

平成19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20年4月

情報通信研究機構

平成19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	各モジュール 10 Gbit/s 伝送特性評価	13
4-1-4	各モジュール 40 Gbit/s 伝送特性評価	16
4-1-5	サブシステムサイズ・コスト検討	19
4-1-6	まとめと今後の課題	21
4-2	波長選択スイッチモジュールの研究開発	22
4-2-1	波長選択スイッチモジュール開発の概要	22
4-2-2	小型分光光学系の開発	24
4-2-3	スイッチ光学系の開発	25
4-2-4	モジュール化開発	28
4-2-5	波長選択スイッチモジュールの試作	29
4-2-6	製品化に向けた検討	30
4-2-5	まとめ	32
4-3	波長分散補償モジュールの研究開発	33
4-3-1	波長分散補償モジュール開発の概要	33
4-3-2	波長分散補償方式の比較	33
4-3-3	製品化に向けた検討	37
4-3-4	小型モジュールの試作	39
4-3-5	まとめ	40
4-4	偏波モード分散補償モジュールの研究開発	41
4-4-1	偏波モード分散補償モジュール開発の概要	41
4-4-2	要素デバイスの試作	41
4-4-3	偏波モード分散補償モジュールの試作	43

4-4-4	まとめ	45
4-5	総括	46
5	参考資料・参考文献	48
5-1	研究発表・講演等一覧	48

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。

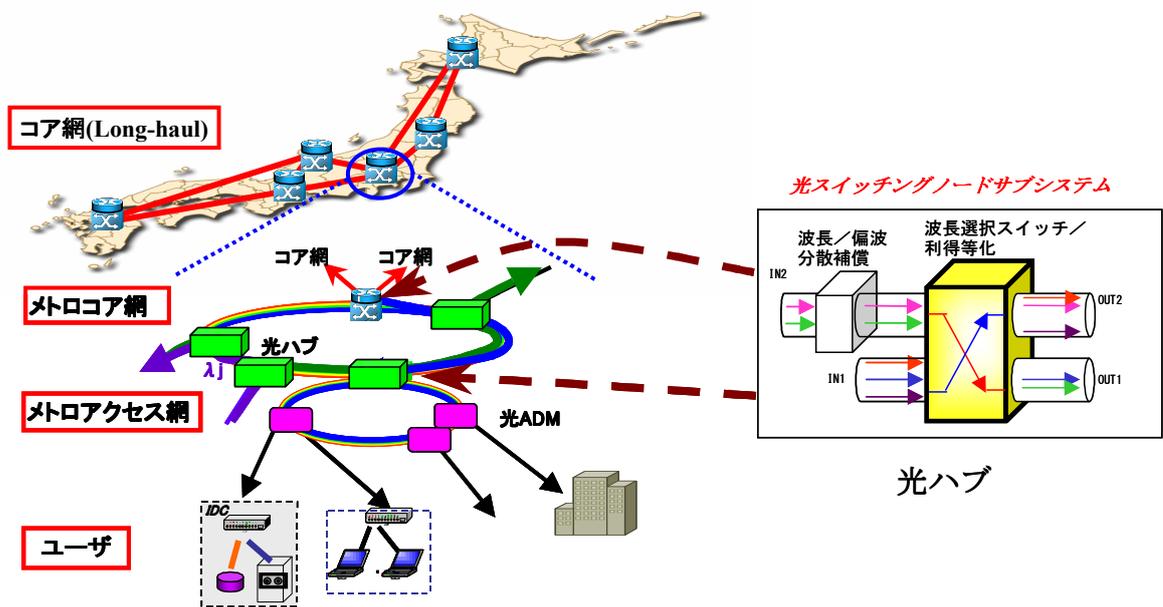


図 1-1: 次世代フォトニックネットワークと本研究で開発する光スイッチングノード

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化することにより、従来にない小型、低損失、低価格を目指す。

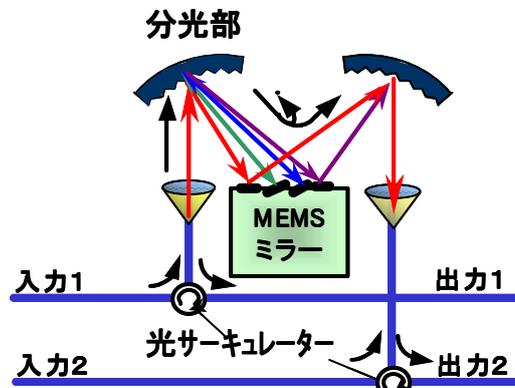


図2-1：2入力2出力波長選択スイッチ基本構成図

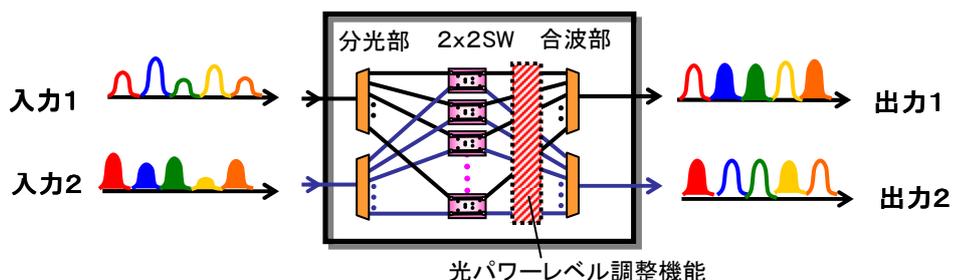


図2-2：分光部とスイッチ部を一体化した波長選択スイッチの構成例

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。

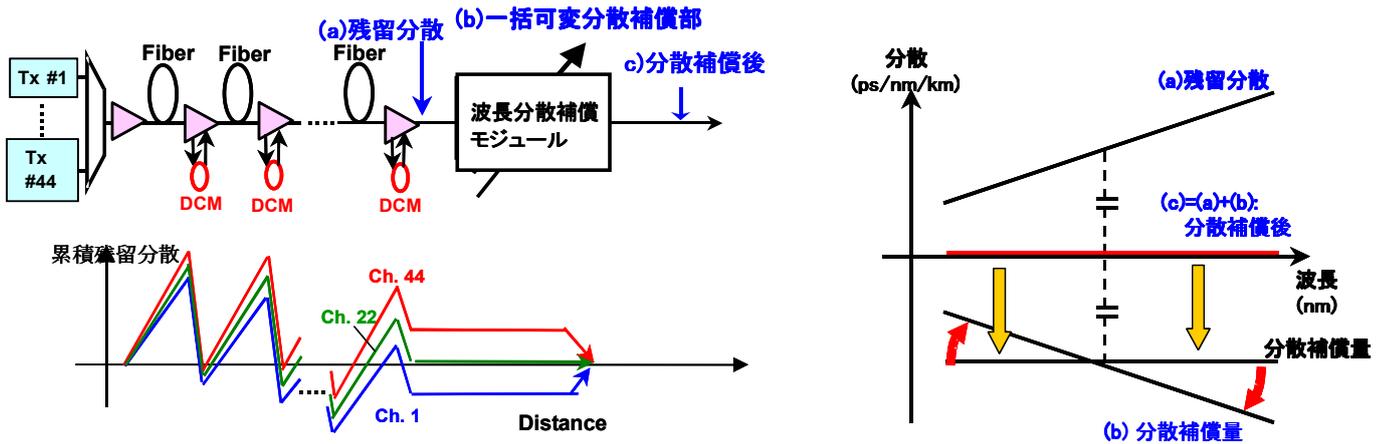


図 2-3 : 残留分散と波長分散補償モジュールの動作

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。

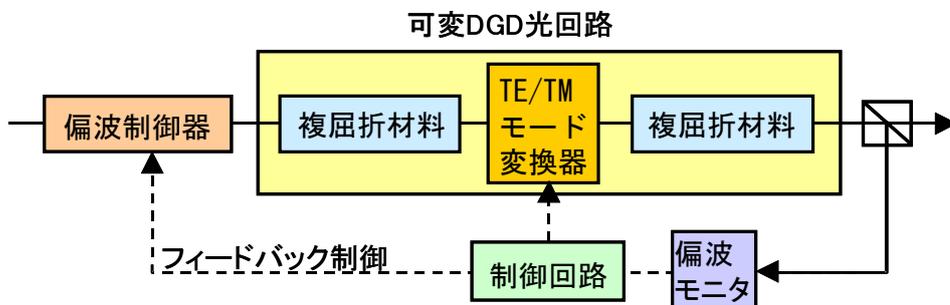


図 2-4 : 偏波モード分散補償モジュールの基本構成図

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トスイッチ、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(バンドまたはLバンド)
- ・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
 - 光クロスコネクト型スイッチ(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バンド(またはLバンド)
- ・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

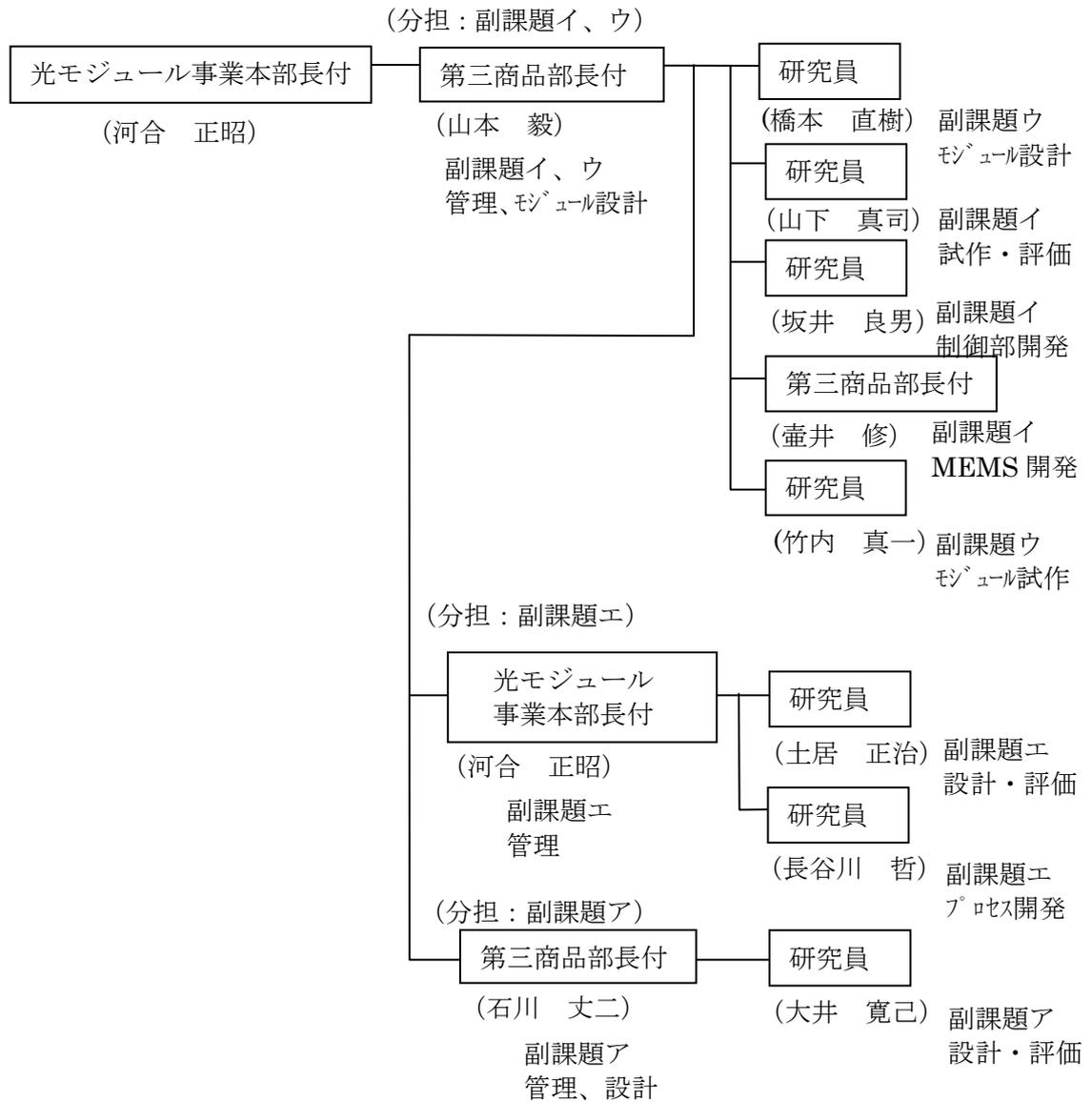
金額は非公表

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



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(WSS)スイッチモジュール、波長分散補償(VDC)モジュール、偏波モード分散補償(PMDC)モジュール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。

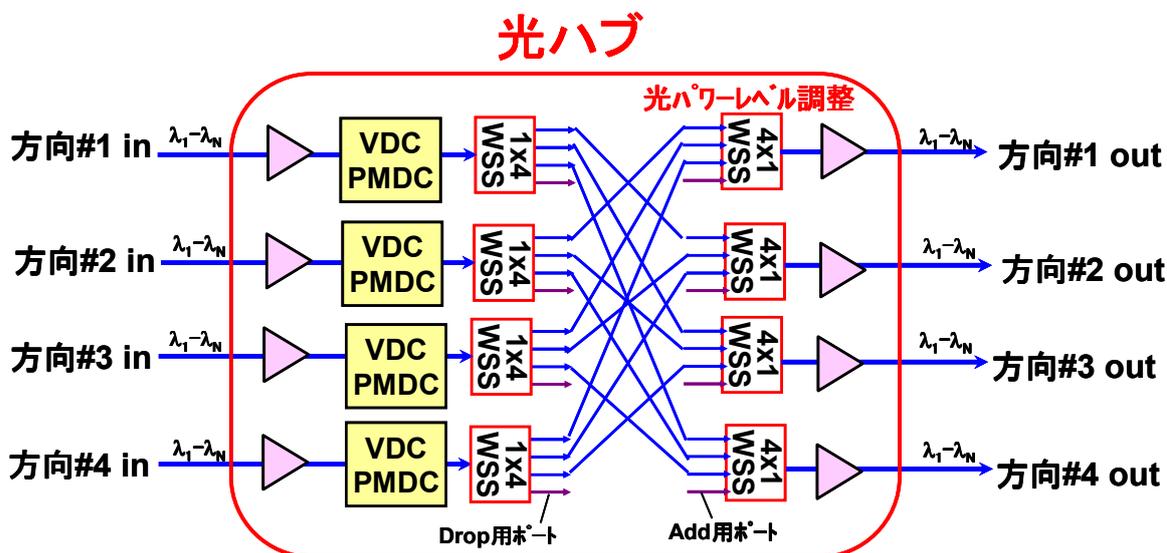


図 4-1-1-1 光ハブの基本構成

具体的な検討内容としては、まず、他の副課題で開発する各モジュールの目標特性を明確にした。次に、試作を行った各モジュールの単体動作および統合動作時の 10 Gbit/s および 40 Gbit/s 伝送特性の評価を行った。さらに、光スイッチングノードサブシステムのサイズ、コストの検討を行った。

4-1-2 各モジュール目標特性検討

4-1-2-1 光ハブに対するシステム要件の明確化

本研究開発課題で開発を進める光ハブに対するシステム上の要件を分析した。(a) 様々なネットワーク形態への対応、(b) 波長毎の経路切り替え機能、(c) 経路切り替えの遠隔制御、(d) 方路数に対するインサービスでの拡張性、(e) 波長数に対するインサービスでの拡張性、(f) 光パワーレベル調整機能、(g) 可変波長分散補償機能、(h) アダプティブ偏波モード分散補償機能、(i) 高速応答特性が求められることが分かった。

特に「(a) 様々なネットワーク形態への対応」のために、現在および次世代の国内外の光ネットワークの調査を行った。図 4-1-2-1 の例を含む各種光ネットワーク構成、さらには、実際の通信事業者のトラフィックダイヤモンドや回線情報からも、4 方路（4 入力 4 出力）までの光ハブを適用することで、ほぼ全てのネットワークをカバーできることが分かった。

さらに「(d) 方路数に対するインサービスでの拡張性」を考慮した場合、2×2 型波長選択スイッチを基本要素とした場合には実現が困難である。これに対し、1×N 型波長選択スイッチ(N≥4)を基本要素とし、これを組み合わせて光ハブを構成することで、図 4-1-2-2 に示すように、最小の 2 方路ハブから最大 N 方路へのインサービスでの拡張が可能になる。

1×N 型波長選択スイッチ(N≥4)は、2×2 型波長選択スイッチよりも入出力ファイバ数が多いために開発の難易度が高いが、以上のように、所要方路数および方路数拡張性というネットワーク構成上の必要性から、「2×2 型波長選択スイッチを用いた 2 方路光

「ハブ実現」という提案時の目標から、「1×N型波長選択スイッチを用いたN方路光ハブ実現 (N≥4)」という、より高い本研究開発課題の目標へと変更することとした。

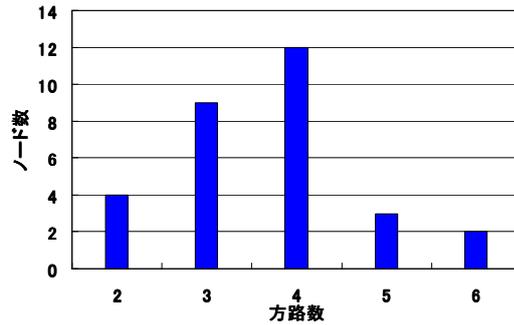


図 4-1-2-1 国内ネットワークモデル例およびノード方路数分布

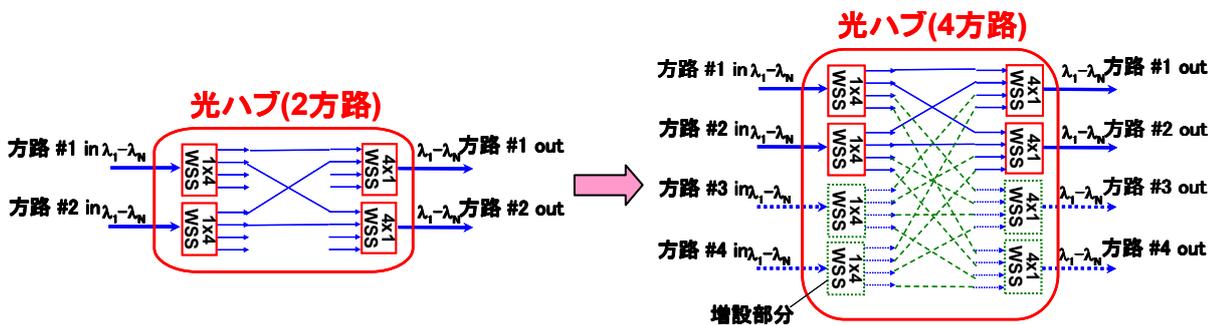


図 4-1-2-2 1×N型波長選択スイッチを適用した光ハブ方路数の拡張

4-1-2-2 各モジュール目標特性の明確化

本研究開発テーマでは、光レベルにて国内を End-to-end で接続するネットワークを構築するための、光ハブの実現を目指す。図 4-1-2-3 に示すように、最長 2500 km のネットワークモデルを想定した。表 4-1-2-1 に同モデルで想定した各モジュールの最大透過段数を示す。そのネットワークモデルに基づいて、各モジュールの目標特性をシミュレーションおよび実験によって明らかにし、各モジュールの開発を促進した。特に、光ハブの多段透過に耐えるための各光特性の確保（透過帯域幅、クロストーク、位相リップル等）が重要であることを明らかにした。

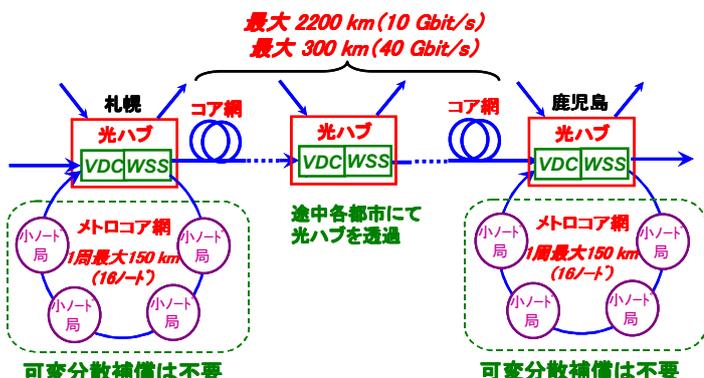


図 4-1-2-3 ネットワークモデル

表 4-1-2-1 各モジュール最大透過段数

モジュール	最大透過段数	
	10 Gbit/s	40 Gbit/s
波長選択スイッチ (WSS)	44 段	30 段
波長分散補償 (VDC)	9 段	2 段
偏波モード分散補償 (PMDC)	-	(2 段 *1)

*1: PMD が大きい伝送路のみに適用するオプション

各モジュール目標特性の検討内容の例として、波長選択スイッチ (WSS) モジュールの 10 Gbit/s での所要透過帯域幅に関する検討結果を図 4-1-2-4 に示す。WSS の透過形状がフラットトップであるため 3 次のガウシアン形状を想定して、フィルタを多段透過した場合の

伝送波形シミュレーションを行った。許容ペナルティを0.1 dBとして、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。

また、波長分散補償(VDC)モジュールの10 Gbit/s での所要位相リップルに関するシミュレーション結果を図4-1-2-5に示す。正弦波形状の位相リップルモデルを用い、本テーマで採用したエタロン型VDCが特徴的にもつリップル周期を想定した。許容ペナルティを1 dBとして、位相リップルの最大値は380 mrad (rms)となる。波長分散補償モジュールが最大9段接続されることを想定しているため、1台当たりの位相リップルの目標特性を40 mrad (rms)以下とした。

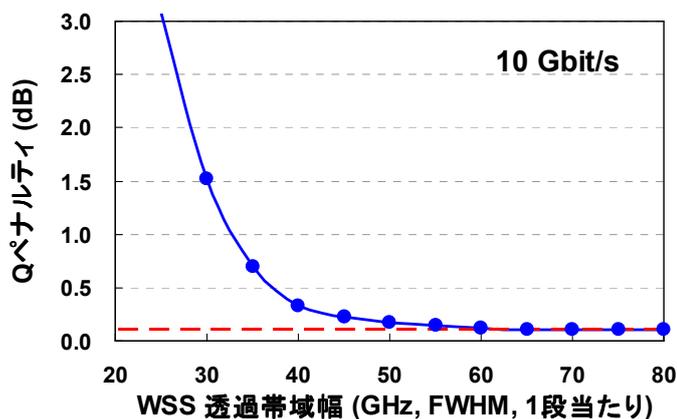


図 4-1-2-4 WSS モジュール所要透過帯域幅 (伝送シミュレーション)

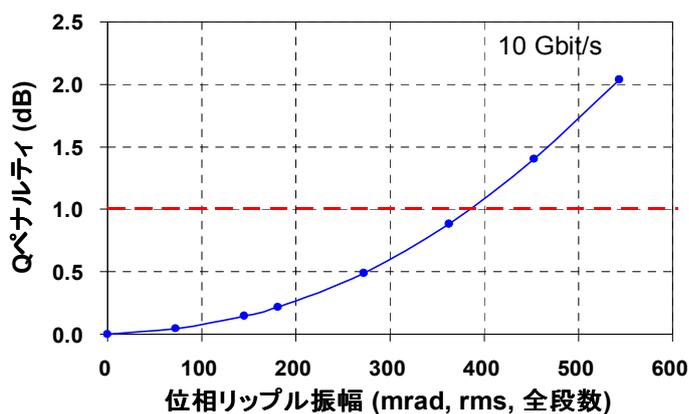


図 4-1-2-5 VDC モジュール所要位相リップル (伝送シミュレーション)

以上のような各種パラメータに関する依存性の検討を行い、各モジュールの目標特性を表4-1-2-2の通り求めた。

表 4-1-2-2 各モジュール目標特性 (主要項目)

項目	目標値	
	10 Gbit/s 用 (NRZ)	40 Gbit/s 用 (RZ-DQPSK)
[共通]		
波長帯	CバンドもしくはLバンド	
波長間隔	100 GHz	
波長数	40 ch	
[波長選択スイッチモジュール]		
入出力ポート数	(a) 入力: 1、出力: N, (b) 入力: N、出力: 1 (Nは4以上)	
透過帯域 (3dB)	>60 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: < -44 dB	
挿入損失	< 6 dB	
光パワー可変範囲	> 6 dB	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)	
[波長分散補償モジュール]		
補償チャンネル数	1 ch (チャンネル毎補償)	
挿入損失	< 6 dB	
透過帯域幅	> 40 GHz (FWHM, 直線近似分差引後)	
損失傾斜	< 0.067 dB/GHz (< ± 8.3 dB/nm)	
波長分散可変範囲	-400 ~ +400 ps/nm	
波長分散可変ステップ	< 80 ps/nm	< 20 ps/nm
位相リップル	< 40 mrad (rms)	
応答速度	遅くて可 (半固定)	

[偏波モード分散補償モジュール]		
DGD 補償範囲	-	0 ~ 35 ps
挿入損失	-	< 10 dB
応答速度	-	1 ms

なお、40 Gbit/s 伝送の変調方式に関して、本テーマ開始時点においては、NRZ 変調方式の適用を想定していた。しかし、国内外での 40 Gbit/s システムに対する市場要求として、10 Gbit/s 伝送と同じ 100 GHz 間隔での高密度波長多重、および 10 Gbit/s に近い長距離伝送の要求が強くなり、本研究テーマにおいても、別途開発を進めてきた RZ-DQPSK 変調方式 (Return-to-Zero Differential Quadrature Phase-shift-keying) [1-1]に変更することとした。RZ-DQPSK 変調方式は、NRZ 変調に比べて、光スペクトル幅が小さいために、高密度波長多重(100 GHz 間隔)が可能であること、波長分散耐力が高いこと、光信号対雑音(OSNR)耐力やファイバ非線形耐力に優れて長距離伝送が可能であることなどの様々な利点を持つ。さらに、偏波モード分散(PMDC)耐力に優れており、通常の PMD 特性の伝送路であれば、偏波モード分散補償モジュールが不要である。よって、本テーマにおいても、偏波モード分散補償モジュールは、海外における敷設時期が古く、特別に PMD が大きい伝送路のみで適用するオプションの位置づけで開発を行う。

4-1-3 各モジュール 10 Gbit/s 伝送特性評価

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、高い利得平坦性を持つ光アンプを用い、メトロシステムの評価に不可欠な多段接続時においても、極めて高い利得平坦性を有する周回伝送実験系を構築した。次に、構築した伝送テストベッドを用いた伝送実験、および伝送波形シミュレーションによって、実際のシステムにおける多段接続状態を模擬し、各モジュール単体および統合時の基本的な伝送特性の評価を行った。本章では、まず、10 Gbit/s NRZ 信号に対する評価結果を示す。

4-1-3-1 10 Gbit/s 波長選択スイッチ(WSS)モジュール単体評価

図 4-1-3-1 に、副課題イで試作した 4 入力 1 出力の波長選択スイッチモジュールを用いた 10 Gbit/s 信号に対する方路切り替え実験結果を示す。各入力ポートおよび各波長対

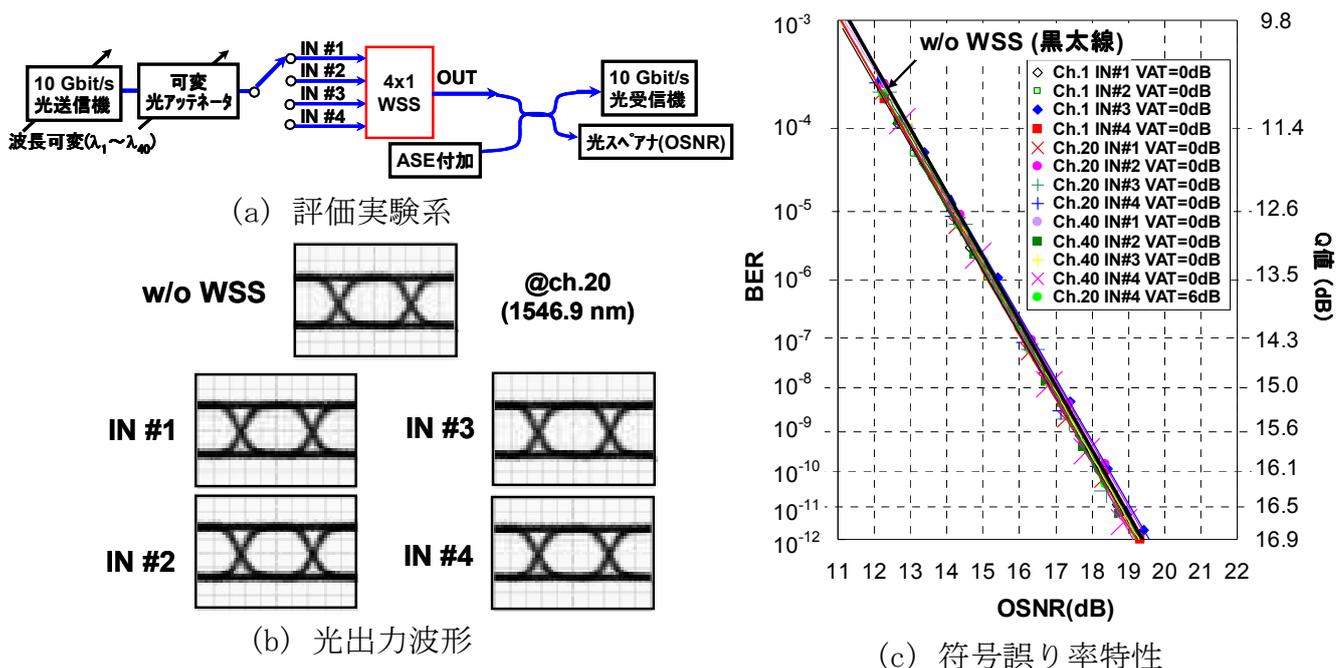
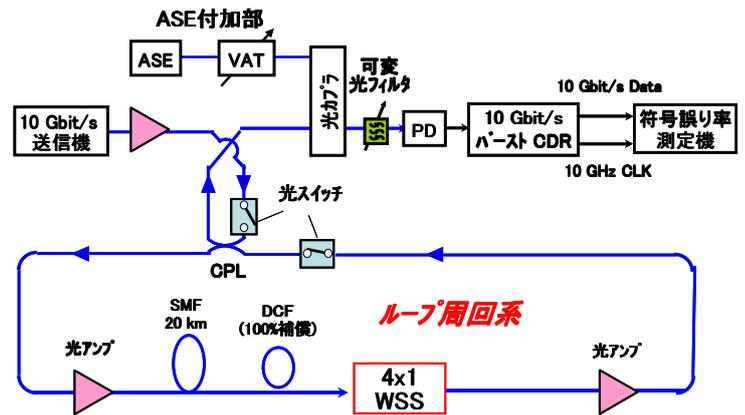


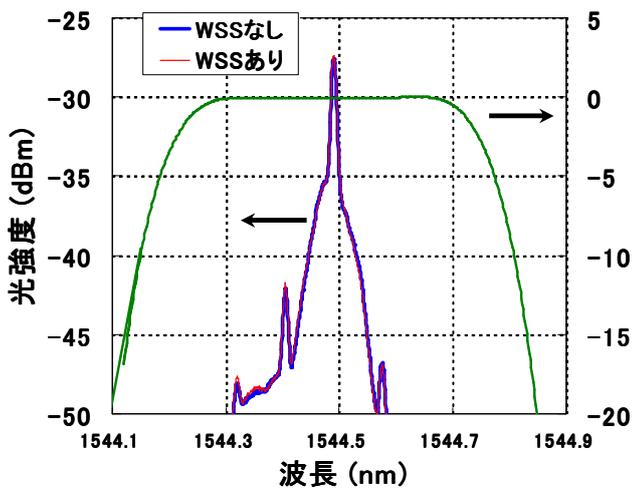
図 4-1-3-1 10 Gbit/s 波長選択スイッチモジュール切替特性

して、Q ペナルティ 0.2 dB 以下(測定誤差レベル)の良好な伝送特性が得られることを確認した。さらに、波長選択スイッチモジュールの光パワー可変減衰量の設定を 6 dB まで変化させた場合にも劣化は観測されないことを確認した。

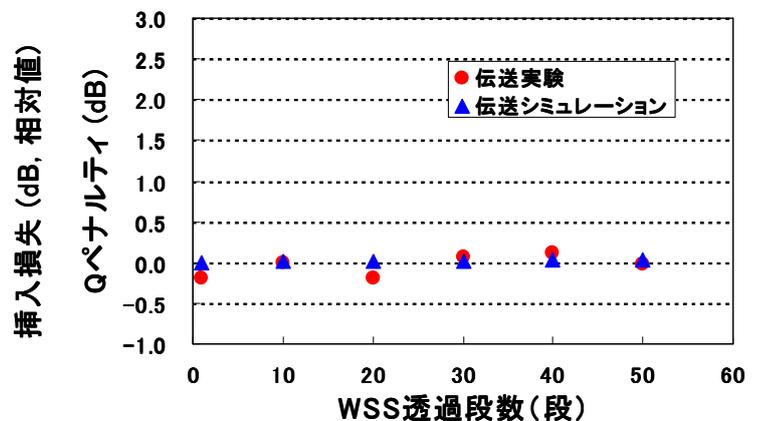
さらに、図 4-1-3-2 に、波長選択スイッチモジュールの多段透過特性の評価実験結果を示す。表 4-1-2-1 の目標に示すような多数のモジュール透過段数の実験を少ない台数の評価サンプルで行うために、一周当たり 20 km という短いループ長の周回伝送実験系を構築した。その際、一周当たりのバースト信号長が短いため(約 100 μ sec)、バースト信号対応の引き込み時間の速いクロック抽出回路を適用した。波長選択スイッチモジュールを最大 50 段透過させた場合の「透過段数 対 Q ペナルティ」の特性を図 4-1-3-2(c) に赤丸で示す。また、用いた波長選択スイッチモジュールの「周波数 対 損失特性」の実測データを用いて伝送シミュレーションを行った結果を青三角で示す。いずれも、Q ペナルティが測定精度以内でほぼ零であることが分かる。図 4-1-3-2(b) に、波長選択スイッチモジュール 40 段透過時の光スペクトルを示す。モジュールを透過した場合としない場合で、光スペクトル形状が全く重なっており、波長選択スイッチモジュール多段透過による光スペクトル狭窄をほとんど受けていないことが分かる。



(a) 評価実験系



(b) WSS 40 段透過後光スペクトル

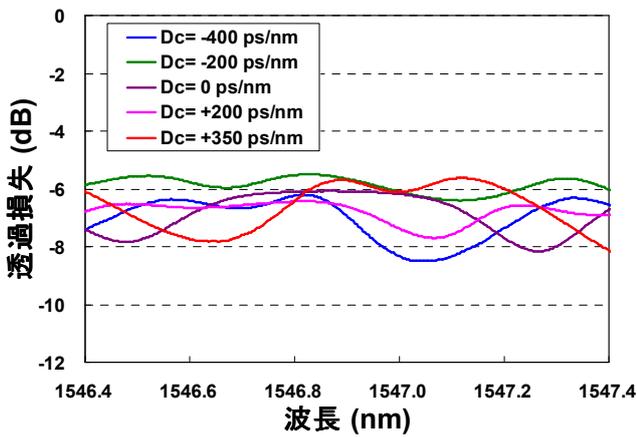


(c) Q 値特性

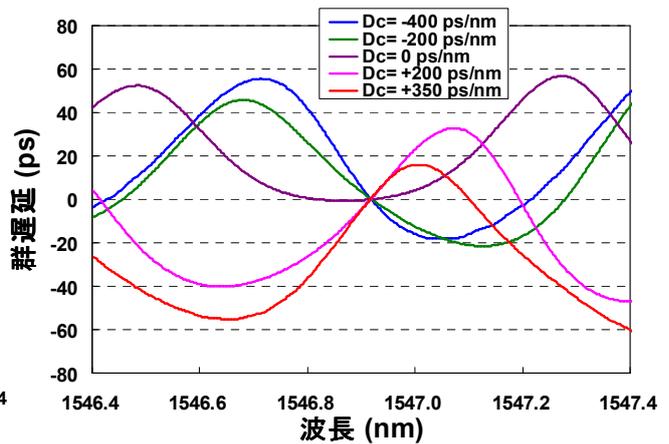
図 4-1-3-2 10 Gbit/s 波長選択スイッチモジュール多段透過特性

4-1-3-2 10 Gbit/s 波長分散補償(VDC)モジュール単体評価

副課題ウで開発したエタロン型波長分散補償(VDC)モジュールを用い、10 Gbit/s 波長分散補償特性の評価を行った。図 4-1-3-3 に、試作を行った波長分散補償モジュールの透過特性、群遅延特性を示す。



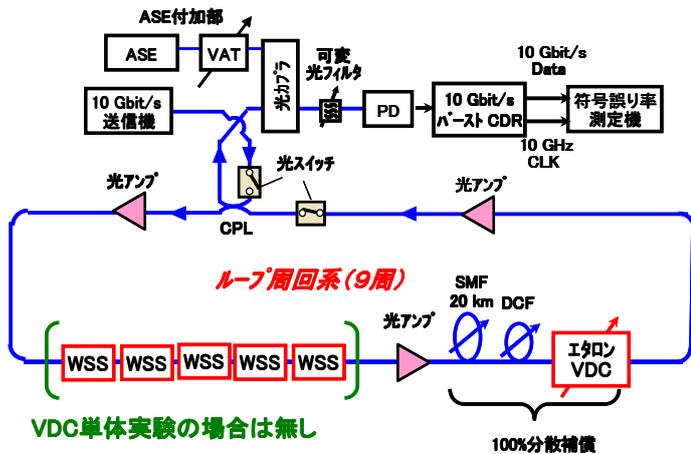
(a) 透過特性



(b) 群遅延特性

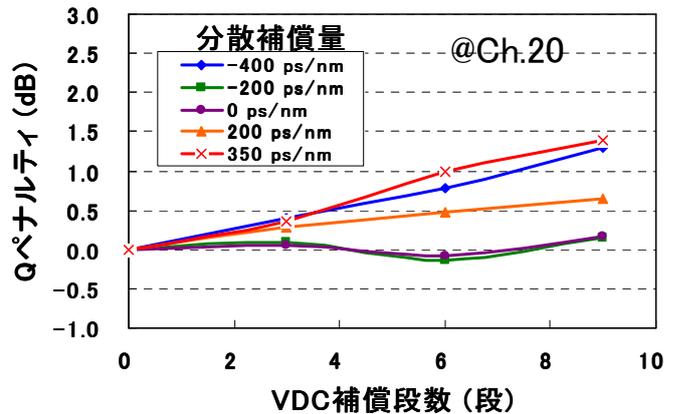
図 4-1-3-3 波長分散補償モジュール特性

図 4-1-3-4(a)に示すように、周回ループ中に波長分散補償モジュールを配置し、9 段透過させた。伝送路(SMF, DCF)の長さを変えて波長分散量を変化させた上で、波長分散補償モジュールで最適分散補償(ほぼ 100%補償)を行った(ここでは図中の WSS は無し)。 (b) (c)の実験結果、(d)の実測静特性を用いたシミュレーション結果が示すように、各チャネル、各分散補償量において、波長分散補償モジュール 9 段補償後に Q ペナルティ 1.5 dB 以下(実測)の良好な補償特性を確認した。分散補償量が大きい場合に多少 Q ペナルティが増大しており、シミュレーションでの調査によると、透過特性の傾斜が大きくなるとともに、群遅延特性の波長帯域幅が光スペクトル幅に比べて小さくなるためである。

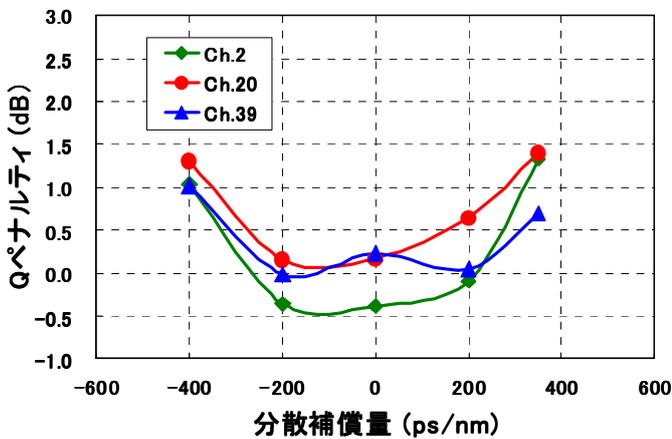


VDC単体実験の場合は無し

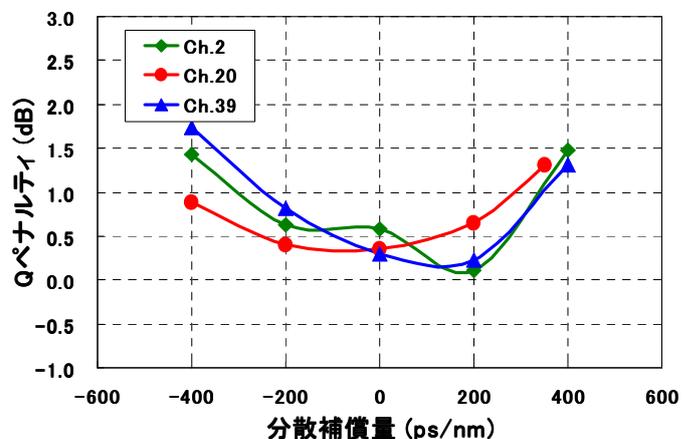
(a) 評価実験系



(b) Q 値 VDC 段数依存性(実験)



(c) VDC9 段透過後 Q 値特性(実験)

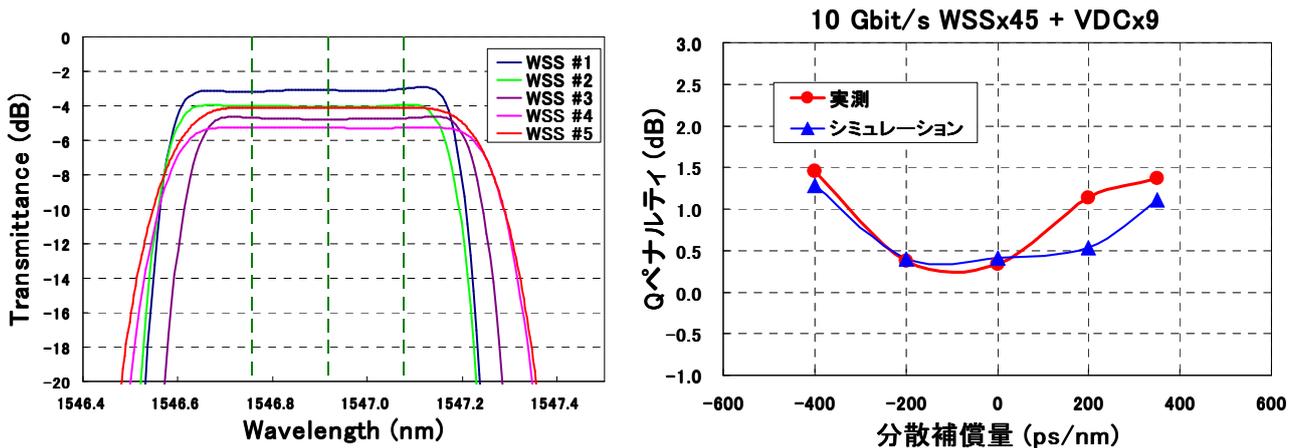


(d) VDC9 段透過後 Q 値特性(シミュレーション)

図 4-1-3-4 10 Gbit/s 波長分散補償モジュール補償特性

4-1-3-3 10 Gbit/s WSS+VDC モジュール統合評価

表 4-1-2-1 の目標とする各モジュール透過段数に基づき、図 4-1-3-4(a) の評価実験系で波長選択スイッチ(WSS)モジュール5台と波長分散補償(VDC)モジュール1台を同時に配置して9周回伝送し、WSSモジュールを合計45段、VDCモジュールを合計9段透過させて最適波長分散補償を行う評価実験・シミュレーションを行った。図 4-1-3-5(b)の結果が示すように、各分散補償量でQペナルティ1.5 dB以下の良好な結果を得た。図 4-1-3-2の結果が示すように、WSSモジュールの透過特性がフラットトップで十分幅が広く、WSSモジュール45段透過時でも劣化をほとんど生じないため、図 4-1-3-5(b)のQペナルティは、ほとんどVDCモジュールに起因することが分かる。



(a) WSS モジュール透過特性 (5 サンプル)

(b) Q 値特性

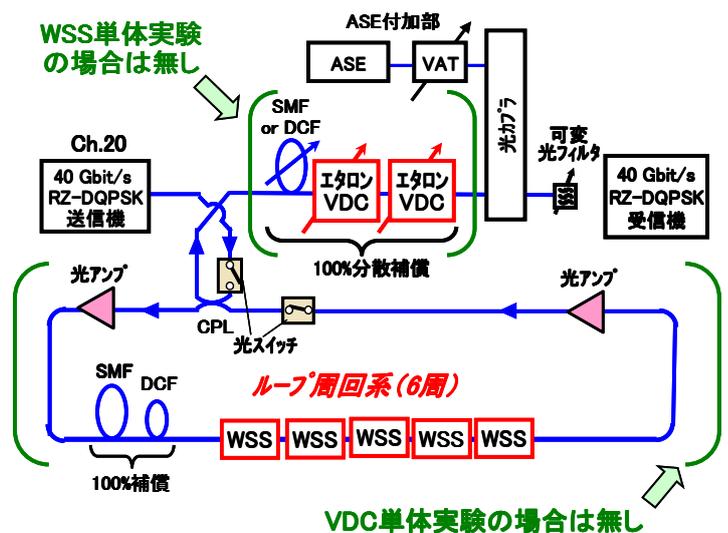
図 4-1-3-5 10 Gbit/s WSS 45 段+VDC 9 段 多段透過・補償評価

4-1-4 各モジュール 40 Gbit/s 伝送特性評価

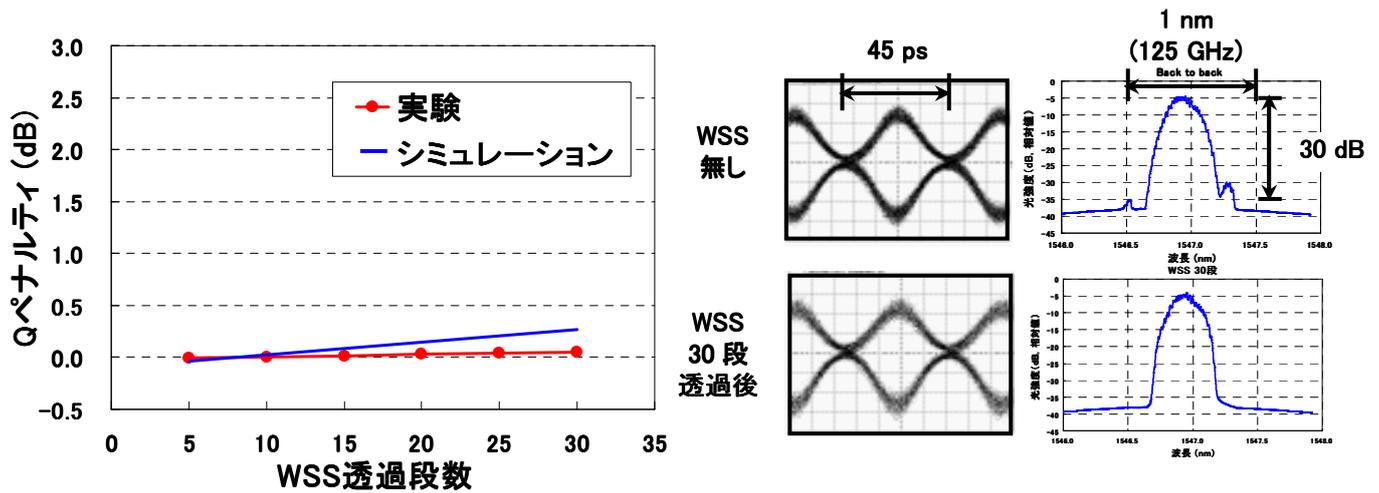
前章の 10 Gbit/s NRZ 信号に対する評価結果に続き、本章では 40 Gbit/s RZ-DQPSK 信号に対して、各モジュール単体および統合時の伝送特性の評価を行った結果を示す。

4-1-4-1 40 Gbit/s 波長選択スイッチ(WSS)モジュール単体評価

図 4-1-4-1 に、40 Gbit/s RZ-DQPSK 信号での波長選択スイッチモジュールの多段透過特性の評価実験結果を示す。表 4-1-2-1 の目標に示す 30 段の波長選択スイッチモジュールを透過させるために、5 台のモジュールを周回内に配置し、最大 6 周回の伝送を行った(ここでは図(a)のエタロン VDC は無し)。図(b)の実験結果、シミュレーション結果に示すように、波長選択スイッチモジュール 30 段透過後も Q ペナルティ 0.1 dB 以下(実測値)の良好な結果を得た。図(c)で 30 段透過後も等化波形(遅延干渉計後)、光スペクトルの目立った劣化は無く、40G RZ-DQPSK 信号の狭スペクトル特性の利点によることが分かる。



(a) 評価実験系



(b) Q 値 WSS 透過段数依存性

(c) 等化波形、光スペクトル

図 4-1-4-1 40 Gbit/s 波長選択スイッチモジュール多段透過特性

4-1-4-2 40 Gbit/s 波長分散補償 (VDC) モジュール単体評価

波長分散補償モジュールを用い、40 Gbit/s 波長分散補償特性の評価を行った。評価系は、図 4-1-4-1(a)での周回部分(WSS)を除いたストレート構成で行い、波長分散補償モジュール 2 台を連結させた。前段に配置した伝送路(SMF, DCF)の長さを変えて波長分散量を変化させた上で、波長分散補償モジュール 2 台の分散補償量を共通に変化させ、最適分散補償(ほぼ 100%補償)を行った。図 4-1-4-2 の結果に示すように、各分散補償量において Q ペナルティ 1.9 dB 以下(実測)の良好な補償特性を確認した。分散補償量が大きい場合に多少 Q ペナルティが増大しており、シミュレーションでの調査によると、群遅延特性の波長帯域幅が光スペクトル幅に比べて小さくなるためである。

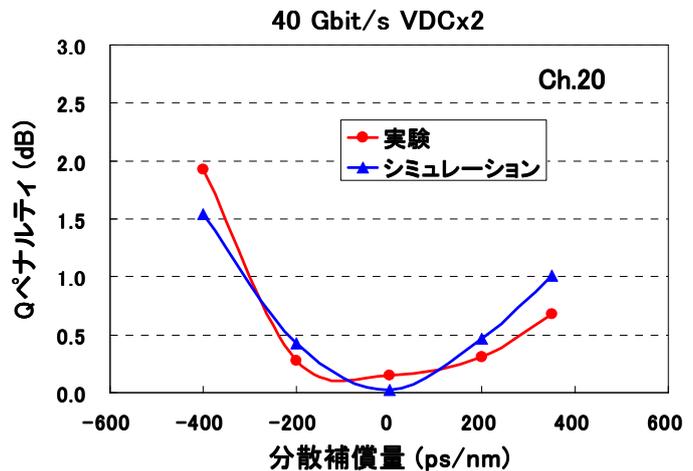
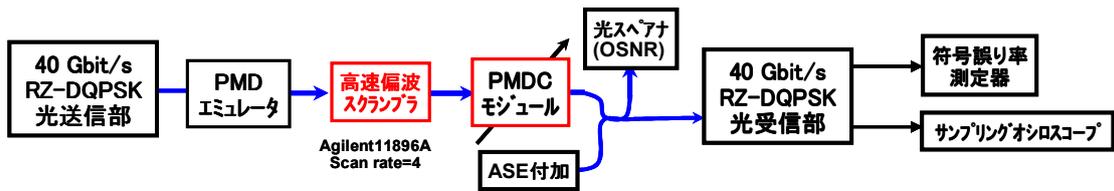


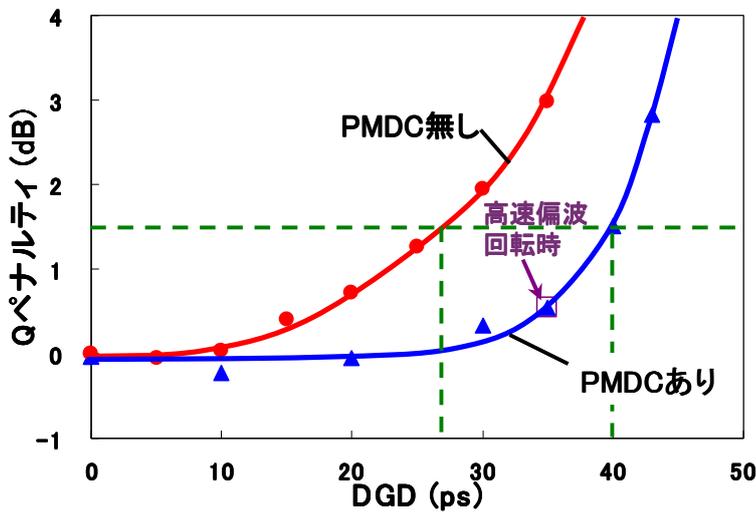
図 4-1-4-2 40 Gbit/s 波長分散補償モジュール補償特性

4-1-4-3 40 Gbit/s 偏波モード分散補償 (PMDC) モジュール単体評価

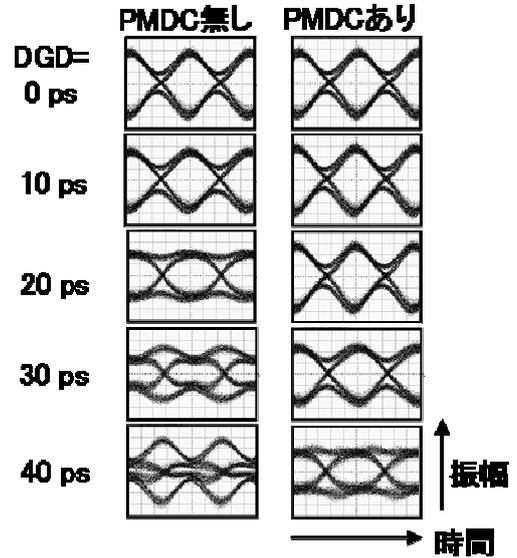
4-1-2-2 章で説明したように、40 Gbit/s RZ-DQPSK 変調方式は偏波モード分散 (PMD) トレランスに優れるため、通常の PMD 特性の伝送路では偏波モード分散補償モジュールは不要である。海外における敷設時期が古く、特別に PMD が大きい伝送路のみで、オプションとして適用する。副課題エで試作を行った偏波モード分散補償モジュールを適用し、40 Gbit/s RZ-DQPSK 信号に対する PMD 補償実験を行った結果を図 4-1-4-3 に示す。DGD (Differential Group Delay) トレランスが 27 ps (PMDC 無し) から 40 ps (PMDC 適用時) まで拡大される良好な補償特性を得た。これは、PMD に制限される伝送距離が 2.2 倍に拡大されることに相当する。また、偏波モード分散補償モジュールの高速応答特性を評価するために、前段に高速偏波スクランブラを配置して、ファイバタッチに相当する 0.95 degree/ms の高速偏波回転を与えた。DGD= 35 ps の条件で評価を行い、図 (b) に示すように高速偏波変動を与えない場合に対して Q 値が変化せず、偏波モード分散補償モジュールが、高速偏波変動に対して十分高速応答をしていることが分かる。



(a) 評価実験系



(b) Q 値特性

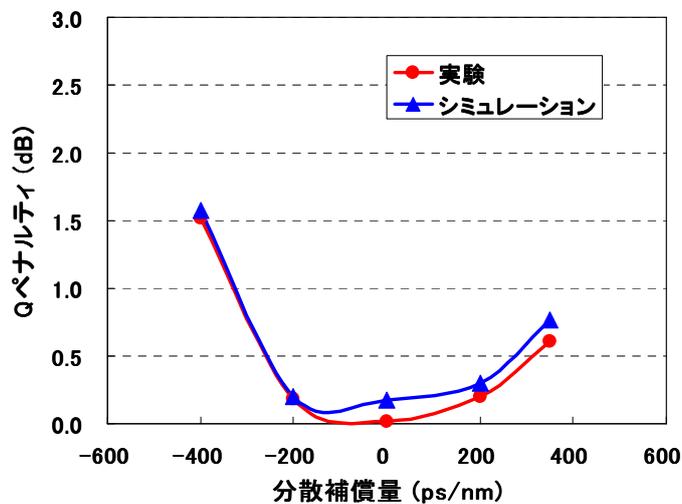


(c) 等化波形

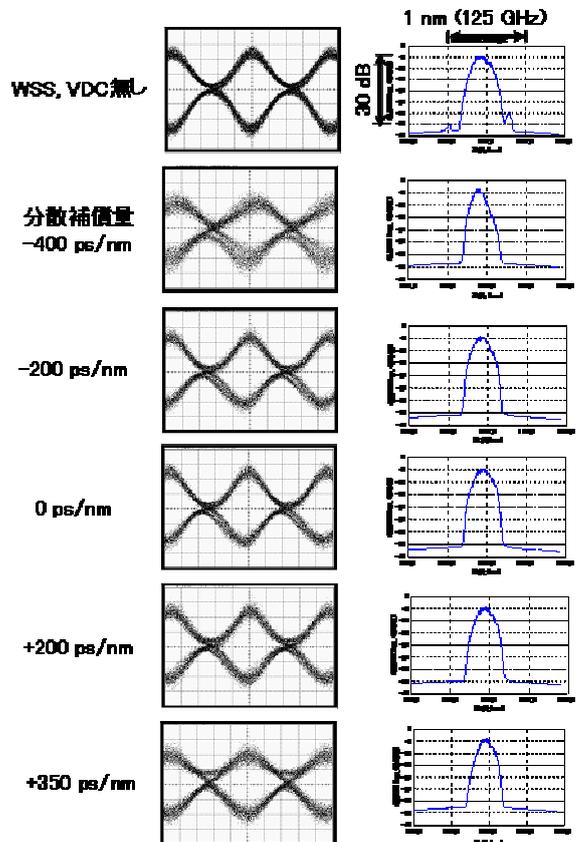
図 4-1-4-3 40 Gbit/s 偏波モード分散補償モジュール補償特性

4-1-4-4 40 Gbit/s WSS+VDC モジュール統合評価

表 4-1-2-1 の目標とする各モジュール透過段数に基づき、図 4-1-4-1(a) の評価実験系で WSS モジュールを合計 30 段、VDC モジュールを 2 段透過させて 40 Gbit/s 多段透過・補償評価を行った。図 4-1-4-4 の結果が示すように、各分散補償



(a) 透過・補償特性



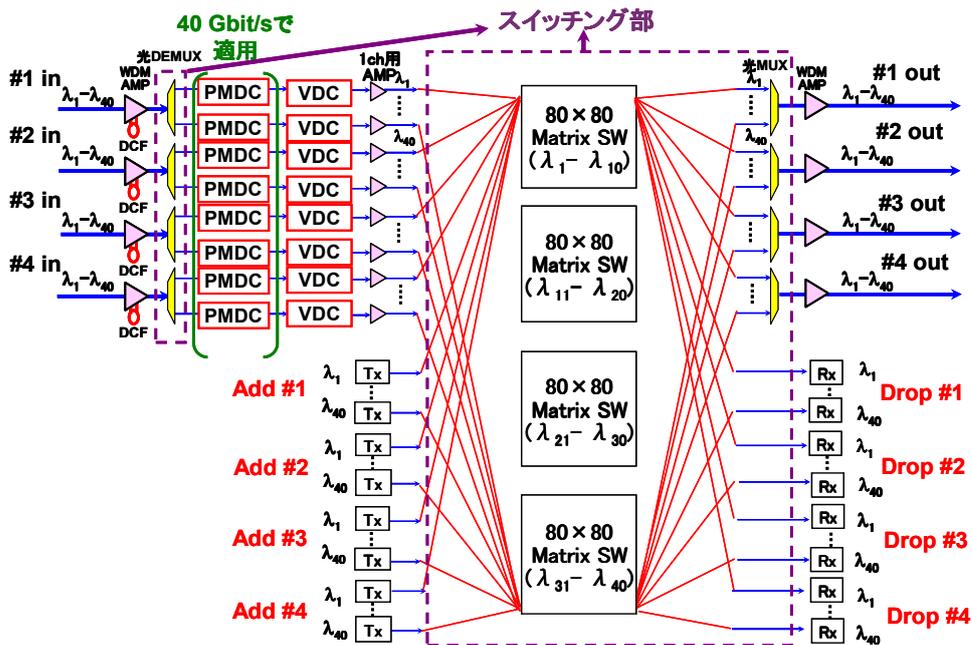
(b) 等化波形・光スペクトル

図 4-1-4-4 40 Gbit/s WSS 30 段+VDC 2 段 多段透過・補償評価

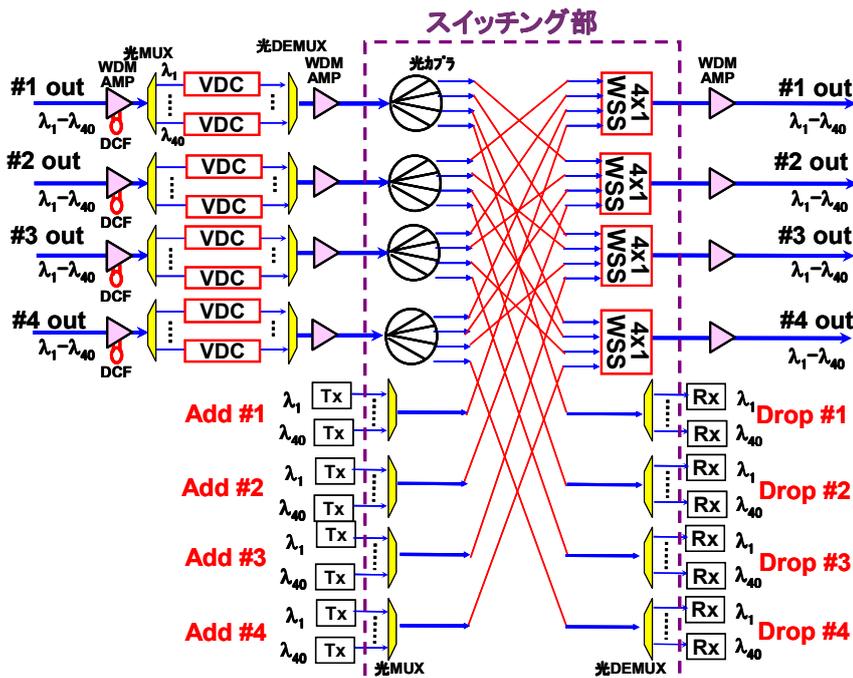
量で Q ペナルティ 1.5 dB 以下(実測)の良好な結果を得た。図 4-1-4-1 項の結果から、WSS モジュール 30 段透過時でも劣化が小さいため、図 4-1-4-4(a) の Q ペナルティは、ほとんど VDC モジュールに起因することが分かる。

4-1-5 サブシステムサイズ・コスト検討

本研究テーマでは、小型・低コストの各モジュールを新規開発することで、従来のデバイス、モジュールを組み合わせて同等機能の光ハブノードを構成した場合に比べ、格段に小型・低コストのノードを実現することを目標としてきた。各モジュールの設計・試作・評価を進めてきた実績を踏まえ、光ハブノードサブシステムのサイズ・コストの検討を行った。図 4-1-5-1 に本研究テーマ開始前((a)従来構成)と、本テーマで想定している((b)新規構成) 4 方路光ハブノード構成を示す。従来構成では、80ch×80ch マトリクススイッ



(a) 従来構成



(b) 新規構成

図 4-1-5-1 4 方路光ハブノード構成

ち、VIPA 可変分散補償器、および当時市販されていた PMDC ユニットの適用を想定している。本テーマ開始当時の 40 Gbit/s 変調方式は PMD 耐力の低い NRZ のみであったため、40 Gbit/s 伝送において偏波モード分散補償器 (PMD) の適用が必要である。これに対し、新規構成では、波長選択スイッチ (WSS)、エタロン型波長分散補償 (VDC) の各モジュールを適用する。40 Gbit/s 伝送においては、PMD 耐力に優れた RZ-DQPSK 変調方式を採用し、通常の伝送路においては偏波モード分散補償 (PMD) は不要であるため、新規構成では偏波モード分散補償モジュールを除いてサイズ、コストの検討を行った。また、市場要求として、方路切り替えのみならず、全チャネルの光信号の光分岐 (Drop)・挿入 (Add) 機能が求められるため、その部分を従来、新規構成ともに加えた。

図 4-1-5-2 に、図 4-1-5-1 中の主要部分であるスイッチング部 (方路切替機能) に着目した場合の体積およびコストの比較を示す。特に、マトリクススイッチに比べて波長選択スイッチのサイズ、コストが格段に小さいため、新規構成においては、従来構成に比べ、体積は約 30 分の 1、コストは約 12 分の 1 への縮小が見込まれる。

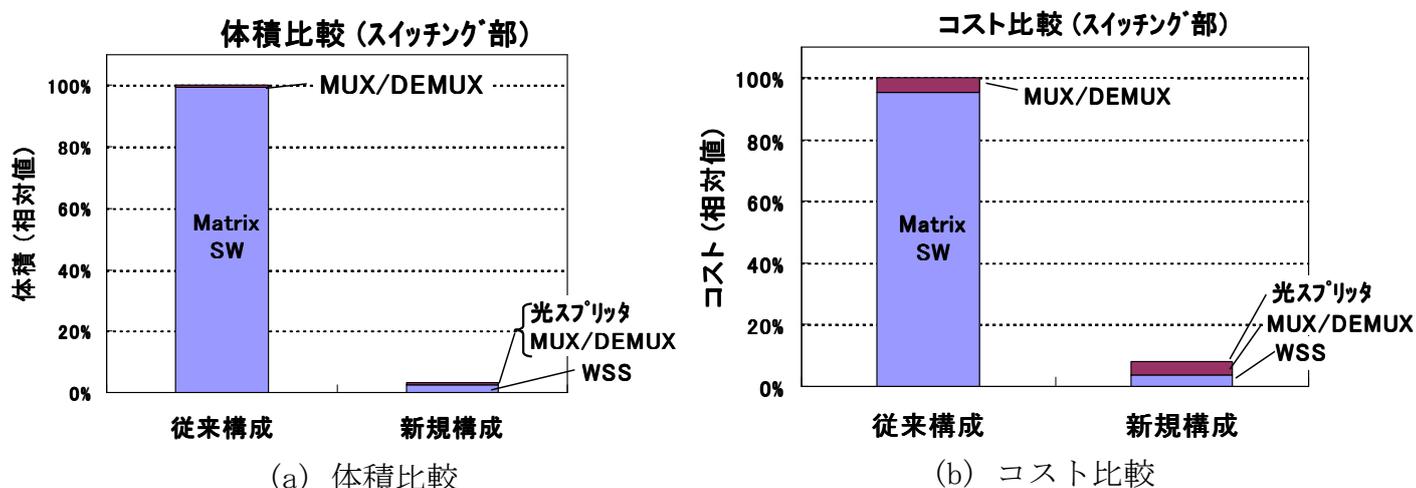


図 4-1-5-2 スwitching部の体積・コスト比較

次に、10 Gbit/s システムにおける、図 4-1-5-1 の 4 方路光ハブノード構成全体の体積およびコストの比較を図 4-1-5-3 に示す。新規構成では、従来比でサイズ、コストともに約 10 分の 1 となる。これは、上記のマトリクススイッチに比べて波長選択スイッチの優位性に加え、VIPA 可変分散補償器に比べて小型・低コストに優れたエタロン型波長分散補償モジュールを適用したことによる。また、従来構成では、光 DEMUX と光 MUX の間に高い挿入損失の部品が連続して配置されるため、光レベル補償用の 1 波用光アンプをチャネル数

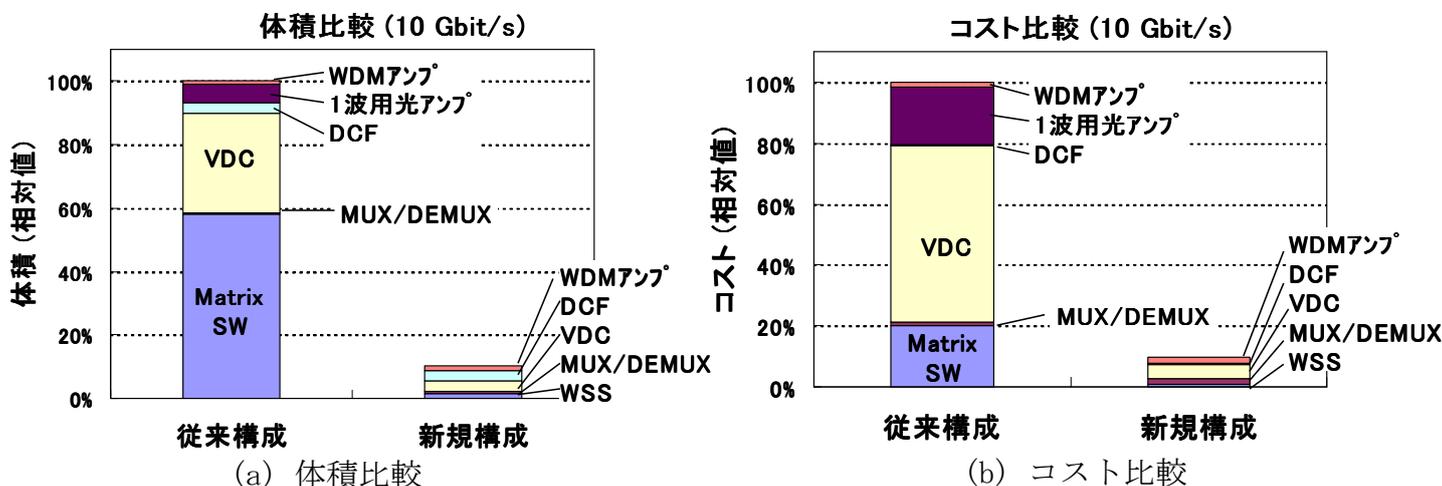


図 4-1-5-3 10 Gbit/s システムにおける 4 方路光ハブノード全体での体積・コスト比較

分用意する必要があり、サイズ、コストに影響を与えている。一方、新規構成では、1波用光アンプは不要である。今後のさらなる各部品の小型化と量産によるコストダウン効果により、将来的には目標としていた従来比20分の1の実現は可能であると考えられる。

次に、40 Gbit/s システムにおける、図 4-1-5-1 の4方路光ハブノード構成全体の体積およびコストの比較を図 4-1-5-4 に示す。なお、従来構成では光スペクトル幅が大きい NRZ 変調方式であるために、波長間隔を 200 GHz (20 チャンネル) とせざるを得ないが、新規構成と同じ伝送容量相当に換算して比較を行っている。その結果、新規構成では、従来構成に対して体積は約 100 分の 1、価格は約 20 分の 1 となる。これは 10 Gbit/s システムと同様の理由に加え、新規構成では偏波モード分散補償モジュールを不要とする RZ-DQPSK 変調方式を選択したことによる。

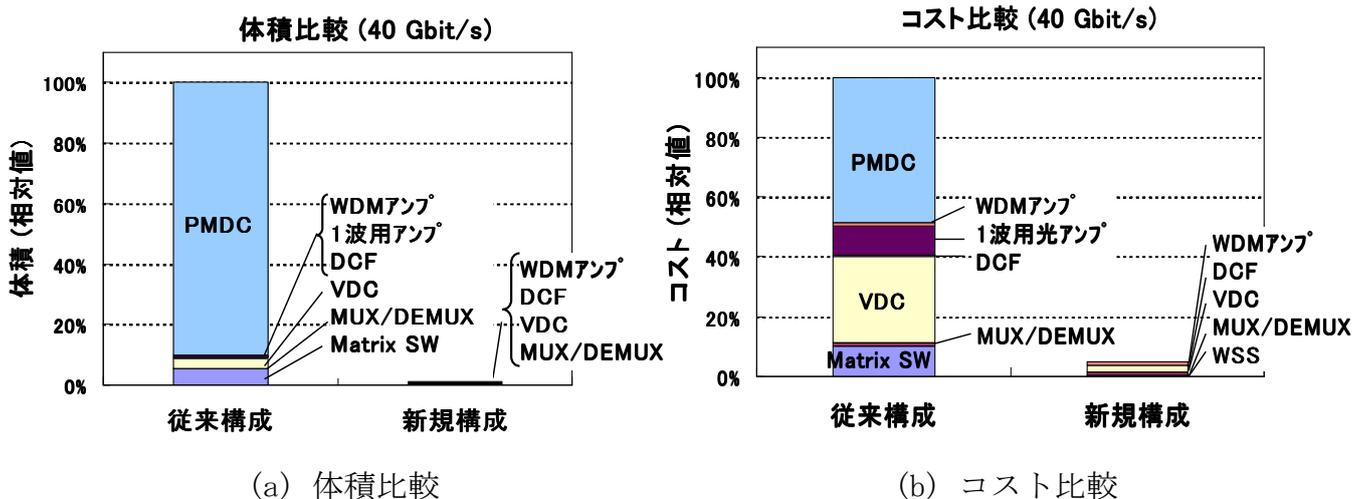


図 4-1-5-4 40 Gbit/s システムにおける 4 方路光ハブノード全体での体積・コスト比較

4-1-6 まとめと今後の課題

サブシステム開発を行う本副課題においては、まずは光ハブに対するシステム要件を分析し、その結果から、提案時より高い光ハブの機能目標へと変更し(2入力×2出力 → N入力×N出力(N≥4))、検討を進めた。シミュレーション・実験により、光ハブを構成する各モジュールに対する目標特性を明確化し、開発を促進した。さらに、試作を行った各モジュールの単体および統合時の 10 Gbit/s および 40Gbit/s 多段透過・補償評価(実験、シミュレーション)を行い、良好な伝送特性が得られることを検証した。また、光スイッチノードのサイズ、コストを見積もり、目標の数値を得られる見通しをつけ、最終目標に対して 100%の達成度を得たと考えられる。今後は、実際に各モジュールを実装した光スイッチングノードサブシステムの開発を進めていく予定である。

参考文献

[1-1] T. Hoshida, T. Takahara, Y. Akiyama, H. Ooi, K. Nakamura, Y. Terayama, N. Mizuguchi, Z. Tao, J.C. Rasmussen, G. Ishikawa, T. Terahara, H. Onaka, D. Tanimura, H. Kodaka, A. Oota, K. Tatsumi, C. Sato, T. Yakihara, M. Wada, H. Matsuura, A. Miura, "Design Optimization of 40 Gb/s RZ-DQPSK Transceiver for High OSNR and PMD Tolerance under Fast Polarization Changes", ECOC 2007, P064.

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。15年度のプロジェクト開始後、システム検討をおこない、表 4-2-1-1 にまとめた機能・特性を目標として開発を進め、スイッチ構造の決定、モジュール試作と検証、特性の安定化や製造性等の製品化に向けての技術の完成度を向上を推進してきた。

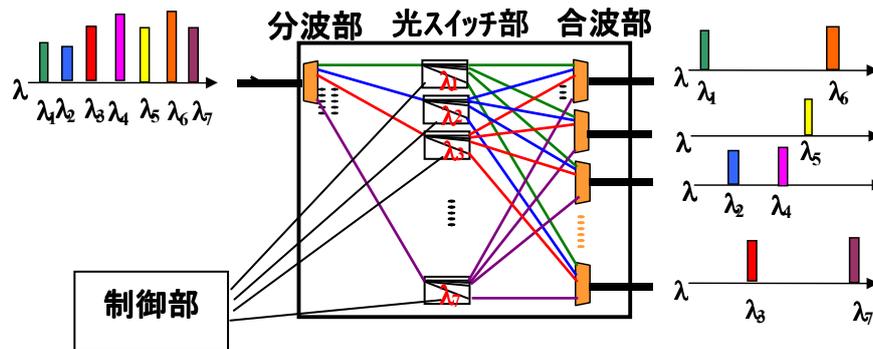


図 4-2-1-1 波長選択スイッチの機能ブロック

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バンド(1573.71 - 1606.60 nm)	
波長間隔	100 GHz	
波長数	40 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	
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: < -44dB	
挿入損失	< 6 dB	
光パワー可変範囲	> 6 dB	
位相リップル	<4 mrad (rms)	
応答速度	< 3 ms(制御時間含む)	

- 機能: 1 × N (N ≥ 4) の光スイッチ、光パワーレベル調整機能

光ハブに必要な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の結果を得、1 × N (N ≥ 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

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。

4-2-1-1 モジュール構成の検討

前述の要求をブレイクダウンし、波長選択スイッチの構成、要素部材を検討した。

・1×Nスイッチ光学系

光路を多段で切り替え、1 デバイスで 1×N が構成可能な偏向型のスイッチ光学系(可動ミラー、屈折率の多段制御素子 等を用いたもの)を中心に検討した(図 4-2-1-2)。波長選択スイッチでは波長数分だけアレイ化されたものとなる。レンズの焦点に可動ミラーを配置し、ミラーの角度を変化させる事で入射光の角度を切り替え、光路の切り替えを行う。

・分光光学系

WDM 光を分離する分光光学系の基本構成を図 4-2-1-3 に示す。分光素子(回折格子 等)により、 $d\theta/d\lambda$ の線分散量(波長を分解する能力; 単位波長あたりの偏向角度)で分解した光を、分光素子から焦点距離 f_{sp} の間隔で離れたレンズで平行な光とし、スイッチ光学系へ入射する。ここで、 $\Delta\lambda$ の間隔で並んだ WDM 光を分解し、 f_{sp} の距離を飛ばした時、分離した光の間隔は $s = \Delta\lambda \cdot d\theta/d\lambda \cdot f_{sp}$ となる。

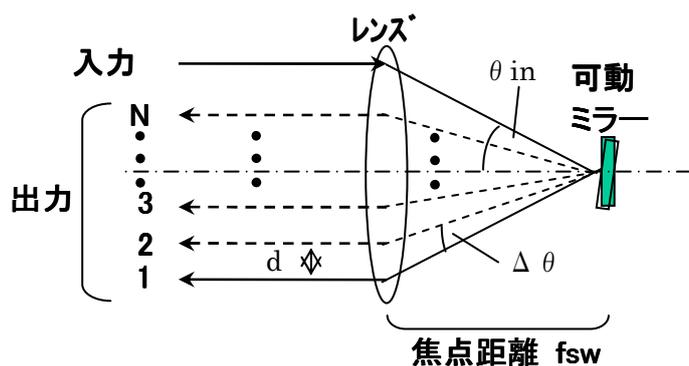
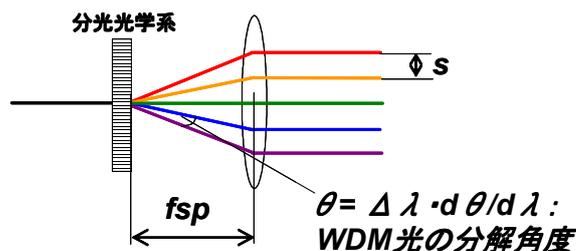


図 4-2-1-2 スイッチ光学系



$$f_{sp} = \frac{s}{\Delta\lambda \cdot d\theta/d\lambda}$$

図 4-2-1-3 分光光学系

以上に示したスイッチ光学系と、分光光学系を組み合わせ、入出力光学系と制御部を合わせたものが波長選択スイッチの基本構造となる。空間型回折格子を用いた例を図 4-2-1-4 に示す。以下、この構造を元に、波長選択スイッチモジュールの構成を詳細に検討する。

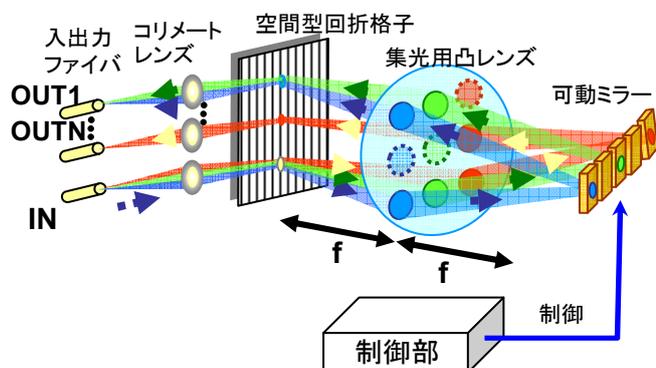


図 4-2-1-4 波長選択スイッチの基本構造 (空間型回折格子を用いた例)

- ①入力ファイバから WDM 光を入射し、コリメート光にする。
- ②入射コリメート光を空間型回折格子で波長毎に分光する。
- ③分光された光を凸レンズで平行にする。
- ④波長毎に所望の経路を取れるように、可動ミラーアレイの角度を個別に制御し、切り替えをおこなう。
- ⑤経路を切り替えられた光を集光用の凸レンズで集約する。
- ⑥空間型回折格子で WDM 光に戻す。
- ⑦各出力ポートのファイバへ入射する。

4-2-1-2 モジュール構成の詳細検討

以上説明してきた機能・特性を実現するため、ポート数の拡大・波長透過帯域の拡大・切り替えの高速化 等に向けた課題、それを解決するための構造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)

複数のポートで1つの回折格子を共有化できる空間型回折格子を分光素子とする構成を採用した。

②狭ポート間ピッチで、低クロストークの光学系(小型化)

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。

③光スイッチ光学系で切り替え可能なポート数の拡大

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。

④波長透過帯域の拡大

図 4-2-1-5 に示すよう、透過帯域はビームのサイズ(径)と MEMS ミラーのサイズの比率で決まる。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、実装時のバラツキや、環境変動、径時変動によるビームの位置ずれの低減について検討し、新規の MEMS ミラーと安定な光学系を開発した。

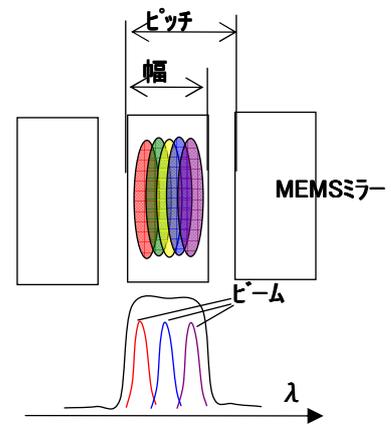


図 4-2-1-5 透過帯域の決定要因

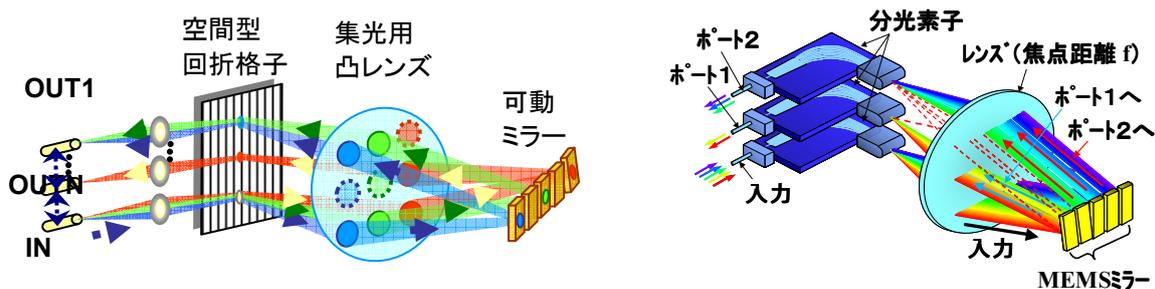
⑤切り替えの高速化

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。

4-2-2 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 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。線分散量の大きい分光素子として図 4-2-2-1 に示す、空間型回折格子と導波路型回折格子との比較検討をおこない、適用する候補を決定した。



(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 4-2-2-1 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い(表 4-2-2-1)、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判断した。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。

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 分光光学系の構造選定

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。Blaze型、Hologram型、Echelle型等の反射型、VPG型、E-VPG型等の透過型、さらにはプリズムと組み合わせて分散角度を高めるGrism型について、透過(反射)損失、偏波依存損失(PDL)、分光能力の評価とコスト比較をおこない、波長選択スイッチへの適用性を検討した。波長分解能力を大きくできる領域での入出射角の切り分けと、低PDL特性から透過型の回折格子の適用が最適と判断した。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が、量産性、部材の入手性の課題が有り、通常の透過型回折格子を2段組み合わせて分光能力を拡大する構造を選択した。

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

スイッチ光学系として、図4-2-3-1に示すレンズとMEMSミラーを組合せた構成を選択し、詳細検討をおこなった。

- ・小型の光学系

レンズ-MEMSミラー間を可能な限り短くする光学設計

→ 狭いピッチのMEMSミラーの実現

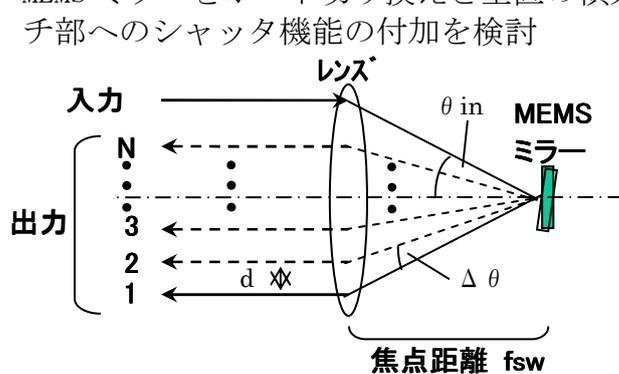
- ・ポート数を多くとれるスイッチ光学系

振り角 θ の拡大: 回転可能な角度を拡大できるMEMSミラーの構造を検討

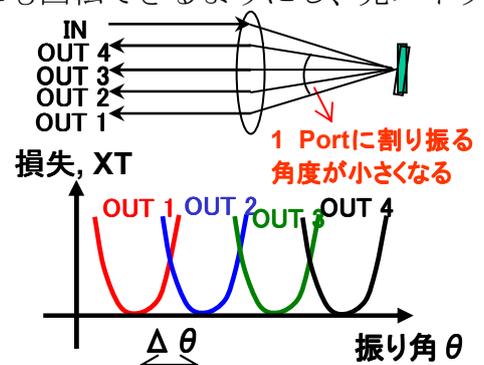
ポート間角度 $\Delta\theta$ の縮小: 隣接ポート間クロストーク(VOA機能実現のためのオフセットも考慮)を考慮し、MEMSミラー上でのビーム径を設計

- ・ポートを横断する際のダイナミッククロストーク対策:

MEMSミラーをポート切り換えと垂直の横方向にも回転できるようにし、光スイッチ部へのシャッタ機能の付加を検討



(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 波長選択スイッチ用 MEMS ミラー

(1) MEMS ミラーへの要求の整理

波長選択スイッチに要求される機能と、それを実現するために MEMS ミラーに要求される機能・特性を表 4-2-3-1 に整理する。大きな振り角、連続動作、アレイ化の点から、この要求を最も満たせるのはトーションバー型の 3D-MEMS ミラーである。この構造でアレイ方向を軸とした振りを実現する構造は図 4-2-3-2 に示すものとなる。トーションバーとミラーが同列に並ぶ配置となるため、⑤狭ピッチ、⑥高いミラー幅/ピッチ比率とするにはトーションバーの領域がとれなくなる。その課題を解決するために、15年度にトーションバーを中心としてミラー部と駆動部を分ける片持ち型の MEMS ミラー構造を考案した。さらに回転角を増やすため、17年度に図 4-2-3-3 に示す垂直櫛歯の方向を変え魚の骨のように回転軸(x)と並行に配置した新規の櫛歯構造を開発し、駆動力の増加を図った。

表 4-2-3-1 MEMS 可動ミラーへの要求の整理

要求される機能	MEMS ミラーに要求される機能・特性
波長数最大 80	①ミラーのアレイ化
1×Nのスイッチ	②ミラーのアレイ方向を軸とした振り ③大きなミラー最大振り角
光パワーレベル調整機能	④アナログ動作(連続動作)
スイッチの小型化	⑤狭いアレイ間隔(ピッチ)
フラットな波長帯域	⑥高いミラー幅/ピッチ比率

トーションバー 及び 保持部が狭ピッチ、大有効面積を阻害

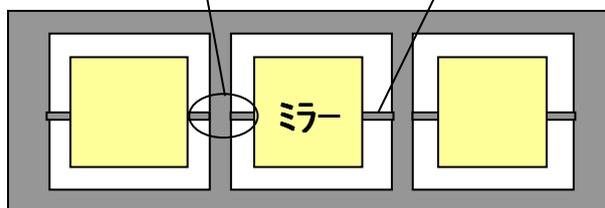


図 4-2-3-2 アレイ方向とテイルミラーの構造

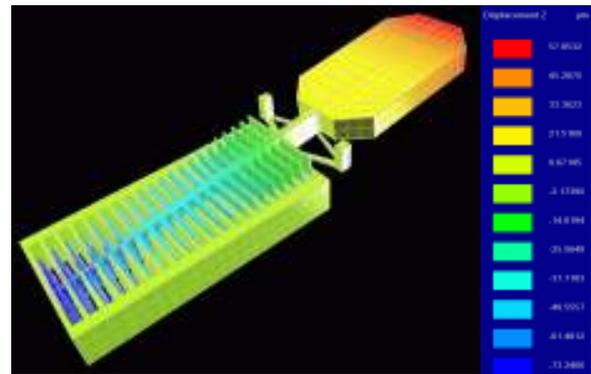


図 4-2-3-3 設計した垂直櫛歯ミラー構造

4-2-3-3 2軸動作ミラーの構成検討

ミラー動作の2軸化にあたり、当社で別途開発を進めている3D-MEMSスイッチの構造(図 4-2-3-4)を参考にした。MEMS ミラーを2軸動作させる場合は、ミラーを支え、動作させる内部フレームをさらにトーションバーで支え、動作させる外部フレームの2重構造をとる必要がある。MEMS ミラー稠密度の制約から、波長選択スイッチでは、ミラーの横方向に十分なサイズのフレームと、ミラーを動作させるための櫛歯アクチュエータを配置する事ができないため、ミラーの上下方向に櫛歯アクチュエータを配置する構成を検討した。その構成を図 4-2-3-5 に示す。

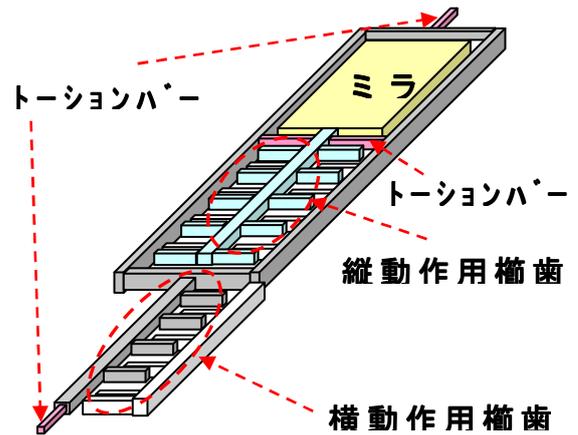
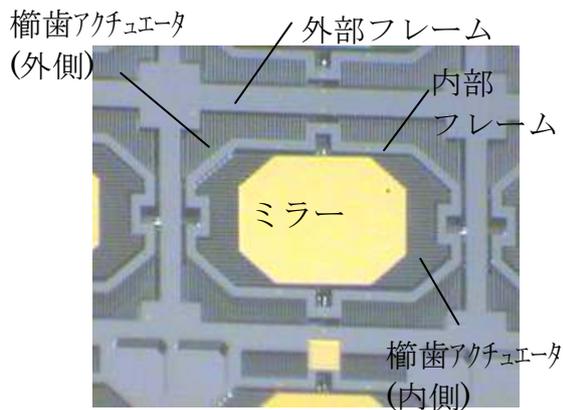


図 4-2-3-4 3D-MEMSミラーの構造

図 4-2-3-5 2軸駆動MEMSミラーの構造

4-2-3-4 試作ミラーの評価結果

試作したミラーを図 4-2-3-6 に示す。2軸の動作特性を評価した結果、縦方向(ポート方向)は 6° の振り角、横方向(シャッタ方向)は 2.5° の振り角と目標どおりの特性が得られた(図 4-2-3-7 に示す)。

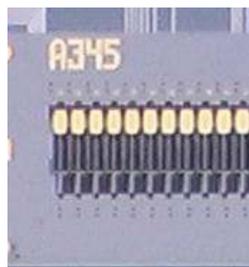


図 4-2-3-6 試作した2軸駆動MEMSミラー

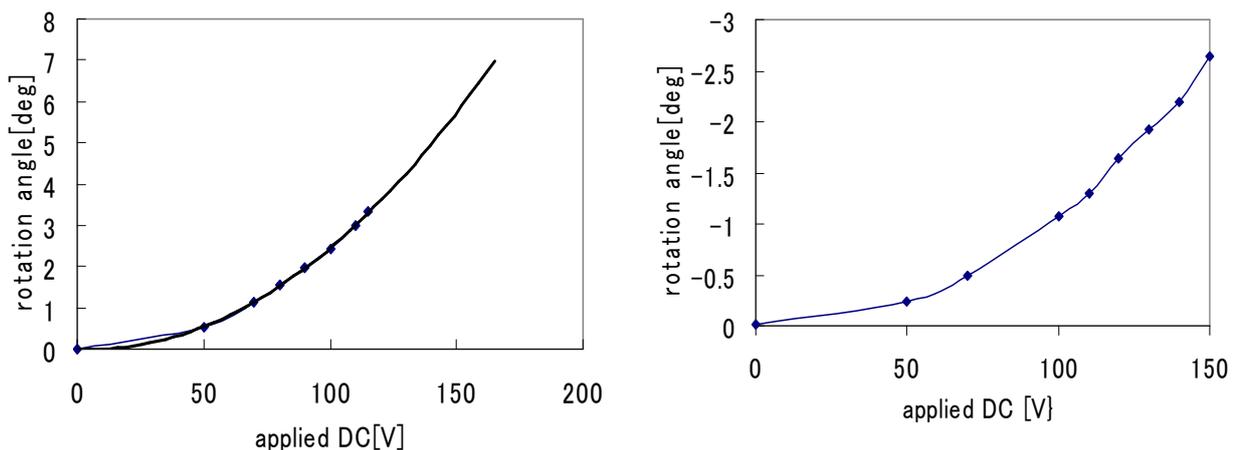


図 4-2-3-7 試作したMEMSミラーの動作

4-2-3-4 ミラー作製プロセスの改善

波長選択スイッチではミラーアレイのうち1ミラーでも動作しない不良品が混在していると、対応する波長が有効な伝送信号として使えないことになる。すなわち全数のミラー動作が必要であり、実用化に向けてプロセス改善について開発を行った。図 4-2-3-8 に試作途中のウェーハを示すとおり、4インチウェーハを使用することで図 4-2-3-6 に示した

MEMS ミラーチップが 57 チップ取得可能となった。例えばウェーハ中に均一に 57 個欠陥があると、このウェーハからは完全なチップが取得できないことになるため、清浄な設備・雰囲気ですべてのウェーハから全数動作チップが取得可能であった。実験の結果、実際の欠陥の発生はランダムに偏りを伴うことから、ウェーハ内に 100 個程度まで欠陥数をコントロールすることが実用化の条件となることを試作実験により検証できた。

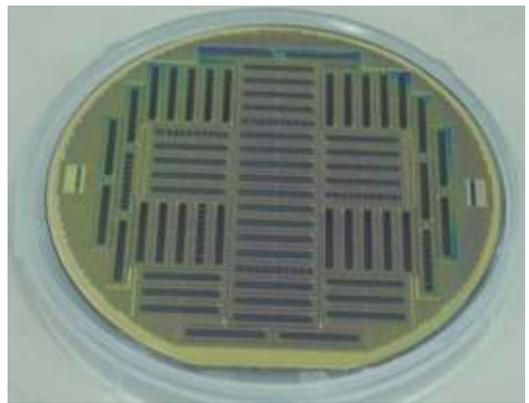


図 4-2-3-8 MEMS 試作途中のウェーハ

4-2-4 モジュール化開発

4-2-4-1 モジュール化での課題

前節までに説明した要素技術を組み合わせ、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、解決すべき課題抽出と対策検討をおこなった。

- 振動・衝撃性の向上
往復で 60 cm の空間伝搬する光学系であり、光学系の微小のずれで波長特性、損失特性に悪影響を与える。
- 高減衰時の損失変動
高減衰時に角度トレランスが悪化し、振動・制御部の駆動電圧出力の微小な揺れ等で MEMS ミラーの微小振動で損失量の変動が発生
- 温度変動による影響
環境温度の変動による電圧、筐体の歪等の影響により、損失の変動が発生

上記は、ビームの横ずれによる波長特性のシフトと、高減衰時の MEMS ミラーの角度変化による損失変動に大別され、この 2 点を主眼に制御系、機構系の改良をおこなった。

ビームの横ずれは光部品、ホルダ等の機構系の位置、角度が変化する事で幾何学的に発生するものである。この点は、光部品の経時的な変形、ホルダとの接着部の経時劣化、外的要因による機構系(特に光部品を固定する光学フレーム)の変形の 2 点を抑制する検討をおこなった。

MEMS ミラーは、MEMS を駆動する電圧の変動、物理的な力の印加で角度が変動する可能性がある。この変動を抑制するため、駆動電圧の安定化、制御回路のノイズの低減、ダンパによる外部からの力の遮断の検討をおこなった。

4-2-4-2 機構系の検討

すべての光部品を固定する光学フレームの歪、捻じれは光部品の位置・角度変動の最大要因であり、温度変動、外部からの振動に対しての変動量を低減する検討をおこなった。有限要素法による構造解析シミュレーションにより光学フレームの変形モードと固有振動を導出し、実使用環境(特に振動・衝撃)を考慮して数種の構造比較をおこなった結果、ふた・底板追加の効果が最も高いとの結果を得た。この結果を反映させた光学フレームを作成し、波長選択スイッチモジュールに適用、その効果の検証をおこない、荷重に対する変形量は 30um から最悪でも 1.2um となり 30 分の 1 に改善し、波長ずれは x 方向で 9GHz から 0.6GHz へ、y 方向で 18GHz から 0.3GHz へと大幅に低減する事を実証した。

4-2-4-3 制御部の検討／試作検証

波長選択スイッチの制御部には、40～80 の MEMS ミラーを大回転角で動作させるための 100～200V の出力電圧を、連続的 (VOA 動作をさせるため) に、数ms の高速動作で出力できるものが要求される。それらに対応するため、下記の構成での制御部を開発した。

①外部との電気インターフェース

高速動作のため DPRAM (Dual Port RAM) インターフェースを採用した。

②各ポートへ切り替えるための波長毎のMEMSミラーの駆動電圧を記憶する電圧テーブル部

③外部からの制御信号に則して、駆動電圧テーブルから所望のパスを設定する電圧値を読み込み、MEMSミラーに印加する電圧を決定する制御部

FPGA(Field Programmable Gate Array)を用い、簡易に制御方法を変更できるようにした。

④制御部からの指示に従い、MEMSミラーに電圧を印加する駆動部

100～200V の出力電圧連続的に出力する部分には高電圧アンプと D/A コンバータを集積化した IC を用い、回路の小型化を図った。

以上の中で、MEMSミラーの駆動電圧を安定化させるには、③制御部で選択する駆動電圧の精度向上と、④駆動部で印加する電圧の経時変動、ノイズの低減が重要となる。各ポート、波長毎のMEMSミラー駆動電圧は、電子部品の特性バラツキ、MEMSの特性バラツキ、実装バラツキ等のバラツキや、使用環境によって異なるものとなる。そのため、モジュール組立後に、各ポート、波長、温度の組合せの最適電圧を求め、その値をテーブルに書き込む方式を採用した。各バラツキ、環境変化に対して、安定な駆動電圧出力を実現する事が可能となる。また、回路で発生する微小ノイズでもMEMSミラーの角度ゆれが発生し、損失変動へとつながる。そのため、回路の最適化をはかり、ノイズの低減をおこなった。

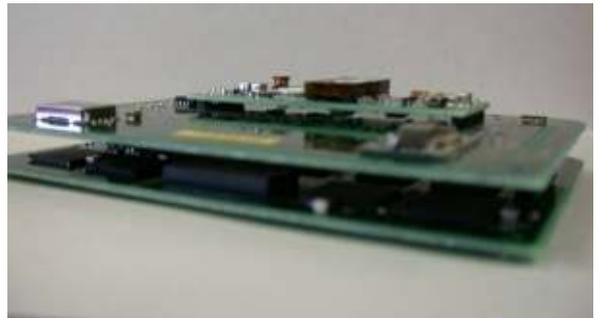


図 4-2-4-1 試作した制御回路

4-2-5 波長選択スイッチモジュールの試作

以上の検討で得られた結果を元にしてスイッチモジュールの原理試作 (波長間隔: 100GHz、4×1)をおこない、特性の確認と、制御アルゴリズムの検討をおこなった。試作したモジュールの外観を図 4-2-5-1 に、代表的な波長特性例を図 4-2-5-2 に示す。50GHz 以上の透過帯域、6dB 以下の損失を確認した。また、図 4-2-5-3 に示すように、動特性を評価した結果、5ms の切り替え速度を確認した。制御方法の点から、目標の 1ms は到達できていないが、MEMSミラーの共振周波数は 1kHz を超えており、1ms の反応速度の実現は可能と考えている。



図 4-2-5-1 波長選択スイッチモジュール外観

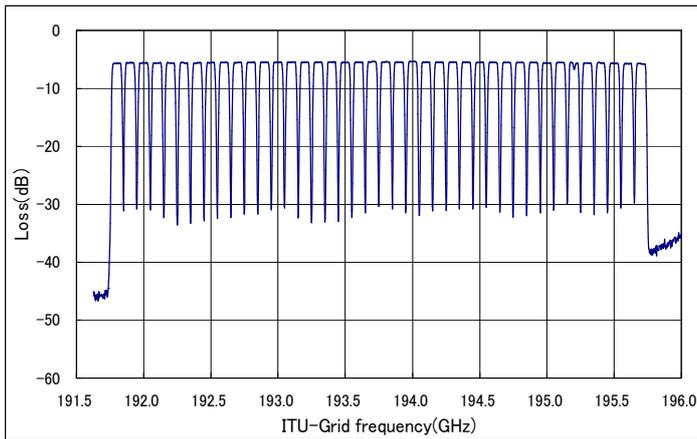


図 4-2-5-2 波長特性例

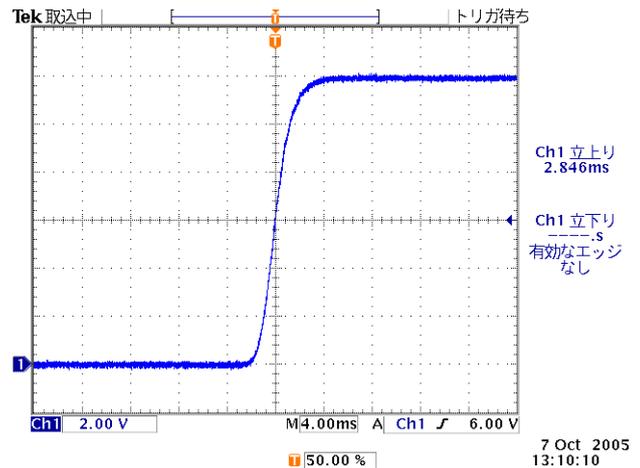


図 4-2-5-3 動特性例

上の検討で得られた結果を元にして、波長選択スイッチモジュールの改良試作(波長間隔: 100GHz、 4×1)をおこなった。代表的な損失特性例(4ポート、40波長の特性)を図4-2-5-4に示す。全波長、ポート、温度範囲で安定した特性が得られ、目標の6dB以下の損失を実現できる事を確認した。光減衰の動作をおこなった結果を図4-2-5-5に示す。10dBまでは劣化の無いスペクトルが得られ、目標の6dB減衰が可能である事を確認した。

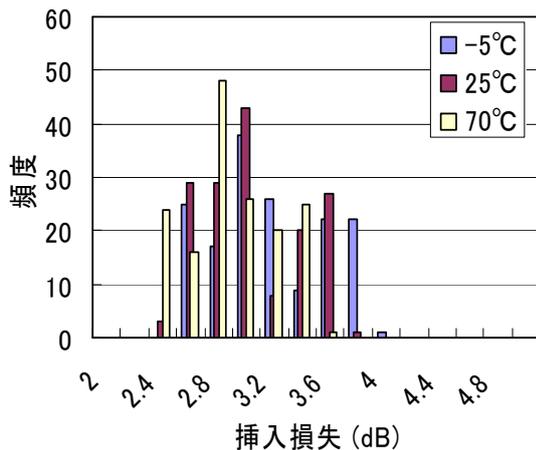


図 4-2-5-4 損失特性

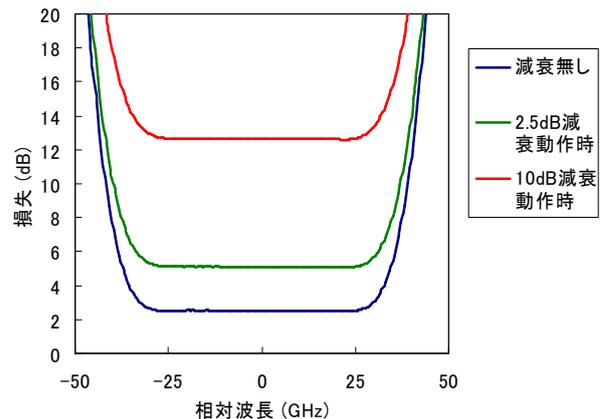


図 4-2-5-5 VOA動作

4-2-6 製品化に向けた検討

以上、波長選択スイッチの要素技術の検討、モジュール構成の決定、設計/試作/評価の繰り返しによる特性改善をおこない、システム要求を満たすモジュールを実現できた。その結果を活かし、波長選択スイッチの製品化を進めるに当たり、以下の検討を進めた。

4-2-6-1 信頼性の検証

光通信に使用する部材には20年と長い期間の動作を可能とするため、厳しい信頼性規定をクリアする必要がある。条件としては、高温高湿、ヒートサイクルといった長期的な観測が必要な試験から、振動・衝撃試験といった短期の試験まで多数ある。本来であればそれぞれの試験毎に十数台のモジュールの試験が必要であるが、費用の問題もあり、今回は実際にモジュールを用いた試験と、個別の光部品を用いた試験を組み合わせで判断した。

長期的な変動に対する試験は、組み立てたモジュールでの高温高湿、熱サイクル試験と、最も動く可能性の高い光部品の接着部の高温高湿試験・熱サイクル試験(試験用の機構部品に光部品を接着したサンプルを用いたもの)をおこなった。個別部品の試験は部品の位置・

角度ずれから光ビームのずれを計算し、特性の変動量を導出した。測定はより再現性を高めるため、高精度の形状測定器で部品の形状変動を測定し、角度・位置ずれを求めた。モジュールでの試験結果を図 4-2-6-1 に示す。個別部品の試験を合わせて、要求される仕様を満足する事を確認した。

振動・衝撃試験は試作したモジュールを用いておこなった(図 4-2-6-2)。図 4-2-6-3 に示す結果のよう、信頼度を確認できた。

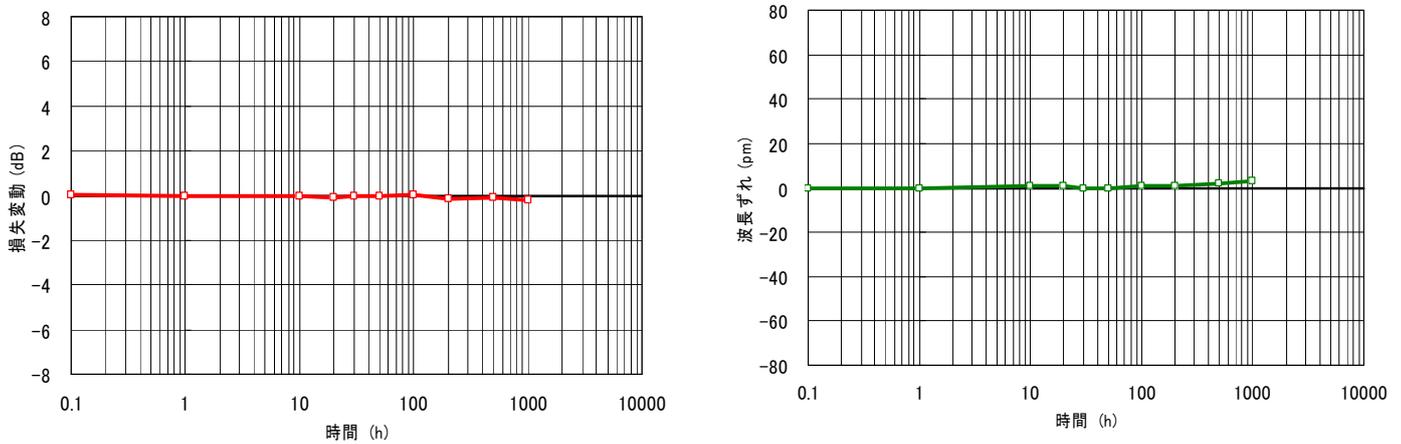


図 4-2-6-1 モジュールの高温高湿試験の結果(一例)

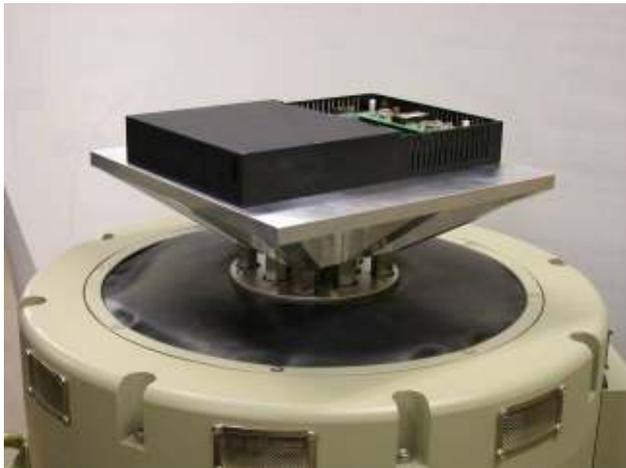


図 4-2-6-2 振動・衝撃試験の様子

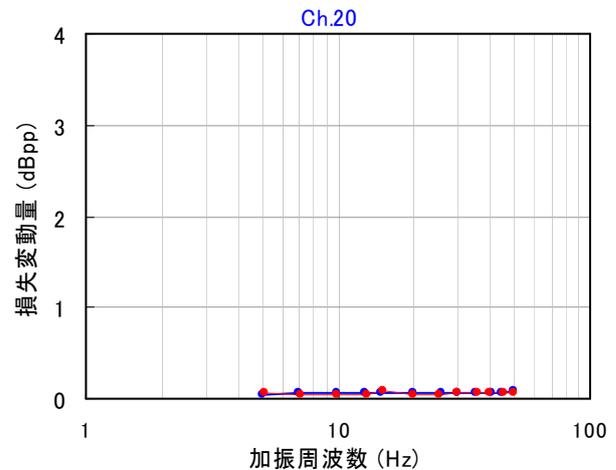


図 4-2-6-3 モジュールの振動試験結果(一例)

4-2-6-2 環境安定性の向上

上述の信頼性面とも関係するが、0~70℃の温度環境での動作保証、外部から振動・衝撃に対する考慮が必要である。特に敏感な特性である、波長ずれと減衰時の損失変動に対し次の対策を進めた。

(波長ずれ対策)

波長ずれは MEMS ミラーに入射する光の光軸ずれに起因するものであり、光学フレームの歪、光部品固定部のずれ等に起因する。光学フレームは有限要素法を用いた振動解析をおこない、舟型の構造を採用し、安定な光学ファブリック部の実現をはかった。

(損失変動対策)

損失変動は MEMS ミラーの角度変動による光軸ずれも影響するため、安定な光学系に加えて MEMS ミラーの角度の安定化もはかる必要がある。MEMS ミラー角度変動の要因としては

MEMS の材料であるシリコンの合成の温度特性と駆動する電子回路の温度特性が主要のものである。この対策として駆動電圧をフィードフォワード制御して安定化を図る事とした。駆動電圧のテーブルを数点の温度に対して作成し、そのテーブルからの保管処理で最適の駆動電圧を決定して MEMS ミラーを動作させる事で解決した。

4-2-6-3 量産性の向上

波長選択スイッチの光学部は多数の光部品の集合体であり、組立時にはそれら部品の高精度な調整が要求される。この時、回折格子で波長毎に分光した空間伝搬光を同時に調整する必要がある。試作モジュールではこの調整を個人スキルに負うところが多かったが、量産に向けては、誰でも容易に組み立てられる環境が必須となる。その対応として、光学部の組立の自動化の検討を進めた。コリメータの自動組み立ては、目標とする数ミリ度の出射角度精度を実現するため、出射角度を位置変換しての角度調整と、損失のモニタを組み合わせて最適のレンズ実装位置を決定する方法を開発した。光学ファブリックは、MEMS 実装位置でのビーム位置のモニタと折り返し光の結合損失のモニタを併用し、各光部材の最適実装位置を決定する自動機の開発を進めた。

また、波長選択スイッチモジュールの初期値テーブルにおいて、各波長、ポート毎に3温度の初期値を必要とする方式としているが、最適結合の MEMS 角度を探索し、その値を初期値とするため、その取得に非常に長い時間を必要としている。工程の短縮のため、複数波長を並行してモニタする試験系を開発し、探索の処理の並列化による高速化をおこなった。

4-2-7 まとめ

プロジェクトを開始した15年度にシステム検討、モジュールの基礎検討をおこない、必要な機能・特性を明確化し、16年度にコア部品の詳細検討、光学系設計技術の開発を進め、透過型回折格子と MEMS ミラーを組み合わせたスイッチ構造の決定、原理試作による動作確認をおこなった。17年度に光学設計/光学部品選定の最適化と実装/制御/駆動部を詳細検討によるモジュール試作と検証を、18年度は特性の安定化や製造性の向上を図った。19年度はこれらの成果を踏まえ、製品化に向けて技術の完成度を向上させるべく、モジュール改良(機構系、制御系の改良)、MEMS チップのプロセス・構造の改良、信頼性の向上をおこない、最終目標に対し、100%の達成度を得た。

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

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り替え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を開発する。15年度のプロジェクト開始以降、MEMSを補償可変機構に用いたMEMS+マイクロオプティクス型、PLC型、エタロン型を試作・検討し、損失・コストの点からエタロン型が最適と判断し、詳細検討を進めた。

表 4-3-1-1 波長分散補償モジュール 目標特性

項目	目標値		備考
	10 Gbit/s用	40 Gbit/s用	
波長帯	CバンドもしくはLバンド		
信号チャンネル間隔	100 GHz		
信号チャンネル数	40 ch		
補償チャンネル数	1 ch (チャンネル毎補償)		
挿入損失	< 6 dB		
透過(損失)帯域幅	> 40 GHz (FWHM)、1.5次ガウシアン		直線近似分差引後
損失傾斜	< 0.067 dB/GHz (< ±8.3 dB/nm)		@ < ±3 GHz
一次波長分散可変範囲	-400 ~ +400 ps/nm		
一次波長分散可変ステップ	< 80 ps/nm	< 20 ps/nm	
群遅延(位相)帯域幅	> 30 GHz (全幅)		
位相リップル	< ± 40 mrad		@ < ±15 GHz
偏波依存性損失	< 0.3 dB		
偏波モード分散	< 1 ps		
内部光クロストーク	< -40 dB		
応答速度	遅くて可 (半固定)		

4-3-2 波長分散補償方式の比較

4-3-2-1 波長分散補償方式

波長多重された光信号の波長分散補償の方式としては、図 4-3-2-1, 2 に示す「分散スロープ補償方式」と「個別チャンネル補償方式」2通りが考えられる。

分散スロープ補償方式とは、分散スロープと呼ばれる伝送路ファイバが有する波長分散量のチャンネル間の連続変化に応じて、隣接チャンネル間の分散補償量を連続的に変化させ補償する方式のことを呼ぶことにする。個別チャンネル補償方式とは、補償器が設置されるノードにおいて、波長多重される個々のチャンネルが有する波長分散を隣接チャンネルに対する補償量と相関なく独立に補償する方式のことを呼ぶことにする。

本テーマの光スイッチノードに最適の方式を決定するため、双方の方式についてそれぞれ、PLC型、MEMS型、エタロン型の検討をおこなった。

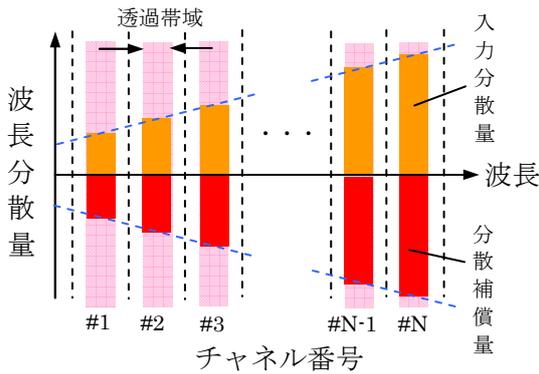


図 4-3-2-1 分散スロープ補償方式

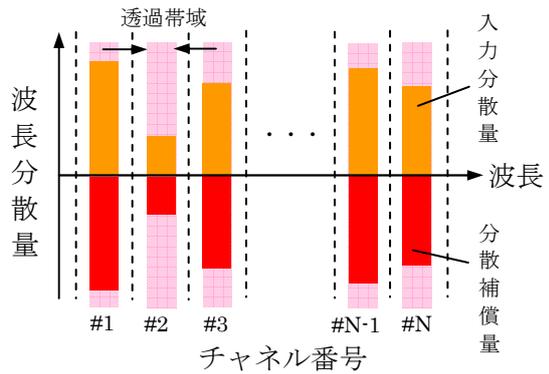


図 4-3-2-2 個別チャンネル補償方式

4-3-2-2 PLC型

PLC型は一括スロープ補償方式の補償器として検討した。その構成は図 4-3-2-3 に示すリング共振器型 All-Pass フィルタを基本としている。試作したチップを図 4-3-2-4 に示す。放射周回損失を抑えるために、曲率半径が大きく出来る FSR10GHz にて試作した。特性を図表 4-3-2-5 に示す。シミュレーションによるフィッティングから周回損失が 0.8dB/周発生していることが判っている。これより、分散補償量は多段化により十分得ることはできるが、所望の波長間隔実現に必要な高 Δ プロセスを適用した場合には、さらに周回損失は増加する方向であり、実用にかなう透過帯域を得るためには、周回損失の低減が大きな課題である。動作速度に関しては、チップ単体では熱光学効果により 3ms 以内で動作する。

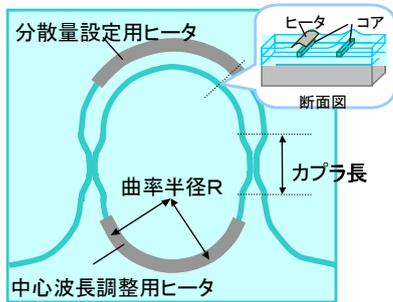


図 4-3-2-3 リング型 All-Pass フィルタ

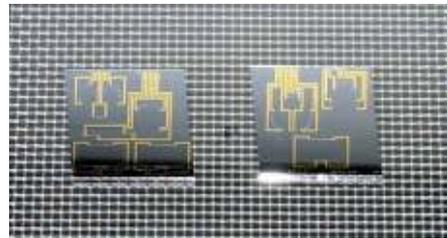


図 4-3-2-4 試作チップ

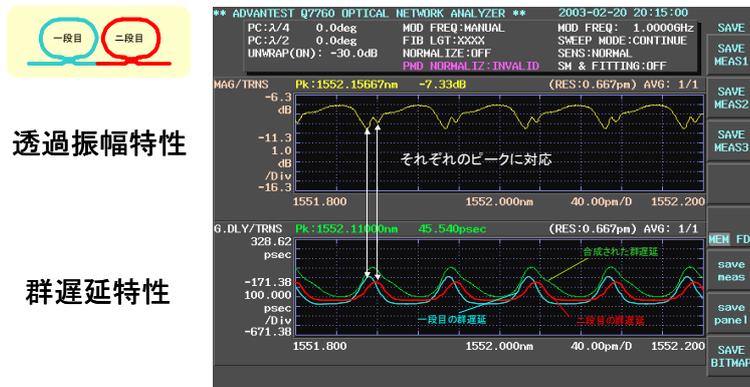


図 4-3-2-5 試作チップの透過振幅特性 (上) と群遅延特性 (下)

4-3-2-3 MEMS+マイクロオプティクス型

MEMS+マイクロオプティクス型は個別チャンネル補償方式の補償器として検討した。図4-3-2-6に基本構成を示す。本補償器は当社開発済のVIPA可変波長分散補償器と同じ分散補償原理であり、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設置し、個別チャン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。

図4-3-2-7に一次試作モジュールを、図4-3-2-8にMEMSミラー振り角1度での補償特性を示す。試作により120ps/nmの補償量の変化を確認した。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。補償量は、MEMSの振り角の拡大、3Dミラーの平行移動(VIPAにて開発済)により達成見込みであるが、低損失化が大きな課題である。動作速度に関しては、可変機能が副課題イと同じMEMSデバイスを適用するため副課題イと同等の可変速度<10msとなる。

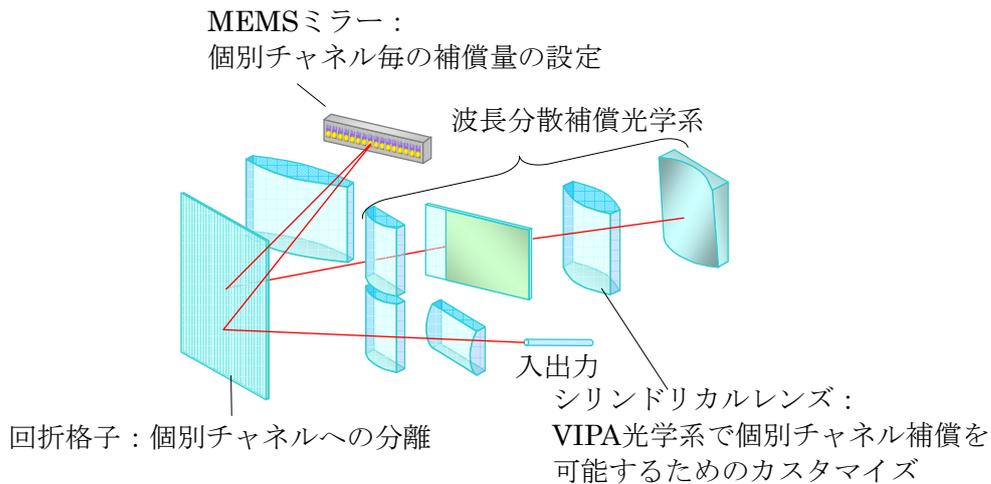


図4-3-2-6 MEMS+マイクロオプティクス型個別チャンネル波長分散補償器

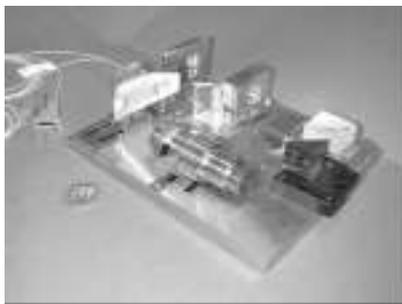


図4-3-2-7 試作モジュール

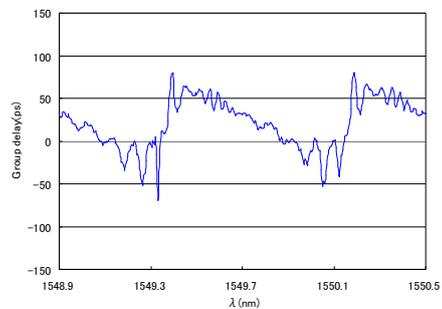


図4-3-2-8 群遅延特性

4-3-2-4 エタロン型

エタロンの一回反射当りの損失はPLCに比べ非常に低損失であり、PLC型での帯域、FSR等の問題解決が期待できるため、反射率に波長依存性と入射角依存性を有するエタロンを用い、エタロンへの入射角度の変化により、分散値とスロープ値を可変する一括スロープ補償方式の開発を進めたが、調整、制御方法等の課題があり、補償量可変時のチャンネル間隔変化の低減、単チャンネル可変量および帯域の確保をポイントとして個別チャンネル補償型への展開を行った。この構成(図4-3-2-9)では、同一条件下での一枚目のエタロンと二枚目のエタロンとでフィネス(群遅延特性の尖度)の異なるものを用い、エタロンを平行配置しエタロン間で直接多段化する。回転軸を最初の入力点にすることにより、ミラー位置の光信号の位置は回転角により変化するが、入出力位置は変化しない構成としている。

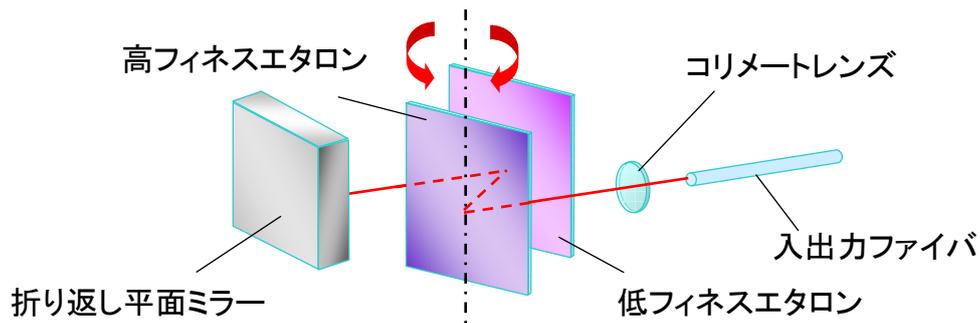


図 4-3-2-9 平行配置されたフィネスの異なるエタロン

図 4-3-2-10 に分散補償に用いる反射型エタロンのパラメータと特性との関係を示す(昨年度の再掲)。反射型エタロンは、二つの反射膜にて構成されており、一方の膜が反射率100%に近く、他方が、それより低い反射率となっている。中心波長間隔と中心波長は当該2膜の光学距離(エタロンの厚み)にて設定され、分散補償量の大きさを決める群遅延量は低い反射率の膜の反射率で設定される。制御を含めた詳細設計に必要なため、これらのパラメータ同士の関係を、以下に簡単に説明する。

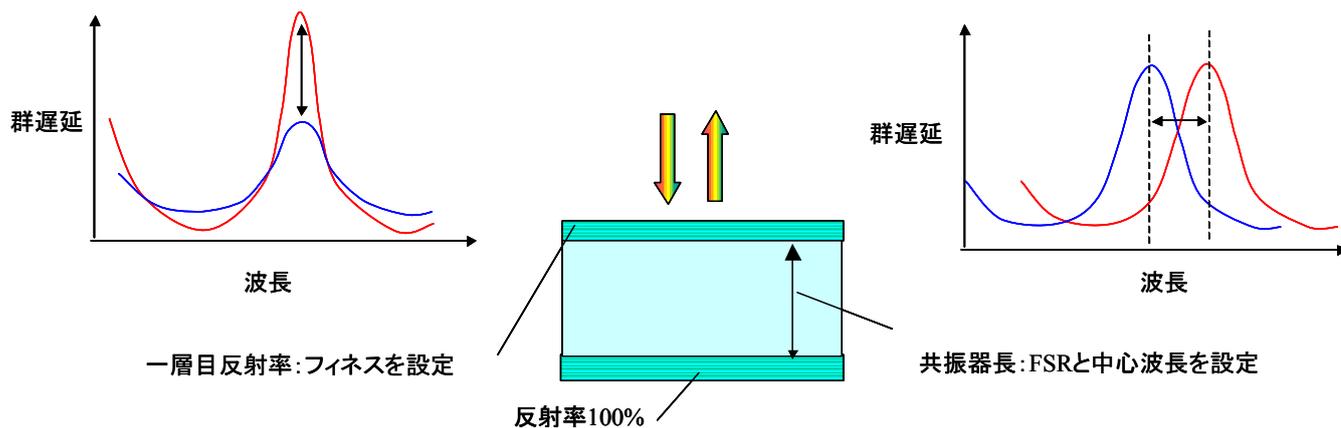


図 4-3-2-10 反射型エタロンのパラメータと特性との関係 (再掲)

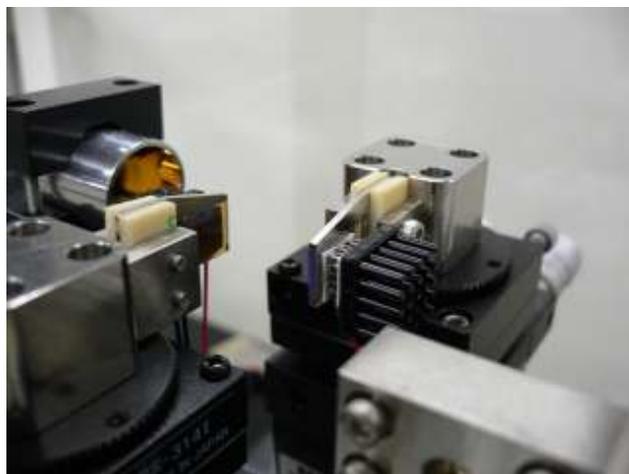


図 4-3-2-11 エタロン型分散補償器試作モジュール

試作をおこない(図 4-3-2-11)、基本となる機構要素の動作を確認し、1 モジュールあたりの可変量として 700ps/nm を達成した。試作モジュール群遅延特性を図 4-3-2-12 に、透過特性を図 4-3-2-13 に示す。中心波長 1546.92nm での群遅延特性が-400ps/nm~300ps/nm 可変できること確認、中心波長変化を抑え補償量を可変にする技術を確認した。

透過特性については、-300ps/nm~200ps/nm において、挿入損失は 2dB 改善し、損失傾斜等は満足することができた。-400ps/nm, 300ps/nm で損失傾斜が拡大しているが、これは制御温度の変化により、結合ずれが生じたためと考えている。

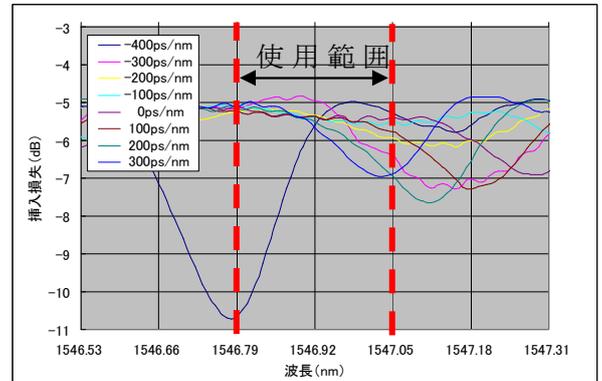
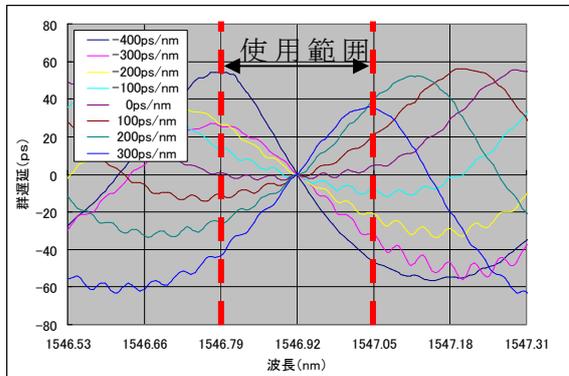


図 4-3-2-12 試作モジュールの群遅延特性

図 4-3-2-13 試作モジュールの透過特性

4-3-2-5 方式の比較

以上、本節で示した 3 種の方式について得失の検討をおこない(表 4-3-2-1)、本テーマの光スイッチノードに最適のものはエタロンを用いた個別補償型と判断した。

表 4-3-2-1 分散補償器 3 構成の比較

	PLC 型	エタロン型	MEMS 型
分散スロープ補償幅	○	—	○
分散補償幅	○	○	○
動作速度	○	△ (チューニング方式による)	○
損失・損失傾斜	× 損失傾斜大	○	× 損失大
チャンネル間隔(FSR)	×	○	○
小型化	○	○	×
低コスト	△	○	×
主要課題	周回損失低減	チャンネル数拡大 (カテーレス化も可能)	損失低減

4-3-3 製品化に向けた検討

18 年度に試作した分散補償モジュール (Ch. 20 用) の設計を元に、多波長伝送実験用として新たに 2 台 (Ch. 2 用、Ch. 39 用) の特性評価用モジュールの設計と試作を行った。モジュール構成の詳細と制御のノウハウについては 18 年度に報告した通りなのでここでは割愛し、今回新たに採用した損失改善策を中心に述べる。

4-3-3-1 損失の改善

本課題において開発した可変分散補償器のように、反射型エタロンに光が斜めに入射するような光学系では、エタロンの共振器長を変化させると出射される光ビームの位置も変化してしまう。つまり、開発した可変分散補償器では補償量のチューニングにより、挿入

損失（もしくは損失リップル）が劣化してしまう。この過剰損失の発生原理と今回採用した損失改善策について以下で簡単に説明する。

図 4-3-3-1 に示したように入出力面の振幅反射率が r ($R=r^2$) のエタロン（厚さ L ）に光が入射角 θ （屈折角 ϕ ）で入射する場合、反射光の経路はエタロン内部での多重反射の回数に依存して異なり、それぞれ位相が Δ ($\doteq 4\pi nL \cos \phi / \lambda$) だけ異なる。このとき、出力コリメータの位置が x_c であるとする、トータルの光結合効率（振幅）は（1）式のように表せることになる。但し、ここで $\eta(d)$ はコリメータ間の結合効率を表す関数であり、コリメータのビーム半径 W_1 、 W_2 を用いて（2）式のように表せる。（1）式より、エタロンの共振器長変化により、光の結合効率（つまりは損失）も変化することがわかる。

$$A = r \sqrt{\eta(x_c)} - \sum_{m=1}^{\infty} r^{m-1} (1-r^2) \cdot e^{jm\Delta} \cdot \sqrt{\eta(x_c - 2mL \tan \phi \cos \theta)} \quad \dots (1) \text{ 式}$$

$$\eta(d) = \left(\frac{2W_1W_2}{W_1^2 + W_2^2} \right)^2 \exp \left[-\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right] \quad \dots (2) \text{ 式}$$

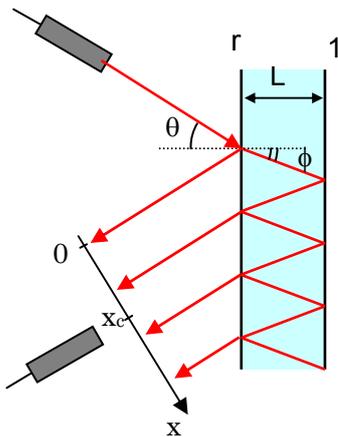


図 4-3-3-1 斜め入射光学系

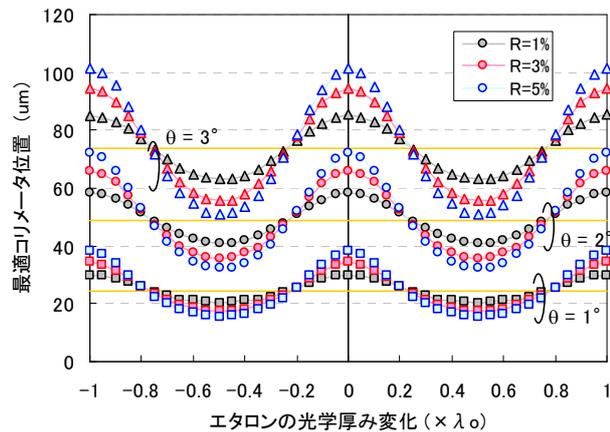


図 4-3-3-2 最適コリメータ位置の変化

今回、上記のような損失劣化を抑圧するため、分散補償器の特性チューニングを行う度に上記の光結合効率が最大となるように光とコリメータの相対意位置を調整するような機構およびアルゴリズムの開発を行った。先の例では、結合振幅 A が常に最大となるように出力コリメータの位置を調整する場合、そのコリメータ位置は図 4-3-3-2 のように変化する。この結果はエタロン 1 枚を使った 1 回反射時の場合の例であるため、実際の分散補償器（2 枚のエタロンを用いた 8 段構成）では、コリメータ位置の変化幅はさらに大きくなる。今回の試作モジュールでは、入出力コリメータの位置を制御する代わりにエタロン間隔を変化させることとし、補償量を変化させるときには、予めメモリに記憶させておいたエタロン間隔の値を読み出し、エタロンの温度や角度と同時にエタロン間隔も最適位置にセットするような制御プログラムを作成した。

4-3-3-2 試作モジュールの特性

今回新たに試作した波長分散補償器モジュールのうち、Ch. 2（波長 1532.681nm）用のモジュールの群遅延特性と損失特性を図 4-3-3-3 に、Ch. 39（波長 1562.233nm）用のモジュールの群遅延特性と損失特性を図 4-3-3-4 に示す。いずれのモジュールも要求される帯域内において $-400\text{ps/nm} \sim +400\text{ps/nm}$ の範囲において分散補償量を変化させることができる。

今回の試作では、昨年に試作したモジュール (Ch. 20 用) よりも光学アライメントと精度が上がったことにより、リップルの非常に少ない群遅延特性が実現でき、また補償量の可変範囲も大きくすることができた (Ch. 20 用では $-400\text{ps/nm} \sim 300\text{ps/nm}$)。さらに、エタロン間隔を狭くした (約 30mm) ことや上記の損失対策により、挿入損失も昨年度よりさらに 2dB 程度改善することができた (typ: 3dB)。

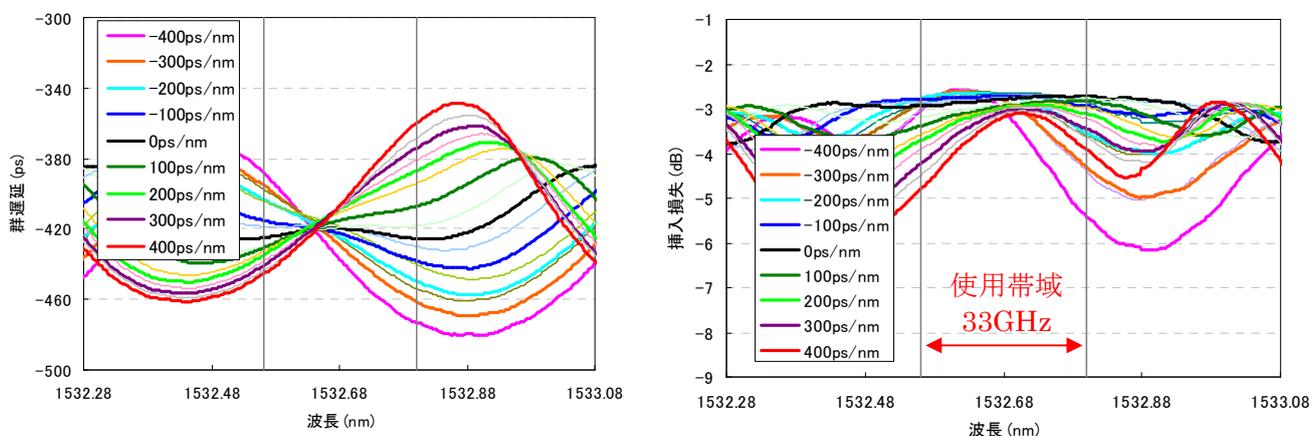


図 4-3-3-3 Ch. 20 用モジュールの静特性

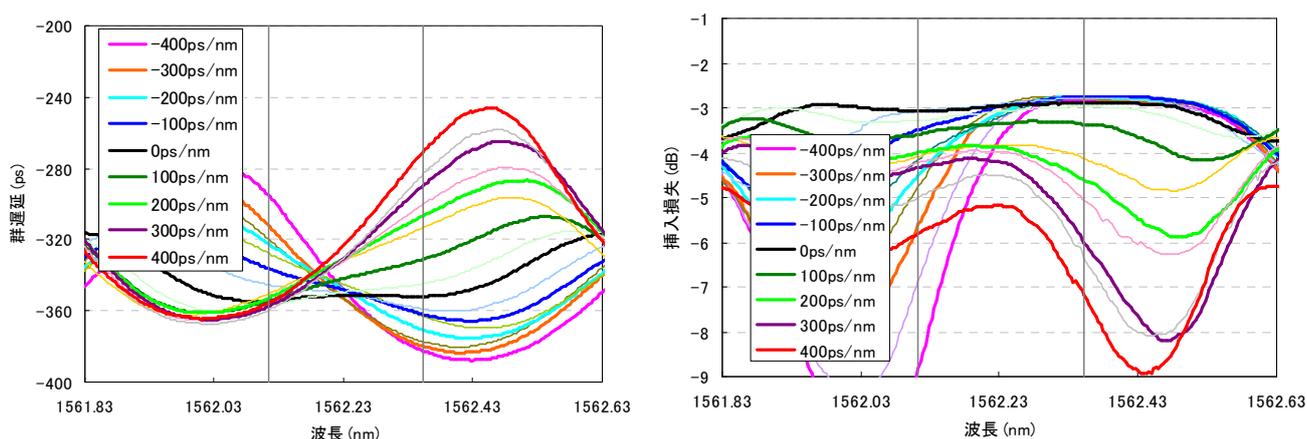


図 4-3-3-4 Ch. 39 用モジュールの静特性

以上の特性により、当初の開発目標はほぼ達成できたため、今回試作したモジュール 2 台と昨年度に試作したモジュール 1 台を用いてシステム評価を行うこととした。

4-3-4 小型モジュールの実現

これまでに開発した設計&制御技術やアライメントのノウハウを生かし、製品化を目指した小型分散補償モジュールの試作を行った。設計のポイントは以下の 3 点である。

- 1) エタロンの温度制御のための放熱対策とその信頼性
- 2) 上記の熱対策を満たした上で出来るだけ小型化
- 3) 安価なモジュールを実現するための組み立ての容易さ

まず、開発時間の短縮のため、光学設計に関しては既に製作した 3 台の実験用モジュールの設計値をそのまま流用することとした。これにより使用する光学部品のサイズとパッケージのおおよその外形が見積もれるため、熱伝導シミュレーションにより両エタロンが熱的に干渉を起こさないような筐体構造を探った。具体的には、筐体の底に溝を彫って 2 つのブロックに分けることで 2 つのエタロンの熱的に隔離すると同時に、エタロン固定用

ジグの表面積を上げることにより放熱効率を高めた。また、熱による筐体の膨張・収縮を抑えるためエタロン保持部はインバー材を用いることとした。さらに、エタロンの角度調整や折り返しミラーの位置調節が容易にできるような、調整ネジを設けるなどの工夫を行ったが、光学アライメントに関しては製品化に向けて残された課題も多い。

以上の結果、 $35^L \times 55^W \times 16.3^H$ mm という小型のパッケージにエタロン分散補償器の機能を詰め込むことに成功した。図 4-3-4-1 に作製したモジュールの写真を示す。

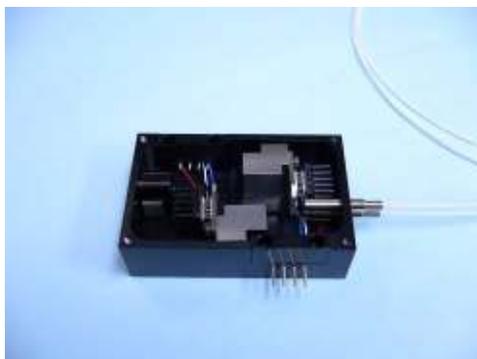


図 4-3-4-1 試作モジュールの外観

4-3-5 まとめ

副課題ウでは、まずメトロコア網に適用する経済的な波長分散補償器の方式・構成について検討し、PLC型、エタロン型、MEMS+マイクロオプティクス型についてシミュレーションと試作を行い、それぞれの基本動作とその特性を確認した。その結果、エタロン型が挿入損失と補償量とのバランスが優れていると判断し、これを本テーマにおける開発デバイスとして選定した。

分散補償器の構成としては、フィネスの異なるエタロンを対向配置して光が2つのエタロン間を複数回往復することにより多段化した可変分散補償器を提案し、エタロンの角度と温度を制御することにより分散補償量をチューニングする方式を採用した。これにより比較的フィネスの低いエタロンを用いて群遅延特性の直線性を保ったまま、 $-400 \sim +400$ ps/nm と比較的大きな補償量の可変範囲を実現することができた。これまでに、3台の評価用モジュールを完成させ、システム実験により良好な補償特性を確認したほか、製品化にむけた小型モジュールも実現した。目標達成度 100%。

今後の課題として、開発した小型モジュールの信頼性を確立するとともに、製造性を向上させて量産体制の構築を目指す。また、分散補償量の可変範囲の拡大や損失特性、リップル特性の改善などの光学系の最適化も進めたい。

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。

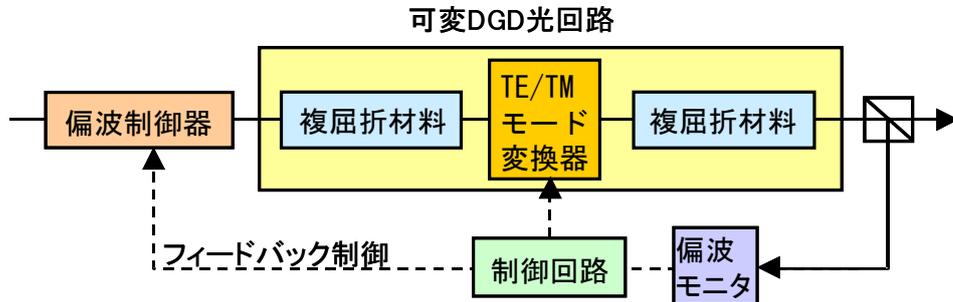


図 4-4-1-1 偏波モード分散補償モジュールの構成図

各要素デバイスの 8ch 以上の機能集積化・アレイ化について、最終目標である表 4-4-1-1 に示す目標特性を達成するとともに、サイズ・価格とも 1/10 以下を目指す。

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バンドもしくは Lバンド
波長間隔	100 GHz
波長数	40 ch
DGD 補償範囲	0 ~ 35 ps
挿入損失	< 10 dB
PDL	< 0.3 dB
応答速度	1 ms

4-4-2 要素デバイスの試作

4-4-2-1 偏波制御器

偏波制御器は、その後段に用いられる可変 DGD 光回路への入力偏波を調整する必要があるため、無限追従、かつ、高速応答が必要となる。高速動作、小型化を考えた場合、電気光学効果を用いた導波路型デバイスが有望であると考え、LiNbO₃ 結晶を用いた構成について検討した。その結果、図 4-4-2-1 に示す2つの構成を考えた。(a)は、原理がすでに報告されている X-cut Z 伝搬の構成であるが、次節の LiNbO₃ を用いた可変 DGD 光回路と伝搬方向(Y 伝搬)が異なるため、集積化は困難である。(b)の構成は、その可変 DGD 光回路との集積化が可能となる構成であるが、波長板挿入による過剰損失が大きく見込まれ、仕様を満足できないと考えられるので、(a)の構成で進めることとした。

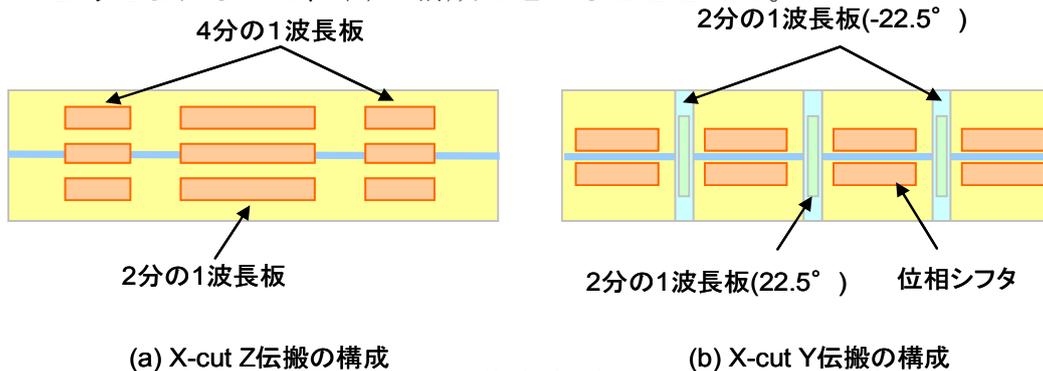
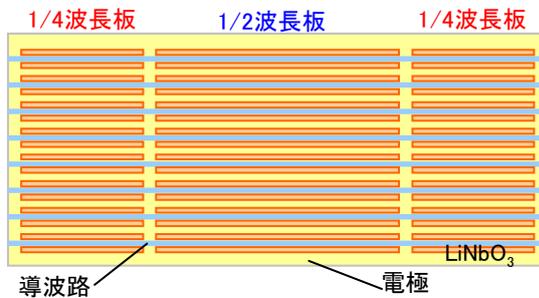


図 4-4-2-1 LiNbO₃ 導波路デバイスを用いた構成

さらに、8ch アレイ化に向けた検討を行った。アレイ化で課題となる低電圧化については、導波路のリッジ構造の導入により、20%の低減を確認し、8ch アレイ偏波制御器の試作を行ったが、挿入損失、PDL のばらつきが見られた。

そこで、それらのばらつきを抑制する為に、導波路幅、導波路形成のプロセス条件の見直しを行った。その結果、図 4-4-2-2 に示すモジュールの試作を行い、図 4-4-2-3 に示すように、挿入損失、PDL ともばらつきの小さい抑えることができ、仕様を満足することができた。



(a) チップ構造



(b) モジュール写真

図 4-4-2-2 8ch 偏波制御器

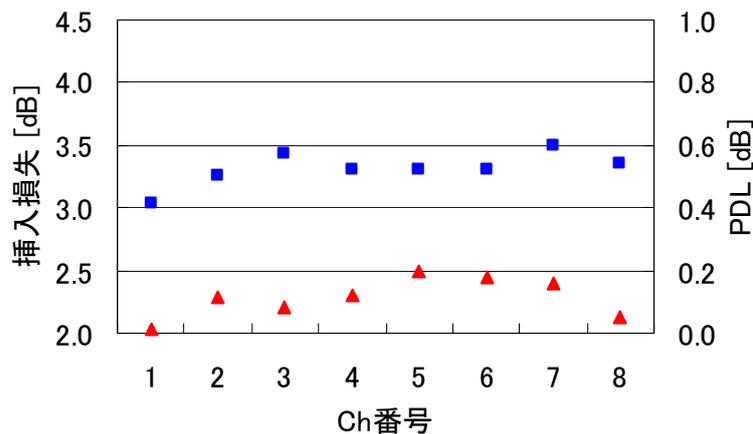
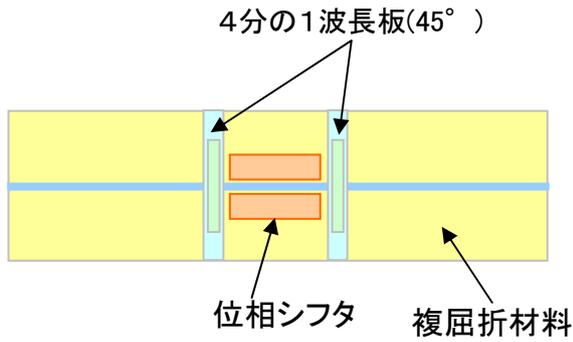


図 4-4-2-3 8ch 偏波制御器の挿入損失、PDL 特性

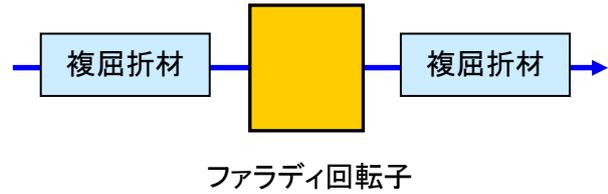
4-4-2-2 可変 DGD 光回路

可変 DGD 光回路は、伝送中に生じた DGD 量を補償するデバイスであり、補償すべき DGD 量としては、表 4-4-1-1 より最大 35 ps である。高速応答については、 μs オーダの応答が必要である。また、4-4-1 節で述べたようにノードの小型化のために、デバイスの小型化、アレイ化、他のデバイスとの集積化が可能な構成を検討する必要がある。

そこで、所要の DGD 量を可変することができ、かつ、高速応答、小型化が可能な可変 DGD 光回路の構成として、図 4-4-2-4 に示す電気光学効果を用いた LiNbO3 導波路型デバイス (E0 型) と磁気光学効果を用いたバルク型デバイス (MO 型) の 2 つの構成について、検討を行い、アレイ化に適した E0 型を選択した。



(a) EO型の構成

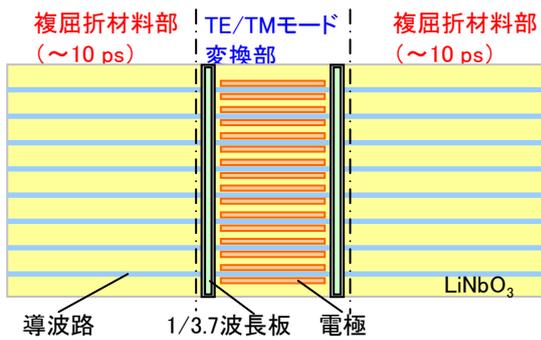


(b) MO型の構成

図 4-4-2-4 可変 DGD 光回路の構成

次にアレイ化の開発を進め、8ch アレイ可変 DGD 光回路の試作を行った。可変 DGD 量は、8ch ともばらつきなく 22ps を達成したが、挿入損失、PDL のばらつきが見られた。

このばらつきを抑える為に、偏波制御器と同様に、導波路幅、導波路形成のプロセス条件の見直しを行った。その結果、図 4-4-2-5 に示すモジュールの試作を行い、図 4-4-2-6 に示すように、挿入損失、PDL ともばらつきの小さく抑えることができ、可変 DGD 量についても、図 4-4-2-7 に示すように仕様を満足することができた。



(a) チップ構造



(b) モジュール写真

図 4-4-2-5 8ch 可変 DGD 光回路

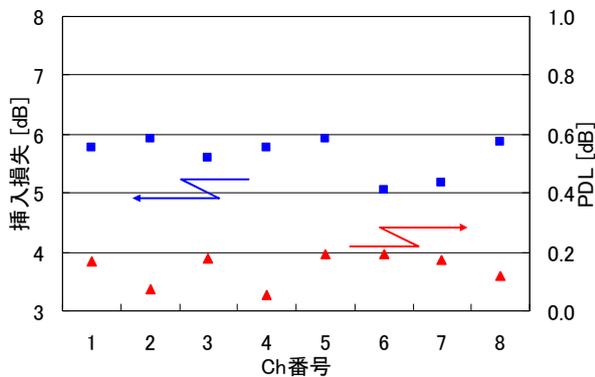


図 4-4-2-6 8ch 可変 DGD 光回路の特性

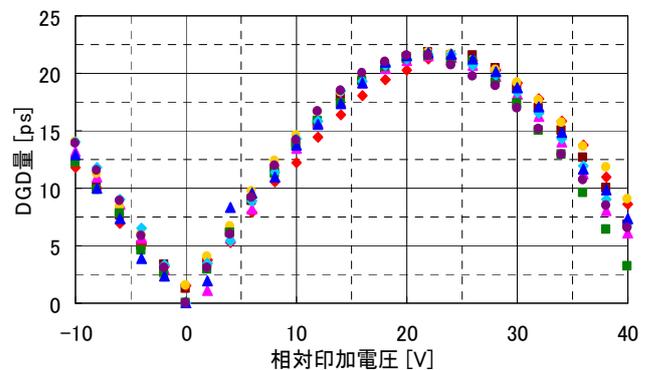


図 4-4-2-7 8ch 可変 DGD 光回路の可変 DGD 量

4-4-2-3 偏波モニタ

偏波モニタの基本構成を図 4-4-2-8 に示す。PD#0 から PD#4 までの受光強度を測定することにより、偏波状態を表すストークスパラメータを求めることができる。

課題としては、他のデバイスと同様に、小型化、集積化、アレイ化、及び、応答速度が挙げられる。他に、偏波状態の検出については、偏光度(Degree of Polarization : DOP)の精度として1%以下が要求される。

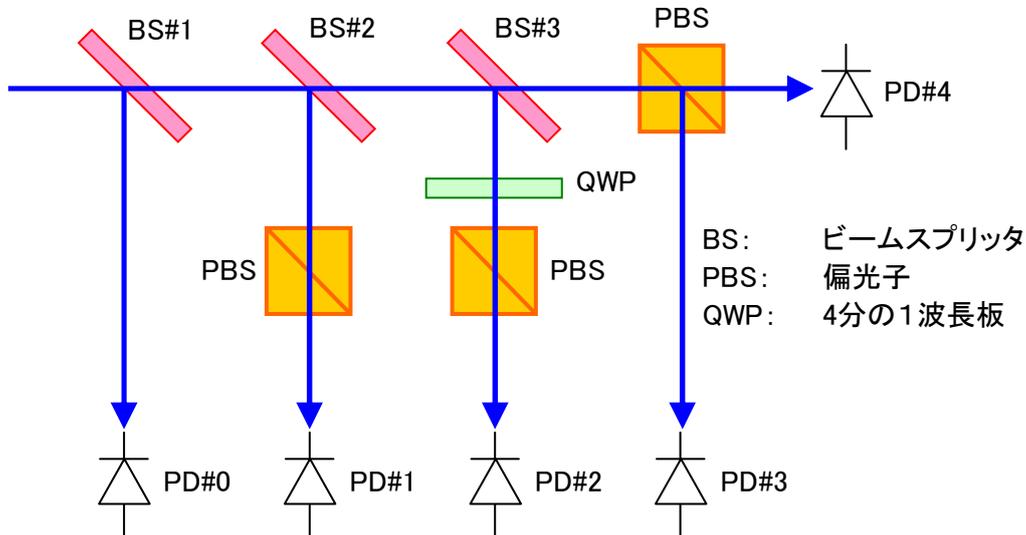


図 4-4-2-8 偏波モニタの基本構成

偏光度(Degree of Polarization:DOP)を高精度に検出する為に、独自の補正方式を開発することで、コストを掛けずに検出精度を上げることができ、0.5%の精度で検出することができた。また、図 4-4-2-9 に示すように、従来の市販品に比べて、10分の1以上の小型化を達成することができた。

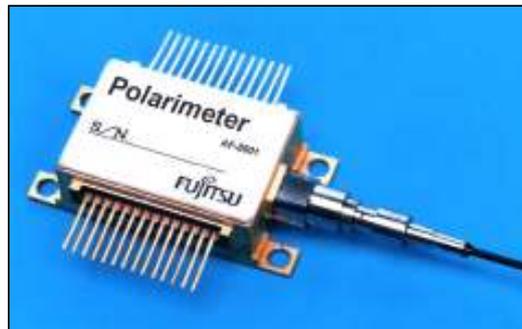


図 4-4-2-9 小型偏波モニタ

4-4-3 偏波モード分散補償モジュールの試作

各主要光デバイス(偏波制御器、可変 DGD 光回路、偏波モニタ)を適用し、偏波モード分散補償モジュールの自動フィードバック制御を行うための制御回路の試作を行った。1chでの制御回路の構成を図 4-4-3-1 に、試作した制御回路に各光デバイスを実装した偏波モード分散補償モジュールの写真を図 4-4-3-2 に示す。

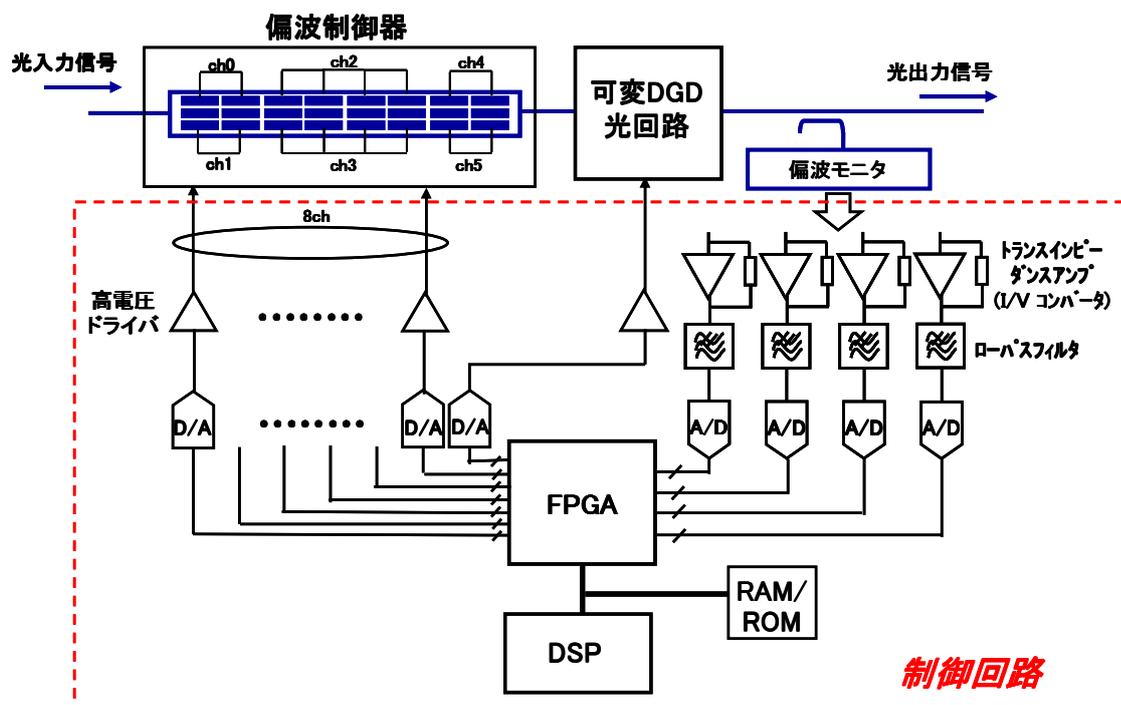


図 4-4-3-1 偏波モード分散補償モジュールの制御回路の構成図



図 4-4-3-2 偏波モード分散補償モジュールの写真

この試作した偏波モード分散補償モジュールを PMD 補償実験に適用し、DGD 補償範囲として、40 ps (図 4-1-4-3 参照)、応答速度も仕様の 1ms 以下を実現することができた。

4-4-4 まとめ

偏波モード分散補償モジュールの各要素デバイス(偏波制御器、可変 DGD 光回路、偏波モニタ)について開発を進め、偏波制御器、可変 DGD 光回路については、最終目標の 8ch 以上のアレイ化を達成することができた。偏波モニタは、従来の 1/10 以下の小型化に成功した。また、偏波モード分散補償モジュールとしては、1ch モジュールの試作を行い、1 ms 以下の応答速度、DGD 補償範囲 40 ps 以上、他、最終目標の特性を実現することができた。

上記の 1ch モジュールの試作、及び、8ch 偏波制御器、8ch 可変 DGD 光回路、小型偏波モニタの開発、及び、制御回路の試作により、偏波モード分散補償モジュールの 8ch 化の実現の見通しを得た。この 8ch モジュールのサイズは、従来の個別の現状技術で構成したモジュールと比較して、サイズは約 1/17 となり、コストも約 1/13 になると見積もられ、最終目標の 1/10 以下を達成できた。

4-5 総括

副課題ウの波長分散補償モジュールに若干の遅れはあったが、昨年度までに各モジュールの基本設計は完了し、モジュール試作による動作検証もほぼ終了した。最終年度である本年度は、それらモジュールを組み合わせたサブシステムの統合試験による光スイッチノードの動作検証と、製品化に向けて、各モジュールの完成度の向上を図った。

サブシステム開発を行う副課題アでは、まずは光ハブに対するシステム要件を分析し、その結果から、提案時より高い光ハブの機能目標へと変更し(2入力×2出力 → N入力×N出力(N≥4))、検討を進めた。シミュレーション・実験により、光ハブを構成する各モジュールに対する目標特性を明確化し、開発を促進した。各副課題と連繋して、モニタ・制御系の試作を行った。試作を行った各モジュールの単体および統合時の10 Gbit/s および40Gbit/s 多段透過・補償評価(実験、シミュレーション)を行い、良好な伝送特性が得られることを検証し、最終目標に対して100%の達成度を得た。今後は、実際に各モジュールを実装した光スッチングノードサブシステムの開発を進め、目標としたサイズ、コスト、特性の実現に関する検証を進めていく予定である。

波長選択スイッチを開発する副課題イでは、プロジェクトを開始した15年度にシステム検討、モジュールの基礎検討をおこない、必要な機能・特性を明確化し、16年度にコア部品の詳細検討、光学系設計技術の開発を進め、透過型回折格子とMEMSミラーを組み合わせたスイッチ構造の決定、原理試作による動作確認をおこなった。17年度に光学設計/光学部品選定の最適化と実装/制御/駆動部を詳細検討によるモジュール試作と検証を、18年度は特性の安定化や製造性の向上を図った。19年度はこれらの成果を踏まえ、製品化に向けて技術の完成度を向上させるべく、モジュール改良(機構系、制御系の改良)、MEMSチップのプロセス・構造の改良、信頼性の向上をおこない、最終目標に対し、100%の達成度を得た。

波長分散補償モジュールを開発する副課題ウでは、まずメトロコア網に適用する経済的な波長分散補償器の方式・構成について検討し、PLC型、エタロン型、MEMS+マイクロオプティクス型についてシミュレーションと試作を行い、それぞれの基本動作とその特性を確認した。その結果、エタロン型が挿入損失と補償量とのバランスが優れていると判断し、これを本テーマにおける開発デバイスとして選定した。分散補償器の構成としては、フィネスの異なるエタロンを対向配置して光が2つのエタロン間を複数回往復することにより多段化した可変分散補償器を提案し、エタロンの角度と温度を制御することにより分散補償量をチューニングする方式を採用した。これにより比較的フィネスの低いエタロンを用いて群遅延特性の直線性を保ったまま、-400~+400 ps/nm と比較的大きな補償量の可変範囲を実現することができた。これまでに、3台の評価用モジュールを完成させ、システム実験により良好な補償特性を確認したほか、製品化にむけた小型モジュールの試作により、100%の達成度を得た。製品化に向けて、信頼性を確立するとともに、製造性を向上させて量産体制の構築を目指す。

偏波モード分散補償モジュールを開発する副課題エでは、各要素デバイス(偏波制御器、可変DGD光回路、偏波モニタ)について開発を進めた。偏波制御器はLiNbO3結晶を用いたE0型を選択した。可変DGD光回路についてはLiNbO3を用いたE0型と磁気光学素子を用いたM0型の比較をおこない、アレイ化の観点からLiNbO3を選択した。偏波モニタはバラック型を採用した。偏波制御器、可変DGD光回路については、最終目標の8ch以上のアレイ

化を達成することができた。また、偏波モニタは、従来の 1/10 以下の小型化に成功した。また単 ch ではあるが要素デバイスを組合せた偏波モード分散補償モジュールを試作し、1 ms 以下の応答速度、DGD 補償範囲 40 ps 以上、他、最終目標の特性を実現した。上記の単 ch モジュールの検証、及び 8ch 偏波制御器、8ch 可変 DGD 光回路、小型偏波モニタの開発により、8ch にした場合のモジュールサイズは、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 以下を実現する見通しを得、最終目標に対し、100% の達成度を得た。

以上、この 5 年間で各要素モジュールの試作・動作検証と、それらを組み合わせたシステム評価をおこない、ほぼ目標通りの特性を得る事ができた。最終的な光スイッチノードの完成系に持っていくにはまだ課題は残っているが、現状での特性と、サイズ・コストの検討結果から、最終目標実現見通しを得る事ができ、全体として 100% の達成度を得る事ができたと考えている。今後は光スイッチノードの製品化開発と共に、先行して要素モジュールの製品化をおこなっていく。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- (1) A. Isomura, J.C. Rasmussen, T. Kubo, T. Matsuyama, M. Doi, G. Ishikawa, “Ultra compact Stokes polarimeter with high accuracy and fast response time”, Proc. OECC/COIN2004 16F2-3, 2004.
- (2) 久保輝洋、磯村章彦、イエンス・ラスムッセン、土居正治、石川丈二、「超小型ストークス・ポラリメータの高精度・高速応答性」、電子情報通信学会 2004 ソサイエティ大会 B-10-37, 2004.
- (3) O. Tsuboi et al. , 「A High-Speed Comb-Driven Micromirror Array for 1xN 80-channel Wavelength Selective Switches」, OpticalMEMS2004
- (4) I. Sawaki et al., 「Optical Switches Based on MEMS Technology」, OECC2004
- (5) 土居正治、長谷川 哲、河合正昭、「PMDC 用 8ch LiNbO₃ 導波路型偏波制御器&可変 DGD 光回路」、電子情報通信学会 2008 総合大会 C3-58、2008