

平成16年度
研究開発成果報告書

経済的な光ネットワークを実現する高機能
集積化光スイッチングノードの研究開発

委託先：富士通(株)

平成17年5月

情報通信研究機構

平成16年度 研究開発成果報告書

「経済的な光ネットワークを実現する高機能集積化光スイッチングノードの研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	6
2-2-1	最終目標	6
2-2-2	中間目標	7
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	9
3-1	研究開発実施体制	9
4	研究開発実施状況	
4-1	高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの研究開発	10
4-1-1	光スイッチングノードサブシステム開発の概要	10
4-1-2	各モジュール目標特性検討	10
4-1-3	光ハブ評価用テストベッド構築	20
4-1-4	光ハブ用モニタ、制御系開発	21
4-1-5	まとめと今後の課題	22
4-2	波長選択スイッチモジュールの研究開発	23
4-2-1	波長選択スイッチモジュール開発の概要	23
4-2-2	小型分光光学系の開発	25
4-2-3	スイッチ光学系の開発	28
4-2-4	モジュール化開発	33
4-2-5	まとめと今後の課題	36
4-3	波長分散補償モジュールの研究開発	37
4-3-1	波長分散補償モジュール開発の概要	37
4-3-2	光学系の開発	38
4-3-3	補償量可変機能の開発	41
4-3-4	スロープモニタ及び制御技術の開発	42
4-3-5	まとめと今後の課題	42
4-4	偏波モード分散補償モジュールの研究開発	43
4-4-1	偏波モード分散補償モジュール開発の概要	43
4-4-2	偏波制御器の開発	43
4-4-3	可変 DGD 光回路の開発	44
4-4-4	偏波モニタの開発	46
4-4-5	まとめと今後の課題	46

4-5 總括47

5 參考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

1 研究開発課題の背景

近年、高速アクセス網、高速企業網が急速に普及し、これらの通信需要増大に対応するため、コア網では波長多重伝送システムの敷設が進みつつある。その一方で、都市間を接続するメトロ網は、ノードのスループットと伝送帯域が大幅に不足するため、ネットワーク上のボトルネックとなる。この状況を打破するために、図 1-1 に例示するように、メトロ領域に、波長選択スイッチと各種補償機能を集積化した小規模な光スイッチングノード（光ハブ）を設置し、光領域でアクセス網とコア網を直接接続する新しいフォトニックネットワークアーキテクチャの構築を提案する。光ハブをアクセス網とコア網間の接続ノードとして適用することにより、日本国内の任意の地点間で距離を全く意識することなく、FTTH の持つ上り・下り双方向 100 Mbit/s の高速アクセス網の能力をフルに発揮できる経済的ブロードバンドネットワーク網の実現が可能となる。

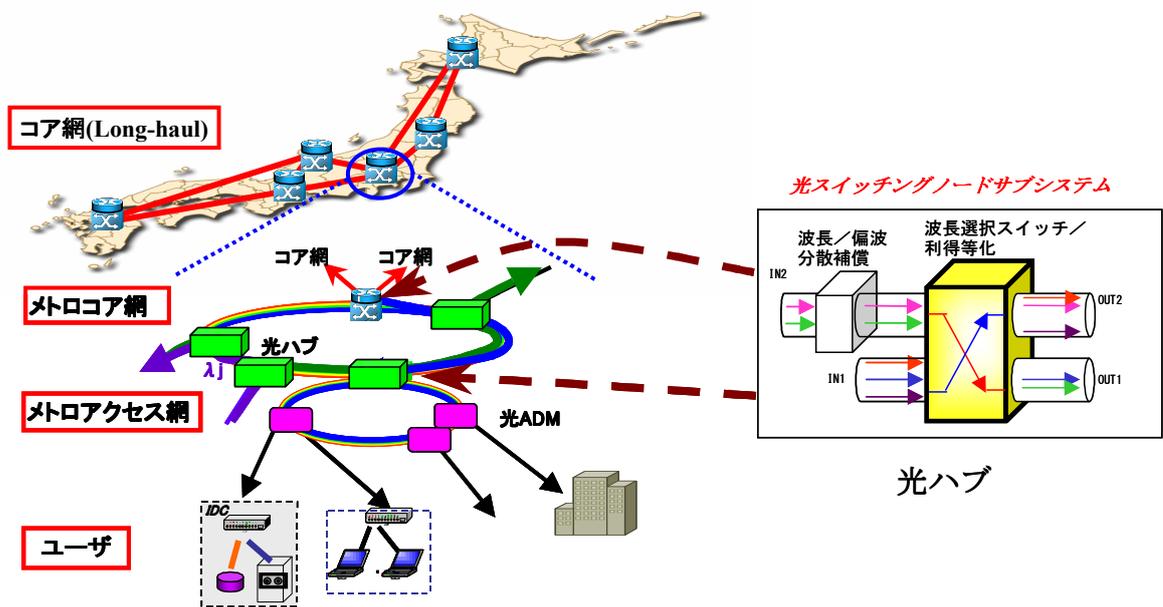


図 1-1: 次世代フォトニックネットワークと本研究で開発する光スイッチングノード

2 研究開発体の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本提案の高機能集積化光スイッチングノード（図1に例示）は、メトロコア網に適した小型・低価格かつフレキシビリティの高い光ハブ機能を提供するとともに、End-to-endの高品質な通信状態を確保するために、経路切替に連動してアダプティブに動作する、各種の光補償機能を内蔵することを特徴とする。そのための主要開発項目としては、波長選択スイッチモジュール、波長分散補償モジュール、偏波モード分散補償モジュール、およびそれらを統合したサブシステムがあり、下記の通り、4つの副課題に大別して本研究開発を実施する。

副課題ア) 高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの開発

下記の副課題イ～エの各モジュール機能をインテグレートし、小型・低価格を可能とする機能集積形態を追求する。特に、小型化と低価格化に適した機能統合形態、統合制御と実現性を考慮した各モジュールへの最適な機能配分、今まで世界的にも全く研究実績の無い、光スイッチングとアダプティブな光補償技術の融合を実現する高速モニタ・制御技術の開発を行う。

副課題イ) 波長選択スイッチモジュールの開発

メトロコア網に適した小型・低価格と、フレキシビリティを併せ持つ、波長選択スイッチモジュールの開発を行い、光ハブとしての基本である光ルーティング機能を実現する。図2-1のような2入力×2出力の波長選択スイッチ機能、伝送によって生じる波長間の光パワーレベルの偏差を補償する光パワーレベル調整機能を、図2-2に示すような形態で一体集積集することにより、従来にない小型、低損失、低価格を目指す。

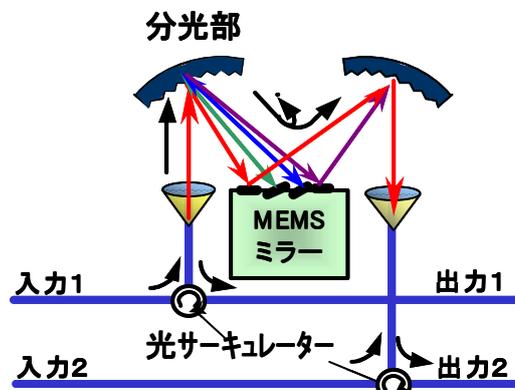


図2-1：2入力2出力波長選択スイッチ基本構成図

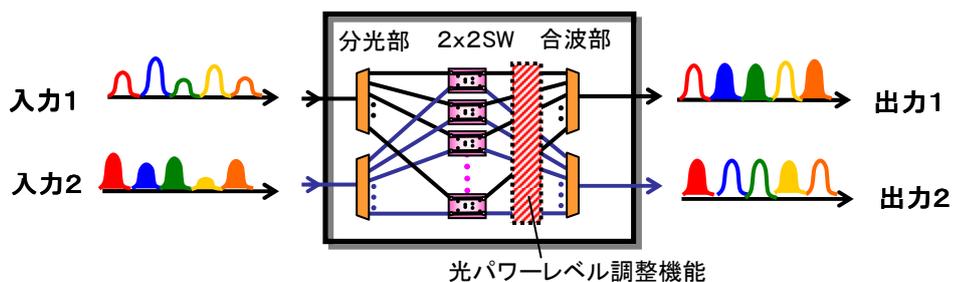


図2-2：分光部とスイッチ部を一体化した波長選択スイッチの構成例

副課題ウ) 波長分散補償モジュールの開発

10 Gbit/s 以上の高速伝送でネットワークサイズの制限要因となる波長分散をアダプティブに補償する。波長多重信号の波長分散の波長間差(分散スロープ)も併せて補償する機能が重要である。その補償方法は2つある。ひとつはチャンネル間の分散量の変化を連続的=分散スロープとして捉え、複数のチャンネルを一括で補償する方法(一括スロープ補償)であり、もうひとつは、隣接チャンネル間の補償量に関らず個別に分散補償量を設定する方法(個別チャンネル補償)である。本副課題では、どちらの方法がよりメトロに適しているか検討し、更に光スイッチングノード適用に重要でありながら従来デバイスで困難であった高速応答特性も可能な構造の実現を目指す。

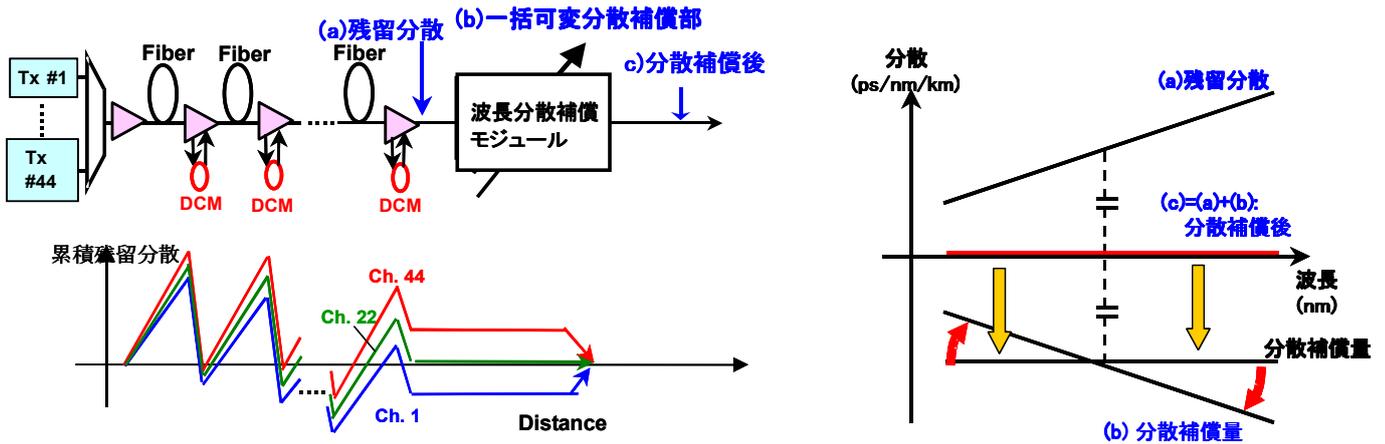


図 2-3 : 残留分散と波長分散補償モジュールの動作

副課題エ) 偏波モード分散補償モジュールの開発

ファイバ状態によっては、偏波モード分散がネットワークサイズの制限要因となることがあり、そのアダプティブ補償を行う必要を生じる。波長毎の現象のランダム性により、補償機能が波長毎に必要なため、徹底した機能集積化、アレイ化により小型、低価格化を図る。本偏波モード分散補償モジュールは、40 Gbit/s 以上の超高速伝送において特に必要となる。

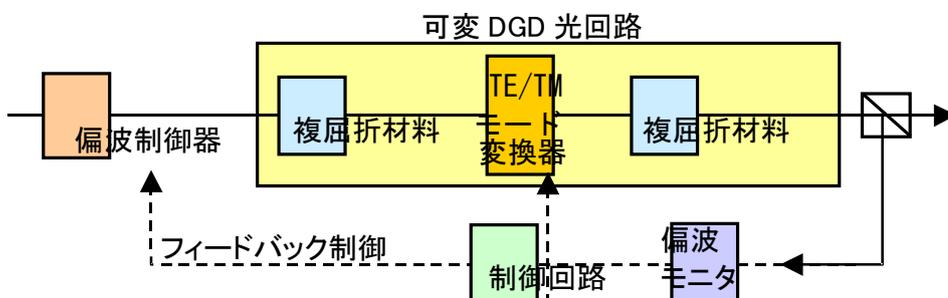


図 2-4 : 偏波モード分散補償モジュールの基本構成図

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成20年3月末）

副課題ア) 高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの開発

波長選択スイッチ（光パワーレベル調整機能を含む）、波長分散補償機能、偏波モード分散補償機能、およびそれらの統合モニタ・制御機能をサブシステムに統合し、実際のネットワークに適用可能な特性を実現する。具体的には、実際のメトロコア網を模擬したリング形態のテストベッドを構築し、サブシステムとしての総合的な機能確認を行う。高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの最終目標を下記に示す。

- ・サイズ(体積)、価格：現状技術を用いて光クロスコネクタスイッチ、波長分散補償器、偏波モード分散補償器を構成・統合した値に対して20分の1
- ・応答速度：ネットワーク全体として50ms以下
- ・入出力ポート数：2入力2出力
- ・ビットレート：2.5～40Gbit/s
- ・波長帯：C-band(またはL-band)
- ・波長間隔：25, 50, 100GHz

副課題イ) 波長選択スイッチモジュールの開発

- ・小型化、低損失化、低価格化のための分光光学系、モジュール技術の確立
- ・アナログスイッチング技術の確立(制御含めて <1ms)
 - 1ms以下の応答速度のアナログスイッチングデバイス
 - 1ms以下の動作に対応したVOA制御/駆動技術の確立
- ・モジュールの目標
 - サイズ：従来の1/10、損失：5dB以下、価格：従来の1/10
 - 光クロスコネクタ型スイッチ(合分波器+マトリクススイッチ+VOA)を基準
 - 波長間隔：25～100GHz
 - 光パワーレベル調整機能の集積化

副課題ウ) 波長分散補償モジュールの開発

今まで実現されていなかったシステムに適用可能な広い分散補償範囲の実現と光経路の切替に対応する高速補償動作の実現を最終目標とする。その他、詳細な特性は初年度にシステム仕様の検討の中で決定する。

- ・可変補償幅
 - 分散スロープ補償幅：36ps/nm²（全幅，C or Lバンド）以上
 - 分散補償幅：±2000ps/nm 以上
- ・動作速度：約10ms（制御系の収束時間を含む）

副課題エ) 偏波モード分散補償モジュールの開発

偏波モード分散補償モジュールを構成する要素デバイス(偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ)をアダプティブな制御も含めた機能集積化し、かつ、アレイ化を行うこ

とにより、小型化・低価格化を達成する。

- ・8波長以上の機能集積化、アレイ化
- ・100 μ s以下の応答速度の実現
- ・個別の現状技術で構成したモジュールと比較して、サイズ・価格ともに1/10以下

2-2-2 中間目標（平成18年1月末）

副課題ア) 高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの開発

サイズ・動作速度などに一部制約はあるものの、各モジュールの基本的な機能（光スイッチング機能、光補償機能）は最終目標と同等のものを実現する。これらを用いて、各モジュールを統合制御した状態での動作検証実験を行い、課題を明確化し光デバイス開発にフィードバックすることで、最終目標に向けての開発を推進する。

- ・入出力ポート数：2入力2出力
⇒1入力N出力（Nは4以上）への修正を反映すべきか？
- ・ビットレート：10 Gbit/s
- ・波長帯：C-band(またはL-band)
- ・波長間隔：50 GHz

副課題イ) 波長選択スイッチモジュールの開発

基本光学系と機能は最終目標と同等のモジュールを実現し、システム実験を通して、制御アルゴリズムの指針を得る。

- ・分光光学系の構成決定
- ・アナログ動作可能なスイッチングデバイスの構造決定

副課題ウ) 波長分散補償モジュールの開発

基本的な光学特性は最終目標と同等とする。システム評価が可能なレベルのモジュール化を行う。

副課題エ) 偏波モード分散補償モジュールの開発

偏波モード分散補償モジュールを構成する要素デバイス（偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ）の1波長分の基本構成について所要の性能を達成する。

2-3 研究開発の年度別計画

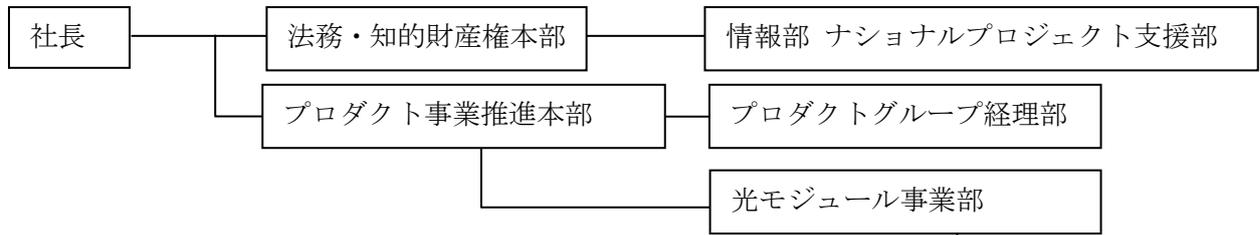
(金額は非公表)

研究開発項目	H15年度	H16年度	H17年度	H18年度	H19年度	計	備考
経済的な光ネットワークを実現する高機能集積化光スイッチングノードの研究開発							
副課題ア) 高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの開発					→		
副課題イ) 波長選択スイッチモジュールの開発					→		
副課題ウ) 波長分散補償モジュールの開発					→		
副課題エ) 偏波モード分散補償モジュールの開発					→		
間接経費額 (税込み)							
合 計							

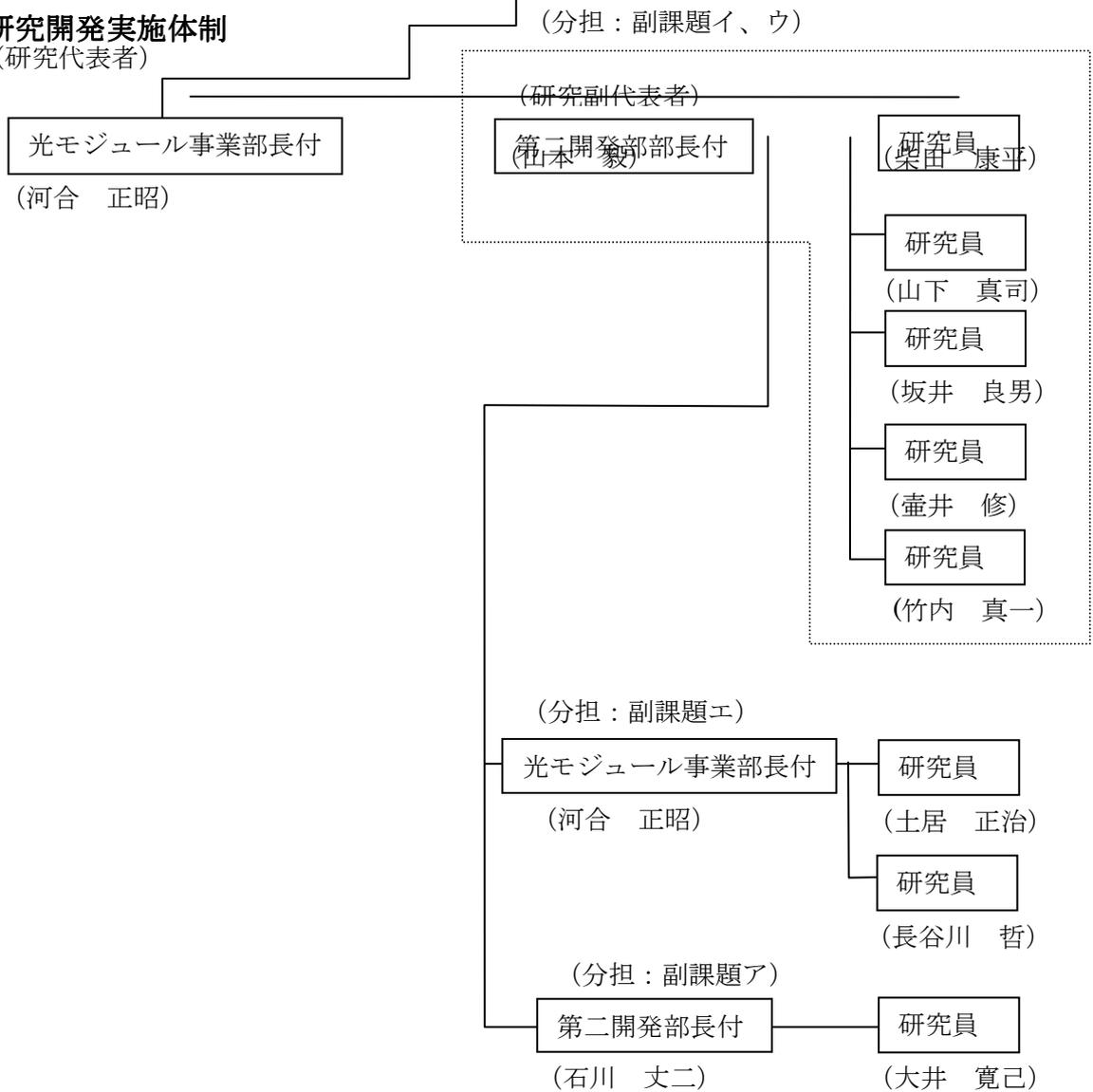
- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



2-2 研究開発実施体制 (研究代表者)



4 研究開発実施状況

4-1 高機能集積化光スイッチングノードサブシステムの研究開発（副課題ア）

4-1-1 光スイッチングノードサブシステム開発の概要

本副課題では、図 4-1-1-1 に示す光ハブを構成する波長選択スイッチモジュール(WSS)、可変分散補償モジュール(VDC)、偏波モード分散モジュール(PMDC) をインテグレートした光スイッチングノードサブシステムの研究開発を進める。

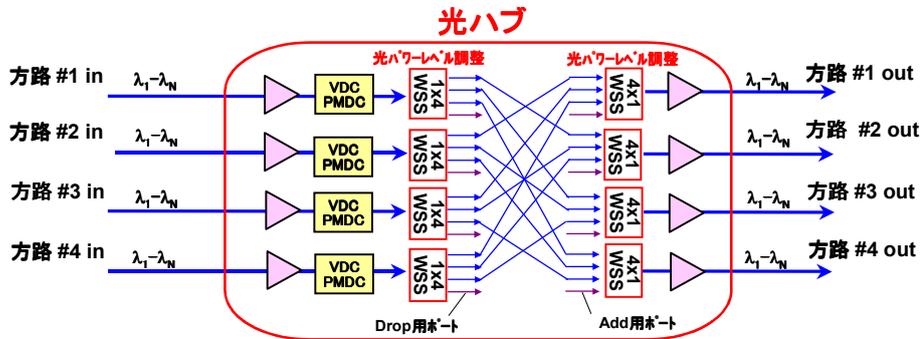


図 4-1-1-1 光ハブの基本構成

今年度は、中間目標である、各要素モジュールを統合制御した状態での動作検証実験に向け、下記の検討を行った。

(a) 各モジュール目標特性の検討

昨年度検討した各モジュール目標特性一次案に対し、国内全域にわたって End-to-end(メトロ網-コア網-メトロ網)で光レベル接続するためのネットワークモデルの見直しを行い、各モジュールの詳細仕様をまとめた。特に、昨年度課題となった高速応答特性、クロストーク等に関して、定量的な検討を行った。

(b) 光ハブ用モニタ、制御系開発

各モジュールを統合制御するためのモニタ、制御系の開発を進めている。今年度は特に、経路切替や光パワーレベル調整をモニタ信号に応じて自動で行うための波長選択スイッチの制御回路の試作を行った。

(c) 光ハブ評価用テストベッド構築

昨年度に引き続き、各モジュールおよびそれらを統合したサブシステムの伝送特性評価を行うためのテストベッドの構築を行った。特に今年度は、各モジュールの高速応答の評価系の立ち上げを行った。

4-1-2 各モジュール目標特性検討

昨年度報告書においては、光ハブに対するシステム要件を明確化し、それに基づいて各モジュール（波長選択スイッチモジュール、可変波長分散モジュール、偏波モード分散モジュール）の目標特性の一次案を示した。今年度は、国内全域にわたって End-to-end で光レベル接続すべくネットワークモデルを拡大し、各モジュール目標特性の詳細について検討した。

4-1-2-1 ネットワークモデル

本検討で前提としたネットワークモデルを図 4-1-2-1 および図 4-1-2-2 に示す。昨年度はコア網の伝送距離を最大 300 km として検討したが、今年度は日本全域にわたって End-to-end で光レベル接続するネットワークの実現を目指し、それに伴って各モジュールの目標特性の見直しを行った。図のように、コア網としては、国内全域を接続する最長 2200 km のメッシュ網を想定した[1-1]。各都市(図中赤丸)には任意波長の経路切替えをする光

ハブを配置し、そこを基点として各都市圏内のメトロコア網へと接続する。メトロコア網としては、最大 150 km のリング網を想定し、最大 15 段（SDH/SONET 規格を参考）の小ノード（分岐挿入のみを行なう小型のノード）を経由すると想定した。



図 4-1-2-1 国内コア網ネットワークモデル

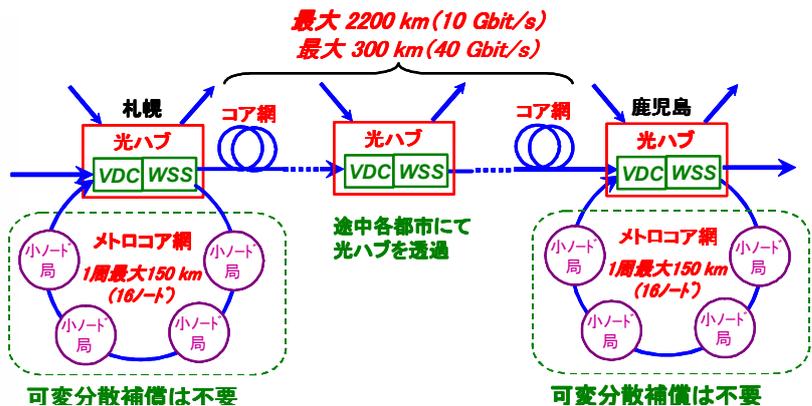


図 4-1-2-2 コア網およびメトロ網のノード配置

ネットワークパラメータを表 4-1-2-1 に示す。10 Gbit/s 信号に関しては、上記ネットワークモデルの全域をカバーする最大伝送距離 2500 km (メトロコア網 150 km + コア網 2200 km + メトロコア網 150 km) を目標とする。40 Gbit/s 信号に関しては、10 Gbit/s 信号に比べて所要光信号対雑音比が 6 dB 厳しくなり、伝送距離が 1/4 に制限されるため、最大伝送距離を 600 km (メトロコア網 150 km + コア網 300 km + メトロコア網 150 km) とした。

表 4-1-2-1 想定したネットワークパラメータ

項目	値		備考
ビットレート	10 Gbit/s	40 Gbit/s	
波長帯	C バンド (1531.90 - 1563.05 nm) もしくは L-band (1573.71 - 1606.60 nm)		
波長間隔	50/100 GHz	200 GHz	
最大波長数	80/40 ch	20 ch	
最大ノード数	メトロ網	16 ノード (光ハブ 1, 小ノード 15)	SDH/SONET 規格 (BLSR) を参考
	コア網	7 ノード	
ファイバ種類	SMF/ DSF (L-band)		
伝送距離	最大 2500 km (コア網: 2200 km, メトロ網 150 km × 2)	最大 600 km (コア網: 300 km, メトロ網 150 km × 2)	

4-1-2-2 波長選択スイッチモジュールの目標特性

本研究開発課題では End-to-end で光ネットワーク接続する光ハブの実現を目的とするため、光ハブに適用する波長選択スイッチとしては、波長毎の経路切替え機能をもつことに加え、光ノード多段透過に耐えられる伝送特性の確保が重要である。波長選択スイッチモジュールの目標特性検討にあたり、まず、チャンネル数拡張を考慮した上での①波長間隔を検討した。次に、主な伝送劣化要因としての②透過帯域幅、③クロストークの所要特性、さらに、光スイッチングに要求される④高速応答特性に関して検討を行った。

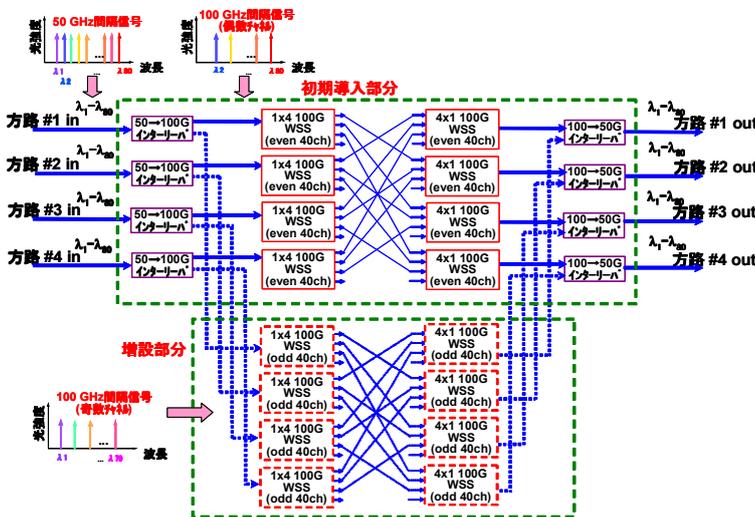
① 波長間隔、波長数

昨年度検討を行った光ハブに対するシステム要件の一つに、波長数に対する柔軟な拡張性があった。つまり、初期導入時にはその時点でのトラフィックディマンドに応じ、少ない波長数に対応した低コスト、小型の光ハブを適用し、トラフィックディマンド増大に応

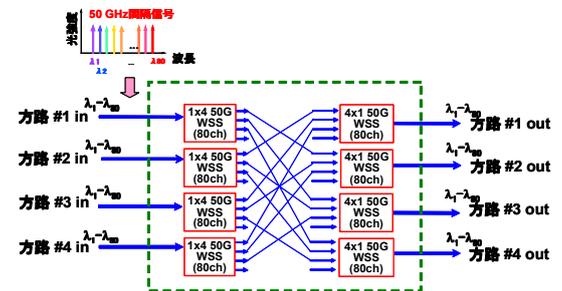
じて、インサービスで各構成モジュールを追加できる構成が望ましい。図 4-1-2-3 に示す下記の 3 つのノード構成方法に関して、比較検討を行った。

- (a) 初期導入時には 50 GHz/100 GHz インターリーバを挿入した上で、100 GHz 間隔（偶数グリッド）40 波用波長選択スイッチを配置し、さらに波長数要求が 40 波以上が増大した場合、奇数グリッド 100 GHz 間隔の波長選択スイッチを追加する。
- (b) 初期から 80 波用の 50 GHz 間隔波長選択スイッチを導入する方法
- (c) 40 波用の 100 GHz 間隔波長選択スイッチをのみを導入する方法（最大波長数が 40 波に制限される。）

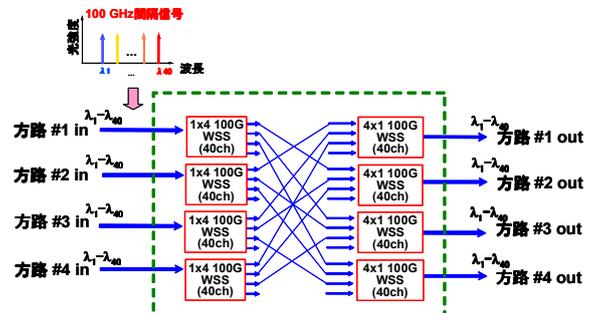
図 4-1-2-4 に各構成間の光ハブのサイズ、コストの比較を示す。実際の市場要求としては 40 波以下の比率が高く、そのような状況下で、構成 (b) は少数波長時にも最大波長数と同じサイズ、コストが必要となるため、拡張性の点からデメリットが大きい。そのため、まず、最大波長数 40 波以下のシステムでは、100 GHz 間隔波長選択スイッチを適用すべきと考える（構成 (c)）。さらに、40 波以上に拡張する必要があるシステムへの対応としては、100 GHz 用波長選択スイッチと 50 GHz/100 GHz インターリーバを組み合わせることを想定する（構成 (a)）。



(a) 100 GHz 間隔波長選択スイッチとインターリーバを適用する構成（最大 80 チャンネル）

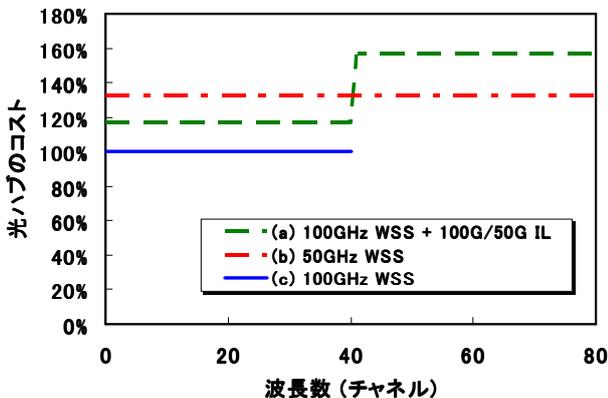


(b) 50 GHz 間隔波長選択スイッチ適用（最大 80 チャンネル）

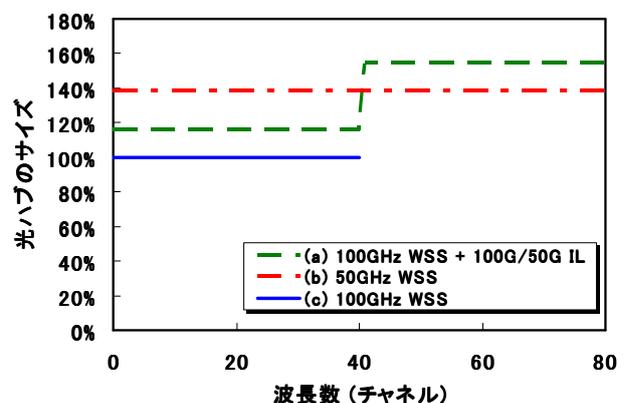


(c) 100 GHz 間隔波長選択スイッチ適用（最大 40 チャンネル）

図 4-1-2-3 波長数拡張に関する波長選択スイッチ構成案



(a) コスト



(b) サイズ

図 4-1-2-4 各波長選択スイッチ構成のノードコスト、サイズ比較 (IL: インターリーバ)

② 透過帯域幅

表 4-1-2-1 で想定したネットワークモデルでは、多段の光モジュール(波長選択スイッチ、可変分散補償モジュール)を透過するため、それに耐える透過帯域幅の確保が重要である。今回、モジュール多段透過による波形劣化を評価する伝送シミュレーションを行った。図 4-1-2-5 に、10 Gbit/s(100 GHz 間隔)および 40 Gbit/s(200 GHz 間隔)伝送特性の各モジュール透過帯域幅依存性のシミュレーション結果を、表 4-1-2-2 に計算で想定したモジュール条件と所要帯域幅計算結果を示す。なお、4-2、4-3 章で述べる開発中の各モジュールの現状特性を考慮し、波長選択スイッチおよび可変分散補償モジュールの透過特性形状に関して、各々 3 次および 2 次のガウシアンを想定した。

特に、許容ペナルティを 0.1 dB としたとき、10 Gbit/s 信号での波長選択スイッチモジュールの透過帯域幅としては、60 GHz 以上(3dB-down, 全幅)が要求される。なお、最大 80 チャンネル(波長間隔 50 GHz)のシステムへの対応が必要となる場合、ノード多段透過時には、各モジュールでなく 50 GHz/100 GHz インターリーバの透過帯域幅が伝送制限要因になり、伝送距離が縮小する(インターリーバ 36 段(18 ノード)で 1 dB ペナルティ)。

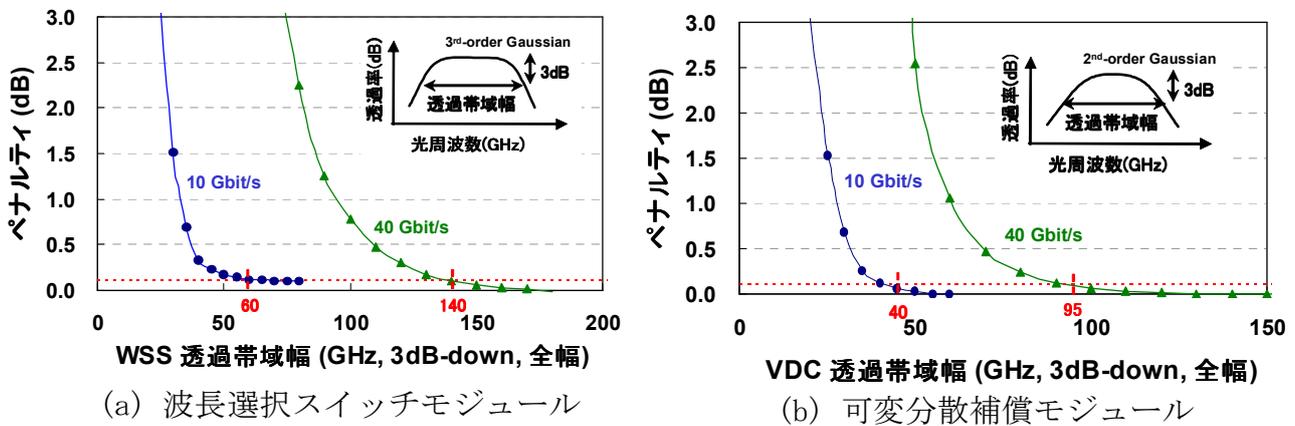


図 4-1-2-5 伝送特性の各モジュール透過帯域幅依存性

表 4-1-2-2 想定したモジュール透過条件と所要帯域幅計算結果

項目	値		備考
ビットレート	波長選択スイッチ(WSS)	可変分散補償モジュール	
最大モジュール透過段数	10 Gbit/s	44 台	- 光ハブ: WSS 2 台 + VDC 1 台 - 小ノード局: WSS 1 台
	40 Gbit/s	30 台	
透過帯域形状	3 rd -order Gaussian	2 nd -order Gaussian	
所要透過帯域幅	10 Gbit/s	60 GHz	3dB down, 全幅 許容ペナルティ 0.1 dB
	40 Gbit/s	140 GHz	

(偏波モード分散補償モジュールは、帯域制限を生じないため表から除外)

③ クロストーク (コヒーレントクロストーク)

コヒーレントクロストークは、合分波デバイスのアイソレーション不足や迷光等の理由によって、一部の信号が複数の経路を経て再び信号光に重畳される現象(MPI = Multi-pass interference)である。同一波長によるクロストークであるために、主信号の間で光干渉による雑音を発生させる。本検討で想定したネットワークモデルのように、多数の光ノードが連結する場合、複数の波長選択スイッチを透過するごとに、各波長選択スイッチで発生するコヒーレントクロストークが累積し、信号光の伝送特性をさらに劣化させる。

今回、コヒーレントクロストーク量とペナルティの関係をシミュレーションおよび実験で評価するとともに、波長選択スイッチが多段接続された場合のクロストークの累積効果

に関してシミュレーション検討を行った。図 4-1-2-6 に示すように、実験においては、可変アッテネータ (VATT) を用いてクロストーク量 (信号光パワーとクロストーク光パワーの比率) を調節し、ファイバ伝送時に相当する光信号対雑音比 (OSNR) になるよう ASE を付加した。

図 4-1-2-7 に、各波長選択スイッチの多段接続数における、波長選択スイッチ 1 台あたりで発生するコヒーレントクロストークと Q ペナルティを示す。多段接続前 (1 段) におけるクロストーク量対ペナルティの関係は、実測 (プロット) とシミュレーション (曲線) の間でよく一致している。多段接続時の影響に関して、今回想定しているネットワークモデルでは、表 4-1-2-2 に示したように、最大 44 台の波長選択スイッチを透過することになる。許容ペナルティを 1 dB とした場合、シミュレーション結果より、波長選択スイッチ 1 台あたりに許容されるコヒーレントクロストークは -44 dB 以下となる。

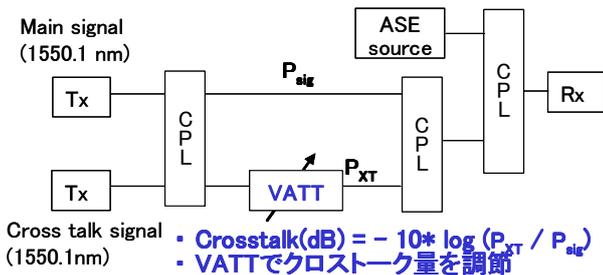


図 4-1-2-6 クロストーク評価実験構成

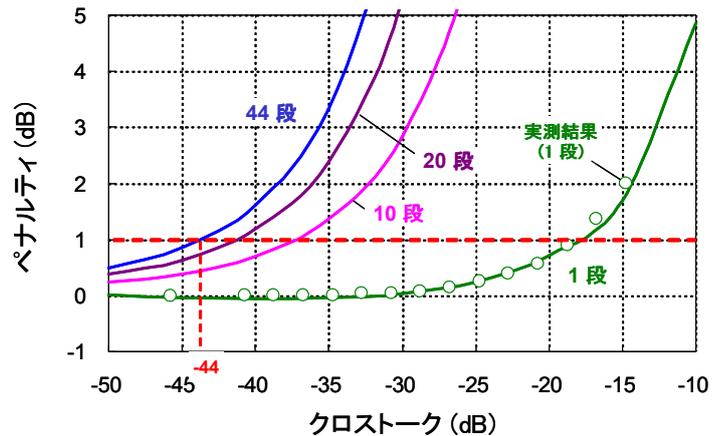


図 4-1-2-7 クロストーク劣化評価結果

④ 応答速度

本テーマで提案している光ハブを用いたシステムの高速度応答特性としては、「ネットワーク全体として 50 ms 以下でのサービス復旧」を目標としている。高速応答特性を決める要因としては、高速プロテクション、オンデマンドでの伝送経路切替が考えられる。

まず、光ハブを用いて接続された複数ネットワーク間的高速プロテクションへの対応を考える。従来の単一リング伝送路網中心のメトロシステムにおいては、OUPSR (Optical Unidirectional Path Switched Ring)、OSPFR (Optical Shared Path Protection Ring) といった光プロテクション方式を採用し、光ファイバ断障害時の高速サービス復旧

(SONET/SDH 規格では 50 msec 以内) を実現してきた [1-2, 1-3]。今回、光ハブを用いて複数リング間を接続した光ネットワークへの同プロテクションの応用について検討した。

図 4-1-2-8 に、光ハブを用いて 2 つのリングを接続し、OUPSR プロテクションを行なうための光ネットワーク構成を示す。OUPSR においては、各リング内でお互いに逆回りの現用回線と予備回線を 1 対 1 で用意し、トランスポンダからの送信光信号を光カプラ等で分岐して、現用回線と同一の信号を予備回線にも伝送する。光ハブにおいては、2 つのリング間での現用回線同士、予備回線同士を波長選択スイッチで接続する。よって、リング A から送出された同一の信号が、現用、予備回線を介して隣接リング B の受信端に到達するために、現用信号が障害で切断された場合でも、受信トランスポンダ (a) 内蔵のスイッチ切替のみで予備信号に切り替えることができる。この場合、障害発生時に光ハブでは切替動作を行なわないため、波長選択スイッチには高速応答は要求されない。

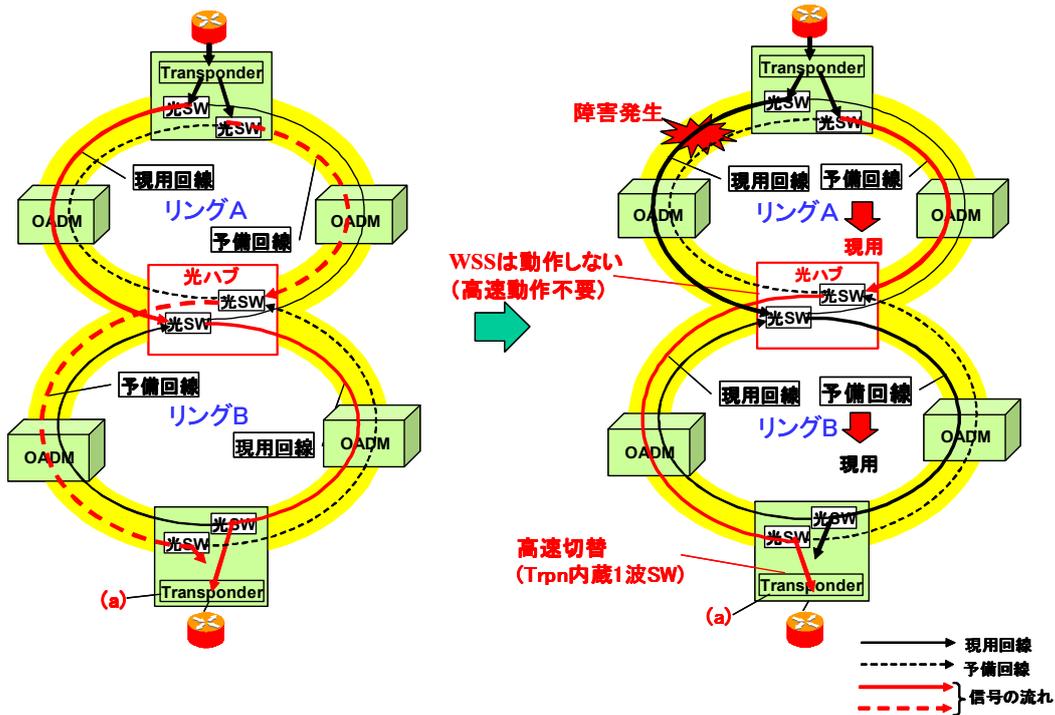


図 4-1-2-8 光ハブを用いた複数リング間での OUSPR プロテクション

一方、図 4-1-2-9 に、2リング接続で、OSPFR プロテクションを行なうためのネットワーク構成を示す。OSPFR プロテクションは、予備専用の回線を設けずに、同一波長で別の情報の光信号を上りと下りの2回線に收容することで、回線の使用効率を高めることを特徴とする。障害が発生して上り側の現用回線からの光信号が切断された場合は、送信端のスイッチ(b)で切替を行って、光信号を下り側の回線に送出する(障害発生前に下り側の回線で流していた優先度の低い信号は切断)。この場合、障害が起きたリングA内のみで閉じたプロテクションを行ない、隣接リングBに影響を与えないようにするため、光ハブにおける波長選択スイッチは切替動作を行う。よって、波長選択スイッチには高速応答が要求される。

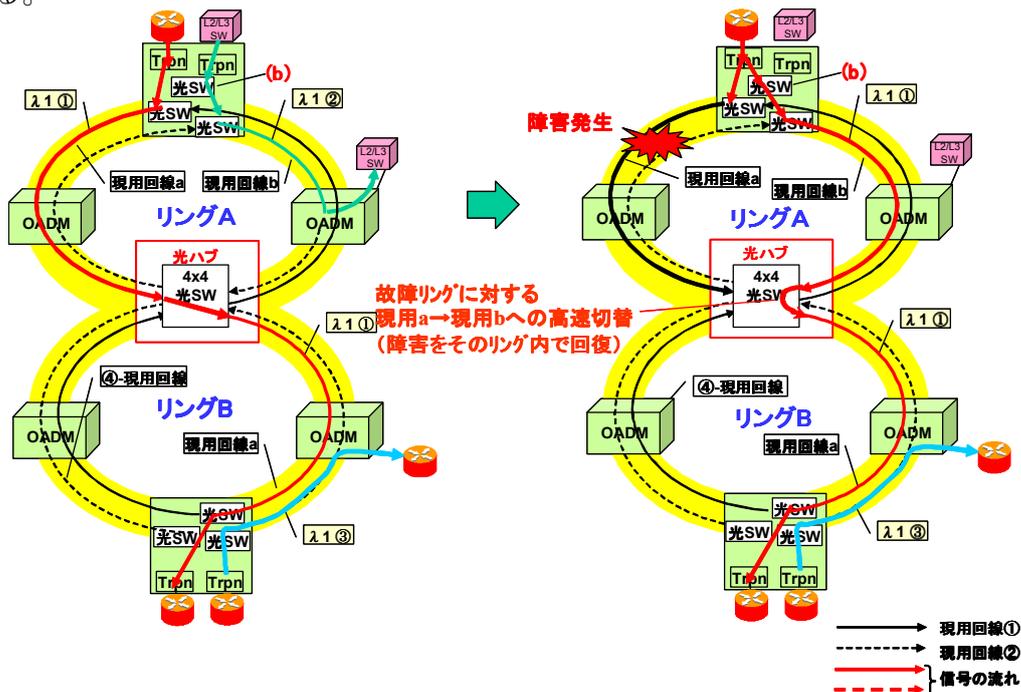


図 4-1-2-9 光ハブを用いた複数リング間での OUPFR プロテクション

図 4-1-2-10 に、OSPPR における障害復旧時間検討のネットワークモデルを、図 4-1-2-11 に切替制御シーケンスを示す。SONET/SDH レイヤでの Bellcore 規格に準じ、伝送距離としては最大 1200 km、ノード数としては最大 16 ノードのネットワークでのプロテクションを考えた。

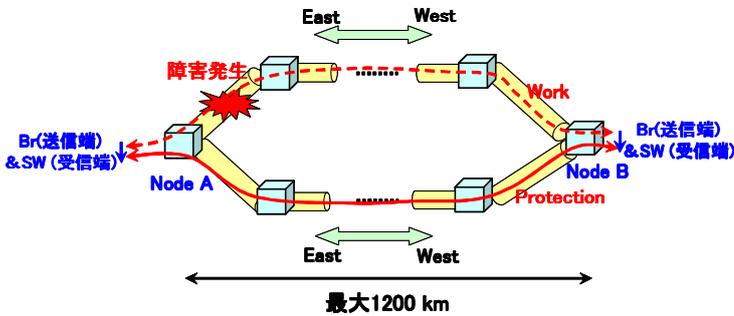
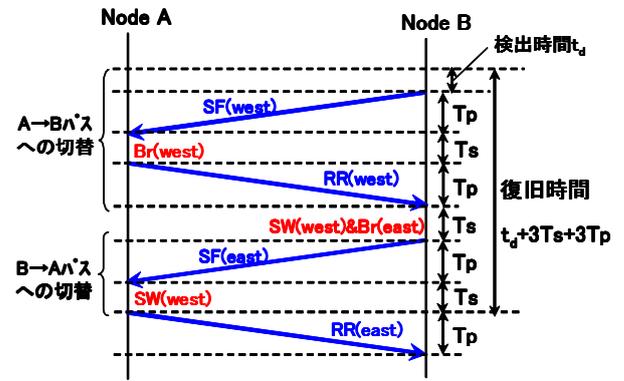


図 4-1-2-10 障害復旧ネットワークモデル



SF: Signal Failure BR: Bridging (送信端)
RR: Reverse Request SW: Switching (受信端)

図 4-1-2-11 切替制御シーケンス

下記計算に示す各プロセスへの所要時間の割振りを行った結果、波長選択スイッチの所要応答速度を 3 msec 以下とした。

- ・ 障害検出時間 $t_d = 2 \text{ ms}$
- ・ $T_p = \text{ファイバ伝搬時間} + \text{中継ノード遅延時間}$
 $= (1200 \times 10^3 \text{ m}) \div (2 \times 10^8 \text{ m/s}) + 250 \mu\text{s} \times 16 \text{ node} = 10 \text{ ms}$
- ・ 全体としての復旧時間: $t_d + 3T_s + 3T_p < 50 \text{ ms}$ (目標値)
- ⇒ 1 ノード当たりの切替時間: $T_s < 6 \text{ ms}$
- ⇒ 波長選択スイッチモジュールの切替時間 < 3 ms (モニタ検出時間を 3 ms と想定)

また、様々なトラヒックを効率よくネットワークに収容し、波長貸し等の新規サービスへ対応するために、波長毎のオンデマンドでの信号経路切替が必要になると考えられる。本テーマで開発を行っている光ハブに関しては、当面必要とされるストリーム信号に対する信号経路切替を想定している。その場合、オペレーションシステムからの切替制御信号に応じて、所望の伝送パス上の複数の光ハブの経路切替を同時に行うことで、上記プロテクション要求に応じた波長選択スイッチ切替時間 (<3 ms) が実現できれば、光信号の瞬断時間は充分 50 ms 以下とすることが可能である。

但し、現在 GMPLS [1-4] に代表されるような光レベルでのネットワークマネジメント技術の研究開発が進められており、今後制御時間も含めたネットワーク応答速度の高速化が求められる場合に、光スイッチへの要求速度がさらに厳しくなる可能性があり検討課題である。また、フォトニックネットワークに収容するトラヒックの効率をさらに高めるために、バースト的に発生する IP パケットのかたまり毎に異なる波長を割り当てる光バースト転送技術、IP パケット毎に異なる波長を割り当てる光パケット転送技術の研究開発も行われており、そのような次世代技術に対応するためには、サブミリ秒～ナノ秒オーダーのスイッチの高速応答が必要になってくる可能性がある。

表 4-1-2-3 波長選択スイッチに対する高速応答要求

		経路切替ノード	波長選択スイッチの応答速度要求	備考
(a) プロテクション	OUPSR	受信端のみ切替 (光ハブは切替無し)	遅くて可	△ 常に予備パスが必要
	OSPPR	光ハブ、送受信端ともに切替	<3 ms	○ 予備パス不要で、波長を有効活用
(b) オンデマンドでの伝送経路切替		光ハブ、送受信端ともに切替	<3 ms (ストリーム信号転送)	今後の高速ネットワークマネジメントの要求 (GMPLS, 光バースト、光パケット伝送等)に従って要求が厳しくなる可能性あり

⑤ 波長選択スイッチモジュール目標特性

表 4-1-2-4 に、昨年度のおよび以上①～④の検討結果による波長選択スイッチモジュールの目標特性をまとめる。

表 4-1-2-4 波長選択スイッチモジュール 目標特性

項目	仕様値		備考
	10 Gbit/s 用	40 Gbit/s 用	
波長帯	CバンドもしくはL-band		
波長間隔	50 /100 GHz	200 GHz	
波長数	80 /40 ch	20 ch	
入出力ポート数	(a) 入力: 1、出力: N (Nは4以上) (b) 入力: N、出力: 1 (Nは4以上)		
透過帯域 (3 dB down、全幅)	>60 GHz	> 140 GHz	
クロストーク	リアクロストーク: < -25 dB コヒーレントクロストーク: < -44 dB		
挿入損失	< 6 dB		
光パワー可変範囲	> 6 dB		
群遅延リップル	< +/-2.7 ps	< +/-0.9 ps	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		

4-1-2-3 可変波長分散補償モジュールの目標特性

可変波長分散補償モジュールの仕様項目としては、波長多重信号に対して様々な伝送路条件でも高い分散補償精度を確保するための①波長分散スロープ可変範囲・ステップ、一次波長分散可変範囲・ステップ、波形劣化を防ぐための②群遅延リップルが重要である。

① 波長分散スロープ可変範囲・ステップ、一次波長分散可変範囲・ステップ

伝送距離が長くなるほど、経路切替に伴う伝送距離変化、伝送路ファイバ・DCFの波長分散係数・分散スロープの製造ばらつき、伝送路ファイバの温度変動による零分散波長のシフト等に起因して分散補償誤差が累積し、伝送波形劣化が課題となる。今回、図 4-1-2-1 に示した国内全域をカバーするネットワークモデル(最長 2500 km)において、これらの分散補償誤差を補償するため、可変分散補償モジュールの可変分散補償量、可変ステップ(一次分散および分散スロープ)の所要量を検討した。同図に示すように、可変分散補償モジュール(VDC)は、コア網とメトロ網をつなぐ光ハブ内へ配置すれば、比較的短距離のメトロ網内での配置は不要と考える。伝送路としては、波長分散係数の大きい標準のシングルモードファイバを想定した。

図 4-1-2-12 に、可変波長分散補償モジュールを適用する前後の分散マップを示す。可変分散補償モジュール適用により、受信端での残留分散差が、2510 ps/nm から 82 ps/nm と

効果的に低減される。

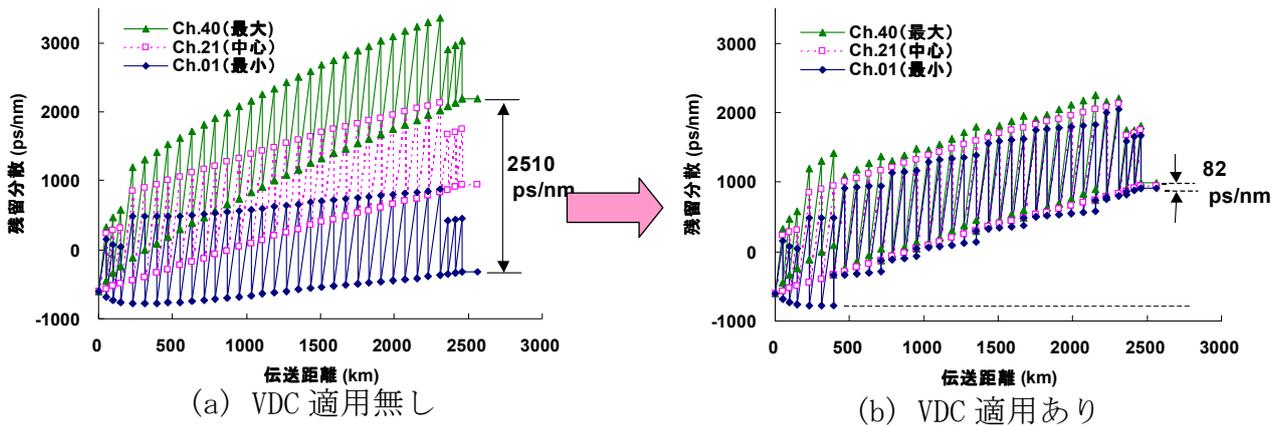


図 4-1-2-12 可変分散補償モジュール適用前後の分散マップ

想定している伝送路およびDCFの波長分散及び波長分散スロープばらつき量、および伝送信号の波長分散トレランスより、可変分散補償モジュールに要求される分散補償特性を表 4-1-2-5 の通り求めた。40 Gbit/s 伝送では、波長分散トレランスが 10 Gbit/s 伝送の 1/16 と厳しくなるため、分散補償量の可変ステップを小さくする必要がある。

表 4-1-2-5 可変分散補償モジュール 分散補償量目標値

	10 Gbit/s	40 Gbit/s	備考
分散スロープ可変範囲	-8~+8 ps/nm ²	-8~+8 ps/nm ²	・一次分散と独立に可変 ・個別チャンネル補償型の場合は本項目は規定不要
分散スロープ可変ステップ	< 4 ps/nm ²	< 0.3 ps/nm ²	
一次波長分散可変範囲	-400~+400 ps/nm	-400~+400 ps/nm	
一次波長分散可変ステップ	< 80 ps/nm	< 5 ps/nm	

②群遅延リップル

昨年度報告書においては、群遅延リップルの形状を正弦波と仮定し、群遅延リップルによる伝送波形劣化のシミュレーション結果から、群遅延リップルの目標特性を求めた。今回、国内全域にネットワークサイズを拡大したことによりモジュール透過段数が増大するため、群遅延リップルの目標値の見直しを行った。

昨年の伝送波形シミュレーション結果によると、システム全体で許容される群遅延リップルの振幅は、10 Gbit/s および 40 Gbit/s 信号光に対してそれぞれ +/-20 ps および +/-5 ps である。多段接続する各モジュールを透過する場合、群遅延リップルの現れ方（振幅、周期、位相）がノード毎にランダムに異なるため、リップル振幅は統計的に加算される。そのため、1つのモジュール（波長選択スイッチモジュール、可変分散補償モジュール）当たりの許容リップル振幅は下記のようになる。

$$[10 \text{ Gbit/s}] \quad +/-20 \text{ ps} \div \sqrt{(44+9)} = +/-2.7 \text{ ps}$$

$$[40 \text{ Gbit/s}] \quad +/-5 \text{ ps} \div \sqrt{(30+2)} = +/-0.9 \text{ ps}$$

③ 可変分散補償モジュール目標特性

表 4-1-2-6 に、昨年度および上記①～②の検討結果による可変波長分散補償モジュールの目標特性をまとめる。

表 4-1-2-6 可変波長分散補償モジュール 目標特性

項目	仕様値		備考
	10 Gbit/s 用	40 Gbit/s 用	
波長帯	CバンドもしくはL-band		
波長間隔	50 / 100 GHz	200 GHz	
波長数	80/40 ch	20 ch	
分散スロープ可変範囲	-8 ~ +8 ps/nm ²	-8 ~ +8 ps/nm ²	・一次分散と独立に可変 ・個別チャネル補償型の場合は本項目は規定不要
分散スロープ可変ステップ	< 4 ps/nm ²	< 0.3 ps/nm ²	
一次波長分散可変範囲	-400 ~ +400 ps/nm	-400 ~ +400 ps/nm	
一次波長分散可変ステップ	< 80 ps/nm	< 5 ps/nm	
透過帯域 (3dB down, 全幅)	> 40 GHz	> 95 GHz	4-1-2-2③参照
挿入損失	< 10 dB	< 10 dB	
群遅延リップル	< +/-2.7 ps	< +/-0.9 ps	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		波長選択スイッチと同時制御

4-1-2-4 偏波モード分散補償モジュールの目標特性

偏波モード分散モジュールは、偏波モード分散トレランスの厳しい 40 Gbit/s 伝送において必要になる。今年度は、特に偏波変動による偏波モード分散モジュールの応答速度に関して、実測に基づく検討を行った。

① 応答速度

偏波モード分散補償モジュールの高速応答に関しては、伝送経路切替への応答のみならず、高速偏波変動への追従性が要求される。高速偏波変動は、伝送システムが配置された局舎で、作業員がファイバの脱着作業の際にファイバコードに接触した場合に、最も高速の偏波変動が起きると考えられる。そこで、偏波モード分散補償モジュールの高速応答評価系を構築し、ファイバタッチによる偏波変動速度を測定した。

図 4-1-2-13 に、偏波モード分散補償モジュールの高速応答評価系を示す。偏波モード補償モジュールの前段に高速偏波スクランブラと PMD エミュレータ [1-5] を配置し、高速偏波変動を擬似的に作り出す。今回、ファイバタッチと、市販の高速偏波スクランブラ (アジレント社製 11896A) の偏波変動速度を測定した。図に示すように、波長可変光源 (TSL) からの光をファイバタッチや偏波スクランブラによって偏波を変化させ、ADC とパソコンを用いて、1/1000 秒ごとに偏光パラメータ (SOP) を収集する。SOP の変化から偏波変動の速度測定を行った。さらに、偏波スクランブラの代わりに 1m のファイバを振ったり (fiber shake)、短いファイバを用いて直径約 6 センチの円を作りそれを弾いたりして (fiber touch)、偏波変動の測定を行った。

実測による偏波変動角度対発生確率のヒストグラムの図 4-1-2-14 に、偏波変動速度の平均値を表 4-1-2-7 に示す。図中の scan1、4、8 は偏波スクランブラのスキャンレート設定を示す。ファイバタッチ等、ファイバに力が加わった場合、1 秒間にポアンカレ球を 4~5 回まわる位の偏波変動が生じることが分かった (ほぼスキャンレート 4 に相当)。よって、経路切替に追従するための速度が実現できれば、ほぼ偏波変動への追従も可能と考えられるため、偏波モード分散モジュールの応答速度の目標値を 1 msec 以下とした。

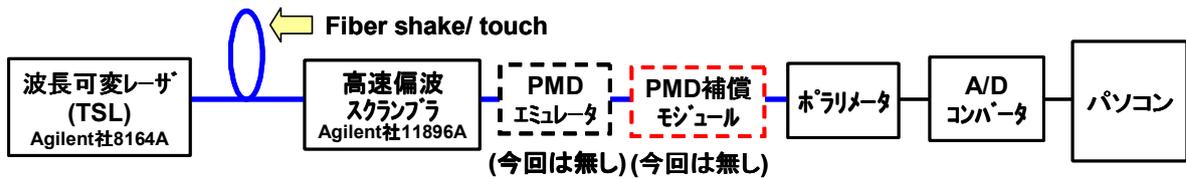


図 4-1-2-13 PMDC 高速応答評価系

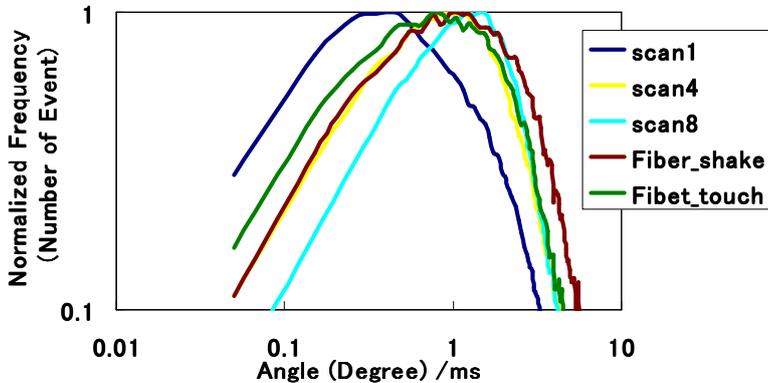


表 4-1-2-7 偏波変動速度測定結果

設定値	<速度>(degree/ms)
Scan 1	0.45
Scan4	0.95
Scan8	1.25
Fiber Shake	1.05
Fiber touch	0.75

図 4-1-2-14 偏波変動速度の度数分布

② 偏波モード分散モジュール目標特性

表 4-1-2-8 に、昨年度および①の検討結果による偏波モード分散補償モジュールの目標特性をまとめる。

表 4-1-2-8 偏波モード分散補償モジュール 目標特性

項目	仕様値	備考
	40 Gbit/s 用	
波長帯	CバンドもしくはL-band	
波長間隔	200 GHz	
波長数	20 ch	
DGD 補償範囲	0 ~ 28 ps	
挿入損失	< 10 dB	
PDL	< 0.3 dB	
応答速度	1 ms	

4-1-3 光ハブ用モニタ、制御系開発

光ハブ用モニタ・制御系開発として、今年度は特に、波長選択スイッチモジュールの自動フィードバック制御方式検討・動作確認のための制御回路の試作を行った。波長選択スイッチ(WSS)自動フィードバック系の構成を図 4-1-3-1 に、試作した WSS 制御回路の写真を図 4-1-3-2 に示す。WSS 自動フィードバック系は、任意波長の合分波及び光強度調整を行う波長選択スイッチ、波長毎の光強度を測定する光チャンネルモニタ(OCM: Optical Channel Monitor)、光信号の WSS 入力ポートを識別する Photo Diode Array (PD Array) から成る光モニタ系、光モニタ系の情報を基に波長選択スイッチの制御を行う今回試作の制御回路から構成されている。また、今回は、動作確認のため、RS-232 ケーブルを介しパソコンを用いて制御ボードのコントロールを行った。試作した WSS 制御回路は、波長選択スイッチにおける波長毎の光強度調整を行うため、まず、OCM 及び PD-Array から、DPRAM インターフェースを介して FPGA に光強度値を取得する。その際、PD-Array で受けた電流信号は、電圧信号に変換し、ローパスフィルタでノイズ除去を行い、A/D コンバータでデジタル信号に変換する。FPGA では、OCM で得られた光強度と所要の光強度との差分を波長

毎に計算し、DPRAM インターフェースを介して波長選択スイッチを制御する。今後、開発した波長選択スイッチを搭載して動作確認を行なう。

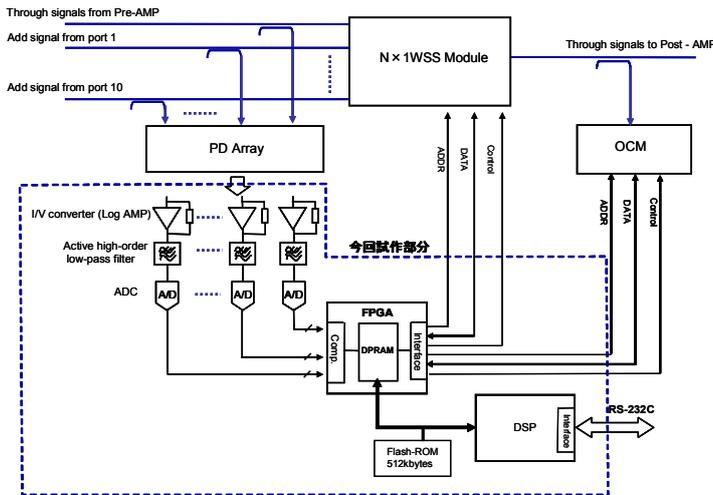


図 4-1-3-1 WSS 自動フィードバック制御系構成



図 4-1-3-2 WSS 制御回路試作品写真

4-1-4 光ハブ評価用テストベッド構築

光ハブ評価用テストベッド構築として、今年度は特に、各光モジュールの高速応答評価系の立ち上げを行った。本研究テーマでは、マイクロ秒～ミリ秒オーダーの高速動作で、経路切替、波形劣化補償を行う光ハブの実現を目指しており、その高速応答特性の評価が重要である。従来、光スイッチの高速応答特性評価として、一般的に光パワーの強度変化をオシロスコープで観測する方法が用いられているが、必ずしも光信号品質の時間変化を評価していない。さらに、可変波長分散補償モジュールの応答に関しては光パワーの変動を伴わないため、同方法が適用できない。そこで、今回、符号誤り数を利用することで、ダイレクトに各モジュール高速応答による信号品質変化を評価する実験系の構築を行った。

(なお、図 4-1-2-13 に示したように、偏波変動に対する偏波モード分散補償モジュールの高速応答評価系の構築も別途行った。)

高速応答評価系を図 4-1-4-1 に示す。被評価光モジュール (DUT) を模擬するために、今回は高速動作可能な市販の 1 波用光スイッチを配置した。光信号を受信後、誤り検出器のダイレクト出力機能からの信号をオシロスコープを用いて記録した。ダイレクト出力機能は、2.99 ns 周期で、エラー有無に応じて -1 V (エラー有)、0 V (エラー無) の電圧信号を出力する。また、比較のために、従来方法である光パワーレベルの高速変化も同時に測定した。

オシロスコープによる測定例を図 4-1-4-2 に示す。光スイッチ切替後、光レベルが低下し、ダイレクト出力信号がエラー無 (0V) からエラー有 (-1V) に変化していることが確認できる。さらに、オシロスコープに記録した測定データを解析した結果を図 4-1-4-3 に示す (縦軸は 200 ns 当りのエラー数)。エラーカウント評価系による応答速度は約 120 μ s となり、従来の光レベルモニタの約 140 μ s とほぼ同等の結果を得た。

以上より、エラーカウント評価により、従来の光パワーレベルモニタでは行うことのできなかった光信号品質の高速変化の検出が可能であることを確認した。

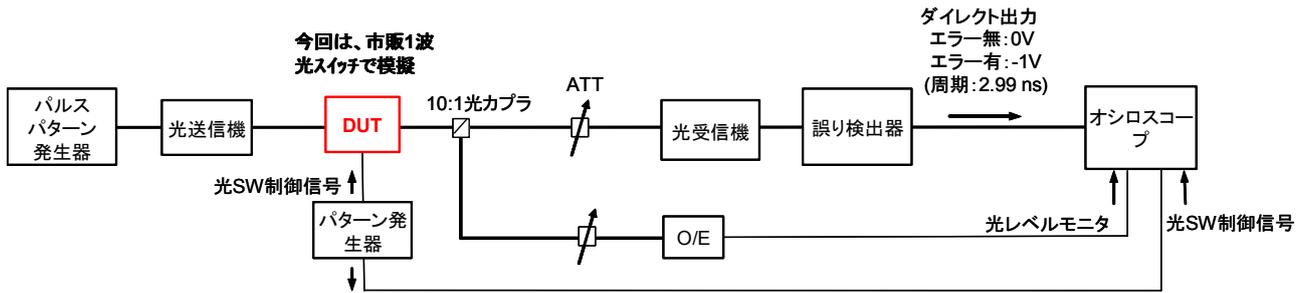


図 4-1-4-1 エラーカウント評価系

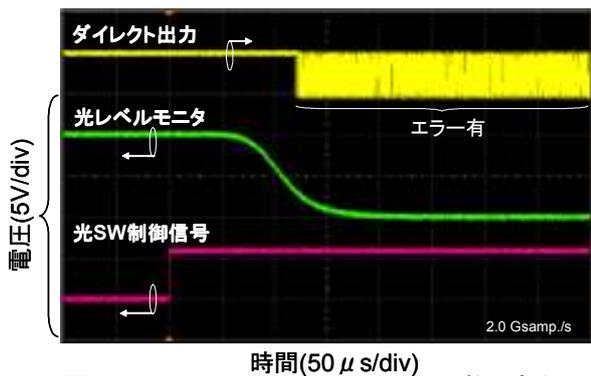


図 4-1-4-2 オシロスコープ測定例

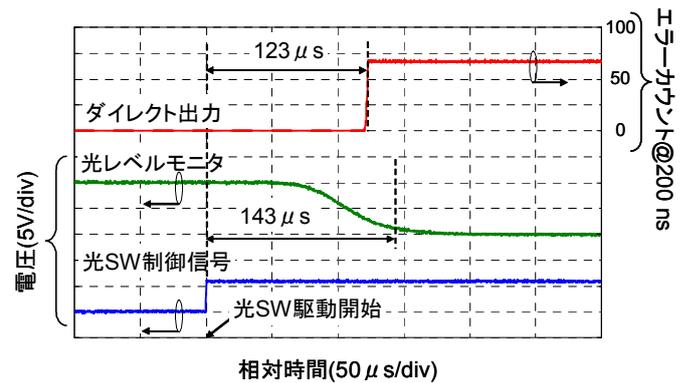


図 4-1-4-3 エラーカウント測定結果

4-1-5 まとめと今後の課題

各モジュール機能をインテグレートした光スイッチングノードサブシステムの実現に向け、今年度は昨年度に引き続き、各モジュール目標特性の明確化と、各モジュールのモニタ・制御系の開発、伝送テストベッド評価系構築の立ち上げを行った。

各モジュール目標特性検討に関しては、平成15年度に提示した目標特性一次案に加え、各モジュールの詳細仕様を明確化することで、各モジュール開発を促進した。特に、国内全域にわたってEnd-to-endで光レベル接続するネットワークモデルを想定し、各モジュールに対する要求特性（特に透過帯域幅、応答速度）の見直しを行った。

また、各モジュールのモニタ・制御系の開発に関して、今年度は、波長選択スイッチモジュールの制御系の試作を行った。

さらに、各光モジュールのシステム基本特性評価のため、40～80 km×40 スパン以上伝送可能な伝送テストベッド実験系の構築を行った。今年度は特に、各モジュールおよび光ハブのマイクロ秒～ミリ秒の高速応答特性を評価する系の構築を行った。

今後は下記の検討を進めていく。

①各モジュール伝送実験評価

各機能モジュールの伝送特性評価により、今年度提示した各モジュール仕様項目の影響を定量的に評価し、各モジュール開発へのフィードバックを行う。

②統合モニタ・制御系開発

各光モジュールごとのモニタ・制御方式を確立し、それら連携動作させるためのアルゴリズムの検討を行う。

③機能統合形態検討

各光モジュール開発における特性確保の状況を考慮した上で、それらを統合する光モジュールの形態を検討する。

参考文献

- [1-1] 渡辺 篤、岡本 聡、「オプティカルパスによる IP バックボーンネットワーク構成」、1999 年電子情報通信学会総合大会 B-10-118.
- [1-2] 矢島昇、友藤博朗、寺井昇、「富士通 FLASHWAVE 7500」、OPTRONICS、オプトロニクス社、No. 248 (2002 年 8 月)、pp. 158-161.
- [1-3] ITU-T Recommendation G.841, Types and characteristics of SDH networks protection architecture
- [1-4] Satoru Okamoto, Tomohiro Otani, Wataru Imajuku, Daisaku Shimazaki, Michiaki Hayashi, Kenichi Ogaki, M. Miyazawa, Itaru Nishioka, Mikako Nanba, Kazumasa Morita, Shinya Kano, Syoichiro Seno, Kazuhiko Sagara, Nahoko Arai, Hideki Ohtsuki, “Nationwide GMPLS Field Trial Using Different Types (MPLS/TDM/Lambda) of Switching Capable Equipment from Multiple Vendors”, OFC 2005, PDP40, Anaheim, 2005
- [1-5] Wenyu Zhao, Lan Wang, Hongxiang Wang, Yuefeng Ji, Jens C. Rasmussen, Hiroki Ooi, George Ishikawa, and Shinya Hasuo, “Crystal-Optical Higher-Order PMD-Emulator for 40 Gbit/s Systems”, OECC/IIOC 2001, ME-3, p. 45.

4-2 波長選択スイッチモジュールの研究開発

4-2-1 波長選択スイッチモジュール開発の概要

波長選択スイッチは波長分割多重された光(WDM 光)の経路を、波長成分ごとに切り替える機能モジュールであり、提案する光スイッチングノードの経路切り替え部に適用する。図 4-2-1-1 に示す機能ブロック図のように、WDM 光を分波する部分、分波した光の径路を切り替える光スイッチ部、分波した光を再び合波する部分と、光スイッチ部の制御部から構成される。16 年度は中間目標であるモジュール試作の実現に向け、15 年度決定の機能・仕様を基にし、基本設計と部材の絞込み、原理試作による確認をおこなった。

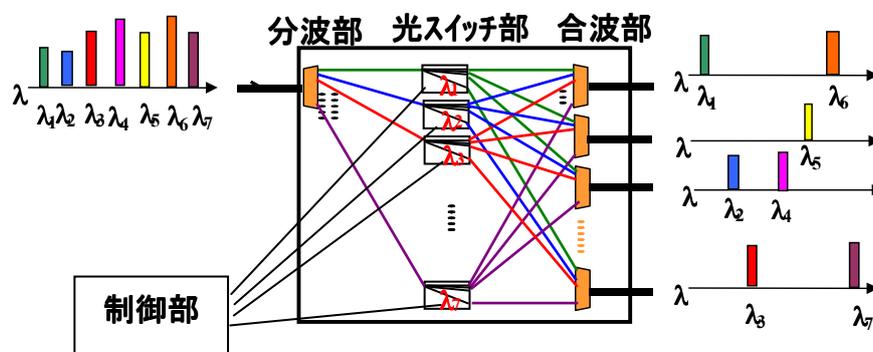


図 4-2-1-1 波長選択スイッチの機能ブロック

4-2-1-1 システム要求の整理

課題(ア)のサブシステムの検討から波長選択スイッチへ要求する機能・特性を下記に絞り込み、それらを実現すべく開発を進めている。

- ・機能： $1 \times N$ ($N \geq 4$) の光スイッチ、光パワーレベル調整機能

光ハブに必要とされる所要方路数の検討結果から、4 方路以上をカバーする光ハブが必要となることが判明し、 $1 \times N$ ($N \geq 4$) の波長選択スイッチを基本要素とした。また、様々な径路を通ってくる WDM 光の光パワーレベルを均一化するため、出力ファイバへの光結合効率を調整する光パワーレベル調整機能を集積化する事とした。

・特性

スイッチノードは多段で接続される事が前提であり、そのコア部となる波長選択スイッチには多段化に耐えうる特性が要求される。特に、挿入損失、透過帯域、動作速度は通過するノードが増加するたびに累積していくものであり、厳しい特性が要求される。以上の機能・特性をまとめたものを表 4-2-1-1 に示す。これら項目で、特に課題が大きいと考えている多ポート化、高速化、透過帯域の拡大を中心に波長選択スイッチモジュールの構成検討をおこなった結果を次節から説明する。

表 4-2-1-1 波長選択スイッチモジュール 主要目標特性

項目	仕様値	
	10 Gbit/s 用	40 Gbit/s 用
波長帯	C バンド(1531.90 - 1563.05 nm) もしくは L-band (1573.71 - 1606.60 nm)	
波長間隔	50 /100 GHz	200 GHz
波長数	80 /40 ch	20 ch
入出力ポート数	(a) 入力: 1、出力: N (N は 4 以上) (b) 入力: N、出力: 1 (N は 4 以上)	
透過帯域(3dB down、全幅)	>60 GHz	> 140 GHz
クロストーク	リニアクロストーク: < -25 dB コヒーレントクロストーク: < -44dB	
挿入損失	< 6 dB	
光パワー可変範囲	> 6 dB	
群遅延リップル	< +/-2.7 ps	< +/-0.9 ps
応答速度	< 3ms (制御時間含む)	

4-2-1-2 多ポート化に向けた課題

今年度は特に波長選択スイッチの入出力のポート数拡大(1×N、N×1 ; N≥4)を重要開発項目とし検討を進めた。図 4-2-1-2 に示す多ポート化時の構成に対し、以下に示す課題を抽出し、波長選択スイッチを構成する各部について、課題解決のための検討をおこなった。

- ①ポート毎に必要な分光素子の数の削減(コスト削減)
- ②狭ポート間ピッチで、低クロストークの光学系(小型化)
- ③光スイッチ光学系で切り替え可能なポート数の拡大
- ④ポートを横断する際のダイナミッククロストークの低減
- ⑤ポート数の増加により難易度があがった光実装の簡易化

分波部・合波部を構成する分光光学系は、高波長分解能力と低損失、低PDLを両立する分光素子の選択と、低ポート間クロストークを実現する分光光学系の設計技術を開発した。スイッチ光学系は、アナログ動作可能なスイッチングデバイスとして、MEMS(Microelectro Mechanical System)用いた可動ミラーを選択し、ポート数の拡大に向けてミラーの振り角度の拡大と、横断時のダイナミッククロストークを低減するためのシャッタ機能の集積化の開発をおこなった。以上二つの光学系のモジュール化に向け、小型・低損失を実現するための、光学解析/設計ツールを開発し、実装技術・制御技術の基本検討をおこなった。詳細を次節以降に示す。

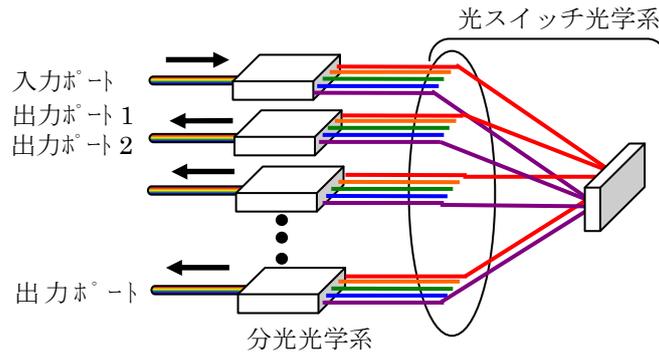


図 4-2-1-2 多ポート化時のスイッチ構成

4-2-1-3 切り替えの高速化に向けた課題

高速化には光スイッチ部の高速な動作が要求され、MEMS ミラーの高速応答と、高速な制御回路の実現が課題である。ミラーの高速応答は、共振周波数の高い MEMS の検討を、制御回路の高速化はインターフェースの高速化の検討をおこなった。

4-2-1-4 波長透過帯域の拡大に向けた課題

図 4-2-1-3 に示すよう、透過帯域はビームのサイズ(径)と MEMS ミラーのサイズで決まり、昨年度の検討で透過帯域の拡大にはミラー比率(ミラー幅/ミラーピッチ)の大きい MEMS ミラーが必要とし、新規構造の MEMS 開発を開始した。今年度はさらに光学設計・実装面から検討をおこなう。これに部材の精度、実装精度、温度変動等によるビームサイズ・位置のずれを考慮してミラーに当たるビーム径を決定する。

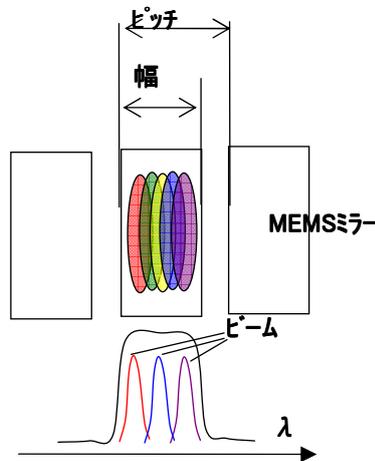


図 4-2-1-3 透過帯域の決定要因

4-2-2 小型分光光学系の開発

4-2-2-1 分光光学系の構成と要求、分光素子の選定

分光光学系は図 4-2-2-1 に示すように WDM 光を分解する分光素子と、各成分の光を平行にする集光レンズとから構成される。サイズは分光素子とレンズの距離 f_{sp} により決まり、小型化にはこの距離の縮小、つまり線分散能力 $(d\theta / d\lambda)$ の大きい分光素子の開発が必要となる。15 年度の検討では線分散量の大きい分光素子として空間型回折格子と、導波路型回折格子を選択し、試作・評価・課題抽出をおこなった。それぞれの回折格子を用いた波長選択スイッチの構成例を図 4-2-2-2 に示す。今年度はさらに最重要項目である多ポート化をキーワードに、この 2 種の回折格子を比較し、適用する候補を決定した。

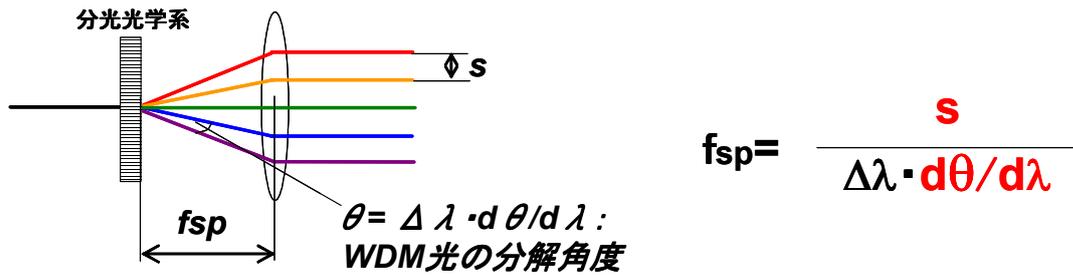
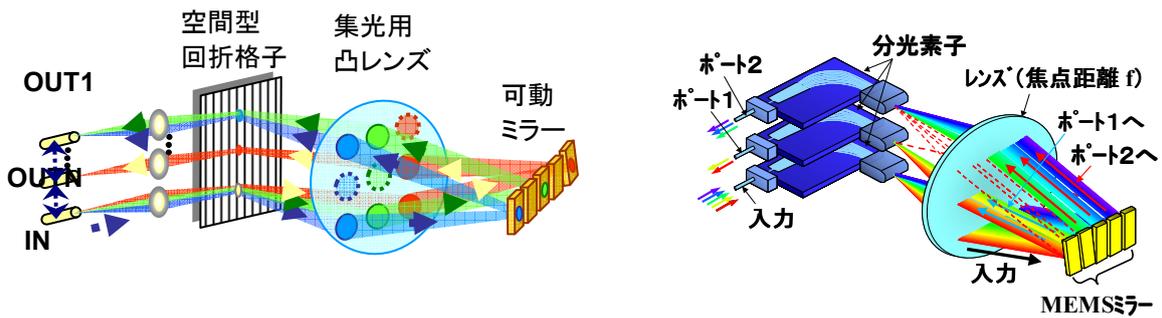


図 4-2-2-1 分光部の構成



(a) 空間型回折格子を用いたタイプ (b) 導波路型回折格子を用いたタイプ

図 4-2-2-2 多ポート波長選択スイッチの構成

前述したポート数拡大時の課題である必要な分光光学系の数の削減、狭ポート間ピッチで低クロストークの光学系、光実装の簡易化について、比較検討をおこなった。分光素子数の削減は各ポートでの共通化の可能性検討をおこない、サイズは大きくなるが1素子で全ポートをカバーできる空間型の回折格子が、N+1個の分光素子を必要とする導波路型より優れているとの結果が得られた。また、導波路型の多ポート化は、導波路型分光素子を多段に積み重ねていく構成となり、数 cm オーダの素子の高精度な6軸調整が必須となる。トレランス検討の結果から、分光した光の出射角のポート間バラツキを 0.001° のオーダであわせる必要がある事が判明し、導波路型採用の上での大きな判断ポイントとした。特性面では、PDL(偏波依存損失)を含んだ損失を中心に比較をおこなったが、特性面でも空間型開設格子の方が有利との結果が得られた。

以上のポイントを中心に空間型回折格子と、導波路型回折格子を比較した結果、本テーマでの波長選択スイッチは空間型回折格子を分光素子とした分光光学系を採用する事とした。次節で空間型回折格子に絞り込んだ詳細の検討をおこなう。

表 4-2-2-1 分光素子の比較

	回折格子型	導波路型
必要な分光素子数	1	N+1
実装性	○	× (導波路の6軸調整が必須)
挿入損失	1dB	3.6dB
偏波依存損失	0.5dB	0.5dB

4-2-2-2 回折格子の選定(各回折格子の調査・比較と候補の絞り込み)

波長選択スイッチモジュールに採用する分光素子を空間型回折格子に絞込み、さらに詳細の調査をおこなった。以下に示す回折格子について、波長選択スイッチへの適用性を調査した。

[1]反射型

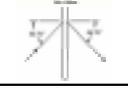
- ・Blaze 型： 溝の断面形状を鋸歯状に加工し、入射光と回折光が鏡面反射の関係となるように、溝の角度を形成することにより、特定次数に回折光パワーが集中させる回折格子。高い回折効率が得られるため、現状最も一般的に使用されている。
- ・Hologram 型： 光の干渉による干渉縞を感光剤に記録し、エッチングにより正弦波状の断面形状を得るタイプの回折格子。ブレイズ型と比較して、シャープな加工ができないため一般的に効率は劣るが、加工精度が高く迷光が少なくクロストーク特性に優れる。
- ・Echelle 型： 幅が広く浅い溝を持つ構成であり、45 度以上の入射角で溝の側面に対してほぼ垂直に入射されるように設計された回折格子。比較的高い回折次数(数十以上)で用いる。高線分散時のブレイズ角度は 65 度近辺となり、加工に課題。
- ・Grism 型： 回折格子にプリズムを貼り合わせた構成であり、分散角度を大きくとれる。

[2]透過型

- ・VPG 型： ホログラムの技術を用いて製作される透過型回折格子で、ゲル状の媒質の屈折率に周期的な変動を与えることにより位相差を産み出すもの。VPG を挟んだ入射角と出射角が一致する場合(Bragg 条件)に高効率の状態となる。
- ・E-VPG 型： VPG では、溝本数 600 本/mm 以上の空間周波数では、一般に高回折効率と低 PDL を両立させることができない。E-VPG は同課題を解消すべく開発された回折格子であり、溝本数 940 本/mm で約 95%の回折効率、0.1dB 程度の PDL を実現している。
- ・Grism 型： 透過型回折格子をプリズムで挟み、分散角を増大させる構成。

以上の回折格子について、高波長分解能力、低損失、低 PDL をキーワードにして、候補の絞り込みを進めた。その結果を表 4-2-2-2 に示す。波長分解能力を大きくできる領域では、入射角と出射角がほぼ同一となり、その切り分けに大きな課題が発生していたが、この問題の解決には、透過型の回折格子の適用が最適と判断し、その中でも高波長分解のための設計自由度が高い VPG(Volume Phase Grating)型を第一候補とした。その評価結果を図 4-2-2-3 に示す。損失、PDL 共に優れた値を得られている。

表 4-2-2-2 各種回折格子の比較

	構成	分散能力	回折損失	PDL	判定	条件、備考	
反射型	Blaze型		0.04deg/nm	0.9dB	< 0.2dB	△	溝本数: 600本/mm, 1次, Littrow配置
			0.08deg/nm	1.2dB	< 0.2dB	△	溝本数: 300本/mm, 3次, Littrow配置
	Hologram型		0.12deg/nm	0.6dB	< 0.25dB	○	溝本数: 1100本/mm, 1次, Littrow配置
	Echelle型		0.15deg/nm	1.6dB	< 0.3dB	△	溝本数: 52.67本/mm, 22次, Littrow配置
Grism型		0.36deg/nm	0.9dB (S偏光)	> 10dB	×	溝本数: 1800本/mm, Littrow配置, 回折損失とPDLがトレードオフ (低PDLのGratingを用いれば回折損失増)	
透過型	VPG型		0.04deg/nm	< 0.3dB (S偏光)	< 0.8dB	○	溝本数: 600本/mm, 1次, Bragg条件 回折損失とPDLがトレードオフ
			0.08deg/nm	< 0.3dB (S偏光)	< 5dB	×	溝本数: 900本/mm, 1次, Bragg条件 回折損失とPDLがトレードオフ
	E-VPG型 (Dickson型)		0.08deg/nm	< 0.3dB	< 0.25dB	○	溝本数: 940本/mm, Bragg条件
			0.18deg/nm	< 0.7dB	< 0.3dB	◎	溝本数: 1200本/mm, Bragg条件
	Grism型		0.3deg/nm	6.5dB	< 0.3dB	×	溝本数: 1852本/mm, Bragg条件 PDLを低減する場合、回折損失が増加
0.14deg/nm			slight degradation from <0.3dB	slight degradation from <0.25dB	○	E-VPG(940本/mm)利用, Bragg条件	

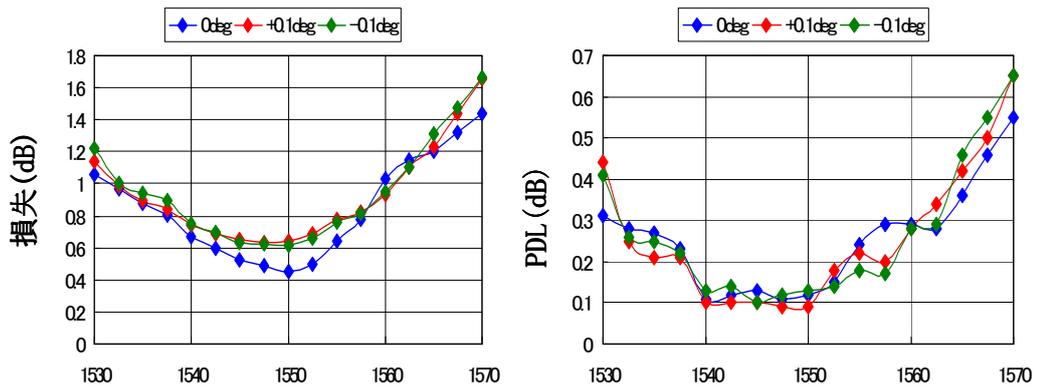
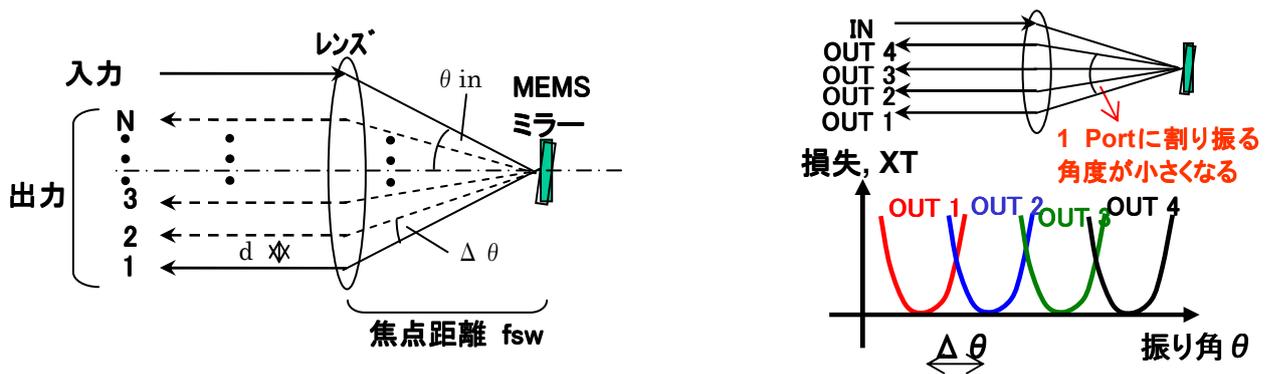


図 4-2-2-3 VPG の評価結果

4-2-3 スイッチ光学系の開発

4-2-3-1 スイッチ光学系の構成要求

15年度にスイッチ光学系の主要部はMEMSを用いた可動ミラーを選択したが、ポート数の拡大に向け、次の検討をおこなった。スイッチ光学系は図 4-2-3-1 に示すよう、レンズと MEMS ミラーより構成される。ポート数 N のスイッチを実現するため条件は、MEMS ミラーの回転角度 θ 、ポート間の分離に必要な回転角度を $\Delta\theta$ とすると $N=2\theta/\Delta\theta+1$ となる。ポート数の拡大には θ の拡大、 $\Delta\theta$ の縮小が必要である。VOA 機能はミラーの角度を最適値からずらす事で実現するため、目標の減衰量 6dB を得るためのオフセット量とポート間のクロストーク仕様を満たす角度の和が $\Delta\theta$ となる。 Δ 縮小についてはモジュール設計の部分で説明するとし、本節では、回転可能な角度を拡大できる MEMS ミラーの構造の検討結果を説明する。また、多ポート化においては、ポートを横断する際のダイナミッククロストークが課題なり、光スイッチ部へのシャッタ機能の付加を検討した。これは、これまで縦方向にのみ回転し、光の径路を切り替えていた MEMS ミラーを、横方向にも回転できるようにし、切り替え時に意図的にファイバに光が入らないようにする事で対応した。



(ア) スイッチ光学系の構成

(イ) ミラー回転角度の配分

図 4-2-3-1 スイッチ光学系の構成

4-2-3-2 MEMS ミラープロセスの改善

2004 年度は図 4-2-3-2 に示すような片持ちミラー構造による 1 次元ミラーアレイを提案し、以下の暫定スペックで 2 段エッチプロセスにより擬似ミラーアレイの原理試作を行った。

- ミラーサイズ $80 \times 100 \mu\text{m}$ (ビーム径 $15 \mu\text{m}$)、ピッチ $100 \mu\text{m}$ 、アレイ数 80 (又は 40)
- 共振周波数 30kHz、動作角度 ± 1.5 度

● 動作電圧 150V

スペックを満たすために必要なミラーの寸法を以下のように見積った。

- ミラー部の厚さ 20um
- 櫛歯長 200um、櫛歯幅 5um、ギャップ 4um
- トーションバー幅 3um、厚さ 2.5um

原理試作の結果、動作確認と所望の特性が得られたので、今年度は全チャンネル動作可能案ミラーアレイの試作を進めた。図 4-2-3-3 に設計したミラーアレイのマスクパターンを示す。バンプによる配線基板との導通については、導通歩留りを考慮して 100um ピッチとはせず、200um 千鳥とした。

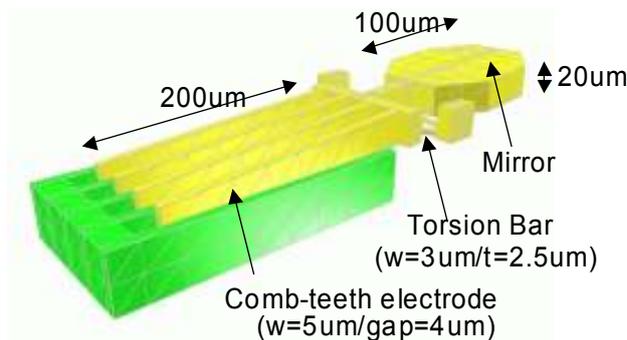


図 4-2-3-2 提案した片持ちミラー構造

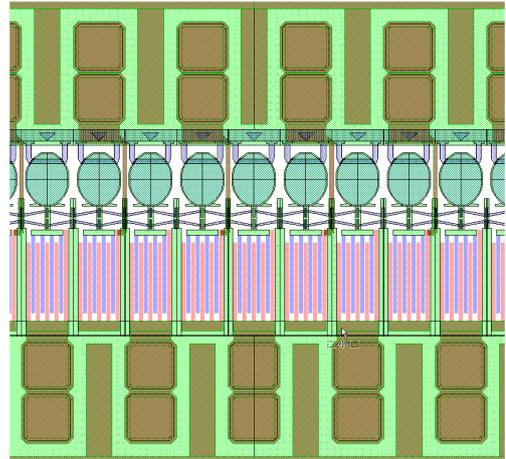


図 4-2-3-3 設計したミラーアレイ

4-2-3-3 新プロセスによるミラーの試作

原理試作ではプロセス面での問題点として、2.5um と薄いトーションバーの作製が困難で DRIE の分布精度では、所望のトーションバー厚をもったチップを 1 ウェーハから数個しか取得できないという問題があったため、動作率の向上は非常に困難であると予想された。そこで、トーションバーの膜厚制御性を向上させるべく、Poly-Si をトーションバーとして用い、Epi-Si をミラー・櫛歯電極に用いる新プロセスを開発した。このプロセスを用いて作製したミラーの形状を図 4-2-3-4 に示す。問題無い形状が得られた。ミラーの表面状態を光干渉法により測定した。図 4-2-3-5 に示すとおり、30nm 程度以下のミラー平面度が確認された。

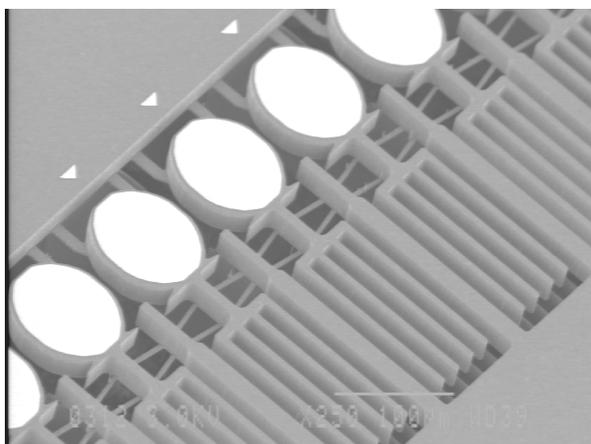


図 4-2-3-4 試作したミラーチップ(表)

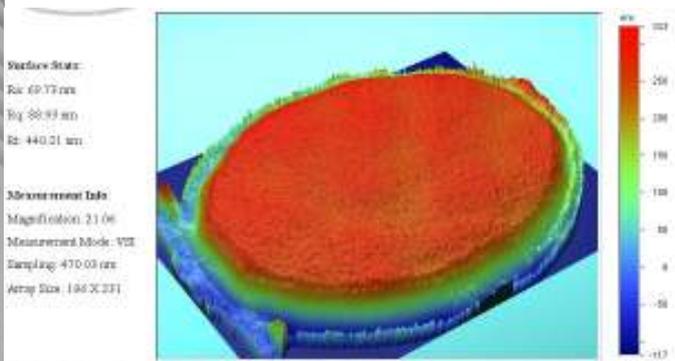


図 4-2-3-5 試作したミラーの表面形状

4-2-3-3 試作ミラーの評価結果

3台試作し、動作ミラー数は81/83(#1-1)、82/83(#1-2)、82/83(#1-3)と良好な結果が得られた。図4-2-3-6に共振周波数の測定結果(ヒストグラム)を示す。共振周波数は約25kHzでバラツキがチップ内10%程度であった。旧プロセスに比べると良好な特性均一性が得られた。また、図4-2-3-7にV- θ 特性を示す。200Vで1.6°とシミュレーションの見込みよりも特性が思わしくないのは、裏の櫛歯細りが原因と考えられる。

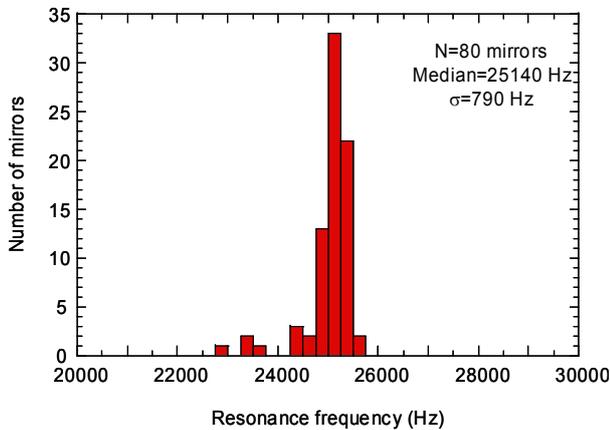


図4-2-3-6 WSS#1-2の共振周波数分布図。

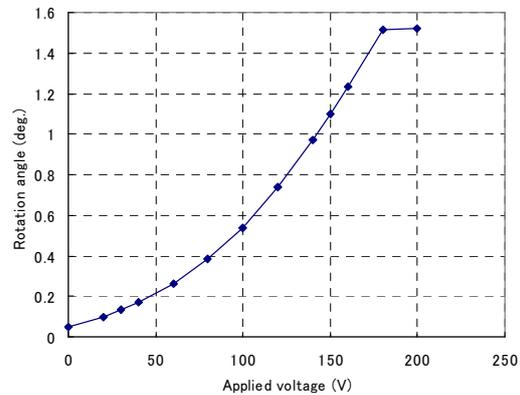


図4-2-3-7 WSS#1-3のV- θ 特性

4-2-3-4 ポート数拡大に向けたMEMSミラーの改良検討

試作したモジュール実験の結果を踏まえ、ポート数拡大のためのMEMSミラーの検討を進めた。ポート数を大きくするには、MEMSミラーの回転角の増大と、ポート間の間隔の縮小が課題だが、MEMSミラーの回転角の増大にはミラー駆動力の増加が必要となり、櫛歯電極の本数の増加すなわち、ミラーピッチを増やす事が一つの答えになる。また、ポート間の間隔の縮小には、クロストークの低減が必要となり、ビーム径の拡大が一つの答えになる。以上の2点共に、ミラーピッチの増大が答えであるが、これはスイッチサイズの大規模化につながる。実現可能なポート数と、トレードオフの関係にあるスイッチサイズ、ミラー回転角、ポート間クロストークの検討をおこない、MEMSミラーの改良設計を進めた。

MEMSミラーは、動作角度目標を6度以上に設定して検討を進めた。シャッタ機能の実現に向けては、シャッタ素子を別途付加する、1対のミラーアレイでビーム走査する、2軸に可動なミラーアレイでビーム走査するという3つの方法を比較検討した。検討の結果、

1軸方式は、

- MEMSの構造・プロセスは容易 ---利点
- 入射角小および1対ミラーの光学系確保のためミラーを著しく長くする必要あり
- 折り返しミラーの高精度実装が必要
- X+X式はシャッタ機能が実現困難

という特徴がある。一方で2軸方式は、これら得失が逆転しており、結論としてMEMSの設計難易度は高いが、WSSモジュールの実現に有利な2軸ミラーアレイを選択した。2軸ミラーアレイによりシンプルかつ小型なモジュールを構成することが可能になる。X軸回転(縦スキャン)によりスイッチ動作、Y軸回転(横スキャン)によりVOA動作とシャッタ機能を実現可能となる。

4-2-3-5 動作角度増の検討

波長選択スイッチのような狭ピッチで、高いミラー比率が必要とされる用途には、原理試作同様に片持ちミラー構造の採用が最適と考えられる。既に述べたようにWSSモジュール

ル用ミラーにはアレイ方向(x 軸)を回転軸とする方向に大角度動作が必要とされる。そこで狭ピッチミラーアレイの動作角度増について検討を行った。

垂直櫛歯構造では位置ズレ起因の横ぶれによる Pull-in により動作角度上限が決まる。これを理解するために原理試作の V- θ 特性 (シミュレーション) を示す。両面アライメントの位置ズレなど製造工程におけるバラツキを加味して上下櫛歯のズレを 2.5 μm とおくと、図 4-2-3-8 に示すように、 $\theta=3.7^\circ$ 以上で横ぶれ Δx が許容値を超え Pull-in を発生してしまい、 4° 弱が限界であることが確認できる。(元々 3° 持てば良いという設計なので妥当ではある) つまり WSS のような狭ピッチミラーアレイでは、要求値 6° 実現は困難であった。これに加えて、ミラー展開方向のミラー面振れ(y 軸回りの回転)が、図 4-2-3-9 に示すように 3° 動作時に約 0.08° あり、無視できないレベルで発生することが判明した。面ぶれは隣接チャンネルのアイソレーションを低下させるため 1 軸動作の懸念点として挙げられる。

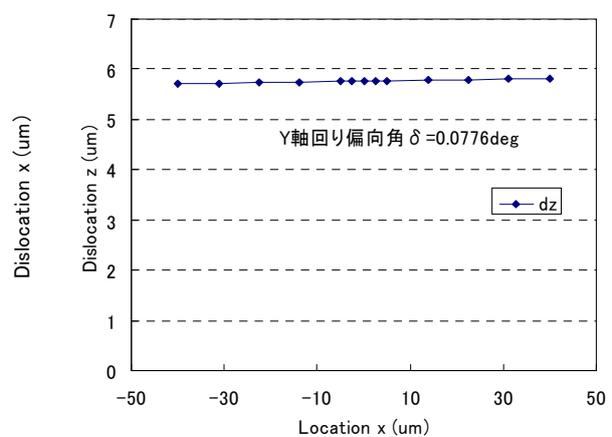
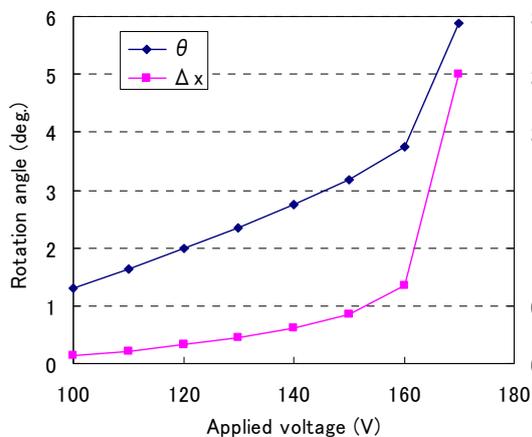


図 4-2-3-8 原理試作での V- θ (ワースケース) 図 4-2-3-9 原理試作での面振れ見積もり結果

片持ちミラー構造の動作角度増加の方向性として、アンバランスな力のキャンセル構造を検討した結果、垂直櫛歯の方向を変え魚の骨のように回転軸(x)と並行に配置した形態のモデルを提案した。この構造によれば位置ズレによる櫛歯に働く横ぶれの力は左右同レベルに発生するためキャンセルさせ、z 軸まわりの回転モーメントを殆ど発生しないため、大角度動作が期待できる。櫛歯電極同士の機械的干渉を避けるため、櫛歯間のギャップを広くする必要がある。新構造に対応したミラー設計として、横型櫛歯(魚骨状)の最適化を行った。図 4-2-3-10 に横型櫛歯の断面モデル図を示す。上下櫛歯間に電位差を与えると上部可動櫛歯が回転しながら沈みこんでくる。この際、電極は元の位置に比べ、内側に $y_i = (R - hm) * (1 - \cos\theta)$ 、外側に y_o だけせり出すことになる。 y_o は櫛歯表面なので実際問題になるのは下部電極上端面 (埋め込み酸化膜付近) におけるせり出し $y_o' = R * (\frac{1}{\cos\theta} - 1)$ である。

最大 6° 回転したときの各電極がせり出し量 $+5\mu\text{m}$ として、ギャップを求めた。図 4-2-3-11 に設計したミラー構造を示す。比較のため、図 4-2-3-12 に示すよう、同様寸法にて垂直櫛歯の最適化構造を設計した。櫛歯を 2 段構造にして先端側を短く $150\mu\text{m}$ 、回転軸側を $200\mu\text{m}$ とすることで櫛歯電極の曲がりのバランス点を見つけた。トーションバーの付け根のミラー部分を幅太く、トーションバー間隔を広くすることで横ぶれを最大限抑制する構造にすると、動作角度を $4\sim 5^\circ$ 程度にまで動作範囲を拡大できた。

以上の 2 種類の動作シミュレーション結果を図 4-2-3-13 に示す。横型櫛歯ミラーは 7° まで動作し垂直櫛歯と遜色ない駆動力を有していることが確認できた。最適化された垂直櫛歯ミラーも 5° までは動作したがそれ以上では Pull-in してしまうため、動作マージン

が不足している。また、トーションバーのストレスが大きいいため強度が心配される。大角度動作には横型櫛歯(魚骨状)ミラーが適当であるということが確認できた。

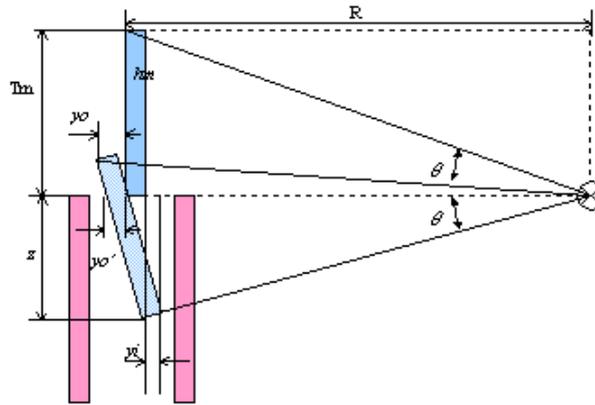


図 4-2-3-10 横型櫛歯の断面モデル図

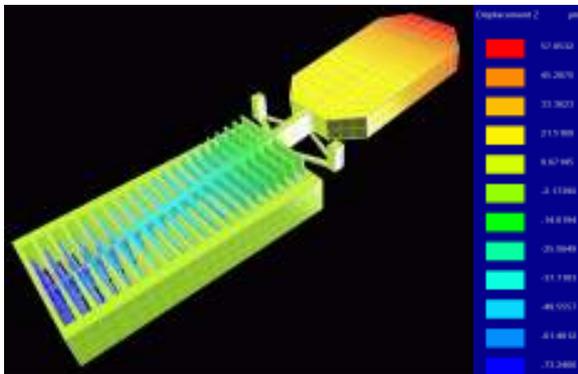


図 4-2-3-11 設計した横型櫛歯ミラー構造

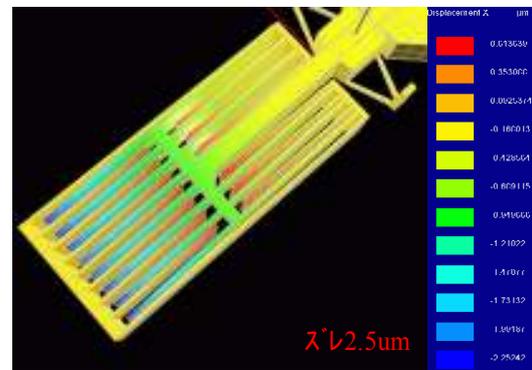


図 4-2-3-12 設計した垂直櫛歯ミラー構造

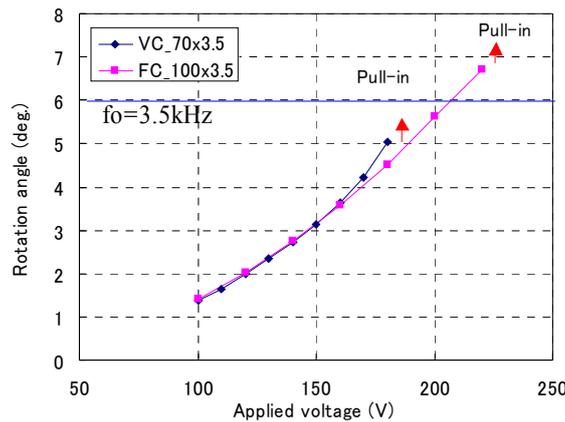


図 4-2-3-13 設計した横型櫛歯ミラーおよび垂直櫛歯ミラーの特性

4-2-3-6 2軸動作ミラーの構成検討

続いて2軸化のために必要な可動フレームについて検討・設計を行った。図 4-2-3-14 に可動フレーム構造案を示す。図中、緑青黄色の部分为上層 Si(活性層)による部分、赤色が下層 Si(支持基板)による部分である。ここで考慮しないとイケないのは、ミラーの開口率を 80%確保することが必須なので、ピッチの残り 20%の中に、

- フレーム(幅を wf)を2本、
- ミラーとフレームの間隔(S_{mf} とおく)を2本
- フレーム間隔(S_{ff} とおく)を1本

を確保する必要があることである(図 4-2-3-15 を参照)。非常に狭いエリアにこれらを配置するだけでなく、フレームの強度、フレームとミラーあるいはフレーム同士の動作クリアランスを確保しなければいけない。図 4-2-3-14 の中では右端に示した下層 Si によりフレームを形成する方法が、ミラーとフレーム間隔 S_{mf} を小さく詰めることができ、その分フレーム幅 wf を確保しやすいので最良と判断した。電極の引き出し自由度も高いが、フレームに駆動電位を印加するためフレーム間のクロストークが懸念事項である。

内x軸(片持ち)/外y軸(片持ち)

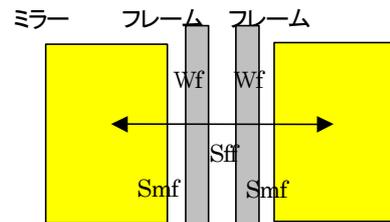
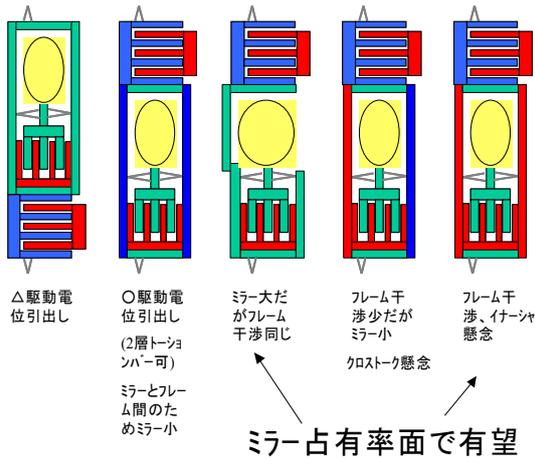


図 4-2-3-14 狭ピッチミラーレイのフレーム構造案

図 4-2-3-15 可動フレームとミラーの位置関係

4-2-4 モジュール化開発

4-2-4-1 モジュール化の課題

波長選択スイッチは分光光学系とスイッチ光学系から構成され、その二つの光学系を組み合わせてモジュール化するにあたり、広い波長透過帯域、ポート数の拡大、低損失、高安定を目標として、光学設計技術、実装技術、制御技術の検討を進めた。

・波長透過帯域設計

MEMS ミラーのアレイ方向に分光された光がミラーに入射する時、ミラーの有る箇所は波長の光だけ反射してくる。その反射してくる領域の波長だけがスイッチを透過し、帯域となる。帯域の拡大に対し、MEMS ミラーへ入射するビームに対するミラーの面積を増やすべく、ミラー比率の大きい新規構造の MEMS ミラーを開発した。ここではモジュール化を考慮した帯域設計をおこなう。

MEMS ミラーへ入射するビームのサイズが設計値より大きくなると、実効的にミラー比率が減少し、透過帯域の絶対値は減少する。ビームサイズは、ビームウェストの位置の MEMS ミラーからのずれ(実装時のずれ)、レンズの特性バラツキ、収差による絶対値のずれ等により影響を受ける。また、MEMS ミラーへ入射するビームの位置ずれは、波長のずれとなり、波長がずれた量だけ帯域は減少することになる。実際のモジュールでは、各光学部品の実装ずれ、温度変動による位置ずれ等によりビームの位置ずれが発生し、帯域劣化の要因となる。以上を図 4-2-4-1 にまとめ、設計例を表 4-2-4-1 に示す。ミラー比率と各劣化要因を詳細検討し、部品仕様、実装仕様を決定する。

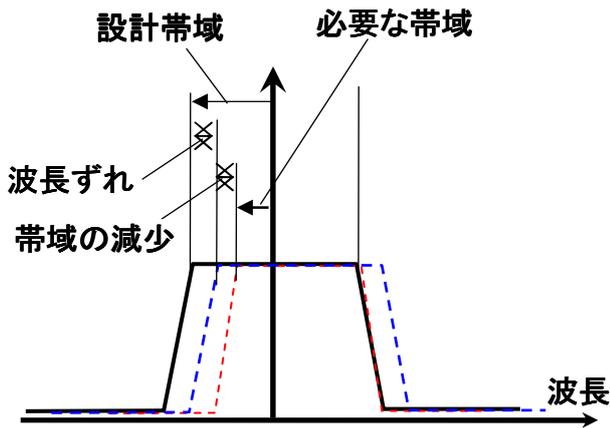


図 4-2-4-1 帯域の設計

		透過帯域 (半幅)
絶対値(設計帯域)		36.5 GHz
帯域減少	ミズ収差	2 GHz
	実装ずれ	1 GHz
波長ずれ	実装ずれ	1 GHz
	回折格子歪特	2 GHz
	筐体温特	0.5 GHz
必要な帯域		30 GHz

表 4-2-4-1 透過帯域の設計例

・多ポート化設計

ポート数が増加するほど、ポート間の間隔が増大するほど大きな MEMS ミラーの回転角を要求する。そのため、有限な回転角度でポート数を拡大するには、間隔の縮小が必要であるが、縮小はポート間クロストークの増加につながる。今回の開発ではミラーの傾きを最適点からずらす事で VOA 機能を実現しているため、クロストークの増加がより顕著になって現れる)。この問題を解決するには、図 4-2-4-2 に示すようにビーム径を大きく設計する事で広がり角の縮小を図り、隣接ポートへのクロストークを低減する事で対応できるが、前述の透過帯域議論に従うと、ビーム径/ミラー比率の縮小、すなわち透過帯域の縮小につながる。このトレードオフを解決するため、MEMS ミラーに当たるビームの楕円化(縦方向は大きく、横方向は小さくする)を図った。

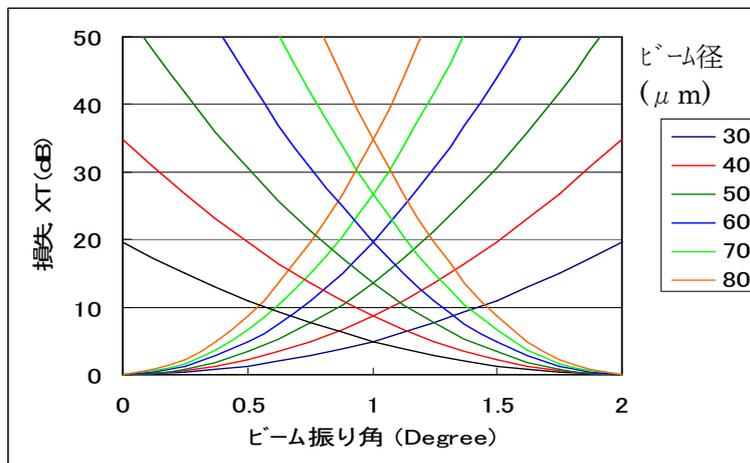


図 4-2-4-2 クロストークとビーム径の関係

4-2-4-2 光学設計技術

以上に示したよう、分光光学系、スイッチ光学系の異なる光学系の接続、楕円光学系の採用、位置ずれによる透過帯域への影響を考慮して低損失の光学系を設計する必要がある。また、光路の長さも往復で 130 mm と非常に長い、信号光が通過する光部品が 11 個((コリメートレンズ、シリンダリカルレンズ×2、回折格子、集光レンズ)が往復で×2、MEMS ミラー)と多い空間光学系となる。このような複雑な光学系において、最適設計をおこなうには、光学設計ツールの使用が不可欠となる。今回の開発では市販の光学解析ソフト(CODE V)を用いた設計ツールを立上げ、試作モジュールの設計をおこなった。図 4-2-4-3 に設計例

を示す。

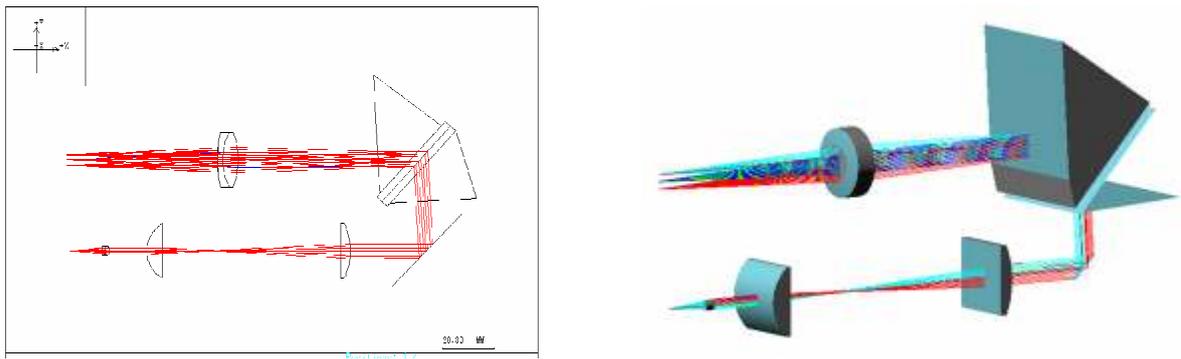


図 4-2-4-3 設計例

4-2-4-3 原理試作による確認

以上、これまで検討してきた技術を確認するため、光学部材を簡易実装した原理試作をおこなった。その結果を図 4-2-4-4 に示す。



図 4-2-4-4 原理試作の結果

4-2-4-4 モジュール構造の検討(実装技術開発)

原理試作において抽出した課題を元に、モジュール構造の検討を進めた。長い光路長でも小型化可能なよう、凹面鏡を用いた集光部と、反射鏡により、折り返し型の構造を検討した。拡大光学系をアナモルフィックプリズムとし、光路長の短縮を図った。光学モジュールの形状も正方形に近くなり、温度変動、外部からの振動に対し、特性の安定化も図る事ができる。また、特性の安定化のため、外部の振動を除去する防振構造を付加する事とした。モジュール構造を図 4-2-4-4 に示す。

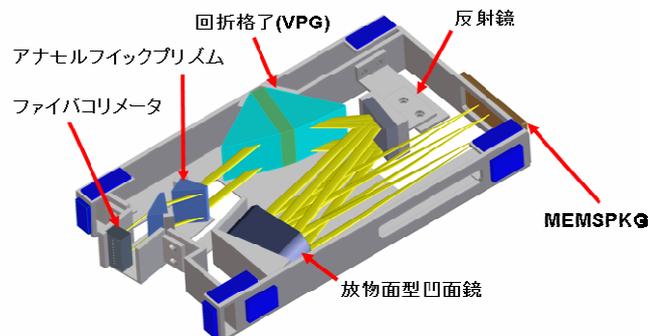


図 4-2-4-4 波長選択スイッチモジュール(光学部)の構造図

4-2-4-5 制御部の開発

高速な制御のために、インターフェースの高速化と、制御回路の高速化が課題となる。まず高速のインターフェースの検討から開始した。波長選択スイッチモジュールは図4-2-4-6に示すようにDPRAM (Dual Port RAM)、制御回路、スイッチファブリックから構成され、以下の動作を行う。

- ①ホストコントローラが各チャンネルの切替情報、光減衰量を DPRAM に設定する
- ②ホストコントローラが切替開始信号を制御回路に送信する
- ③制御回路が①で設定された情報を DPRAM から読み出す
- ④制御回路は③の情報をもとに MEMS 駆動電圧を計算し、MEMS ミラーを駆動する
- ⑤制御回路が制御終了信号をホストコントローラに送信する

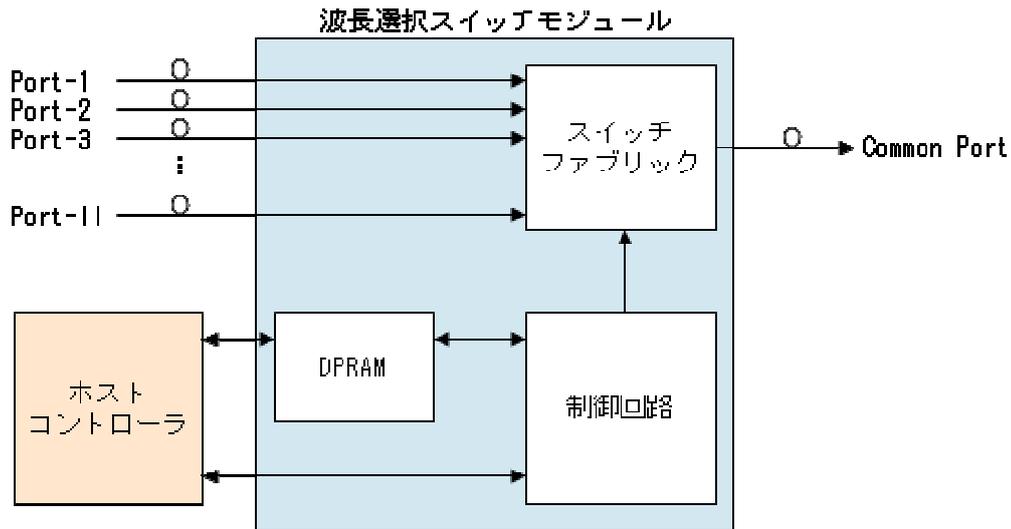


図 4-2-4-5 波長選択スイッチモジュールブロック図

4-2-5 まとめと今後の課題

16年度は中間目標の達成に向け、1×4の波長選択スイッチモジュールを実現すべく、コア部品の詳細検討、光学系設計技術の開発を進め、スイッチ構造と適用する部品の仕様・構造を決定した。

分光光学系は今回の開発の最重要項目である多ポート化の観点から回折格子型と導波路型を比較・検討し、-40dB以下のクロストークを実現でき、実装性の点からコスト面で優れた回折格子型が最適な解との結論を得た。種々の回折格子の比較検討を進め、小型化の観点から、0.18 deg/nmと反射型の3倍の分散能力を持ち、低損失と低PDL特性を兼ね備える過型回折格子が最適と判断した。

MEMSを用いた可動ミラーを選択したスイッチ光学系は、ポート数の拡大に向け、回転角を拡大可能なミラー構成の検討を進めた。その結果、新規の櫛歯構造を開発し、目標の6°以上の回転角を実現した。また、ポート間を横断して切り替えをおこなった場合の動的なクロストークの回避策として、シャッタ機能を付加するため、横方向の回転も可能とする2軸駆動型のMEMSミラー構造の設計を進めた。

モジュール化開発は、低損失の波長選択スイッチモジュール実現のため、分光光学系とスイッチ光学系を最適の状況で結合可能とできる光学設計ツールの開発を進めた。市販の光学解析ソフト(CODE V)を用い、分光・スイッチ光学系の設計技術の確立から、光学モジュール部の設計・試作をおこなった。また、特性の安定化のため、外部の振動を除去する防振構造の設計と、温度変動に強い構造と材料を明確化した。

今後の課題として、今年度設計を開始した2軸MEMSミラーの試作、光学部材を選択し、設計を進めた波長選択スイッチモジュール光学部の試作、制御回路の試作をおこない、波長選択スイッチモジュールの試作を進める。

4-3 波長分散補償モジュールの研究開発

4-3-1 波長分散補償モジュール開発の概要

4-3-1-1 開発の位置付けと目標

波長選択スイッチにて構成される光ハブを開発し、メトロコアシステムを経済的に実現する全体テーマにおいて、本副課題では光経路の切替に伴う広範な波長分散の変化を高速に補償する可変波長分散補償器の開発を目的とする。今年度、副課題アにより検討、更新された諸特性の目標値を表 4-3-1-1 に再掲する。

表 4-3-1-1 可変波長分散補償モジュール 目標特性

項目	仕様値		備考
	10 Gbit/s用	40 Gbit/s用	
波長帯	Cバンドもしくは L-band		
波長間隔	50 / 100 GHz	200 GHz	
波長数	80/40 ch	20 ch	
分散スロープ可変範囲	-8 ~ +8 ps/nm ² 中心 : 0 ps/nm ²	-8 ~ +8 ps/nm ² 中心 : 0 ps/nm ²	一次分散と独立に可変
分散スロープ可変ステップ	< 4 ps/nm ²	< 0.3 ps/nm ²	
一次波長分散可変範囲	-400 ~ +400 ps/nm	-400 ~ +400 ps/nm	
一次波長分散可変ステップ	< 80 ps/nm	< 5 ps/nm	
透過帯域(3dB down, 全幅)	> 40 GHz	> 95 GHz	
挿入損失	< 10 dB	< 10 dB	
群遅延リップル	< +/-2.7 ps	< +/-0.9 ps	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		

4-3-1-2 波長分散補償器の基本構成

昨年度、対象とするメトロコア網の構成に着目し、異なる経路による波長分散量を経済的に補償する構造として、①個別チャネル補償導波路型、②分散スロープ補償導波路型、③個別チャネル補償マイクロオプティクス型の3つについて、具体的構成の考案とその特性予測を行った。

導波路型①②については、構造の基本となるリング導波路の周回損失を、目標の波長間隔実現に必要な高屈折率差を有する導波路では達成が困難と考えられる 0.1dB/周末満としても、目標の透過帯域、補償量、群遅延リップルを同時に満足することが難しいことが判明した。

一方、個別チャネル補償マイクロオプティクス型③については、図 4-3-1-1 に示す VIPA 可変分散補償器、波長選択スイッチの光学系を応用した構造を考案した。

本波長分散補償器は当社開発済の VIPA 可変波長分散補償器と分散補償原理は同じであり、アレイ化された MEMS ミラーを用いた光学系を波長分散補償光学系の前段に構成することにより、個別チャネル毎に補償量を独立に設定できる様にしたものである。本構成にて隣接するチャネルの補償量を連続的に変化させることにより、分散スロープ補償も実現できる。

その個別チャネル毎の補償特性は、実現されている VIPA 可変分散補償器の特性から、目標を満足する可能性が高く、今年度の開発は本構成についての詳細検討を優先した。

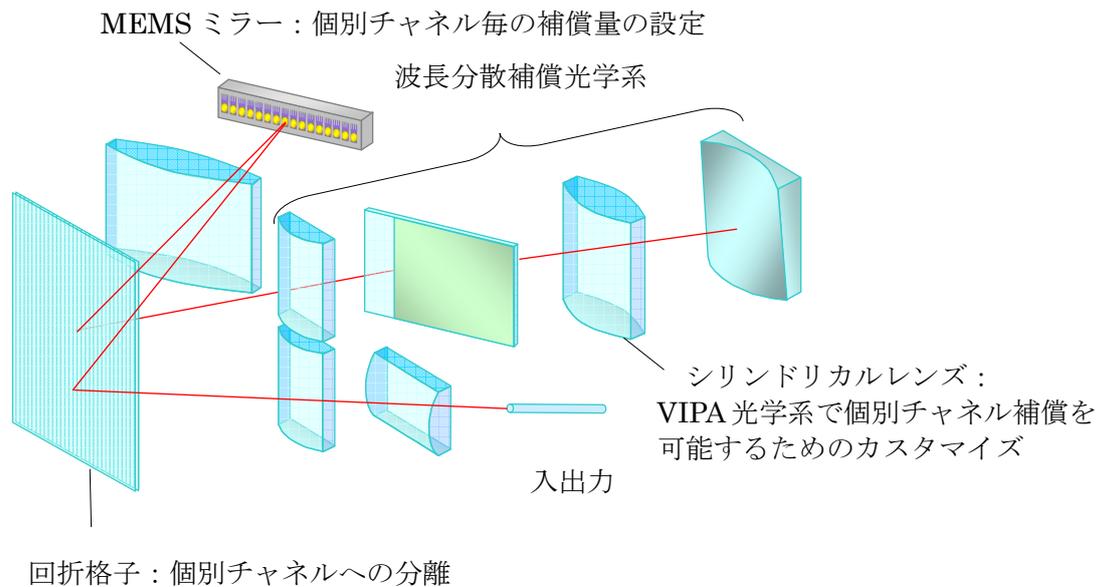


図 4-3-1-1 個別チャンネル補償マイクロオプティクス型波長分散補償器

4-3-2 光学系の開発

4-3-2-1 開発・検討の内容

本構成は昨年度報告の通り、VIPA 光学系からなる波長分散補償部において VIPA 板と補償量を決定する自由曲面ミラーとの間の焦点レンズを、シリンドリカルレンズにカスタマイズしている。このカスタマイズが、MEMS ミラーで設定されたチャンネル毎に異なる VIPA 入力位置を、3D ミラー上の異なる位置に反映させ、チャンネル個別の補償を可能にするポイントである。このカスタマイズによる影響の有無を実験とシミュレーションにて検討した。

4-3-2-2 原理実験

分散補償部となる VIPA 光学部の実験系を図 4-3-2-1 に示す。シリンドリカルレンズでの補償光学系の透過特性を図 4-3-2-2、その群遅延特性を図 4-3-2-3 に示す。

本測定では、10GHz と 40GHz の双方を予測するべく、VIPA 板は FSR が 150GHz 間隔のものを用い、3D ミラー上でのスポットサイズは $50\mu\text{m}$ 程度に設定した。図中の群遅延特性の変化は、3D ミラー位置は固定で、VIPA 入力に対するコリメータの移動量 (0mm, 2mm) の変化に対応する。

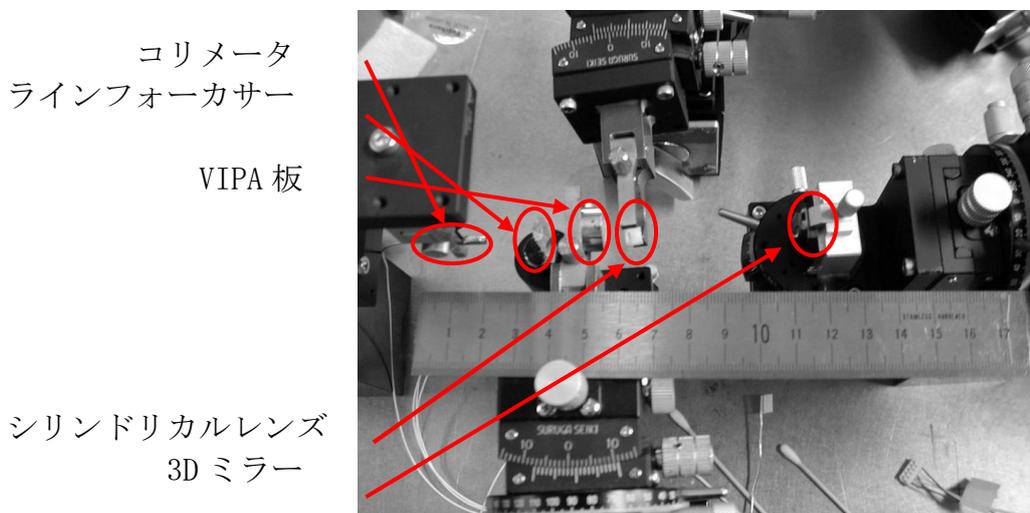


図 4-3-2-1 分散補償部原理実験系

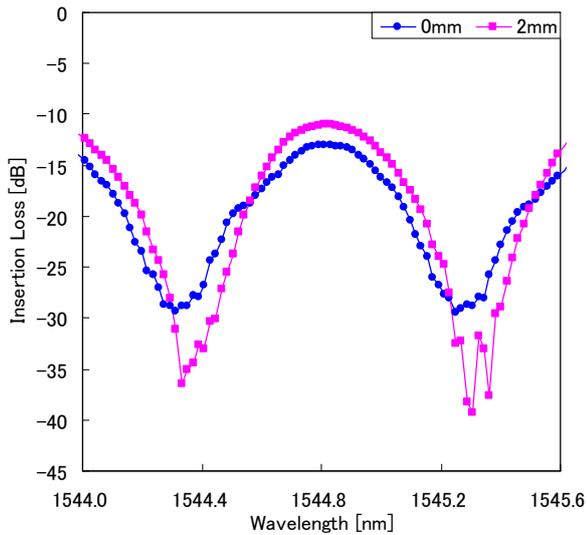


図 4-3-2-2 シリンドリカルレンズでの透過特性

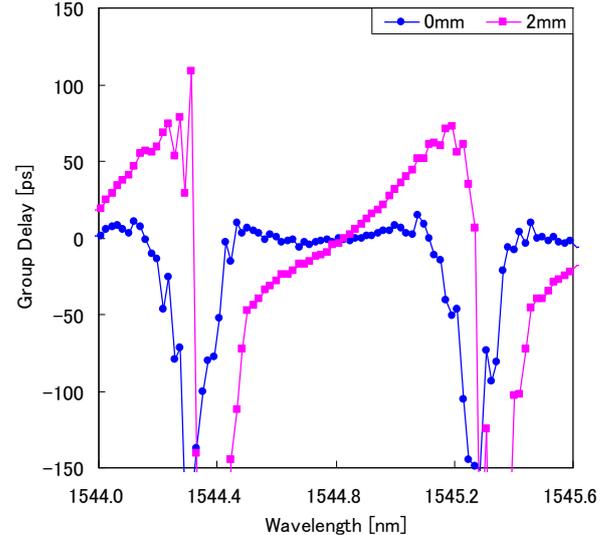


図 4-3-2-3 シリンドリカルレンズでの群遅延特性

本測定結果より、シリンドリカルレンズにカスタマイズした VIPA 光学系においても、補償量を可変にできることを確認できた。また当初の目論見どおり、透過特性も補償量にほぼ依存せず、3dB 帯域に関しても 40GHz (0.32nm) 以上確保でき、選択した構造が多段化耐力確保に有利であることも確認できた。

4-3-2-3 シミュレーションによる検証

本方式は図 4-3-2-4 に示すように、シリンドリカルレンズに変更した事により、各波長ビームの補償量可変方向（スロープ発生方向）は集光されず、ほぼ VIPA 板に入力されたビーム幅で 3D ミラーに達する。VIPA 補償光学系において、3D ミラー上の異なる位置は、異なる群遅延量（分散補償量）に対応しているため、この事は一つの波長が異なる遅延量の分布をもって補償器から出力される事を意味する。原理実験での透過特性、群遅延特性において、特に問題は発見されなかったが、透過特性、群遅延特性では時間方向について平均化されている可能性があり、この影響を以下の手順でモデル化し、伝送波形シミュレーションによる検証を試みた。

まず、M 系列 (Maximum length code) を用いて擬似ランダム符号列をつくり、伝送波波形 $T(t)$ を発生させる。次に、光伝搬に伴う位相変化 $\Phi(\omega)$ を、 ω_0 を中心にテーラー展開し、分散に寄与する 2 次の項に着眼した $\Phi_2(\omega - \omega_0)$ を $\exp(i\Phi_2(\omega - \omega_0))$ とし、これにフーリエ変換した伝送波波形 $F(T(t))$ をかけ、逆フーリエ変換することによって、波形劣化を表現する。

VIPA 光学系の伝達関数 $VIPA(\omega)$ は、ミラー上の集光ビームがスロープ発生方向にガウス分布をもって集光されていると仮定し、ミラー上の各位置でのガウス分布に従う振幅を持った光が波長分散を発生し、複数の分散が合成されるモデルとする。この伝達関数を用い、ビーム径をパラメータとして、4-3-2-1 式で表せる分散補償シミュレーションを行う。

$$F^1[F(T(t)) \exp(i\Phi_2(\omega - \omega_0)) VIPA(\omega)] \quad 4-3-2-1 \text{ 式}$$

一例として、伝送速度 40Gb/s でのビーム径 50 μm でのシミュレーション結果を図 4-3-2-5、ビーム径 1800 μm でのシミュレーション結果を図 4-3-2-6 に示す。

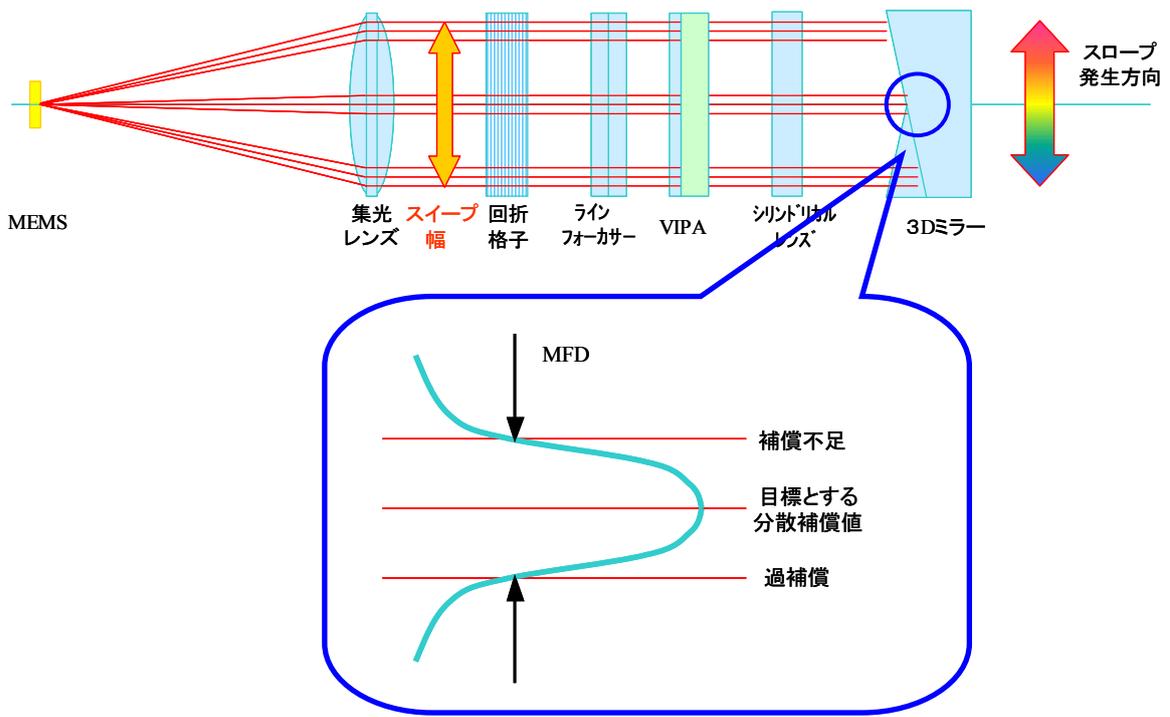


図 4-3-2-4 シリンジカルレンズ化による影響

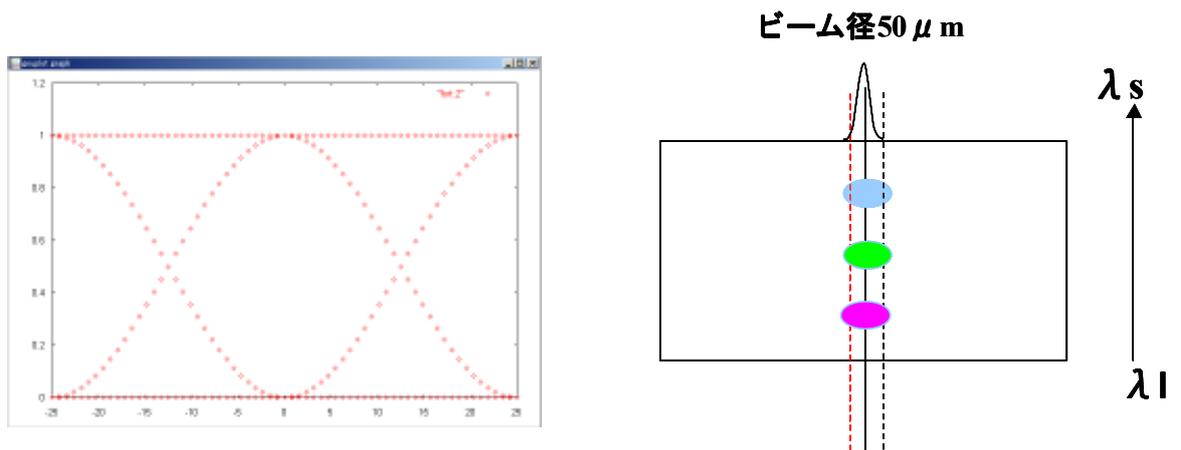


図 4-3-2-5 3D ミラー上ビーム径 50 μm での伝送波形

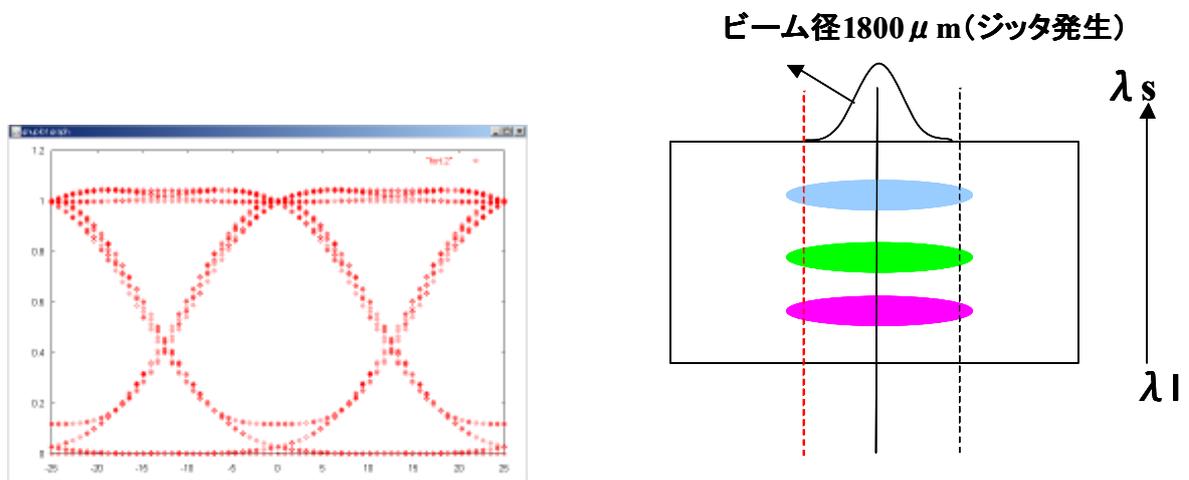


図 4-3-2-6 3D ミラー上ビーム径 1800 μm での伝送波形

本シミュレーションにより、3D ミラー上 (=VIPA 光学系入力部) のビーム径が大きくなると、ジッタの発生が見られることが判った。

上記の結果は、VIPA 補償光学系と MEMS ミラーを用いた補償量設定部との接続において、補償量設定部のビームサイズへの新たな設計上の制限要因となる。

本制限に対して、今後、副課題アと連携し、ビットエラーレートでの許容量の判定を進める予定である。

4-3-3 補償量可変機能の開発

前節までの設計要因を考慮し、MEMS ミラーを用いた波長分散補償量の設定部と、シリンダリカルレンズを用いた VIPA 補償光学系との統合動作確認用の一次試作を行った。

図 4-3-3-1 に一次試作モジュールを示す。本試作では 100GHz 間隔とした。MEMS ミラー振り角 1 度での補償特性を図 4-3-3-2 に示す。これにより 120ps/nm の補償量の変化を確認した。これは、可変分散スロープ量としては、短波長側の分散量と長波長側の分散量との差が 120ps/nm とできることから、Cバンド全域において 3.4ps/nm² (=120ps/nm ÷ 35nm) の補償量に相当する。

補償特性におけるリップルは、主に現状の挿入損失 (30dB 程度) が大きいことによる測定ノイズの影響である。今後の統合モジュールにおける実装上の優先課題は、低損失化である。

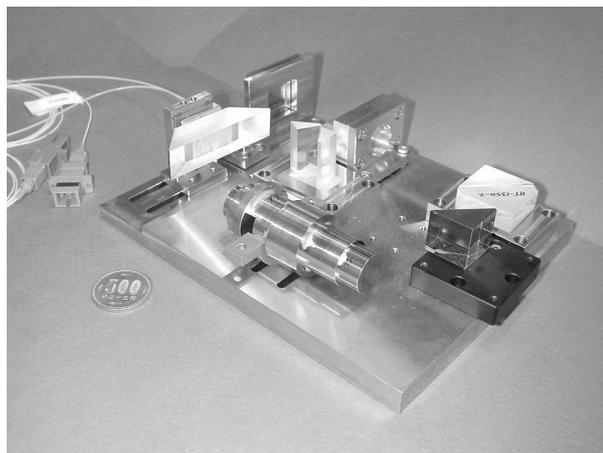


図 4-3-3-1 Ch by Ch 波長分散補償器一次試作モジュール

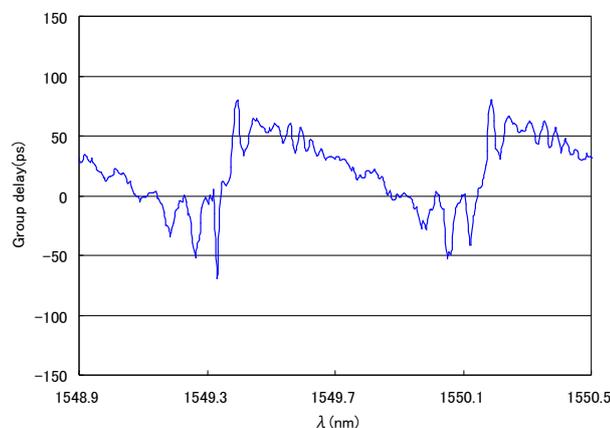


図 4-3-3-2 一次試作モジュール補償特性

4-3-4 スロープモニタ及び制御技術の開発

経路情報に基づく上位レイヤからの制御に関し、デバイスの駆動精度の観点から検討を進めた。検討の基礎となる値は目標特性における、一次波長分散可変ステップ、及び波長分散スロープ可変ステップである。このステップ値に対して VIPA 光学系と MEMS ミラーを用いた本構成では、40Gb/s の波長分散可変ステップが本構成において最も厳しい条件となる。

スロープ可変 ($\pm 8\text{ps}/\text{nm}^2 \times 17.5\text{nm}$) と一次分散 ($\pm 400\text{ps}/\text{nm}$) を両立独立に設定するための分散可変量 $-540 \sim +540 \text{ps}/\text{nm}$ を満足し、40Gb/s での波長可変ステップ $5\text{ps}/\text{nm}$ を満足するためには、216 個以上の制御値が必要となる。MEMS を用いた本構成では、MEMS の振り角を 216 以上に分割することで対応が可能である。

現在、12～16 ビットの D/A コンバータが商用化されており入手可能であることから、可動範囲に対して、4095～65535 ($2^{12} \sim 2^{16} - 1$) 個の精度で分割が可能であり、本構成ではデバイス上実現の可能性が高い。

直接モニタ方式については、論文を中心に調査を進めている。今後はこれらの方式に対して、副課題アと連携し伝送フォーマット依存性の有無、経路切替、伝送路の環境変動への追従性、検出精度等の性能面、小型化、集積化等の経済性の両面から課題を抽出、詳細比較を進める。

4-3-5 まとめと今後の課題

本年度は、MEMS ミラーによるチャネル個別の補償量設定を行うためのカスタマイズが施された VIPA 補償光学系について、原理実験、シミュレーションにより補償特性向上のための課題を明確にした。更に MEMS を用いた可変補償動作の原理確認用一次試作を行い、一チャネル当り $120\text{ps}/\text{nm}$ の分散可変量 (Cバンド全域において $3.4\text{ps}/\text{nm}^2$ の可変分散スロープ補償量に相当) を得た。制御モニタに関しては、経路情報に基づく上位レイヤからの制御については、補償精度の検討を進め、直接モニタ方式については文献調査を進めた。

今後は、補償器開発に関して上記方式の改善検討を進めると共に、本格的な事業化に向け小型・低コストの観点のもと、他の分散補償技術の進歩も踏まえ、他方式を含めた比較検討を再度行う予定である。

制御モニタ開発に関しては、経路情報に基づく制御での分散補償の精度を実験により検証する。本検証結果をもとに、伝送速度、環境温度等の変化による補償精度、モジュール規模等について、直接モニタ方式との比較・選考を行う。

4-4 偏波モード分散補償モジュールの研究開発（副課題エ）

4-4-1 偏波モード分散補償モジュール開発の概要

本副課題エでは、偏波モード分散補償モジュールを構成する3つの要素デバイス（偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ）の開発を行い（図4-4-1-1参照）、アダプティブな制御も含めた機能集積化し、モジュールの小型化、低コスト化を進める。

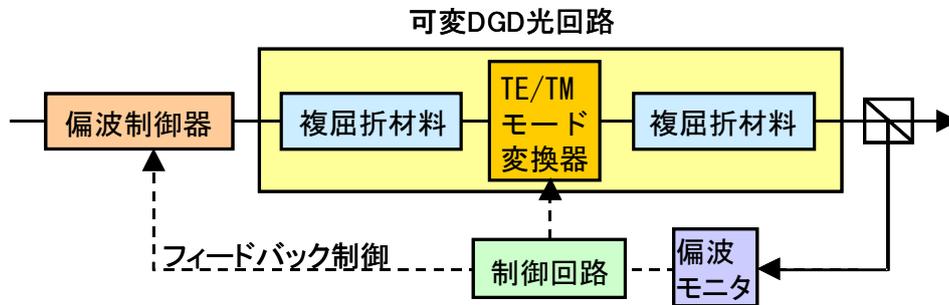


図 4-4-1-1 偏波モード分散補償モジュールの構成図

平成16年度は、中間目標である1波長分の基本構成について、副課題アでの検討結果である表4-4-1-1に示す目標特性を達成するモジュールの実現に向けて、各要素デバイスの検討を行った。

偏波制御器および可変DGD光回路については、それぞれパッケージへの実装を行い、モジュール評価を行うとともに、目標特性との比較検討を行った。

また、偏波モニタについては、平成15年度に試作したものと市販品との特性の比較・検討を行った。

表 4-4-1-1 偏波モード分散補償モジュール 目標特性

項目	仕様値
波長帯	Cバンド(1531.90 - 1563.05 nm) もしくは Lバンド (1573.71 - 1606.60 nm)
波長間隔	200 GHz
波長数	20 ch
DGD 補償範囲	0 ~ 28 ps
挿入損失	< 10 dB
PDL	< 0.3 dB
応答速度	1 ms

4-4-2 偏波制御器の開発

偏波制御器について、平成15年度にチップでの評価を行ったLiNbO3結晶を用いた8ステージの図4-4-2-1に示す構成の偏波制御器をパッケージに搭載し、モジュール化を行った。図4-4-2-2にモジュール概観図を示す。

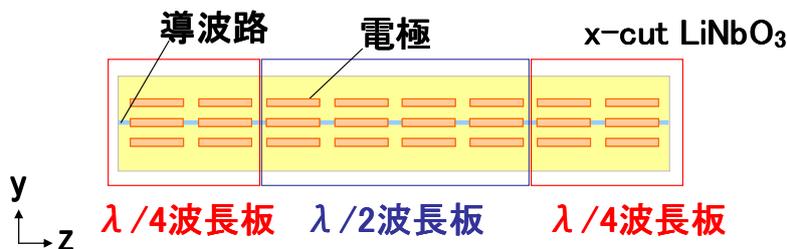


図 4-4-2-1 Z 伝搬偏波制御器のチップ構造

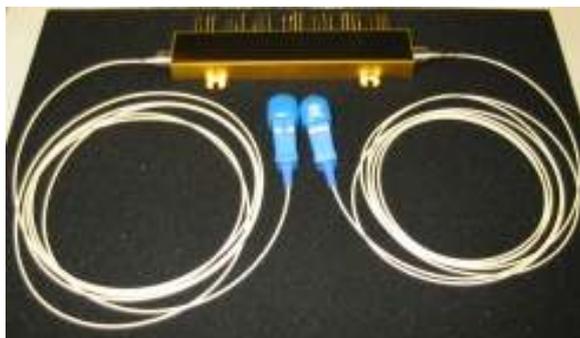


図 4-4-2-2 偏波制御器モジュール

モジュールでの特性評価を行い、挿入損失は 2.4 dB、偏波依存性損失 (PDL) は 0.2 dB であった。また、図 4-4-2-3 に示すように、ポアンカレ球状に円弧を描いており、偏波制御がうまくできていることがわかる。このとき、駆動電圧 20 V 以下、応答速度 1 μ s 以下とチップと同等の特性が得られた。これらの特性は、目標特性(表 4-4-1-1)を十分に満足している。また、導波路構造である為、最終目標の 10ch アレイ化は容易であると考えられる。

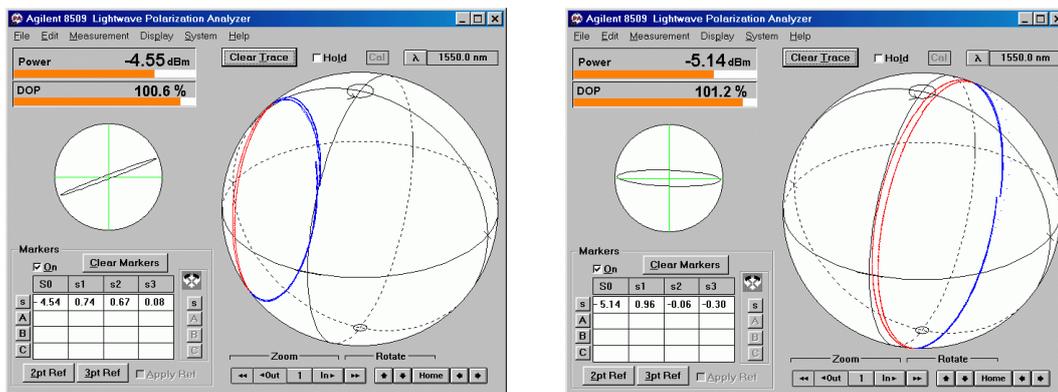


図 4-4-2-3 偏波制御器モジュールの特性

4-4-3 可変 DGD 光回路の開発

可変 DGD 光回路については、昨年度検討した LiNbO₃ 結晶を用いた図 4-4-3-1 に示す構成、及び、磁気光学結晶を用いた図 4-4-3-2 に示す構成の双方についてモジュールの試作を行った。モジュールの写真を図 4-4-3-3 に示す。特に、M0 型の寸法は、42×24×12mm と小型に作製することができた。

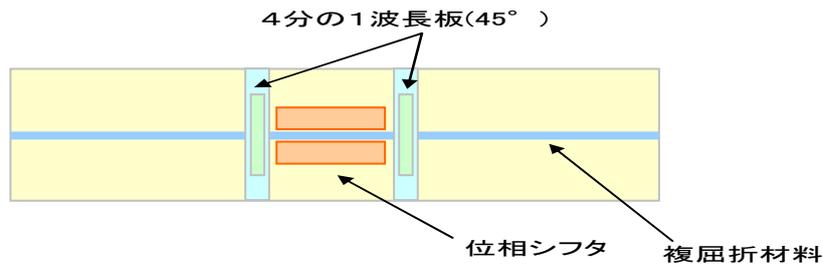


図4-4-3-1 EO型可変DGD光回路の構成

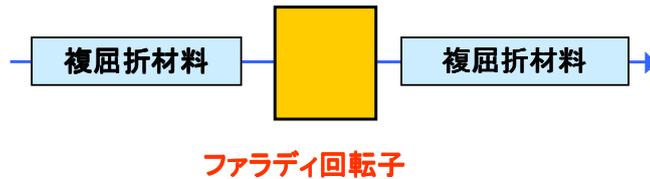


図4-4-3-2 MO型可変DGD光回路の構成



(a)EO型



(b)MO型

図4-4-3-3 可変DGD光回路モジュール

静特性は、EO型が、挿入損失は5.5 dB、PDLは0.4 dB、MO型は、挿入損失は、0.6 dB、PDLは0.1 dBであった。また、DGD特性の評価を行い、両者ともDGD可変幅0~20 ps、応答時間250 μ s以下とチップ特性と同等の特性を確認した。また、MO型に関して、0~40°CでのDGD量の温度特性の評価を行い、図4-4-3-4に示すように温度依存性の小さいことを確認した。これらの特性が、目標特性に対する検討を行った。挿入損失については、前節の偏波制御器を含めて、目標特性を満足しているが、PDLについては、EO型の方は、満たしておらず、MO型の方は、上限値となっている。また、DGD可変幅については、目標値(28 ps)を満たしていないが、これは、複屈折材料部の長さを調整することにより満足できる。このように特性の点では、MO型の方が優位であると考えられる。しかし、最終目標である10chアレイ化を考えた場合、EO型は、導波路構造である為、アレイ化が容易であるのに対して、MO型は、これ以上の小型化については、困難であると考えられる。そこで、特性の点と、機能集積化・アレイ化の点で優位な構成が異なり、来年度、継続して構成の絞込みを行うこととした。

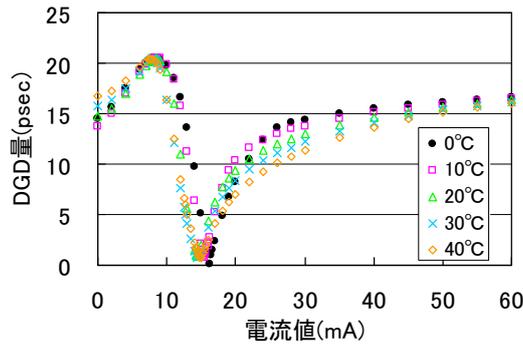


図4-4-3-4 M0型可変DGD光回路モジュールの温度特性

4-4-4 偏波モニタの開発

偏波モニタについては、国内外の動向調査を行い、昨年度試作した偏波モニタと市販の偏波モニタとの比較を行った。偏波モニタとしては、主に3社から市販されており、表4-4-4-1にそれらの特性を示す。

A、B社の偏波モニタは、InLine型となっており、可変DGDの後で、カップラで分岐する必要がないという特長がある。また、B、C社の偏波モニタは大きく、最終目標の10chアレイ化を考えると、適さないと考えられる。また、A社のものは、DOP精度が±2%と大きく、PMDCの制御には不十分である。それに対して、当社の昨年度試作した偏波モニタは、InLine型ではないものの、小型で、DOP精度もよく、目標特性を十分満足していると考えられる。引き続き、動向調査を行うが、現状では、当社のモニタが優位であると考えている。

表 4-4-4-1 偏波モニタの比較

メーカー名	A社	B社	C社	当社
	In-line	In-line		
大きさ	39.1×20.3×18.0	(2 slots)	257×102×360	25×20×8
挿入損失	0.8 dB (Typ.) 1.2 dB (Max.)	0.5 dB (Max.)	—	—
入力光強度	-23~7 dBm	-40~+13 dBm	0~20 dBm	
SOP 精度	1% max.	±0.25°		
DOP 精度	±2% max.	±0.25%		±0.35%
速度		1 MS/s	10 S/s	
測定帯域	700 kHz			100 kHz

4-4-5 まとめと今後の課題

偏波モード分散補償モジュールを構成する要素デバイス(偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ)の1波長分の基本構成について所要の性能(10μs以下の応答時間とシステム要求を満たす偏波モード分散補償特性)の達成を目指し検討を進めた。

LiNbO3結晶を用いた構成の偏波制御器のモジュール化を行い、基本特性はチップと同等の特性(駆動電圧20V以下、応答時間1μs以下)を確認し、本方式の有効性を明らかにした。

可変 DGD 光回路については、2つの構成のモジュールを試作・評価し、チップ特性と同等の特性(DGD 可変幅 0~20 ps、応答時間 250 μ s 以下)を確認するとともに、温度特性についても問題ないことを確認した。また、特性と、機能集積化・アレイ化の点で優位な構成が異なり、継続して構成の絞込みを行うこととした。

偏波モニタについては、国内外の動向調査を行い、昨年度試作した偏波モニタとの比較・検討を行い、昨年度試作した構成が特性的に優位であることがわかった。

今後、中間目標である1波長分の基本構成について、各要素デバイスの目標特性を達成するとともに、最終目標である10chの機能集積、アレイ化の開発を進めていく。

4-5 総括

17年度の中間目標であるに向け、各モジュール(波長選択スイッチモジュール、可変分散補償モジュール、偏波モード分散モジュールの実現とそれらを組み合わせた光スイッチングノードサブシステムの動作検証に向け、各副課題の検討を進めた。

副課題アでは、平成15年度に提示した目標特性一次案に加え、国内全域にわたって End-to-end で光レベル接続するネットワークモデルを想定した要求特性(透過帯域幅、補償量、クロストーク、群遅延リップル、応答速度等)を導出し、各モジュールの詳細仕様を明確化し、各モジュール開発を促進した。また、各モジュールのモニタ・制御系の開発に関して、今年度は、波長選択スイッチモジュールの制御系の試作を行った。さらに、各光モジュールのシステム基本特性評価のため、40~80 km \times 40 スパン以上伝送可能な伝送テストベッド実験系の構築を行った。今年度は特に、各モジュールおよび光ハブサブシステムのマイクロ秒~ミリ秒の高速応答特性を評価する系の構築を行った。

副課題イでは、1 \times 4の波長選択スイッチモジュールを実現すべく、コア部品の詳細検討、光学系設計技術の開発を進め、スイッチ構造と適用する部品の仕様・構造を決定した。分光光学系は多ポート化の観点から比較検討をおこない、透過型回折格子が最適と判断した。MEMSを用いた可動ミラーを選択したスイッチ光学系は、ポート数の拡大に向け、新規の櫛歯構造と、シャッタ機能を付加するため、横方向の回転も可能とする2軸駆動型の構造の検討を進めた。モジュール化開発は、低損失の波長選択スイッチモジュール実現のため、分光光学系とスイッチ光学系を最適の状況で結合可能とできる光学設計ツールの開発を進めた。

副課題ウでは、個別チャネル補償マイクロオプティクス型における波長分散補償器の補償部となるカスタマイズされたVIPA光学系の補償特性について、原理実験、シミュレーションにより特性向上のための課題を明確にし、MEMSを用いた可変補償動作の原理確認用一次試作を行い、一チャネル当り 120ps/nm の分散可変量(Cバンド全域において 4ps/nm² の可変分散スロープ補償量に相当)を得た。

副課題ウでは偏波モード分散補償モジュールを構成する要素デバイス(偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ)の1波長分の基本構成について所要の性能(10 μ s以下の応答時間とシステム要求を満たす偏波モード分散補償特性)の達成を目指し検討をおこない、LiNbO₃結晶を用いた構成の偏波制御器のモジュール化を行い、基本特性はチップと同等の特性(駆動電圧 20 V 以下、応答時間 1 μ s 以下)を確認し、本方式の有効性を明らかにした。可変 DGD 光回路については、2つの構成のモジュールを試作・評価し、チップ特性と同等の特性(DGD 可変幅 0~20 ps、応答時間 250 μ s 以下)を確認するとともに、温度特性についても問題ないことを確認した。また、特性と、機能集積化・アレイ化の点で優位な構成が異なり、継続して構成の絞込みを行うこととした。

以上、各モジュールの仕様の決定、基本的な設計はほぼ終了し、中間目標達成に向け、予定通りに開発が進捗している。次年度は、各モジュールの試作と伝送実験評価、統合モニタ・制御系の開発、機能統合形態の検討を進め、中間目標の達成を目指す。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

「A High-Speed Comb-Driven Micromirror Array for 1xN 80-channel Wavelength Selective Switches」 O.Tsuboi Et.al, OpticalMEMS2004

「Optical Switches Based on MEMS Technology」 I.Sawaki Et.al, OECC2004