平成17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: ㈱東芝

平成18年4月

情報通信研究機構

平成17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

_		가파 여자 티티 카스 카페 티		0
1		研究開発課題	見の背景	2
2		研究開発の全	主体計画	4
	2	一1 研究開	発課題の概要	4
		2 - 1 - 1	光ネットワークアーキテクチャの研究開発	6
		2 - 1 - 2	高効率光変復調の研究開発	7
		2 - 1 - 3	高速・高安定光周波数制御の研究開発	10
	2	-2 研究開	鼎発目標	12
		2 - 2 - 1	最終目標(平成18年3月末)	12
		2 - 2 - 2	中間目標(平成16年3月末)	13
	2	-3 研究開	開発の年度別計画	14
3		研究開発体制	刹	15
	3	-1 研究開	鼎発実施体制	15
4		研究開発実施	施 状況	16
	4	-1 光ネッ	ットワークアーキテクチャの研究開発	16
		4 - 1 - 1	研究開発の概要	16
		4 - 1 - 2	ノード障害時のプロテクション動作	17
		4 - 1 - 3	ノード障害時プロテクションのシミュレーション結果	20
		4 - 1 - 4	Linux OS O PC $\vdash \sim O \pi - \overline{r} + \sqrt{r}$	22
		4 - 1 - 5		
	4	-2 高効率	料本で 変化の 変化の の 研究開発	
	-	4 - 2 - 1	研究開発の概要	
		4 - 2 - 2	反転 RZ 光信号による 1 Obit/s/Hz 超の波長多重伝送	01
		4 - 2 - 3	反転 RZ 光信号を用いた 0 Shit/s/Hz 光 ADM 部の検討	
		4 - 2 - 4	米スイッチと米合分波器対による米 ADM 部と波長可変光源による米ノード部の	機能
		確認主輪		34
			周回伝送系による複数段光ノードへの光信号 Through 実験	37
		4 - 2 - 6	高四四之外による後外久元/ 「 、 、 」には、「 Imough 央歌	
	Л		ー 高宏学の変換のである。 ・ 真安定米周波教制御の研究開発	10
	Т		ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	+1
		4 0 1	30 元用元の幌安	±1 /1
		$4 \ 0 \ 2$	ル内波気候山、阿岬ボジ室平取町 エタロンの泪産堵僧	41
		4 3 3	ユアロンの温度価値	42
		4 3 4	同歴・同女にル内仮数削仰の天歌和木 直油・直安完光周波粉割御のまとめ	40
	1	ユ 1 公任	回歴 回外圧ル回欧効剤弾やよこの	40
F	4	4 №10.		4J E0
J	F	一 1 □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □	⊘勹入叭 以主,謙定竺影	90 E0
	о г		七衣 [、]	90
	Э	ーム 豕有り	人間入	90

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、管理の効率は必 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 Quadriphase-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-DPSK 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。

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 ァ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で通過する。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
- 高効率光変復調の研究開発

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



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 と同じである。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

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:0TDM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 2-2.3 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±2000ps/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、電気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(~30m)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、整定時間と言う言葉を用いるこ 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±2.5GHz 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±1GHz 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±1GHzとし、3750GHzの周波数を変化させる事 を考慮すれば、目標値の±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±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。



±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 500MHz/℃の温度係数とな るので、10分の1℃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ネル間隔程度に制限されていたが、本方式ではチャネル間隔の 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



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 3Tbit/s トータルスループット \sim 50Tbit/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 40Gbit/s 带域利用効率 $\sim 0.8 \text{bit/s/Hz}$ 偏波多重分離 無し 伝送距離 \geq 200km Add Drop 機能確認実験 Add Drop の光周波数間隔 \sim 50GHz 光受信器同期確立時間 \leq 1ms

(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≤ 1ms (目標値の±0.03%以下)光送信波長可変範囲> 30nm送信波長安定度~ $\pm 1GHz$

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
帯域利用効率
偏波多重分離≥ 40Gbit/s
 $\sim 0.6bit/s/Hz$
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
光送信波長可変範囲≦ 1ms(目標値の±0.5%以下)
> 30nm

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 日	備考
	概略設計	詳細設計	方式確認	試作評価		
		-				
間接経費			<u> </u>			<u></u>
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 ㈱東芝 研究開発センター内

東京都日野市旭ヶ丘 3-1-1 ㈱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ト (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 (P-LSP; Packet 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、P-LSP と同一経路で光パスを設定する。特定の時間が経過するあるいは光パス 上のトラフィックが少なくな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]

提案したネットワークアーキテクチャの機能を、シミュレータ上に実装し、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し、改良を加えた。

一昨年までに、P-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、P-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、元に戻すことが可能であり、通常は大 きい問題とはならない。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 (Resource Reservation Protocol Traffic Engineering, 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、P-LSP の障害を光パスで救済する方法を 新たに提案することができた。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。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。障害リン クを通る全ての P-LSP を一本の P-LSP の中にラベルスタック(ラベルパスの中に複数のラ ベルパスをカプセル化する)し、さらに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 P–LSP を、元の P–LSP に戻して、障害を回避する。障害 を受けた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。そのため、バイパス光 パスの設定は、通常の輻輳回避の光パスと異なり、下流から上流へ RESV メッセージのみで 実現することができる。ここで示したリンク障害時のプロテクション方式について電子情 報通信学会にて報告した。[12]

今年度は、昨年度に引き続き、ノード障害時のプロテクション動作について検討を進め た。ノード障害時の迂回動作に関しても、リンク障害と大枠において同様な考え方でプロ テクションを行うこととした。すなわち、ネットワークが立ち上がった段階で、全てのノ ードに対して、障害となった場合を想定して、迂回路すなわちバイパス光パスを計算する。 障害ノードを想定して、障害ノードの上流のノードをPLRとし、下流のノードをMPとする。 PLRからMPへ、障害ノードを除いたShortest Pathを求めて、それをバイパス光パスとす る。PLRとMPは、障害ノードの上流と下流の隣接ノードである。PLRとMPは、ひとつの障 害ノードに対して複数の組み合わせが存在する。従って、同一リンクにバイパス光パスが 複数通り、波長が重ならないように前もって設定しておく。

PLR と MP の両者は、隣接ノードの障害か、リンク障害か不明である。リンク障害の場合 には、MP からバイパス光パスのための波長設定メッセージ(バイパス RESV メッセージ) を出して、バイパス光パスを設定する。しかし、ノード障害の場合には、MP からバイパス 光パス用波長設定メッセージ(バイパス RESV メッセージ)を出しても、対抗するノードが 障害を受けているため、この光パスは設定できない。したがって、バイパス光パス用波長 設定メッセージと同時に、PLR に向けて、障害通知を出力する。障害通知を受けた PLR は、 自らも隣接ノードとの間のリンク断などの信号障害を検出している場合、隣接ノードの障 害であると判定する。次に、MP に対して、ノード障害に対応するバイパス光パスを設定す るためのバイパス PATH メッセージを出力する。バイパス PATH メッセージを出力した PLR は、それと同時に、該当するバイパス光パスの中に、複数の P-LSP をスタックして入れる ことにより、プロテクションを行う。

また、本年度は、昨年度に引き続き、ネットワークシミュレータに実装したシグナリン グ部分を抜き出し、Linux の OS で稼動する PC 上へ、ソフトウェアをポーティングした。 本年度は、スイッチングハブを介さず、直接 9 台の PC を接続できるようにした。仮想的な 障害を発生させることにより、プロテクション動作が、Linux の PC 上で自律分散的に動作 することを検証した。

ここでは、本年度実施した、ノード障害時のプロテクション動作を第4-1-2章で説明 する。第4-1-3章では、ネットワークシミュレータに実装したノード障害時のプロテク ション動作を、パケットの伝送遅延の値を元にして説明する。さらに、第4-1-4章では、 Linux-OS の PC 上にポーティングしたシグナリング機能部により、プロテクション動作が 正常に行われていることを、ログにより示し、説明を行う。最後に、高効率全光ネットワ ークアーキテクチャとして、最終目標の値が達成できたことを示して、まとめとする。

4-1-2 ノード障害時のプロテクション動作

第4-1-1章において、ノード障害時におけるプロテクション動作について、その概要 を示した。ここでは、図を用いて詳細に説明する。図4-1-1には、9ノードのメッシュ ネットワークを示す。個々のノードの接続形態は、図に示した通りである。波長ゼロのデ フォルト光パスを用いて、通常のMPLSネットワークとして、パケット Labeled Switch Path (LSP)によりユーザパケットが転送されているものとする。P-LSPは、全てのノードがフ ルメッシュで接続されている必要はない。ルーティングプロトコルにより作成されたフォ ワーディングテーブルに従ってラベルテーブルが作成されるので、トラフィックがないノ ード間には、P-LSPは設定されない。図4-1-1の中に実線で示されるように、P-LSPが設 定されているものとする。P-LSPの設定には、RSVP-TEを用いる。P-LSPを設定する際には、 通常は、RESVメッセージによりひとつ下流の入力ラベルを知る。今回は、ノード障害時の 対策を考慮し、ノード二つ下流の入力ラベルまで知るように設定した。

次に、リンク障害とノード障害のプロテクションのために、バイパス光パスの予約が行われる。リンク障害のプロテクションにおいては、ただひとつの波長のみが、バイパス光

パスのために予約される。一方、ノード障害のプロテクションに用いるバイパス光パスの ための波長の数は、トポロジによって変化する。図 4-1-2 には、リンク EA、EB、EC、ED が障害を受けた場合のバイパス光パスと、ノード E が障害になった場合のバイパス光パス が予約されていることを示している。例えば、ノード E からノード A へ向かうリンク EA が 障害を受けたと仮定する場合、ノード E が Point of Local Repair (PLR)で、ノード A が Merge Point (MP)となる。ノード E からノード A への経路の中で、リンク EA を除いた場合 の Shortest Path は、E→D→A の経路となる。



図4-1-1 ノード障害プ ロテクションを説明するた めのネットワーク(図中の 実線のパスが設定されてい る) 図 4-1-2 プロテクションの ための光パスの予約を説明する 図

ノードEが障害となった場合であって、ノードAがMP、ノードB、C、DがPLRの場合に は、ノードEを除いたときのPLRからMPへのShortest Pathは、それぞれ、B→A、C→D →A、D→Aとなる。ノードBがMPで、ノードC、D、AがPLRの場合、ノードCがMPで、 ノードD、A、BがPLRの場合、ノードDがMPで、ノードA、B、CがPLRの場合のバイパス 光パスも、図4-1-2の中に記した。以上より、ノードEに障害があった場合、12本の バイパス光パスが必要になる。また、例えば、C→D→AとD→Aのように、同一リンク上に 複数のバイパス光パスが張られるので、予約する波長の数も複数必要となる。ここで予約 された波長は、P-LSPを流れるパケットトラフィックが所定のしきい値を超えたときに設 定される輻輳回避光パスの波長と競合しないように、輻輳回避光パスの波長を設定する場 合の推奨波長から、予め削除される。

次に、ノードEが障害となった場合を考える。図4-1-3に示すようにノードEが障害 となり、ノードA、B、C、Dへの信号が断となったと仮定する。ここで、障害の検出では、 定期的なハローパケットがこなくなったとして検出することが考えられる。しかし、サー ビス停止時間として 50msec を目標とした場合には、ハローパケットの繰り返し時間を短縮 することより、物理層における受信信号断や同期はずれを検出することが妥当と考えられ る。ここでは、物理層における障害検出を念頭において、プロテクションの検討を行った。



図 4-1-3 ノード障害の場合の制御パケット転送を示す図

ノードAがMPで、ノードB、C、DがPLRの場合を考える。ノードAは、ノードEからの 受信信号断を検出したとする。この場合、ノードAは、リンクEAが障害なのか、ノードE が障害なのか不明である。そこで、ノードA(MP)は、リンク障害の PLR (ノードE)に 対して、バイパス光パスの設定のための RESV メッセージを出力する。また、RESV メッセ ージと同時に、ノード障害の PLR (ノード B、C、D) に向けて、障害通知メッセージを出 力する。リンク障害を想定して出力した RESV メッセージは、ノード E が故障であるため、 バイパス光パスは設定されない。ノード障害の PLR であるノード B、C、D に向けた障害通 知メッセージは、ノードB、ノードC、ノードDにより受け取られる。また、ノードB、ノ ードC、ノードDでは、ノードEからの信号が断であることを知っている。すなわち、PLR が、障害通知メッセージを受け取り、かつ、隣接ノードからの信号が断の場合は、そのノ ードが障害であることを認識する。その結果、PLR(ノードB、C、D)は、MPに向けて、ノ ード障害時のバイパス光パスを設定する PATH メッセージを出力する。この様子を図 4-1 -4に示す。ノード障害バイパス光パスを設定するための PATH メッセージは、輻輳回避の ための PATH メッセージと異なり、ネットワークの立ち上がり時点で、波長の予約がなされ ている。したがって、RESV メッセージのリターンを待たずに、PATH メッセージのみで、予 約した経路で、既に決定している波長でバイパス光パスを張ることが出来る。従って、バ イパス光パスメッセージを出すと同時に、PLR(ノードB、C、D)は、光パスの中に、障害 を受けた P-LSP を入れる。この様子を図 4-1-5 に示す。





図 4-1-5 PATH メッセージと同時に、光パスの中に P-LSP を入れたプロテクション

PLR (ノードB、C、D)から MP (ノードA)へのバイパス光パスの中に、障害経路上の P-LSP を入れる。このためには、PLR から MP へ向かうラベルドパケットのラベル値を、障害ノー ドの出力ラベル値に置き換えた上で、同一経路のラベルドパケットを束ねる目的で、ラベ ルをスタック (ラベルプッシュ)させる必要がある。スタックする外側のラベル値は、ネ ットワークが立ち上がる時点で、予めノード障害時のバイパス光パスの波長を決める際に、 同時にラベル値も決めておく。一方、障害ノードの出力ラベル値は、P-LSP を設定する際、 RSVP-TE の RESV メッセージで、ノード二つ手前のラベルを知っていた。この操作を利用し、 障害ノードの出力ラベル値を前もって認識することが出来る。以上より、ノード障害時の バイパス光パスを設定したと同時に、PLR にて P-LSP のラベルの付け替えとスタックによ り、プロテクションが完了する。

4-1-3 ノード障害時プロテクションのシミュレーション結果

第4-1-2章に示した基本設計をベースとして、ネットワークシミュレータ OPNET®上でノード障害時のプロテクション機能を実装した。その機能の検証を目的として、図4-1-6に示すトポロジのネットワークシミュレーションを実施した。



図 4-1-6 16 ノードのグリッドネットワークでの ノード障害シミュレーション

ノード間のリンク長は、それぞれ 300km とした。すなわち1リンクのファイバ伝送によ る遅延は、1.5 ミリ秒となる。シミュレーション開始後に、OSPF (Open Shortest Path First) プロトコルにより経路テーブルが作成される。その後、経路テーブルに従って、フルメッ シュの P-LSP が設定される。シミュレーション開始後、65 秒からユーザデータとなるパケ ットトラフィックが生成され、転送される。生成されるトラフィックは、100Mbit/s とし た。リンク速度は、40Gbit/s としたので、輻輳光パスは設定されない。ノード5からノー ド1、ノード7、ノード12の3つのノードへ向けてパケットが転送されるように設定し た。OSPF により、転送されるパケットは、図4-1-6 に矢印で記した経路を通る。この経 路上に P-LSP が設定されていることになる。

シミュレーション開始から 70 秒後に、ノード6に障害を発生させた。設計のとおりに、 プロテクション機能が動作すれば、瞬時にプロテクション動作が起こるはずである。

その後、シミュレーション開始から 130 秒後に、ノード6を除いた、新しいトポロジに より OSPF を用いて新たな経路テーブルが作成される。それにより、P-LSP が再設定される ため、Shortest Path によるパケットの転送が行われる。

シミュレーションの結果として、ノード5からノード1、ノード7、ノード12へ転送 されるパケットの遅延時間の変化を求めた。この結果を図4-1-7に示す。



図 4-1-7 ノード5 からノード1、7、12 へのパケット遅延時間の変化 (70 秒にノード6 に障害、130 秒に経路の再計算が行われた)

図 4-1-7 において、ノード5からノード1 へ向かう P-LSP 上のパケット遅延時間は、 ノード6 が障害になっても、なんら変化はない。これは、ノード6 が障害となった場合に、 ノード5 からノード1 への経路は、影響を受けていないからである。

一方、ノード5からノード7へ転送されるパケットについては、70秒の時点で、パケット遅延時間が、3ミリ秒から6ミリ秒に倍増している。ノード6が正常に動作しているときには、経路は、ノード5→6→7の経路で転送され、リンク2つ分で3ミリ秒の遅延時間となっている。ノード6が障害となったときに、PLRがノード5で、MPノード7で、ノード6を除いた最短経路となるノード5→1→2→3→7のバイパス光パスが設定される。この為、リンク4つ分のパケット遅延である6ミリ秒の遅延となって、ノード7にパケットが到着する。

ノード 5 からノード 12 へ転送されるパケットについては、P-LSP 上にデータパケットを 流し始める 65 秒の時点では、P-LSP の経路は、ノード 5 → 6 → 7 → 8 → 1 2 となっていた。 4リンク分の遅延、すなわち6ミリ秒のパケット遅延が生じていた。ノード6が障害となった70秒の時点で、パケット遅延時間は、9ミリ秒となった。これは、PLRがノード5で、MPがノード7であり、ノード5→1→2→3→7のバイパス光パスの中に、このP-LSPがスタックされて入るからである。ノード7を出た P-LSP は、ノード8を介してノード12 に設定される。従って、ノード6が障害になった場合の、ノード5から12へ向かう P-LSP の経路は、ノード5→1→2→3→7→8→12となる。遅延は、6リンク分で、9ミリ秒となる。130秒において、ノード6を除いた際の最短経路が再計算される。この結果、P-LSP は、ノード5→9→10→11→12となる。その結果、遅延時間は、4 リンク分の6 ミリ秒となる。

以上の結果より、ノード障害におけるプロテクション動作が、設計通り動作しているこ とを確認することが出来た。

4-1-4 Linux OSのPC上へのポーティング

本研究では、提案するネットワークアーキテクチャの機能を、ネットワークシミュレー タ上で動作させ、検証することにより、開発を進めてきた。使用しているネットワークシ ミュレータ OPNET®は、実際の構成要素に近い機能分割が可能であるため、開発したソフ トウェアを比較的容易に移植することが可能である。今回、ラベルスイッチパスや、光パ スを設定、解放するためのシグナリング機能を、PC上に実装することにより、より現実的 なアーキテクチャの検証を行うことを目的として、本ソフトウェアを開発することとした。

昨年度は、ネットワークシミュレータ OPNET®に実装したシグナリング機能の中でプロ テクション機能を含まない部分を、Linux OS の PC 上にソフトウェアをポーティングした。 この際、PC のネットワークインタフェースはひとつのみとし、スイッチングハブを介して PC 間の通信を行うようにした。従って、想定するネットワークは、実際の物理トポロジと 異なるネットワークとなってしまっていた。

今年度は、最大4つまでネットワークインタフェースを持つ PC を、スイッチングハブ を介さずに、互いに接続するようにした。PC 間接続の物理トポロジそのものが、ネットワ ークトポロジとなる。また、シグナリング機能に加え、リンク障害、ノード障害時のプロ テクション機能を盛り込んだ。

4-1-4-1 ノードモデル

Linux OSのPCで実現したノードの 概略機能構成を、図4-1-8に示す。 昨年のモデルとの違いとして、リン ク障害とノード障害に対応するバイ パス光パス設定機能を追加した。ま た、外部とのネットワークインタフ ェースが1つかた4つになった。光 パス設定要求機能、波長要求配布機 能、ラベル要求配布機能、バイパス 光パス設定機能などに入出力する制 御パケットのインタフェースは、フ オワーディングテーブルによって選 択される。フォワーディングテーブ ルは、物理トポロジに従い、手動で 設定するようにした。イーサネット の IP アドレスとノードの IP アドレ



図 4-1-8 Linux OS の PC で構成したノード機能ブロ ック構成

スの対応については、設定ファイルの中に手動で書くようにした。

4-1-4-2 システム構成

ソフトウェアとして、Linux OS は、Red Hat Linux 9 で、カーネルバージョンは、2.4.20 以降である。

4-1-4-3 ネットワーク構成と設定



Linux 0SのPCを9台準備した。 図 4-1-9に示すように、実装し たソフトウェアの評価を行うた めに、9ノードのグリッドメッシ ュネットワークを構築した。各ノ ードの IP アドレスとインタフェ ースの IP アドレスを図 4-1-9 に示すように設定した。図 4-1 -9のトポロジを基にして、ネッ トワーク設定を行った。図 4-1 -10 に、ノード1におけるネッ トワーク設定のための設定ファ イルを示す。

図 4-1-9 ネットワーク構成

かいか	N9.2.5_made_1.conf ▼ 通訳: ▼ 挿 車 井 贏 品 1行 1桁 15-0 23H 1/5.275/F-(ト	
1 23 4 5 6 7	Node Infod イ NoNodeInfo [®] 自ノード名 自ノードアドレス サービスボート番号>・・・接続フラグd WilodeInfo>-node_1>-172.0.0.1>・・10001>・・1d	物理ネットワーク設定
8.9	Neighbor Connection Info#	
10 11 12		
13 14 15 16 17 18	NeighborNodeInfo [®] >次ホッブノード名 接続IF 接続アドレス 接続ポート 接続フラグ 4 eighborNodeInfo ^{>} >>-node_2>=0>=10.0.12.10>=10002>==0# eighborNodeInfo ^{>} >==node_4>=1>==10.0.14.11>=10004>==0# eighborNodeInfo>===GUI>=1>=127.0.0.1>==10010>==0#	
19 20 21	e Forwarding Info (Routing Info) ∢	論理ネットワーク設定
22 23 24	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	
25 26 27 28 29 30	HostsTable [®] ノード名>PXCアドレス4 ostsTable [®] -node_1>-192.168.1.04 ostsTable [®] -node_2>-192.168.2.04 ostsTable [®] -node_3>-192.168.3.04 ostsTable [®] -node_4>-192.168.4.04	
31 32	astsTable>-node_5>-192.168.5.0# astsTable>-node_6>-192_168.6_04	-

図4-1-10 ノード1のCONFファイル

4-1-4-4 シグナリングソフトウェアのプロテクション機能の実行結果

りつドウ: N9,2,6,nade,4.kep 🛛 選択: 💌	1 挿 📕 🕂 🔜 🚨	
CVDocuments and SettingsVe0071010.HINOVMy Documents/Current 12102187 102 1221227 2014 2014 2014 2014	VFolder#TAOVinplement#_p3V1VN9_2_6_nee	ic_4.lec
12100117 1101121001977 301 14:429,110/0,2 121081 ジフォワーディングテーブル表示>>Lノード名:nod		
121622 IPアドレス>先ノード番号>元ノ- 121683>	·ド番号>・・・入力IF>・入力ラベル>・・・ >	出力IF>-出力ラベル4
<u>.</u>		<u> </u>
C 4 Documents and Settings¥e0071010 HINOTMy Documents¥curren 12172947 145 121729570 094 4 422 816/8 2	(Folder#TA0¥inplement¥_p2¥1¥K9_2_6_nt 1.51901_VK	迂回光パス向け Forwarding 🔤 🚽
121729	···>·····0.75>···0.d8000>>····	···0x15>···0xd8184>>····0x000004
121731 2 192,168.6.128 > 6>> 0>-	>0x22>0x300003>>	0:022 0:30000 > 0:000004
121732	>0x01>0x20187>>	0x75)0xb0187>>0x001874
121734	>0x40>0x20184>>	···0x75>···0xb0184>>····0x201844
121738 192,168,7,1 / /////////////////////////////////	>0x30>0x30001>>	迂回対象 LSP 集束 Forwarding 🎽
121787 0192 168 7 255 > 75>		0x01>0x01c1>>0x101c14
122721行 1桁 1227215-0 00H.04H 4.465.350/8.20	1.519//7/	
122721 # 122722 K/拝入波長テーブル東示公[ノードタ:works 4] #		
122723 出力 IFン 出力 ラベルン・・・・・挿入波長4		迂回光パス挿入
122724 122725 ······0x15>···0xd8184>>·····594		
1227260x16/0x08084/>		
122728 (《変換波長テーブル表示》)[ノード名:node_4]4	= 10.4 = 10.	
122720	₩2·····₩/\XIU# >	
122731	>0x28108# >0x28102#	
122733	0.f01054	
122735	>	
1227360x16>60>>0x00>60>	>0x280844	
ウハドウ: N0,2,6_nacks_1.kog 🔽 選択: 🔽	7 押 📕 🕂 🚛 🚨	
77034行 1桁 770345-/> 00H.0.4H 3.086.375/6.3	7.162/11/14	
77035 × 4挿入波長テーブル表示>>[ノード名:node_1]4		
7/038 田力ドン・田力ラベルン・・-挿入波長4 77037		
77038		
77040 v 変換波長テーブル表示 >[ノード名:node_1]4	EX (10.2 - 10.4	
77042	長)······光/1ス104)···································	
770430x00>61>>0x01>61> 770440x00>62>>0x01>62>	>0x281064 >0x282024	
77045		迂回光パスカットスルー
77047	>0./281844	
12307747 1#7 12307754/2 OPH.04H 14,922,388/8.22	194 + + Actor 8,708/141	
1280781~9年人波長テーフル表示>>Lノート名:node_2.14 1280781出力JF>・出力ラベル>挿入波長4		
123080		
1230820x16>0xd8102>>634		
123085 。 123084 <<変換波長テーブル表示>>[ノード名=node_2]4		
123085入力1F>-入力波長>出力1F>-出力波	長>光(スID4 >	
123087	0.28106	迂回光パスカットスルー
123089	->0,281844	
122090	119/2010044	

91.71 9: N9,2,6, node, 3.1o	a ▼ 通択:		「評評	++ & &		
66803行 1桁 6	680354) ODH.	.04H 2.743.821/5	5.840.543/117	h in the second s		-
66803		Urbanda Ala				
66805 出力	ーフル表示パレ IF>・出力ラベル	ート名:node_314				
06806 >)				
66807	当レコードなし)	>> #				
66809 K(変換波長子	ーブル表示>>[ノ	' — 14⊈:node.3]/				
08810入力	IF>-入力波長>	出力IP>-出;	力波長>	- 光パス104		
66811	>+>++ \81\>++	0.01)	·····	0./281064		
66813		0.012 - 61	·····	0.20100	迂回光パスカットスルー	-
668140x01	>58>>	0x000580	·····>	-0x281844		
66815	63	0.000 63.		01/261824		
りつドウ: N3,2点,rade点.la	• 通択:		「三神	+ + +		
90483行 1桁 9	048354) OOH.	.04H 3.614.329/	S.660.978/I'4	h i i		<u>ن</u>
90483 <mark>4</mark> 90484 《(挿入)波長宇	ーブル表示>>「ノ	- K&toode 614				
90485 出力	1F)・出力ラベル	••••••挿入波長4				
90486	>) 4				
904880x16	>0xd8086>>	62				
90489						
90490 K(変換波長テ 90491 3 力	ーブル表示>>L/ 1F>+1 力波長>++	'ード名:node_6」。 - サカ1F、サ	力波星〉			
90492	>>>>>>>>>>>>-))	>		汗回光パス終端	
90493	82	0,10,-62		.0./20100	之日九八八八八八	
001011				0.00104		
904940x01 904950x01)54)) /	0x15>593	····· ›····	0x281844		
90494 90495 90495)59))- 	0x16 - 63		0.281844 0.281824 0.401954		
90494 90495 910F79: N3,2,5, no de jã. lo	。 ● ● ● ● ●	0x15 - 59 0x16 - 65 0x17 - 69	[1]]	0x281844 0x281824 		
90494 90495 90495 90670: N3,2,8 pade,8.10 (CVR0scurrents and Set	c ▼ 遵択: ings¥e0171010 HIN	Ux (5) 59 Ux (6) 63 Ox (7)	rrentVFelder#TA	0.281844 0.281854 0.4601854 	nde fê leg	
90494 90495 90495 90495 90495 90494 90495 90494 90495 90494 90495 90494 90495 9049 9049	★ 運搬: tingx¥x0071010 HBK 00801547 907 スングテーブル。	0x15558 0x16 0-17 01Wy Decumenta/cu 3,603,282/ 表示》[/ 15名	rrent¥Felder*TA 6,660,97811*4 rrote 6 M	0-231844 0-251624 0-401854 	nede_6.leg	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90494 9049 90494 9049 90494 9049 9059 90	50 ■ 運択: impetV=0071010 HB 003015-70 マングテーブル ドレスン・先	0x15、-94 0x16、-65 0x17、-65 0x17、-65 0x17、-65 0x17、-65 0x17、-65 (x,603,282/ 表示ンレノード名: ノード番号)…元	「日田」 FrentVFolderTT 6,680,978IFイ node_61 ノード番号>	0.281844 0.281824 0.401854 	eede_≴lag ·····出力1₽>・出力ラペル≉	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90494 9049 90494 90494 90494 90494 90494 90494 90494 90494 90494 90494 9049 90494 9049	。 ■ 選択: inget¥007101040 00001747 マングテーブル ドレスン・先	0x15359 0x1659 01T59 01Wy Dec-wastr¥cu 3,609,922/ 表示》[ノード名: ノード番号ン・・元	「日本」 reartVFalderTA 8,660,978日 node_6 「 ノード部号)	0.28184d 0.281824 0.401853 	ede_ś.leg 出力JP>-出力ラペル& 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90496 90496 90591 80591 80597 80597 80597 80597 80597 80597 90597 80597 90597 80597 90597 80597 90597	・ ■ 選択: interVeO71010 HIK 00001547 30H イングテーブル ドレス> 先 1000160 20000 400	0x15359 0x1559 0x1759 017y Dec. vests Ver 3,600,2027 表示ンレノード名: ノード番号シー・元	「王 ³]神 TrentVFeiderTTA 8,680,97801 node_6]4 ノード番号)	0.231844 0.231824 0.40185 	ede_⋚ 出力テベルチ 	
90494 90494 90495 90791: W2,25,yack,5 ko 90391行 1桁 3 90391 (フォワーデ 90392 90393 マーデ 90392 90395 17 90395 17 90395 17 90395 17 90395 17 187 187 187 187 187 187 187	e ▼ 選択: inget¥e0071010.HIK 00315/2 30H イングテーブル ドレス> 先 inget¥e0071010.HIK 04555/2 104H	0x153-593 0x15-593 0x17-593 0114y Decementation 3,603,232/ 表示シレード名: ノード番号・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	「王王子」 reantVEnderTA 8,680,9780年 node_614 ノート電号) アート電号) ReantVEnderTA 8,680,9780年		node_6.leg 出力IP>-出力ラペル≉ 	
90494 90494 90495 9079: W2,25,yack,5 ko 90391行 1桁 3 90391 ベフォワーデ 90392 90393 マーデ 90393 17 1桁 3 90395 17 1桁 3 90495行 1桁 3 90455行 1桁 3 90446	e ▼ 選択: inget¥e0071010.HUK 00315分 30H イングテーブル ドレス>・・・・ ドレス>・・・・ た 04555分 00H 168.6.128 >	0x1530-593 0x16-593 0x17-593 001Wy Decement Ver 3,603,232/ 表示シレノード名: ノード番号・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2 2 3 3 4 reantVE dear TA 8,680,9780 4 node_6 4 7 — N 1 4 7 — N 1 4 8,680,9780 4 8,680,9780 4		sole_6.leg 出力下>-出力ラペルチ 	× 0 × 1 × 1 × 1 × 1 × 1 × 1
90494 90495 90495 90495 90491 90491 90491 90391 (フォワーデ 90392 90391 (フォワーデ 90392 90391 (フォワーデ 90392 90495 107 90393 (フォワーデ 90395 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90495 107 90595 107 90495 107 90495 107 90595 107 107 107 107 107 107 107 107 107 107	e ▼ 選択: inget¥e0071010 HIK 0031572 30H イングテーブル ドレス〉 先 inget¥e0071010 HIK 0455572 03H	0x153-593 0x16-593 0x17-593 0x17-593 0x14y Decement Var 3,603,282/ 表示シレノード名: ノード番号・一元 0x14y Decement Var 3,612,843/ 6)	1 19 1日 Trant V Folder TA 8,660,9780 イ 1004年6日 7 一下番号) 7 一下番号) 7 一下番号) 8,660,9780 イ 8,060,9780 イ 8)		sole_6.leg ・・・・出力下>・出力ラベル・ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
90494 90495 90495 90495 90495 90491 90491 90591 90591 (フォワーデ 90592 90593 90595 90505 90505 90505 90505 90505 905	■ 単 選択: inget¥e0071010 HB 0031570 30H イングテーブル ドレスン 先 inget¥e0071010 HB 00455570 03H 103.6.123 >	0x153-533 0x15-533 0x15-533 0x15-533 0x16-533 0x16-533 3,609,282/ 表示シレノード名: ノード者号)・・・・・ スード番号)・・・・・・・・・・ スード番号)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		0.281844 0.281824 0.401854 	nde_6.leg 出力下>-出力ラベル・ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90491 90495 90491 90391 (フォワーデ 90393 90391 (フォワーデ 90393 90393 10 90391 (フォワーデ 90393 10 90391 (フォワーデ 90393 10 90495 10 90495 10 90495 10 90445 9045 90	■ 単 選択: inget¥e0071010.HB 0031570 30H イングテーブル ドレスン・先 00455570 03H 103.6.123 > 	0x1530-533 0x15-533 0x17-533 0x17-533 0x18-533 0x18-533 0x19-533 支売シレノード名: ノード番号)・・・・ プード番号)・・・・ プード番号)・・・・ プード番号)・・・・ プード番号)・・・・ プード番号)・・・・ (3,612,843/ 6)・・・・		0.281844 0.281824 0.401854 	nde_6.log 出力下>・出力ラベル・ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90491 90591 90591 107 ± ワーデ 90391 107 ± ワーデ 90391 107 ± ワーデ 90391 107 ± ワーデ 90393 107 ± ワーデ 90393 107 ± ワーデ 90393 107 ± ワーデ 90395 107 ± ワーデ 90495 107 ± ワー 90495 107 ± ワー 9045 107 ± ワー 9045 107 ± ワー 905 107 ± ワー 9045 107 ± ワー 9045 105 105 105 105 105 105 105 105 105 10	■ 単 選択: inget¥e0071010.HB 0001570 30H イングテーブル ドレスン・先 00455570 008H 103.6.123 > 	0x1530533 0x157533 0x167533 0x167533 0x167533 3,609,282/ 表示シレノード名: ノード番号)元 01My Decementation 3,612,843/ 63			nde_fileg 出力下>-出力ラベル。 	
90494 90495 90495 90495 90495 90496 90496 90496 90496 90497 90496 90497 90496 90496 90496 90496 90446 90450 9	■ 単 選択: ingetVe0071010.HB 0001570 30H イングテーブル ドレスン・先 00455570 00H 103.6.128 > >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	0x1530583 0x157583 0x167583 0x167583 0x167583 (3,603,232/ 表示シレノード名: ノード者号)・・・・ ス 0x14y Dacament (4 3,612,843/ 6)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		0.231844 0.231824 0.401854 	ade_6.leg 出力IP>-出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90495 905917 905917 90591 407 ± 70 − 7 90591 407 ± 70 − 7 90591 407 ± 70 − 7 90591 407 ± 70 − 7 90591 407 ± 70 − 7 90595 90490 9049	■ 単語: ing: V=0071010 HB 00015か 30H イングテーブル ドレスン・先 004555か 00H 108: 6, 128 004555か 00H 108: 6, 128 00H 109: 6, 128 00H 10	0x1530583 0x15583 0x17583 0x17583 (3,603,232/ 表示シレノード名= ノード番号)・・元 (3,612,843/ 6)			nde_filer 出力IP>-出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90495 9053117 147 3 90391 4 9033117 147 3 90391 4 90391 4 90	■ 20071010 HIN 0001570 30H イングテーブル ドレス> 先 00455570 00H 108.6.128 > >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	0x1530583 0x15583 0x17583 0x17583 (3.603,232/ 表示シレノード名= ノード番号)・・元 (3.612,843/ 6)			nde_filer 出力下・出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90391 407 2 7 7 7 7 7 90392 90391 407 2 7 7 7 7 7 90392 90495 90	■	0x1530583 0x16583 0x17583 0x17583 (3.603,232/ 表示シレノード名= ノード番号)・・・元 (3.612,843/ 6)	Comparison of the second secon		nde_files 出力下・出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90391 30495 90391 30495 9	■	0x1530583 0x16583 0x17583 0x17583 (0x17583 (0x17583)			nde_files 出力下・出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90495 90391 30392 90391 90391 30392 90495 9	○	0x1530583 0x16583 0x17593 0x17593 0			nde_files 出力IP出力ラベルチ 	
90494 90495 90495 Professional Sectors 90391 90391 C-VDecoments and Set 90391 C-VDecoments and Set 90391 C-VDecoments and Set 90391 C-VDecoments and Set 90391 C-VDecoments and Set 90495 90495 90445 90455	・ マ 選択: ・ ・ 通択: ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	01 / 50 58 0 / 17 - 58 0 / 18 - 58 0		0.281844 0.281824 0.401854 0.401854 	nde_filer 出力IF>-出力ラベルチ 	

図 4-1-11 ノード5 障害時のバイパス光パスに、ノード4から6への トラフィックがバイパスされている様子

図 4-1-9 に示すネットワークトポロジにおいて、ノード4からノード6 に向かうトラフィックに着目する。ノード5 でノード障害を模擬的に起こし、バイパス光パスによる障害回避動作を確認する。図 4-1-9 において、ノード5 が障害となった場合、ノード4→1→2→3→6の経路で、バイパス光パスが設定される。図 4-1-11 に示すように、波長 59番を用いて、ノード4から1、2、3、6 までノード障害時のバイパス光パスが設定されていることが分かる。

その後、ノード5が障害のため、ルーティングプロトコルが動作し、ノード5を除いた ネットワークの再構成が行われる。すなわち、ノード4からノード6へ向うパケットは、 パケットラベルパス P-LSP が、ノード4→1→2→3→6の経路であることを確認する。これ を、図4-1-12に示す。ノード1、2、3のラベルテーブルが、図4-1-12に示すように なっており、ラベル値が0x00184 で P-LSP が設定されていることがわかる。ここで、P-LSP

の入出力の値は、異なっても良い。ここでは、同一の値となっている。

りつドウ: №2,2,5,rade,4.log ▼ 通訳: ▼ 1型 挿 🛛 手 井 録 🐱	
GVDocuments and SettingsVe0071010.HIKOVMy DocumentsVeurrentVFolderVTAOVinglementV_p3V1VN0_2_6_node_4.leg	_DX
18/315行 1桁 18/31570 30H //213,110//,354,225川イト 187315 K(フォワーディングテーブル表示))[ノード名:node 4]4	-
18/316 P・・・・・ IPアドレス>・・・・・先ノード番号>・・・元ノード番号>・・・入力IP>・入力ラベル>・・・・出力IP>・出力ラベル	
	<u> </u>
O'YDocuments and SettingsYe0071010 HIKOTMy DocumentsYolder(TTA0Yinglement) p3Y1YK8 2.6 node 4.log 19727012 182 [197270570] 004 17 216 44577 254 2250 [7]	
18787月 2182.168.6.255 > 6>>	
137376 1373777 137377777 13737777 13737777 13737777 13737777 13737777 137377777777 137377777 13737777777777	44
りつドウ: 100.2.6.yadw.j.keg 🔻 通択: 🔽 🌠 🏹 🛨 🕂 編品	
CVDocuments and SettingsVe0071010-HINO+My DocumentsVeurrentVFelder+TAOVinglementV_p3V1VN9.2.6 node_1.leg	
152306 - 1桁 152306742 30H 6,060,92676,136,2450 7	-
192307 P・・・・・ IPアドレス>・・・・・先ノード番号>・・・元ノード番号>・・・入力IP>・入力ラベル>・・・・出力IP>・出力ラベル・	
	Þ
CYDocuments and SettingsYe0071010 HINOTMy Documents/Courtent/YE0/Jer/TTADVinglement% p3/11/88/2_6 node 1 log	
152369192, 168, 6, 255 → 6>>	44
152370	
152372192,168,7,1 -> 7>>0>0>21>0>20000>>0>001>0>0000>0>0000>0>0000>	ů i
90/F9: №2,26 produc,2.log ▼ 通訳: ▼ 国 揮 ▼ 手 田 福昌	_
C VDocuments and SettingsVe0071010 HINOYMY DocumentsVeurrentVFelderVTAOVinglementV p3V1VN9.2 in node 2 log 20251277 187 202512542 Statements 2 and 3 a	-D×
200517 パフォワーディングテーブル表示>>L/ ード名:node_2]4	
206518 IPアドレス>先ノード番号>元ノード番号>入力IP>-入力IP>-入力ラベル>出力IP>-出力ラベル& 206519	-
	E Ini vi
206581行 1桁 2065815-7) 00H 8,208,871/8,342,204/1 ⁻ /ト	- 44
200580 [192,168,6,255) 6)1)0,01]>0,001[2]>>	14
りつドワ: №2,25,node,3.log ▼ 通訳: ▼ 112 挿 手士 録品	
CVDocuments and SettingsVe0071010.HUNOVMy DocumentsVeurrentVFolderVTAOVinplementV_p3V1VN0.2.6_node_3.log	_DX
133815行 1桁 133815742 3CH 5,614,980/5,714,138/F/ト 133815 探フォワーディングテーブル表示33 ノードタ-roode 3 4	-
100010 PTアドレス>・・・・・先ノード番号>・・・元ノード番号>・・・入力IP>・入力ラベル>・・・・・出力IP>・出力ラベル4	
1000 I/I p	<u> </u>
C4Documents and SettingsYe0071010.HDN0TMy DocumentsYcurrentYFolder#T40YinplementX_p3Y11N8_2_6_node_3.log	. DX
13867月丁 時1135877777 05H 5.618.342/5.714.1980「小 138675 192.168.6.255 > 6>>	
199976 元 0.011 0.00122 元 回对家 LSP 通常 Forwarding	24
138678 0.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.00	4
ウクドウ: N9.2.6.rade.6.log 🔽 通訳: 🔽 🖾 🏧 🏧 🌉 📮 平 🔤 层	
C*Documents and SettingsVe0071010 HINOKMy DocumentsYcurrentYFelder#TA0YimplementV_p3Y19N9_2_6_node_5.log	
E GYDecoments and Settings/GUD/10101000197 Decoment/Fourient/Federati/Complement/port108020.nede_5.lec 162706行 1727-077-078-0797-0710-08417,3417,3417,3417,3417-01 182706行 172-177-7797-0710-0710-08417-094-054	-

162708	162707 - 「アトレス/ 先ノート御号/ 元ノート御号/ 入力に/入力フヘル/ 田力に/田力フヘル/		
C **Documents and Settings*/s077010.HIN0***y Decompet/*strent*/Fabler*TA0*inghament*.p3*1*** 2.6.mode 5. bs 1627657 167 168.6.255 > 65> 7>>0.601>0.601877>0.500>0.60000>>0.601874 162769322,168.6.255 > 65> 7>>0.601>0.60187>0.5000.60000>>0.101884 1627693>> 9>>0.601***0.601***0.5000.601834 1627693>> 9>>0.601***0.601***0.5000.601834 1627693>>>> 9>>0.601***0.51>0.60000>>0.101834 1627693>>>>>>>>	162708		,
C ¥ Documents and Settings ¥ell 71010 HillsOf My Decement ¥ convert ¥ index 1760 Ving benent ¥ p371 ¥82,2,4 and c.4 bec 162765 1 16 1627657-0 00H 6,420,55376,513,654 // 1 162769			
162765行 1桁 162765分 03H 8,420,533/6,518,66411'/h ▲ 162765 112,168,6,255 6>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	CVDocuments and SettingsVe0071010.HDNOVMy Decuments/SeturrentVFolder/TAOVinglementV_p3V1VM9_2_6_mode_6.log	_10	X
162759192,168.6.255 > 6>> 7>>0x00>>0x000>>0x101874 162760>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	162765行 1桁 162765ティン 03H 6,420,588/6,518,684川'小		-
162760 >>>>> 8>>0x00>0x50>0x500>0x101884 162761 >>>>>> 9>>0x00>0x50>0x500>0x101834 162762 >>->->->->->-> 1>>0x01>0x51>0x500>0x0003>0x01834 162763 >>->->->->-> 1>>0x01>0x0182>0x51>0x50000>>0x01824 162763 >>->->-> ->>-0x01>0x01824 162763 >>->->-> ->>-0x01824 162763 >>->->-> ->>-0x01824 162764 >>->->-> ->>-0x01824 162765 >>->->-> ->>-0x01824 162765 >->->->->-> ->>->>->	162759 192, 168, 6, 255 > 6>> 7>>0x00>0xb0187>>0xb0000>>0x101874		
162761 162762 162762 102763 102763 102764 102764 102765 1027	162760 ····>···>···>···> 8>>···0x00 ···0x1088>>···0x10188*		
162762)>>>>>>>> 1>>0x601>0x51>0x50000>>0x00181& 162763)>>>>>>>>>>>>	162761>>> 9>>9x00>0x50189>>0x50>0x500>0x101894		
162764	162762 >···>···>···>···>···> 1>>···0x01>···0x01>···0x0181>		
162764	- 162763 [>>>>>> 2>>0x01>0xb0182>>0x51>0xb0000>>0x001824 迂回対象 LSP 通常 Forwardin	e la la	
182705)····>···>···>···> 4>>···0x01>···0x01>···0x51>···0x50000>>···0x001844	162764		
	162765 ····>···>···>···>···>··· 4>>···0x01>····0x0184>>···0x51>····0xb0000>>···0x001844		

図 4-1-12 ノード5 を除いたネットワークトポロジ再構築の結果

さらに、その状態で、ノード2に障害を発生させた。この結果、ノード1から4→7→8→9→6→3までバイパス光パスが設定されることが、図4-1-13に示されている。すなわ

ち、光パス ID が、0x080c1 で、波長 63 で、バイパス光パスが、南周りの経路で設定され ていることが分かる。ノード 4 からのパケットは、P-LSP でノード 1 に向う。そこから、 0x080c1 の光パス ID を持つバイパス光パスで、ノード 3 までカットスルーされる。ノード 3 からノード 6 への P-LSP により、ノード 6 ヘパケットが出力されている。

りつドウ:	N9,2,8,	nade "4. l	log .		匯択:			T	「挿	+ +					
C-VDo	cuments	and Se	ttings¥	e00710	10.HINO	TMy D	currente	Vourrent	#Folder#T	A0Vinplener	18_2_3V1VN9_2_8	Loode_4.log			_DX
2009	97行	1桁2	100997	34 2 -	SCH		7,661,3	76/9,32	9,321/11	仆					-
200667		•••• IP	77 <u>7</u>	77	- <u>- / ル</u> 象 - 先/	<u>1-1-1-1</u>	レノー・N- 11号>・・	<u>日-100e</u> 元ノー	 - 「 雷号>	入力IP	•·入力ラベル)	>·····出力Ⅱ	>・出力ラベル4		
200999	þ			>			>		·>)		»	······		
CVDo	cuments	and Se	ttingsV	e00710	10.HINO	TMy D	currende.	Vourrent	/Folder#T	Winglener	1.V_p3V1VN9_2_6	Loode_4.log			
2010	58行	1桁	01058	31 0	OSH		7,664,7	11/9,32	9,321/11	4F		迂回対	まLSP 通常 Fo	rwarding	-
201057))	192	2,168,	6.255	> 6))))	- 0) - 4)	···> ···>	0x40>	-0xf0000>>-	····	0-00184>>	0	4
201059	p	192	. 168.	7.1	2.1))	- <u>0</u>		0x21>	-0xd0000>-	05012-	0x000000	050000	
_	_		_		_	_	-	_	_						
ウロドウ:	N9,2,8,	nadej.	log –	7	置択:			V I	「挿	+ +	100 E				
C-VDo	cuments	and Se	ttings¥	e00710	10.HINO	TMy D	ecuments	Vourrent	/Folder#T	AOVinplener	a,2,001¥8q,¥1	Lnode_1.log			
166074	1741 <u>-</u> KK 7 8		166074	742 グテー	- ブル港	示シ	5,524,4 7 — B	41/7,36 名:node	0,798/1 2134	11					-
166075	2	•••• 1P-	アドレ	72	- 先/	- 13	新号>・・	元ノー	下番号>	入力IP	入力ラベル	>出力]F	・出力ラベル		
<												,,	,		-
G.VDo	cuments	and Se	tting:/V	e00710	10.HINO	TMy D	icumonte	Vourrent	/Folder#T	AOVinplener	م_2_8V1VN9_2	行同业	パス向け For	warding	_DX
1661	241	105	1661 24 2.169	s./\ 8.0	2		5,527,1	72/1 3	n, Mella	25 − − 0 √760 − −	-0w80000	0,10	Ov/80a122	0.00000	
166125	P	102	. 168.	3.1	23		}	- 02		0,70	-Unctud///	0x102	Undered 122	040000	
166126	þ	192 192	2. 168. 2. 168	3.128 3.755	> 3))))		· 0)		0x30>	-0xa0000>	0x00> 0x76>	0xa0000>>	0,0000	4
166128	þ	>		>				- 7>		0x01>	-0x000c7>>-	0x76>-	0xb00c7>>	0x000c7	4
166129 166130	B							- 0		0x40>	-0xt0000>>- -0x000c1>>-	0x76>-	0xt0000>	0.00000	4
166131	2	••••192 192	2.168.	4.1	≥ 4			· 0		0.21>	-0xc0000>>-	·····0x01>	0xc0000>>	0.00000	
166132	þ	192	2. 168 2. 168	4.128 4.255	> 40			2			-0xa0001222	0x01>-	0x300003>	0x10102	2
166134	<u>}</u>							- 3)		0x00)	-0x10103>>-	0x01>	0xb0103>>	0x10103	4
166135	Ş							. ₀		0x40>	-0xf0000>>-	0x01>-	0xf0000>	0x00000	1
166137	<u>}</u>	····>·· ····192	162	> 6 1	$\sim \sim \sim \sim$			- 1>	···>····	0x40>	-0x10101>>	0x01>	··0.60101>>··	0x10101	<u>:</u>
166139		195	100	6.128				<u> </u>			-000003	<u> </u> 上回对	R LSP 美宋 F0	rwarding	
166140) D	192	2.168.	6.255	> 6	·····))	- 4>	>	0x01>	-0x00184>>-	0x76>- 0x002	0x00184>>	0,00184	
166142	þ		100	Ş				- 12		0x400	-0x00181>>-	0x76>-	0x00181>>	0x00181	4
りつドリ:	N9,2,8,	nadej.l	log		置択:			v I	河挿	++					
16615	58년	雨日	661585	9D -	000.0	WH B	.529.04	4/7.38	0.798/I ¹ 4	仆					1
166158	<mark>●</mark> K4種入	波長テ	ーブ	し表示	»D-	一ド名	:node_1]4							
166160	2	出ナ	ז IF>+	出力ラ	~JLZ-		和入波長	4					迂回光パス挿	λ	
166162		0x1	6>()d90c	1>>	6	34	-							
166163	् र र राज्यके	法主要	= → 1	1 ==	oot ze	- 12/2	inoda 1	٦.							
166165			j IF>-)	し返小 人力波	長)		indae_1 it力IP>-	」。 出力波	<u>چ</u>	光(ス)	04				
166166 166167	<u>}</u>	-050	> 0>6	89		0	>- 501>	69)		0xf00/2	-4				
166168	þ	-0.0	1>	s)		···· 0	x16>	63>		0x18043	4				
166169 166170		0x0 -0x1	1>6 6>6	80 30	···)····	0	k01>····	69) 63)	···)·····	0xf0042 0x080c1	4				
108171					ation.				to lam		TO DO				
20110	NA 2.8.	145 D	0110/-			NH D	667.65	7/9.22	9 2210 ¹		REC CAR				
201104		100		17	CONTROL OF			110102	STATE OF STREET						
201105 201106	《挿入	波長テ 出ナ	= ー ブ) ⊐ 1E>-5	し表示 セカラ	シ[ノ- ベルン・	-ド名 #	:node_4 €3 波星]4							
201107	þ	ш <i>у</i> .			>-			4							
201108 201109	2		組し	- H	なし>>	4									
201110	ৎক্সাঞ্চ	波長方	ーブ	し表示	22U-	- ド名	:node_4]#		NR 1 - 1					
201111			JJE>-,	く力波	5		1711F>-	出力渡	F.)	光バス」	04 - 4	迂回	光パスカット	スルー	
201113		0x0	0)(3)	>	0	x01>	63)	>	0x080c1	4				
201114	Ş	0x0	p(ý	>	0	wi)	63)	>	0x18043	4				
201116	2	0x0	1>(9)····		0	bd00>	69>		0xf0042	*				

10007 THE 10012-0 10000 127/225.5580 // 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 1 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) THE 2017 - 70.88(3) 10007 THE 2017 - 70.88(3) THE 2	130312行 1枚5 13031254) 00H.04H 5.060.512/7.328.938川小小 130312 # 130312 # 180318 & (は長い注意ディーブル 表示2011 / 一 5.4 reads 7.14	
1000 $\psi_{12} = \psi_{12} = \psi_{1$	190312 p 191313 (2)ほん 注意テーブル表示2)[フードタ-made 7]#	
1381 1382 1383 1383 1383 1383 1383 1383	130314 130315 130315 130315 130315 130318 130318 130318	
1000000000000000000000000000000000000	193317 193318 193318 19339 19339 19339 19350	迂回光パスカットスルー
101212:00.23,00.43,1kc 1	130322	
15:001 15:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001 5:002 10:001	うつドウ: N9,2,3,racks.9.log 🔻 選択: 🔽 🗐 挿 📑 🕂 🌆 👼	
193.2 編長テーブルま示>[1]- ドるいods.3]# 193.0 「「「」」」」」 193.0 「「」」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」 193.0 「」」」」」 193.0 「」」」」」 193.0 「」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」	153503行 1桁 153503ライン 00H.04H 15.845.925/8.315.458川イト 153503 日	×
15500 (雪焼菜魚子・フリ、赤アンビード名:rode.82 日日	153504 153504 153505 出力IF>+出力ラベルシーー・挿入波長4 153506 153507 153507 53508 4	
10000 0001	155500 <(変換波長テーブル表示>>[ノード名:node_8]4 155510入力IF>-入力波長>出力IF>・出力波長>光/(スID4 155511	迂回光パスカットスルー
00131 1023.rade3 bit ● 10111 ● 1011 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 10111 ● 1011	155513 155514 155514 155515	
10724年 16 107245 004.044 4.572.002/0.855.7710.4 4 10724 (43,28,27 - 70,273)) ()つドウ: N9,2,3,rack.9.log 🔻 選択: 💌 部 🍽 🔰 🕂 🔛 🔚	
1012 (祥入波長テーブル表示シレード名:rode.9.)# 1012 (祥入波長テーブル表示シレード名:rode.9.)# 1012 (弦雄法長テーブル表示シレード名:rode.9.)# 1013 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11672447 146 116724545 00H.04H 4.572.602/6.855.771/J*45	×
10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_9] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_9] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_9] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_9] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_9] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_6] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_6] 10000 (医油皮素子・ブル素示)/レード名:node_6] 10000 (Sub Addresse) 10000 (Sub Addresse	116724 ¢ 116725 <4挿入波長テーブル表示>>[ノード名:node_9]4 116728出力IF>:出力ラベル>挿入波長4 116727	
18630 (空境波展テーブル表示>) レード名:node_9]4 迂回光パスカットスルー 18630	116728	
1672 0.00	116729 116730 116731 116731 116731 116731	迂回光パスカットスルー
10730	1167330.000>63>>-0.01>63>>-0.080c14	
10101:10023.00±3.54g ● 図 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 押 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 門 ● 目 □ ● 日 □ ● □	1167350x180434	
1737205 161 173720570 101.044 8,783.921/8,483.500/0.4 ▲ 173720 (14) 次度只テーブル表示>)[/ - F3:node_8]4	116/35 2······0x012····832·····2>····0x002···6322····2>·····0xf0042# 	
17372 (挿入波長テーブル表示>)[/ - ド名:node_8]4 17372 (雪換波長テーブル表示>)[/ - ド名:node_8]4 17372 (一、0,00) 63)	116788 0x012 680 0x012 680 0x002 680 0x100424 116787 0 2016 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	
1/3/26 「変換波長テーブル表示ジレノード名:node_6.4 173722 ······· 入力IP··入力波長)······· 出力IP··出力波長)······· 光/(ス104 迂回光パスカットスルー 173723 ······· ひのひ···· 63 ······ ひの口)···· 63 ······ ひのののし 173723 ······· ひの口)···· 63 ······ ひの口)···· 63 ······ ひのののし 173723 ······· ひの口)···· 63 ······ ひの口)···· 63 ······ ひののし 173723 ········ ひの口)···· 63 ······· ひの口)···· 63 ······· ひの 173723 ··································	1167337 1167337 9(-)ドウ: W9.2.9.mode.5.log (1167377 173720日 14行 [1737205-()] 00H-0.4H [6.783.921/8.483.502/ビイト 173720日	
178782 0000 - 63 0001 - 63 0000 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 0001 - 63 0000 - 63 0010 - 63 178783 153136 15313670 0001 - 63 0010 - 63 153137 15116 15313670 001 - 63 15314 153143	116.535 116.737 116.737 117.720F 177.720F 177.720F 177.720 177.72	
1/5/13 1/5/13 1/5/13 1/5/13 1/5/13 1/5/13 1/5/14 1/5	116.783 116.783 116.783 116.783 116.783 117.720 177.720	► 迂回光パスカットスルー
9 (Fig. 10) 9 (Fig. 10) 153136 (153136 (153136 (153137 ×(平大波長テーブル表示≫[/ード名:node_3]4 153138 (153138 (153148 (1	116.535 116.737 116.737 116.737 10.01 ¹ 83 0.00 ¹ 83 0.00 ¹ 83 0.00 ¹ 83 0.00 ¹ 84 117.720 ¹ 147 17.7205-0 00H.04H 8.783.921/8.483.5020 ¹ -h 17.7320 4 17.7320 4 17.7320 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7322 4 17.7324 4 17.7324 4 17.7325 4 17.7326 4	迂回光パスカットスルー
153138行 16 153138行 16 1531387 (1531387) (001.041 8.075.5592/6.882.8190 ⁻¹ /4 153138 (147)/26 (147)/26 (147)/26 (147)/26 (147)/26 (147)/26 153138 (147)/26 (147)/27 (147)/27 (147)/27 (147)/27 (147)/27 (147)/27 153149 (158)/16 <td>116:38 116:727 116:727 116:727 117:727 177:720 1</td> <td>★ 迂回光パスカットスルー</td>	116:38 116:727 116:727 116:727 117:727 177:720 1	★ 迂回光パスカットスルー
153130 (4年入波長テーブル表示))[ノード名:node_3]4 153130 (4年入波長テーブル表示))[ノード名:node_3]4 153130 (1カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ)(カ	116.535 116.737 116.737 116.737 116.737 178720	迂回光パスカットスルー
153140	116.535 116.757 116.757 10.012 B3 prode.6.bg 2 延振: 1 10 押 + + 中語 173720 1 新 1737205-0 00H.04H 8.783.921/8.483.5020 小 173720 4 173720 4 173720 4 173720 4 173722	迂回光パスカットスルー
153142 「空狭波表テーブル表示シレノード名:node_3」4 153143 入力ボラー入力液長シーーー・出力派長シーーー・光/(ス.104 153144 迂回光パス終端 153145 0x00063シーー・シーーの(80)0x080c14 153146 0x00063シーー・シーーの(16)63シーー・シーーの(80)-c14 153147 0x0063シーー・シーーの(16)63シーー・シーーの(50)63シーー・シーーの(50)63シーー・シーーの(50)	116.535 116.757 116.757 117.720 177.720	迂回光パスカットスルー
153144 0x0063 0x080c14 153145 0x01063 0x080c14 153145 0x01063 0x080c14 153147 0x01063 0x080c14 153147 0x01063 0x080c14 153147 0x01063 0x080c14 153147 0x01063 0x01063 153148 0x01063 0x01063	116.53 116.737 116.737 116.737 116.737 117.720 1	迂回光パスカットスルー
153146 153147 153147 153147 153147 153148	116.83 0.001> 630 0.000> 630 0.002<	迂回光パスカットスルー
	116.53 116.757 116.757 117.720 17.720	迂回光パスカットスルー

りつドウ: N9,2,8,rode,3.log		通択:	T	印挿	++				
C#Documents and Setting	;z¥e0071	1010. НІКОТМу	Documents¥curre	ent¥Folder¥	TAOVinplene	ەر 2_2_W1VN9	de_3.leg		
153026行 1桁 1530	265イン	SCH	8,069,166/6	,882,819/	1715				
153026 谷フォワーディ	<u>ングテ</u>	<u>ーブル表示</u>	<u>>>[ノード名:nc</u>	ode_3]/	No. 1 + 10		and the second		
153027 IP / 1- 153028	U / 2*	先/-	ト 番号/ ・ 元 /	一下型号	>X711F2	~JJ~~U/	出力正	出力ラベル	
x									<u> </u>
C-¥Documents and Setting	s¥e0071	IOTO, HINOTMY	Documents¥curre	ent¥Folder#	TAOVinglene	nt¥_p3¥1¥N9_2_8_no	de_3.loc		
153073行 1桁 1530	7354)	09H	6.071.758/6.	.882.819/	l'AN 👘				
153066 192.16	8.3.12	8 > 3>++	··>···· 6		0.000	-0.a0000>>	0.30)	0xa0000>>	0.00004
153067)()()	0x000	-0530000>>	0x30	-0x30000>	0x000004
153069			-Ś ĵi		0x01>	-0xa00000>>	0x30)	0xa0001>>	0x000004
153070			-> 2		0x01>	-0xa0000>>	0x30)	0xa0001>>	0x000004
153071			>)))	0,01>	-0xa0000>>	迂回光	パスより Forw	arding 🚽
153073	>)	-> D)	0x16>	-0xd80c1>>	0.86>	(0008000)	0x000004
REAL CONTRACTOR					il a lite		116-116		
りつドワ: N3,2,3_rocks,3.log		遥 択:		聊挿	+ +	100 000			
C#Documents and Setting	;s¥e0071	IOTO HINOTMy	Documents¥curre	ent¥Folder¥	TAOVinglene	on_8_2_3¥1¥N9_2_8 o	de_3.leg		
153026行 1桁 1530	285-72	SCH	6,069,166/6	,882,819/	17F				
153026 ベフォワーディ 193027	<u>ングデ</u>	<u>ーフル表示</u> 生 / ニ	<u>>)レード名:nd</u> ド新星、 ティ	ode_3. <mark>//</mark> 		1 + 5 < 1 >			
153028			>>		······				
× _									Ľ
G VDocuments and Setting	seVeOO71	IOTO HINOTMY	DocumentsVcurre	ent¥Folder#	TAOVinplene	nt¥_p3¥1¥N9_2_8_ne	de_3.log		_ [D] ×
153091行 1桁 1530	91542	OSH	6,072,723/6	,882,819/	i'rh				
153089 192, 16	8.6.25	5 > 6>	>)) \\\	0x01>	-0x00181>>	迂回对象	kLSP 通常 For	warding 📕
153091	>)))	0x01>	-0.00184>>	0x00)	0xb0184>>	0x001844
EDGT07									
りつドウ: N3,2,3 ,vade,6.log	7	通択:	•	10 挿	+ +	HC CO			
C#Documents and Setting	;z¥e0071	IOTO HINOTMy	Documents¥curre	ent¥Folder¥	TAOVinplene	ەر 2_2_3¥1¥N9 م.	de_6.log		
173817行 1桁 1738	175-0	SCH	8,777,902/8	,483,502/	171				-
173817 ドフォワーディ	ングテ	- ブル表示	>>[ノード名:nx	ode_6]/	Aug. 1 ± 10	1 +			
173618 173619	U / / ·	先/-	ト 番号/ ・ 元 /	一下面号	>>		出力正	出力ラヘル	
•									E
C#Documents and Setting	s¥e0071	IOTO, HINOTMY	DocumentsYourn	ent¥Folder#	TAOVinglene	nt¥_p3¥1¥N9_2_8_no	de_6.lee		_ [D] ×
173676行 1桁 1736	76545	09H	6.781.143/8.	483.502/	17N				2
173670 192, 16	8.6.25	5 > 6>…	··?····· 7	·····>···	0.00>	-0. 6 0187>>	0.50>-	-0.40000>>	0x101874
173671	>	>	>))))	0x00	-0.60188>>	0,50	0.600000	0x101884
173673	>	>) 1)	····›	0x01>	-0xb0181>>	0.51>	-0.4.0000	0x001814
173874 >>			··>····· ź		0x01>	-0.±0182>>	计回动名	き ISP 通堂 For	warding 24
173675				···· ›	0.01>	-0.4018233			
173676			4	,,	0.01)	0x10000	0.0012	02100007	0:0001844

図 4-1-13 ノード2 障害時のバイパス光パスに、ノード4 からノード6 へのトラフィックがバイパスされている様子

4-1-5 光ネットワークアーキテクチャのまとめ

ラベルスイッチルータ(LSR)とフォトニッククロスコネクト(PXC)を組み合わせたノ ードを用いて、従来の MPLS ネットワークに光パスネットワークをアンダーレイする新しい ネットワークアーキテクチャを提案した。通常の状態では、MPLS ネットワークとして動作 する。パケットラベルスイッチパス(P-LSP)上を流れるパケットトラフィックが増加した 時に、P-LSP を負荷の軽いノードを通るように移すのではなく、P-LSP と同一経路に光パス を設定して、移すことにより輻輳を回避する。この輻輳を回避する光パスの設定には、高 速で安定に波長を変えることができる光源が必要となる。また、コンベンショナルな光フ ァイバ増幅器の有限な波長帯域 30nm で、出来るだけ高密度に波長チャネルを多重するため の光変調技術も重要となる。

本研究の開始時点で設定した最終目標値は、以下の通りである。

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

制御用パケットを転送するデフォルト波長を含めて 70 波長を、自由に選択して光パスを 設定できるパス設定手法を確立した。また、ネットワーク側の入出力インタフェースは、 40Gbit/sの速度で、最大 70 波長まで多重できることを想定した。また、ノード数が 16 ノ ード以上で、モード 8 の接続まで可能なメッシュ状のネットワークを構築できる。ダイナ ミックルーティング 0SPF により、自動で経路テーブルを作成することが出来るために、シ ミュレータ画面上で、ノードの自由な接続が可能となった。16 ノードのネットワーク規模 で、70 波長、40Gbit/sのデータパケットを転送することが可能であるため、ネットワーク のトータルスループットとして約 50Tbit/s を超える規模のネットワークをシミュレーシ ョンすることが可能である。

さらに、ネットワークを構成する任意のリンクやノードに対して障害を起こし、瞬時に プロテクション動作が開始され、サービスが継続される機能を、ネットワークシミュレー タに盛り込んだ。本機能は、障害を受けたリンクやノードに隣接したノードの間だけにバ イパス光パスを設定するため、パスプロテクションなどと違って、障害の通知を限定でき るために、非常に高速に迂回を行える特長を有している。また、プロテクションの後に、 OSPF による経路再計算を行うことにより、常にコストが小さい経路を選択することが可能 である。もちろん、輻輳を回避することも常に行われる。

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 部を光スイッチと光合分波器対により構成し、受信信号品質の評価により光 ADM 部のチ ャンネル切換動作を確認する。

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源に 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換する光源を 0.8bit/s/Hz波長多重信号へのAdd信号源として用い、光ADM部のチャンネル切換と光源の 波長切換を同期させ、伝送実験により各チャンネル信号の受信信号品質を評価する。

これらの評価によりチャンネル切換の機能確認を行い、反転 RZ 変調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 反転 RZ 光信号による 1.0bit/s/Hz 超の波長多重伝送

伝送路内に複数の光 ADM 部が存在する場合、波長多重光信号が ADM 部を通過する際には 光信号帯域が狭窄化され、受信特性が劣化するおそれがある。このため、複数の光 ADM 段 を用いた光ネットワークに対しては、多段フィルタリングによる帯域狭窄に強い変調方式 を採用することが重要である。ここで注目している反転 RZ 光信号は、2-1-2節に記載 したように反転パルスの前後で光位相が反転するため、透過帯域幅が狭い光フィルタを通 過しても、アイ開口度劣化が少ないという特徴がある。反転 RZ 光信号が複数段の ADM 部を 通過可能ならば、送信部において光フィルタにより信号帯域を削減し、光周波数利用効率 1.0bit/s/Hz 以上の波長多重化に対しても、エラーフリー伝送が可能なはずである。

そこで、40Gbit/s 反転 RZ 信号に対し、ビットレート周波数より小さい透過半値全幅を 有する光インターリーバによって帯域狭窄化し、37.5GHz 間隔にて波長多重伝送する実験 を行い、200km 伝送後の受信信号品質を評価する実験を行った。図4-2-1に実験系を 示す。37.5GHz 間隔 CW 光源(32 台)を偶・奇チャンネル毎に合波し、それぞれ push-pull



強度変調器に導いて反転 RZ 変調を施す。2 つの変調器出力を 75.0/37.5GHz の光インター リーバ (FWHM: 29.5GHz) にて帯域抑圧・合波する。 2 つの変調器は同一の差動 40Gb/sNRZ 信号対により駆動されている。偶・奇チャンネル間のビット相関を解消するため、偶チャ ンネル側に 15cm 長の SMF を追加した。32 波信号の偏光方位は偏光子により一括して揃え た。この後、EDFA(出力光強度:-1.7dBm/ch)と 50km の通常分散ファイバと分散補償フ ァイバ(-850ps/nm)による中継区間を4段通過させた。200km伝送後、WDM信号は37.5/75.0G 光インターリーバと 0.3nm 波長可変フィルタにより波長分離される。

図4-2-2に32波WDM 信号の光スペクトル、図4-2-3に各チャンネルのQ 値測定 結果を示す。39.813Gb/s (PRBS: 2²⁰-1) 信号を 200km 伝送時にも全チャンネルでエラーフ リー特性(Q>17dB、FEC 無し)を確認した。0km(B-B) 伝送時と比較するとQ 値劣化量は 2.0dB 以下であった。従って、反転 RZ 信号は帯域狭窄に強く、1.0bit/s/Hz を超える高密 度波長多重伝送にも適用可能であることが判った。





4-2-3 反転 RZ 光信号を用いた 0.8bit/s/Hz 光 ADM 部の検討

光ネットワーク内の光ノードでは、光合分波器や光フィルタなどを用いて波長多重信号か ら所望のチャンネル信号を分岐・挿入する ADM 機能が求められる。従って、光ノード数 が増大すると光ノードを通過する光信号に対しては、光信号帯域が抑圧され伝送特性の劣 化するおそれがある。そこで本節では、光周波数利用効率 0.8bit/s/Hz の波長多重信号から 所望のチャンネル信号を分岐・挿入する光 ADM 部に関して検討する。

まず、光 ADM 部の透過特性について注目する。図4-2-4には ADM 部のブロック 図(a)と透過特性(b)を記した。インターリーバ(INT)では、波長多重信号を偶・奇チャン ネル信号毎に波長分離する。INT からの偶・奇数チャンネル信号は、それぞれ可変波長フ ィルタ (ADMF) により Drop・Add・Through される。2 つの ADMF 出力はカプラ (C) により合波され、再び 0.8bit/s/Hz の波長多重信号となる。なお、図 4-2-4(a)の構成 では、Through 信号の光帯域が実質インターリーバにおいてのみ抑圧されるため、光 ADM 部通過による光信号の帯域抑圧は少ないことが特徴である。

次に、図 4-2-4(a)の構成の光 ADM 部を光周回路内に導入し、Through 信号の伝送実 験を行って受信誤り率を評価し、光 ADM 部の許容通過段数を調べた結果を記す。図 4-2 -5 は 0.8bit/s/Hz の波長多重信号源の構成である。 偶・奇数チャンネル用の 16 波 100GHz



図 4-2-4 (a) 光 ADM 部の構成 (b) Drop/Add ポートの透過スペクトル (上) と Through ポートの透過阻止スペクトル (下)



図 4-2-5 0.8bit/s/Hz 波長多重信号源の構成

間隔の光源を MZ 光強度変調器により一括して反転 RZ 変調を施す。2 つの光強度変調器 出力を光ファイバ増幅器 (EDFA) により増幅した後、カプラによってそれぞれ2分岐し、 一部は光 ADM 部に分け、残りは100/50GHz の光インターリーバ (INT:各チャンネル 信号に対する透過半値全幅 45GHz、透過スペクトル曲線はほぼ3 次ガウス型)により 0.8bit/s/Hz にて波長多重する。その後、長さ4km の通常分散ファイバの色分散(+ 68ps/nm)を利用して、各チャンネル信号間でのビット相関を解消した。

図 4-2-6(a)は、光周回伝送実験系を示すものである。周回伝送路は、25km 通常分散 ファイバと-425ps/nm 分散補償ファイバによる遅延線、3 台の EDFA、偏波コントローラ (PC)、光アッテネータ(ATT)、カプラ(C)、2 台の音響光学(AO) スイッチ、そして、 図 4-2-4(a)の光 ADM 部から構成されている。光 ADM 部内に設置された 2 台の ADMF の同調波長を設定し、32 波信号の内の 20、25 番チャンネルを常に Add/Drop した。ADMF の δ f1 と δ f2 は、それぞれ 56GHz と 103GHz である。また、波長可変フィルタ(透過半 値幅 35GHz)を用いて周回路から出力される波長多重信号から所望の 1 波を抽出し、光受 信器にて受信した。さらに、2 台の AO スイッチの ON/OFF 駆動する差動ゲート(gate) 信号対の周期とデューティを調整し、周回数毎の Through 信号の受信誤り率を評価した。

図 4-2-6(b)は、周回数 1 と 10 の場合の周回路出力における光スペクトルであり、図 4-2-6(c)は、周回数 (Loop Circulation number; LCN) と各チャンネルの受信誤り率 (BER)の関係である。信号のビットレートは 43.018Gbit/s (PN:23 段) とした。周回数 10 の場合、光 SN 比の最小値と Through 信号スペクトルの半値全幅の平均値はそれぞれ 20dB, 25GHz であった。このとき、誤り訂正 (FEC) を適用時の許容誤り率を 3×10⁻³[13] と仮定すれば、全チャンネルを伝送可能であることが判った。



図 4-2-6 (a)光 ADM 部を含む光周回伝送系の構成、 (b) 周回数1(左)と10(右)における周回路出力の波長多重信号の光スペクトル、図中の点線部は Add 信号を入力しない場合の光スペクトル、 (c) 周回数(LCN)と受信信号の誤り率(BER)の関係

4-2-4 光スイッチと光合分波器対による光 ADM 部と波長可変光源による光ノード部の機能確認実験

この節では、図 2.2 の光ノード部に関する光 ADM 機能の確認実験に関して記述する。 図4-2-7に実験系を示す。偶・奇数チャンネル(100GHz)間隔16波の波長多重光源を それぞれ 43.0183Gbit/s (PN23 段) の反転 RZ (Inv-RZ) 変調を施し、光インターリーバ (INT) により 0.8bit/s/Hz にて波長多重する。偏波スクランブラ(Pol. Scrambler)により波長 多重光の偏光方位を不定とし、およそ 50km 間隔にて EDFA による中継伝送を行う。伝送路 の総距離はおよそ 210km である。伝送路中央には偶・奇チャンネルの波長分離用の光イン ターリーバ(Int)、偶・奇チャンネル用の光合分波器(計 4 台)、2×2 光スイッチ(計 8 台)、光カプラ(C)による光 ADM 部を設けた。図 2.2 に示す光ノードをデモするため、「高 速波長制御技術の研究開発」で開発した中点保持型水晶エタロンによる波長ロッカーによ り、50GHzの光周波数グリッド上で高速の波長切換が可能な SG-DBR レーザを波長可変光源 として用いた。SG-DBR レーザの発振波長は、波長コントローラにより一定時間毎に隣接 8 チャンネルに設定した (図 4 - 2 - 8)。SG-DBR レーザ出力に反転 RZ 変調を施し、EDFA により光強度を増幅した後、50GHz 間隔波長多重信号用の光分波器に入力した。光分波器 の8つの出力ポートを8つの2×2光スイッチの入力ポートに結び、波長可変光源の光波長 切換と 8 台の光スイッチの切換動作を同期させ(図 4 - 2 - 9)、光ノードでの光 ADM 機能 を受信信号誤り率評価により確認する。受信部においては、フリースペクトラムレンジ (FSR) 400GHz、透過半値全幅 35GHz の1×8 光分波器により 32 波から 4 波ずつ波長分離し た後、透過半値全幅 31GHz の可変波長光フィルタにより所望信号を抽出し、光受信器に取 り込む。

チャンネル信号毎の受信誤り率を図 4-2-10 に示す。図中、赤のプロットは ADM ノードを Through したチャンネル信号の誤り率であり、青の☆印は ADM ノードで Add したチャンネル信号(15 番から 22 番の 8 波)の誤り率である。信号信号のビットレートは



図 4-2-7 210km 伝送路の中点に光ノードを配置した伝送実験系



図 4-2-8 SG-DBR レーザの波長切換え動作 (上段: Wavelength controller からの制御 トリガ信号、下段:発振波長)



図 4-2-9 SG-DBR レーザの波長切換えと光スイッチ駆動



図 4-2-10 各チャンネルの受信誤り率



図4-2-11 3ms幅ゲート信号の遅延時間(横軸:ms)と誤り率の関係

40Gbit/s 信号に誤り訂正 (FEC) 時の 43.0183Gb/s であり、誤り率は 10⁻⁷以下に抑圧され ている。従って、210km 程度の伝送では、エラーフリー伝送が可能であることが判った。 続いて、SG-DBR レーザと光スイッチによる Add チャンネル信号の切換時間を誤り率測 定により評価した結果を記述する。誤り検出器の測定タイミングを制御するゲート信号を タイミングシンセサイザから生成し、ゲート信号の遅延時間と誤り率の関係を求めた。

図4-2-11は、ゲート信号のパルス幅(誤り率測定を行う時間幅)を3msとした時の 測定結果である。誤り率が最低値近傍(10⁻⁷~10⁻⁸)となるゲート信号の遅延時間の幅を見 ると、いずれのチャンネルにおいてもほぼ800µs程度である。ゲート信号のパルス幅3ms との加算をとった後、トリガ信号の時間幅4.1msとの差分をとってチャンネル切換の確立 時間を求めると、およそ300µsでチャンネル切換は完了していることが判った。

4-2-5 周回伝送系による複数段光ノードへの光信号 Through 実験

この節では、4-2-4の光 ADM 部と Add 信号源である波長切換 SG-DBR レーザを用 い、光ノード部を周回系内に導入し、波長多重信号が複数段の光ノードを通過するデモ実 験を行った結果について記述する。

図 4-2-12 に実験伝送系を示す。周回路は

- 50kmの通常シングルモードファイバ(SMF)と分散補償(-850ps/nm)ファイバによる 56kmの伝送路、
- ② 8kmSMF と-50ps/nm の分散補償ファイバによる 10km 伝送路
- ③ 可変光アッテネータ
- ④ 光ファイバ増幅器(EDFA)2台
- ⑤ 50/100GHz 光インターリーバ
- ⑥ 100GHz 間隔 AWG4 台
- ⑦ 2×2 光スイッチ8台
- ⑧ 3dBカプラ 2個
- ⑨ AO スイッチ 2 台

から構成されている。周回路出力には①と同様の構成のファイバ伝送路と EDFA が接続さ れており、受信部へと導かれる。SG-DBR レーザによる波長可変光源や波長分離用の 50GHz 間隔 AWG は 4-2-4 節で使用のものと同等である。②の伝送路(総分散量は 96ps/nm)は、AWG や光インターリーバで発生する負の波長分散を補償するために設けた ものである。波長可変光源の出力は EDFA により増幅し、チャンネルあたりの平均光強度 が Through 信号と Add 信号とでほぼ同等(約 1dB 以内の偏差)となるように、EDFA 出 力に接続した可変光アッテネータの光減衰量を調整した。また、反転 RZ 信号のビットレ ートは 42.7Gbit/s (PN23 段)とした。

全チャンネル信号の受信誤り率の測定結果を図 4-2-13 に示す。ADM 部を 3 段通過 (258km 伝送)後において、受信誤り率は 10⁻³を超えていないことから、FEC を併用す ればエラーフリー伝送が可能である[13]ことが判った。ADM 部と分散補償部(②、⑤、⑥) を取り除いて周回系を構成し、周回数を6(およそ 400km)とした場合、誤り率はおよそ 10⁻⁵であった。従って、周回数増による受信誤り率の劣化の主要因は、光インターリーバ と AWG による光信号帯域の狭窄化であると考えられる。

また、長波長側のチャンネルにおいて誤り率劣化の傾向がある。これは、周回系を構成 する光ファイバ増幅器の利得や光インターリーバ・AWGの透過損失の波長依存性により、 周回数を重ねる毎に長・短波長信号間で光 SN 比の差が大きくなったことに起因する。



図4-2-12 光ノードを周回路系に導入した伝送実験系



図 4-2-13 誤り率測定結果(緑:126km,赤:192km,橙:258km,15~22 チャンネル のデータは ADM ノードを THROUGH させた場合のデータ)



図 4-2-14 周回数 1 の時を基準とした周回数 2 (青) と 3 (赤) における Q 値の劣化量

一方、15~22 チャンネル信号のデータは、8 台の光スイッチの動作を停止させ、波長可 変光源からの Add 信号を加えない(15~22 チャンネルを Through チャンネルとして扱う) 状態のものである。これらのチャンネルの誤り率とその他(1~14、23~32)のチャンネ ルの誤り率を比較すると、概ね同様である。従って、Add 信号を挿入したことによる Through 信号の伝送特性への影響はほとんど無いことが判った。

次に、図 4-2-13 の誤り率から Q 値を算出し、周回数 1 の状態から比較して周回数 2 と 3 の状態で Q 値がどのように劣化するかを比較した結果を図 4-2-14 に示す。5 番チ ャンネルでは周回数の増加により Q 値劣化が著しく大きい。これは、2 台の AWG で起き る透過損失が他のチャンネルに比べて 2dB 程度過剰であったことによる。短波長側のチャンネル信号では、Q 値劣化が 3dB 以内に収まっている。長波長側では、先に述べた周回数 増による光 SN 比の劣化が大きいことに起因して Q 値劣化が 4dB 程度に増えている。全て のチャンネル信号に対して、ADM 部の透過損失や光ファイバ増幅器の利得を一様化する ことができれば、Q 値のばらつきは抑圧可能であると考える。

以上の結果をまとめると、42.7Gbit/s 反転 RZ 信号 32 波の 0.8bit/s/Hz 波長多重信号を 用い、8 波信号を Add/Drop する ADM 部 3 段を含む 258km の伝送実験を行った。ADM 部を構成する AWG などの波長分散や透過損失のばらつきや光ファイバ増幅器の利得の波 長依存性によって、受信誤り率に波長依存性やばらつきが生じた。しかし、FEC 適用を前 提すれば、全チャンネルでエラーフリー伝送が実現し、ADM 部の段数を 3 段まで通過可 能であることが明らかになった。

4-2-6 高効率光変復調技術のまとめ

「高効率光光変復調技術の研究開発」における最終目標値と、本研究で得られた達成値を 以下の表4-2-1に示す。全ての項目で、最終目標値かそれを超える値を得た。また、 本研究開発で取り上げた光ノードの ADM 機能の基本機能について、伝送実験により確認 することが出来た。

今後の課題は、図 2. 2 の様に波長多重信号の数が多く光ノードの規模が大きい場合に、 光 ADM 部の具体的な構成法(多入力多出力の光スイッチの具体的な構成方法とスイッチ ング制御方法など)について明確化することであろう。また、光ノードにおいて波長多重 信号のチャンネル数や平均光強度がダイナミックに変化する場合には、中継器である光フ ァイバ増幅器の利得変動の影響が懸念される。ダイナミックな波長数の変化に際しては、 Through 信号の信号品質がバースト的に劣化する恐れもあり、光ノードにおけるチャンネ ル切換や Add/Drop 操作時に光ファイバ増幅器の利得特性を適切に制御する処理が必要に なるものと考える。

項目	最終目標値	達成値
1波長あたりのビットレート	\geq 40Gbit/s	43.02Gbit/s
帯域利用効率	$\sim 0.8 {\rm bit/s/Hz}$	1.07bit/s/Hz(37.5GHz 間隔波長多重時)
偏光多重分離	無し	無し
伝送距離	\geq 200km	258km(光ノード 3 段)~
		400km(光ノード無し)
AddDrop の光周波数間隔	$50 \mathrm{GHz}$	$50 \mathrm{GHz}$
光受信器同期確立時間	$\leq 1 \mathrm{ms}$	光ノードの波長切換時間 300 µ s を受信
		信号誤り率により確認、従って、
		同期確立時間は 1ms よりも十分小さい

表4-2-1 項目毎の最終目標値と達成値

4-3 高速・高安定光周波数制御の研究開発

4-3-1 研究開発の概要

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±0.03 %以内に収める整定時間を1 msec で実現するこ とを最終目標とした。すなわち、1 msec 以内に光周波数を目標値の±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 30 nm 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。

H16 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 [14] 、波長 可変レーザとしては SG-DBR-LD (Sampled Grating – Distributed Bragg Reflector-Laser Diode) [15] を用い、マイクロコントローラのフィードフォアードとアナ ログ回路による3電極モードホップフリー制御 [16] が高速・高精度な制御として有望で あることが分かった。また、波長切換動作を開始してから1 ms 以内に目標値の±0.03%、 すなわち±1 GHz を達成し、長期的には±3 GHz 以下を実現した。

今年度は光周波数検出系と制御系を改良することにより、波長可変幅の30 nm内の50 GHz グリッドにより高精度に安定化させる。さらに、安定性を向上させ、長期的な光周波数安 定度が±1 GHz 以下となることを見積もり、最終目標を全て達成する。

4-3-2 光周波数検出・制御系の基本設計

光周波数検出器としては図 4-3-1 に示すように中点保持型水晶エタロンを用いて構成する。Z カット水晶エタロンの温度係数は 700 MHz/deg と小さく、波長基準として適している。機械的安定性を向上させるために、補助支柱の挿入、エタロンの次数低減、エタロン 支持部の歪を解除するための熱処理を行った。



による光周波数検出器

図 4-3-2 中点保持型水晶エタロン

水晶エタロンの Z カット面には光反射率 17 %のミラーを、また、X カット面には金電極 を形成し、同期検波法によって光周波数を検出する。図 4-3-2 に50円玉の穴の上に置か れた水晶エタロンを、また、図 4-3-3 に同期検波法による光周波数検出器の構成を示す。 エタロン自身が水晶振動子として動作し、コルピッツ発信器の出力としてディザ信号が得 られる [14]。この方式により、ディザ信号周波数が自動的にエタロンの機械的共振周波 数に一致するため、高い Q 値にも拘わらず、安定した動作が得られる。FSR が 100 GHz の エタロンのボトムとピークの光透過率の両方を用いることにより、引き込み範囲が±50 GHz の制御系が構成でき、誤動作の無い制御が可能となる。光反射率 17%はボトムでの検 出感度を最大にする反射率である。エタロンの寸法L、 t、 Hはそれぞれ、0.967 mm、0.8 mm、3 mm であった。



図 4-3-3 同期検波法の構成

図 4-3-4 3 電極モードホップフリー制御の構成

エタロンの角度調整は、まず、FSR を合わせる。最終的には ITU グリッドに合わせることを 考慮すると、FSR は 50 MHz ごとの飛び飛びの値になる。そこで、FSR を測定し、入射角を増 減させて、FSR が 100,000±25 MHz 以内になるように調整する。FSR がこの範囲に入った事を 確認してから、透過特性を ITU グリッドに合わせ込む。エタロンの次数が低い(Lが小さい) ほど入射角が小さくなり、入射角変動に対して強くなるが、角度調整は難しくなる。尚、 FSR は最大で±25 MHz の誤差が生じるので、±15 nm(全体で 30 nm が目標値)の波長可変 を行うと、18.75 周期に相当する誤差 470 MHz が生じる。

次に SG-DBR-LD の波長制御系について説明する。30 nm の広帯域な波長領域を安定に、 かつ、高速に波長を制御するためにマイクロコントローラのフィードフォアード制御とア ナログ回路によるフィードバック制御の両方を併用した制御系とした。制御系の構成を図 4-3-4 に示す。通常、フィードバック制御は位相調整領域のみに行うが、安定領域が狭い という問題があった。そこで、安定領域が広い3 電極モードホップフリー制御を考案した。 3 電極モードホップフリー制御は位相調整領域ばかりでなく、前方ミラー領域、後方ミラ 一領域にもフィードバックし、波長を広い範囲で連続的に可変できる。しかし、広い波長 範囲をフィードバックによって変化させることは制御誤差を大きくする。積分制御は制御 誤差が小さいが、積分時間が応答速度になるため、高速制御に適さない。そこで、位相調 整領域、前方ミラー領域、後方ミラー領域の各電流値をフィードフォアードでマイクロコ ントローラから与え、誤差分のみを光周波数検出器から得られるアナログ信号に基づいて 各電流値を制御することとした。エタロンのボトムとピークの切換はマイクロコントロー ラからの信号に基づき、センサ出力制御で符合反転する。3 電極モードホップフリー制御 はLD の温度変動や経年変化が生じた場合でも、安定性を確保するために有効である。

4-3-3 エタロンの温度補償

水晶エタロンはペルチエ素子により温度制御するため、安定な波長基準になる。しかし、 エタロンの光透過部分と温度センサの間に熱抵抗が存在するため、外気温変動の1%程度 の影響を受ける。図4-3-5に光周波数検出器の温度特性を示す。0~60度の外気温変動に 対して±150 MHz 程度の光周波数変動が存在する。そこで、エタロンの温度補償を行い、 安定性を高めることを検討した。



Zカット水晶エタロンの温度係数は-700 MHz/℃である。一方、Zカット LiCAF は逆符号 の温度係数 400 MHz/℃を有し、適当な厚さの LiCAF を張り合わせることにより温度補償を 行うことが可能となる[17]。また、中点保持型の水晶エタロンは光変調効率が高く、ド リフトに強い同期検波法を可能とする。この2つの性質を両立させるために図 4-3-6 に示 すように光ビームを透過する部分にのみ温度補償部材の LiCAF を張り合わせた。LiCAF 板 は小さいほど機械的損失が下がり、光変調度が大きくなる。

厚さ0.32 mmのZカット水晶エタロンと厚さ0.73 mmのLiCAFを張り合わせた。水晶の 高さ(H)は3 mm、幅(t)は0.8 mmであった。また、LiCAFの高さは1 mm、幅は0.8 mm であった。水晶とLiCAFの片面には反射率17 %のミラーを設け、ミラーが無い面を向かい 合わせて屈折率が1.44のUV接着剤によって張り合わせた。温度補償エタロンの温度をパ ラメータとして変え、波長特性を測定したものを図4-3-7に示す。この図から、20℃と35℃ の間でも、1 GHz程度のシフトしか観測されず、温度係数は70 MHz/℃と極めて小さい事が 分かる。



図 4-3-6 温度補償エタロンの構造

図 4-3-7 温度補償エタロンの温度変動の影響

図 4-3-8 にエタロンに加えるディザ信号周波数に対する光変調度を示す。ディザ信号 周波数が 924 kHz で共振しており、LiCAF が無い状態での共振周波数 895 kHz より 3 %ほ ど高くなる。この傾向は計算でも確認した。Q 値は 560 であった。LiCAF が無い状態でのQ 値は 10,000 程度であり、1/20 程度に小さくなるが、光変調は可能である。図 4-3-9 に光 周波数 fp が 193.02 THz (a) と 193.07 THz (b) の時の光信号波形を示す。(a) と (b) の光信号 は位相が反転しており、同期検波出力は異符号の電圧が得られた。光変調度はおよそ 0.1% であり、同期検波が可能であることが分かる。



(b) fp=193.07THz

図 4-3-9 エタロン透過光の波形とディザ信号波形

次に温度補償エタロンの FSR 測定実験の結果を示す。同期検波が行えるため、光透過率 のピークとボトムが正確に割り出せ、1周期ごとのFSRの測定が可能となった。結果を 図 4-3-10 に示す。DCアンプ出力はエタロンの光透過率に相当し、この微分形が同期検波 出力になっている。従って、同期検波出力が零の時が光透過率のピークもしくはボトムに 対応している。そこで、光透過率のピーク間の光周波数を求め、グラフの下部に表示した。 この結果、ピーク間隔が均一でなく、不等間隔になっている事が判明した。このことは、 30 nm に及ぶ広帯域な波長検出器を±1 GHz の精度で実現することを考慮すると重大な問題 であり、原因を究明した。



結論から言えば、FSR が不等間隔になる原因は水晶と LiCAF の接着面の僅かな反射であり、 このため3つのミラーから構成されるファブリペロ共振器となる。このようなファブリペ ロ共振器に関しては S. K. Hogeveen らが既に基本式を導出している [18]。文献 [18] によ れば、3つのミラーの振幅反射係数を r₁、r₂、r₃(反射率の平方根)とすれば、このファブ リペロ共振器の光透過率Tは以下のように表される。

$$T = (1 - r_1^2)(1 - r_2^2)(1 - r_3^2) / D_3$$

$$D_3 = 1 + (r_1 r_2)^2 + (r_2 r_3)^2 + (r_1 r_3)^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos(2\phi_1)$$

$$(4 - 3 - 2)$$

+ $2r_2r_3(1+r_1^2)\cos(2\phi_2)$ + $2r_1r_3\cos(2\phi_1+2\phi_2)$ + $2r_1r_2^2r_3\cos(2\phi_1-2\phi_2)$

ここで、 ϕ_1 、 ϕ_2 はミラー1、2間および2、3間の距離に対応した位相量(=2 π L / λ)である。 $r_1 \ge r_3$ は反射率17%に相当する0.41 とし、 r_2 は接着層の厚さによって0.0097 (反射率0.01%)から0.052(反射率0.27%)まで変化する。 r_2 =0.02(反射率0.04%) の時の波長特性を図 4-3-11に示す。この場合の周期のばらつきは±1.5 GHz 程度である。 この事から、温度補償エタロンは複数の ITU グリッドに対して±1GHz を保障するような 精度を実現する用途には適さないことが分かる。しかし、1つの波長に固定する用途であ れば温度補償エタロンを適用することは可能であり、この場合は優れた温度特性が期待で きる。



図 4-3-11 3 ミラーエタロンの波長特性

4-3-4 高速・高安定光周波数制御の実験結果

ここでは 4-3-2 で述べた光周波数検出・制御系の基本設計に基づき、高速・高安定光周 波数制御の実験結果について述べる。まず、高速光周波数切換実験の結果について述べる。 図 4-3-4 のマイクロコントローラから発生するトリガ信号と光周波数検出器の出力信号を 図 4-3-12 に模式的に示す。実験に用いた SG-DBR-LD の光周波数が 196.1 THz の時を ch1 と し、これから 50 GHz 下がるごとに ch2、ch3・・・ch88 とした。ch88 の光周波数は 191.75 THz であり、全幅で 4.35 THz(波長では 34.8 nm)である。トリガ信号の立ち上がりでチャンネルの設定を開始し、立下りでチャンネルの設定を完了する。マイクロコントローラが チャンネルを設定する時間(トリガのパルス幅)はチャンネルによって変わるため、トリ ガのパルス幅は一定ではない。チャンネルが切り替わると、正確に所定のチャンネルに周 波数をロックさせるため光周波数検出器の出力信号を用いたアナログフィードバック系が 動作し、チャンネル設定開始から光周波数検出器出力が安定するまでを切換時間とした。 光周波数検出器の出力と光周波数の関係を図 4-3-13 に示す。同期検波器のドリフトの影響 を低減するために前段のアンプゲインを上げており、飽和領域が生じていた。4 THz の光 周波数に渡って、正確に 50 GHz グリッドを刻んでいることが分かる。



図 4-3-12 トリガ信号と光周波数検出器の出力信号



図 4-3-13 光周波数検出器の出力と光周波数の関係

図 4-3-14 にトリガ信号と光周波数検出器の出力信号の実測値を示す。トリガのパルス幅 は広いものでも 0.11 ms 程度であり、その後、光周波数検出器出力が落ち着くまでの時間 は 0.05 ms 程度であった。両者を合わせた切換時間は 0.2 ms 以下であることが分かる。切 換後の光周波数検出器出力値は比例制御の制御誤差である。制御誤差を小さくするにはル ープゲインを増せば良いが、高速応答と高ループゲインの両立は容易ではない。本実験で のループゲインは 30 dB であった。制御誤差が最も大きいところで、光周波数検出器出力 が 0.15 V であり、光周波数に換算すると 130 MHz であった。

以上より、34.8 nm の波長が可変でき、波長切換開始後 0.2 ms で±130 MHz 以内に光 周波数が安定化することが分かった。



図 4-3-14 トリガ信号と光周波数検出器の出力信号の実測値

次に、光周波数の長期的な安定性について説明する。一般に周波数の安定性はアラン 分散 [19] によって議論される。アラン分散 $\sigma^2(\tau)$ は式(4-3-3)によって与えられる。

$$\sigma^{2}(\tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} (\overline{y_{k+1}} - \overline{y_{k}})^{2}$$
(4-3-3)

ここで、 τ は積分時間を表し、 y_k は τ 秒間の平均周波数を表す。従って、アラン分散 σ^2 (τ)は τ 秒間の平均周波数の隣接値を取り、その差異の平方を平均して得られる。

光周波数を安定化したSG-DBR-LDの出力光を波長計に入力し、その出力をパソコンに取り 込む構成で光周波数を計測した。波長計は10回の測定の平均値を出力し、データ取り込 みは2.5秒ごとに行った。取り込み回数は2¹³=8192回とし、約6時間連続動作させた。 6時間の光周波数変動の実時間測定結果を図4-3-15に示す。光周波数変動は波長計による 変動分が無視できないほどあるが、光源の変動と分離できないので、このままのデータで アラン分散を求めた。アラン分散の平方根である偏差 $\sigma(\tau)$ を縦軸に取ったものを図 4-3-16に示す。積分時間が5120 sと10240 s(2.8時間)はサンプル数が少ないため、精度が 劣るが、積分時間 τ が2.8時間で偏差5 MHzに達している。以後、赤線が示すようなランダ ムウォーク領域となって τ の1/2乗に比例して偏差が増大したと仮定しても1年後に250 MHzの偏差と見積ることができる。このようなドリフトの更なる積算を避けるためには、年 に1度の定期検査でキャリブレーションすれば良い。

以上の検討から安定性として温度特性、比例制御誤差、ドリフトを考慮すれば、それぞれ、±150 MHz、±130 MHz、±250 MHzとなり、全てを足し合わせても±530 MHzとなる。 これは最終目標値の安定度±1 GHzを十分に満たしている。安定度ではないが、精度という 観点では4-3-2で述べたFSR設定精度による誤差が大きい。この誤差は±470 MHzであり、こ れを加えて、光周波数精度として±1GHzとなる。







4-3-5 高速・高安定光周波数制御のまとめ

光周波数検出系としては中点保持型水晶エタロン、波長可変レーザとしては SG-DBR-LDを用い、マイクロコントローラのフィードフォアードとアナログ回路による 3 電極モードホップフリー制御を行った。また、機械的安定性を向上させるために、補助 支柱の挿入、エタロンの次数低減、エタロン支持部の内部歪解除を行った。さらに、水晶 と LiCAF の組み合わせにより温度補償し、中点保持型による同期検波法と両立した構造の 水晶エタロンを実現した。しかし、温度補償エタロンは FSR が不等間隔になるため、1つ の波長に固定する用途にのみ有効な手法であることが分かった。

以上の光周波数制御技術により波長可変光源を実現し、光送信波長整定時間 ≦ 0.2 ms、 光送信波長可変範囲 > 34 nm、送信波長安定度 ~ ±530 MHz を達成し、最終目標を全て 達成した。

尚、FSR 設定精度による誤差±470 MHz を加えても、光周波数精度として±1 GHz となり、 高い精度が得られた。

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ラベルスイッチルータ(LSR)とフォトニ ッククロスコネクト(PXC)を組み合わせたノードを用いて、従来のMPLSネットワークに 光パスネットワークをアンダーレイする新しいネットワークアーキテクチャを提案し、ネ ットワークの詳細設計を完了した。ネットワーク側の入出力インタフェースは、40Gbit/s の速度で、最大 70 波長まで多重でき、ノード数が 16 ノード以上で、ネットワークのトー タルスループットとして約 50Tbit/s を超える規模のネットワークをシミュレーションす ることが可能になった。また、ネットワークを構成する任意のリンクやノードに対して障 害を起こし、瞬時にプロテクション動作が開始され、サービスが継続される機能を、ネッ トワークシミュレータに盛り込んだ。

高効率光変復調の研究開発では反転 RZ 光信号により 1.07bit/s/Hz の帯域利用効率を実現するなど、全ての項目で最終目標値かそれを超える値を得た。本研究開発で取り上げた 光ノードの ADM 機能についても伝送実験により確認し、送信波長切換から受信同期確立ま での波長切換時間として 300 µ s を得た。

高速・高安定光周波数制御の研究開発では、光周波数検出系として、中点保持型水晶エ タロン、波長可変レーザとしてはSG-DBR-LDを用い、マイクロコントローラのフィード フォアードとアナログ回路による3電極モードホップフリー制御を行った。そして、全て の項目で最終目標値を超える値を得た。

本委託業務で行った研究開発の内容をすべて実施することができ、最終目標を全て満た した。また、研究開発の全体計画がすべて完了し、本研究開発が成功裏に終了したことに なる。

高効率全光ネットワークの実現には解決すべき課題が多く存在した。しかし、本研究プロジェクトの研究成果により、ネットワークアーキテクチャから光変復調方式、光周波数 制御方式などの要素技術まで大きく進歩し、全光ネットワーク実現に向けた多大な貢献となり得る。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

番	発表	発表雜誌名	発表者	発表タイトル	発表	査読
号	方法	講演会名			時期	の有
		学会名等				無
1	学会	電子情報通信	大島、宮地	中点保持型Zカット水晶エタロ	H15	無
		学会ソサイエ		ンによる波長検出系	9月	
		ティ大会				
2	学会	電子情報通信	小楠、宮地、	32 波×40Gb/s 反転 RZ 光信号の	H15	無
		学会ソサイエ	大島	0.8b/s/Hz 波長多重実験	9月	
		ティ大会				
3	学会	電子情報通信	富岡、井辺、	高効率全光ネットワークアーキ	H15	無
		学会ソサイエ	井出、宮地、	テクチャ	9月	
		ティ大会	土橋、竹原、			
			中尾、鈴木			6-1
4	字会	電子情報通信	小楠、宮地、	反転 RZ 光信号による超高密度波	H15	無
		字会 (OCS)	开出、大島	長多重伝送の検討	11月	
_	→L 日日	研究会 日 奴 玄 巻 並 即			111 -	Árra"
5	新聞	日栓库美新聞	果之	1兆ヒット級通信へ方式 収良	H15	兼
	当人	テフはおえら		火田冲教和田英本 1000/ 切の冲目	日月	/mrt
6	子会	電士情報通信 一	東之	尤向波剱利用刻率100%超の波長	H16 2 日	兲
7	応 労 ム	子云		多里伩州囲光	3月	ÁTTT.
1	十五	电丁旧報通信 学会マットロ	·	仮 文 可 変 儿 ト ノ ン ン 一 ハ を 用 い た 会 光 之 … ト ロ ー ク の 其 木 特 州	о 110 2 П	罴
		子云ホットク	开山、 召 地、 十插 竹百	に主儿不クトクークの基本特に	υд	
		ノマハノ	山尾 鈴木			
		ワーク合同研				
		究会				
8	学会	電子情報通信	大島、小楠、	水晶エタロン振動子による波長	H16	無
		学会総合大会	井出	ロッカー内蔵 LD モジュール	3月	
9	学会	電子情報通信	小楠、井出、	帯域抑圧反転 RZ 光信号による超	H16	無
		学会総合大会	大島	高密度波長多重実験	3月	
10	学会	電子情報通信	井辺、富岡、	高効率全光ネットワークの特性	H16	無
		学会総合大会	土橋、竹原、	解析(1) ーシミュレータ構成ー	3月	
			中尾、鈴木			
11	学会	電子情報通信	富岡、井辺、	高効率全光ネットワークの特性	H16	無
		学会総合大会	土橋、竹原、	解析(2) -遅延特性-	3月	
			中尾、鈴木			
12	論文	IEICE	Ogusu, Ide,	Ultra-dense WDM with over 100%	H17	有
	誌	Iransactions on	and	spectral efficiency by using 40-Gb/s	1月	
12	国欧	OECC/COIN	Onsinnia Ogusu Ide	0.8-b/s/Hz WDM of 40-Gb/s	Н16	右
10	回 你 全議	2004	and	Inverse-RZ signals without using	7日	Ή
	山时处		Ohshima	polarization-division- multiplexing	• /1	
				and pre-filtering techniques		

14	論文 誌	IEICE Transactions on Communications	Ohshima, Ogusu, and Ide	Wavelength Lock System Using a Quartz Etalon Supported at the Middle Point	H17 4月	有
15	国際会議	ECOC2004	Ogusu, Ide, and 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
16	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
17	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
18	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
19	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
20	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
21	国際 会議	OFC2005	Ogusu, Ide, and Ohshima	Fast and precise wavelength switching of an SG-DBR laser for 1.07-b/s/Hz DWDM systems	H17 3 月	有
22	学会	電子情報通信学 会 全国大会	竹原、井辺、 富岡、鈴木、 土橋、稲村	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
23	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
24	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
25	会学	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、井辺、 鈴木、竹原、 土橋、稲村	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
26	際 議	The Fourth International Conference on the Optical Internet (COIN2005)	Ibe, Tomioka, Suzuki, Takehara, Dobashi	QoS Guaranteed Network Establishing All Optical Path Automatically According to Packet Flow	H17 5 月	有
27	論 文 誌	IEICE Transactions on Communications	Tomioka, Ibe, Suzuki,	Comparison of Techniques to Mitigate Wavelength Contention in a Photonic	H18 4 月	有

			Takehara,	Network with Frequent Optical		
			Dobashi,	Path Setups		
	⇒	IDD	Inamura		111 7	<u>+-</u>
28	論又		Ogusu	ADM configuration for	H17	有
	誌	Electronics		0.8-b/s/Hz WDM of inverse-RZ	10月	
	~ ~ ~ ~	Letters		Signals	111 7	árrat.
29	字会	電子情報通信字	富岡、 开辺、	全光ネットリークの光ハス設定	HI7	無
		会 全国大会	鈴木、竹原、	シグナリング時における波長競	9月	
			土橋、稲村	合軽減方式の改良		
30	学会	電子情報通信学	大島、井出、	SG-DBR-LD のモードホップフリー	H17	無
		会 全国大会	小楠	制御による波長チューニング	9月	
31	学会	電子情報通信学	鈴木、井辺、	全光ネットワークにおける障害	H17	無
		会 全国大会	富岡、土橋、	回避方式の提案	9月	
			竹原、稲村			
32	国際	World	Ibe,	Multi Layer Traffic	H18	有
	会議	Telecommunic	Tomioka,	Engineering GMPLS Network	5月	
	- HIX	ations	Ide,	Architecture using Rapid	予定	
		Congress 2006	Ohshima,	Wavelength Tunable Optical		
		_		Transceiver		
33	国際	The Forum at	Ogusu ,Ibe,	Low Latency IP Network	H18	有
	会議	ITU TELECOM	Ide,	Architecture for Fixed Mobile	12月	
		WORLD 2006	Tomioka,	Convergence	予定	
			Ohshima,			
			Suzuki,			
			Inamura,			
			Dobashi			
34	学会	電子情報通信学	小楠,井出,	反転 RZ 信号による 0.8b/s/Hz 波	H18	無
		会 総合大会	大島	長多重向け光 ADM の検討	3月	
35	学会	電子情報通信学	大島,井出,	波長ロッカー用温度補償水晶エ	H18	無
		会 総合大会	小楠	タロンの光変調特性	3月	
36	学会	電子情報通信学	鈴木、井辺、	全光ネットワークにおけるノー	H18	無
		会 総合大会	富岡、土橋、	ド障害回避方式の提案	3月	
			稲村			
37	学会	電子情報通信学	小楠、井出、	光ADM部と波長可変光源による	H18	無
		合 occ 研究合	十百	业) ドの機能体到字段		
		云の3研先会	入局	兀ノ一下の筬肥唯祢夫阙	эл	

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
- [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) ーシミュレータ構成ー」、信学全 大、H16年3月
- [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
- [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、
- [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」、H16年3月 信学 NS 研究会
- [12] 鈴木、他、「全光ネットワークにおける障害回避方式の提案」、信学ソサイエティ大会、 B6-9-7、17年9月
- [13] 例えば、A. H. Gnauck, et al., ECOC2004, Th4.4.1 など
- [14] S. Ohshima, et al., "Wavelength lock system using a quartz etalon supported at the middle point," IEICE Trans. Commun. vol.E88-B, no.4, pp.1523-1530, 2005
- [15] V. Jayaraman, et al., IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, pp. 1824-1834, 1993
- [16] 大島 他 「SG-DBR-LD のモードホップフリー制御による波長チューニング」、2005 年 電子情報通信学会総合大会、B-12-9
- [17] 大島 他、「波長ロッカー用水晶エタロンの温度補償方法」、2005 年電子情報通信 学会総合大会、C-3-123
- [18] S. J. Hogeveen et al., , Applied Optics, vol.25, no.22, pp.4181-4184, 1986
- [19] D.W. Allan, Proceedings of the IEEE, 54, No. 2, pp.221-231, 1966