能となった。

通信事業者は、トラフィックが集まるバックボーンネットワークへの集中設備投資により利潤を追求した。その結果、ボトルネックはバックボーンからエンドユーザに近い部分に移動してきた。企業が集中する都市部においては、モバイル通信、企業 LAN、企業とデータセンター等との有機的な接続のニーズが飛躍的に増大すると考えられる。このようなメトロポリタンネットワークにおいては、トラフィックがダイナミックに変動するため、限られたネットワークリソースを有効に利用できるネットワークが要求されてくる。また、LAN、SAN (Storage Area Network) などエンドユーザ (企業) が要求する多種多様なインタフェースやプロトコルに対応するネットワークが要求されるであろう。

従来、企業は ATM 専用線などのデータ専用線サービスを利用し、LAN 間接続を行ってきた。LAN 間を常時接続するメリットはあるものの、高速で瞬時にデータ転送を行うことがコスト面で困難であった。また、インタフェースも通信事業者のサービス品目により限定されてきた。

データ専用線が高コストである理由のひとつとして、データ転送を行うための仕組みが重なっていることが上げられる。すなわち、光ファイバ伝送レイヤ、SDH レイヤ、ATM レイヤなど、それぞれのレイヤに独立した装置が必要であるとともに、レイヤ単位のネットワーク管理が行われていた。しかも、各レイヤ間で管理情報の交換がなく、管理の効率はずしも良くなかった。そのため、SDH 伝送装置、ATM 交換機等への設備投資と管理コストが高いことにより、データ専用線サービスが高コストとなっている。また、通信事業者側の ATM 交換機とインタフェースするために、エンドユーザ側インタフェースが ATM に限定されることになる。

光ファイバ伝送レイヤのみでデータ転送が可能となれば、非常に低コストなネットワークが実現できる。

中間のレイヤを極力無くし、ダイナミックに変動するトラフィックを効率的に収容する目的のために、OXC (Optical Cross Connect) 装置を用いた光転送ネットワークが考案されている。現在、OIF (Optical Internetworking Forum)、ITU-T、IETF 等で標準化中のネットワークアーキテクチャは、ノードで波長を変換しながらエンドエンドで光パスを設定する方式である。特に OIF においては、標準化の加速を図るために、ユーザネットワークインタフェースを SDH 信号に絞り込んだ。ノードで波長を変換するネットワークにおいて、光パス設定を行う方式は、IETF で標準化された MPLS (Multi-Protocol Label Switch) を拡張することにより実現できる。この方式は、GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switch) と称され、現在、IETF および ITU-T で検討が進められている。

しかし、ここで提案するノードで波長を変換しない全光ネットワークにおいて、ダイナミックな光パス設定方式に関する検討は十分に行われていない。また、標準化作業も初期検討の段階である。

全光ネットワークは、途中ノードでは、トランスペアレントに光信号を通過させる。途中ノードで光送受信器を持たないため、ノードコストを非常に低くすることが可能である。また、光パスの端点以外は、エンドユーザのプロトコルに依存しないという特長を持つ。さらに、ノードが自律的に光パスを設定することが可能となれば、トランスペアレントな光パスをダイナミックに設定することが可能となる。

GMPLS は、ネットワークのトポロジーに応じて、秒オーダーで準静的に光パスを設定するのに対して、本提案は、ネットワークを流れるフローを検出して、動的に光パスを設定・解放するアーキテクチャを考えている。本アーキテクチャより、さらに先の研究となるのが、光バーストスイッチングネットワーク (OBS と称する) となる。したがって、本研究の位置づけは、IETF で標準化中の GMPLS と先の時代の OBS ネットワークの中間に位置づくものと考えられる。

このような全光ネットワーク全体のスループットを上げるためには、光ファイバ中に多重できる波長数を可能な限り多くする必要がある。トランスペアレントな光パスは、光ファイバや光コンポーネントにおける損失を受ける。この損失を補償するため、光ファイバアンプを導入する。ネットワークのコストを下げるために、使用する波長帯を汎用光ファイバアンプで増幅できる C バンド (コンベンショナルバンド) に限定する。また、1 波長当たりのビット速度を 40Gbit/s とすることにより、光パス端点の装置サイズを小さくすることも重要である。従って、C バンドにおいて、40Gbit/s 光信号の波長多重数を可能な限り多く取れる高効率光変復調技術を開発することが重要となる。

ファイバ分散耐力あるいは非線形耐力を追求した方式としては、近年 CS-RZ (Carrier Suppressed RZ) 変調方式、AC-RZ (Alternate-chirped RZ) 変調方式、光デュオバイナリ変調方式、DCS-RZ (Duobinary Carrier-Suppressed RZ) 変調方式等が提案されている。最近では、RZ-DQPSK (Differential Quadrature-phase-shift-keying) 変調方式などの光信号の多値化変調により直交偏波多重を用いることなく周波数利用効率が 1.0bit/s/Hz を超えるような波長多重伝送の報告例 [1] がある。また、光周波数利用効率の高い波長多重信号に Add-Drop-Multiplexing (ADM) を適用する試みも報告されている。文献 [2] は、周波数利用効率 0.8bit/s/Hz の波長多重信号を、光 ADM 部を有する光周回系に取り込み、光 ADM 部の通過段数を RZ-DPSK 信号や NRZ-Duobinary 信号について測定したものである。文献 [3] は同様の実験を RZ-DQPSK 信号について行ったものである。光 ADM 部の構成は、波長多重信号を 1 波ずつ波長分離する光分波器と 1 波ずつの光信号を合波する光合波器を対にした従来から良く知られたものである。また、RZ-DQPSK 変調用の光変調器は 1 つに集積化されているものの、光変調器のバイアス制御や光受信器の構成が複雑であり、伝送路内に光 ADM 部を多数用いたシステムには、その適用が難しくなる。

本研究開発では、非線形耐力が通常 RZ 信号と同程度で分散耐力が極めて大きいと報告されているデュオバイナリ方式とほぼ同等な性能を確保しつつ、全光ネットワークに適した簡易な構成の変復調方式実現を目指す。すなわち、分散耐力に優れ占有光帯域がコンパクトであり、直交偏波多重を用いることなく超高密度波長多重伝送を可能とし、複数の光 ADM 部を通過したことによる光波形劣化が少ないものである。

全光ネットワークのエッジ装置は、光トランシーバが接続される Add/Drop ポート以外に 2 つ以上のポートを持つ。このポートは、光ファイバにより隣接ノードと接続される。Add/Drop ポート数が、ネットワークを構成する自分以外のノード数だけある場合には、光トランシーバの波長を固定し、フルメッシュの光パスを構成できる。しかし、この場合は、ノードのトランシーバ数が非常に多くなってしまいノードコストが増加し現実的でない。また、ノード間のトラフィック量に応じてダイナミックにネットワークリソースを配分できないという問題もある。従って、ノードにおける Add/Drop 光トランシーバの数を限定し、トラフィックをダイナミックに変化できるアーキテクチャが重要となる。そのためには、光パスに応じて、光トランシーバの光周波数を高速に変化させる必要がある。ネットワークの効率は、光トランシーバの光周波数を高速に変化し、かつ安定化できるかに依存する。従って、本研究開発において、高速・高安定光周波数制御技術は、重要な技術課題となる。

近年、波長可変光源、多波長光源、波長変換デバイスなどの研究開発が盛んになってき

た。波長可変光源の中には比較的安定性の良い光共振器を内蔵し、光共振器の共振周波数で発振するタイプのものがある[4]。光共振器としては石英導波路によるリング共振器やフアブリペロエタロンが用いられるが、レーザの細かいモードホップが生じるため、本研究のような波長ロッカーによるフィードバック制御ほどの安定性は得られていない。多波長光源の多くはファイバーレーザを用いたモードロックによるものであり、レーザ全体の環境温度変化などに対する安定化は未だ不十分なレベルである。また、波長変換デバイスの多くは半導体光アンプ(SOA)中の非線形現象により波長変換を行う[5]。SOAには信号光とともにプローブ光を入射させ、プローブ光の波長に変換する。プローブ光の光源は本研究で行われている高速・高安定な波長可変光源を用いる必要があり、波長変換デバイスは本研究の1つの応用先として位置づけられる。

2 研究開発体の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究開発の対象とするネットワークの概要を図 2.1 に示す。

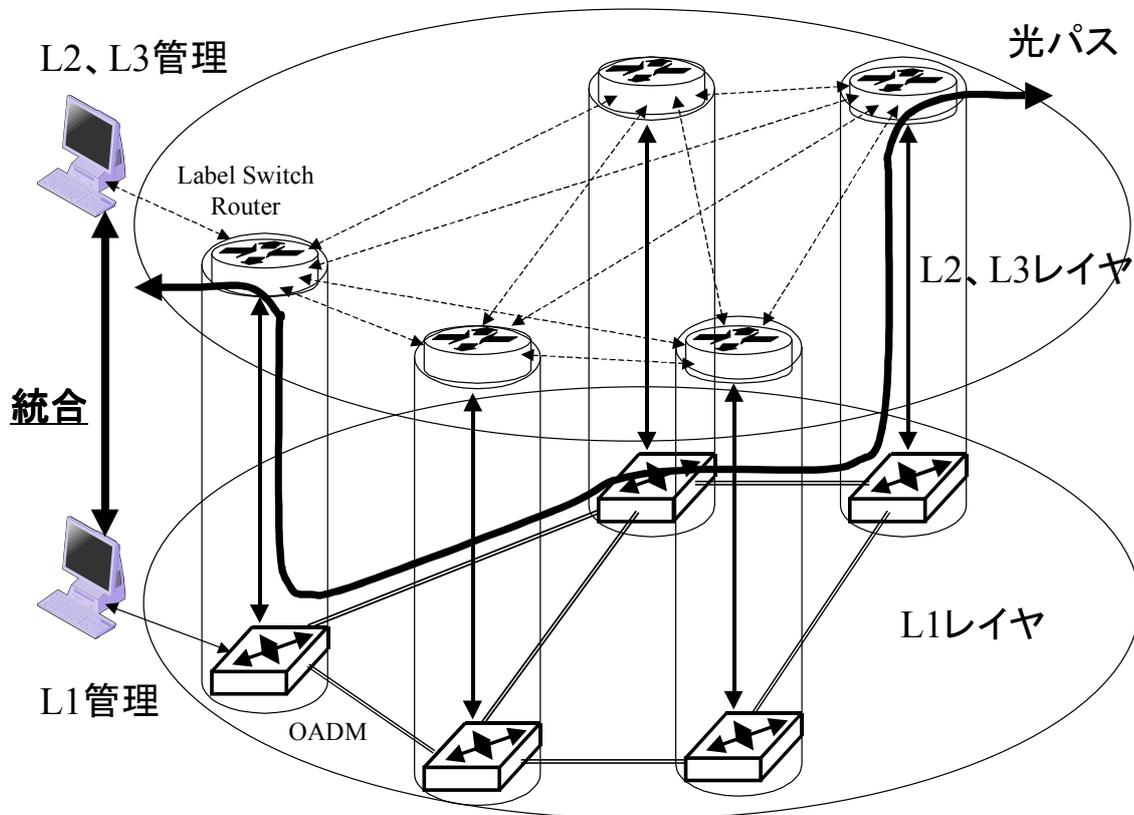


図 2.1 ターゲットとなる全光ネットワークの概念図

全光ネットワークは複数の OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) あるいは PXC (Photonic Cross Connect) で構成される。このネットワークにおける光パスの割り当て方法と OADM あるいは PXC を制御する手順を研究開発対象とする。さらに、全光ネットワークの物理層 (L1) を管理する NMS (Network Management System) と、データリンク層 (L2) やネットワーク層 (L3) を管理する NMS を接続し、NMS 間で必要な構成情報、障害情報などをやり取りすることにより、全光ネットワークを統合管理する方法を確立する。この事により、ネットワーク管理の効率化が図れ、真の高効率ネットワークアーキテクチャを実現することができる。

図 2.1 中に示す光パスは、OADM あるいは PXC ノードを介して設定される。途中ノードにおいて、光パスは、OADM あるいは PXC の光スイッチを介して光信号のまま通過する。波長は変換されない。光パスの端点のデータは、Add/Drop 光トランシーバにより、電気信号に変換される。具体的には、エッジノードに入力される電気信号に付けられた宛先アドレスに応じ、そのエッジノードのネットワーク側出力ポート (光ファイバに対応) と波長を選択することにより、宛先アドレスに該当する遠方のエッジノードまでデータがそのまま転送される。本転送手順を実現するためには、前もって、ノード間に光パスを設定しておく必要がある。

以上のデータ転送の仕組みを実現するノードの概略構成を、図 2.2 に示す。

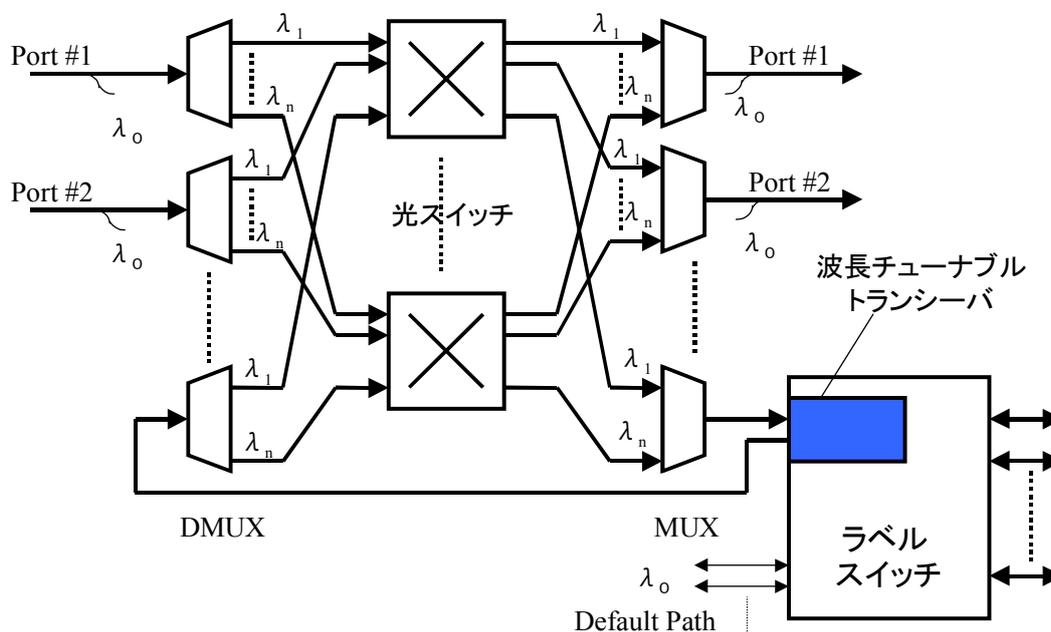


図 2.2 ノードの概略構成

光パスは、デフォルトパスを用いてノード間をホップバイホップで接続したシグナリングレイヤにより制御される。波長チューナブルトランシーバの出力波長は、ラベルスイッチに入力されるラベルに応じて切替えられる。この波長切替により、時間的に異なる光パスにデータを転送することが可能となる。光パスを、特定のポリシーにより消去し、新たに要求のあるノード間に光パスを設定することにより公平性を確保する。

以上に示すネットワークおよびノードの構成を念頭に置き、以下の3つの研究開発課題を克服することにより、高効率な全光ネットワークの実現に向けた要素技術開発を行う。

- ① 光ネットワークアーキテクチャの研究開発
- ② 高効率光変復調の研究開発
- ③ 高速・高安定光周波数制御の研究開発

2-1-1 光ネットワークアーキテクチャの研究開発

全光ネットワークの概略的構成を図 2.1、およびノードの構成を図 2.2 に示す。本ネットワークの基本的な考え方を、図面を参照して説明する。図 2-1.1 に 5 ノードのメッシュ

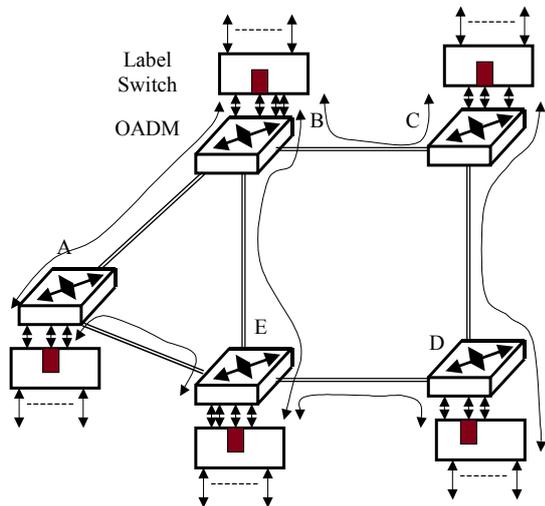


図2-1.1
ネットワークの例

ネットワークを示す。ノードは、ラベルスイッチと OADM で構成されるものとする。このノードの構成は、図 2.2 に示したものと同一である。ノード間は、光ファイバペアで接続されている。

予め定めたデフォルト波長とデフォルトラベルを用いて、ノード間をホップバイホップで接続する。予め設定されたホップバイホップのパスをデフォルトパスと

称する。デフォルトパスを介して、OSPF などネットワークトポロジを把握できるルーチングプロトコルを動作させることにより、制御プレーン上で制御信号を転送することが可能となる。

次に、ユーザデータをデータプレーン上に流すために、上記で確立した制御プレーンを用いてシグナリングを行い、デフォルト波長でデータ転送用ラベルスイッチパスを設定する。このラベルスイッチパスは、ノードのラベルスイッチを介して設定されるパスであるため、全光パスとはなっていない。

ラベルスイッチパス上を流れるトラフィックを測定し、測定したトラフィックが、予め定めたしきい値を超えた場合に、上記の制御プレーンを用いて、光パスを設定するシグナリングを行う。光パス設定シグナリングによりできた光パス上に、しきい値を超えたトラフィックを流し、輻輳を回避する。

光パスは、波長チューナブルトランシーバ 1 台に 1 本張る事ができる。光パスは、次の 2 種類のポリシーに従い消去するものとする。

- 光パスは、予め定めた時間だけ設定するようにし、時間がきたら消去するか、あるいはよりトラフィックの多いパスに切り替える。
- 光パスを流れるトラフィックが、デフォルトパスで流せることが判断できれば、光パスを解放する。

以上に示す基本的考え方に従い、一般的なメッシュ網において、

- ・ 波長切り替えに要する時間とネットワークスループットとパケット廃棄率の関係の導出（光パスの解放手段の決定）
- ・ 障害に対するプロテクション手法の確立
- ・ 統合的ネットワーク管理手法の確立

などを行う。

2-1-2 高効率光変復調の研究開発

(1) 本提案における高効率化の方向

効率よく高スループットな全光ネットワークを構築するためには1ファイバあたりの容量を増加させることが必須である。ネットワークで使用する波長帯を1550nm帯のCバンドとすると、その帯域は30数nmと限定されているため、帯域利用効率の高い変復調方式の実現が重要な研究開発課題となる。

帯域利用効率を高めるための方法としては、(a)1波長あたりのビットレートを高める、(b)コンパクトなスペクトルを有する変調方式を使用する、(c)偏波多重分離を使用する、という3つの方向がある。

本提案では、(a)に対してはビットレートを40Gbit/sとする。ITU-Tで標準化された50GHzの光周波数間隔に可能な限り情報を詰め込む場合、ビットレートを極力高くする必要がある。現在研究開発が行われている1波あたりの最高のビットレートは40Gbit/sであり（光時分割多重:OTDMシステムを除く）、主に幹線系への導入を目標として研究開発がなされている。本提案ではこれを全光ネットワークに導入し、全光ネットワークでは過去に例を見ない高速伝送を行う。

なおOTDMでは100Gbit/sを超える研究報告がある。OTDMは超短パルス列を光段で多重分離する手法であって、超短パルス間の相互作用の制御が困難であり、ファイバ分散・非線形耐力等の光ファイバ伝搬特性トレランスが小さく、波長多重システム、ひいては、本提案の全光ネットワークには適さない。また、OTDMで40Gbit/sを生成する方式も検討されているが、装置規模が大きくコストパフォーマンスが悪い。本提案では電気段で生成した40Gbit/s信号を光信号に変換する方式を採用する。

(b)については、コンパクトな光スペクトルでかつ、光ファイバ伝搬特性の優れた方式が望まれる。全光ネットワークは敷設済みの光ファイバで構築されることが予想されるため、様々な種類の光ファイバに対応できる光ファイバ分散耐力、非線形耐力が望まれる。このような耐力を有する方式は種々検討されているが、構成が非常に複雑であるなど、特性に一長一短があった。本提案では、シンプルな構成でかつ特性の優れた変調方式の実現を目標とする。

(c)に関しては、本提案では偏波多重分離は使用しない。一般に、偏波多重分離（直交する2偏波に異なる信号を乗せ、受信端で偏波分離する）することによって、しない場合と比較して2倍の情報が伝送可能とされている。しかし、敷設済みの光ファイバでは偏波モード分散(Polarization Mode Dispersion: PMD)の上限を規定できず、著しく大きい可能性がある。著しく大きいPMDが存在する場合、直交していた2偏波間で分離不可能なクロストークが発生し、受信品質が劣化する。PMDを補償する機構は幾つか提案されているが、比較的シンプルに構築できるものは、性能が不十分で許容できない誤りを発生させる確率が高い。逆に十分な性能を持つものは構成が非常に大規模で実システムへの導入は実現性が乏しい。

本提案の全光ネットワークはエンドユーザに近い、ある程度の低コスト性が要求されるネットワークである。また、ネットワーク内に複数設けられた OADM ノードは光フィルタや光合分波器などにより構成されるため、OADM ノード数の増大に伴い各波長チャンネル信号への帯域抑圧が厳しくなる。そこで、偏波多重分離を用いることなく、コンパクトなスペクトルと十分な光ファイバ伝搬特性を有し、かつ、シンプルな構成の高効率変復調方式の実現を目標とする。

(2) 高効率化手法

光信号の帯域利用効率を高められる有効な変調方式として、反転 RZ 変調方式を現在検討中である。この変調方式では、通常の RZ 光信号とはマークとスペースの関係が逆転しており、通常マーク時に光強度が最小となる。この反転 RZ 変調方式は図 2-2.1 に上げる構成により実現でき、スペクトルがコンパクトで変調器ドライバ帯域が狭く出来、かつ、光信号がファイバ分散に対して高い耐力を持つことが特徴である。

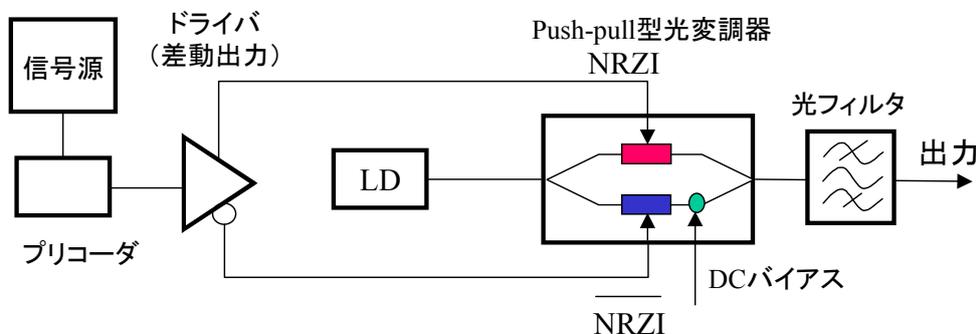


図 2-2.1 反転 RZ 光送信器の構成図

まず、光源（LD）からの CW 光を Push-pull 型光強度変調器に導く。光強度変調器内では、CW 光が 2 分岐される。各分岐路にはそれぞれ光位相変調部が設けられており、各光位相変調部は差動電気信号により駆動される。差動電気信号は、信号源と図 2-2.2 に示すプリコーダ（入力データと 1 タイムスロット前の出力データの排他的論理和を取る回路）と差動出力のドライバにより生成される。

図 2-2.3 は図 2-2.1 の構成によってビット列が変換されていく様子を示している。(a) が信号源から生成された NRZ 信号であり、これをプリコーダに取り込むことにより (b) のビット列（NRZI 信号）が得られる。(b) のビット列、および、この反転ビット列をドライバより取り出し、Push-pull 型光強度変調器に印加すると各分岐路での出力光の位相は (c) のようになる。従って、各位相変調部への駆動（交流）信号レベルと分岐路間での位相差（DC バイアス）レベルを適宜設定すると、光変調器内部で 2 分岐された光信号の位相差は (d) のようにすることができる。よって、2 分岐光が変調器内部で合波されると (e) の光波形（反転 RZ 信号）が得られる。本方式の特徴の一つは、(e) の波形においてマークビットごとに反転マークの光位相が反転していることである。そのスペクトルはキャリア周波数を持たないコンパクトな形状を取っており、光ファイバ分散耐力に優れている。

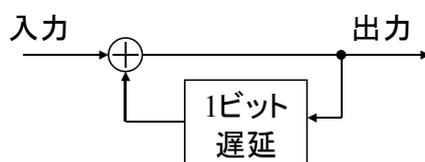


図 2-2.2 プリコーダ

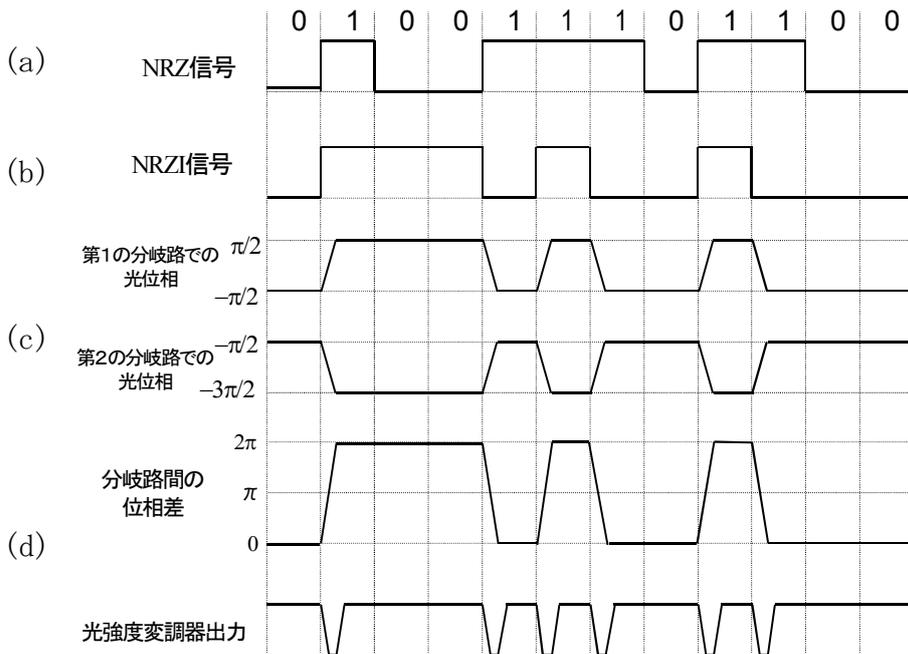


図 2-2.3 反転 RZ 変調方式

もう一つの大きな特徴は駆動信号の立下り、立上りにおいて、各々の反転 RZ パルスが生成するため、立上り／立下りが緩やかで良く、位相変調器の駆動回路に広帯域性が要求されないことである。40Gbit/s の RZ パルス列を得るために必要な駆動回路の帯域が 20 数 GHz 程度で良く、駆動回路への要求が緩和される。また、本方式は、10Gb/s のビットレートにおいては許容分散量として $\pm 2000\text{ps/nm}$ 以上を有し、非線形耐力に関してはファイバ入力光強度の限界値としておよそ +12dBm であり、通常の RZ 光信号並みの非線形耐力を有する。これらのことから、本変調方式による光信号は、ファイバ伝送を行う上で比較的扱いやすいものであるといえる。

本方式と同様の光波形は、電氣的に生成された反転 RZ 電気信号により光強度変調器を駆動しても得られる。しかしながら、隣接反転マーク間の光位相の反転は無いため大きな分散耐力が得られない。また、反転 RZ 光信号の変調部の構成は従来の Duobinary 方式と類似しているが、Duobinary 方式は電気または光領域において電気または光フィルタなどを用いて信号帯域を半分未満に制限する変調方式である。原信号の主要スペクトル成分の一部を除去するため、帯域制限に用いられるフィルタなどは透過・反射特性などの点で制約が厳しく、超高速信号を扱う場合にはフィルタなどの設計が必ずしも容易ではない。一方、反転 RZ 方式では、原信号の主要スペクトル成分をそのまま残して変調器を駆動する平易なものである。

本方式が克服すべき課題としては、以下の点が予想される。まず、本方式による光送信器を用い光帯域の高効率化を試みる場合、送信端や受信端において光バンドパスフィルタを利用するなどして受信に不要な周波数成分を除去し、反転 RZ 光信号のスペクトルをさらに狭める必要がある。従って、ドライバ回路の帯域やファイバ伝送路内に用いる光合分波器や光フィルタ等の光帯域・透過特性を適宜設定することが求められる。このような各部での帯域配分の検討は、多数の OADM ノードを有する光ネットワーク内に反転 RZ 光信号を適用する上でも重要である。光帯域配分を考慮した OADM ノードの構成方法も検討課題であるといえる。また、反転 RZ 方式は通常の RZ 方式に比べると平均光強度が高い変調方式であるので、受信感度が従来の RZ 方式に比べて劣ることが予想される。反転 RZ 光信号の特徴であるコンパクトな光スペクトルと高分散耐力を活かしつつファイバ伝送を行い、受信端

において受信感度が高められうる工夫が必要であろう。

2-1-3 高速・高安定光周波数制御の研究開発

全光ネットワークでは、光送信部において光周波数可変機構（光周波数シンセサイザ）を有することにより、光周波数に応じて宛先ノードを変更でき、ネットワーク利用効率が大幅に向上する。しかしながら、光周波数切り替えに要する時間は、ネットワーク的にはガードタイムとして反映されるために、ネットワークの利用効率の低下を招く。また、光周波数切り替え後の光周波数の安定性は、波長多重における波長密度、すなわち光周波数利用効率と密接に関係しており、安定性が高いほど光周波数利用効率を向上させる。したがって、光周波数シンセサイザには、高速の光周波数切り替え機能と、切り替え後の光周波数安定性が要求される。さらに、装置の小型化・低コスト化の観点から、単一の光源で使用する帯域全て（ $\sim 30\text{nm}$ ）をカバーできることが必要である。

半導体レーザにおける光周波数の切り替え時間としては、数 nsec という報告がなされているが、このような超高速の切り替えにおいては、光周波数検出機能や発振モード安定化がなされていないため、切り替え後、数 msec 程度の時間においてさえも光周波数の安定性を保持できない。全光ネットワークにおいては、一度設定した光パスを長時間にわたって使用することが想定されるので、切り替えた後の光周波数の安定性は非常に重要となってくる。そこで、我々は切り替え時間という言葉ではなく、整定時間という言葉を用いることにする。通常、整定時間は目標値の2%もしくは5%以内に収まり、それ以降再びこの範囲を超えなくなるまでの時間を意味する。ただし、今回のように目標値として 30nm (3750GHz) に及ぶ波長変化が求められる場合では、2%もしくは5%程度の精度では所望のチャンネルに波長を設定することは到底出来ない。従って、目標値に対する精度を付け加えて整定時間を取り扱うことにする。

波長多重伝送においては、各チャンネルの光周波数安定度は、一般に光周波数間隔の10分の1以下と言われ、50GHz 間隔では $\pm 2.5\text{GHz}$ 以下となる。しかしながら、全光ネットワークでは、光パスの端点でのみ電気信号が介在するが、途中のノードではトランスペアレントに光信号を通過させる。途中のノードでは、光合分波器などの光フィルタが介在するために、送信信号の光周波数ずれは伝送特性を著しく劣化させる。したがって、光フィルタが多段接続された場合においては、光周波数の安定度はさらに厳しくなり、概ね $\pm 1\text{GHz}$ 以下の精度が要求される。

上述した機能を有する光送信部の構成を図 2-3.1 に示す。光源としては波長可変レーザを用い、検出部において光出力パワーおよび光周波数を検出する。この検出結果に基づいて波長可変レーザの出力パワーおよび光周波数の制御を行う。波長可変レーザとしては、DFB (Distributed Feedback) 型、DBR (Distributed Bragg Reflector) 型および外部共振器型の3種類があり、それぞれに長所・短所を有している。波長可変レーザとしては、現時点で 30nm 以上という広範囲の可変幅を有し、かつモード跳躍がないという点で外部共振器型の MEMS-VCSEL が有望である。しかしながら、MEMS-VCSEL の応答時間は msec オーダーと長い。また、光周波数の精度を $\pm 1\text{GHz}$ とし、3750GHz の周波数を変化させる事を考慮すれば、目標値の $\pm 0.03\%$ 以内と極めて高い精度が求められている。そこで、目標値の $\pm 0.03\%$ 以内に収める整定時間を 1msec で実現することを最終目標とする。本研究開発では、可変波長範囲、発振モードの安定性、応答速度、制御の簡便性などについて検討を行い、最終目標を満足できるデバイスを選定し、そのデバイスに適した制御方式の研究開発を行う。

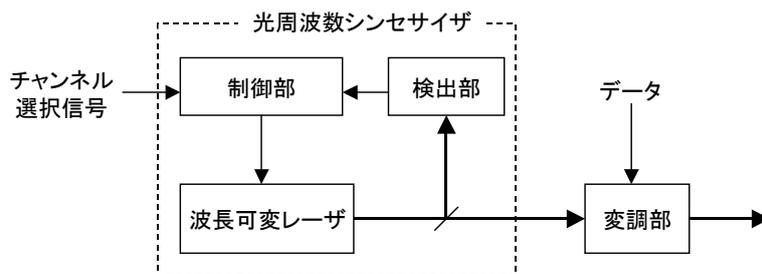


図 2-3.1 光送信部の構成

±1GHz 以下の光周波数精度を実現するためには、光周波数検出において高精度な波長基準が必要となる。また、安定な光周波数切り替えを実現するためには、広い光周波数引き込み範囲を有する制御系が必要となる。したがって、本研究開発では高精度な波長基準器および広い周波数引き込み範囲を有する制御方式の研究開発を行う。

図 2-3.2 に光周波数制御系の構成を示す。波長基準器としては、Zカット水晶のファブリペロ共振器を用いる。Zカット水晶のファブリペロ共振器は $500\text{MHz}/^\circ\text{C}$ の温度係数となるので、10 分の 1°C 程度の温度制御を行えば、高精度の波長基準器を構成することが可能である。水晶の X カット面に電極を設け、低周波の正弦波信号（ディザ信号）を加えると、ファブリペロ共振器の透過特性に応じて、ディザ信号は光強度変調成分に変換される。したがって、ファブリペロ共振器透過光を同期検波することによって、同期検波出力としては、ファブリペロ共振器の透過特性の一次微分した特性が得られる。このように同期検波を用いる方法ではアンプの DC ドリフトなどの影響が除けるため高精度化が可能となる。また、ファブリペロ共振器にディザ信号を加える方法は光源のスペクトル純度が保たれるため、周波数利用効率の向上につながる。水晶の変調効率が低く、検出時間が長い欠点はファブリペロ共振器の保持方法を改良することにより改善可能と考えている。図 2-3.3 にファブリペロ共振器の透過特性と同期検波出力を示す。ファブリペロ共振器の先鋭度（フィネス）を小さく設定することによって、透過特性とピークとボトムの両方をロックポイントとして利用することができる。図 2-3.3 より、透過特性のピークとボトムの光周波数では同期検波出力はともに 0 となるが、同期検波出力の傾きが逆であるために、どちらか一方のみが安定点として動作する。透過特性のピークのみを安定点として用いた従来の方式では、引き込み範囲がチャンネル間隔程度に制限されていたが、本方式ではチャンネル間隔の 2 倍の引き込み範囲を実現でき、より安定な光周波数制御が可能となる。所望のチャンネルの光周波数近傍に引き込む方法に関しては、レーザーの応答速度、発振モードの安定性、制御の簡便性などを考慮し、デバイスに適した制御方式の研究開発を行う。

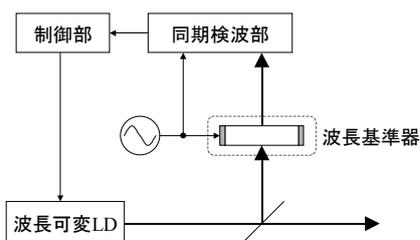


図 2-3.2 光周波数制御系

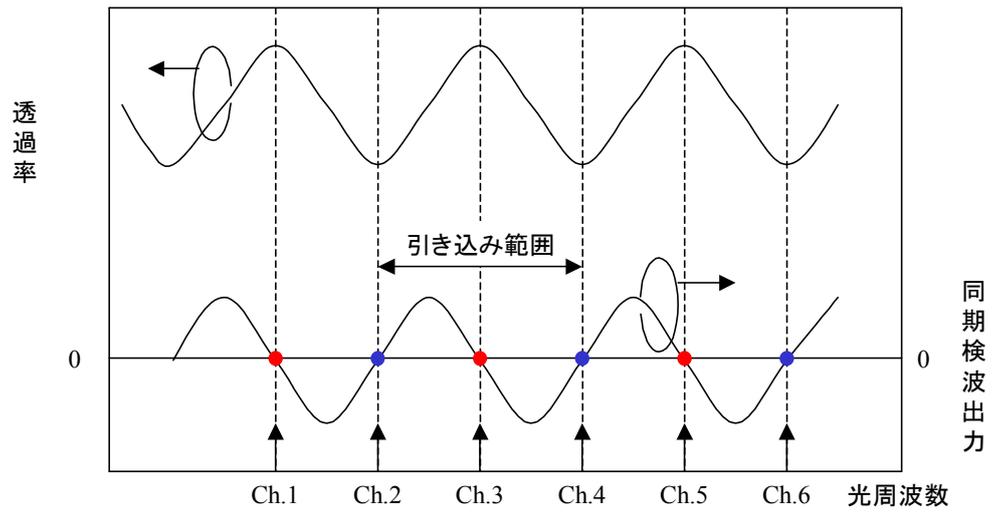


図 2-3.3 光周波数検出方式

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成18年3月末）

統合的管理機能を有する高効率全光ネットワークの研究開発

(1) 全光ネットワークアーキテクチャの詳細設計完

1 ポートあたりの波長数	≥ 70
1 ポートあたりの容量	$\sim 3\text{Tbit/s}$
トータルスループット	$\sim 50\text{Tbit/s}$
1 管理システム内のノード数	≥ 16

(2) 高効率変復調方式の伝送実験完

1 波長あたりのビットレート	$\geq 40\text{Gbit/s}$
帯域利用効率	$\sim 0.8\text{bit/s/Hz}$
偏波多重分離	無し
伝送距離	$\geq 200\text{km}$
Add Drop 機能確認実験	
Add Drop の光周波数間隔	$\sim 50\text{GHz}$
光受信器同期確立時間	$\leq 1\text{ms}$

(3) 高速高安定光周波数制御方式の実験完

光送信波長整定時間	$\leq 1\text{ms}$ （目標値の $\pm 0.03\%$ 以下）
光送信波長可変範囲	$> 30\text{nm}$
送信波長安定度	$\sim \pm 1\text{GHz}$

2-2-2 中間目標（平成16年3月末）

統合的管理機能を有する高効率全光ネットワークの研究開発

(1) 全光ネットワークアーキテクチャの方式設計完

(2) 高効率変復調方式機能確認試作完

1 波長あたりのビットレート	$\geq 40\text{Gbit/s}$
帯域利用効率	$\sim 0.6\text{bit/s/Hz}$
偏波多重分離	無し

(3) 高速高安定光周波数制御方式設計完

光送信波長整定時間	$\leq 1\text{ms}$ （目標値の $\pm 0.5\%$ 以下）
光送信波長可変範囲	$> 30\text{nm}$

2-3 研究開発の年度別計画

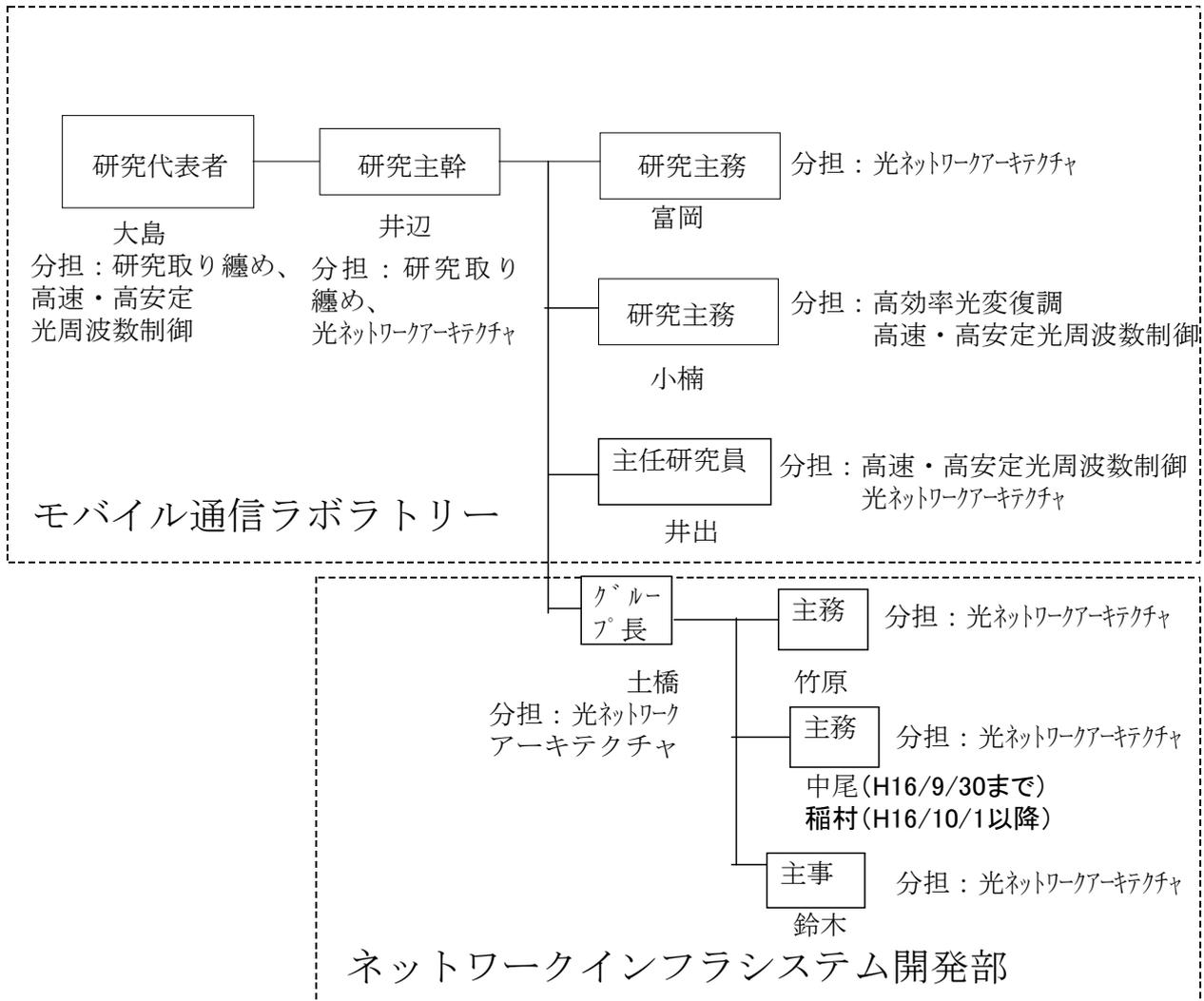
(金額は非公表)

研究開発項目	14年度	15年度	16年度	17年度	計	備考
	概略設計	詳細設計	方式確認	試作評価		
	→					
間接経費						
合計						

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



研究実施場所

神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1
(株)東芝 研究開発センター内

東京都日野市旭ヶ丘 3-1-1
(株)東芝 日野工場内

4 研究開発実施状況

4-1 光ネットワークアーキテクチャの研究開発

4-1-1 研究開発の概要

ラベルスイッチルータとフォトニッククロスコネクタ (PXC) を組み合わせたノードによりネットワークを構成する。予め、データパケットをスイッチするラベルスイッチパス (PSC-LSP ; Packet Switch Capable – Label Switch Path) を、ノード間にフルメッシュに張っておく。パケットトラフィックがしきい値を超えると、パケットのイングレスノードからイグレスノードに向けて、パケットと同一経路で光パスを設定する。特定の時間が経過すると光パスを解放する。以上のネットワークアーキテクチャを提案した。[6]、[7]、[8]、[9]

提案したアーキテクチャのネットワーク機能をネットワークシミュレータ上にソフトウェアを実装し、動作させることにより、アーキテクチャの問題点を明らかにすることを行ってきた。現在まで、PSC-LSP 上のトラフィックを、光パス上に移行する際に、光パス上のパケットが、PSC-LSP 上のパケットを追い抜くという課題が出た。到着パケットの順序の入れ替わりに関しては、上位レイヤたとえば TCP により、戻すことは可能である。しかし、Ethernet フレームをカプセル化するような場合においては、フレームの順序の入れ替わりが問題となり、対策を施す必要があった。上記のパケットの順序入れ替わりという異常状態に関して、対策を講じ、学会発表を行った。[10]

また、光パスを設定するためのシグナリングは、イングレスノードからイグレスノードまで途中ノードを含め、OXC の設定と光波長の決定を行う必要がある。このシグナリングには、RSVP-TE (rfc3473) を用いる。RSVP-TE は、イングレスノードからのシグナリングメッセージの中に、推奨波長を入れることが可能である。途中ノードで使用中の波長があれば、該当する推奨波長を減らしていき、イグレスノードで、波長を決定する。しかし、光パスの設定頻度が高い場合、シグナリングの途中で、異なるイングレスノードからのシグナリングメッセージが到着し、結果的に、同じノードの同一ポートに、異なる光パスでありながら、同一波長を設定してしまうことがある。この波長競合による異常状態は、完全に発生確率をゼロにすることは出来ない。しかし、工夫により、その確率を小さくすることが可能である。種々の方策を提案し、シミュレーションにより、波長競合の確率を下げる方式を示すことができた。[11]

さらに、ノード間を接続するリンクに障害が起こった場合のリカバリーについて検討した。本ネットワークアーキテクチャは、光パスをパケットトラフィックの変動に対してダイナミックにアサインする方式である。そこで、PSC-LSP の障害を光パスでダイナミックに救済する方法を新たに提案することとした。前もって、リンクの障害を想定し、障害リンクの上流のノードを Point of Local Repair (PLR) とし、障害リンクの下流のノードを MP (Marge Point) としたとき、PLR から MP へ、障害リンクを除いた Shortest Path を自律分散的に算出する。算出した経路に沿って、バイパス光パスを前もってシグナリングしておく。いざ、障害が発生した場合は、MP から波長設定メッセージを出して、バイパス光パスを開通させる。さらに、障害リンクを通る全ての PSC-LSP を一本の PSC-LSP にスタックしてからバイパス光パスのトンネルに入れる。MP でバイパス光パスから出たスタックされた PSC-LSP を、元の PSC-LSP に戻して、障害を回避する。そのリンク上に輻輳を回避するた

めに設定した通常の光パスがある場合は、それを強制的に解放する。本方式のバイパス光パスに使用する波長は、1 波長で済む。従って、バイパス光パス用の専用波長を前もってアサインすることが出来る。

上記に示したネットワークの異常状態に対する解決策に関して、パケット順序変更および波長競合についての対策について報告する。

4-1-2 パケット順序逆転防止方式

提案するネットワークは、パケットスイッチが可能なラベルスイッチパス (PSC-LSP) 上のパケットトラフィックがしきい値を超えた際に、光パスを設定し、光パス上にトラフィックを移して、トラフィックの輻輳を避けるアーキテクチャである。光パスは、途中ノードではバッファリングされずに、光のまま通過する。PSC-LSP 上のパケットが、キューイングバッファに蓄積されている状況において、光パス上への切り替えを行うので、切り替えた光パス上のパケットが、PSC-LSP 上のパケットを追い越す可能性が高い。

TCP/IP では、パケットの順序に関しては、エンドシステムで保証できるので大きい問題とはならない。しかし、イーサネットフレームを IP パケットで転送する、あるいは、PSC-LSP でトンネルするといった場合には、イーサネットフレームの順序は入れ替わってはならないという仕様のため、問題となる。そのため、パケット順序逆転防止方式について検討を行った。

4-1-2-1 光パス設定時

図 4-1-2.1に考案した方式の光パス設定時の概略手順を示す。ノードは光パスに入力バッファキューを備える。光パス設定時に PSC-LSP から光パスにトラフィックを移行する手順を以下に示す。

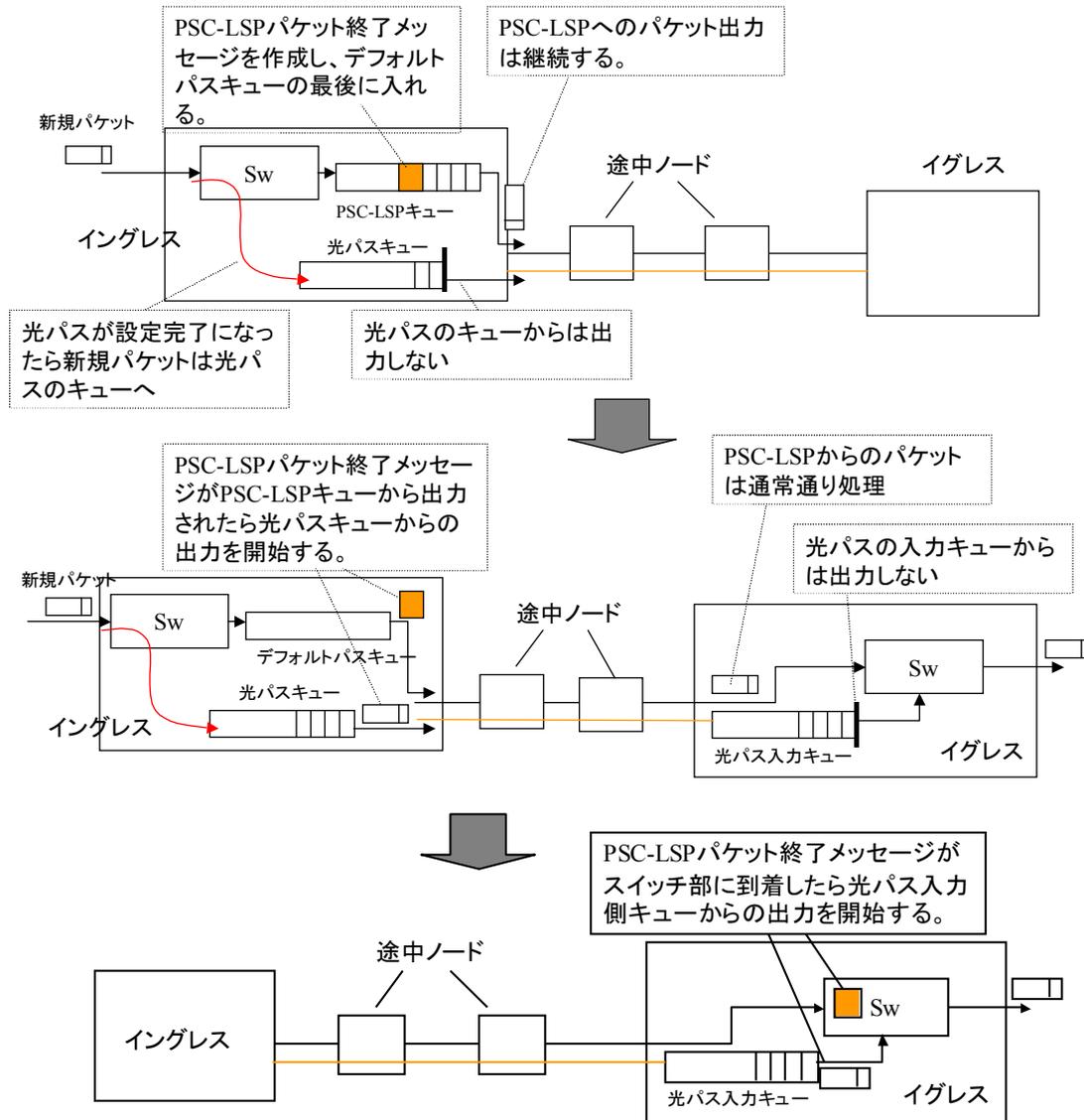


図 4-1-2.1 パケット追い越し対策イメージ(光パス設定時)

○光パス設定時

[イングレスノード]

- (1)イングレスノードに波長配布メッセージが到着し、光パスが設定できたら、対応するPSC-LSP上のパケットを、光パスの出力側バッファキューに入力する。光パスの出力側バッファキューからはパケットを読み出さず、溜めておく。
- (2)イングレスはPSC-LSPパケット終了メッセージを生成し、対応するPSC-LSPのキューの最後に入れる。
- (3)PSC-LSPパケット終了メッセージを送信したら、光パスの出力側バッファキューからパケットを読み出し、送信を開始する。

[イーグレス]

- (1)イーグレスでは、波長配布メッセージを送出し、各種テーブルの書き換えが完了したら、対応する光パスの入力側バッファからの読み出さず、対応する光パスから入力されるパケットは、入力側バッファに溜めておく。
- (2)対応するPSC-LSPで、PSC-LSPパケット終了メッセージを受信した後、光パスの入力側バッファからの読み出しを開始し、パケットの処理を開始する。

図 4-1-2.2 パケット追い越し防止の仕組み

データパケットに遅延が発生しても、制御パケットは、遅延しないように、ノードでの処理優先度を最も上げている。PSC-LSPパケット終了メッセージは制御パケットであるが、PSC-LSPの途中でデータパケットを追い越さないよう、特別にデータパケットの優先度と同じとする。図 4-1-2.2に示す [イングレス](1)(3)の手順を省略しても動作するが、イーグレスの入力キューの負担を軽減するため、イングレスとイーグレスでの処理を二段構成とした。

この方式によれば、パケット間に過剰な間隔を与えず、ほぼ連続してイーグレスノードから出力させることができる。出力バッファ、入力バッファに一時的にパケットが蓄積され、これがジッタとなるのみである。その量はPSC-LSPと光パスの遅延差に相当し、おおよそ、{LSP出力バッファ蓄積量+ノードのパケット処理時間(ストアアンドフォワード)}×途中ノード数、となる。本ネットワークはメトロへの適用を想定しており、途中ノード数はあまり大きくない。さらに、伝送速度が高速であるため、ストリーミングやVoIP等で動作不良を引き起こすほどのジッタにはならないと予想される。

4-1-2-2 光パス解放時

次に光パス解放時の手順を示す。基本的には光パス設定時と同様である。ただし、出力バッファはLSP単位ではなくインタフェース単位であり、また、光パス解放時には基本的にパケット順序逆転は発生しにくいことから、イングレスで一旦出力を止めるステップは省略した。また、入力バッファをPSC-LSPに設けると、遅延が途中ノード数×(ストア&フォワードの時間)分だけ増加してしまうため、ループ状の退避用バッファを設けることで対応した。図 4-1-2.3に退避用バッファの構成を示す。

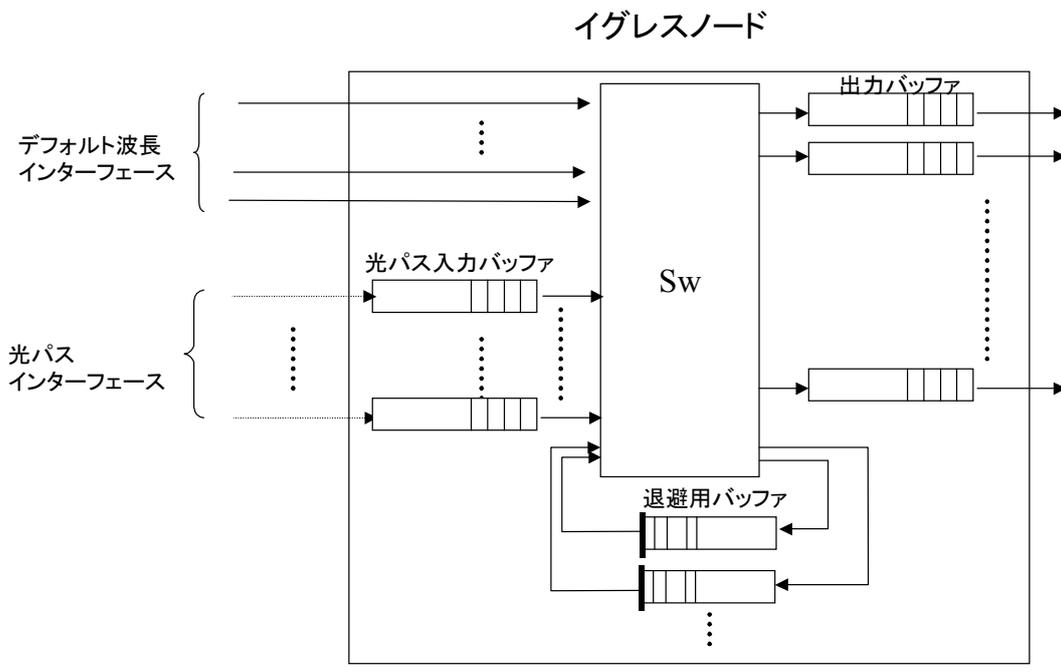
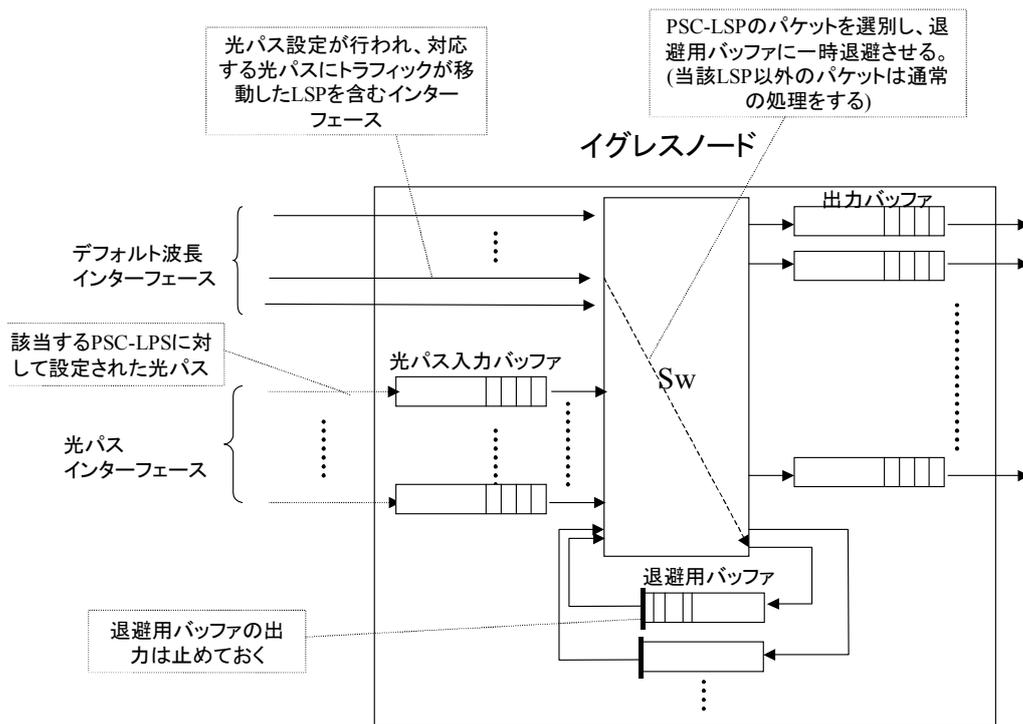
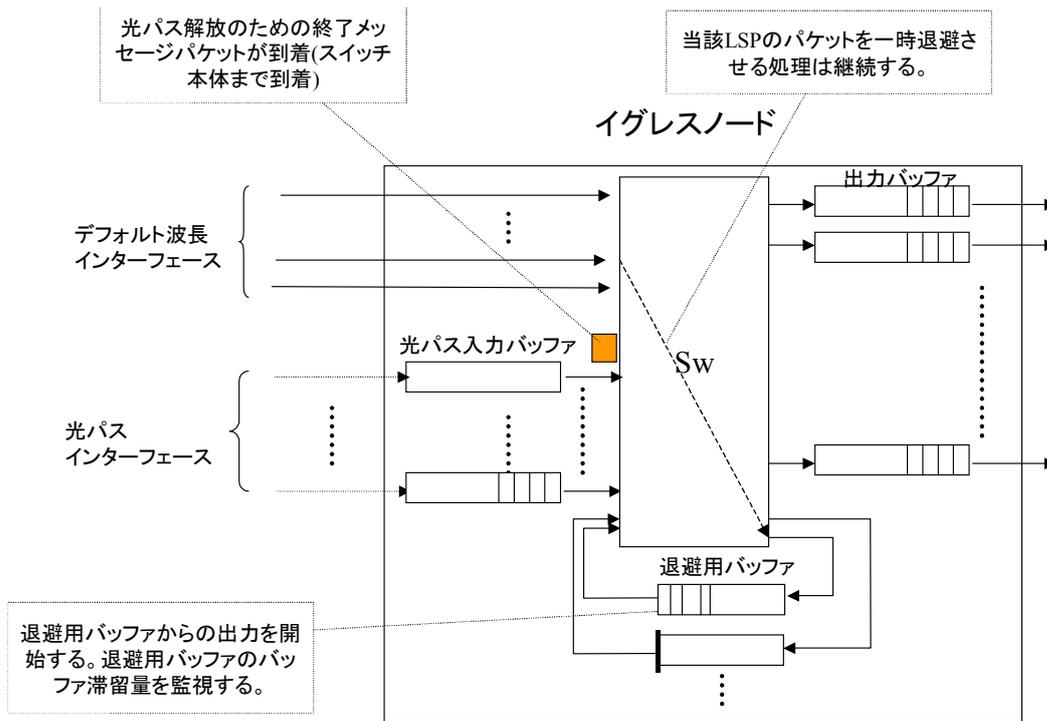


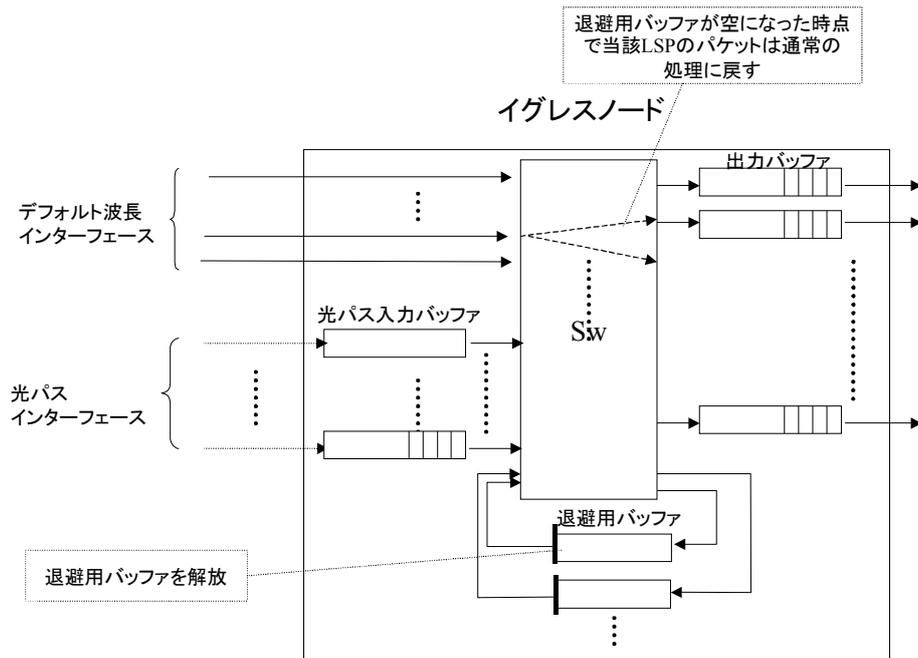
図 4-1-2.3 回避用バッファ構成図



(a) 回避用バッファへの入力開始 (光パス解放時[イグレス] (1))



(b) 退避用バッファからの出力開始(光パス解放時[イグレス] (2))



(c) 退避用バッファの解放(光パス解放時[イグレス] (4))

図 4-1-2.4 退避用バッファによる一時避難

手順の概要を図 4-1-2.4と図 4-1-2.5に示す。

○光パス解放時

[イングレスノード]

- (1)イングレスノードが光パス解放を決定したら、各種テーブルの書き換えの後、パケットを対応するPSC-LSPのバッファークューに書き込む。
- (2)イングレスノードは光パスパケット終了メッセージを生成し、対応する光パスのキューの最後に入れる。
(光パスパケット終了メッセージの優先度はデータ扱いとする)

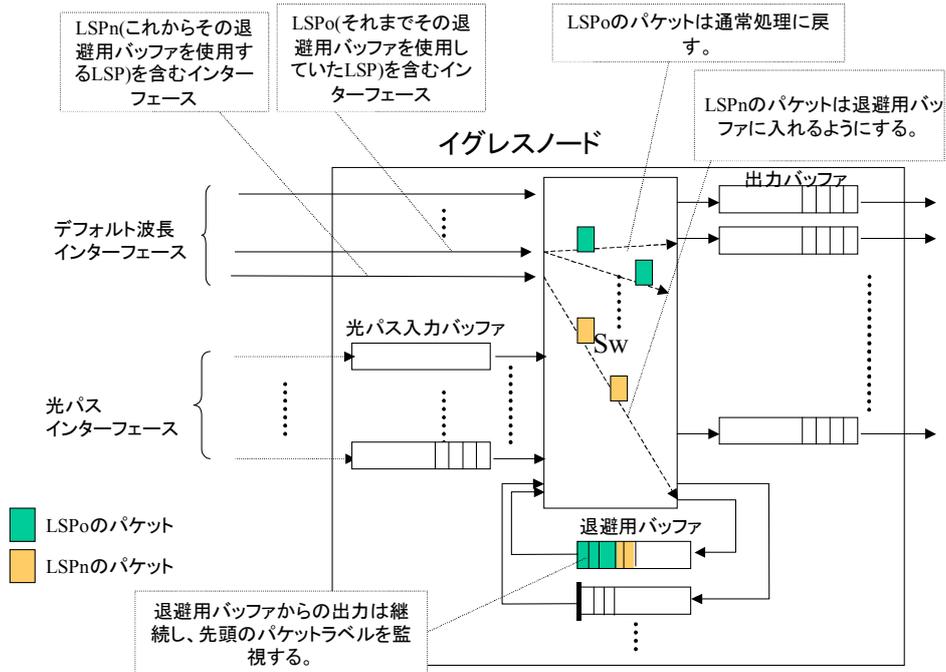
[イーグレスノード]

- (1) 光パス設定時に対応したPSC-LSPで、PSC-LSPパケット終了メッセージを受信したら、そのPSC-LSPからのデータパケットを退避用バッファに書き込む。退避用バッファから出力はしない。(制御パケットは退避用バッファには書き込まない)
- (2) 対応する光パスで、光パスパケット終了メッセージを受信したら、対応する退避用バッファからの出力を開始し、受信したパケットの処理を開始する。退避用バッファからの読み出しは他の入カインターフェースと同等の扱いとする。
- (3) 波長解放要求メッセージを受信した時点で、対応する光パスで光パスパケット終了メッセージを受信していない場合、光パスを解放し、対応する光パス入力キューが空になった時点で、退避用バッファからの出力を開始し、受信したパケットの処理を開始する。
- (4) 退避用バッファからの出力を開始しても、対応するPSC-LSPから退避用バッファへの一時退避は継続する。退避用バッファのバッファ滞留量を監視し、バッファが空になった時点で退避用バッファへの一時退避を停止し、対応するPSC-LSPからのパケットを通常の処理に戻し、退避用バッファを解放する。

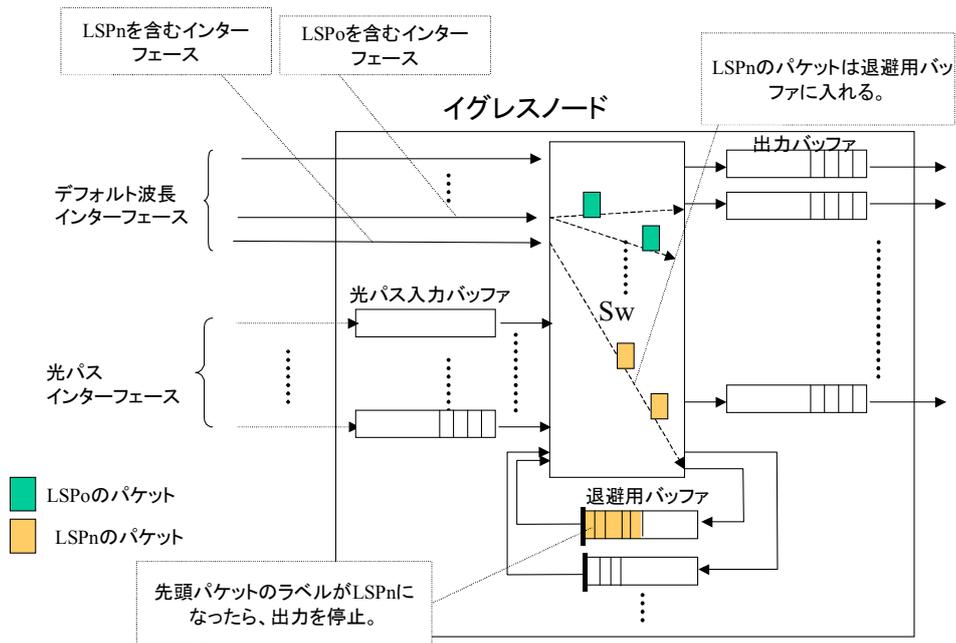
図 4-1-2.5 光パス解放時の処理

退避用バッファの数は光トランシーバの数だけ準備する。退避用バッファは、インタフェースとは前もって関連付けず、その時点で空いているものを使用する。退避用バッファは現状では光パス設定時から使用を始めるため、退避用バッファが空になるタイミングがなく、光トランシーバに未使用が少なくなり、新たな光パス設定時に必要な退避用バッファが確保できない場合がある。そのような場合は、最も古くから使用されている退避用バッファを強制的に空ける。

手順を図 4-1-2.6に、その説明を図 4-1-2.7に示す。以下、空ける退避用バッファで、それまで使用していた PSC-LSP を LSPo、新しく使用する PSC-LSP を LSPn と記述する。



(a) 適用する LSP の変更 (退避用バッファ強制解放手順(1)、(2))



(a) 変更完了 (退避用バッファ強制解放手順(3))

図 4-1-2.6 退避用バッファ強制解放手順

○退避用バッファ強制解放手順

- (1) LSPoの packetsの退避用バッファへの一時避難を停止し、新たに入力されたLSPoの packetsは通常の処理に戻す。
- (2) LSPnの packetsの退避用バッファへの一時避難を開始する。
- (3) 退避用バッファの先頭の packetsのLSPラベルを監視し、先頭 packetsのラベルがLSPnに対応するラベルになったら退避用バッファからの出力を停止する。

図 4-1-2.7 退避用バッファ強制解放手順

強制解放は、packet順序逆転が発生するため、あまり望ましいとはいえない。この点に関しては、解放時は元々順序逆転がおきにくいということを考慮した改良が可能である。解放のシグナリングを

- (1) イングレスからイグレスに解放要求packetを送出
- (2) イングレスで光パスに終了メッセージpacketを送出
- (3) イグレスで解放要求packetを終了メッセージpacketの前に受け取ったら退避用バッファを使用しての一時避難を開始。終了メッセージpacketを先に受け取ったら何もしない。
- (4) イグレスからイグレスに向かって光パスを解放

という手順にかえることによって、退避用バッファの使用率を大きく下げることができ、結果として強制解放を起こしにくくすることが可能である。この際、確率は非常に低い強制解放が必要となる可能性がゼロではない。また、このような変更によって、退避用バッファの数を光トランシーバ数より減らすことが可能である。

4-1-3 ネットワークアーキテクチャと波長競合

本章では、前提となっているネットワークアーキテクチャと、本報告で問題としている波長競合について簡潔に説明する。

4-1-3-1 ネットワークアーキテクチャ

図 4-1-3.1に、全光ネットワークの概念図を示す。

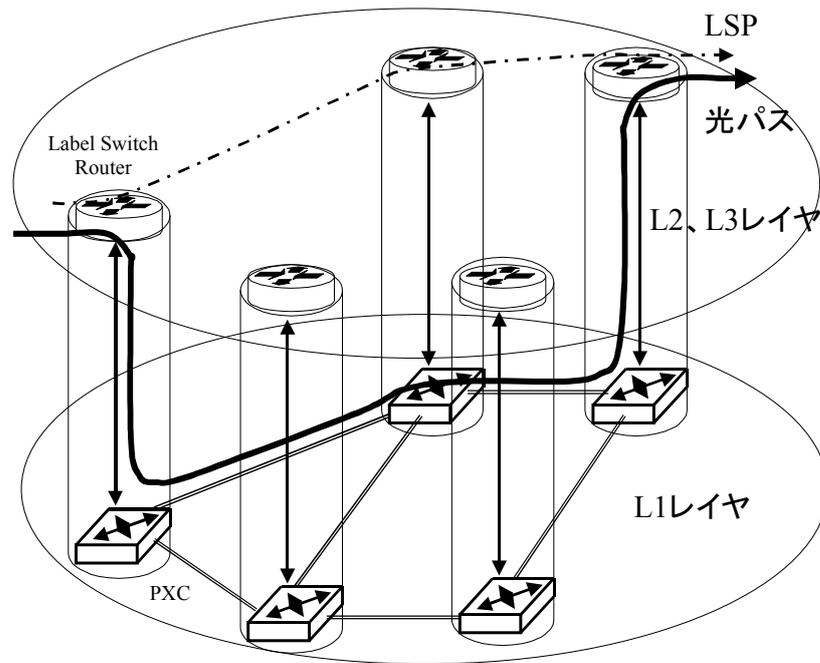


図 4-1-3.1 全光ネットワークの概念図

ノードは、光信号の分岐挿入と通過する光信号を切り替える PXC (Photonic Cross-Connect) 部と、LSR (Label Switch Router) 部で構成される。本ネットワークは、デフォルト波長によりラベルスイッチルータ間をホップバイホップで接続した MPLS (Multi-Protocol Label Switch) ネットワークを基本とする。各ノードはデフォルト波長以外のダイナミックな光パスを張るために限定された数の光トランシーバを持っている。フルメッシュの光パスを同時に張れるだけの数を持たないため、光パスは時間で解放し、光トランシーバを時間でシェアする形態である。

本ネットワークでは図 4-1-3. 2に従うフローにしたがって、IP パケット転送する。LSR 間のホップバイホップの通信により OSPF (Open Shortest Path First) を動作させ、LSR 内にフォワーディングテーブルを作成する。フォワーディングテーブルを元にして、フルメッシュの LSP (Label Switched Path) を設定する。通常は、この論理フルメッシュパスを用いて LSR 間の通信を行う。各 LSR は、PSC-LSP (以降 LSP はすべて PSC-LSP とする) 単位に準備したバッファメモリを監視し、既定値を超えた時に、LSP のイングレスに向けて光パス設定要求を行う。光パス設定要求を受けたイングレスノードは、自ノードの光トランシーバに空があることを確認した後、LSP の下流に向けて使用可能な波長の候補を含む波長要求を出す。中間ノードは隣接ノード間の光波長多重リンクの波長使用状況を見て、使用中波長を波長候補から除いて、波長要求を下流に中継する。イングレスノードは波長要求が到着したら自ノードの光トランシーバの空を確認した後、波長要求に含まれる波長候補から 1 つを選び、下流から上流に向けて光波長配布通知を送出する。中間ノードでは、波長配布を受けて、PXC を設定する。その結果、LSP に沿うように光パスが設定される。

イングレスノードに波長配布が到着したら、デフォルト波長上の LSP を流れていたトラフィックを、光パスに移す。一定時間が経過するか、あるいは、光パス中のトラフィックが小さくなった時点で、光パスを解放する。

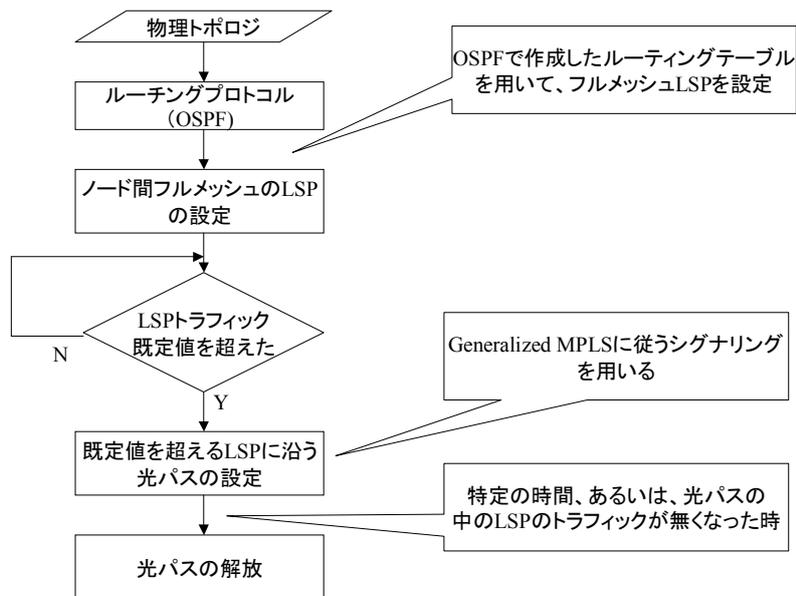


図 4-1-3.2 IP パケット転送フロー

提案したネットワークのノードは、最大 8 個の波長可変光パス用トランシーバを有する。光トランシーバの設定波長と光スイッチとにより、接続先ノードを選択できる。ノードを通過する光信号に関しては、インタフェースだけを光スイッチで切り替える、中間ノードでの波長変換は行わない。

4-1-3-2 波長競合

上述のような波長予約シーケンスを用いた場合、以下のような状況で波長競合が発生する。図 4-1-3.3 に示す 6 ノードの直線状のネットワークを仮定する。ノード 1 が、ノード 6 をイグレスノードとする波長要求 A をその下流ノードに流していくとする。縦軸は時間である。ノード 2 が波長要求 A に自ノードの空波長状況を付加してそれをノード 3 に送出した後に、新たな波長要求 B がノード 2 において発生したとする。波長要求 B はノード 4 をイグレスノードとし、ノード 2 からノード 3 を経由してノード 4 に送られる。ノード 4 は到着した波長要求 B に含まれる波長候補から 1 つを選択してそれを含めた波長配布 B を作成して上流に返す。これはノード 3 を経由してノード 2 に到着する。一方、波長要求 A がノード 6 に到着するとノード 6 は同様に波長要求 A に含まれる波長候補から 1 つを選択して波長配布 A を作成し、上流に返す。波長配布 A がノード 3、2 に到着する前に波長配布 B はノード 3、2 を通過し、いずれかの波長を波長要求 B のために使用させるように波長の使用状況を変更させている。波長要求 A は波長要求 B の前にノード 2、3 を通過しているため、波長要求 A のパッケージには波長要求 B のもたらす影響を反映されることが出来ない。従ってもし、ノード 6 が波長要求 A に対して、波長配布 B で指定された波長と同じ波長を選択して返すと、ノード 3 に到着した時に波長配布 A に記載された波長は既に波長配布 B の光パスによって使用されており、波長配布 A のために使用することは出来ない状態になっている。このような状況を波長競合と呼んでいる。

昨年度まで OPNET®上に構築したネットワークシミュレータでは、波長要求が通過していく段階で他の波長要求をしばらく受け付けないようタイマを設定していた。これは、波長要求の成功率を著しく下げる。それぞれの波長要求のイグレスノードが異なる波長を選べば解決する問題である。そこで、イグレスノードに異なる波長を選ばせるような方法をいくつか考案し、検証するものとした。

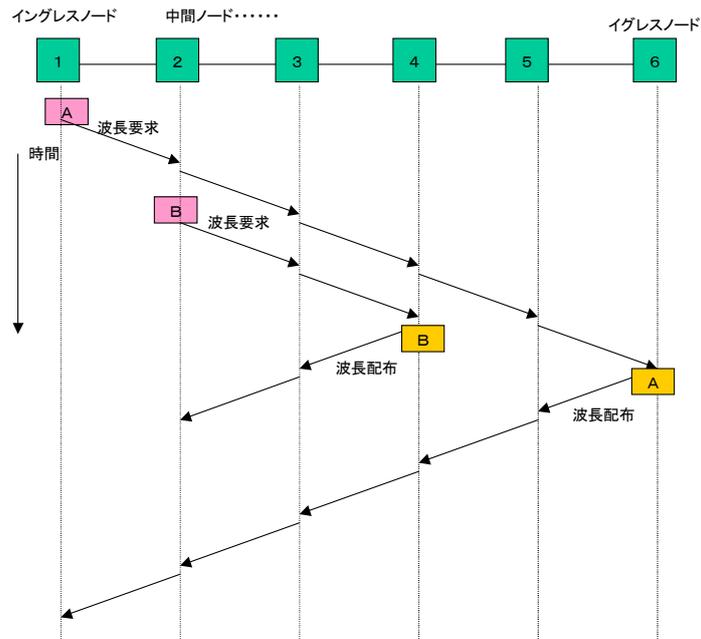


図 4-1-3.3 波長競合発生

4-1-3-3 シミュレータ

前章で述べたネットワークアーキテクチャのうち、光パス設定のシグナリングの部分のみを抜き出してシミュレータを実装した。

ネットワークトポロジー、すなわちノード間の接続のコストを予め与え、これに基づいてダイクストラのアルゴリズムを用いてノード間フルメッシュの最短経路を算出し、これをネットワーク内の LSP の経路とした。

シミュレータ内の時間は、波長要求や波長配布などのパッケージが 1 つのノードで処理されて、次のノードに渡されるまでを 1 ステップとする離散的な時間経過とした。本シミュレータでは波長要求が発生してから波長配布が行われ、場合によっては波長競合、光トランシーバブル等々のエラーとなって、全ての役目を終えるまでを一貫した 1 つの「パッケージ」とみなし、パッケージ単位で管理をするものとした。各ノードは各ステップにおいて自ノードに到着している全てのパッケージについて処理を行い、次ノードに渡す。そのノードで全ての役目を終えたパッケージについては結果を出力ファイルに記録して廃棄する。本シミュレータでは、パッケージをその発生順にシリアル番号で管理しているが、そのステップで 1 つのノードに到着している複数のパッケージがシリアル番号順に処理されると、エラー処理>波長配布>波長要求というように優先的に処理されてしまう可能性があるため、複数のパッケージの処理を開始する前に処理順序をシャッフルしてランダムな順序で処理するようにした。

なお、設定された光パスは後述する光パス寿命に対応するステップ数で消滅する。波長配布パッケージ処理時に各ノードで光パス寿命に相当するカウントダウンタイマを起動し、これが 0 になったらその光パスに関する設定を削除するものとした。特に光パス解放のためのシグナリングは行わないものとした。

光パスは単方向パスとし、各ノード間のリンクは双方向独立にあるものとした。新規のパッケージのイングレス・イグレスは乱数で決定した。新規パッケージ発生の際、同一の PSC-LSP についてシグナリング中のパッケージが存在する場合、PSC-LSP を選択しなおした。しかし、同一の PSC-LSP に対して既に張られている光パスがあっても、シグナリングを開始した。

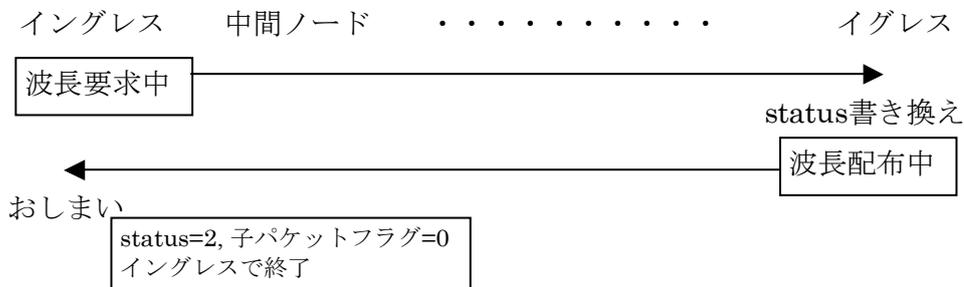
これは、トラフィックの増加があれば必要に応じて同一 PSC-LSP に複数の光パスを設定できるというネットワークアーキテクチャに沿ったものである。

本シミュレータで取られ得るパケットの処理のされ方の一覧を図 4-1-3.4に示す。図中の status はそのパケットが波長要求や波長配布かなど、何の処理を受けているかを示している。

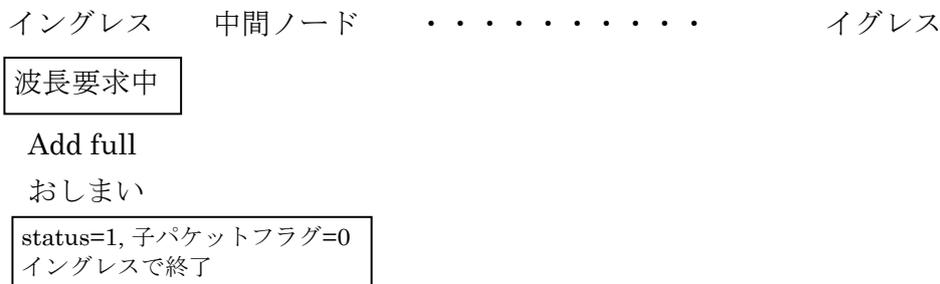
パケットはそれが処理された状況に応じて図 4-1-3.4 (a)～(e)の5つの結果に分類でき、パケット毎の結果が出力ファイルに記録される。これまでに述べた波長配布成功、波長競合の他に、イングレスの光パス用光トランシーバが不足して光パスを張ることが出来ない (Add full)、イグレスの光パス用光トランシーバが不足して光パスを張ることが出来ない (Drop full)、波長要求を送る途中で波長候補がなくなってしまう (Wave full) がある。波長配布成功以外は全て失敗であり、エラーとなる。

シミュレータとしては、波長競合対策を含めない骨子の部分を作成し、これをベースとして何種類かの対策を付け加えたプログラムを個別に作成した。

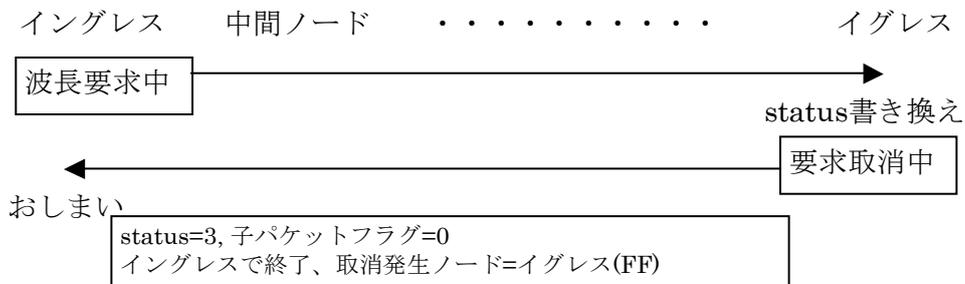
(a)波長配布成功



(b)Add full

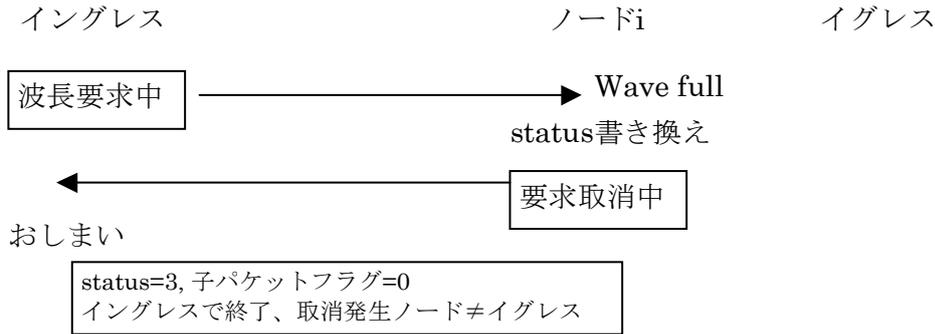


(c)Drop full

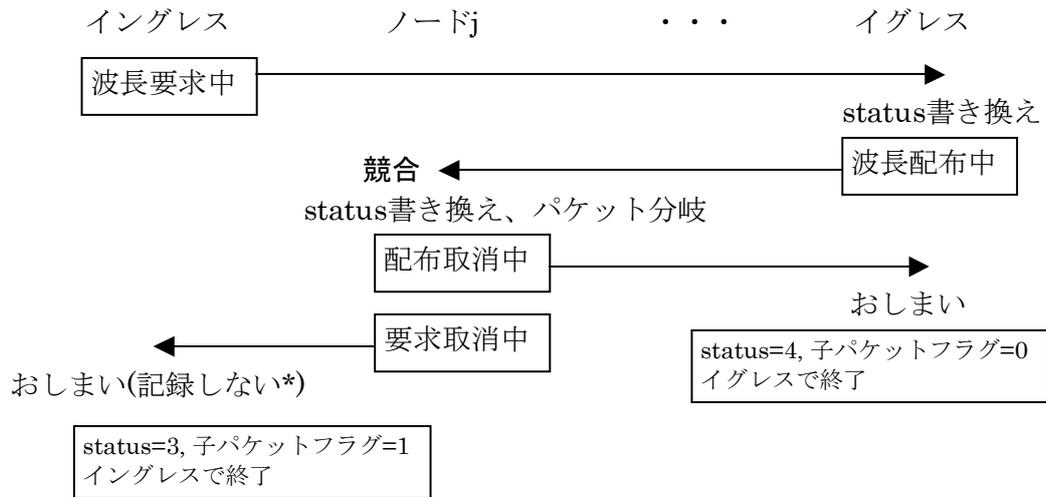


パケット処理一覧

(d) 要求中に Wave full



(e) 予約途中で波長競合



*子パケットフラグ=1の場合はパケット削除時の結果吐き出しは行わない

図 4-1-3.4 パケット処理一覧(続き)

4-1-3-4 波長競合対策

本章では、シミュレーションで比較した波長競合対策方式について説明する。大きく分けて3種類の方式を比較した。波長競合対策無しも含めて4種類を比較した。

4-1-3-4-1 波長競合軽減方式

波長競合を軽減する方式をいくつか検討した。

- 履歴方式・・・波長要求が中間ノードに到着した時点で波長を確保しておく方式。新しい波長要求が届いたら、それ以前の波長要求の数(仕掛け数)だけ空波長を番号の若い方から削って送る。上流ノードで既に空波長を削っている可能性があるため、波長要求に何個分の空波長を削っているかを示す数(履歴数)を記入して渡す。各ノードは光リンク毎に履歴数を保有し、自ノードの履歴数が波長要求の履歴数より大きければ、その差分だけ新たに波長要求内の空波長を削り、波長要求内の履歴数を自ノードの履歴数に置き換える。自ノードの履歴数が小さければ、自ノードの履歴数を波長要求の履歴数に置き換える。新たな波長要求の到着によってインクリメントする。波長配布が来たら、自身の履歴数を本当に残っている予約仕掛け数にリセットする

- ランダム方式・・・イグレスが波長要求に記載された空波長から、ランダムに波長を選択する。
- 折衷方式・・・履歴方式とランダム方式を折衷した。履歴方式では、波長要求の空波長を削って送るため、実際には空波長があるのに空波長無しになることがある。削られた波長が必ず使用される訳ではないことを考慮し、折衷方式では履歴数は送るが波長要求内の空波長は削らない。イグレスは空波長の内、番号の若い方から履歴数の数だけ嵩上げた波長を選択する。嵩上げて最大波長番号を越えてしまう場合は、空波長からランダムに選択する。

4-1-3-4-2 シミュレーション条件

シミュレーションの主なパラメータは表 4-1-3.1 のようである。

表 4-1-3.1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	数値	説明
最大同時発生数	1~4	1 ステップで発生する新規パケットの最大数
波長数	4, 32	ノード間接続リンクの波長数
A/D 数	8	ノードの光パス用トランシーバ数
光パス寿命	10, 3 0	光パスが張られてから消滅するまでのステップ数

光パス寿命が増加すると、光パスによる波長や光トランシーバの占有時間が長くなるため、波長や光トランシーバの使用率が増加する。その結果、波長の使用状況が虫食いになりやすい。

最大同時発生数が増加すると、同一時刻にシグナリング中のパケット数が増加するため波長競合が発生しやすくなる。また、光パスが設定される 1 ステップあたりの平均数が増加するため、波長や光トランシーバの使用率が増加する。なお、1 ステップで新規に発生するパケット数は 0~最大発生数の間のランダムな数である。

本ネットワークの重要なコンセプトが有限数の光トランシーバであるため、A/D 数は有限とし、他のシミュレーションで用いた値を流用して 8 とした。

トポロジーは図 4-1-3.5 のようなメッシュとした。円内の数字はノード番号である。ダイクストラのアルゴリズムで LSP ルートを決定したが、その際、リンクコストは全て同一とした。

各々の条件において 1 万個の結果が記録されるまで計算を行った。

4-1-3-4-3 シミュレーション結果

3 方式に競合対策無し加えた計 4 方式を比較した。競合対策無しでは、パケット処理を特に工夫無く行い、イグレスは空波長の内、最も番号の若い波長を選択した。

図 4-1-3.6 (a) は最大同時発生数に対する光パス設定要求の成功率のグラフである。波長数 32 で、光パス寿命 10 (実線、網掛け) と 30 (破線、白抜き) の結果を示している。光パス寿命、最大発生数によらずランダム方式が良い結果を示している。

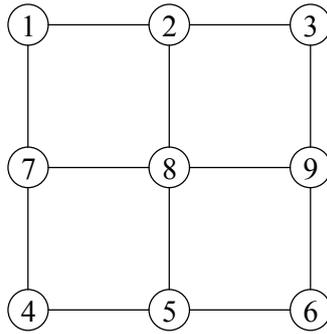


図 4-1-3.5 シミュレーションしたネットワークトポロジー

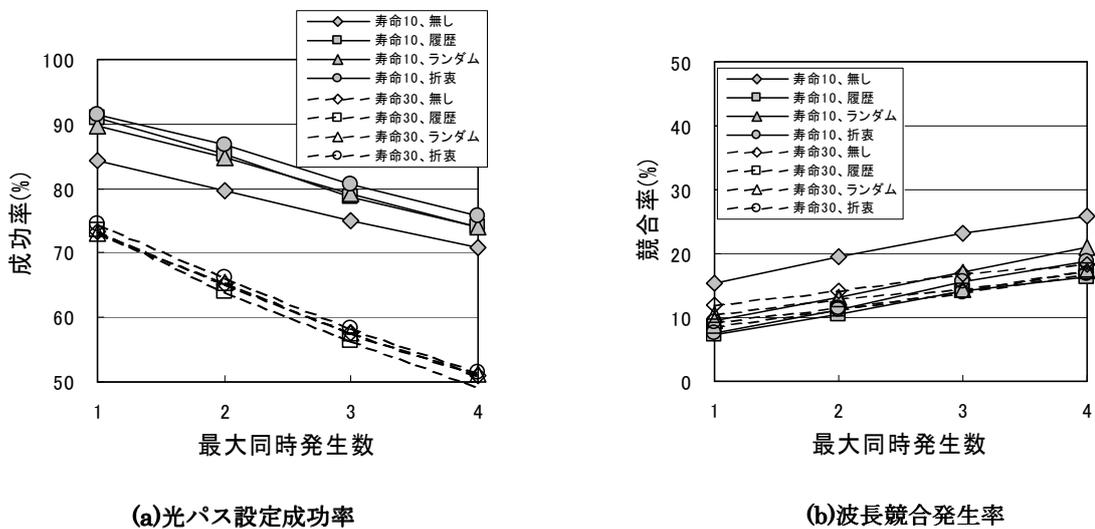
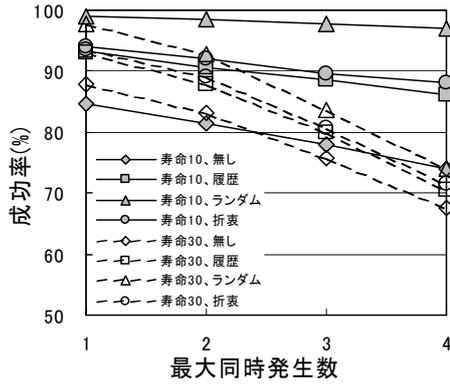


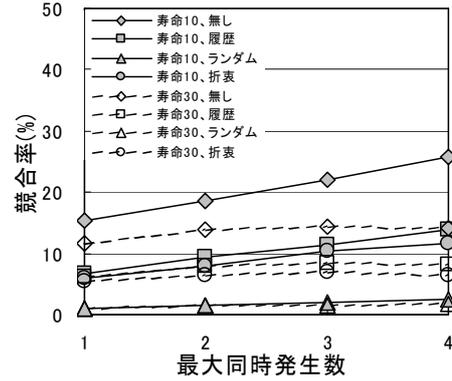
図 4-1-3.6 シミュレーション結果 (波長 32)

これは、波長数 32 はネットワークの規模に対して十分に大きく、ランダムに波長を選択することで波長競合発生率が著しく小さくなったためである。図 4-1-3.6 (b) に波長競合発生率を示す。光パス寿命 10 では、成功率と競合率の合計がほぼ 100% となり、失敗の原因がほぼ波長競合であることが判る。

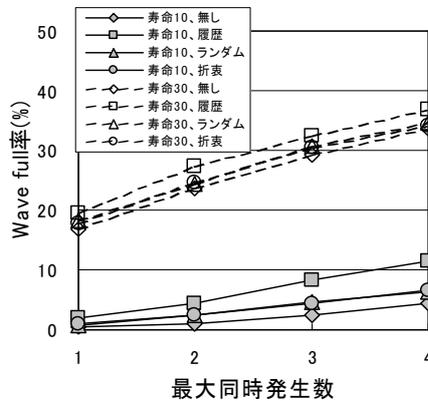
他の方式については、競合対策無しが最も悪く、履歴方式と折衷方式は同程度であったが、折衷方式の方が若干良かった。図 4-1-3.6 の条件では Wave full は全く発生しなかったため、履歴方式と折衷方式の差は、Wave full に対する方式の差ではなく、波長競合数の差である。履歴方式では、中間ノードで削ったつもの空波長が後続ノードで設定済みの光パスによって使用されていることがあり、波長を予約するという動作にならない場合がある。これが一定の割合で発生して効果が落ち、競合対策無しの方に曲線が近づいたものと推測される。折衷方式はイグレスで嵩上げするため、このようなことがない。ただし、イグレスでの嵩上げでは予約のために空けた波長が選択されるとは限らず、その分効果が落ちる懸念もあった。しかし結果としては、予約した分が後続ノードで無効になるマイナスの方が大きかったものと推測される。



(a)光パス設定成功率



(b)他の要因を除いた波長競合発生率



(c)Wave full 発生率

図 4-1-3.7 シミュレーション結果 (波長数 4)

光パス寿命 30 でも 10 の場合と同様の結果が得られているが、成功率と競合率を合計しても 100%にならない。100%に不足する分は Add full および Drop full である。成功率が高い方式は光トランシーバの使用率が高く、波長競合が発生する段階に達する前に Add/Drop full によって失敗している。光パス寿命 30 と 10 の下落率の差は主に Add/Drop full の発生の有無の差である。

成功率では大体光パス寿命 10 の方が 30 よりも成功率が高いのに対して、競合率では 10 の方が 30 よりも高い。Add /Drop full の影響を除いてもやはり、30 の方が競合率が低い。これは、光パス寿命が長くなることによって、波長の使用状況が虫食いになり、結果として選択波長がランダム化されて競合がおきにくくなったためと推測される。

光パス寿命 10 に対して 30 の方が方式間の差が小さく、競合対策無しでは最大同時発生数 1, 2 において 10 が 30 より成功率が高いことも同様の原因である。光パス寿命 30 では選択波長がランダム化され、波長競合対策無しにおいても、あたかも若干の波長競合対策を採ったかのような効果が得られたためと推測される。

また、光パス寿命 30 では最大同時発生数の増加に伴って方式間格差が縮まっている。光パス寿命 30 のカーブの下落原因が主に Add/Drop full であって Add/Drop full は成功率が高くなるほど出やすいことによる。

次に、波長数 4 の場合の結果を図 4-1-3.7に示す。他の条件は図 4-1-3.6と同様である。波長 4 では波長数が足りないため、Wave full の発生によって図 4-1-3.6より成功率が落ちている。

折衷方式がわずかに他より良い結果を示した。その理由は以下のように説明できる。シミュレーションでは、シグナリングの流れ上、Add full→Wave full→Drop full→競合の順にエラーが発生する。そのため初めの段階のエラーが大量に出ると後のエラーが減っているように見えることがある。そこで、他の要因を除くため、競合数/(競合数+成功数)なる競合率を計算した(図 4-1-3.7 (b))。光パス寿命 10 の競合対策無しを除けば、競合率に大差は無いことがわかる。また、図 4-1-3.7の条件では Add/Drop full はあまり多くなく、成功率は主に Wave full で決定されている。図 4-1-3.7 (c)に Wave full 発生率を示す。光パス寿命 10 では Wave full 率は高々 10%程度であり、波長が常時フル使用されていた訳ではない。そのため競合対策無しは、競合対策をしなかったという本来の理由で成功率が低かったものと推測される。ランダム方式は空波長数、すなわち、波長の選択の自由度に競合率が強く依存する。波長数が少ないため競合率が上がり、成功率が他方式と同程度まで下がったと思われる。履歴方式は中間ノードで空波長を削るため Wave full が出やすい。図 4-1-3.7 (c)では明らかに履歴方式での発生率が多く、これが、履歴方式と折衷方式の差に繋がっている。競合対策無しの Wave full 率が若干低い、これは、競合が発生しやすいために成功率が他より低く、空波長が多かったためと推測される。折衷方式はランダム方式と比較して Wave full 率はほぼ同じだが、競合率が低い。これは、折衷方式内の履歴方式部分のコンセプトが働いて、波長を上手に詰め込んだためと推測される。Wave full 率は主に、波長の使用率と、使用中波長が同じ波長に集中している割合で決定する。Wave full 率が殆ど同じなのに、折衷方式の成功率(波長使用率)が高いということは使用中波長が同じ波長に集中している割合が高いことを意味する。

4-1-3-4-4 波長競合対策のまとめ

以上に示したように、限定された数の光トランシーバを使用する全光ネットワークにおける波長予約シグナリング時の波長競合対策のシミュレーションを行った。

比較した波長競合対策は以下の 4 系統である。

- 波長競合対策無し
- 履歴方式・・・以前に自ノードを通過して行った波長要求のために、以降の波長要求の空波長を番号の若い方から削り、削っている空波長数(履歴数)と一緒に次に送る方式。
- ランダム方式・・・空波長からランダムに選択。改良方式として仕掛けがある場合のみランダムに選択する仕掛けランダム方式も検討。
- 折衷方式・・・履歴数を波長要求に記録するが、空波長は削らずイグレスが履歴数に対応した数だけ、波長番号の若い方からよけて波長を選択する。空波長数が履歴数より小さい場合には空波長からランダムに選択する。改良方式として{履歴数+履歴数*[0, 1]の乱数}分だけよける折衷 dither 方式も検討。

これらを、波長要求発生頻度、波長数、光パス寿命、光トランシーバ数、トポロジー等をパラメータとしてシミュレーションした結果、以下のことが判明した。

- ・ 波長競合対策無しが最も成績が悪かった。
- ・ 波長数に十分余裕があるときはランダム方式系が有利である。これは、どの方式でも競合を完全に無くすことが出来ないため、波長数に依存して波長要求性効率が上がるランダム方式が、波長数が大きい場合は有利となることを意味する。
- ・ 波長数が不足気味の場合は折衷方式系が有利である。波長数に余裕がないとランダム系は成績が著しく下がり、また、空波長を中間ノードで削る履歴方式は波長フル

によって成績が下がった結果、折衷方式が優位となった。

- 波長要求発生頻度は、そのまま競合の発生しやすさに直結する。
- 光トランシーバ数によって成功率に影響は出るが、方式間の優位性にはほとんど影響しなかった。
- 光パス寿命が長くなると使用中波長が虫食い状態になり、波長競合対策無しでも自然に選択波長がランダム化されるため方式間格差が小さくなった。
- トポロジーとしては、PSC-LSP が集中するボトルネックリンクがあると競合発生率が著しく増加する。リンク数が多く、PSC-LSP ルートが分散している方が競合は発生しにくい。トポロジーは方式間優位性には直接影響しなかった。

OPNET®で実装しているネットワークは波長数が 70 と非常に大きい。メトロネットワークを想定していることからノード数はあまり多くなく、70 波長は殆どの場合において十分に余裕のある数字と言える。従って、波長競合対策としてはランダム系の方式が適当である。

4-1-4 リンク障害対策の検討

提案するネットワークアーキテクチャは、低コストな全光ネットワークを実現するという目標を掲げ、トラフィック変動に応じてダイナミックに、中間ノードで波長変換を行わない光カットスルーパスを設定し伝送リソース(波長)を効率的に活用する事で、これを実現しようとしている。これまで、当該アーキテクチャにおける、

- トラフィック変動に応じたダイナミックな光カットスルーパス設定の基本動作、
- ラベルスタックを用いた光カットスルーパス設定/解放時のパケット追い越し対策、
- トラフィック量平均値に対する閾値による光カットスルーパス解放判定の追加、
- 光カットスルーパス設定エラー時の(異常)処理シーケンスの追加、
- 光カットスルーパス設定エラー発生を軽減する対策の提案

をネットワークシミュレーションを用いて評価し、目標を達成する見通しを立てて来た。また、ネットワークシミュレーション環境自体に対し、

- 測定項目及びエラー状態表示の追加、
- ノードの追加/削除(トポロジー変更)への新規対応(ネットワーク再構築機構の追加)を行ってきた。

今回は、伝送障害に対するトラフィックのプロテクション手法確立のために、当該アーキテクチャにおいて、ネットワーク上に発生するリンク障害を対象としたプロテクション機能の追加を行った。

プロテクションの方策については、下記の選択を行い設計方針とした。

- プロテクション種別
Local Repair (障害リンクの両端を始点・終点としたトラフィックの迂回)を採用する。Global Repair は、障害箇所ではなく、トラフィックが通るパスの始点・終点間で迂回を行うため、耐障害性ではより有利となる。しかし、迂回するトラフィックの本数分の光トランシーバを用意しなければならず、採用しなかった。
- プロテクション対象とする障害の範囲
手法の基本となる単一リンク障害に対応するプロテクションを実施する。この為、全光ネットワーク上の 1 波長をプロテクション専用のリソースとして割り当てのみとなった。今後、ノード障害対応のための機能拡張は、今後の課題となる。
- プロテクションを行う手順

予めネットワーク構築時に各リンクに対応する予備ルートを自動で検索し予約しておく、リンク障害発生時には予約していた予備ルート上の光パスにトラフィックを一斉に切り替える動作のみを行い、トラフィックの切り替え時間を短縮する。

- 予備ルートの波長予約方式

Shared Protection 方式を採用する。本方式は、帯域使用効率が優れている。

- プロテクション動作以後のトラフィックの扱い

障害リンクから迂回したトラフィックを、そのまま予備ルート上の光パスで伝送している間に、障害リンクを「リンクなし」と見なした新たなネットワークトポロジーでのネットワーク再構築(PSC-LSP の再設定)と、当該トラフィックの光パスから再設定 PSC-LSP への移動を make-before-break で行い、ネットワークの通常運用状態に戻る。この為、ネットワーク構築と矛盾なく動作させることが出来る。

- プロテクション動作以前に割り当てられていた光カットスルーパスの扱い

プロテクションによる迂回を行った直後、光カットスルーパスを解放しトラフィックを PSC-LSP に戻す。障害リンクを通る PSC-LSP は既にプロテクションされているので、トラフィックはそのまま予備ルート上の光パスで伝送される。トラフィック変動に応じたダイナミックな光カットスルーパスの設定と、プロテクション動作のための光パスの設定との間に、矛盾・競合を発生させない。

4-1-5 光ネットワークアーキテクチャのまとめ

平成 16 年度において、重点的に開発を進めたのが、障害からのリカバリーである。MPLS の Fast Reroute をモディファイした Shared link protection 方式の高速障害復旧プロトコルを提案した。提案の方式は、Shared path protection の Disjoint minimum hop path に比較して、障害通知メッセージを送るノード数が限定されるため、より短時間の障害復旧が可能である。また、障害リンクを代替するバイパス光パスには 1 波長を前もって割り振れば良いので、リソース使用効率も低くない。

シミュレータへの提案プロトコルを実装し、シミュレーションにより、障害復旧の有効性を確認することが出来た。SONET/SDH 伝送のセクションプロテクションによる障害復旧時間である 50msec と同程度の障害復旧時間となるメドを得た。

4-2 高効率光変復調の研究開発

4-2-1 研究開発の概要

第2章 2-1 節「研究開発課題の概要」にて提案しているノードの概略構成（図 2.2）では、高密度波長多重信号から所望チャンネル信号を抽出・挿入する光 ADM 部が要である。

そこで、分散耐力に優れ、占有光帯域が比較的コンパクトな反転 RZ 変調方式に注目し、光周波数利用効率が 0.8bit/s/Hz （ビットレート 40Gbit/s 、波長多重間隔 50GHz ）の波長多重信号から所望チャンネル信号のみをトランスペアレントに抽出・挿入するための光 ADM 部における光フィルタ要素の構成方法を検討する。具体的には、光 ADM 部の構成と通過帯域の関係をシミュレーションにより調査し、多段光フィルタリング効果の少ない構成方法を明確にする。

また、既提案のノード概略構成では、光波長を高速・ダイナミックに可変可能な光トランシーバにより新規信号を挿入する機能を設けている。そこで、中点保持型水晶エタロンによる波長ロッカーを用い、光キャリア周波数が ITU グリッド周波数上で連続切り替えされている光源を周波数利用効率 1.07bit/s/Hz の波長多重光送信部に導入し、送信信号のチャンネル切り替え実験を行って各チャンネル信号の受信信号品質を評価する。

これらの検討を行い、光 ADM 部の構成と光フィルタ要素の光透過帯域配分を求めるとともに、反転 RZ 光信号が本研究で提案している光 ADM ノードに適用可能であることを示す。

4-2-2 光周波数利用効率 0.8bit/s/Hz における光 ADM 部の光フィルタ構成の検討

光信号の抽出・挿入・通過を行う光 ADM 部には、次の 3 点が要請される。

1. 抽出チャンネル信号の隣接チャンネル信号とのクロストークが少ないこと
2. 挿入・抽出信号間のコヒーレントクロストークが十分抑圧されていること
3. 通過チャンネル信号への帯域抑圧が少ないこと

これら 3 点を満足する光 ADM 部を実現するべく、光分波器、光合波器、光フィルタ、光カップラ等の光デバイスによる光 ADM 部の構成方法を提案し、光 ADM 部における抽出 (Drop) 信号、挿入 (Add) 信号、通過 (Through) 信号の光波形シミュレーションを通じて、光 ADM 部の複数の光フィルタ要素に関する光透過帯域の配分を最適化した。また、複数の光 ADM 部を通過したことによる光信号への帯域狭窄の影響に関しても波形シミュレーションにより把握した。これらの結果から得た知見を元に構成した光 ADM 部を波長多重伝送系に組み入れて伝送実験を行い、受信信号品質を評価することによって光 ADM 部の機能を確認した。

4-2-3 連続波長切り替え SG-DBR レーザによる 1.07bit/s/Hz 波長多重信号のチャンネル切替実験

複数の反転 RZ 光信号は偏光多重を利用せずに波長多重を行っても周波数利用効率 1.0bit/s/Hz 以上が可能である [13]。また、中点保持型水晶エタロンを波長ロッカーとして用いると、半導体レーザの発振周波数波長を高速に切換られ、切換後の発振周波数は高安定であり、 $200\mu\text{s}$ にておよそ 4THz の光周波数を切換可能であることを確認している [14]。光周波数利用効率が 1.0bit/s/Hz 以上であるような波長多重密度が非常に稠密な場合、反転 RZ 信号のような帯域抑圧に強い耐力を有する光変調信号を用いても、光源には数 GHz オーダの厳しい光周波数の設定精度が要求される。そこで本節では、開発中の波長可変光源を周波数利用効率 1.07bit/s/Hz の波長多重伝送系に導入し、受信信号の誤り率特性の評価

により波長可変光源のチャンネル切換動作の正確性、高速性を実証する。

中点保持型水晶エタロンによる波長検出機構を SG-DBR レーザに適用して発振波長の安定化を施す。以降の検討・実験においては、SG-DBR レーザの前方・後方 DBR ミラーへの注入電流をチャンネル切り替え時のパラメータとして用い、連続矩形パルス信号により波長チャンネル切り替えを連続で行う。なお、水晶エタロンによる波長検出系からの制御信号を SG-DBR レーザの位相調整領域に加えることにより、光周波数制御は継続で行う。SG-DBR レーザの前・後方の DBR ミラーの注入電流変調のみにより波長を切り替え、37.5GHz の ITU グリッドに整合した光周波数チャンネルを選定した。具体的には、193.15THz と 193.45THz のチャンネルに連続切り替えを行うこととした。

図 4-2-1 は SG-DBR レーザへのチャンネル切り替え信号と SG-DBR レーザ出力の光波長をマッハツェンダ干渉計によりモニタした信号を示したものである。波長切り替え時のレーザ波長のモニタ信号を拡大してみると、チャンネル切り替えの立ち上がり、立下り時に大きな周波数モードジャンプが観測された。このようなモードジャンプは、波長多重時に他チャンネルへのクロストークとなって影響を及ぼしうる。チャンネル切り替え後に波長が安定するまでの時間は、およそ 100~200 μ s 程度であることが伺える。

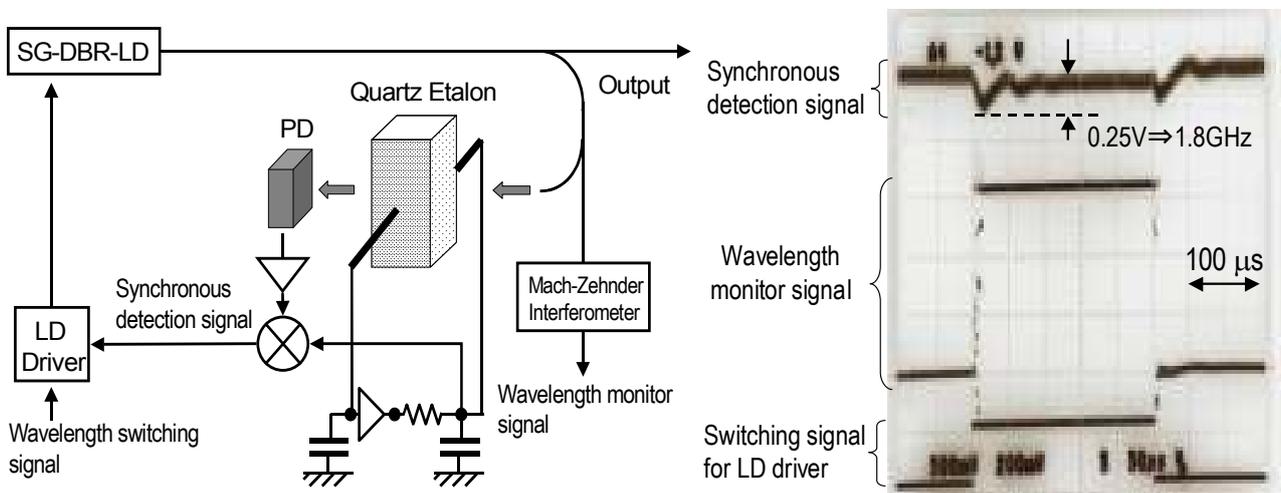


図 4-2-1 中点保持型水晶エタロンによる波長検出を用いた波長可変光源の構成 (左側) と連続波長切り替え時の同期検波出力、FSR900GHz のマッハツェンダ干渉計による波長モニタ出力、LD ドライバ回路に印加するチャンネル切り替え信号の観測結果 (右側)。同期検波の波長ずれ検出係数は 0.14V/GHz。

SG-DBR レーザによる波長可変光源を波長多重光源内に導入 (図 4-2-2) し、SG-DBR レーザによる波長チャンネル切り替え時の伝送特性の変化を調べ、波長切り替え動作の高速性・安定性を確認する。既述のとおり、SG-DBR レーザの波長切り替え時にはモードジャンプにより光周波数が不安定に変化する。この影響を評価するため、SG-DBR レーザ出力を A0 光スイッチに接続し、光周波数不安定時に A0 光スイッチを OFF となるように光スイッチを駆動させる。波長切り替え信号、SG-DBR レーザの光周波数、A0 スwitchへのゲート信号、A0 スwitch出力の関係を図 4-2-3 に示す。ゲート信号の OFF 時間を変化させ、DWDM 伝送後の各チャンネルの誤り率を評価する。1.07bit/s/Hz の波長多重信号は、75GHz 間隔の偶・奇数チャンネル 40Gbit/s (PN15 段) の反転 RZ 信号を光インターリーバにより 37.5GHz 間隔にて帯域抑圧・合波することにより生成した。伝送距離は 200km であり、総伝送路の残留分散量はおおよそ +86ps/nm である。光受信部では、クロック抽出機能は市販の CDR モジュールを用い、データ信号側は、広帯域増幅器により PD 出力を増幅したものをそのままエラーディテクタに入力した。なお、SG-DBR レーザに割り当てられた 2 つのチャンネル信号 (20 番、28 番) の誤り率評価を行う場合には、エラーディテクタはパルスジェネレー

タと同期したタイミングシンセサイザからのゲート信号により、誤り検出動作を ON/OFF させた。

図 4-2-4 に 32 波長多重信号スペクトル、図 4-2-5 に各チャンネルの Q 値を示す。奇数チャンネルでは、AO スイッチが常時 ON (Δt が 0) であっても、SG-DBR レーザのモードジャンプによるクロストークが光インターリーバの作用により十分抑圧されるため、受信信号品質に影響が出ない。一方、偶数チャンネル側ではクロストーク成分がインターリーバで抑圧されないため、チャンネル切り替え時に生ずるモードジャンプの影響が固定波長チャンネル信号の受信特性に現れた。全チャンネルがエラーフリーとなる AO スイッチの最小 OFF 時間は $12 \mu\text{s}$ であった。 Δt を短くしていくと、Q 値が劣化するチャンネルの数が増加するが、モードジャンプは不規則におこるため、その影響は必ずしも SG-DBR レーザに割り当てられたチャンネルと隣接した固定波長チャンネルに強く現れるものでないことが判った (図 4-2-6)。AO スイッチを常時 ON としても影響が全く出ないチャンネルもあった。

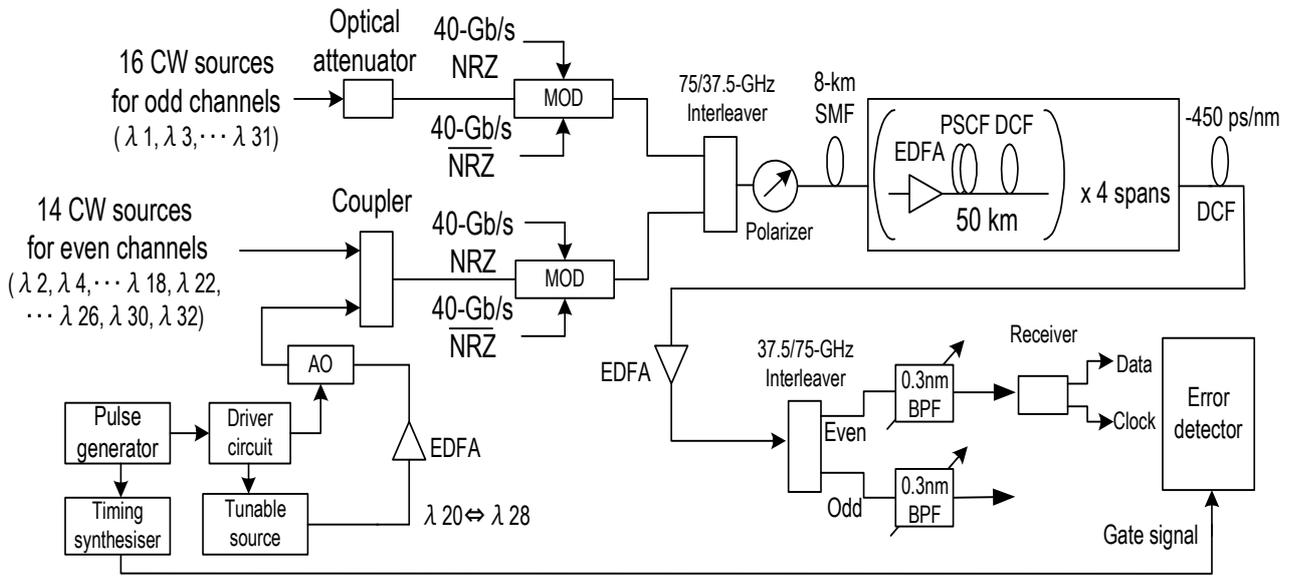


図 4-2-2 波長可変光源を偶数チャンネル側に導入した 1.07bit/s/HzDWDM 実験系

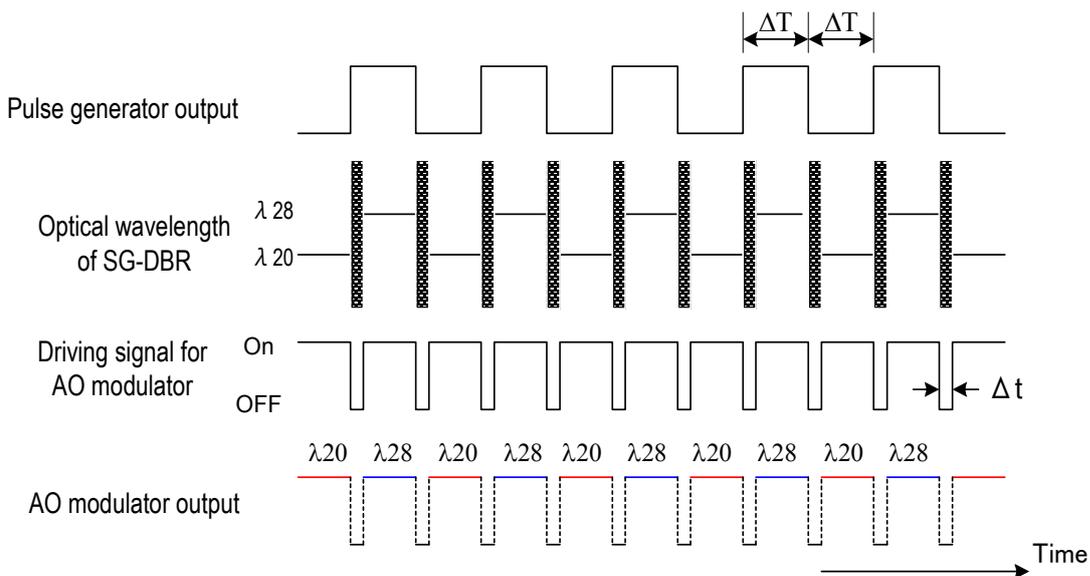


図 4-2-3 パルスジェネレータ出力と AO スイッチ出力の関係

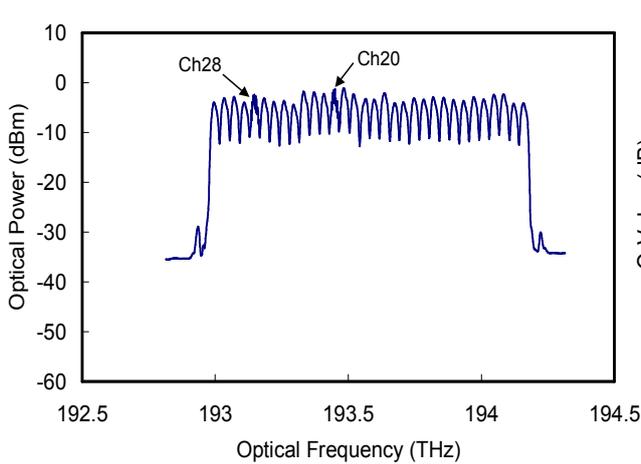


図 4-2-4 波長多重信号スペクトル

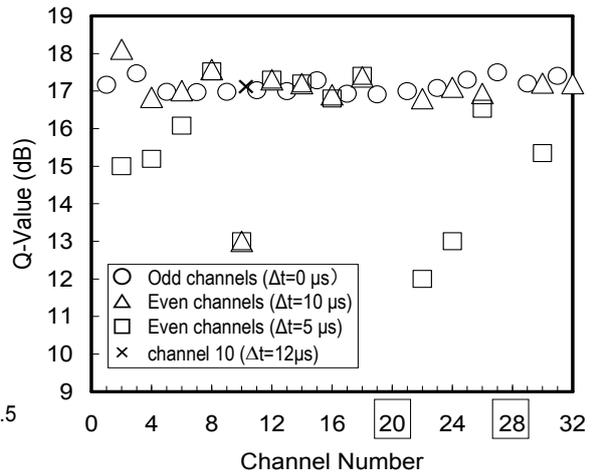


図 4-2-5 各チャンネルの Q 値

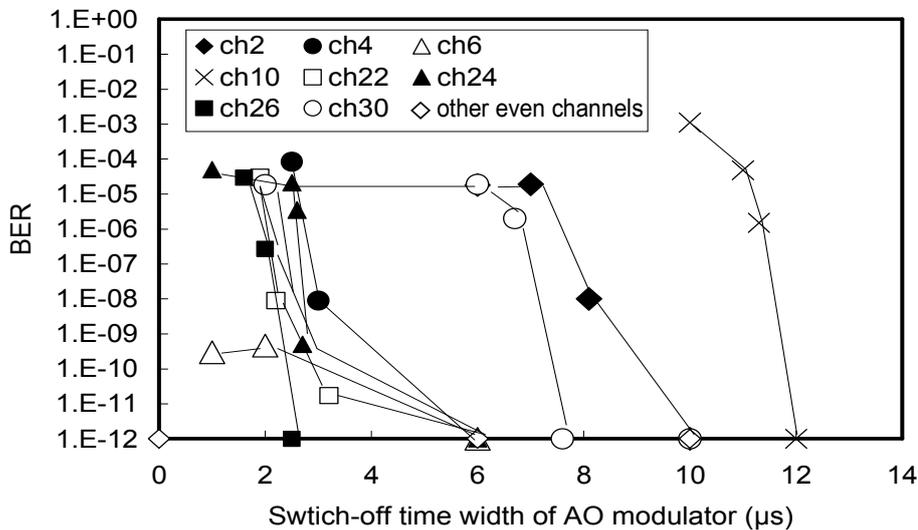


図 4-2-6 AO スイッチの OFF 時間と偶数チャンネルの誤り率の関係

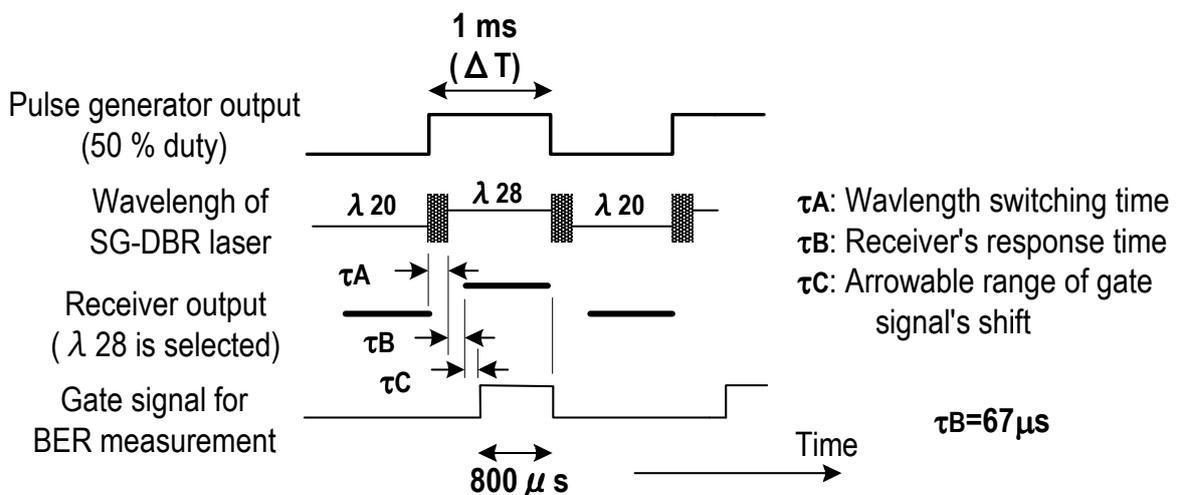


図 4-2-7 パルスジェネレータ信号と SG-DBR レーザの波長と受信器出力とエラーディテクタ制御用のゲート信号の関係。τA、τB、τC は、波長可変光源の正味の波長切換時間、光受信器の受信確立時間、ゲート信号の許容遅延時間幅。

次に、連続光周波数切り替え時の SG-DBR レーザの光周波数制定時間を調べた。図 4-2-7 は波長制定時間 τ_A 、光受信器の受信確立時間 τ_B 、エラーディテクタの ON/OFF 制御のためのゲート信号の許容遅延量 τ_C とパルスジェネレータ信号、SG-DBR レーザの光波長の関係を示している。図 4-2-2 の実験系で A0 スイッチを常時 ON としておく。20 番、28 番のチャンネル信号を選択受信して、タイミングシンセサイザによりゲート信号 (パルス幅 $800 \mu s$) の遅延時間を変えて BER と遅延時間の関係を調べた (図 4-2-8)。この結果、 τ_C は 20 番、28 番のチャンネルで $65 \mu s$ 、 $40 \mu s$ であり、 τ_B が $67 \mu s$ の光受信器を用いたことにより、正味の波長切り替え時間は $68 \mu s$ 、 $93 \mu s$ であった。実験に使用した反転 RZ 光信号の帯域抑圧・波長多重分離用の光インターリーバと反転 RZ 光信号の許容光周波数ずれ範囲はおよそ $5 \sim 6 \text{GHz}$ であるが、波長可変光源の設定波長精度が高く、かつ、高速であることが判明し、 $100 \mu s$ 以下の波長切り替え時間が達成されていることが伝送実験において確認された。

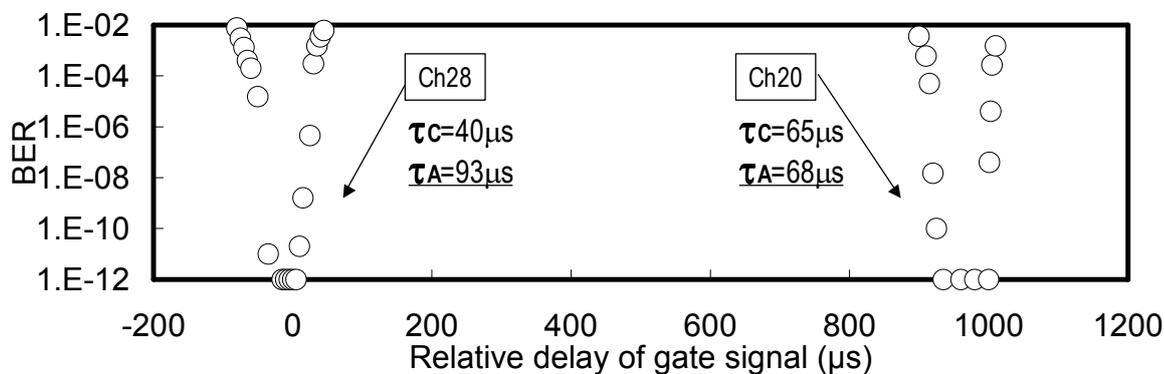


図 4-2-8 ゲート信号の相対遅延時間と誤り率の関係。それぞれのチャンネルにおいて、チャンネル切換時間 (τ_A) が $100 \mu s$ 未満。

4-2-4 高効率光変復調のまとめ

光周波数利用効率 0.8bit/s/Hz の波長多重信号の ADM が適切に行われることを目標に、光 ADM 部の構成方法を検討した。具体的には、光 ADM 部における Drop 信号、Add 信号、Through 信号の光波形シミュレーションを行い、光 ADM 部を構成する光フィルタ要素について透過帯域幅の配分などを見積もった。また、複数の光 ADM 部を通過したことによる光信号への帯域狭窄の影響についても波形シミュレーションにより把握した。また、中点保持型水晶エタロンによる波長検出系を SG-DBR レーザの発振光周波数制御に利用した波長可変光源について、波長切り替え動作の高速性 ($100 \mu s$ 以下)・周波数設定精度 ($2 \sim 3 \text{GHz}$ 以下) を周波数利用効率 1.07bit/s/Hz の超高密度波長多重伝送実験により確認した。波長切り替え時における発振光周波数のモードジャンプにより、瞬時的に他チャンネルへ光クロストークをもたらさうが、SG-DBR レーザの出力光信号を $12 \mu s$ 遮断することにより、クロストークの影響は解消されることが判明した。

今後の課題は、複数の高密度波長多重信号間で所望チャンネル信号を柔軟にクロスコネクトする光ノードの構成を実現することである。本報告の検討結果から得られた光 ADM 部における各光フィルタ要素への帯域配分に関する知見を元に、複数の光合分波器と光スイッチを用いた光ノードを構成し、中点保持型水晶エタロンを波長ロッカーとして高速・高安定な波長切換機能が実現された波長可変光源と反転 RZ 変調による光インターリーバを用いて、光ノードの機能達成を試みる。

4-3 高速・高安定光周波数制御の研究開発

4-3-1 研究の概要

全光ネットワークのノードに配置する波長可変光トランシーバの光源には高速・高安定な光周波数シンセサイザを必要とする。一度設定した光パスを長時間にわたって使用することも想定されるので、目標値の $\pm 0.03\%$ 以内に収める整定時間を1msecで実現することを最終目標とした。すなわち、1msec以内に光周波数を目標値の $\pm 0.03\%$ の範囲に収め、以後、この範囲を超える事がない。また、波長可変幅は30nmであり、Cバンド帯をほとんどカバーする光周波数シンセサイザを実現する。

H15年度までの検討では、光周波数検出系としては中点保持型水晶エタロン[15]、波長可変レーザとしてはSG-DBR-LD (Sampled Grating – Distributed Bragg Reflector-Laser Diode) を用い、マイクロコントローラ(PIC)によるフィードフォワードとアナログ回路によるフィードバック制御のハイブリッド制御が高速・高精度な制御として有望であることが分かった。

今年度は高速・高精度な光周波数検出・制御系において、30nmの波長可変範囲内の50GHzグリッド間での切替えを行うために、ファブリペロ共振器の光透過率のボトムとピーク間の波長切替えを実現し、方式確認を行った。具体的には、ボトムとピークの両方に安定化するために高速な極性切替えを実現した。また、光周波数検出系の波長精度を向上させ、波長切替え動作を開始してから1msec以内に目標値の $\pm 0.03\%$ 、すなわち $\pm 1\text{GHz}$ を達成し、長期的には $\pm 3\text{GHz}$ 以下となる見通しを得た。

4-3-2 SG-DBR-LDの光周波数制御系

ファブリペロ共振器の光透過率のボトムとピーク間の波長切替えを実現するための新しい光周波数制御について述べる。

4-3-2-2 光周波数制御系の構成

光周波数制御系の構成を図4-3-2-4に示す。SG-DBR-LDの出力光の一部は光周波数検出系に入力され、光周波数をアナログの電気信号として出力する。SG-DBR-LD制御部は光周波数のアナログ信号を取り込み、SG-DBR-LDの各電極を制御する。また、光周波数の観測系として、読み取りが低速ではあるが高精度な波長計と高速読み取りが可能なマツハツエー (M-Z) フィルタの両方を用いた。

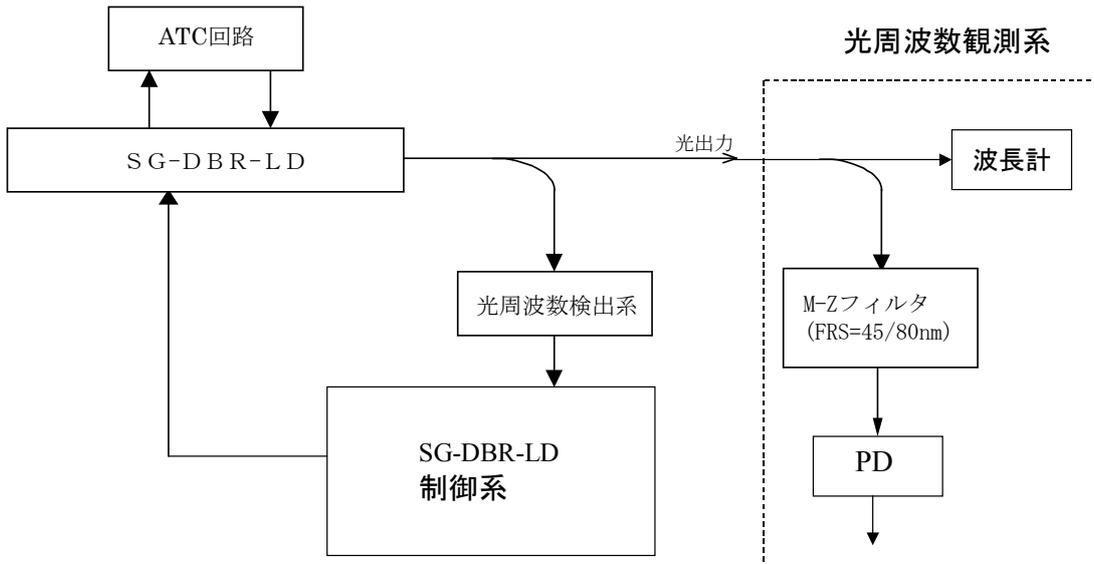


図 4-3-2-4 光周波数の制御系の構成

光周波数検出系は中点保持型の水晶エタロンによって構成した。水晶エタロンを水晶振動子としても使い、ディザ信号周波数はエタロンの機械的共振周波数に自動的に一致する。光周波数モニタの構造を図 4-3-2-5 に示す。図中に書かれている座標軸は水晶の結晶軸を表している。エタロンの角度調整は、まず、FSR を合わせる。FSR が $100,000 \pm 25$ MHz 以内になるように調整してから、透過特性を ITU グリッドに合わせ込む。光周波数モニタの入力光周波数と同期検波出力の様子を図 4-3-2-6 に示す。(a)～(c)までで 5 THz であり、波長換算では約 40 nm である。これらのどの光周波数領域でも ± 500 MHz 以下の精度で ITU グリッドに対応している。

ペルチエ素子による温度安定化部

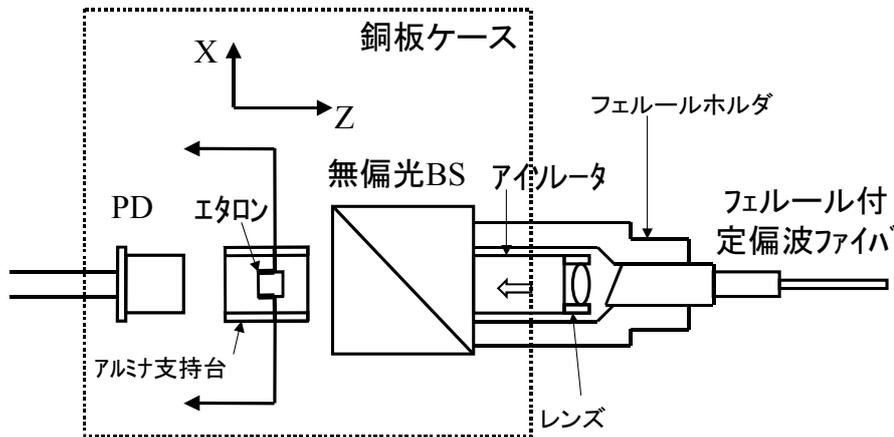
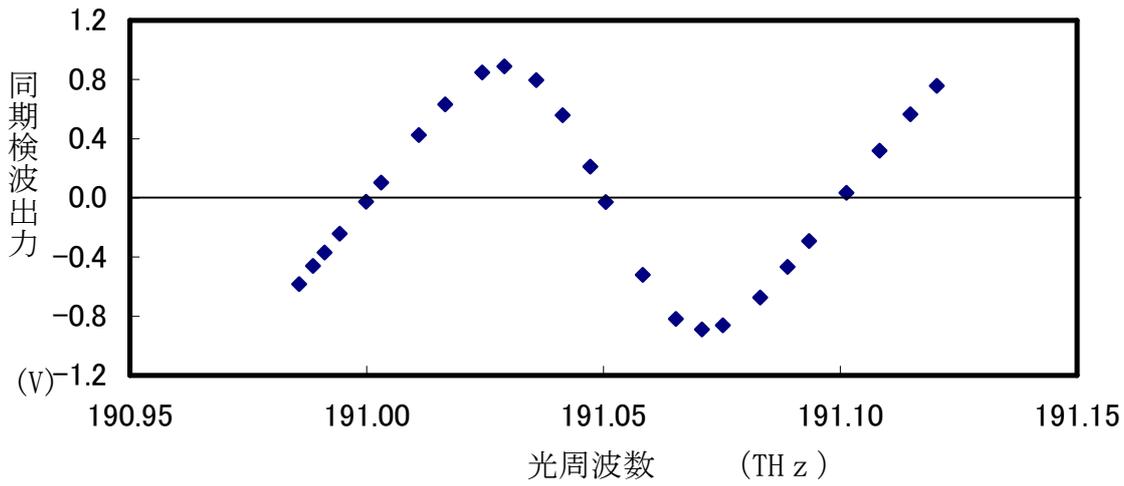
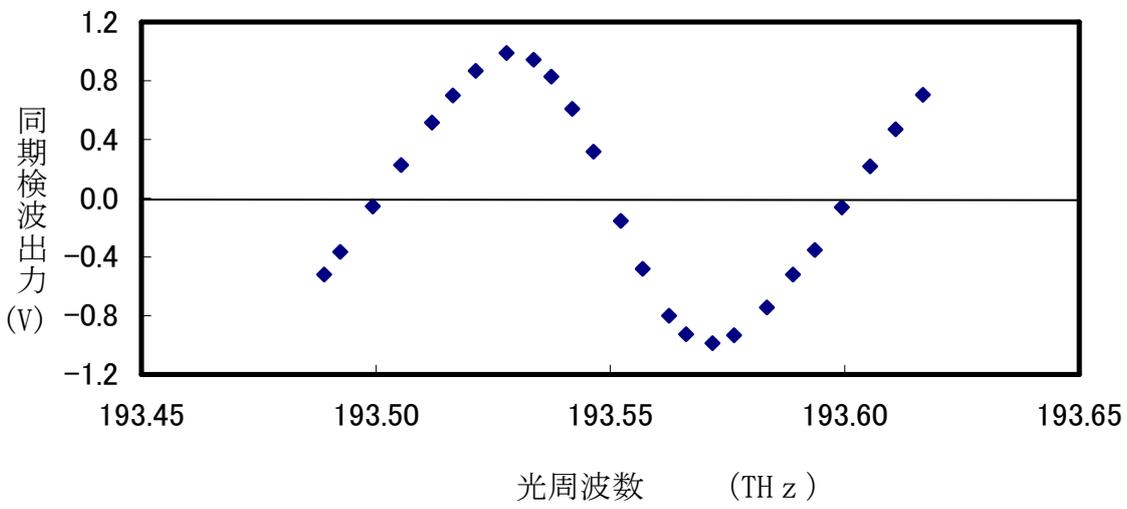


図 4-3-2-5 光周波数モニタの構造

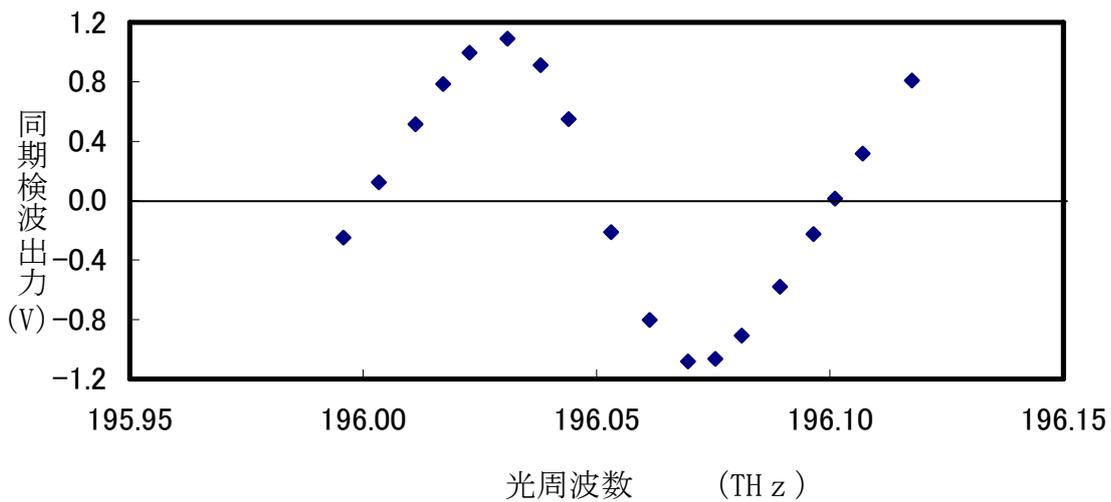
以上からエタロン透過率のボトムとピークの両方に安定化することが可能となる。また、波長切替え動作を開始してから 0.2msec で目標値に対して ± 0.4 GHz の精度で制御され、光周波数検出系の誤差 ± 0.5 GHz を加味しても、光周波数は $\pm 0.027\%$ (± 0.9 GHz) 以内に収まる。



(a)



(b)



(c)

図 4-3-2-6 光周波数モニタの出力特性

4-3-3 光周波数の長期的な安定性

4-3-2 では短期的に±0.9GHz の精度を実証した。ここでは長期的に±3GHz 以下となる見通しを得る。長期的な安定性を議論するためにはアラン分散による評価が適している。そこで、光周波数の自動データ収集を行い、データ量処理してアラン分散を求める系を立ち上げた。この系を用いて測定を行い、長期的な安定性を調べた。

4-3-3-1 光周波数のアラン分散

瞬時周波数を $y(t)$ とし、 τ 秒間の周波数測定を行い、その平均値を \bar{y}_k とすれば式(4.3.11)の関係がある。

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt \quad (4.3.11)$$

周波数測定の測定時間 τ と測定の繰り返し時間を等しく取り、無駄時間がないようにしたとする。この様な状態で周波数 y_k を測定したときに、式(4.3.12)の $\sigma_y^2(\tau)$ をアラン分散と呼ぶ。

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2} \right\rangle \quad (4.3.12)$$

ここで、 $\langle \quad \rangle$ は無限時間平均を表す。実際には無限時間平均は実現できないので、ある有限個数 m 個 (かなり大きい) の \bar{y}_k を取得し、平均して求める。すなわち、式(4.3.13)による。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \quad (4.3.13)$$

実際にはアラン分散の平方根を取った偏差 $\sigma_y(\tau)$ がグラフの縦軸としてよく使われる。

さて、式(4.3.13)は τ 秒間の平均周波数の隣接値を取り、その差異から求めることを現している。したがって、瞬時周波数が短い時間で変動していても、平均値が一定であれば τ を大きく取ることによりアラン分散は小さくなる。逆に、平均値が緩やかに変動している場合は平均値変動が観測される時間以上に τ を大きく取るとアラン分散は大きくなる。アラン分散の平方根 $\sigma_y(\tau)$ を縦軸に、横軸に τ を取り、模式的に表したものを図 4-3-3-1 に示す。

A の時間領域は $\sigma_y(\tau)$ が τ^{-1} に比例する領域であり、フリッカ PM 雑音に相当する。 τ は 1 秒未満の領域である。

B の時間領域は $\sigma_y(\tau)$ が $\tau^{-1/2}$ に比例する領域であり、ホワイト FM 雑音領域に相当する。 τ は 1 ~ 10 秒程度の領域である。

C の時間領域は τ に無依存な領域であり、温度、湿度、気圧、重力などの外的環境条件領域のゆらぎから決まる領域である。 τ は 10 ~ 10³ 秒程度の領域である。

D の時間領域は $\sigma_y(\tau)$ が $\tau^{1/2}$ に比例する領域であり、ランダムウォーク FM 雑音領域に相当する。長期安定性の範疇に入り、 τ は 10⁴ 秒以上の領域である。通常の光通信における光周波数の安定性では領域 C と D が重要である。

測定の結果、偏差の最小値は 1.7×10^{-8} (3.4MHz) であった。仮に、 $\tau^{1/2}$ の傾きで増大し続けると仮定すれば、1ヶ月ほどの長期間においても偏差は 1.5GHz となり、高い安定性が得られている。また、 τ が 3000 秒以上では偏差が飽和する傾向にあり、この見積もりより更に安定している可能性もある。長時間でどのような動きになるかは今後さらに検討を深める。

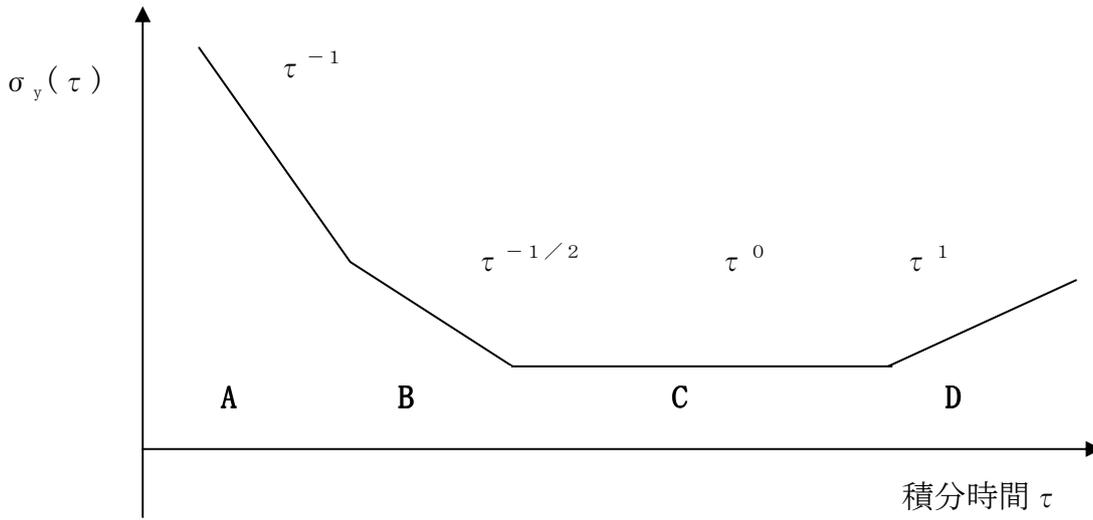


図 4-3-3-1 周波数安定度の時間領域

4-3-4 エタロンの温度補償方法

水晶エタロンは $700 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ と石英ガラスの温度係数の半分であり、温度変化に対しても比較的安定である。しかし、共振器長に変調を掛けることはできないが、トライクイント社の Schnaelite™ エタロンは温度係数が $300 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 以下と小さく、外気温変動に対して安定な波長基準である。そこで、本研究においても温度係数が小さいエタロンを得るために水晶エタロンに LiCaAlF_6 (略して LiCAF) 結晶を貼り合わせ、温度補償を行うことについて検討した[16]。

4-3-4-1 温度補償の基本設計

図 4-3-4-1 は温度無依存化を行ったエタロンを用いた光周波数検出系の構成図である。水晶と LiCAF とともに Z カット板を用い、接着剤で貼り合わせた構造を有する。誘電体ミラーは外側の面に取り付け、ファブリペロ共振器を形成している。LiCAF は負の温度係数を有しているので、水晶の温度係数と打ち消すことが可能である。

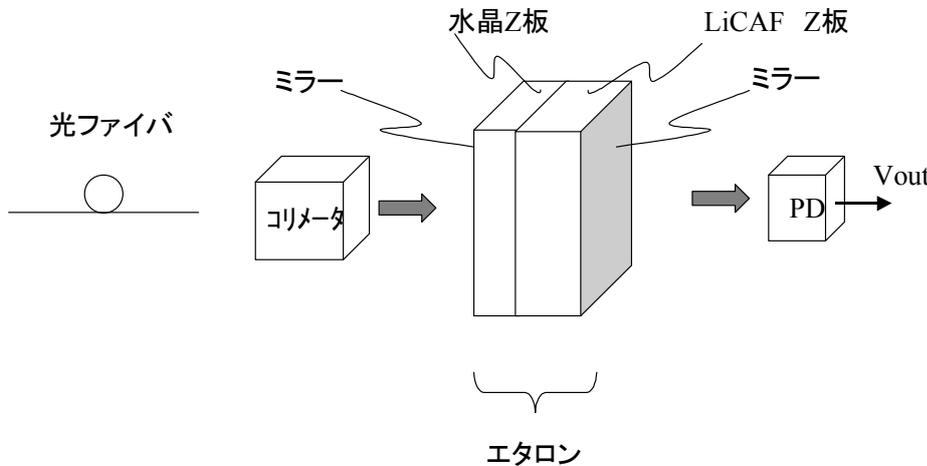


図 4-3-4-1 温度無依存化エタロンによる光周波数検出系

4-3-4-2 温度補償実験および考察

まず、Zカット水晶エタロンの波長特性を温度を変えて測定したものを図 4-3-4-2 に示す。このエタロンのミラーの反射率は1.7%であった。1.5°Cの温度差によって波長特性は10GHzほどシフトしており、このことからZカット水晶の温度係数は670 MHz/°Cが得られる。

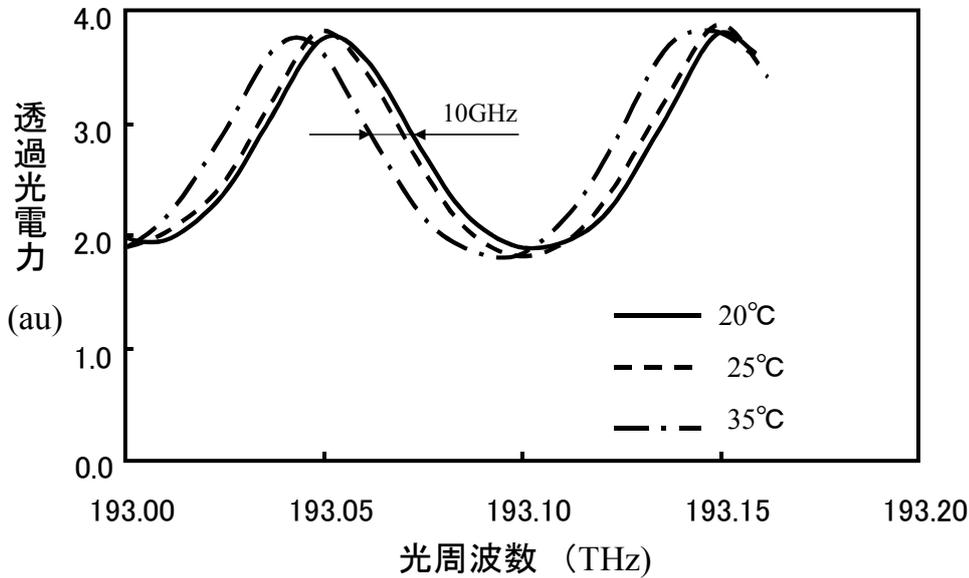


図 4-3-4-2 Zカット水晶エタロンの温度依存性

次にZカットLiCAFエタロンの波長特性を温度を変えて測定したものを図 4-3-4-3 に示す。このエタロンのミラーの反射率は片面が1.7%であり、もう片面はフレネル反射の2.5%である。1.5°Cの温度上昇によって波長特性は6.7GHzほど右にシフトしており、水晶とは逆符号の温度係数を有することが分かる。図 4-3-4-3 からLiCAFの温度係数として-450MHz/°Cが得られる。

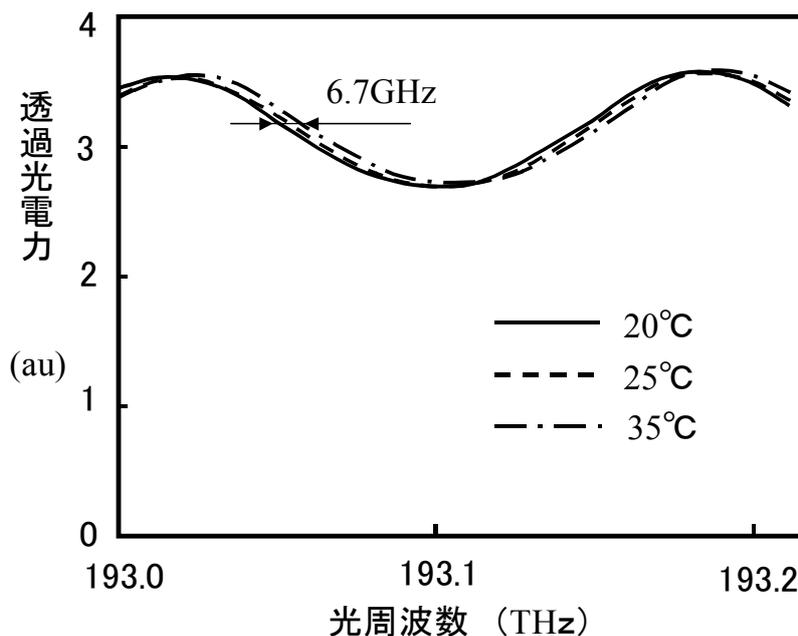


図 4-3-4-3 ZカットLiCAFエタロンの温度依存性

次に水晶と LiCAF を貼り合わせ、温度補償を行ったエタロンの温度特性を示す。LiCAF は図 4-3-4-3 で用いたものを使った。水晶は片面のみ 17% 反射のミラーが設けてある。両者の接合には屈折率が 1.44 の接着剤を用い、界面でのフレネル反射を極力抑えた。接着層の厚さは $1\ \mu\text{m}$ 以下であった。温度補償エタロンの波長特性を温度を変えて測定したものを図 4-3-4-4 に示す。15°C の温度上昇によって波長特性は 3GHz ほど左にシフトしており、このことからこのエタロンの温度係数は 200 MHz/°C が得られる。また、波長特性は滑らかな特性であり、界面でのフレネル反射の影響は小さいことが分かる。

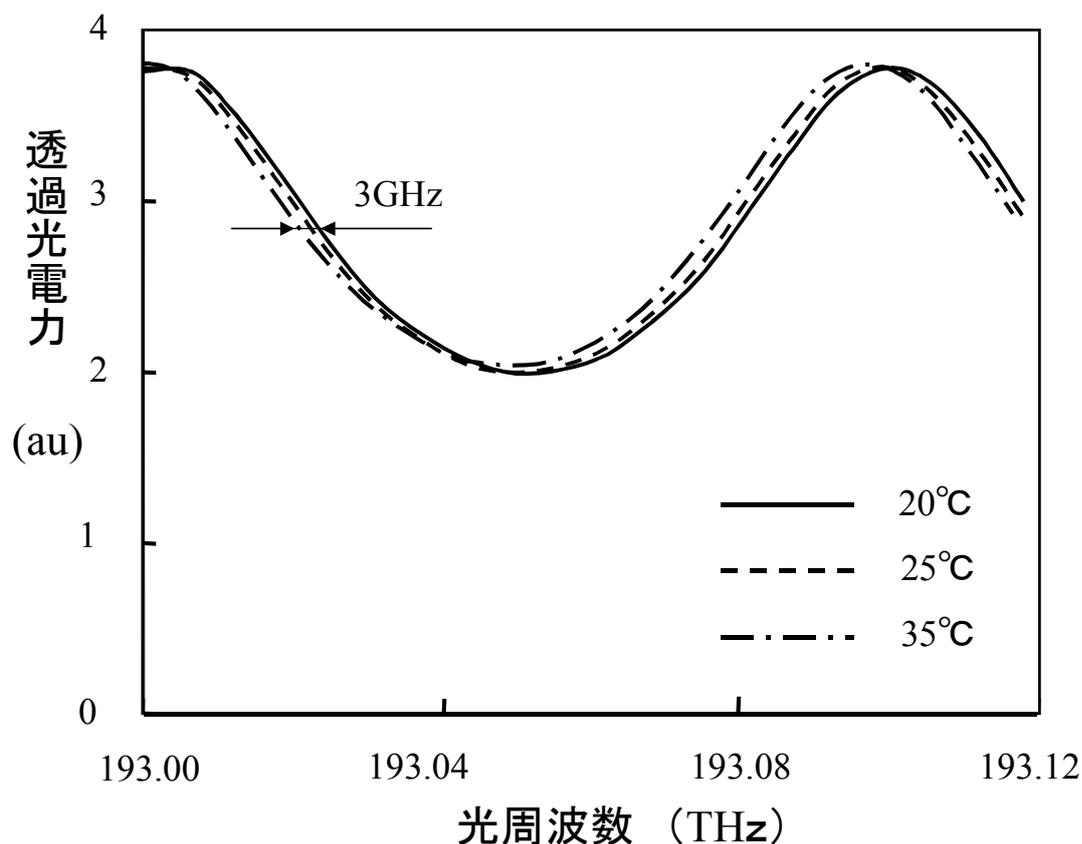


図6 温度補償エタロンの温度依存性

以上の結果から、水晶に LiCAF 結晶を貼り合わせ、エタロンの温度無依存化が行えることが分かった。200MHz/°C の光周波数温度係数が得られ、水晶エタロンの $1/4$ 程度の値であり、極めて安定なエタロンである。しかし、温度係数が完全に零にならなかった。この原因は LiCAF の物理定数の精度が良くなく、また、LiCAF の X, Y 軸方向の線膨張率は 23×10^{-6} と水晶の 13×10^{-6} と比較して大きいため、温度変化によって応力が生じ、屈折率が変わることが考えられる。

今後、LiCAF による温度補償エタロンの最適設計を行い、さらに温度安定性の高いエタロンを実現する。また、水晶のピエゾ効果を利用した同期検波法も併用することも予定している。

4-3-5 高速・高安定光周波数制御のまとめ

ファブリペロ共振器の光透過率のボトムとピーク間の波長切替えを実現するために、高速な極性切替器と広い引き込み範囲が得られる 3 電極モードホップフリー制御方式を考案した。3 電極モードホップフリー制御方式は位相調整領域だけでなく、前方ミラー領域と後方ミラー領域にもフィードバック制御を行う方式である。この結果、ボトムとピークの両方に安定化することが可能となり、波長切替え動作を開始してから 0.2msec で目標値に対して±0.4GHz の精度で制御され、全体の精度は±0.027%以内に収まることが分かった。また、アラン分散を求めることにより、1ヶ月ほどの長期間においても偏差は 1.5GHz と見積もることができ、高い安定性が得られている。さらに、安定性を高めるために水晶に LiCAF 結晶を貼り合わせ、エタロンの温度無依存化が行えることが分かった。試作では 200MHz/°C の光周波数温度係数が得られ、水晶エタロンの 1/4 程度の値であり、極めて安定なエタロンである。

今後、LiCAF による温度補償エタロンの最適設計を行い、同期検波法も併用するなどして長時間の安定性をさらに改善するつもりである。

4-4 総括

光ネットワークアーキテクチャの研究開発では障害からのリカバリーを重点的に開発を進め、Shared link protection 方式の高速障害復旧プロトコルを提案した。提案の方式は、より短時間の障害復旧が可能であり、リソース使用効率も高い。シミュレータに提案プロトコルを実装し、シミュレーションにより、障害復旧の有効性を確認した。SONET/SDH 伝送のセクションプロテクションによる障害復旧時間である 50msec と同程度の障害復旧時間となるメドを得た。

高効率光変復調の研究開発では光 ADM 部における Drop 信号、Add 信号、Through 信号の光波形シミュレーションを行い、光 ADM 部を構成する光フィルタ要素について透過帯域幅の最適配分を見積もった。また、光 ADM 部を光周回路内に設置した光周回系を用いて、0.8bit/s/Hz の波長多重信号が複数の光 ADM 部を通過する実験を行い、検討している光 ADM 部構成が反転 RZ 信号による高密度波長多重に有効であることが判った。さらに、中点保持型水晶エタロンによる波長検出系を備えた SG-DBR レーザ波長可変光源を用い、高速波長切替動作を行いながら超高密度波長多重伝送が実現可能であることを確認した。

高速・高安定光周波数制御の研究開発では高速な極性切替器と広い引き込み範囲が得られる 3 電極モードホップフリー制御方式を考案し、ファブリペロ共振器の光透過率のボトムとピーク間の波長切替えを実現した。切替動作を開始後、0.2msec で目標値に対して±0.027%以内に収まることが分かった。また、アラン分散を求めることにより、1ヶ月ほどの長期間においても偏差は 1.5GHz と見積もった。さらに、安定性を高めるために水晶に LiCAF 結晶を貼り合わせ、エタロンの温度無依存化が行えることが分かった。

以上述べたように各研究課題とも平成 17 年度の目標を完遂し、検討している方式の動作を確認した。今後は、さらに完成度の高い動作確認を行い、最終目標を完遂する予定である。

尚、本報告書は公開用として編集したものであり、割愛した部分があることをご承知願いたい。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

番号	発表方法	発表雑誌名 講演会名 学会名等	発表者	発表タイトル	発表時期	査読の有無
1	学会	ECOC2004	Masahiro Ogusu, Kazuhiko Ide, and Shigeru Ohshima	Comparison among pre-filtered 40-Gb/s signals of Inverse-RZ, DPSK, and DPSK-RZ toward co-polarized DWDM with 37.5-GHz intervals	H16 9月	有
2	学会	電子情報通信 学会 研究会	大島、小楠、井出	中点保持型水晶エタロンの振る舞い	H16 5月	無
3	学会	電子情報通信 学会 第2種研究会	小楠、井出、大島	反転RZ光信号による超高密度波長多重の検討	H16 6月	無
4	学会	電子情報通信 学会 ソサイエティ 大会	小楠、井出、大島	周回系を用いた 0.8b/s/HzWDM 反転 RZ 光信号への帯域狭窄実験	H16 9月	無
5	学会	電子情報通信 学会 ソサイエティ 大会	大島、井出、小楠	水晶エタロン付き SG-DBR-LD の高速波長可変特性	H16 9月	無
6	学会	電子情報通信 学会 ソサイエティ 大会	富岡、井辺、土橋、 竹原、中尾、鈴木	光パスへのトラフィック移行時における効率的なパケット順序逆転防止方法の提案	H16 9月	無
7	学会	OFC2005	M. Ogusu, K. Ide, and S. Ohshima	Fast and precise wavelength switching of an SG-DBR laser for 1.07-b/s/Hz DWDM systems	H17 3月	有
8	学会	電子情報通信 学会 全国大会	竹原 潤、井辺 博之、富岡 多寿 子、鈴木 雅淑、 土橋 恭介、稲村 浩之	光パス設定時間が全光ネットワークに与える影響の検討	H17 3月	無
9	学会	電子情報通信 学会 全国大会	大島、井出、小楠	波長ロッカー用水晶エタロンの温度補償方法	H17 3月	無
10	学会	電子情報通信 学会 全国大会	小楠、井出、大島	反転 RZ 光信号を用いた 1.07b/s/Hz WDM 伝送系による SG-DBR 光源の高速・高安定波長切替実験	H17 3月	無
11	学会	電子情報通信 学会 ネットワークシステム・情報ネットワーク合同研究会	富岡 多寿子、井辺 博之、鈴木 雅淑、 竹原 潤、土橋 恭 介、稲村 浩之	全光ネットワークの光パス設定シグナリング時における波長競合軽減方式の検討	H17 3月	無
12	学会	The Fourth International Conference on the Optical Internet (COIN2005)	井辺博之、富岡多 寿子、鈴木雅淑、 竹原潤、土橋恭介	QoS Guaranteed Network Establishing All Optical Path Automatically According to Packet Flow	H17 5月 予定	有

13	論文誌	電子情報通信学会 英文論文誌 B	富岡、井辺、鈴木、 竹原、土橋、稲村	Comparison of Techniques to Mitigate Wavelength Contention in a Photonic Network with Frequent Optical Path Setups	H18 3月 予定	有
----	-----	---------------------	-----------------------	--	-----------------	---

5-2 参考文献

- [1] N. Yoshikane and I. Morita, OFC2004, PDP38, 2004.
- [2] G. Raybon, et al., ECOC2004, Mo 4.5.1, 2004.
- [3] A. Gnauck, et al., ECOC2004, Th4.4.1, 2004.
- [4] M. Takahashi, et al., OFC2005, PDP19, 2005.
- [5] Y. Liu, et al., OFC2005, PDP17, 2005.
- [6] 富岡、他、「高効率全光ネットワークアーキテクチャ」、信学ソサイエティ大会、H15年9月、B-6-140
- [7] 富岡、他、「波長可変光トランシーバを用いた全光ネットワークの基本特性」、H16年3月 信学会 IN・NS 研究会
- [8] 井辺、他、「高効率全光ネットワークの特性解析(1) —シミュレータ構成—」、信学全大、H16年3月、SB-2-7
- [9] 富岡、他、「高効率全光ネットワークの特性解析(2) —遅延特性—」、信学全大、H16年3月、SB-2-8
- [10] 富岡、他、「光パスへのトラフィック移行時における効率的なパケット順序逆転防止方法の提案」、信学ソサイエティ大会、H16年9月、B-6-116
- [11] 富岡、他、「全光ネットワークの光パス設定シグナリング時における波長競合軽減方式の検討」、H17年3月 信学 NS・IN 研究会
- [12] Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels, draft-ietf-mpls-rsvp-lsp-fastreroute-07.txt
- [13] M. Ogusu, et al., OFC2005, TuE4, 2005.
- [14] 大島 他、2004年度電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-1.
- [15] S. Ohshima, et al., IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E88-B, no.4, pp.1523-1530, 2005
- [16] 大島 他、信学全大、H17年3月、C-3-123