

平成21年度 成果報告書

(一般型)

「高速電気信号処理技術に基づく適応制御光トランスポートネットワークの研究」

目 次

1	研究開発課題の背景	3
	(ア) 分散フリートランスポンダの研究開発	4
	(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発	5
	(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	5
	(エ) システム実証・評価の研究開発	6
2	研究開発の全体計画	7
2-1	研究開発課題の概要	7
2-2	研究開発目標	7
	2-2-1 最終目標 (平成22年3月末)	7
	2-2-2 中間目標 (平成20年1月末)	8
2-3	研究開発の年度別計画	9
3	研究開発体制	10
3-1	研究開発実施体制	10
4	研究開発実施状況	11
4-1	分散フリートランスポンダの研究開発	11
	4-1-1 概要	11
	4-1-2 方式エミュレーション (平成17~18年度)	12
	4-1-3 高速LSI設計 (平成19~20年度)	13
	4-1-4 トランスポンダ設計・検証 (平成17~21年度)	18
	4-1-5 実施計画に対する達成の状況	23
4-2	MEMS 駆動光スイッチの研究開発	24
	4-2-1 概要	24
	4-2-2 MEMS 機構開発 (平成17~18年度実施)	24
	4-2-3 スイッチ試作 (平成18~20年度実施)	26
	4-2-4 スイッチ改良試作 (平成20年度実施)	28
	4-2-5 装置化 (平成21年度実施)	29
	4-2-6 実施計画に対する達成状況	30
4-3	自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	32
	4-3-1 概要	32
	4-3-2 プラットフォーム構築 (平成17~21年度)	32
	4-3-3 オプティカルパスレンジング機能 (平成18~21年度)	34
	4-3-4 分散フリー全光パス最適設定機能 (平成18~21年度)	38
	4-3-5 実施計画に対する達成状況	40
4-4	システム実証・評価の研究開発	41
	4-4-1 概要	41
	4-4-2 エミュレーション環境での実証・評価 (平成18~19年度)	41
	4-4-3 実験室および実フィールド環境での実証・評価 (平成20~21年度)	42
	4-4-4 標準化提案 (平成20~21年度)	46

4-4-5	実施計画に対する達成の状況.....	46
4-5	総括.....	47
5	参考資料.....	49
5-1	研究発表・講演等一覧.....	49
5-2	産業財産権.....	52
5-2-1	出願特許数.....	52
5-2-2	公開特許一覧.....	52
5-2-3	登録特許一覧.....	53
	文献.....	53

1 研究開発課題の背景

我が国政府主導で進められてきた e-Japan 戦略、それを引き継ぐ形で総務省が主導する u-Japan 政策により、これまでに世界最先端の IT 国家となるようブロードバンドの普及や安い料金設定などの着実な成果をあげてきている。総務省統計によれば、日本国内のブロードバンド契約者数は、引き続き増加を続け、2009 年 9 月末では 3400 万加入を超えている。FTTH アクセスサービスの契約数も 2009 年 9 月末時点で 1651 万に達しており、増加率も 20%を超えている。また、世界のブロードバンド加入者数も、2013 年には 10 億人以上との予測データもある。米国インスタット社は、調査レポートとして、世界のブロードバンド市場調査:市場概況、技術、2013 年までの予測の概要を発表した。これによるとブロードバンドサービスの人気は依然として高く、2009 年においては、世界のブロードバンド新規加入者数は、毎月平均 880 万人ずつ増加。2008 年末の 9900 万から増加して、2009 年 12 月の時点で 5 億 7800 万人であったが、2013 年までには、世界のブロードバンド加入者数は 10 億を上回ると予測している。光の広帯域性を活用した様々なアプリケーションの発展により、データ通信トラフィックは増え続けており、LAN 及び光アクセスネットワークとともに、メトロ・基幹光ネットワークの更なる大容量化、経済化が必須となっている。

このように e-Japan 戦略の目標は大きくクリアし、ブロードバンド環境は充実したが、u-Japan 政策では、これまでの有線中心のインフラ整備から、有線・無線の区別のないシームレスなユビキタスネットワーク環境への移行を目指している。有線から無線、ネットワークから端末、認証やデータ交換等を含めた有機的な連携によって、あらゆる場面で継ぎ目なくネットワークにつながる環境の整備を目指し、その結果として、ネットワークが生活の隅々にまで融け込む草の根のような ICT(Information and Communications Technology)環境の実現を目的としている。

電気デジタル信号処理を駆使して光通信技術の伝送方式研究分野は、世界各国で実用化に向けた検討が盛んに行われ、日本も主導的な貢献をしてきた分野であるが、これまで、実用化には至らなかった。近年のデジタル信号処理の目覚ましい発展を取り入れたデジタルコヒーレント検波などにより、偏波多重分離や光直交周波数多重分離等の新しい多重分離技術や、多値変復調符号技術など、光通信システムでは従来適用が困難であった技術の適用可能性が見えつつある。電気でのデジタル信号処理を行うためには、高速のアナログデジタル変換回路とリアルタイム動作が可能なデジタル処理回路が必要であり、これらのシステム LSI に、従来日本が光デバイス技術分野で積み上げてきた技術的ノウハウがデジタル信号処理として集積されブラックボックス化される方向にある。このため本分野での、国際的貢献とともに国内ならびに国際市場に通用する基盤技術をいち早く確立し、日本の国際競争力を高めていくことが課題となっている。

一方、我が国では、少子高齢化が進む中で、安心・安全への対応や、経済の活性化など、解決すべき社会課題が顕在化している。これらの解決策として情報通信技術を意味する ICT が課題解決策として期待されている。次世代のユビキタスネットワークを支える基盤ネットワーク技術の一つの特徴は、通信トラフィック需要の急激な変化に対応できるような柔軟な回線設定が可能で、かつ異なるシステム間の相互接続性を確保する点である。この実現に向けて本研究開発課題は、複数のリングが接続されたネットワークの各ノードを最適配置された波長パスで接続することで、接続の自由度向上と任意ノード間接続、トランスペアレントなサブネットワーク間接続をそれぞれ可能とする適応性に富んだ光トランスポートネットワークの実現を目指すものである。

図 1-1 に本研究開発課題が実現しようとする適応制御光トランスポートネットワークの概要を示す。ベースとなる概念は、将来の光ネットワークのあるべき姿としてこれまで

にも国内外から提案があり、いくつかの重要な要素技術開発が行われつつあるが、最新状況としては、長距離トランスポートでは光技術、LSI 技術の双方の高度化が、実現の大きな鍵となると考えられる。近年の光ネットワークでは、光中継ノードで光電気変換せずに光スイッチにより動的に光信号を切り替える ROADM(Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer)や OXC(Optical Cross Connector)などのノードが適用され、光信号伝送距離がダイナミックに変動するため、従来の 500km 程度の固定的光伝送設計をアップグレード可能な歪み補償電気信号処理技術が必要となっている。このような歪み補償電気信号処理は、光技術の低コスト化を実現するキー技術となってゆくと考えられる。そのような状況の中、ROADM ネットワークに関する研究は、引き続き現在も活発である。ROADM ネットワークでの波長パスによる複数リング間接続の主目的は、ルータにおけるパス計算時間の爆発的増加やルート再構築遅延を回避し、ルータの削減およびそれに伴うコスト低減を図ることにある。これらの活発な研究開発は、デバイス技術の進歩と合わせて、本目的に対する要求が切実となりつつあることを受けたものであり、今後の研究開発および市場動向も引き続き注目される。

これに対して、図 1-1 で示す適応制御光トランスポートネットワークは、高速の電気信号処理技術によって分散補償ファイバとその損失を補償する光アンプを廃して初期コストを低減し、建設時やノードの増減設等の適応的再構成を自動的に処理し、高速に光パスを設定可能な適応制御光トランスポートネットワークを研究開発するものであり、(ア)分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの 3 つを主要開発テーマとする。また、(エ) システム実証・評価においては、分散フリートランスポンダ、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールの連携動作を確認すると共に実フィールドにおける機能の実証や性能評価のため、これらの機能を実装・搭載したプロトタイプシステムを開発し、エミュレーション環境、実験室環境、および実フィールド環境の三段階において実証・評価実験を行う。以下、各開発課題における背景およびこれまでの取組状況について述べる。

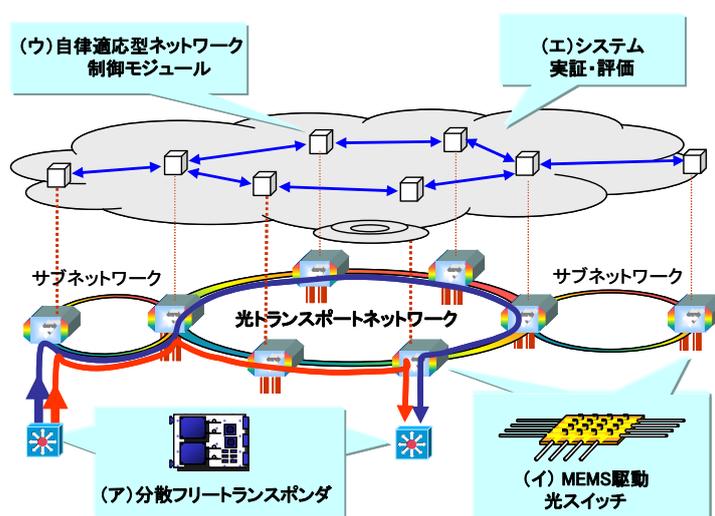


図 1-1 提案する適応制御光トランスポートネットワークの全体図

(ア) 分散フリートランスポンダの研究開発

分散フリートランスポンダの研究開発を開始した時点から、光トランスポートネットワークの装置コスト低減と伝送距離の延伸の両立が既に求められていた。そのニーズは現在も変わりなく、システムの低コスト化の要求は益々大きくなっている。そのため、分散に

よって生じる波形歪みを送信側の高速電気信号処理プリコーディングによって等化するための技術は、現在もなお注目されている。基本原理の検証に関しては、これまで、同方式の変調方式依存性[1]、非線形耐力[2]、非線形抑圧効果への適用検討[3]、長距離伝送系への適用検討[4、5]などについて精力的な研究開発が行われてきた。また、送信側プリコーディングを実現する光送信器構成技術に関しては、これまでは演算ブロックの回路規模や基礎パラメータなどの原理検討[6、7]が主流であったが、光変調器の構成検討[8]、変調方式との組み合わせによる回路規模削減検討[9]といった内容へも検討範囲が広がってきている。しかしながら、現時点においても、送信側プリコーディング技術には未成熟の点も多く、実用化までには、ネットワーク設計と連携したシステム要求条件の明確化、ターゲットに適した回路方式の確立および検証、光変調器の駆動方式検証、回路設計ならびに基本機能検証といった開発を求められており、本研究開発では、これらの課題に取り組んできた。

(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発

これまでに開発されてきた光スイッチの主な方式としては、熱光学効果を用いた導波路型、および MEMS 機構による微小ミラーを用いて光路を 3 次的に切り替える空間光学系型 (3D-MEMS 型) が挙げられる。導波路型としては、1×2 スイッチを多段に接続し、N×N スイッチを構成したものがあ る [10]。これらの方式は、小規模マトリクススイッチとしては完成度が高く、石英導波路、ポリマ導波路などをベースに、開発が進んでいる。また、大規模光スイッチとしては 3D-MEMS 型光スイッチが海外を中心に盛んに開発されている [11、12]。しかしながら、我が国においては、中～大規模の光スイッチを実現するための有力な技術が確立されておらず、国内の優れた研究もあるが、全般的には、海外勢に先行されている状況である。本研究にて開発する MEMS 駆動光スイッチは、提案者独自の光経路切り替え原理に基づくものであり、機械式駆動のため熱光学効果型と比較し低消費電力、原理的に 3D-MEMS 型のようなコスト要因となる高精度アナログ位置制御や高圧電源を要さない、という利点を有している。光スイッチのプラットフォームとして安価なポリマ導波路フィルムを用い、低コストな MEMS 駆動機構の開発を行うことで、価格競争力のある日本独自の光スイッチ技術を確立することを目的とする。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

ITU-T、IETF (the Internet Engineering Task Force)、OIF (the Optical Internetworking Forum) などによる標準化活動の結果、SONET/SDH に基づく時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) パスや光伝送特性を考慮しない波長パスの動的確立・解放の手順が光ネットワーク制御プロトコル GMPLS (Generalized MultiProtocol Label Switching) として規定され、多くの相互接続実験によって相互運用性が確保されている [13-17]。我が国においても、JGN II や NICT けいはんな情報通信オープンラボにおいてマルチキャリア GMPLS 接続・ASON (Automatically Switched Optical Networks)/GMPLS 接続のフィールド実験が実施され、標準の検証・相互運用性確立へ貢献してきた [18]。一方、OEO 中継を伴わず光のまま中継される全光パスの動的な確立・解放については、GMPLS 標準化当初に光伝送特性情報の GMPLS ルーティングプロトコルへの搭載 [19、20] や波長選択への GMPLS シグナリングプロトコルの適用 [21] が検討されたが、全光パスの確立可能性を判断するための光伝送特性の絞り込みが進まず、検討は進んでいなかった。しかしながら 2008 年より、IETF にて、全光ネットワーク上の光パスの GMPLS 制御を検討する WSON (Wavelength Switched Optical Networks) の検討が開始され、GMPLS シグナリングメッセージ内のラベルへ全光パスの波長情報を格納するフォーマットや、波長多重リンクや ROADM から成るネットワーク上で波長単位の全光パスをルーティング、シグナリングするための方式等の議論 [22] [23] やフィ

ールド実験[24] や光ラベルの相互接続実験[25]も報告され、この分野の研究開発が活発化している。特に、光伝送特性（光伝送の劣化要因：Impairment）を考慮した GMPLS 制御についての議論が 2008 年 11 月の IETF 会合から開始され、Impairment を含む WSON 制御のフレームワーク文書の作成が開始された[26]。本研究開発では、上記標準化活動と連携して、自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発を進め、GMPLS 拡張プロトコル (GMPLS-Plus) を規定してそれを実装する評価用プラットフォームを試作し、分散フリースポンドアの適用によって距離や波長分散の制約が大幅に緩和される全光パスを、オペレータやユーザの要求に基づいてトポロジーに依存せずダイナミックにかつ自動的に確立可能とすることを目的とする。

(エ) システム実証・評価の研究開発

本研究開発課題は、サブテーマとして実施する三つの研究開発課題（分散フリースポンドア、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュール）の連携動作を確認するとともに、機能の実証や性能の評価を行い、その評価結果を各サブテーマの研究開発にフィードバックするためのものである。動的な全光パスの確立に対応して、受信側の可変分散補償デバイスを最適に設定するため、GMPLS シグナリングプロトコルを拡張する提案やその実験[27] [28]が行われているが、送信側プリコーディング技術と GMPLS プロトコルとの連携については行われていない。そのため、本研究開発では、実験計画に基づき具体的な実験シナリオを策定して実験システムの構築に着手すると共に、試作した実験ノードおよび構築したエミュレータを用いて、実験計画を先行的に検証する室内予備実験を実施し、実フィールド実験へつなげ、動的な全光パスの経路選択と確立に至る動作を実証する。また本研究開発のテーマである、従来の GMPLS では実現できない波長分散量の学習や波長分散補償を考慮した経路選択など次世代の全光ネットワーク向けの光伝送特性制御を可能とする GMPLS 拡張の基本コンセプトを、WSON フレームワーク文書へ反映するための標準化提案活動を開始した[29]。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究開発の課題は、複数のリングが接続されたネットワークの各ノードを最適配置された波長パスで接続する適応制御光トランスポートネットワークを実現することである。従来の固定波長パスに比べ、接続の自由度が増すだけでなく、サブネットワーク間をトランスペアレントに接続することが可能になるため、例えば異なる通信キャリアが複数のリングをまたいで相互乗り入れすることが可能になる。また、通信トラフィック需要の変化に応じた回線の増減設や設定変更を、既存の回線に影響を与えることなく実施することができる。さらに、ネットワークの障害時に別ルートへ切り替えるプロテクションやリストレーションも波長レイヤで任意に実施することができる。ベースとなる概念は、将来の光ネットワークのあるべき姿としてこれまでも国内外から提案があり、いくつかの重要な要素技術開発が行われつつある。しかしながら、既存の研究は、デバイス・装置レベルのみのアプローチか、またはネットワークオペレーションのみの開発のどちらかであり、両者を統合する研究には至っていない。

本研究開発では、(ア)ファイバの分散で生じる波形歪みを高速電気信号処理により等化する分散フリートランスポンダ、(イ)光ルーティングのキーとなるダイナミック光 ADM (Add Drop Multiplexing) 用の MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 駆動光スイッチ、および(ウ)オプティカルパスレンジング機能により自動で伝送路パラメータを学習する機能を GMPLS (Generalized MultiProtocol Label Switching) プロトコル上に拡張した新しい自律適応型ネットワーク制御モジュールの3つを開発する。これらにより、初期コストの高騰要因であった一切の分散補償ファイバとその損失を補償するアンプが不要になり、また小型・高集積光スイッチによる低コスト・高信頼・高速光ルーティングが可能になり、回線増設やプロビジョニング、リストレーションもネットワーク制御モジュールからの制御により運用コストをかけずに実現でき、ネットワークの帯域利用効率を飛躍的に向上する差別化システムが提供可能になる。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標 (平成 22 年 3 月末)

(ア) 分散フリートランスポンダ

- (1) 国内ネットワークの大部分をカバーする 2,000km に相当する波長分散を補償できる光トランスポンダを開発する。
- (2) 自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証する。

(イ) MEMS 駆動光スイッチ

光機能プラットフォームたる MEMS 駆動技術を開発し、スイッチング速度 1ms 以下で 40×40 の MEMS 駆動光スイッチを試作し、システム試験で実証する。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュール

- (1) 40 台からなるネットワークにおいて、全ノードが 10 秒以内に全光リンクの分散を自動学習できるオプティカルパスレンジング機能を開発する。
- (2) 学習した分散量は各ノードへ広告され、広告された情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることを実証する。

(エ) システム実証・評価

分散フリースポンド、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した試作システムにより、実フィールドでの実証・評価を実施する。

2-2-2 中間目標（平成 20 年 1 月末）

（ア）分散フリースポンド

方式の確かさを見極め、LSI 開発が順調にスタートしていること。

(1) 10Gbps に対し 2,000km の分散を補償できる光フリースポンドの実現可能性を、計算機上のエミュレーションにて実証すること。

(2) 上記を実機にて実現するための高速 LSI 開発に着手し、論理設計を終えていること。

（イ）MEMS 駆動光スイッチ

デバイスとしてのスイッチ開発を完了していること。

(1) アド・ドロップ機能とマトリクス切替機能を兼ね備え、任意の波長パスを任意の経路に出力可能なダイナミック ADM 用としてのスイッチの試作を終える。40 x 40 のマトリクス構成で、1ms 以下のスイッチング動作を実現する。40 ポートの挿入損失は 10dB 以内で、光可変減衰器 (VOA) によりポート間の損失偏差を±0.5dB 以下に安定化する機能をモノリシックに集積する。

（ウ）自律適応型ネットワーク制御モジュール

中間目標までに個々の機能試作、機能検証を完了させる。

(1) オプティカルパスレンジング機能として、自律的に光伝送路の分散量（精度 5% 以内）を学習できることを実験系において実証すること。

(2) 分散フリー全光パス最適設定機能として、標準プロトコル (GMPLS) を拡張することにより、伝送路特性（分散）情報をノード間で広告することができ、適切な全光パスを選択でき、かつデバイス設定パラメータが導出できることを実証すること。

（エ）システム実証・評価

(1) 実ネットワークを計算機で模擬したエミュレータ上で、分散フリースポンド、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールが連携して、適応制御光トランスポートネットワークが実現できることを実証すること。

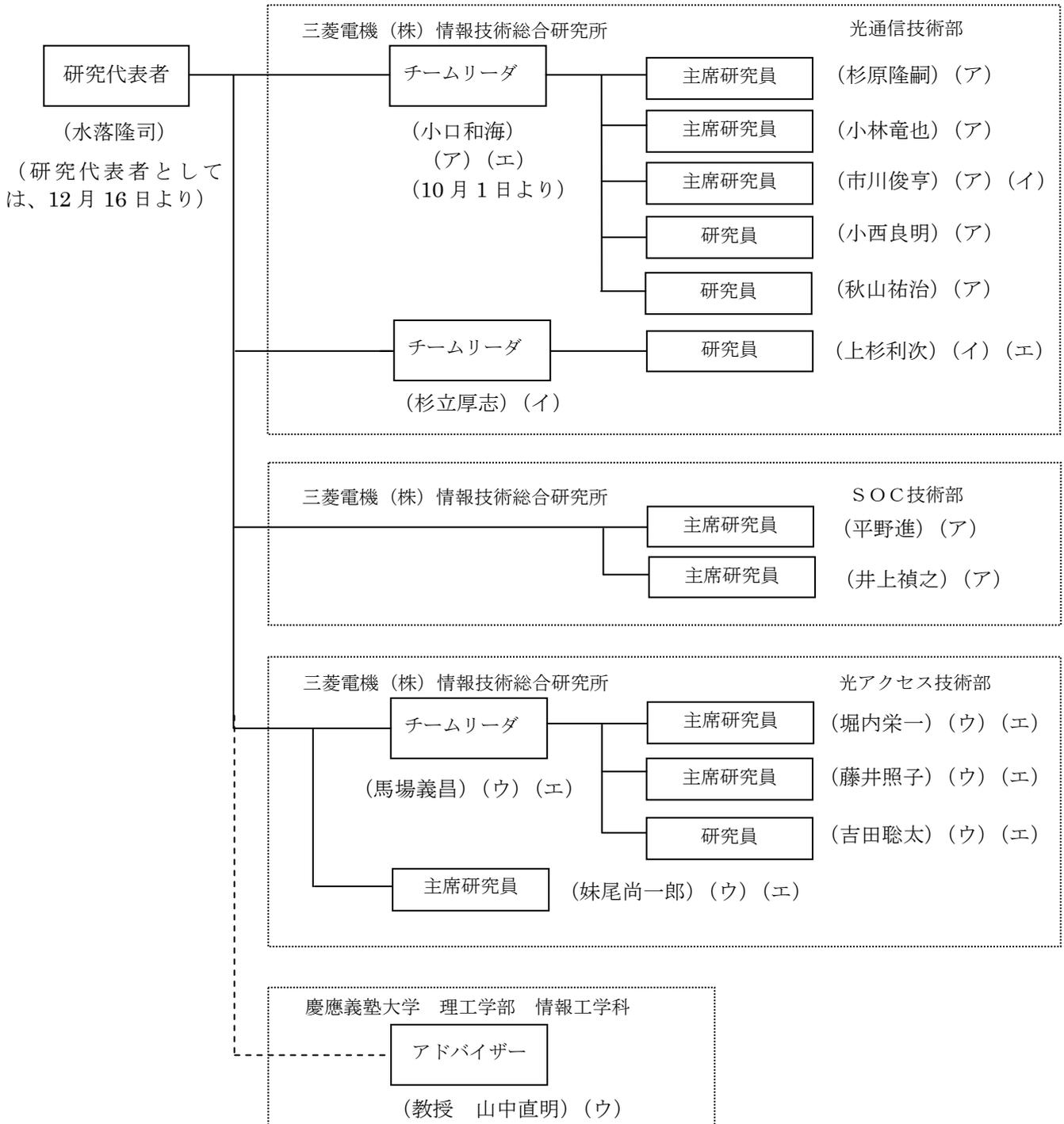
2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	計	備考
(ア) 分散フリートランスポンダ 方式設計・エミュレーション LSI 試作・装置試作 実験室評価・フィールド試験	—	—	—	—	—	—	
(イ) MEMS 駆動光スイッチ MEMS 機構開発 スイッチ試作 改良試作 装置化・実フィールド評価	—	—	—	—	—	—	
(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュール 機能試作・機能検証 組合せ評価・フィールド試験	—	—	—	—	—	—	
(エ) システム実証・評価 エミュレーション評価 実験室・実フィールド評価	—	—	—	—	—	—	
間接経費	—	—	—	—	—	—	
合計	—	—	—	—	—	—	

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



(ア) 分散フリーストランスポンダの開発 (イ) MEMS 駆動光スイッチの開発
 (ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの開発 (エ) システム実証・評価

4 研究開発実施状況

4-1 分散フリースポンドの研究開発

4-1-1 概要

分散フリースポンドは、光トランスポートネットワークのシステム初期コスト低減を図りつつ伝送距離を延伸する目的で、分散によって生じる波形歪みを送信側の高速電気信号処理プリコーディングにて等化することを目的としている（図 4-1-1-1）。本開発において、図 4-1-1-2 に示す開発フローに沿って、分散フリースポンドの実現に必要な、方式エミュレーション、高速 LSI 設計、トランスポンド設計を完了した。また、設計結果を反映した高速 LSI および分散フリースポンドにて、伝送試験を行い分散フリースポンド動作が実現できていることを確認した。

以下、各設計・検証内容について記す。

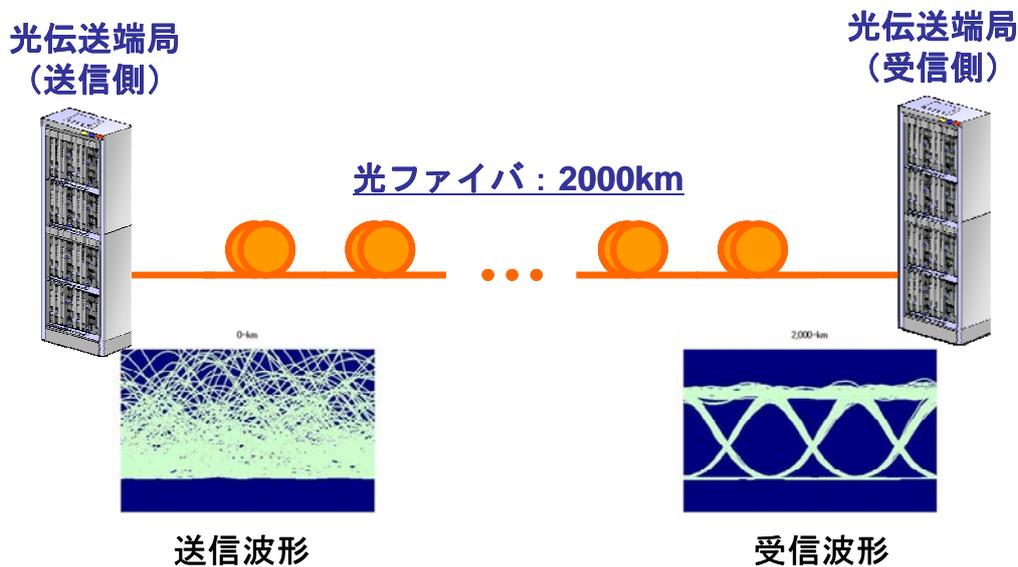


図 4-1-1-1 分散フリースポンドを用いた光伝送の様子

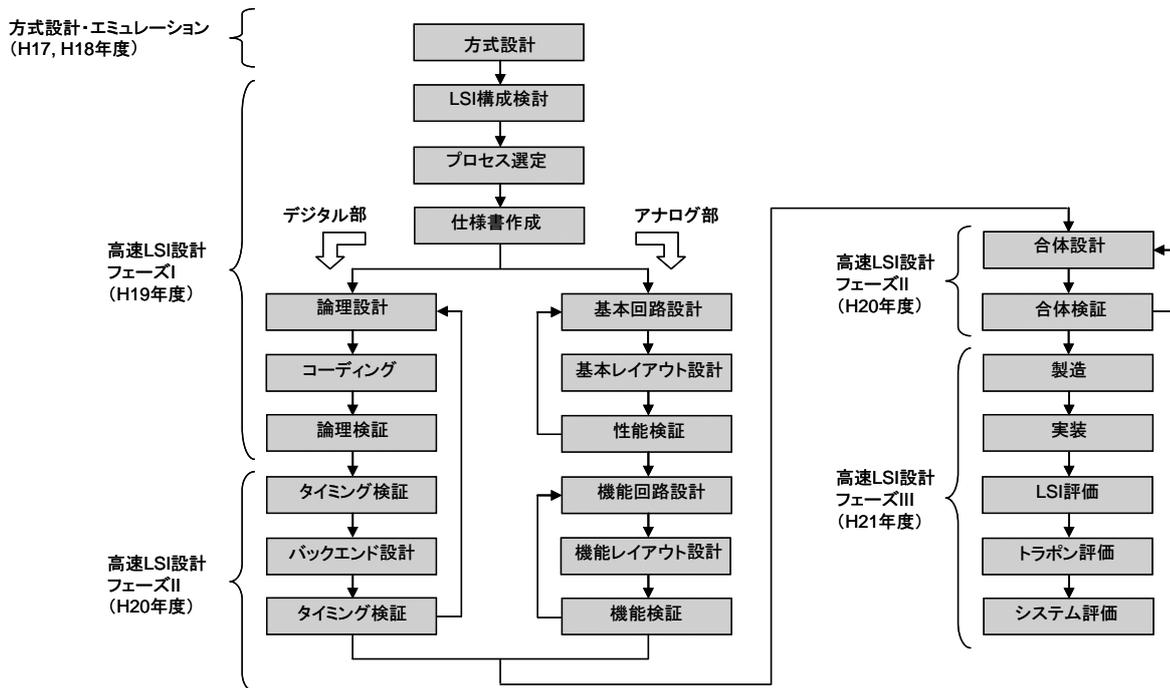


図 4-1-1-2 分散フリートランスポンダ開発フロー

4-1-2 方式エミュレーション (平成 17~18 年度)

実際の光送信器を構成する上では、プリコード時の各種誤差や光変調器の構成・伝送路の雑音特性など多岐にわたるパラメータを勘案した上での方式詳細検討が必要不可欠となる。以下では、回路方式設計内容およびシミュレータ開発内容について述べる。

4-1-2-1 シミュレータ開発

図 4-1-2-1 に分散フリートランスポンダの機能ブロック例を示す。入力送信データ系列に対して伝送路逆伝達関数によるプリコーディングを行う機能を有する。サンプリング速度はビットレートの倍とし、光変調器駆動に用いるアナログ信号は k ビットの振幅分解能 (量子化ビット数) とする。波長分散を補償した光信号を出力するには、任意の複素光電界を生成する必要があるため、I-ch、Q-ch の 2 系列の信号で I/Q 変調器を駆動する。プリコーディング部演算機能を盛り込んだ GUI ベースのシミュレータを開発し、統合環境シミュレータを構築し、回路方式検討に必要なパラメータを決定した。また、本シミュレータを元に、光の送受信動作を考慮したエミュレータを開発した。エミュレータ動作例を図 4-1-2-2 に記す。図 4-1-2-2 は分散フリートランスポンダに適用により、10Gbps 2,000km 伝送を行った場合の計算例であるが、伝送後も信号品質が良好に保たれていることがわかる。

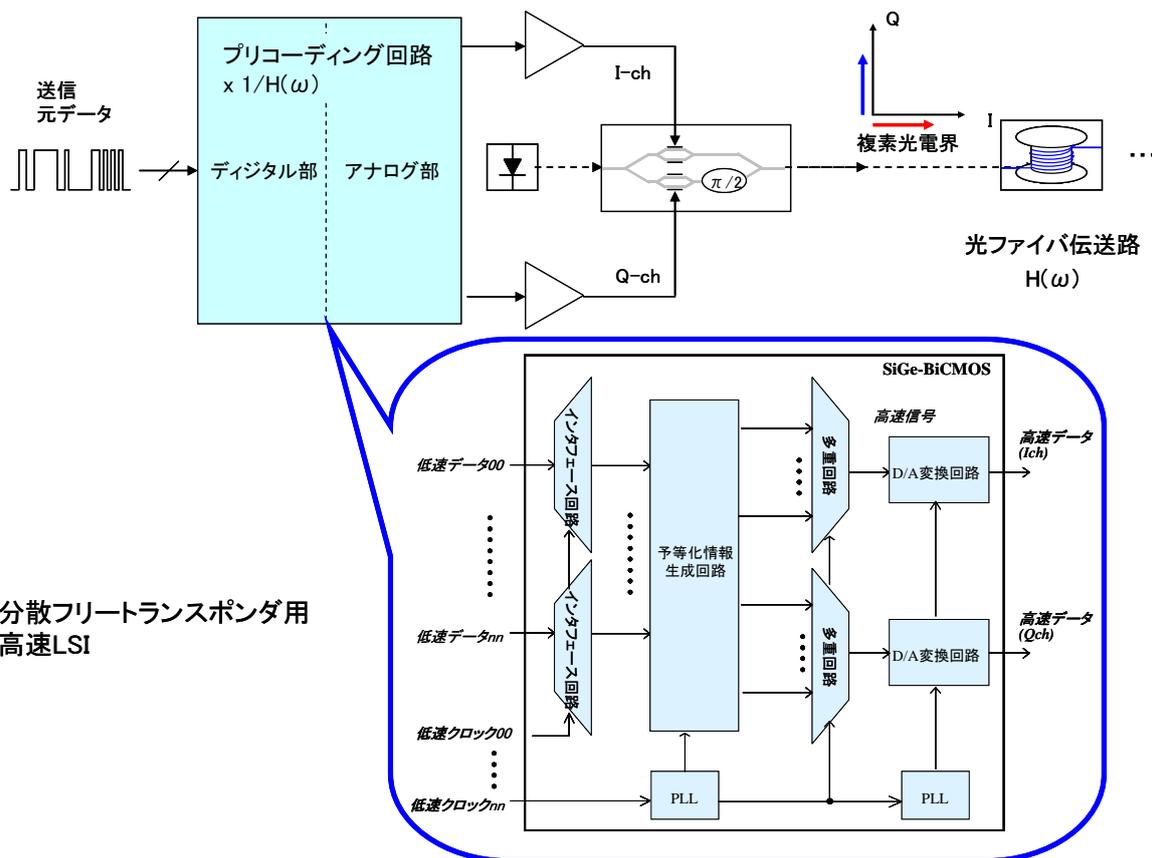
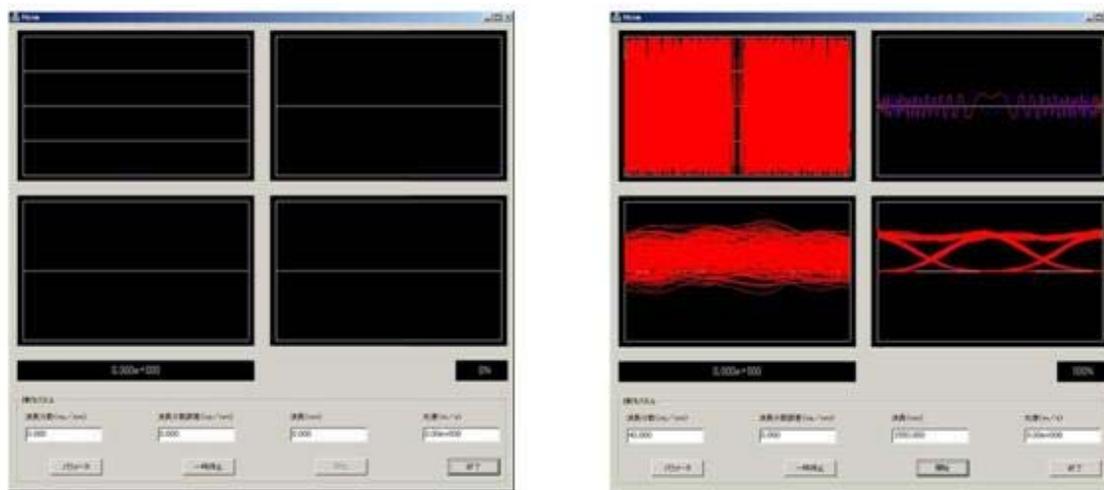


図 4-1-2-1 分散フリートランスポンダの機能ブロック例



(a) 起動画面 (b) 10Gbps 2,000km 伝送エミュレーション時
 図 4-1-2-2 分散フリートランスポンダエミュレータ動作例

4-1-3 高速 LSI 設計 (平成 19~20 年度)

分散フリートランスポンダを実機にて実現するためには、キーデバイスであるプリコーディング機能を持つ高速 LSI (図 4-1-2-1) の開発が必須である。図 4-1-2-1 に示すデジタル回路とアナログ回路とを別 LSI とした場合、LSI 間を走る並列データのスキュー調整用回路による回路規模の増加や、並列データ入出力用のピンによるチップサイズの増大の問題が判明した。これらを克服するため、開発難易度は増すが、デジタル・アナログ混在 LSI

開発を選択し、開発した。以下では、図 4-1-1-2 の開発フローに沿って行った、高速 LSI 設計フェーズ I～フェーズ III の内容について述べる。

4-1-3-1 デジタル回路設計

本 LSI のデジタル部設計としては、光ファイバ伝送路の予等化情報を生成する大規模なデジタル回路の実現が重要である。デジタル回路では、10.5Gbps の高速データ信号を扱う必要があるばかりでなく、後段のアナログ部との同期動作が必要であるため、内部低速パラレル信号の取り扱いおよびクロック系の設計が非常に重要となる。また、LSI の入出力動作速度に合わせて信号を多重化する MUX 機能が回路規模の観点から重要となる。以下では、本 MUX 機能の設計結果について詳細を記す。

本 MUX 機能は SFI-4 準拠の平行→シリアル変換動作を行う必要がある。加えて、伝送路出力のシリアル信号に対応した CMU の機能が必要となり、通常の分散フリー機能を持たないトランスポンダ同様のジッタ特性を満足する必要がある。ここで、PLL 回路はデジタル部およびアナログ部の両特性にインパクトを与える主要機能部であり、高速 LSI 全体として良好な動作を実現するためには不可欠な機能ブロックである。以上を鑑み、開発した高速 LSI では、PLL として ITU-T G.8251、G.783 準拠のジッタ特性が得られるよう回路設計を行った。トランスミッタとしてのジッタジェネレーション規格を表 4-1-3-1 に示す。設計した PLL 回路の主要機能は以下の通りである。

- (1) 2.7GHz 帯クロック源として発振周波数範囲が 2.65GHz～2.680GHz 以上である電圧制御発振器(VCO: Voltage Controlled Oscillator)を有し、PLL の引き込み範囲は、上限：2.680GHz、下限：2.65GHz をカバーする。
- (2) 二入力として 1)外部クロック、2)上記 VCO 出力の 4 分周クロック (あるいは 16 分周クロック)、である位相比較器を有する。
- (3) ローパスフィルタ(LPF: Low Pass Filter)を有する。
- (4) 位相比較器の一入力として、(1)カウンタクロック、(2)データ並走クロック、の 2 つを選択可能なセレクトを有する。
- (5) 2.7GHz クロックとして、1)VCO 出力クロック、2)外部入力クロック、3)CMU からのカウンタクロック、の 3 つを選択可能なセレクトを有する。
- (6) 2.7GHz クロックに対して、複数の分周比を持つ分周回路を有する。
- (7) 2.7GHz クロックの分周クロックを各機能ブロックおよび、外部ピンに出力する機能を有する。
- (8) 各機能ブロック間で、クロックのレベル変換を行う。
- (9) 1.35GHz クロックを 16 逡倍して 21.5GHz クロックの生成を行う。

設計では、図 4-1-3-1 に示すクロック系モデルによりジッタ特性見積りを実施した。設計時のジッタ測定用フィルタの特性を図 4-1-3-2 に示す。また、PLL ループ内の VCO の位相雑音の特性として、VCO 設計結果を反映した図 4-1-3-3 および図 4-1-3-4 を仮定した。図 4-1-3-5 および図 4-1-3-6 に Typical 条件および Worst 条件での位相雑音特性見積り結果を示す。表 4-1-3-2 には位相雑音見積り結果から得られるジッタ特性評価結果を示す。表 4-1-3-2 から、21.5GHz 基準で見た場合においても、十分なマージンを持ってジッタジェネレーション規格を満足できていることがわかる。なお、設計においては、PLL 内のチャージポンプの漏れ電流の影響によるジッタ増加およびクロック配線時の損失補償およびレベル変換のためのバッファ多段接続によるジッタ蓄積の影響を最低限に抑えるよう、回路パラメータおよびレイアウトを最適化した。

表 4-1-3-1 トランスミッタのジッタジェネレーション規格

測定帯域		Limit [UIp-p]	参照規格
High-pass [kHz]	Low-pass [MHz]		
20	80	0.3	OTN: ITU-T G. 8251
4000	80	0.1	
20	80	0.3	SDH: ITU-T G. 783
4000	80	0.1	

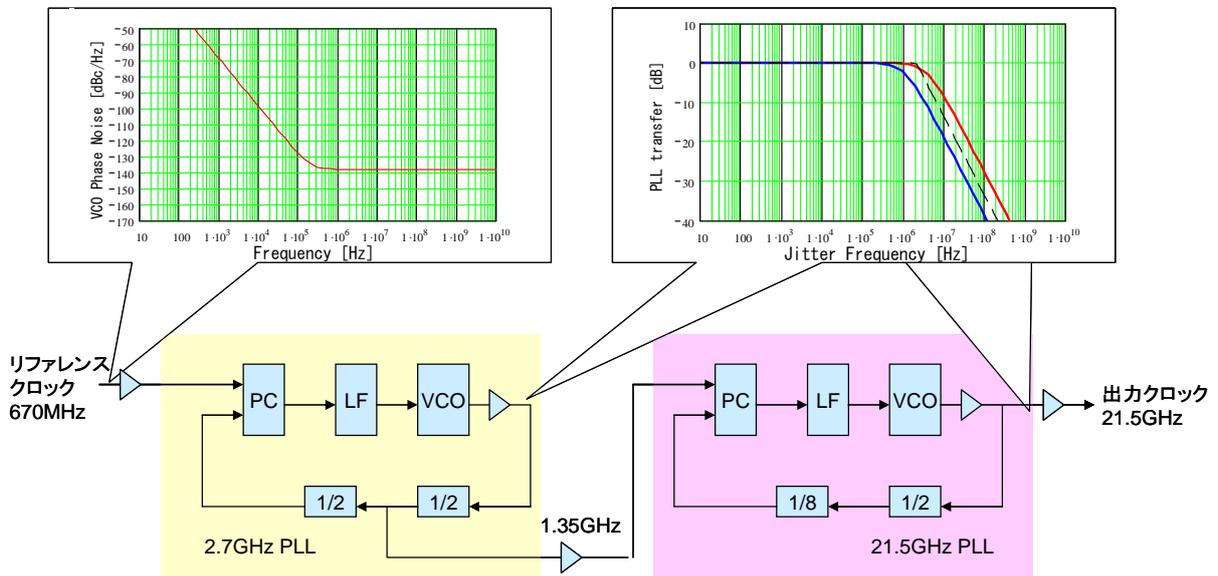


図 4-1-3-1 ジッタ特性見積りモデル

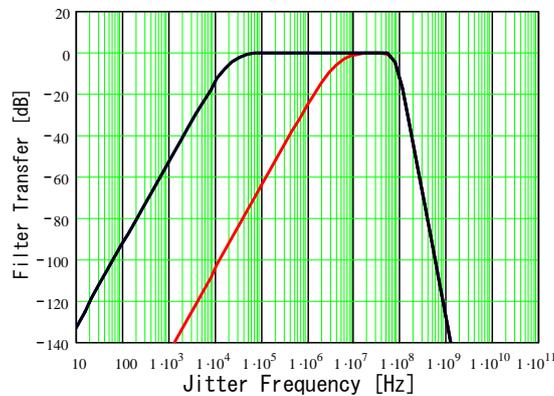


図 4-1-3-2 ジッタ測定用フィルタ

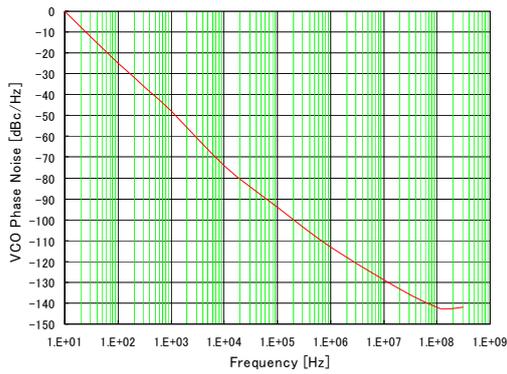


図 4-1-3-3 2.7GHz VCO 位相雑音

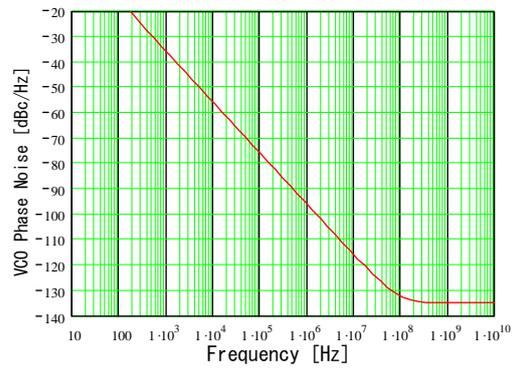


図 4-1-3-4 21.5GHz VCO 位相雑音

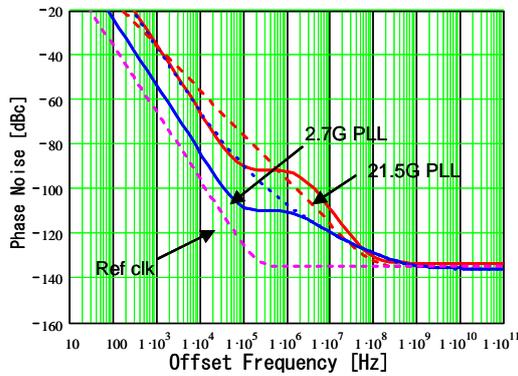


図 4-1-3-5 Typical 条件での位相雑音特性

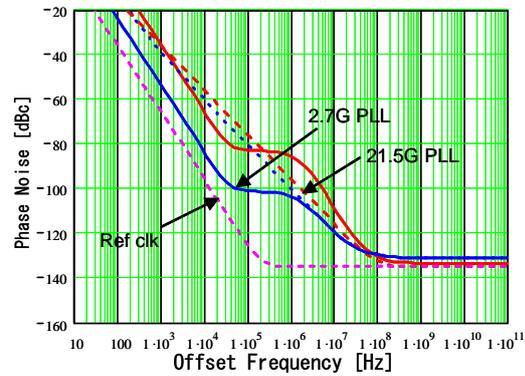


図 4-1-3-6 Worst 条件での位相雑音特性

表 4-1-3-2 PLL 設計結果

測定帯域		規格 [UIp-p]	UIp-p 規定速度	設計値	
High-pass [kHz]	Low-pass [MHz]			Typical	Worst
20	80	0.3	10.7G	0.05	0.098
			21.5G	0.1	0.196
4000	80	0.1	10.7G	0.022	0.032
			21.5G	0.044	0.064

4-1-3-2 アナログ回路設計

本 LSI のアナログ部設計としては、10Gbps の任意波形を生成する高速アナログ回路の実現が必要となる。

分散フリーストランスポンダ用高速 LSI のアナログ部の主機能は、2 倍オーバーサンプリング以上の高速動作可能な D/A 変換機能である。D/A 変換の回路には、グリッチ抑圧に効果のあるセグメント方式と、高速サンプリングに適するウエイト電流スイッチ方式がある。グリッチを抑圧しつつ 22Gsample/s の速度を実現するために両方式を併用し、N/6 で表わされるセグメントレベルを検討した。図 4-1-3-7 に、設計した 22Gsample/s 6bit の D/A コンバータの回路構成を示す。入力 6bit の内、N-bit を Thermometer Decoder 回路に入力し、残りの (6-N) bit を遅延調整回路に入力する。Thermometer Decoder 回路はエンコードされた (2N-1) bit を出力し、遅延調整回路は (6-N) bit を出力する。D-Flip/Flop (DFF) 回路はリタイミングを行う。電流比の精度を確保するため、ウエイト電流スイッチの電流源のトランジスタをマルチエミッタとした。グリッチおよび消費電力の観点から、セグメントレベルは 50% (N=3)。セグメントレベルを 50%とした場合の、DAC 出力シミュレーション例を図 4-1-3-8 に記す。64 階調ランプ、22Gbps 変調のいずれにおいても、良好なアイパターンが得られている。図 4-1-3-9 には、上記設計に基づいて試作した D/A 変換回路での出力波形測定例を示す。シミュレーションと合致した、良好な出力波形特性が得られた。

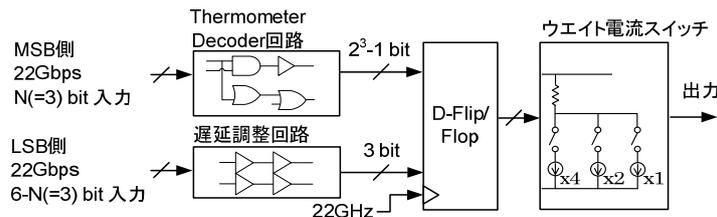


図 4-1-3-7 D/A コンバータ構成ブロック

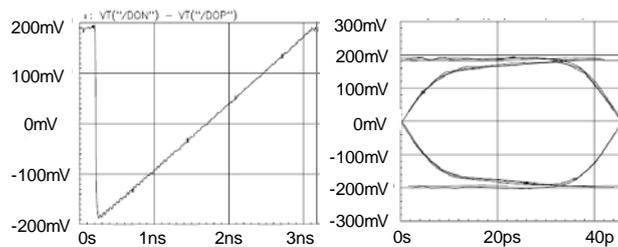


図 4-1-3-8 22Gbps データ出力シミュレーション例
左：64 階調ランプ、右：15 ビット疑似ランダムパターン

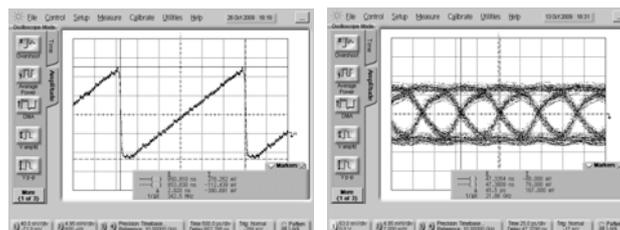


図 4-1-3-9 22Gbps データ出力測定波形
左：64 階調ランプ、右：15 ビット疑似ランダムパターン

4-1-3-3 LSI 全体設計・検証

デジタル部・アナログ部回路の各回路ブロックを合体させ、1 チップでの全体設計・検証を実施した。1 チップの LSI としての設計妥当性は、以下の各検証をクリアすることで確認した。

- ・検証項目
 - DRC (design rule check)
 - LVS (layout versus schematic)
 - ANTENNA
 - ESD_LUP
 - STRESS
 - ERC (electrical rule check)
 - Bipolar 部 Sim
 - デジタル部 STA (static timing analysis)
 - IR Drop
 - 等価性検証
 - 接続検証
 - RTL Check

平成 21 年度は、高速 LSI 設計フェーズⅢにおける製造、実装を確実に実施するために高速 LSI 回路設計(7)として、高速 LSI チップ製造および実装を行った。

また、同じく高速 LSI 設計フェーズⅢにおける LSI 評価を短期間にて行うために、高速 LSI 回路設計(7)として、高速 LSI チップ評価を実施した。具体的には、専用の LSI 製造実装設備、LSI 評価設備を有する製造会社に作業を委託し、結果として、効率良い開発が出来、高速 LSI 設計フェーズⅢを予定通り完了した。

4-1-4 トランスポンダ設計・検証 (平成 17~21 年度)

高速 LSI を用いた分散フリートランスポンダを実現・検証を行うために、トランスポンダ評価設備構築、トランスポンダ設計、伝送試験を行った。以下では、各研究開発内容について述べる。

4-1-4-1 分散フリー端局評価設備開発

分散フリー端局装置評価設備開発として、分散フリートランスポンダを評価するための架、シェルフ、制御用カードにて構成される評価設備の構築を実施した。

主たる構成要素である架、シェルフ、制御用カードについて次に説明する。

①分散フリー端局評価設備の架には、複数のシェルフを収容することが可能なラックマウント型の EIA 規格準拠シェルフ収容架を適用した。

②シェルフは、専用バックボード、専用ファンを搭載し、制御用カード及び分散フリートランスポンダ評価カードを収容することが可能なカード収容シェルフである。シェルフの機構設計、バックボードの電気設計を実施し、専用シェルフの製作を行った。

③制御用カードは、シェルフに収容され、制御カード内に実装されている CPU を用いて、同一シェルフに収容される他のカード類の制御、監視などを行う。制御用カードは、CPU、メモリコントローラ、各種メモリを搭載する。CPU はメモリコントローラを介して制御用

カード上の各種デバイスに対して、各種の設定、情報の収集、データの書き換えを行う。また、イーサネットポートを有し、外部端末との通信を行う。

監視制御系評価装置は、監視制御系プラットフォームの機能評価、性能評価を実施するための設備である。評価結果は、分散フリー端末装置評価設備の監視制御系 S/W に反映した。

分散フリートランスポンダの試作、その性能評価において、試作分散フリートランスポンダを評価カードに実装し、その評価カードをシェルフに收容し、制御用カードにより制御、監視することにより、試作分散フリートランスポンダの伝送特性評価を行った。伝送特性評価結果については、後段にて述べる。

4-1-4-2 トランスポンダ設計

図 4-1-4-1 に分散フリートランスポンダの全体機能ブロックを示す。トランスポンダ全体としては、分散フリートランスポンダ用高速 LSI の他に、クライアント I/F、誤り訂正機能部、光源、光変調部、変調器駆動用ドライバ、データ分離部、光受信部、基板制御部、送信制御部を主要構成要素とする。試作した分散フリートランスポンダを図 4-1-4-2 に示す。以上の、本機能部を有する分散フリートランスポンダを実現し、伝送特性評価、課題エでの連携動作試験を実施した。

各機能部のうち、性能向上・動作安定化のためには新しい変調器駆動方式が必要となる。以下では、本開発にて考案した変調器駆動方式と制御精度検討結果について記す。

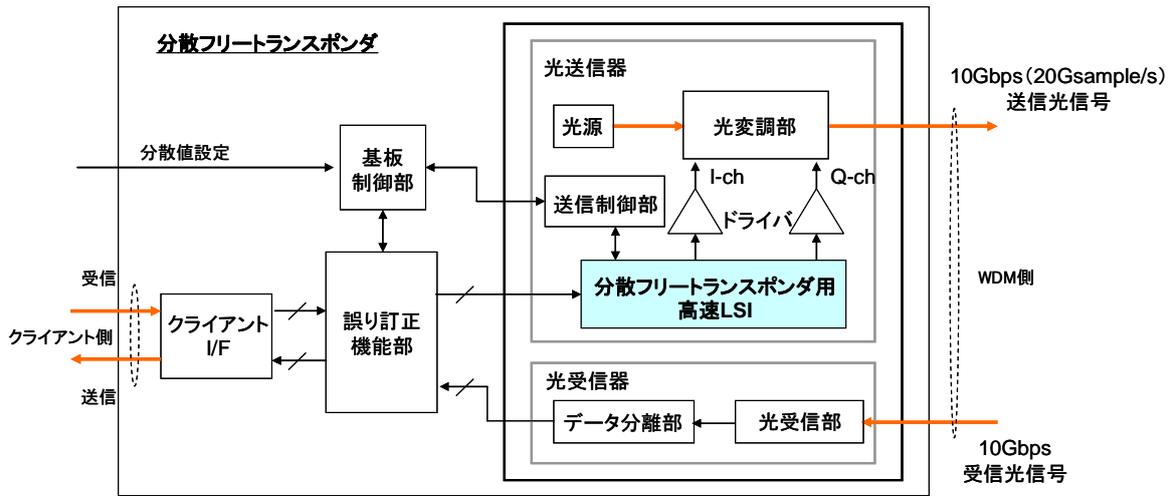


図 4-1-4-1 分散フリートランスポンダ機能ブロック



図 4-1-4-2 試作した分散フリートランスポンダ

プリコーディング光送信器では、変調器駆動系の I-ch、Q-ch のそれぞれに複素光電界の実部および虚部を割り当てる。一般的なプリコーディング演算部の構成を図 4-1-4-3 に示す。分散補償量ゼロでは Q-ch は存在せず I/Q 変調器の Q-ch 側を消光の状態で使用することになるため、変調器で 3dB の過剰挿入損失が発生してしまう。

上記問題を解決するために、図 4-1-4-4 に示す座標変換を用いたプリコーディング演算方式を考案した。従来の I-ch、Q-ch データ $D_r(t)$ 、 $D_i(t)$ に対して、座標変換後のデータである

$$(I'-ch) = \frac{1}{\sqrt{2}} D_r(t) + \frac{1}{\sqrt{2}} D_i(t), \quad (Q'-ch) = -\frac{1}{\sqrt{2}} D_r(t) + \frac{1}{\sqrt{2}} D_i(t)$$

を用いて変調器を駆動することで、 $D_r(t)$ 、 $D_i(t)$ の大きさによらず、両チャンネルの同振幅駆動を実現する。このため、図 4-1-4-3 の従来構成で問題となった光変調器の Q-ch 側の過剰損失は発生せず、システムの信号対雑音比を改善する。

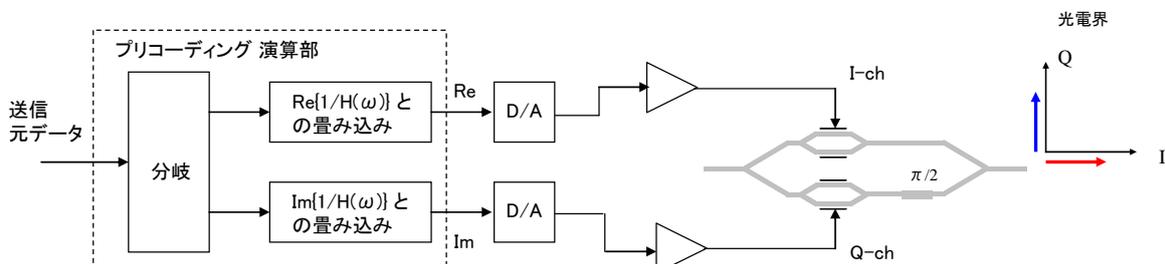


図 4-1-4-3 従来のプリコーディング演算部の構成

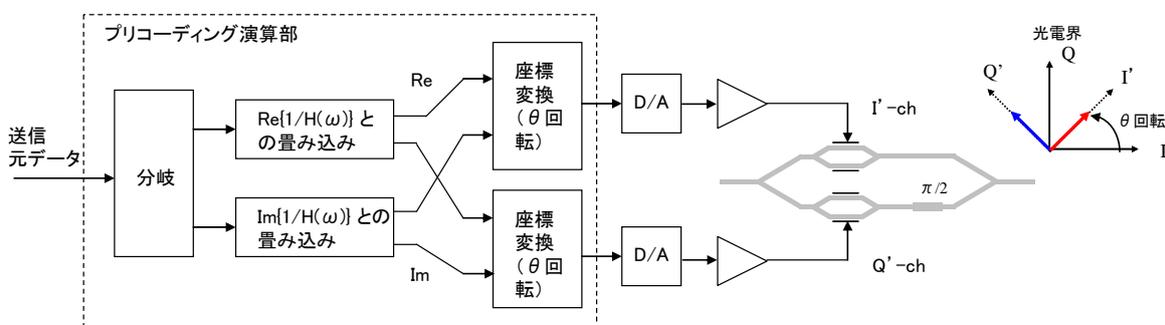


図 4-1-4-4 座標変換動作を行うプリコーディング演算部の提案構成

図 4-1-4-4 の提案構成における挿入損失低減効果を計算した結果を図 4-1-4-5 に示す。ここで伝送符号は 10Gbps NRZ とした。座標回転角度が $\pi/4$ に設定することで、分散予等化量によらず挿入損失を最大で 3dB 改善できることが明らかとなった。

座標変換を行った場合 ($\theta=\pi/4$ rad.) の変調器バイアス制御精度について検討した。図 4-1-4-6 に計算結果を示す。0.5dB のペナルティに対しての必要精度は 0.1π rad. である。座標回転角 $\theta=\pi/4$ rad. でのペナルティ特性は、座標回転なし ($\theta=0$ rad.) の場合と同等であり、座標変換操作により制御精度は劣化しないことがわかる。

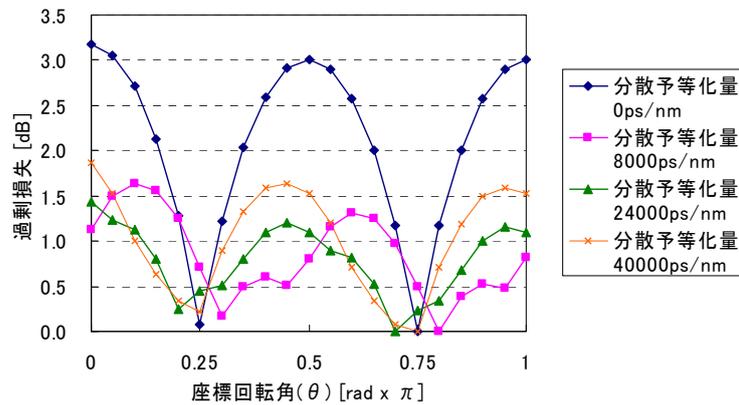


図 4-1-4-5 変調器過剰損失の座標回転角依存性

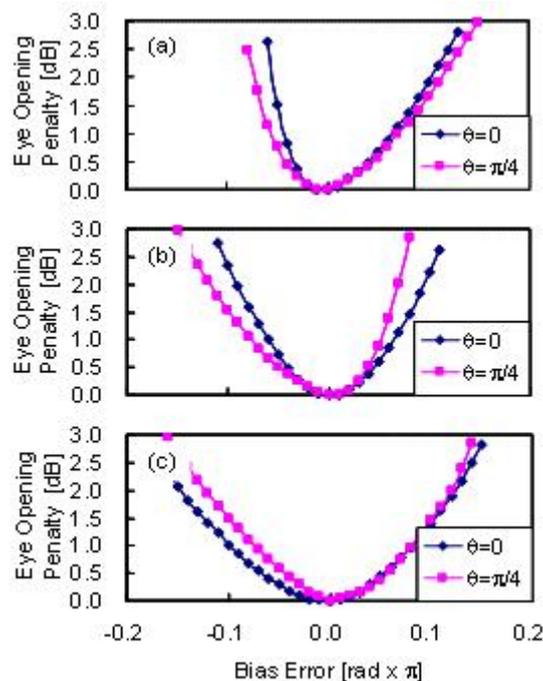


図 4-1-4-6 NRZ 変調におけるバイアス誤差耐力

(a) I-ch MZI に対するバイアスずれ、(b) Q-ch MZI に対するバイアスずれ、(c) I-ch/Q-ch 相対光位相ずれ

4-1-4-3 伝送特性評価

分散フリートランスポンダを用いた伝送においては、予等化送信の状態に関する精度、解像度、安定性は、実際の伝送特性に大きな影響を与える。また、送信端での過度の予等化は、伝送路ファイバ中での非線形光学効果に関わることが知られており、様々な条件下（特にフィールド環境）での伝送実験を行うことは、予等化技術を広範な光通信システムに導入する際に欠かすことができない。以降では、実験室環境下での SMF-500km 伝送 (8171 ps/nm 補償) の実験結果を記す。また、実フィールド環境として JGN2-plus 光テストベッドネットワーク環境で行ったが、フィールド環境での試験結果については、課題 (エ) にて記す。

予等化技術を用いた SMF-500km における 10Gbps DPSK 伝送実験を行った。実験系を図 4-1-4-7 に示す。送信器では、10Gbps クライアント信号が FEC 符号化された後に、MSA-300pin インターフェースを介して予等化 LSI に供給される。予等化 LSI では、I-ch/Q-ch 用の予

等化処理されたアナログ波形が生成される。アナログ波形を生成する DAC の分解能は 6-bit である。DP-MZM (Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator) は、予等化された光 DPSK 信号を生成する。クライアント信号としては、ランダムデータ (PRBS31) を使用した。FEC の冗長度は 7% である。500km の伝送路は、10 個のファイバースパンと 10 個の EDFA (980nm 励起) にて構成した。試験波長 (1550.6nm) でのトータル分散は 8170ps/nm であった。非線形光学効果を抑圧するために、8 波のダミー光 (CW 光) を挿入しており、SMF 伝送路への出力パワーは -2dBm/ch である。500km 伝送後の着信 OSNR は 25dB/0.1nm であった。

伝送後波形と BER を 100km、200km、300km、400km、500km にて測定した。受信器では、光フィルタにて試験波長を抽出した後、1 ビット遅延干渉計とバランスドレシーバにて復調を行った。図 4-1-4-8(a)、(c)、(e) は送信光波形である。図 4-1-4-8(b)、(d)、(f) は受信光波形である。送信信号は目標とする分散値に応じて予等化される。分散設定の分解能は 10ps/nm である。図 4-1-4-8 に示す通り、500km-SMF 伝送後においても光分散補償デバイスを用いることなく良好なアイパターンが得られることを確認した。通常国内で敷設されている G.653 ファイバや海底長距離伝送に使用される G.655 ファイバを用いて長距離伝送を行うことを考えた場合、ファイバの分散値としては 3~4ps/nm/km をターゲットとすればよく、8170ps/nm の補償能力は、2,000km 相当の伝送が実現できることを示している。

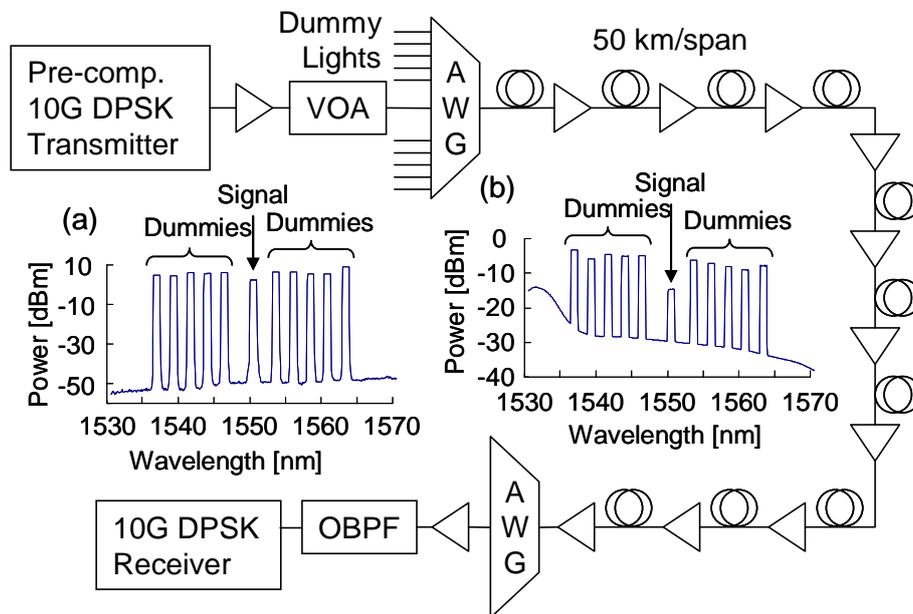


図 4-1-4-7 分散補償伝送試験系

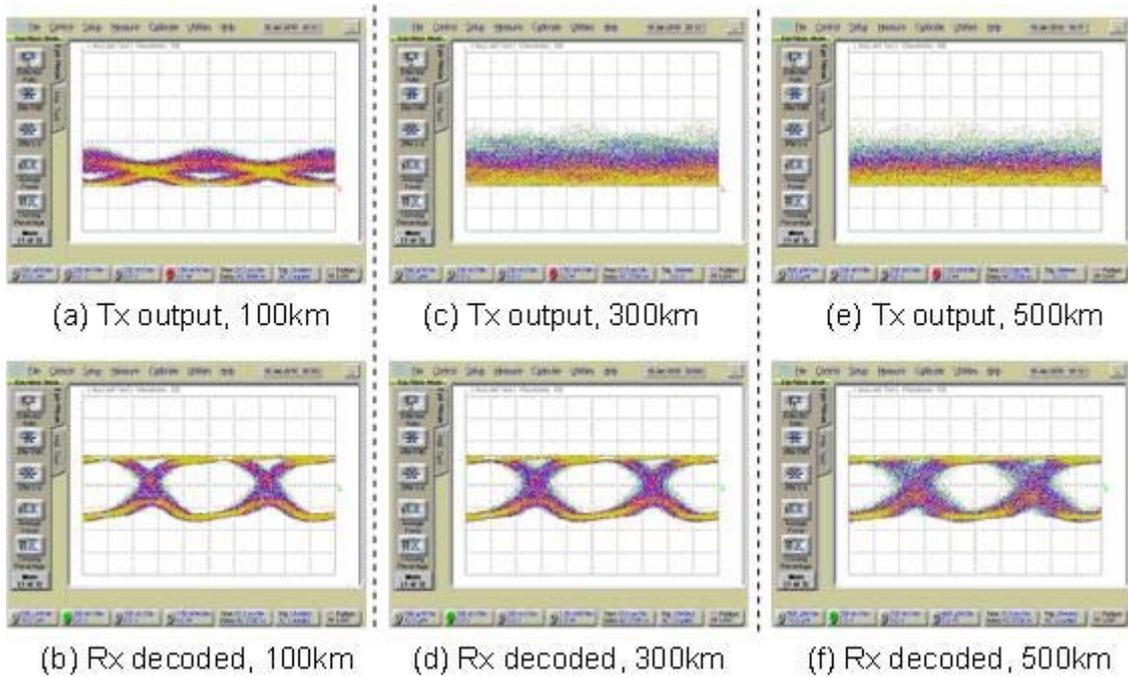


図 4-1-4-8 500km 伝送時送受信波形

4-1-5 実施計画に対する達成の状況

本研究課題では、国内ネットワークの大部分をカバーする 2,000km に相当する波長分散を補償できる光トランスポンダを開発すること、自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証することを最終目標としていた。

分散フリートランスポンダを開発し、実験室での伝送試験にて 2,000km 相当の伝送にあたる分散補償が可能であることを実証した。また、JGN2plus 光テストベッドを利用した実フィールドでの評価実験により、自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証した。

上記により、最終目標を達成することができた。

4-2 MEMS 駆動光スイッチの研究開発

4-2-1 概要

本研究開発で取り組む光スイッチは、素材として用いるポリマ導波路フィルムの柔軟性を利用し、導波路交差部に形成した溝の機械的な接合と分離により光学的透過と反射を切り替えるものである。図 4-2-1-1 に原理模式図を掲載する。

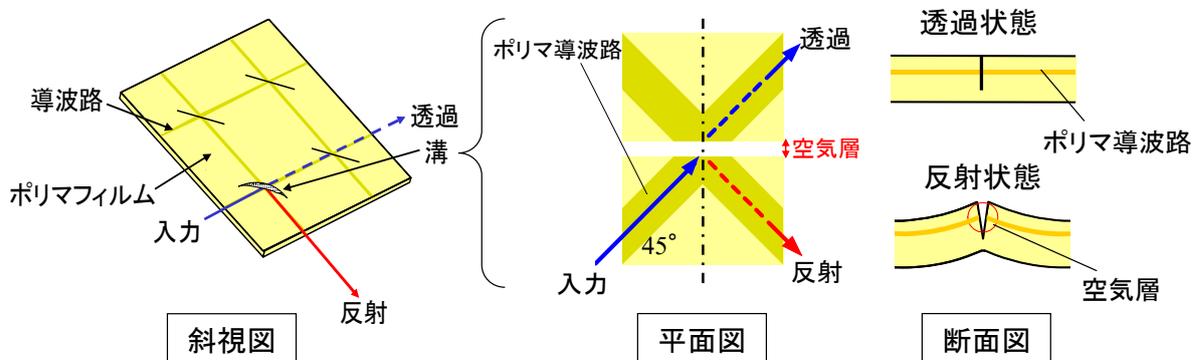


図 4-2-1-1 光スイッチの原理図

ポリマ導波路交差部の溝を開くことで空気層とポリマ導波路との屈折率差による光の全反射が起こり、光路の切り替えを実現できる。

本研究開発では、まずこの溝の開閉駆動のための MEMS 機構開発を行い、その後にスイッチ試作およびその改良、さらに実フィールド試験に適用するための装置化を実施した。以下では各々について詳細を報告する。

4-2-2 MEMS 機構開発（平成 17～18 年度実施）

本研究開発にて提案する MEMS 駆動光スイッチの駆動機構として、(1) 圧電バイモルフ式、(2) 回転駆動式、の 2 方式を比較検討した。まず圧電バイモルフ式について、図 4-2-2-1 に原理図を示す。

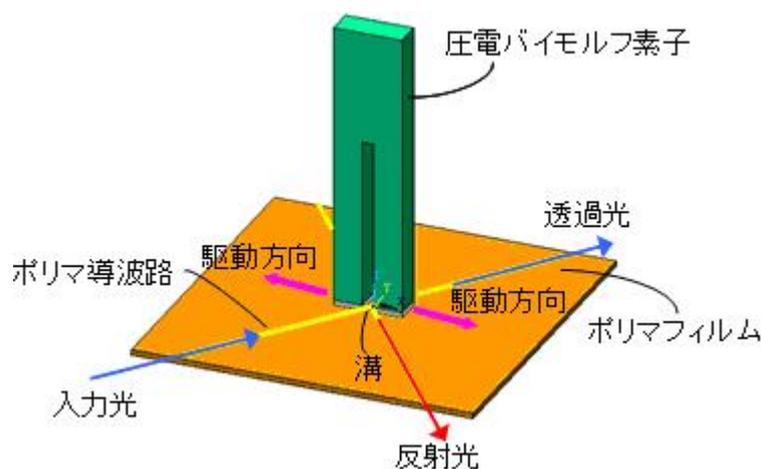


図 4-2-2-1 圧電バイモルフ式光スイッチの原理図

圧電バイモルフ式では微小圧電素子である圧電バイモルフ素子をポリマ導波路交差部の溝近傍へ実装し、その水平方向への駆動力により溝を開閉する。本方式の適用性を判断するために、スイッチングに必要な溝への駆動力と圧電バイモルフ素子の発生力との関係を検

討した。その結果を図 4-2-2-2 に示す。

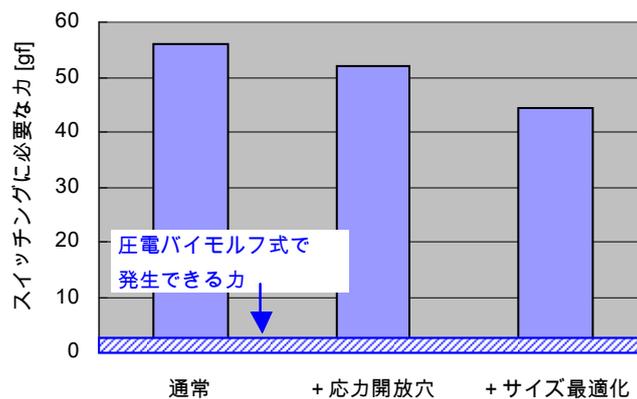


図 4-2-2-2 圧電バイモルフ式でスイッチングに必要な力

圧電バイモルフ素子の発生力と、溝開閉の所要駆動力を整合させるため、ポリマフィルムへの応力開放穴形成や、ポリマフィルムとの接合部サイズ最適化による所要駆動力低減を検討したが、光スイッチング動作に必要な力（45～56gf）に対して圧電バイモルフ素子の駆動力（2～3gf）が 1/10 以下と不足することが明らかになった。したがって、この圧電バイモルフ式では仕様を満足するのに十分な溝の開閉が不可能と結論した。

このような課題を鑑み、回転駆動により効率的に回転トルクを溝開閉に活かせる方式とした回転駆動式について次に述べる。原理図を図 4-2-2-3 に示す。

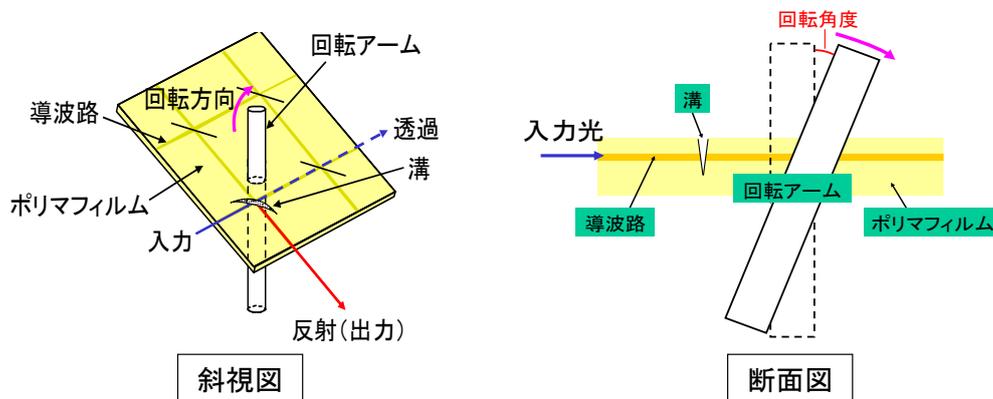


図 4-2-2-3 回転駆動式光スイッチの原理図

図中のポリマ導波路フィルム断面図に示すようにフィルムに直交して溝近傍に回転アームを実装している。溝が閉じている状態（透過状態）から回転アームを矢印方向に回転させることで柔軟なポリマフィルムを通じて溝壁に回転力を与えて溝を開き反射状態へと切り替える。本方式では回転モーメントを利用するため、回転駆動高さの最適化により任意に必要な駆動力を調整することが可能であり、構造解析により 0.6gf 程度の微小力でのスイッチング動作が可能ことが確認できた。この駆動力を発生するための具体的なアクチュエータとしては、汎用品で大量生産されているため低コスト化が期待できる電気機械式リレーを適用する。その機構構成を図 4-2-2-4 に示す。

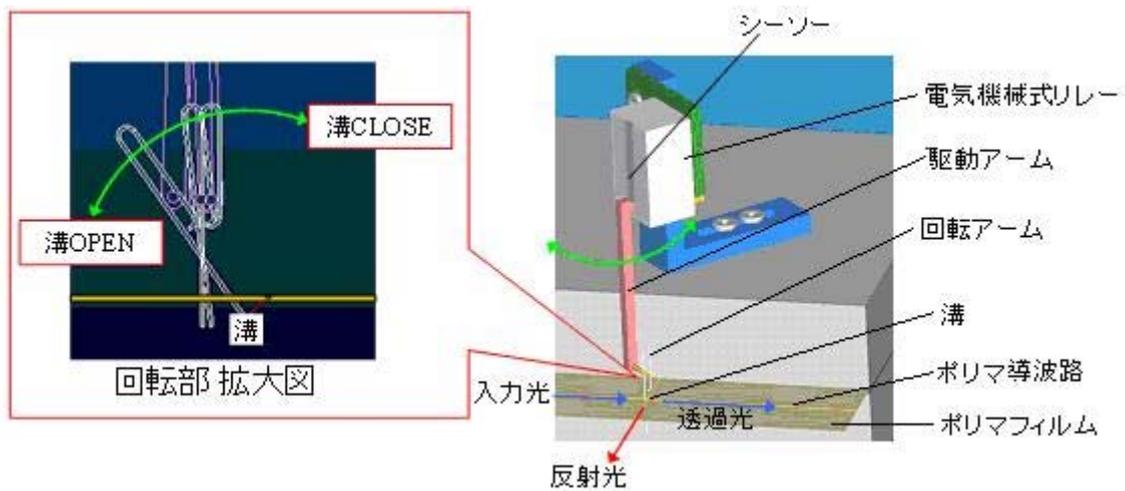


図 4-2-2-4 リレーをアクチュエータとした回転駆動式光スイッチの機構構成

リレーの先端部分に存在するシーソー状の変位部分に対して駆動アームと呼ぶ部材を取り付け、その先端突起部をポリマ導波路フィルムのスイッチ溝近傍に実装した回転アームに挿入する構成とした。リレーの電氣的スイッチングによるシーソー部分の変位に伴う駆動アームの回転により回転アームを回転することで溝の開閉を可能とする機構となる。リレーの発生力は 10gf 以上あり十分にスイッチングが可能である。次節以降ではこの機構に基づくスイッチ試作について述べる。

4-2-3 スイッチ試作 (平成 18~20 年度実施)

前節で述べた機構を元に設計を行い光スイッチの試作検証を実施した。図 4-2-2-3 における回転アームの回転角度に対する反射光出力の関係を観察した結果を図 4-2-3-1 に示す。

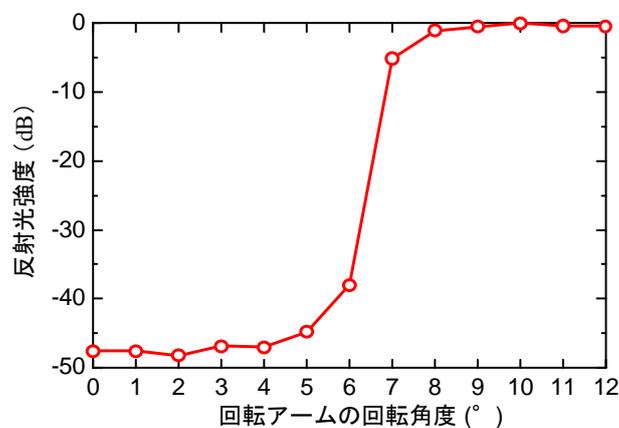


図 4-2-3-1 回転アームの回転角度と反射光強度の関係

回転駆動により良好なスイッチングが実現できることが示されている。回転角度の設定としては 7~8° 以上とすべきであることが確認できる。

次に、リレーによる駆動動作の検証の様子を図 4-2-3-2 に示す。

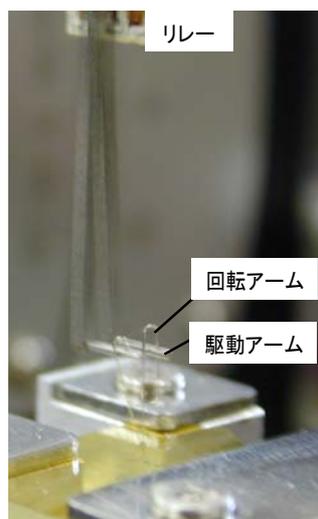


図 4-2-3-2 リレーによる光スイッチ回転駆動の様子

図の写真はリレー回転駆動時の動作を残像写真として記録したものであり、回転駆動が実現できていることがわかる。

次に、本光スイッチでのもう一つの重要な技術であるポリマ導波路フィルムについて述べる。素材となるポリマフィルムは電子部品において広く普及している材料であり、量産による低コスト化が可能である。設計したポリマ導波路フィルム内の構造を図 4-2-3-3 に示す。

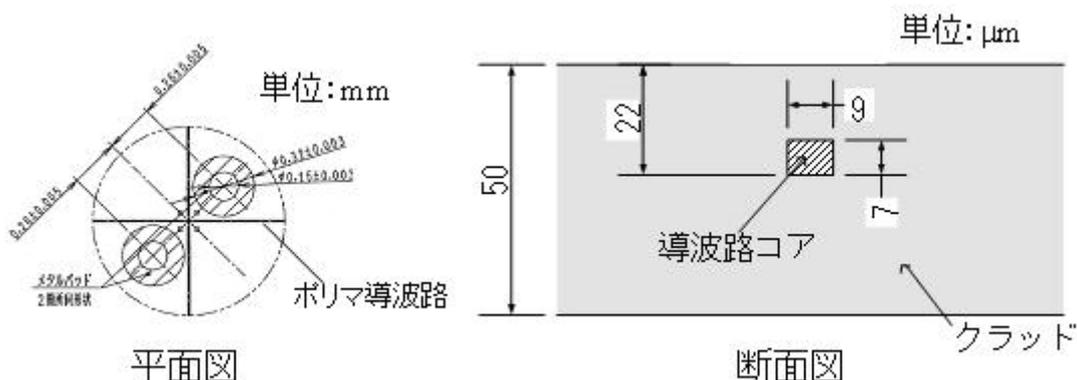


図 4-2-3-3 ポリマ導波路フィルムの構造図

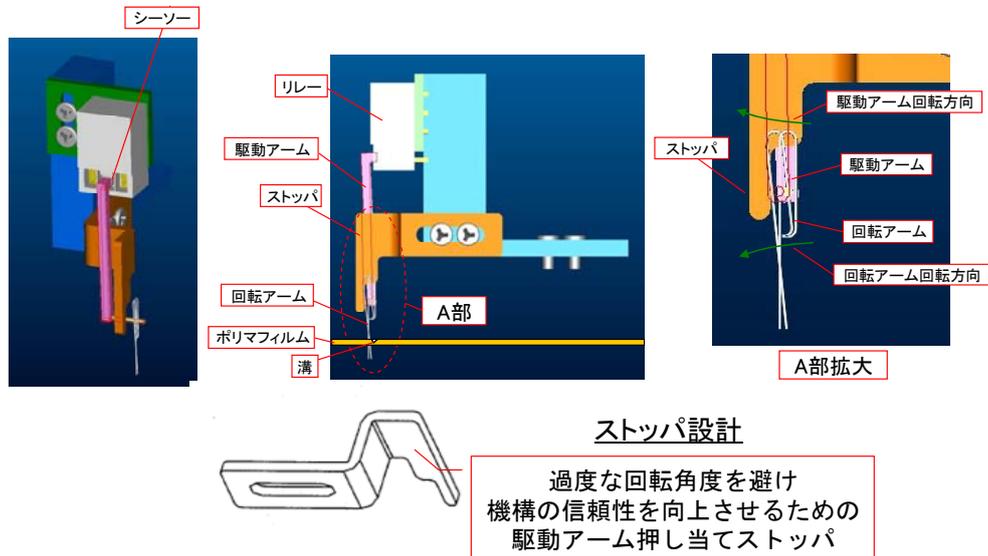
平面図における導波路交差部近傍のメタルパッドは回転アーム実装時のアライメントマークとして設計している。また、導波路については断面図に示すように $9 \times 7 \mu\text{m}^2$ の導波路コア部がクラッドに覆われておりシングルモード伝搬となるように設計している。伝搬損失は 0.15dB/cm と低損失であり、かつ溝形成部での損失も透過状態において 1 ポイント当たり 0.05dB と低損失であることを確認している。

本光スイッチにおいてはポリマ導波路フィルム上に形成した溝の開閉を利用するため、その部分での機械的な信頼性が課題として想定されるが、事前検証により 1,000 万回の開閉に耐えることを確認しており実用上問題にならないと考えられる。

4-2-4 スイッチ改良試作（平成 20 年度実施）

前節での試作において、単体でのスイッチング動作が実証できた。そのため次にスイッチ規模拡張に向けた改良設計について述べる。

課題抽出のために複数個体の試作動作検証を前節と同様に実施したところ、リレーの変位量の個体ばらつきにより回転量に差異が出るという課題が明らかとなった。規模拡張時にスイッチング特性がばらつく懸念があるため、本課題を解決するために実施した改良設計構成を図 4-2-4-1 に示す。



新たに「ストッパ」機構を配置することで回転角度の最大値を規定し、リレー個体のばらつきによる過度の回転角度を避ける設計とした。また、スイッチ規模拡張時にポートごとのばらつきを吸収するため各機構パラメータも微調整可能な機構とした。実際に試作した本回転駆動機構の写真を図 4-2-4-2 に示す。



図 4-2-4-2 改良設計した回転駆動機構の試作品

ここまでで、光スイッチのエレメント開発が完了した。次のステップは、複数エレメントを集積して規模を拡張した光スイッチの検証となる。このために、システム試験および実用化検証にも適用可能な 1×10 規模のスイッチ試作を実施した。図 4-2-4-3 に試作品の写真を示す。

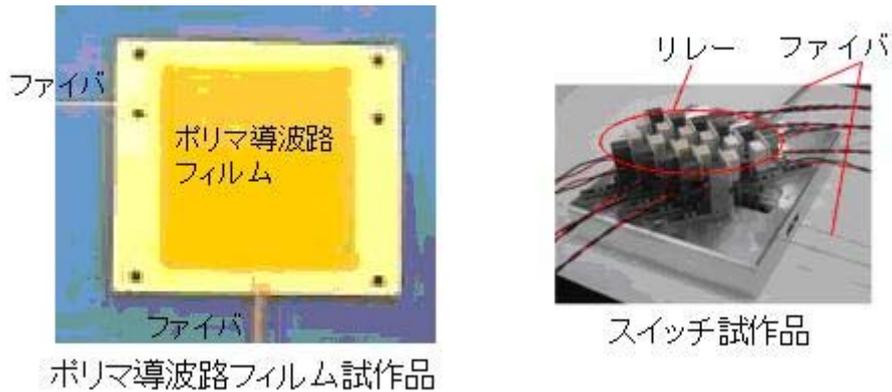


図 4-2-4-3 1×10 スイッチの試作品写真

リレーを集積しているポリマ導波路フィルムは保護のためカバーケースに覆われている。本試作品をベースとして実施した光スイッチ装置化試作およびスイッチング特性について次節で報告する。

4-2-5 装置化 (平成 21 年度実施)

本節では実フィールド評価に向けた光スイッチの装置化試作について述べる。光スイッチのアクチュエータであるリレーを電気駆動するための制御系基板を試作し、その基板上に前節にて試作した 1×10 スイッチを実装し筐体に組み込んだカード型の光スイッチ装置試作品を図 4-2-5-1 に示す。

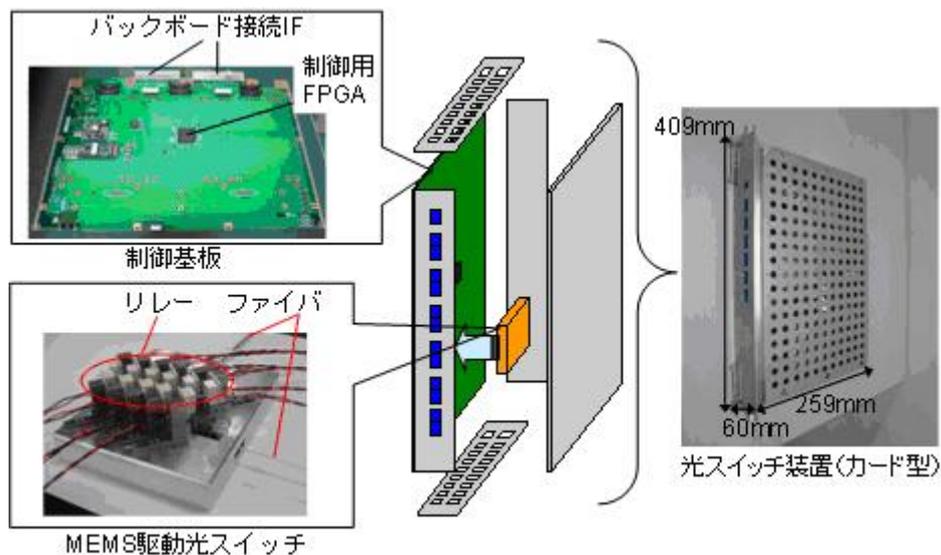


図 4-2-5-1 光スイッチ装置試作品

装置全体のサイズは $60 \times 409 \times 259 \text{mm}^3$ となり、一般的なノード装置に実装可能である。制御基板はバックボード接続 IF を有しており、ノード装置への実装時に MEMS 駆動光スイッチを監視制御カードにより制御することで課題 (ア)、(ウ) との連携を可能としている。

光スイッチの応答波形の例を図 4-2-5-2 に示す。

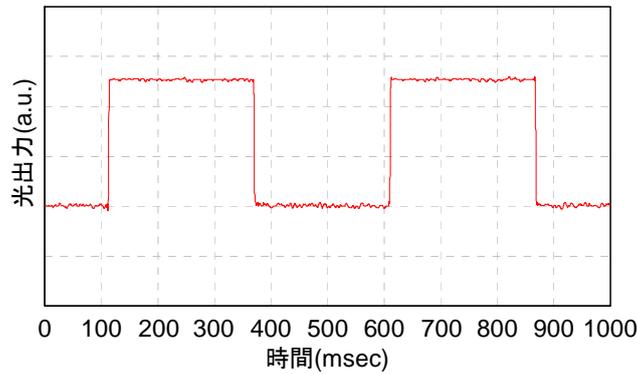


図 4-2-5-2 光スイッチ応答波形

良好な応答波形が得られていることがわかる。スイッチング速度については本研究開発の最終目標である 1ms 以下を達成している。

本光スイッチ試作品の構成 (1×10) は本研究開発の着手後数年を経て近年の市場で需要が見込まれている N:1 プロテクション用途等を想定したものであり、これ単体で事業化に魅力あるものと考えられる。

最後に、さらなるスイッチ規模の拡張設計について述べる。規模拡張に伴う光スイッチの大型化を避けるため、駆動アクチュエータのポリマフィルム上への高密度実装構成を検討した。図 4-2-5-3 にその構成を示す。

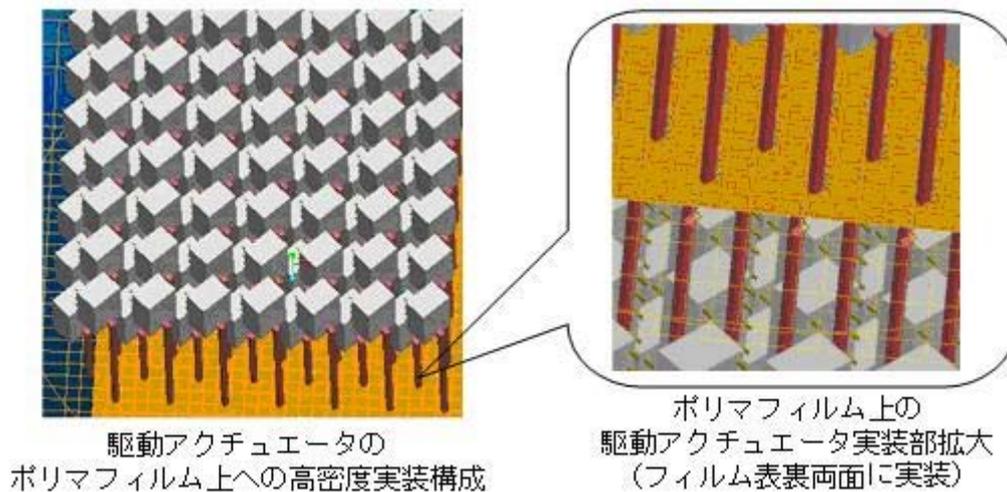


図 4-2-5-3 スイッチ規模拡張のための高密度実装構成

駆動アクチュエータをポリマフィルムの表裏両面に二段で実装する構成とし高密度化を図ることで、40×40 規模において面積サイズ 20×20cm² まで小型化が可能な見込みを得た。これは図 4-2-5-1 に示した試作品のような一般的なカード型装置内への実装が可能なサイズとなる。このことから、本光スイッチの中～大規模化のための技術的な見込みを得たと結論できる。

なお、課題 (エ) での実フィールド評価において本研究開発での光スイッチがシステム適用可能なことを確認しており、詳細はそちらの報告を参照されたい。

4-2-6 実施計画に対する達成状況

本研究課題では、光機能プラットフォームたる MEMS 駆動技術を開発し、スイッチング速度 1ms 以下で 40×40 の MEMS 駆動光スイッチを試作し、システム試験で実証することを最終目標としていた。

これに対して、電気機械式リレーをアクチュエータとした回転駆動による MEMS 駆動技術を開発し、スイッチ規模拡張のための駆動アクチュエータの高密度実装構成を示し、光スイッチ装置の試作によりスイッチング速度 1ms 以下とシステム試験への適用性を実証した。

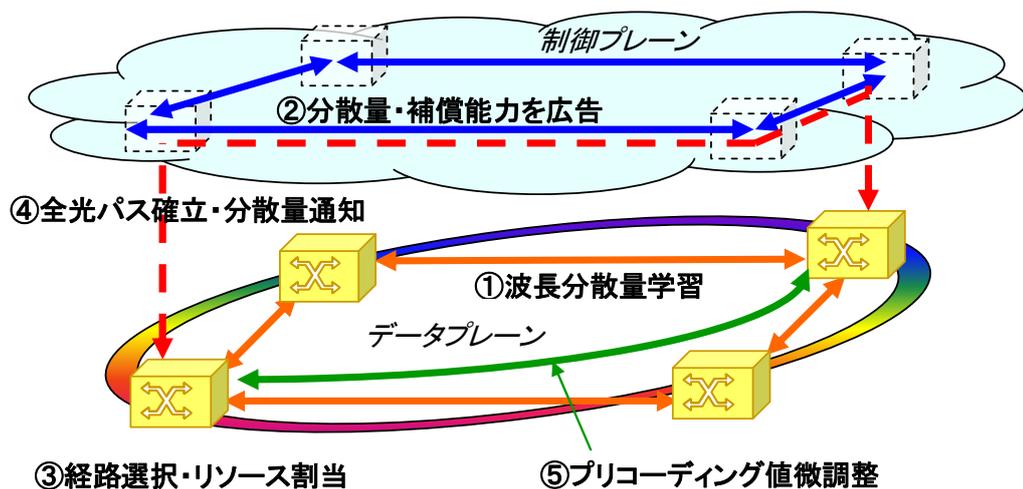
研究期間内においても、市場動向を随時調査した結果、例えば光通信システムにおけるプロテクションやシステム冗長化に $1 \times N$ 型の低コスト光スイッチのニーズが近年急速に高まっていることを踏まえ、 1×10 光スイッチを試作した。一方、 40×40 光スイッチに関しては、研究期間内での試作は見送ったものの、詳細設計は実施したこと、およびその部分試作たる 1×10 光スイッチ実証を行うことでその実現可能性を示した。従って、研究期間終了後の事業性も考慮し、十分なる成果と考える。

上記により、最終目標に対して十分な成果が得られた。

4-3 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

4-3-1 概要

自律適応型ネットワーク制御モジュールは、自律的な光ネットワーク制御を実現するために標準化されている GMPLS を拡張し、自律分散制御に基づき自動的に波長分散補償を最適化しつつ全光パスを動的に確立するものである。自律適応型ネットワーク制御モジュールにて使用する GMPLS の拡張を、GMPLS-Plus (GMPLS-Photonic layer usability support) と呼び、概略手順を図 4-3-1-1 に示す。



- ①設置時にオプティカルパスレンジングにてリンク波長分散量を学習 (LMP 拡張)
- ②波長分散量・分散補償能力を広告 (OSPF-TE 拡張)
- ③広告情報に基づき全光パスの経路、波長分散補償リソースの割当を選択
- ④全光パス確立時にその波長分散量を通知 (RSVP-TE 拡張)
- ⑤全光パスの端点ノード間で送信側プリコーディングを調整し最適に設定

図 4-3-1-1 GMPLS-Plus の概略手順

自律適応型ネットワーク制御モジュールは、GMPLS-Plus を適用しつつ上記 5 つのステップを実行し、分散フリートランスポンダの適用によって距離や波長分散の制約が大幅に緩和された全光パスの確立を可能とする。これにより、オペレータやユーザの要求に基づいてトポロジーに依存せずダイナミックかつ自動的な全光パスの確立が可能となる。

本研究開発では、各種機能評価を行うため GMPLS-Plus を実装した評価用のプラットフォームを構築し、本評価用プラットフォーム上で、ノード間リンクの波長分散量を学習するオプティカルパスレンジング機能、および学習した波長分散量をノード間で伝搬して全光パスの最適設定を行う分散フリー全光パス最適設定機能を実装・動作させ、その有効性を評価した。

4-3-2 プラットフォーム構築 (平成 17~21 年度)

構築した評価用プラットフォームの機能構成図を図 4-3-2-1 に示し、それぞれの機能について記述する。

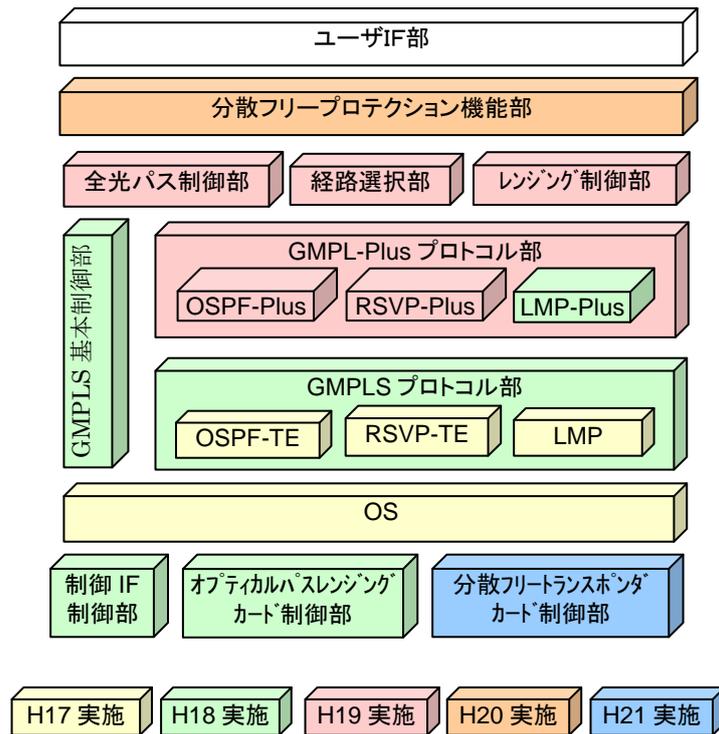


図 4-3-2-1 評価用 S/W プラットフォームへの機能構成

(1) ユーザ IF 部

自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載したノードを使用するユーザが、提供される各機能を制御・管理するための手段として、コンソール機能を実現。

(2) 分散フリープロテクション部

現用系の全光パスに障害が発生した場合に、待機系の全光パスへの迂回（プロテクション、レストレーション）を実現する機能を実現。

(3) 全光パス制御部、経路選択部

全光パス制御部は、経路選択部に搭載されている経路選択アルゴリズムに基づいて、RSVP-TE を拡張した RSVP-Plus プロトコルを使用して分散フリーな全光パスを設定。

(4) レンジング制御部

リンクの波長分散量を測定するオプティカルパスレンジング機能の制御を実施する。レンジング制御部は、LMP を拡張した LMP-Plus プロトコルを使用して、隣接ノードとの間でのレンジング制御のための制御チャネルを確立後、オプティカルパスレンジングカードを制御するオプティカルパスレンジングカード制御部を制御して、隣接ノードとの間の波長分散量の測定を実施する。

(5) GMPLS-Plus プロトコル部

GMPLS プロトコルを、自律適応型ネットワーク制御モジュールにて使用するために拡張したプロトコル部であり、リンクの波長分散量やノードの分散補償能力を広告するためにルーティング機能を拡張した OSPF-Plus、分散フリーな全光パスを設定するためにシグナリング機能を拡張した RSVP-Plus、オプティカルパスレンジング機能を実現するためにリンク管理機能を拡張した LMP-Plus からなる。

(6) GMPLS プロトコル部

GMPLS プロトコル部は、GMPLS の基本プロトコルであるリンク管理プロトコル (LMP)、シグナリングプロトコル (RSVP-TE)、ルーティングプロトコル (OSPF-TE) から構成される。

(7) GMPLS 基本制御部

GMPLS プロトコル部の各種制御を行うため、各プロトコル (LMP、RSVP-TE、OSPF-TE) のパラメータ管理機能と、GMPLS 通信管理機能から構成される。

(8) 制御 IF 制御部

ユーザ IF 部が使用するシリアルインタフェースやイーサネットインタフェース、および GMPLS プロトコル部が使用するイーサネットインタフェースの制御機能を実現。

(9) オプティカルパスレンジングカード制御部

オプティカルパスレンジングカード (OPR カード) の制御機能として、レンジング信号の送受信機能、波長分散量の読み出し機能を実現した。

(10) 分散フリートランスポンダカード制御部

全光パスを設定するために、パスに使用する波長、プリコーディングの設定等の分散フリートランスポンダカード制御を行う。

また、上記各機能を、評価用 H/W プラットフォーム上で動作させ、機能および性能の評価を行った。

4-3-3 オプティカルパスレンジング機能 (平成 18~21 年度)

オプティカルパスレンジングは、ノード設置時や新たなリンクの开通時にリンクの波長分散量を学習する機能である。オプティカルパスレンジングを実現するには波長分散量の測定手段と測定手段を制御する手順が必要であり、前者は図 4-3-3-1 に示すオプティカルパスレンジングカード (OPR) によって、後者は GMPLS の LMP (Link Management Protocol) を拡張した制御プロトコル、LMP-Plus によって実現される。

本研究開発では、波長分散測定方式の検討を実施し、オプティカルパスレンジングカードのハードウェア設計、カード試作を行った。また、波長分散量測定動作を制御するオプティカルパスレンジング制御プロトコルの設計を行い、評価用プラットフォーム上での基本動作を評価した。

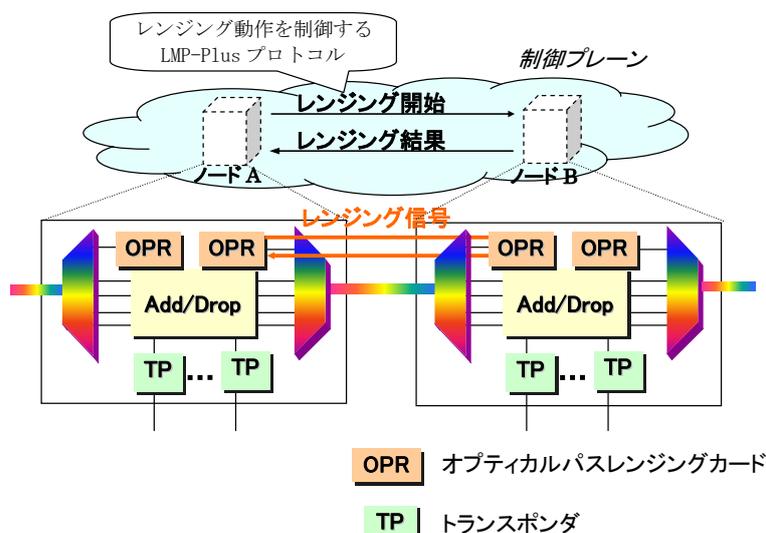


図 4-3-3-1 オプティカルパスレンジングの動作

4-3-3-1 波長分散測定方式とカード試作

波長分散量は異なる波長により伝送される光信号の伝送遅延の差として定義されるので、オプティカルパスレンジングのレンジング信号として異なる波長の2つの光信号を送信し、受信側で時刻差を計測することとした。送信する光信号の波長を λ_1 、 λ_2 [nm] (ただし $\lambda_1 < \lambda_2$)、それぞれの受信時刻を t_1 、 t_2 [ps]とすると、リンクの波長分散 D [ps/nm]は次式で求められる。

$$D = (t_2 - t_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

カード試作においては、波長分散を測定する際の信号レートを STM-1 の 155.52Mb/s とした。通信用の光信号と比較して低速度にした理由は、例えば 1Gbps を超えるような高速度を用いると、信号伝送時における光ファイバの波長分散によりパルスが広がり、精度よく2つの異なる波長の群遅延時間を測定できないためである。表 4-3-3-1 に試作したオプティカルパスレンジングカードの基本諸元を記載する。

表 4-3-3-1 オプティカルパスレンジングカードの基本諸元

光ファイバの種類	シングルモードファイバ
波長差	30nm
ビットレート	155.52Mb/s
SDH フレーム長	2,430byte
測定精度	20ps/nm 以下
最大測定距離	10,000km 以上
最小測定距離(測定誤差 5%)	16km

4-3-3-2 オプティカルパスレンジング制御プロトコルの設計と評価

光リンクの波長分散量を自動的に学習するオプティカルパスレンジングの制御手順として、GMPLS における光リンク管理プロトコル (LMP) をベースに LMP 標準との整合性や測定時の障害などからの回復手順を備えたオプティカルパスレンジング制御プロトコル (LMP-Plus) を設計し、上記オプティカルレンジングカードと LMP-Plus を実装した監視制御カードを評価用プラットフォームに収容し、図 4-3-3-2 に示すオプティカルパスレンジング機能実証の実験系にて動作検証を行った。

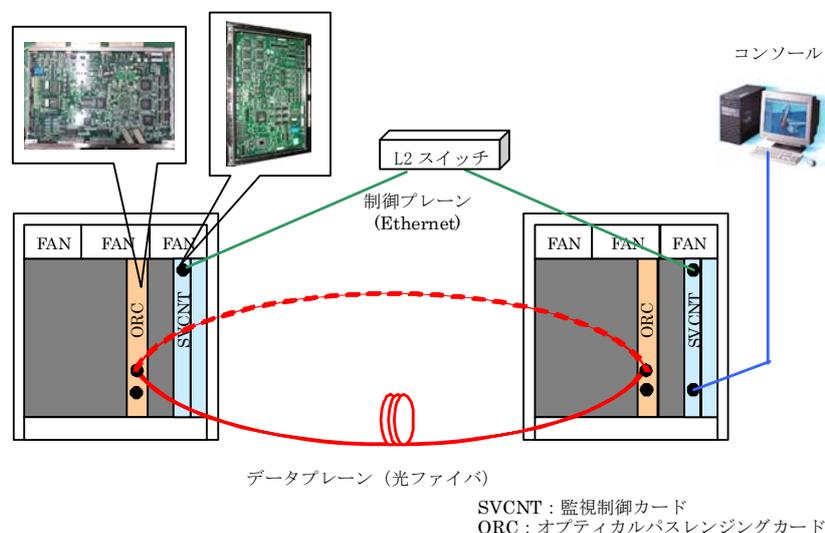


図 4-3-3-2 オプティカルパスレンジング機能実証の実験系

図 4-3-3-3 の学習シーケンスに示すように、LMP による制御チャネル確立後、レンジング制御部 (RC) から測定動作が起動され、オプティカルパスレンジングカード (OPR) の動作確認を経て OPR から測定信号が送受信される。この時 LMP-Plus はレンジング制御部の指示によって下記の拡張 LMP メッセージを送受信し、測定タイミングおよび測定結果を通知する。この学習時間が 1.2 秒以内であることを確認した。一方、リンク毎の波長分散量学習時間が 1 秒程度であっても、リンク数の多い大規模ネットワークでは逐次的に波長分散量を学習すると延べ時間が長くなるため、並列的に波長分散量を学習することが望ましいことが分かった。開発した自律適応型ネットワーク制御モジュールおよび拡張 LMP プロトコルは、このような並列動作を可能としていることを確認した。

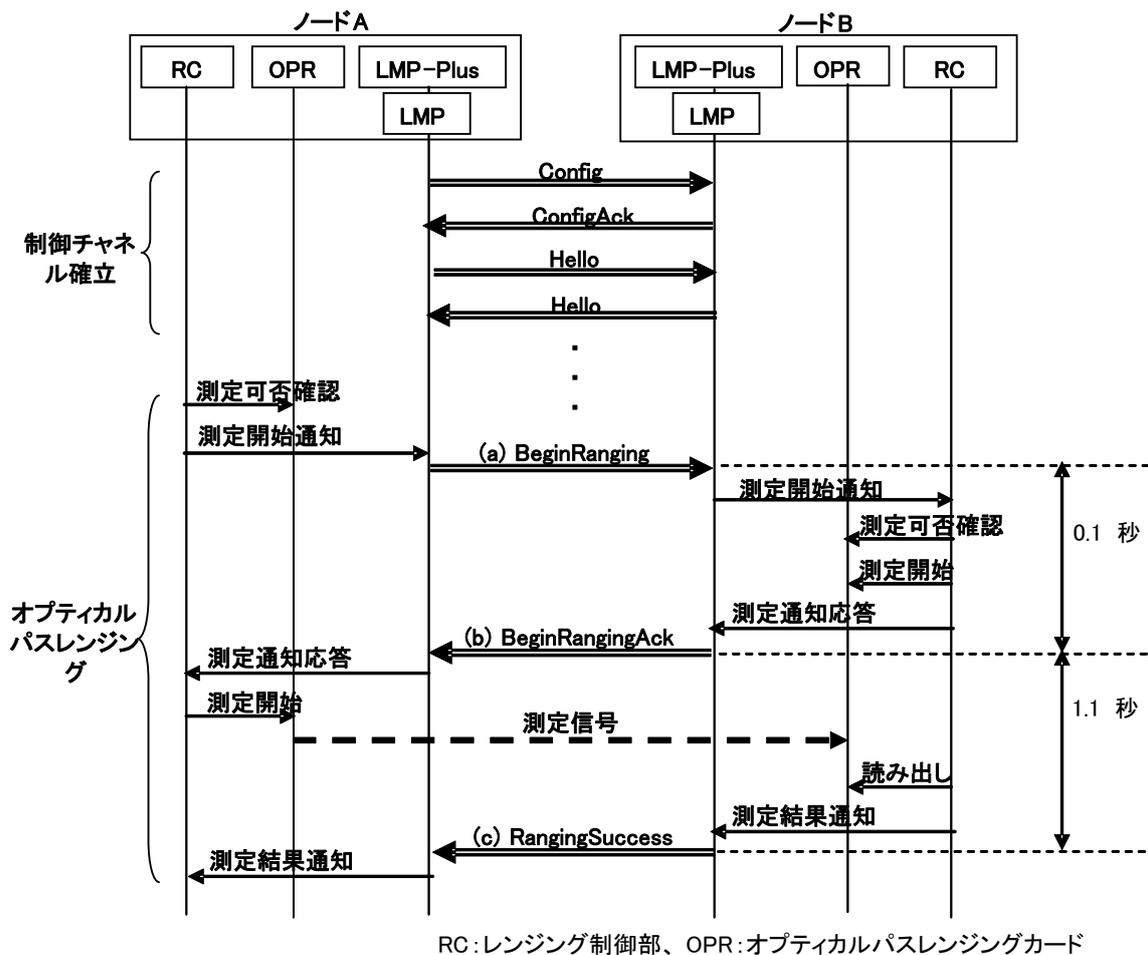


図 4-3-3-3 波長分散量の学習シーケンス (測定)

4-3-3-3 波長分散量測定の評価

オプティカルパスレンジングカードを用いて、2 ノード間のファイバ・リンクの波長分散量測定の精度を評価した。テストファイバには 10~88km のシングルモードファイバを使用した。市販の測定器と比較した結果を図 4-3-3-4 に示す。測定結果をファイバ長 80km の場合、分散スロープの誤差から生じる波長分散値の誤差は高々 12ps/nm であるため、総誤差は、約 25ps/nm 以下となることが確認できた。

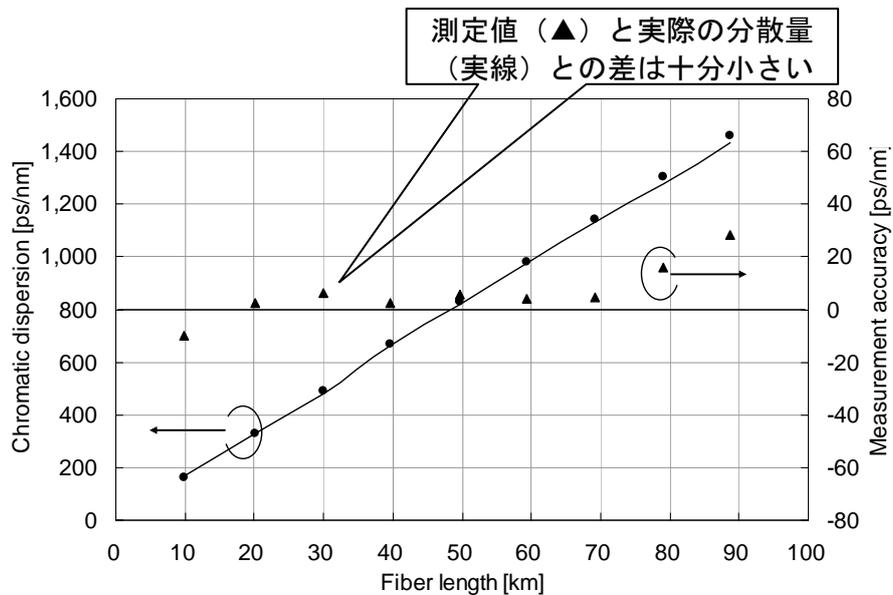


図 4-3-3-4 波長分散測定結果および市販測定器との比較

4-3-3-4 大規模ネットワークへの適用評価

大規模リングネットワークでの動作を検証するため、大規模リングネットワークを模擬する環境を構築し、評価用プラットフォームを含む 40 ノードで構成するネットワークにおいて、自律適応型ネットワーク制御モジュールを動作させ、GMPLS-Plus のステップ②～④の動作を確認するとともに、②のステップである波長分散量の広告のための所要時間を測定した。

図 4-3-3-5 に大規模ネットワークの模擬環境を示す。GMPLS-Plus のステップ①における波長分散量学習を行う 2 台の評価用プラットフォームに加えて、合計 38 台分のノードを 2 台の PC による模擬環境で構成した。2 台の PC 上には、合計 38 台分の仮想マシンを動作させ、それぞれの仮想マシン上に、自律適応型ネットワーク制御モジュールを動作させる。また、2 台の評価用プラットフォームにも、自律適応型ネットワーク制御モジュールを動作させる。これにより、図 4-3-3-6 の(a)～(c)に示すような 3 種のトポロジーによって、合計 40 ノード分のネットワークを構築した。

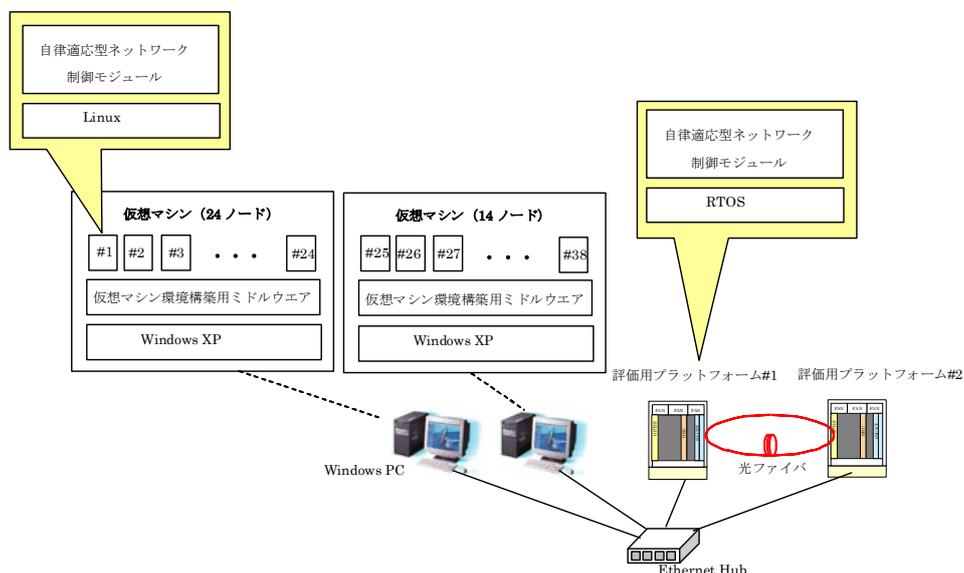


図 4-3-3-5 大規模ネットワーク模擬環境

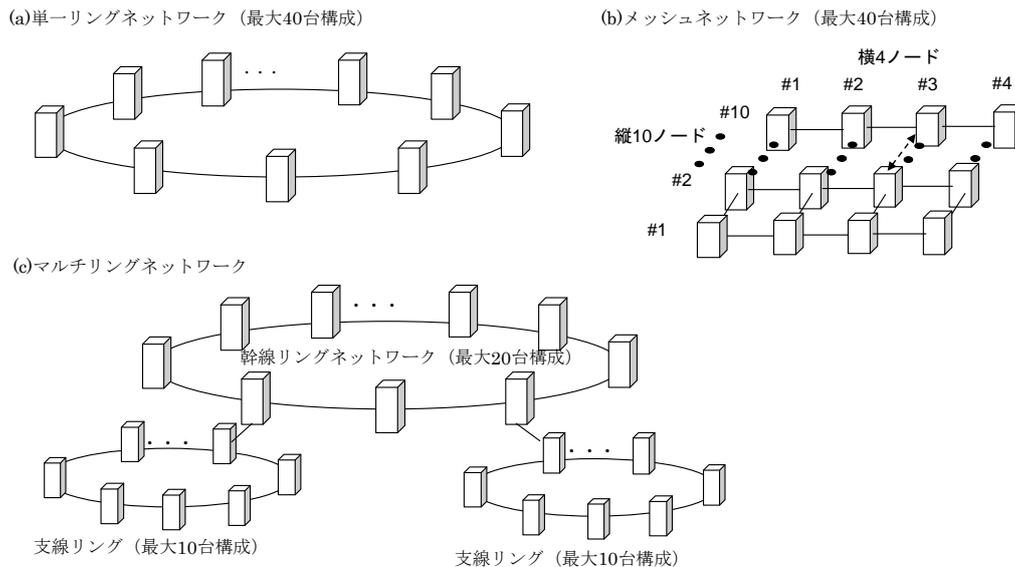


図 4-3-3-6 大規模ネットワーク模擬環境のトポロジー構成

それぞれのネットワークにおいて、GMPLS-Plus のステップ②～④の動作を実行し、仮想マシンおよび評価用プラットフォーム間で GMPLS プロトコルのメッセージを送受させ、機能検証した。学習した波長分散量をルーティングプロトコル OSPF-TE の metric パラメータによってネットワーク上の全ノードに広告し、全ノードが受信すること、受信した波長分散量に基づきリング上の 1 ノードから、別のノードに至るパスの経路を取得し、経路上の全リンクの波長分散量の合計値を取得可能であること、およびパスを確立可能であることを確認した。

また、波長分散量の広告動作の性能を測定した。各ノードが収容するリンクの波長分散量の測定結果を隣接ノードに通知するとともに、受信した他ノードの測定結果を転送する広告の手順を動作させる。最初に測定結果を隣接ノードに通知してから、その内容を全ノードが受信し、自ノードデータを格納するまでの時間を計測した。各ノードでの所要時間は、隣接ノード間の広告動作のタイミングなどにより異なり、表 4-3-3-2 に示す結果となった。3 種のネットワークのうちの最大所要時間が 3.2 秒であることから、4-3-3-2 節の性能評価にて得られた波長分散量の学習所要時間 1.2 秒を各ノードにて並行的に実行し、学習結果を広告すると、全てのネットワークにおいて、4.4(3.2+1.2)秒以内に、全ノードの波長分散量の取得が可能であるといえる。

表 4-3-3-2 40 ノードネットワークにおける測定結果の広告動作の所要時間

トポロジー	最大	最小
単ーリング	3.2 秒	0.9 秒
メッシュ	1.5 秒	0.4 秒
マルチリング	2.7 秒	0.6 秒

4-3-4 分散フリー全光パス最適設定機能 (平成 18~21 年度)

分散フリートランスポンダを適用する全光パスに対し経路上の総波長分散量が適切な範囲に収まる経路を選択するアルゴリズムを設計すべく、分散フリー全光パスの経路選択アルゴリズムの特性評価を行った。また GMPLS-Plus プロトコルのスケーラビリティを評価し、

これらを反映して GMPLS-Plus の実装設計を実施し、評価用プラットフォーム上での評価を行った。

4-3-4-1 プロトコル実装設計

与えられた始点ノード装置・終点ノード装置を結び波長分散量が補償可能範囲にある全光パスの経路を選択する経路選択アルゴリズムの検討として、最短経路アルゴリズム、最小分散量アルゴリズム、その両者を重み付けしたハイブリッドアルゴリズムについて、シミュレーション評価により特性を明らかにして、以下のプロトコル設計を行った。

(1) ルーティングプロトコル OSPF-Plus

既存 GMPLS との整合性・将来的な拡張性・効率性・実装の容易性などを考慮し、次の機能を持つ GMPLS 拡張ルーティングプロトコル OSPF-Plus を設計した。

- －リンクの波長分散量の広告
- －同一の波長分散量を持つリンクの集約による広告情報の削減
- －分散フリートランスポンダの利用状況を反映したノード装置の分散補償能力の広告

(2) シグナリングプロトコル RSVP-Plus

全光パス確立に際しての分散フリートランスポンダへの設定には、光パス確立時に経路選択アルゴリズムにて選択した経路のリンク分散量の総計を通知する初期設定手順と、パス確立後に、全光パスを経由して分散フリートランスポンダ間でデータ信号を送受信し設定を最適化する補正（最適化）手順とがある。それぞれの手順に必要な分散補償情報を効率的かつ確実に伝達できるよう、GMPLS シグナリングの拡張方法を検討し、GMPLS 拡張シグナリングプロトコル RSVP-Plus を設計した。

4-3-4-2 GMPLS-Plus の評価

上記の GMPLS-Plus の実装設計に基づき、GMPLS プロトコル拡張と経路選択アルゴリズムを評価用プラットフォームおよび大規模ネットワーク模擬環境へ実装し、適切な経路を通る分散フリー全光パスを確立することを検証した。

(1) 大規模リングネットワーク模擬環境において、4-3-3 のオプティカルパスレンジング機能によって測定、学習した波長分散に基づき、経路上のリンクの波長分散量を合計することにより、全光パス全体の波長分散量を算出することを確認した。また、最短経路アルゴリズムが、ノードの補償能力を上回らない波長分散量となる全光パスの経路を選択することを確認した。

(2) 大規模リングネットワーク模擬環境において、最大 32 ノード(31 ホップ)のパス確立が可能であることを確認した。

(3) 評価用プラットフォームを使って、3 ノード（2 ホップ）のパスを確立し、パス確立時、トランスポンダを制御した結果、全光パスが、データ導通することを確認した。

また、波長分散量を考慮した分散フリープロテクション機能の詳細検討を実施し、光パスの障害迂回時のパス制御について検討を行った。光パスの障害迂回手法には、予備パスを予め確立しておく Protection と障害時に障害箇所を迂回して予備パスを確立する Restoration があり、パス制御への要求条件が異なるため、これらの比較を表 4-3-4-1 に示す。

表 4-3-4-1 光パス障害迂回手法とパス制御

分類	項目	内容	パス制御
Protection	1+1 Protection	現用パスと予備パスに同一トラヒックを転送。	現用パスと予備パスで異なる分散フリートランスポンダを使用。
	1:N Protection	N 本の現用パスを 1 本の予備パスで保護。	同上。
	Extra Traffic	予備パスにて低優先トラヒックを転送。	同上。
Restoration	Pre-planned Restoration	経路を事前に選択し障害時に予備パスを確立。	経路の事前選択において波長分散補償の考慮が必要。
	Full Restoration	障害時に経路を選択し予備パスを確立。	無し (通常のパス確立時の制御と同じ)

波長分散量を考慮した光パス障害迂回手法の評価を行うため、評価用プラットフォーム上に 1+1 Protection 手順と Restoration 手順を実装し、プロトタイプ評価を行った。本成果報告では Restoration 評価結果のみ記載するが、図 4-3-4-1 に示すように、現用パス障害時の迂回時間を測定した。受信側 Analyzer での光断時間は 350ms となり、一般的に 500ms ~ 1 秒程度の性能が要求される Restoration 性能を満たせる見通しが得られた。

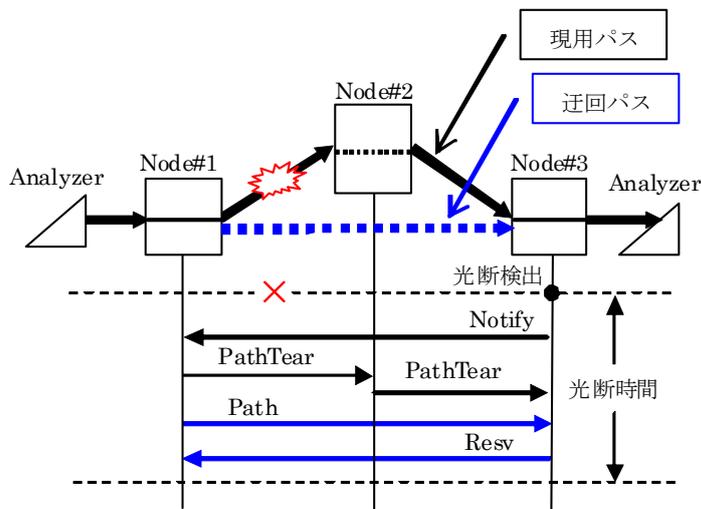


図 4-3-4-1 光パス障害迂回 (Restoration)

4-3-5 実施計画に対する達成状況

本研究開発では、「40 台からなるネットワークにおいて、全ノードが 10 秒以内に全光リンクの分散を自動学習できるオプティカルパスレンジング機能を開発する。」という最終目標に対して、40 台のノードを模擬する評価用模擬環境を構築し、最大 4.4 秒で全光リンクの分散を自動学習できることを確認した。

また、「学習した分散量は各ノードへ広告され、広告された情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることを実証する。」という最終目標に対して、GMPLS-Plus を実装した評価用プラットフォームを構築し、本評価用プラットフォーム上でオプティカルパスレンジング機能および分散フリー全光パス最適設定機能の実証・評価を行い、広告され

た情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることが確認した。

上記により、最終目標を達成することができた。

4-4 システム実証・評価の研究開発

4-4-1 概要

システム実証・評価は、(ア) 分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの連携動作について実証・評価実験を行うもので、エミュレーション環境、実験室環境、および実フィールド環境の三段階にて実施した内容を述べる。あわせて、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの成果に基づく GMPLS プロトコル拡張の標準化提案について報告する。

平成 18 年度から環境構築を始めて平成 19 年度にエミュレーション環境による評価を行い、平成 20 年度にエミュレーション環境と (ウ) 自律適応ネットワーク制御モジュールの評価用プラットフォームを連携させた実験室環境での予備実験を実施し、平成 21 年度に実フィールド環境での実験を遂行した。また、平成 20 年度末から GMPLS プロトコル拡張の標準化提案活動を開始し、平成 21 年度も活動を継続した。

4-4-2 エミュレーション環境での実証・評価 (平成 18~19 年度)

(ア) 分散フリートランスポンダのシミュレーション環境として、各種変調方式に応じたプリコーディング信号の送信回路と伝送路、受信回路を模擬する伝送路シミュレータを構築した。また、(イ) MEMS 駆動光スイッチと (ウ) 自律適応ネットワーク制御モジュールを PC 上で模擬動作させるシミュレータを構築した。伝送路シミュレータを用いた伝送シミュレーションの例を図 4-4-2-1 に示す。図中、左側はプリコーディング信号の送信波形、右側は受信波形であり、10,000 ps/nm の波長分散を持つパスであっても、受信側にて良好な受信波形となる様子が示されている。

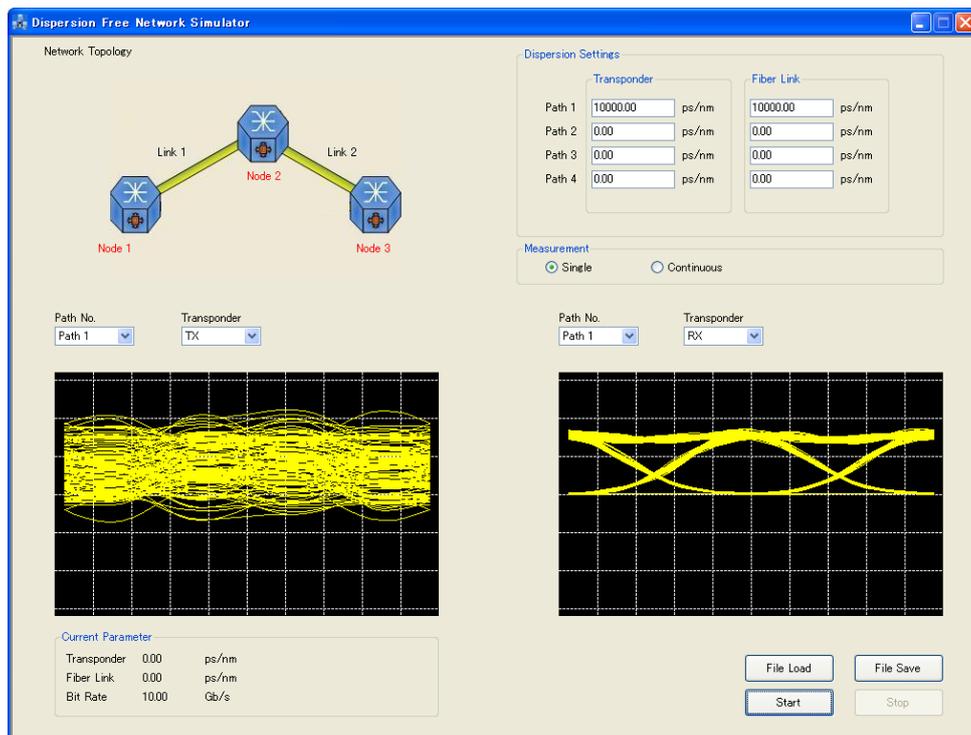


図 4-4-2-1 伝送シミュレーション例

上記のシミュレーション環境と(ウ) 自律適応ネットワーク制御モジュールの評価用プラットフォームによる実験系を連携させ、伝送路特性を学習・反映した分散フリートランスポンダへの設定・伝送を模擬する連携動作エミュレーション環境を構築し、動作を検証した(図4-4-2-2)。

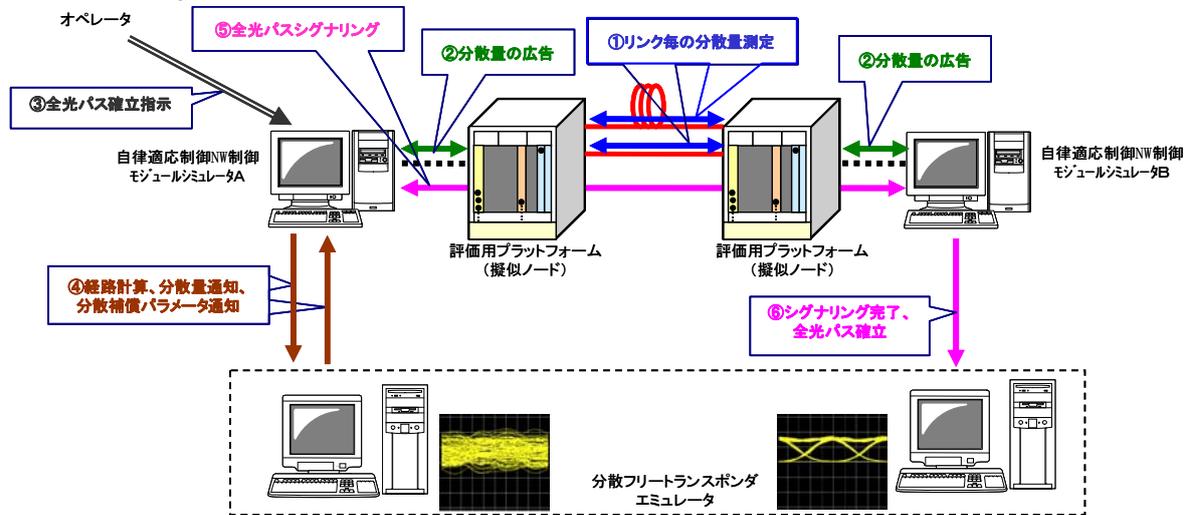


図 4-4-2-2 連携動作エミュレーション環境

連携動作エミュレーション環境による検証の結果、(ア) 分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールが連携し、適応制御光トランスポートネットワークが実現できることが実証できた。

4-4-3 実験室および実フィールド環境での実証・評価(平成20~21年度)

4-4-3-1 試作システムの構築と評価

室内実験および実フィールド実験へ適用するため、図4-4-3-1に示すように(ア)(イ)(ウ)それぞれの試作成果を基板として組み込んだ実験ノードを組み立て、複数の実験ノードを連携動作させる試作システムを構築した。

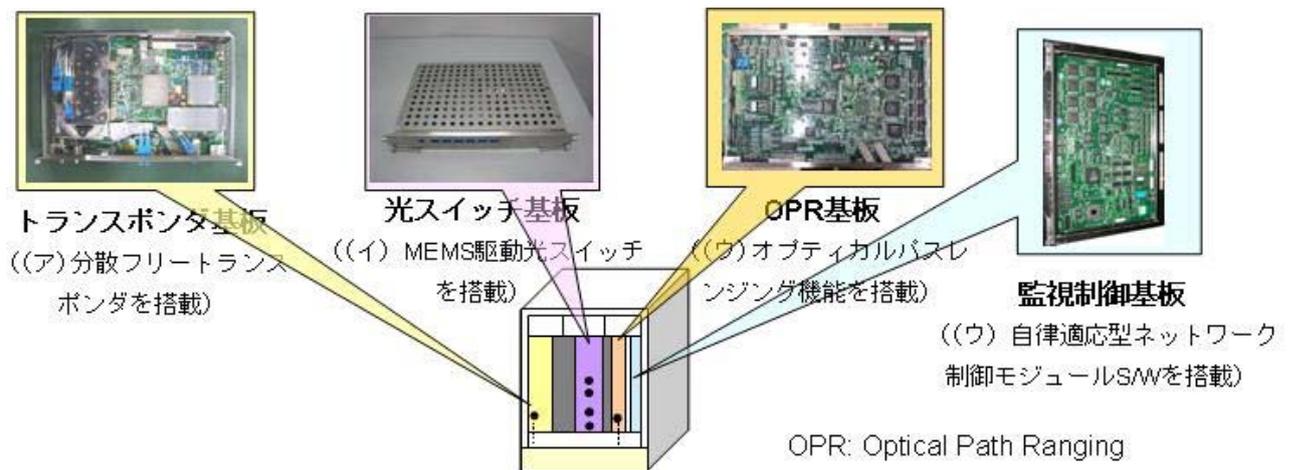


図 4-4-3-1 実験ノードの構成

本試作システムを用いた室内評価実験により、(ア) 分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールが、実機においても連携動作することを確認した。

4-4-3-2 実フィールド実験

上記試作システムを JGN2plus 光テストベッドへ接続し実フィールドに敷設された光ファイバにおける連携動作を実証する実験を、2010年2月に実施した。図 4-4-3-2 に実フィールド実験における光ファイバ接続の構成を示す。

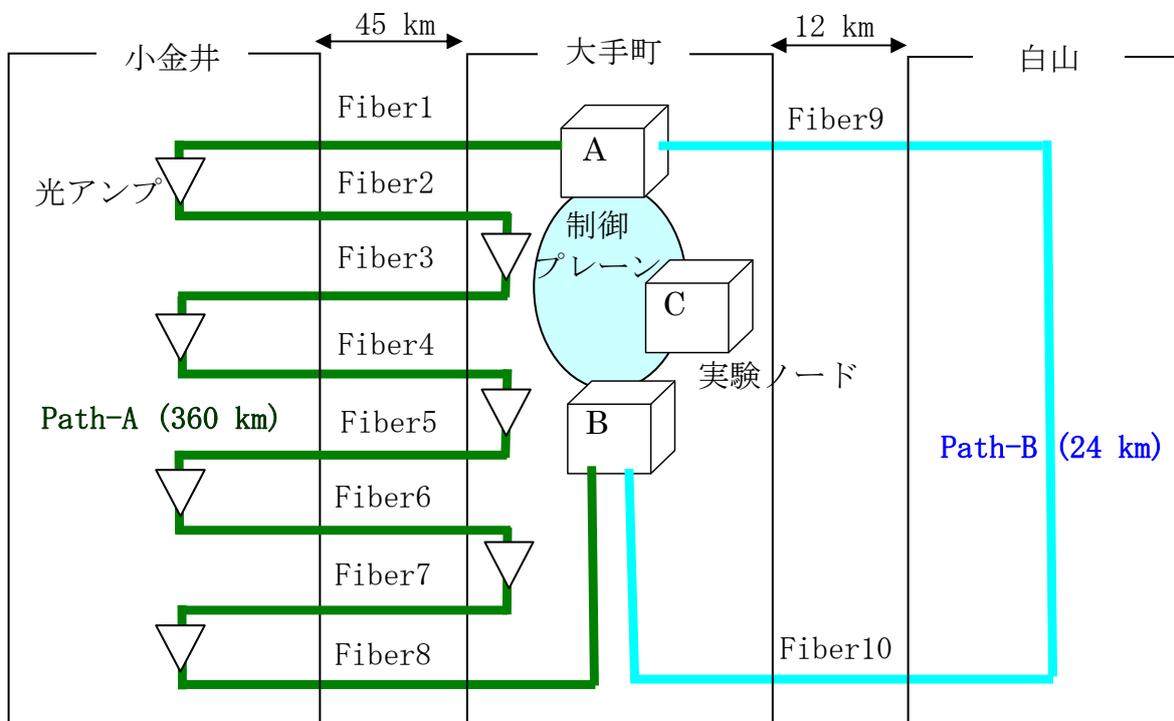


図 4-4-3-2 実フィールド実験における光ファイバ接続構成

実フィールド実験においては、まず（ウ）自律適応型ネットワーク制御モジュールの機能である実ファイバの波長分散量の学習と、それに基づいた経路選択および分散量通知を含む光パス設定を確認した。表 4-4-3-1 に、実フィールド実験において実証された（ウ）自律適応型ネットワーク制御モジュールの GMPLS 拡張（GMPLS-Plus）機能を示す。

表 4-4-3-1 実フィールド実験にて実証された GMPLS 拡張機能

No	項目	内容	備考
1	リンク波長分散量の学習	LMP の拡張により OPR 基板を制御して波長分散量を測定し相手ノードへ通知	LMP-Plus
2	リンク波長分散量の広告	OSPF の拡張により学習したリンク単位の分散量をノード間で広告	OSPF-Plus
3	波長分散を考慮した光パス経路選択	リンクの分散量を合計してパス全体の分散量を求め、ノードの補償能力を超える経路を除外した最適経路を選択	
4	光パスの分散量通知	光パス設定時に、補償すべきパス分散量を始点ノードから終点ノードへ通知	RSVP-Plus

さらに（ウ）自律適応型ネットワーク制御モジュールの制御により、（イ）MEMS 駆動光スイッチを用いて図 4-4-3-2 に示す 2 本の光パスを 2 台のノード間で動的に切り替えることにより、（ア）分散フリートランスポンダの送信側プリコーディングを、波長分散が大幅に異なる光パスに追従させる実験を行い、切替前、切替後とも正常にデータが導通することを確認した。表 4-4-3-2 に実験に用いた 2 本の光パスの光伝送パラメータを示す。光ファイバの非線形光学効果の影響を受けないように、ファイバ入射パワーは-2dBm/chとした。

表 4-4-3-2 光パスの光伝送パラメータ

光パス	ファイバ種別	距離	波長分散量	着信 OSNR	伝送データ
Path-A	SMF	360 km	5,520 ps/nm	22.1 dB/0.1nm	10Gbps
Path-B		24 km	390 ps/nm	17.6 dB/0.1nm	DPSK 信号

図 4-4-3-3 に、実フィールド実験において得られた BER 特性(a)と、送信波形(b)および受信波形(c)を示す。図 4-4-3-3 (a)において、受信器入力パワーを低下させていくと Path-A で 0.5dB のパワーペナルティが発生しているが、これは OSNR および送受信器の不完全性に起因するものと考えられる。

さらに Path-A 上で 2 日間連続の常温導通試験を実施し、エラーフリー動作（FEC による誤り訂正後）を確認した。

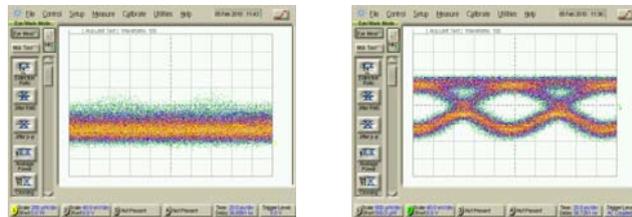
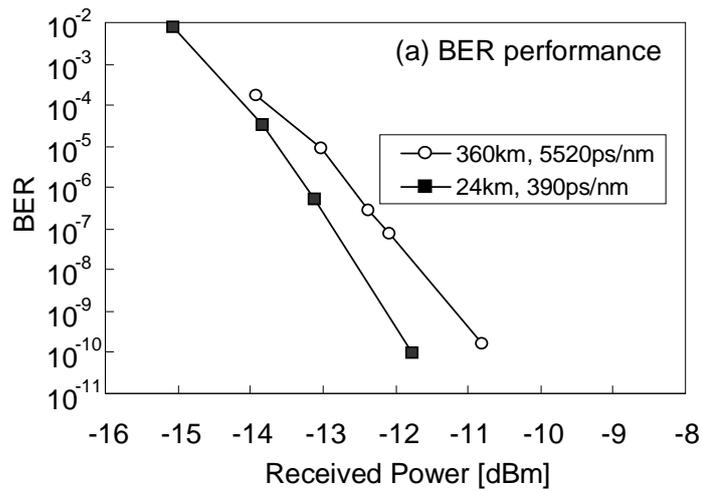


図 4-4-3-3 実フィールド実験における光ファイバ接続構成

以上より、実フィールド環境において、光の分散補償デバイスを用いることなく数百 km オーダの SMF で 10Gbps DPSK 信号を伝送できることが確認された。

最後に図 4-4-3-4 に実フィールド実験の様態を示す。

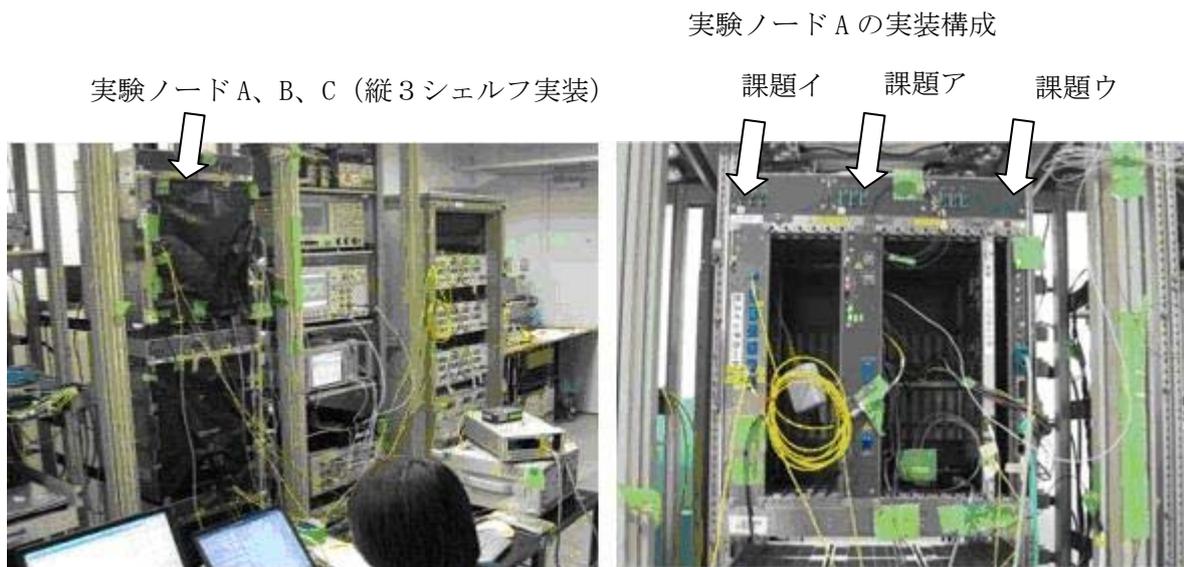


図 4-4-3-4 実フィールド実験の様態

4-4-4 標準化提案（平成 20～21 年度）

GMPLS を標準化している IETF (the Internet Engineering Task Force) の CCAMP (Common Control and Measurement Plane) WG においては、2008 年より全光ネットワーク上の光パスの GMPLS 制御を検討する WSON (Wavelength Switched Optical Networks) の活動が立ち上がり、全光ネットワークにおける光伝送特性 (WSON では Impairment と呼ぶ) を考慮した光パスのモデル化、光パスの経路計算、光パス設定のための GMPLS 拡張などの議論が行われている。(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールにて開発した GMPLS 拡張プロトコル (GMPLS-Plus) は、WSON に先駆けて、主要な光伝送特性である波長分散の学習と光パス経路計算への反映、および光パス設定時の分散パラメータ通知のため、GMPLS を拡張したプロトコルを実装・評価してきており、WSON と目的を同じくする。そこで、WSON 標準化への GMPLS-Plus の採用を目標として、下記の標準化提案を実施した。

2009 年 3 月 IETF へ寄書を提出し、光パス設定時の分散パラメータ通知を一般化した Impairment 補償制御機能と、波長分散の学習を一般化した Impairment 自動発見機能を WSON の標準化内容へ追加することを提案。

2009 年 6 月 国際会議 iPOP 2009 において WSON への提案内容をプレゼンし、WSON 標準化参加者らと意見を交換。

2009 年 10 月 IETF へ再度寄書を提出。

WSON 標準化において Impairment 補償制御機能と Impairment 自動発見機能を検討することの理解が得られたため、標準化のための要求条件の策定とプロトコルへの反映に向けて提案活動を継続していく。

4-4-5 実施計画に対する達成の状況

本研究課題では、分散フリーストランスポンダ、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した試作システムにより、実フィールドでの実証・評価を実施することを最終目標としていた。

エミュレーション環境、実験室環境での評価を経て、2010 年 2 月に JGN2plus 光テストベッドを利用した実フィールド実験を実施し、(ア) 分散フリーストランスポンダ、(イ) MEMS 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した試作システムが、連携動作しつつ距離の異なる光パスを動的に切り替えて設定すること、そして設定した光パス上で 10Gbps のデータが導通することを実証した。

上記により、最終目標を達成することができた。

4-5 総括

分散フリートランスポンダの研究開発では、国内ネットワークの大部分をカバーする2,000kmに相当する波長分散を補償できる光トランスポンダを開発すること、自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証することが最終目標である。これに対し、平成17年度から平成21年度にかけて、無線通信技術など当社の長年の技術蓄積を活用した方式設計・エミュレーションを十分に実施した後、高速LSI設計フェーズⅠ、フェーズⅡ、フェーズⅢの複数段階の開発フェーズを設け、並行検証を伴う確実な開発計画に従い、分散フリートランスポンダ用高速LSIの開発に成功した。さらに、この高速LSIを用いた分散フリートランスポンダを開発し、実験室での伝送試験にて2,000km相当の伝送にあたる分散補償が可能であることを実証した。また、JGN2plus光テストベッドを利用した実フィールドでの評価実験により、自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証した。

本研究開発の開発開始当初から、既に、光トランスポートネットワークの装置コスト低減と伝送距離の延伸の両立が求められていた。そのニーズは現在も変わりなく、システム全体の低価格化の要求は、益々大きくなっている。そのため、分散によって生じる波形歪みを送信側の高速電気信号処理プリコーディングによって等化する技術には、これまで以上に注目度が高くなっている。本研究開発では、この社会ニーズに答え、送信側プリコーディング技術を確立することができた。本研究開発の成果は、送信側プリコーディング技術の実用化のために、ネットワーク設計と連携したシステム要求条件の明確化、回路方式の検証、光変調器の駆動方式検証、回路設計、機能検証までを含めた極めて有用な研究開発と言える。

MEMS駆動光スイッチの研究開発では、光機能プラットフォームたるMEMS駆動技術を開発し、システム試験で実証することが最終目標である。これに対して、平成17年度から平成21年度にかけて、素材として用いるポリマ導波路フィルムの柔軟性を利用し、ポリマ導波路交差部に溝を設ける光スイッチ方式と電気機械式リレーをアクチュエータとした回転駆動によるMEMS駆動技術を開発してきた。また、研究期間後半では、スイッチ規模拡張のための駆動アクチュエータの高密度実装構成を示し、光スイッチ装置の試作により高速スイッチング特性を検証、さらに、システム試験への適用性を実証することができた。

本研究にて開発したMEMS駆動光スイッチは、当社独自の光経路切り替え原理に基づくものであり、機械式駆動のため熱光学効果型と比較し低消費電力、原理的に3D-MEMS型のようなコスト要因となる高精度アナログ位置制御や高圧電源を要さない、という利点を有している。光スイッチのプラットフォームとして安価なポリマ導波路フィルムを用い、低コストなMEMS駆動機構の開発を行うことで、価格競争力のある日本独自の光スイッチ技術を確立することができた。

自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発では、40台からなるネットワークにおいて、全ノードが10秒以内に全光リンクの分散を自動学習できるオプティカルパスレンジング機能の開発と学習した分散量は各ノードへ広告され、広告された情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることを実証が、最終目標である。これに対し、標準化されているGMPLSを拡張した全光パス制御プロトコルであるGMPLS-Plusを設計、実装し、40台のノードを模擬する評価用模擬環境を構築し、最大4.4秒で全光リンクの分散を自動学習できることを確認した。また、GMPLSの拡張プロトコルを実装した評価用プラットフォームを構築し、本評価用プラットフォーム上でオプティカルパスレンジング機能および

分散フリー全光パス最適設定機能の実証・評価を行い、広告された情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることを確認した。以上により、その目標を十分に達成することができた。

システム実証・評価の研究開発では、分散フリートランスポンダ、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した試作システムにより、実フィールドでの実証・評価を実施することが最終目標である。これに対し、計画通り、最終年度までに、エミュレーション環境、実験室環境での評価を経て、2010年2月に JGN2plus 光テストベッドを利用した実フィールド実験を実施し、(ア) 分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した試作システムが、連携動作しつつ距離の異なる光パスを動的に切り替えて設定すること、そして設定した光パス上で 10Gbps のデータが導通することを実証することができた。また、従来の GMPLS では実現できない波長分散量の学習や波長分散補償を考慮した経路選択など、次世代の全光ネットワーク向けの光伝送特性制御を可能とする GMPLS 拡張の基本コンセプトを反映するための標準化提案活動を進めてきたことも有意義な成果である。

JGN2plus 光テストベッドでの実証実験により、実フィールド環境において、光の分散補償デバイスを用いることなく数百 km オーダの SMF で 10Gbps DPSK 信号を伝送できることが確認されたことは、システム実用化の観点で、本研究開発の大きな成果の一つである。2009年10月には、CEATEC JAPAN 2009 会場にて「NICT スーパーイベント」に出展、全光ネットワークの実現に向けた波長分散補償制御技術としてその成果を披露した。引き続き、2010年10月開催予定の CEATEC JAPAN 2010 「NICT スーパーイベント」にも出展申請し、研究成果の展示を予定している。

また、次世代の全光ネットワーク向け GMPLS 拡張である WSON 標準化において、従来の GMPLS では実現できない波長分散量の学習や波長分散補償を考慮した経路選択など、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールにて開発した GMPLS 拡張プロトコル (GMPLS-Plus) の採用を目標として、これまで標準化提案活動を進めてきており、今後も活動を継続する予定である。

5 参考資料

5-1 研究発表・講演等一覧

<研究論文>

(1) T. Uesugi, S. Zaizen, A. Sugitatsu and T. Hatta, "Polymeric Waveguide Optical Switch Using Rotary Drive Mechanism," IEICE Trans. on EC, Vol.E91-C, No.7, Jul., 2008

<外国発表予稿等>

(1) S. Seno, Y. Baba, T. Mizuochi, T. Sugihara and K. Motoshima, "Dynamic Compensation Control by GMPLS-Plus," OECC 2006, Jul., 2006

(2) H. Kubo, S. Mochida, K. Motoyoshi, T. Mizuochi and A. Shibuya, "Intersymbol Interference Compensation Scheme in Collaboration with Transmit Pre-coding and Adaptive Equalization," ISITA2006, Oct., 2006

(3) T. Sugihara, H. Kubo, T. Mizuochi and K. Shimizu, "A Study on Residual Distortion Equalization in Combination with Pre-distortion and Post-equalization," OFC/NFOEC2007, Mar., 2007

(4) T. Sugihara, T. Mizuochi, H. Kubo and K. Shimizu, "Proposal for Coordinate Transformed Electronic Pre-compensator and Investigation of its Robustness to Bias Error," OECC/I00C2007, Jul., 2007

(5) T. Uesugi, S. Zaizen, A. Sugitatsu and T. Hatta, "Polymeric Waveguide Optical Switch Using Rotary Drive Mechanism," OECC/I00C2007, Jul., 2007

(6) S. Seno, Y. Baba, T. Mizuochi, T. Sugihara, K. Motoshima and T. Ideguchi, "A Study on Optimized Assignment of Dispersion Compensation Capability for Dynamic Optical Paths," OECC/I00C2007, Jul., 2007

(7) Y. Konishi, T. Sugihara and T. Mizuochi, "A Novel Flip-Flop Based Look-Up Table in Digital Signal Processing for Optical Communications," IEICE Trans. on EC, Feb., 2008

(8) E. Horiuchi, M. Kamei, S. Seno and Y. Baba, "Chromatic Dispersion Compensation Control in Dynamically Reconfigurable All-Optical Networks," iPOP 2008, P-3, June, 2008

(9) Y. Konishi, T. Sugihara and T. Mizuochi, "A Novel Flip-Flop Based Look-Up Table in Digital Signal Processing for Optical Communications," APCC/COIN2008, Oct., 2008

(10) K. Onohara, K. Kubo, T. Sugihara and T. Mizuochi, "Online Measurement of Chromatic Dispersion using Optical Supervisory Channels for Electronic Pre-Distortion," APCC/COIN2008, Oct., 2008

(11) T. Sugihara, "Practical implementation of precoding technologies in high-speed optical transmission," APCC/COIN2008, Oct., 2008

(12) S. Seno, Y. Baba, S. Yoshida, M. Kamei, E. Horiuchi, K. Onohara, T. Mizuochi, and T. Ideguchi, "Design of a Chromatic Dispersion Measurement Control Protocol Based upon the GMPLS Architecture," OFC/NFOEC 2009, Mar., 2009

(13) S. Seno, Y. Baba, E. Horiuchi, T. Fujii and S. Yoshida, "Impairment Compensation Control for Wavelength Switched Optical Networks," iPOP 2009, 2-4, June, 2009

(14) S. Yoshida, K. Onohara, E. Horiuchi, S. Seno, Y. Baba and K. Shimokasa, "Design and Implementation of Chromatic Dispersion Control Protocol," OECC 2009, Jul., 2009

- (15) E. Horiuchi, S. Yoshida, S. Seno and Y. Baba, "Fault Recovery With Routing and Adaptation Control of Chromatic Dispersion," OECC 2009, Jul., 2009
- (16) T. Uesugi, T. Ichikawa and A. Sugitatsu, "Rotary-Driven Polymeric Waveguide Optical Switch with Mechanical Actuator," OECC 2010, Jul., 2010
- (17) T. Sugihara, Y. Konishi, T. Kobayashi, T. Ichikawa, S. Seno, E. Horiuchi, S. Inoue, S. Hirano, T. Yoshida, K. Uto, K. Sawada, H. Bessho, K. Koguchi, K. Shimizu and T. Mizuochoi, "10Gbps DPSK Pre-equalization Transmission Experiments over In-field Fibers," OECC 2010, Jul., 2010

<収録論文>

- (1) 藤井照子, 堀内栄一, 馬場義昌, 妹尾尚一郎, "全光ネットワークのための波長分散補償量広告方式の検討," 電子情報通信学会 光通信システム研究会, 2009年6月

<学術解説等>

- (1) 水落隆司, "長距離・超高速・大容量光通信の現状と将来展望", 光学, 2009年5月

<一般口頭発表>

- (1) 妹尾尚一郎, 馬場義昌, 水落隆司, 杉原隆嗣, 本島邦明, "プリディストーションによって設定自動化を実現する全光ネットワークの提案," 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 PN2005-107, 2006年3月
- (2) 水落隆司, "ダイナミック光ネットワークにおける電気信号処理技術の進展," 電子情報通信学会総合大会 BP-4-5, 2006年3月
- (3) 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, 三谷 俊輔, "電氣的プリ分散補償を用いた光伝送における変調方式依存性のシミュレーション検討," 電子情報通信学会 光通信システム研究会, 2006年5月
- (4) 杉原隆嗣, "プリディストーション技術の現状と今後," 電子情報通信学会 光通信システム研究会, 2006年6月
- (5) 水落隆司, "光通信システムにおける分散補償 - 光学的手法と電氣的手法, 微小光学研究会," 2006年7月
- (6) 水落隆司, "超高速フォトニックネットワークに向けた誤り訂正と電気信号処理技術," 第2回超高速フォトニクスシンポジウム, 2006年7月
- (7) 妹尾尚一郎, "GMPLS-Plus - Extensions of GMPLS for Dynamic Optical Networking," IEICE PN/ OECC 2006 Joint Workshop, 2006年7月
- (8) 小西良明, 杉原隆嗣, 久保博嗣, 水落隆司, "光通信用分散補償プリコードにおけるメモリ構成方法の検討," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2006年9月
- (9) 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, "電氣的プリディストーション技術を用いた光送信器性能に関する検討," レーザ学会第27回年次大会, 2007年1月
- (10) 水落隆司, 杉原隆嗣, 久保博嗣, 清水 克宏, "電氣的プリ・ポスト分散補償における復調方式依存性に関する検討," 電子情報通信学会 2007年総合大会, 2007年3月
電子情報通信学会
- (11) 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, "電氣的プリ・ポスト分散補償における光変調精度の影響," 2007年総合大会, 2007年3月
- (12) 上杉 利次, 財前 志保, 杉立 厚志, 八田 竜夫, "ポリマ導波路光スイッチの回転駆動機構の検討," 電子情報通信学会 2007年総合大会, 2007年3月
- (13) 久保 博嗣, 渋谷 昭宏, "[招待講演] 広帯域通信システムのための適応等化技術に関する検討," 電子情報通信学会 ワイドバンドシステム研究会, 2007年3月

- (14) 杉原隆嗣, 清水克宏, 水落隆司, 久保博嗣, “電氣的プリ分散補償における送信器構成法と光変調精度の検討,” 電子情報通信学会 光通信システム研究会, 2007年7月
- (15) 小西良明, 小浜茂樹, 杉原隆嗣, 水落隆司, “分散補償プリコーダにおける FIR フィルタ回路規模削減方法の検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2007年9月
- (16) 清水克宏, “光通信ネットワークのための波長分散補償技術,” 平成19年電気関係学会関西支部連合大会, 2007年11月
- (17) 水落隆司, “光通信用デジタル信号処理技術の現状と展望,” (財)光産業技術振興協会 マンスリーセミナー, 2008年1月
- (18) 吉田聡太, 亀井美里, 堀内栄一, 妹尾尚一郎, 馬場義昌, “全光パス制御のための波長分散測定機能の検討,” 電子情報通信学会 2008年総合大会, 2008年3月
- (19) 後藤健太郎, 杉原隆嗣, 小西良明, 水落隆司, 矢野安宏, 久保博嗣, “送信端分散補償プリコーディングにおける変調座標変換の検討,” 電子情報通信学会 光通信システム研究会, 2008年7月
- (20) 上杉利次, 市川俊亨, 杉立厚志, “回転駆動式ポリマ導波路光スイッチの回転角度検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-3-55, 2008年9月
- (21) 斧原聖史, 久保和夫, 杉原隆嗣, 水落隆司, “プリディストーション分散補償における監視制御光を用いたインサービスタイプ波長分散モニタ,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2008年9月
- (22) 久保博嗣, 中島昭範, “多重遅延検波を利用した線形等化による送受協調等化,” SITA2008, 2008年10月
- (23) 吉田聡太, 斧原聖史, 堀内栄一, 妹尾尚一郎, 馬場義昌, “GMPLS 拡張による波長分散測定機能の検討,” 電子情報通信学会 総合大会, 2009年3月
- (24) 水落隆司, “光通信用デジタル信号処理技術の最新動向,” 平成21年度フットニックネットワーク新時代における産業・技術懇談会, 第1回公開討論会, 2009年5月
- (25) 上杉利次, 市川俊亨, 杉立厚志, “アクチュエータを実装した回転駆動式ポリマ導波路光スイッチ,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2009年9月
- (26) 小林竜也, 堤恒次, 杉原隆嗣, 平野進, 水落隆司, “デジタル信号処理光通信用 22Gsample/s D/A コンバータの設計,” 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, 2009年9月
- (27) 堀内栄一, 吉田聡太, 藤井照子, 斧原聖史, 妹尾尚一郎, 馬場義昌, “GMPLS ベース・波長分散補償制御プロトコルの実装,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2009年9月
- (28) 小林竜也, 堤恒次, 杉原隆嗣, 平野進, 水落隆司, “デジタル信号処理光通信用 22GS/s D/A コンバータの試作評価,” 電子情報通信学会 総合大会, 2010年3月
- (29) 吉田聡太, 吉村仁美, 堀内栄一, 斧原聖史, 妹尾尚一郎, 馬場義昌, “波長分散を考慮した全光パス経路計算機能の検討,” 電子情報通信学会 総合大会, 2010年3月

<その他資料>

- (1) Y. Baba and T. Mizuochi, “Auto-configured All-Optical Networks by Electronic Pre-Distortion,” iPOP 2008, June, 2008
- (2) 馬場義昌, 水落隆司, “GMPLS 適用波長分散制御技術,” 三菱電機技報, 2009年1月
- (3) Y. Baba and T. Mizuochi, “Distributed Wavelength Routing for Wavelength Switched Optical Networks,” iPOP 2009, June, 2009
- (4) 市川俊亨, 馬場義昌, 吉田聡太, 堀内栄一, 藤井照子, 斧原聖史, 妹尾尚一郎, 水落隆司, “全光ネットワークの実現に向けた波長分散補償制御技術,” CEATEC 2009 NICT スーパーイベント, 2009年10月

(5) E. Horiuchi, K. Koguchi and S. Yoshida, "Distributed Path Control in WSON Networks," iPOP 2010, June, 2010

<標準化提案>

(1) S. Seno, "Requirement of Impairment Compensation Control in WSON," IETF Internet-Draft, Mar., 2009

(2) S. Seno, "Requirement of Impairment Compensation Control in WSON," IETF Internet-Draft, Oct., 2009

5-2 産業財産権

5-2-1 出願特許数

国内出願 26件、 国際出願 2件

5-2-2 公開特許一覧

公開日	公開番号	発明の名称
2007/10/04	特開 2007259281(日本)	分散補償光ファイバ通信システム
2007/10/11	特開 2007266689(日本)	光伝送システムおよび光伝送方法
2007/10/11	特開 2007267001(日本)	分散予等化光送信器
2008/03/06	特開 2008054175(日本)	並列化ルックアップテーブル方式
2008/03/06	特開 2008054176(日本)	リング型光伝送システム
2008/05/29	特開 2008124893(日本)	分散予等化光送信器および光通信システム
2008/05/29	特開 2008124894(日本)	デジタルアナログコンバータ
2008/05/29	特開 2008124549(日本)	光ネットワークシステム
2008/09/11	特開 2008211493(日本)	分散予等化光通信システム
2008/10/02	特開 2008236512(日本)	分散予等化光送信器
2009/02/19	特開 2009038461(日本)	リング型光伝送システム
2009/01/15	特開 2009008791(日本)	光スイッチ
2009/01/22	特開 2009017352(日本)	受信機
2009/02/12	特開 2009033502(日本)	デジタルフィルタ
2009/06/25	特開 2009139400(日本)	スイッチクロスポイント及び光切替装置
2009/07/02	特開 2009147416(日本)	光伝送システム
2009/07/02	特開 2009147417(日本)	光ネットワーク
2009/08/20	特開 2009188788(日本)	送受信システム
2009/11/06	WO2009/072197(PCT)	デジタルフィルタ、プリコーディング装置、送信システム
2009/11/05	特開 2009258373(日本)	光スイッチ
2009/11/12	特開 2009267934(日本)	光送信器
2009/08/10	WO2009/122509(PCT)	デジタル信号処理光送信装置

2009/11/12	特開 2009267935(日本)	光送信器および光受信器
2009/12/24	特開 2009303136(日本)	分散予等化光送信器
2010/02/04	特開 2010025913(日本)	波長分散測定装置及び波長分散測定方法 (特願 2008-159498(日本)を基礎とした優先権出願)

5-2-3 登録特許一覧

該当なし

参考文献

- [1] C. Xie, "Performance of Electronic Pre-Distortion in 40-Gb/s Systems with Optical Dispersion Compensation for Different Modulation Formats and Transmission Fibres," ECOC2007, Tu3.1.5, 2007.
- [2] S. Hellerbrand, et al., "Advanced Modulation Formats for Electronic Predistortion of Intra-channel Nonlinearities at 40 Gbit/s," ECOC2007, We6.2.4, 2007.
- [3] F. Inuzuka, et al., "Nonlinear Inter-Channel Crosstalk Compensation Using Electronic Pre-Distortion in Carrier Phase Locked WDM," OFC/NFOEC2008, OTu05, 2008.
- [4] Y. Benlachtar, et al., "Robust Long-Haul Transmission Utilizing Electronic Precompensation and MLSE Equalization," OFC/NFOEC2007, JWA52, 2007.
- [5] Y. Benlachtar, et al., "Investigation of the Use of Electronic Pre-Distortion and MLSE Equalization in Long-Haul Transmission," ECOC2007, Th9.1.4, 2007.
- [6] R. I. Killey, et al., "Electronic Dispersion Compensation by Signal Predistortion Using Digital Processing and a Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 17, no. 3, pp. 714-716, 2005.
- [7] P. J. Winzer, et al., "Electronic pre-distortion for advanced modulation formats," ECOC2005, Tu4.2.2, 2005.
- [8] H. Yang, et al., "Comparison of Practical Implementation Limitations for Different Electronic Pre-Distortion Transmitter Structures," ECOC2006, We1.5.2, 2006.
- [9] P. Watts, et al., "Performance of Electronic Predistortion Systems with 1 Sample/bit Processing using Optical Duobinary Format," ECOC2007, Tu3.1.6, 2007.
- [10] L. Eldada, et al., "Intelligent Optical Cross-Connect Subsystem on a Chip," OFC' 05, NTuL2(2005).
- [11] V.A. Aksyuk, et al., "238 x 238 micromechanical optical cross connect," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.15, no.4, pp.587-589 (2003).
- [12] X. Zheng, et al., "Three-dimensional MEMS photonic cross-connect switch design and performance," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 9, no. 2, pp.571- 578, Mar./Apr. 2003
- [13] E. Mannie, ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF RFC 3945, Oct. 2004.
- [14] J. Lang, ed., "Link Management Protocol (LMP)," IETF RFC 4204, Oct. 2005.
- [15] K. Kompella and Y. Rekhter, ed., "OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching," IETF RFC 4203, Oct. 2005.

- [16] L. Berger, ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions," IETF RFC 3473, Jan. 2003.
- [17] D. Fedyk, L. Berber and L. Andersson, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Ethernet Label Switching Architecture and Framework," IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-gmpls-ethernet-arch-09.txt, work in progress, Jan. 2010.
- [18] S. Okamoto, "Field Trial of Signaling Interworking of Multi-Carrier ASON/GMPLS Network Domains," ECOC 2006 Workshop on "ASON/GMPLS Implementations in Field Trials and Carrier Networks," Sep. 2006.
- [19] J. Strand, A. Chiu and R. Tkach, "Issues for Routing in the Optical Layer," IEEE Comm. Magazine, vol.39, no.2, pp.81-87, Feb. 2001.
- [20] J. Strand and A. Chiu, ed., "Impairments and Other Constraints on Optical Layer Routing," IETF RFC 4054, May 2005.
- [21] E. Oki, D. Shimazaki, K. Shiimoto, N. Matsuura, W. Imajuku and N. Yamanaka, "Performance of Distributed-controlled Dynamic Wavelength-conversion GMPLS Networks," Optical Comm. and Networks, no.1, pp.355-358, Nov. 2002.
- [22] T. Otani, T. Tsuritani, and D. Li, "Generalized Labels for Lambda-Switching Capable Label Switching Routers," IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-gmpls-g-694-lambda-labels-05.txt, work in progress, Dec. 2009.
- [23] Y. Lee, G. Bernstein, and W. Imajuku, ed., "Framework for GMPLS and PCE Control of Wavelength Switched Optical Networks (WSON)," IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-rwa-wson-framework-05.txt, work in progress, Feb. 2010.
- [24] J. Lee, T. Tsuritani, H. Guo, S. Okamoto, N. Yoshikane, and T. Otani, "Field Trial of GMPLS-Controlled All-Optical Networking Assited with Optical Performance Monitors," OFC/NFOEC 2008, OTuA3, Mar. 2008.
- [25] S. Okamoto, T. Tsuritani, S. Yoshida, T. Fujii, K. Kubo, I. Nishioka, M. Sakauchi, S. Araki, S. Seno, and M. Tsurusawa, "Multi-Vendor Interoperability Demonstration of Wavelength Switched Optical Network (WSON) with GMPLS Lambda-Label Extension," ECOC 2009, Vienna, Austria, Sep. 2009.
- [26] Y. Lee, G. Bernstein, D. Li, and G. Martinelli, "A Framework for the Control of Wavelength Switched Optical Networks (WSON) with Impairments," IETF Internet Draft, dr3ft-ietf-ccamp-wson-impairments-01.txt, work in progress, Oct. 2009.
- [27] 笠史郎, 八木幹雄, 里見秀一, 浅野正一郎, "超高速波長パスネットワークにおける波長分散補償," 信学会ソ大会 BCS-1-1, Sep. 2004.
- [28] T. Hashimoto, M. Yagi, H. Koyano, S. Tanaka, A. Inomata, S. Satomi, H. Ishimatsu and S. Ryu, "Rapid Automatic Chromatic Dispersion Compensation Using GMPLS Signalling Enhancement for Dynamically Reconfigurable All-optical Network," ECOC 2003, Mo4.7.6, Rimini, Italy, Sep. 2003.
- [29] S. Seno, "Requirement of Impairment Compensation Control in WSON," IETF Internet Draft, draft-seno-ccamp-wson-impairment-compensate-ctrl-01.txt, work in progress, Oct. 2009.
- [30] F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, "A Novel Signaling Approach to Encompass Physical Impairments," Globecom 2004 Workshop, Dallas, USA, Nov. 2004.
- [31] Y. Konishi, T. Sugihara, T. Mizuochi, "A novel flip-flop based look-up table

- in digital signal processing for optical communications," APCC/COIN2008, Tokyo, Japan, Oct. 2008.
- [32] D. Walker, H. Sun, C. Laperle, A. Comeau, and M. O'Sullivan, "960-km Transmission Over G.652 Fiber at 10 Gb/s With a Laser/Electroabsorption Modulator and No Optical Dispersion Compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2751-2753, 2005.
- [33] R. I. Killey, P. M. Watts, V. Mikhailov, M. Glick, and P. Bayvel, "Electronic Dispersion Compensation by Signal Predistortion Using Digital Processing and a Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 714-716, 2005.
- [34] 後藤健太郎, 杉原隆嗣, 水落隆司, 矢野安宏, 久保博嗣, "送信端プリコーディングにおける変調座標変換の検討," 電子情報通信学会 光通信システム研究会, Jul. 2008.
- [35] T. Sugihara, "Practical implementation of precoding technologies in high-speed optical transmission," APCC/COIN2008, Tokyo, Japan, Oct. 2008.
- [36] D. McGhan, C. Laperle, A. Savchenko, C. Li, G. Mak, and M. O'Sullivan, "5120 km RZ-DPSK transmission over G652 fiber at 10 Gb/s with no optical dispersion compensation," OFC/NFOEC2005, PDP27, Anaheim, CA, Mar. 2005.
- [37] K. Roberts, C. Li, L. Strawczynski, M. O'Sullivan, and I. Hardcastle, "Electronic Precompensation of Optical Nonlinearity," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 403-405, 2006.
- [38] T. Sugihara, T. Mizuochi, H. Kubo and K. Shimizu, "Proposal for Coordinate Transformed Electronic Pre-compensator and Investigation of its Robustness to Bias Error," OECC/IOOC2007, Jul. 2007.
- [39] S. Seno, Y. Baba, S. Yoshida, M. Kamei, E. Horiuchi, K. Onohara, T. Mizuochi, and T. Ideguchi, "Design of a Chromatic Dispersion Measurement Control Protocol Based upon the GMPLS Architecture," OFC/NFOEC2009, Mar. 2009.
- [40] 吉田聡太, 斧原聖史, 堀内栄一, 妹尾尚一郎, 馬場義昌, "GMPLS 拡張による波長分散測定機能の検討," 信学会総合大会 B-12-6, March 2009.
- [41] Y. Lee, G. Bernstein, D. Li, and W. Imajuku, "Routing and Wavelength Assignment Information Model for Wavelength Switched Optical Networks," IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-rwa-info-07.txt, work in progress, Feb. 2010.
- [42] G. Bernstein, Y. Lee, D. Li, and W. Imajuku, "Routing and Wavelength Assignment Information Encoding for Wavelength Switched Optical Networks," IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-rwa-wson-encode-04.txt, work in progress, Feb. 2010.
- [43] Y. Lee, G. Bernstein and M. Kattan, "Information Model for Impaired Optical Path Validation," IETF Internet Draft, draft-bernstein-wson-impairment-info-02.txt, work in progress, July, 2009.
- [44] G. Bernstein, Y. Lee and M. Kattan, "Information Encoding for Impaired Optical Path Validation," IETF Internet Draft, draft-bernstein-wson-impairment-encode-01.txt, work in progress, July. 2009.
- [45] G. Martinelli and A. Zanardi, "GMPLS Signaling Extensions for Optical Impairment Aware Lightpath Setup," IETF Internet Draft, draft-martinelli-ccamp-optical-imp-signaling-02.txt, work in progress, July 2009.