

平成17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18年4月

情報通信研究機構

平成17年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「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	各モジュール伝送特性評価	11
4-1-3	各モジュール目標特性検討(所要位相リップル検討)	15
4-1-4	まとめと今後の課題	19
4-2	波長選択スイッチモジュールの研究開発	21
4-2-1	波長選択スイッチモジュール開発の概要	21
4-2-2	光学系技術の開発	23
4-2-3	スイッチ光学系の開発	27
4-2-4	波長選択スイッチモジュールの試作・評価	30
4-2-5	まとめと今後の課題	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	小型・低コスト化検討	34
4-3-3	光学特性の改善	37
4-3-4	制御技術の開発	41
4-3-5	まとめと今後の課題	41
4-4	偏波モード分散補償モジュールの研究開発	42
4-4-1	偏波モード分散補償モジュール開発の概要	42
4-4-2	偏波モード分散補償モジュール制御回路の開発	42
4-4-3	アレイ化に向けた検討	45
4-4-4	まとめ	47

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。

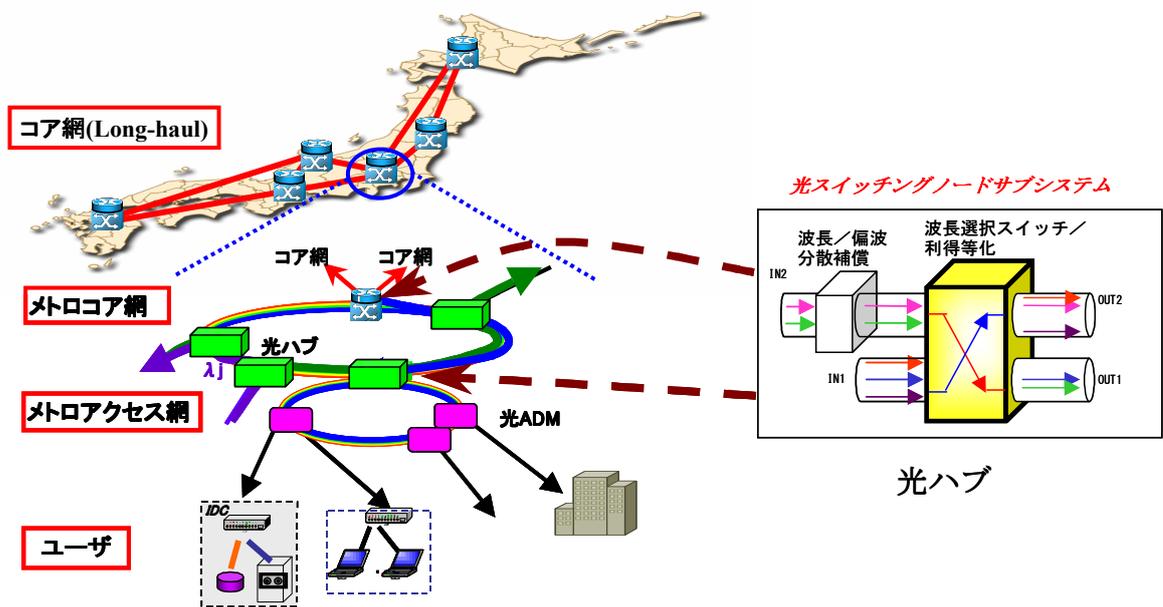


図 1-1: 次世代フォトニックネットワークと本研究で開発する光スイッチングノード

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 1-1 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、経路切り替え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。

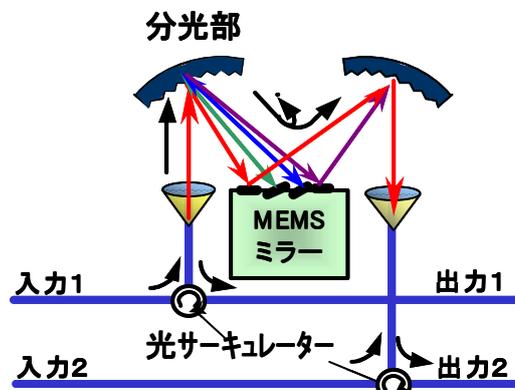


図 2-1：2入力2出力波長選択スイッチ基本構成図

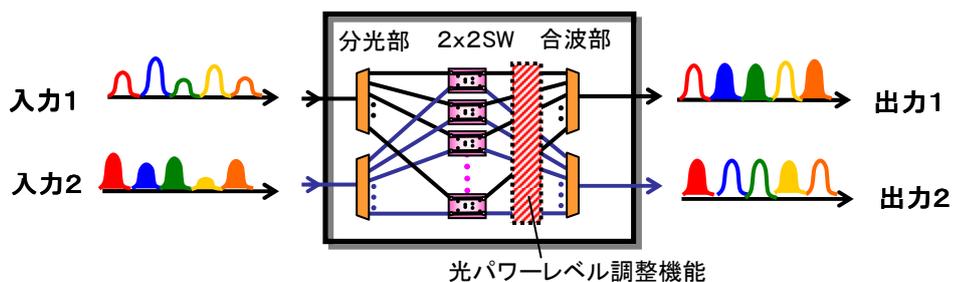


図 2-2：分光部とスイッチ部を一体化した波長選択スイッチの構成例

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(図 2-3)。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。

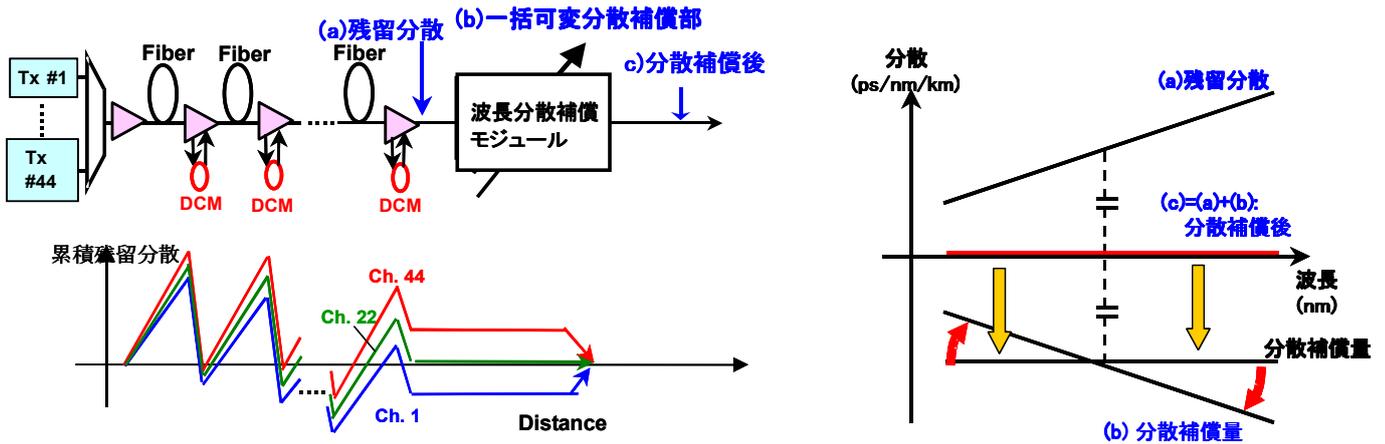


図 2-3 : 残留分散と波長分散補償モジュールの動作

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。図 2-4 の構成でその機能を実現する。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。

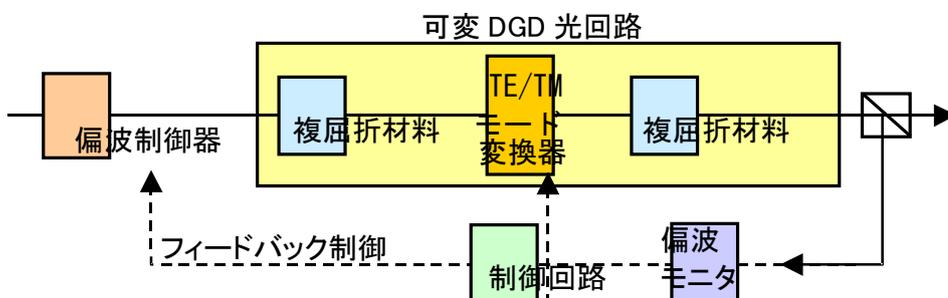


図 2-4 : 偏波モード分散補償モジュールの基本構成図

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り替え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
- ・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

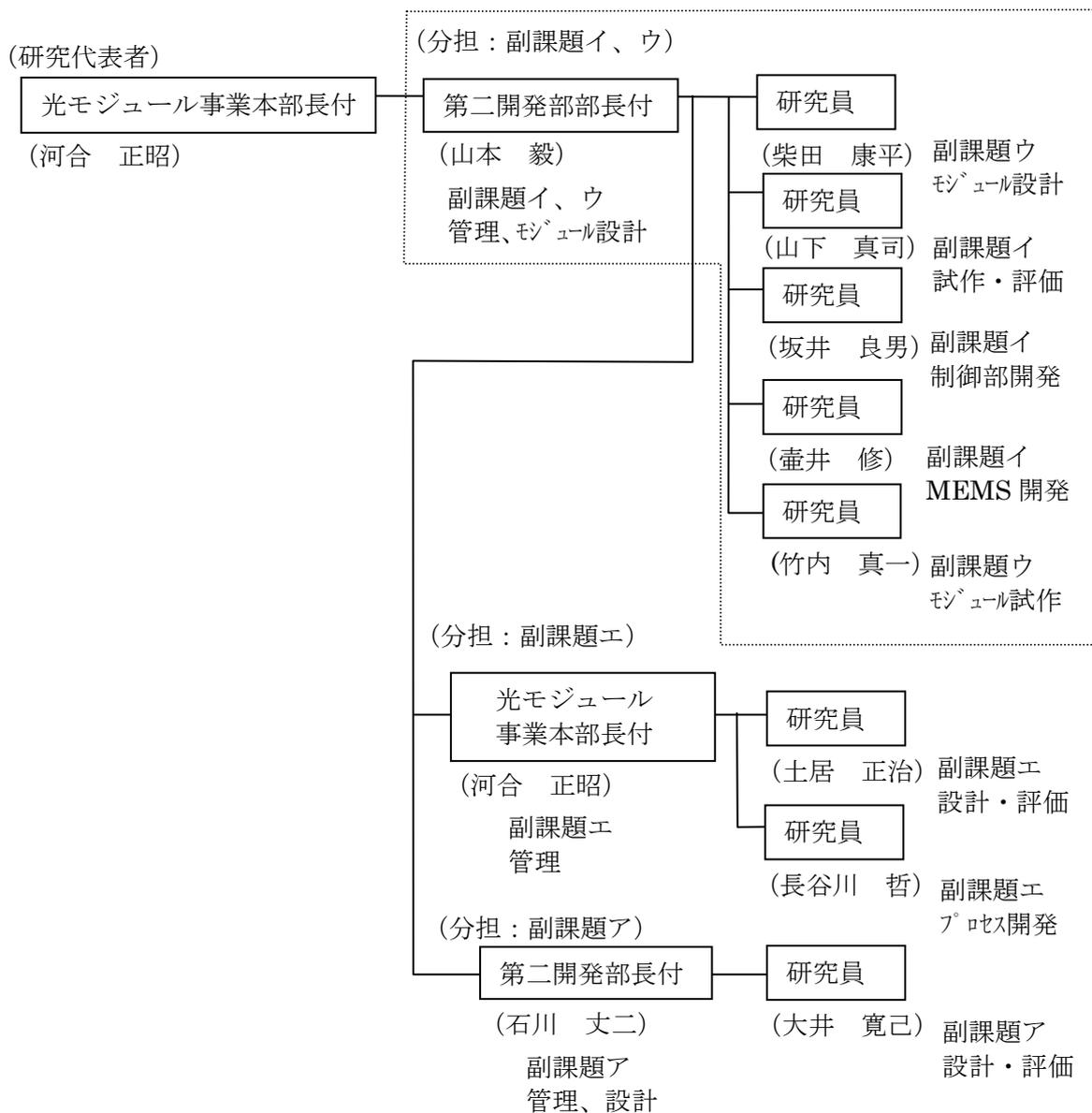
(金額は非公表)

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



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)、波長分散補償モジュール(VDC)、偏波モード分散補償モジュール(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。

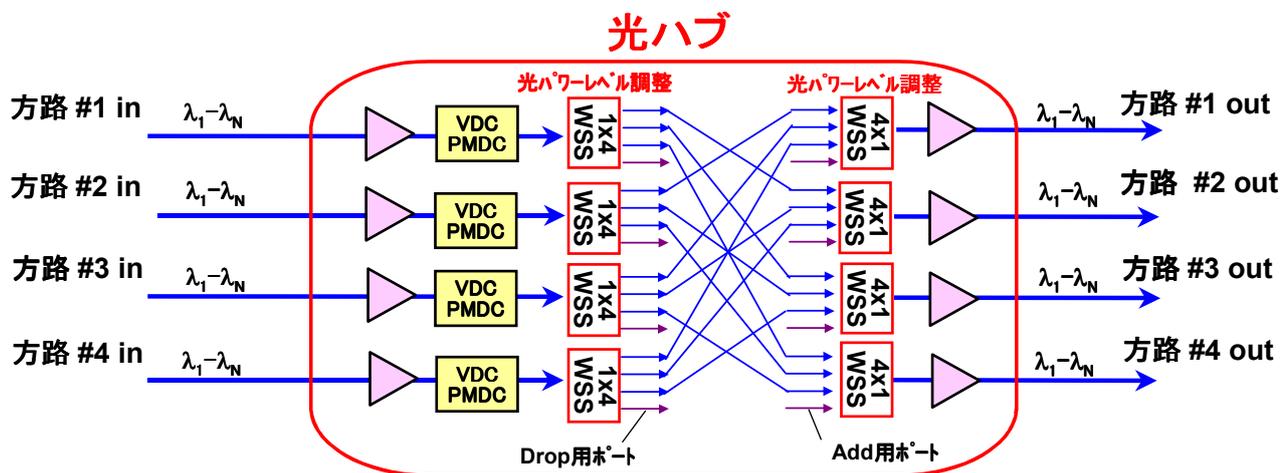


図 4-1-1-1 光ハブの基本構成

特に、本プロジェクトの中間目標である各機能モジュールの基本機能確立に向けて、今年度は下記の検討を行った。

(a) 各モジュール伝送特性評価（伝送実験、シミュレーション）

前年度までに構築した光ハブ評価用伝送テストベッドを用い、波長選択スイッチモジュールに関しては 10 Gbit/s 信号に対する方路切り替え実験を、偏波モード分散補償モジュールに関しては 40 Gbit/s 補償実験を行うことで、基本動作特性を検証した。波長分散補償モジュールに関しては、エタロン型のモジュール静特性を用いた伝送波形シミュレーションにより、補償特性を確認した。

(b) 各モジュール目標特性検討

前年度までに提示した各モジュール目標特性に関する見直しを行った。具体的には、主に波長分散補償モジュールでの群遅延リップル規定に関して、リップル周期依存性を考慮した場合に、位相リップル規定の方が適していることを伝送波形シミュレーションで示した。

4-1-2 各モジュール伝送特性評価

前年度までに、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。今年度は、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、各モジュールの基本的な動作特性の評価を行った。

(a) 波長選択スイッチモジュール

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(4x1 WSS)を用い、10 Gbit/s 信号に対する方路切り替え実験を行った。図4-1-2-1に示す実験系で、4x1 WSSへの10 Gbit/s 信号の入力ポートを繋ぎ替え、信号入力ポートと出力ポートが結合するように、4x1 WSSのスイッチ切り替えを行った。10 Gbit/s 光送信機においては波長可変光源を用い、波長(チャンネル)依存性の評価も行った。また、4x1 WSSの光パワーレベル可変機能の評価も行い、その際4x1 WSS前段に配置した可変光アッテネータを調節し、10 Gbit/s 受信機への入力光パワーが一定になるようにした。

図4-1-2-2に、波長選択スイッチモジュールの透過特性と、10 Gbit/s 光信号スペクトルを示す。光信号スペクトルに対して、波長選択スイッチモジュールの透過帯域幅が充分広く、透過前後でスペクトルの劣化が全く無いことが分かる。

実験を行った際の波長選択スイッチモジュールおよび制御回路の写真を図4-1-2-3に、10 Gbit/s 光波形を図4-1-2-4に、光雑音(ASE)付加によって受信光信号の光信号対雑音比(OSNR)を変化させた場合の符号誤り率測定結果を図4-1-2-5に示す。各入力ポートおよび各波長に対して、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目標特性の6dBまで変化させた場合にも、信号劣化は観測されないことを確認した。

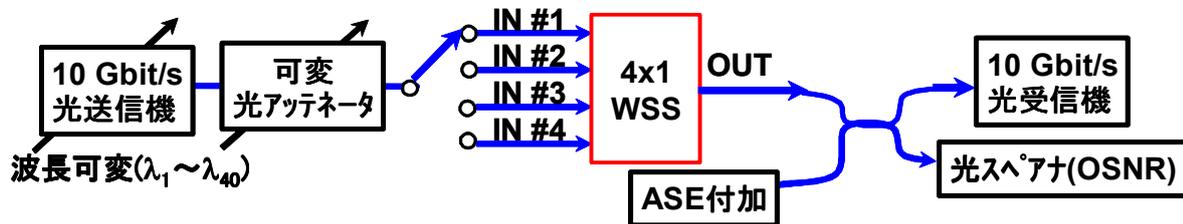
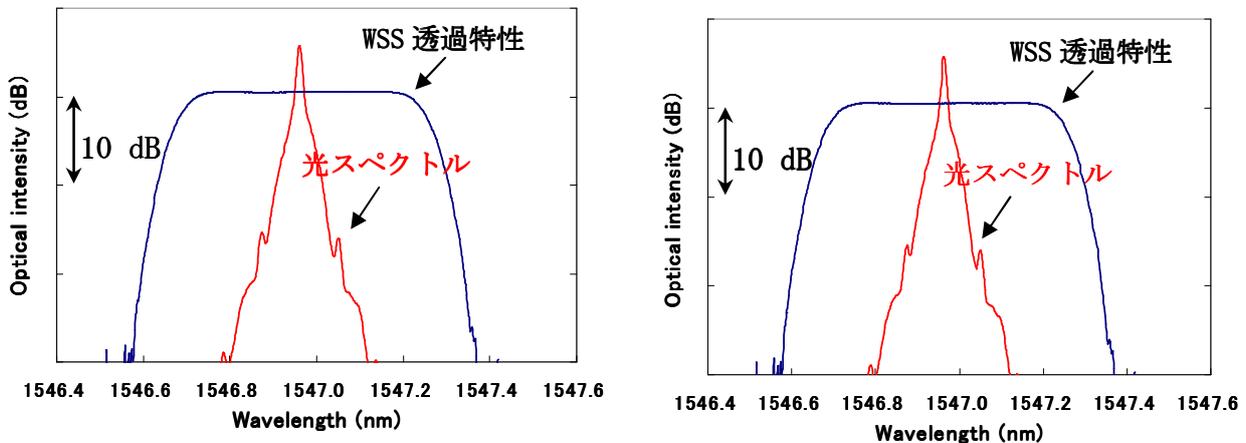


図4-1-2-1 波長選択スイッチモジュール 評価実験系 (10 Gbit/s)



(a) モジュール透過前

(b) モジュール透過後

図4-1-2-2 波長選択スイッチ透過特性と10 Gbit/s 信号光スペクトル

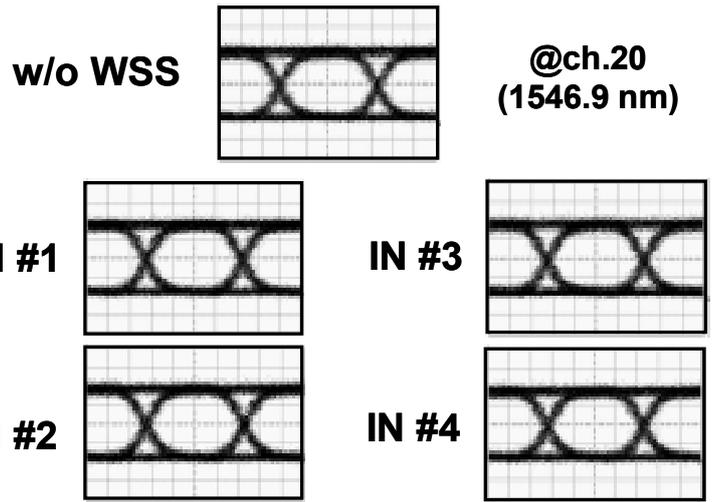


図 4-1-2-4 10 Gbit/s 光波形

図 4-1-2-3 波長選択スイッチモジュール写真

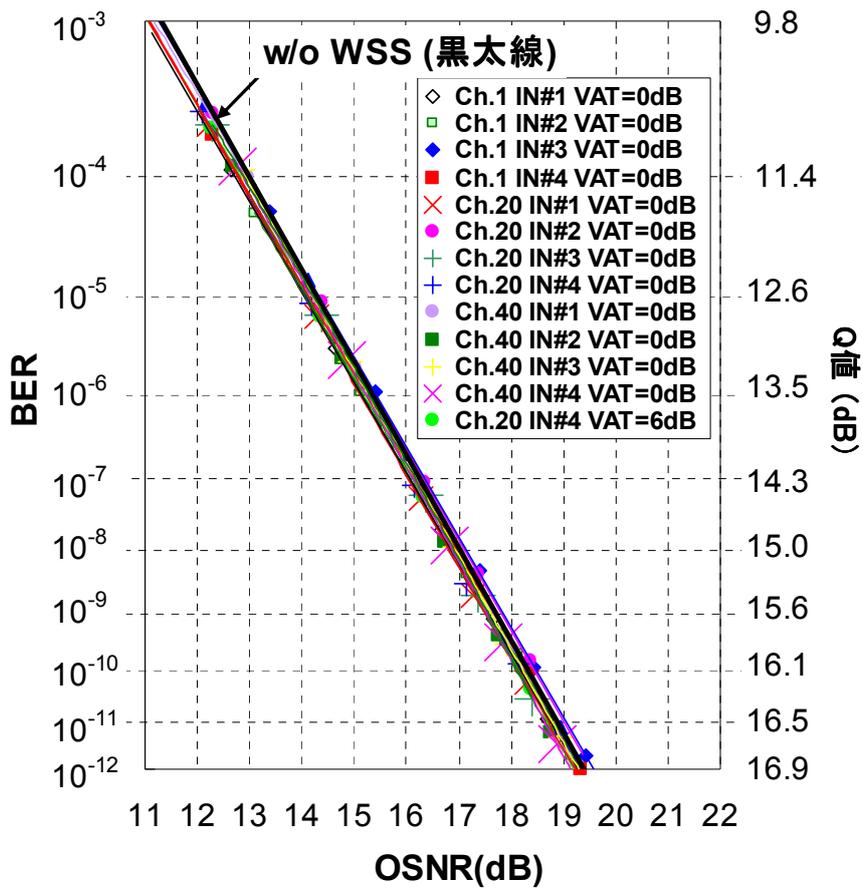


図 4-1-2-5 10 Gbit/s 符号誤り率特性 (各チャンネル、各入力ポート、光アッテネーション量=0, 6 dB)

(b) 波長分散補償モジュール

副課題ウで開発中の波長分散補償モジュール（エタロン型）に関して、図 4-3-3-4 に示される静特性データ（群遅延特性、透過特性）を用い、10 Gbit/s 分散補償特性に関する伝送波形シミュレーションを行った。図 4-1-2-6 のシミュレーション構成に示すように、伝送路で残留分散スロープが発生し、その値がばらつく場合を想定した。図 4-1-2-7 に示すように、伝送路分散スロープ量、およびその変化量が大きい場合でも、波長分散補償モジュールの調整（エタロン入射角）によって、Q ペナルティが効果的に低減されることが分かる。適用可能チャンネル数、分散スロープ量可変範囲、透過帯域幅等の改良が今後の課題である。

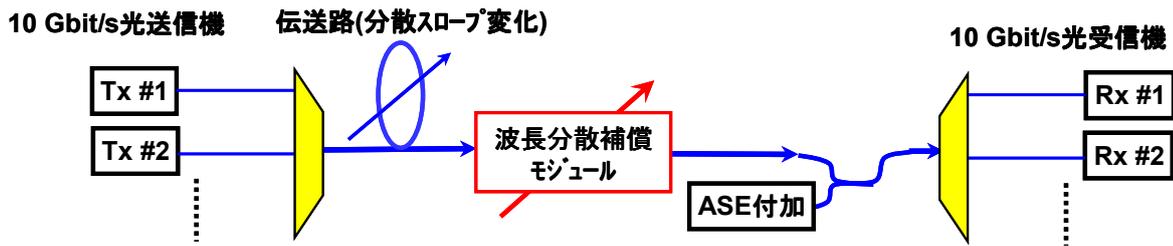


図 4-1-2-6 波長分散補償モジュール 伝送シミュレーション構成 (10 Gbit/s)

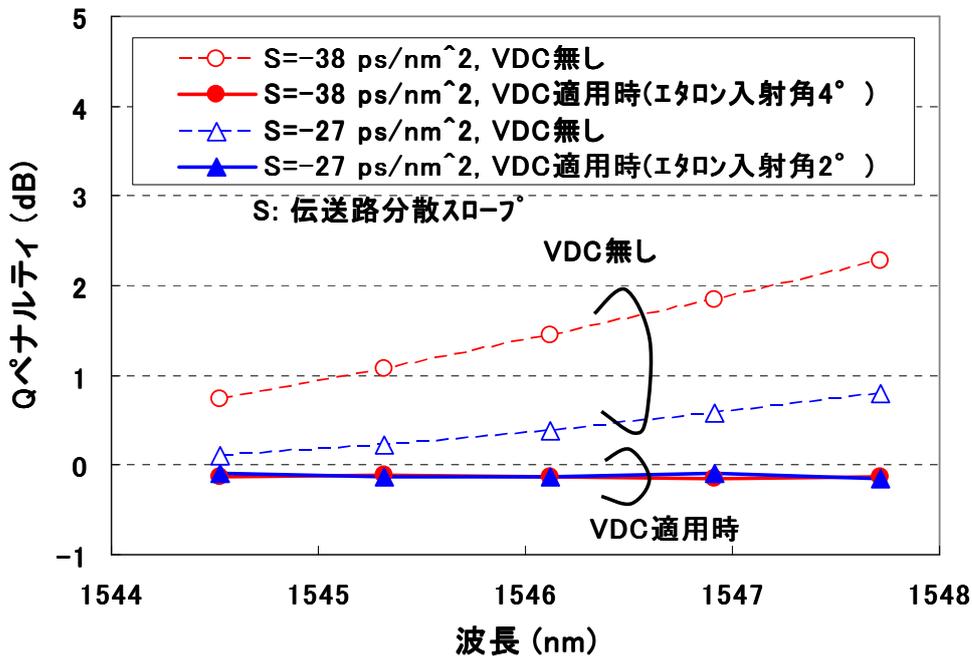


図 4-1-2-7 波長分散補償モジュール 10 Gbit/s 補償特性 (シミュレーション)

(c) 偏波モード分散補償モジュール

副課題エで試作を行った偏波モード分散補償(PMDC)モジュールを適用し、40 Gbit/s 信号に対する PMD 補償実験を行った。図 4-1-2-8 に示すように、市販の PMD エミュレータを用いて伝送路が発生する PMD を模擬し、偏波モード分散補償(PMDC)モジュールによる補償を行った。図 4-1-2-9 に PMD 補償あり・無しの場合の 40 Gbit/s 光波形を、図 4-1-2-10 に 40 Gbit/s 偏波モード分散補償特性を示す。ここで、光雑音(ASE)を付加して OSNR を 24 dB(典型値、分解能 0.1 dB)に固定し、BER から換算した Q 値の Back-to-back に対する劣化分を Q ペナルティとした。DGD(Differential Group Delay)トレランスが 10 ps(PMDC 無し)から 28 ps(PMDC 適用時)まで拡大される良好な補償特性を得た。これは伝送距離が $(28/10)^2 = 7.8$ 倍に拡大することに相当する。

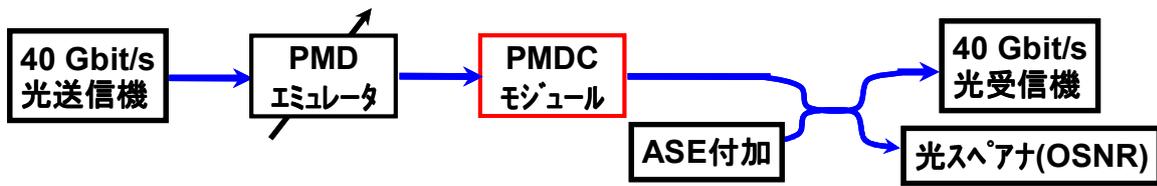


図 4-1-2-8 偏波モード分散補償モジュール 評価実験系 (40 Gbit/s)

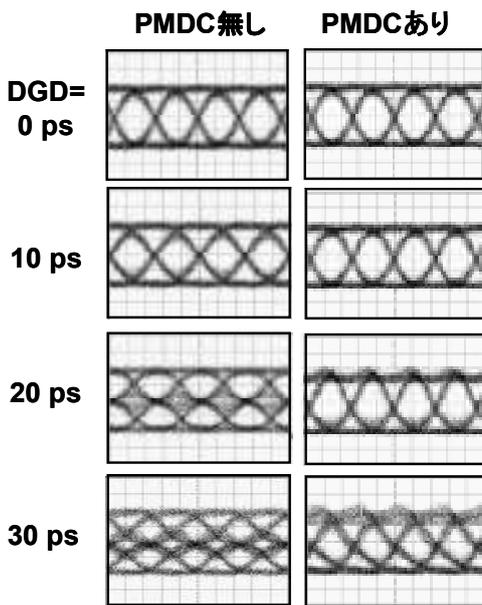


図 4-1-2-9 40 Gbit/s 光波形

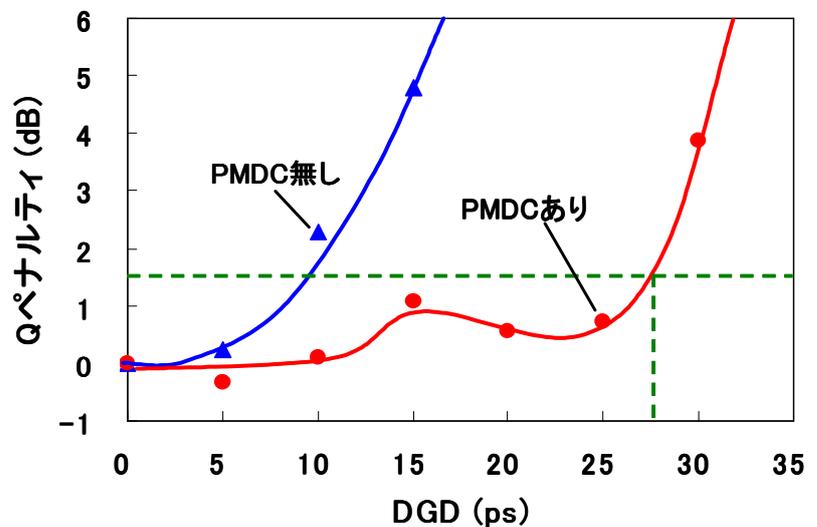


図 4-1-2-10 40 Gbit/s 偏波モード分散補償特性

4-1-3 各モジュール目標特性検討（所要位相リップル検討）

昨年度報告書においては、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想定し、各モジュール（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）の目標特性を示した。

今年度は、特に波長分散補償モジュールにおける評価指標である群遅延リップルに関して見直しを行った。

本検討で前提としたネットワークモデルを図 4-1-3-1、ノード配置を図 4-1-3-2 に、ネットワークパラメータを表 4-1-3-1 に示す。昨年度と同じく、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を想定した。10 Gbit/s 信号に関しては、ネットワークモデル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、40 Gbit/s 信号に関しては、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）を想定した。

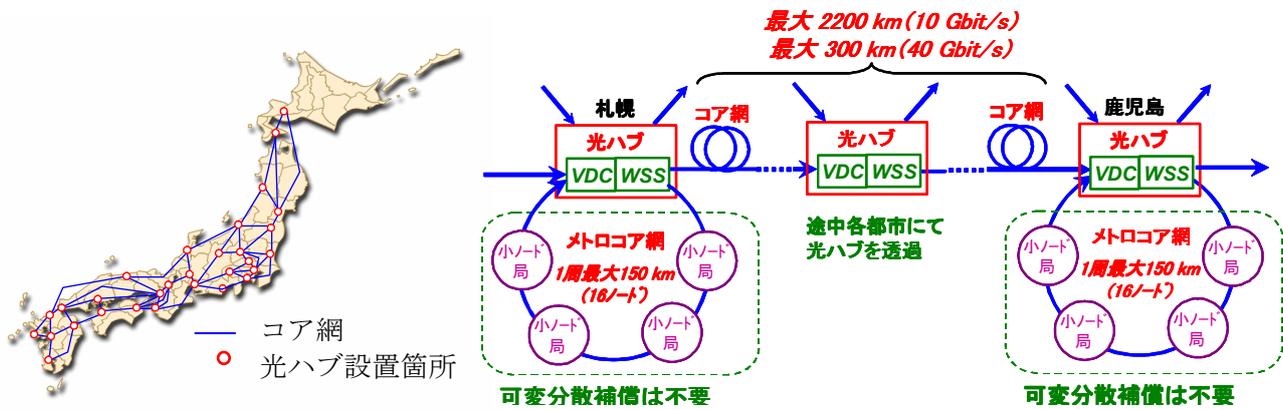


図 4-1-3-1 国内コア網ネットワークモデル

図 4-1-3-2 コア網およびメトロ網のノード配置

表 4-1-3-1 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)		

昨年度においては、特に波長分散モジュールにおける評価指標として、従来から広く用いられている群遅延リップルを採用して、その目標値を提示した。しかし、群遅延リップルにおいては、Qペナルティがリップル振幅のみならず、リップル波長周期に大きく依存するという問題があり、近年、位相リップルという指標が提案されてきている[1-1, 1-2]。今回、伝送波形シミュレーションによって、10 Gbit/s, 40 Gbit/s 信号に対して、群遅延リップル、位相リップルという両指標の定量的な比較を行った。

計算モデルとしては、図 4-1-3-3 に示すように、波長（周波数）に対して、三角関数形

状の群遅延リップルまたは位相リップルを仮定した。波長対群遅延特性を周波数積分することによって、波長対位相特性が得られる。群遅延リップルは、波長対群遅延特性から、直線近似分を差し引くことによって得られる。さらに位相リップルは波長対位相特性から、二次関数近似分を差し引くことによって得られる。

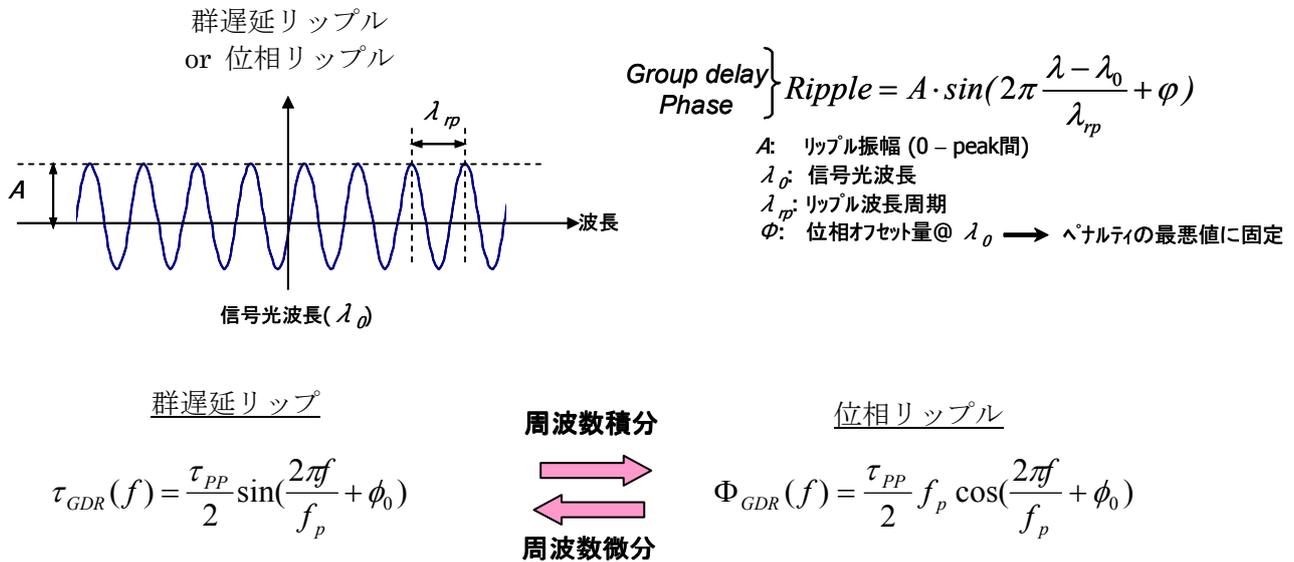
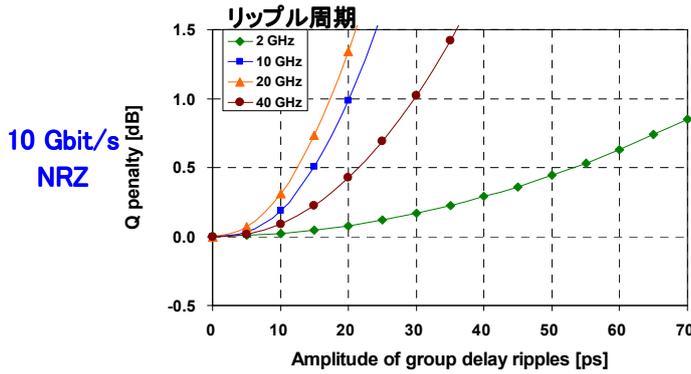


図 4-1-3-3 群遅延リップル、位相リップルの計算モデル

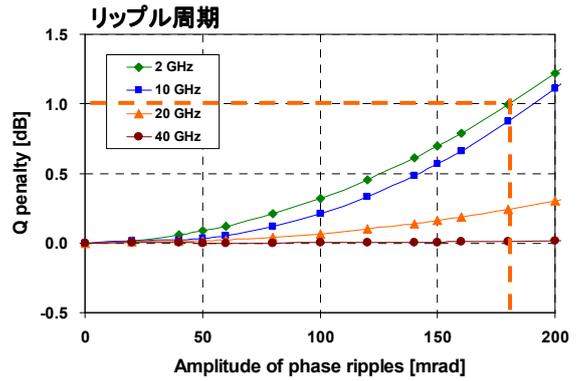
図 4-1-3-4 に、10 Gbit/s および 40 Gbit/s NRZ 信号に対して、群遅延リップルおよび位相リップル依存性の計算結果を示す。ここで、計算結果は光信号対雑音比 (OSNR) にも依存するが、典型的な OSNR として、10 Gbit/s 伝送では 20 dB, 40 Gbit/s では 26 dB (分解能 0.1 dB) に設定した。群遅延リップルを評価指標とした場合、Q ペナルティがリップル波長周期に大きく依存することが分かる。従来のファイバグレーティング (FBG) 等の波長分散補償器の特性から予想されるように、実際のデバイス性能としては、製造上の不完全性より、様々な波長周期の群遅延リップルが複雑に混在する。よって、波長周期により Q ペナルティが大きく異なる群遅延リップルは、正確な評価指標として用いることが難しい。これに対して、位相リップルに関しては、図 4-1-3-4 から分かるように、リップル周期がビットレートより小さい場合に、リップル周期依存性がかなり小さい。リップル周期がビットレートより大きい場合には、信号のスペクトル幅 (ビットレートと同程度) の中では光位相リップルの変化量が小さく、分散補償量の変化として影響を与えることになるが、図から分かるように Q ペナルティとしては小さい。位相リップルでの指標を用いることで波長依存性が小さくなる理由としては、リップルによって主信号近傍に信号劣化 (符号間干渉) を与えるエコーパルスが発生するが、そのパルス振幅が位相リップル振幅に等しいことによる [1-2]。

ビットレート依存性に関しては、位相リップルを指標として採用することで、Q ペナルティがビットレートにほぼ依存しないことが分かる。群遅延リップルを指標とした場合には、実際のデバイスのリップル周期が不明であるため、最大のペナルティを与えるリップル周期、つまりリップル周期 (Hz) = (1 ~ 2) × B (B: ビットレート) を想定する必要を生じ、ビットレートが高くなるほど厳しい要求となる。それに対し、リップル周期無依存である位相リップルを指標として採用することで、不必要に厳しい特性を要求することを避けることができる。

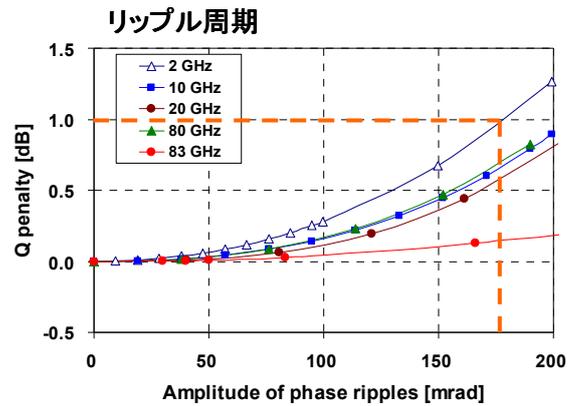
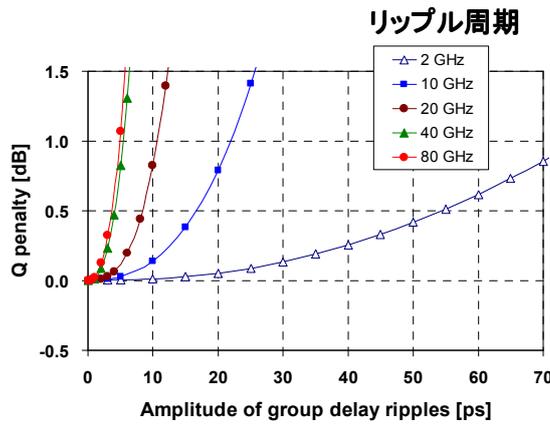
群遅延リップル 振幅依存性



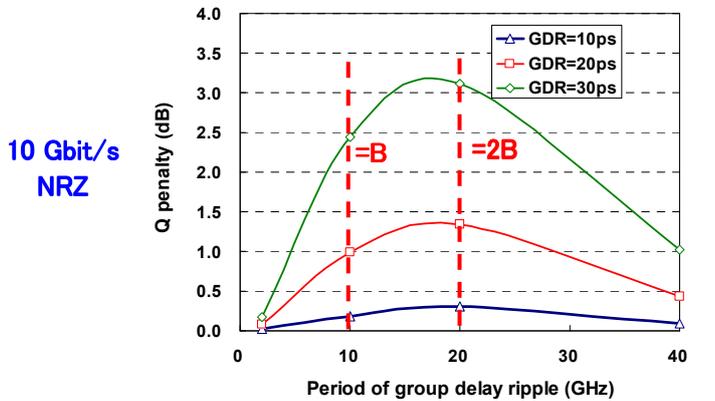
位相リップル 振幅依存性



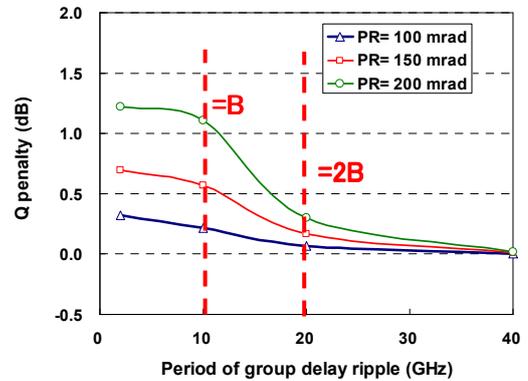
40 Gbit/s NRZ



群遅延リップル 周期依存性



位相リップル 周期依存性



40 Gbit/s NRZ

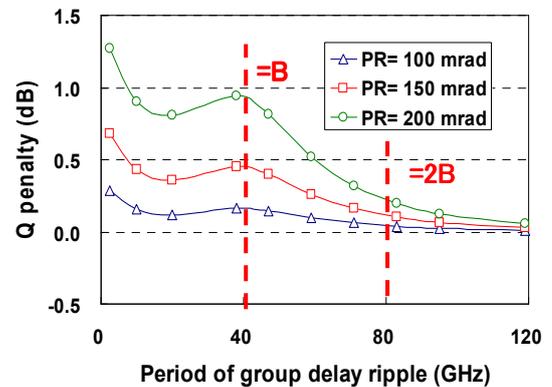
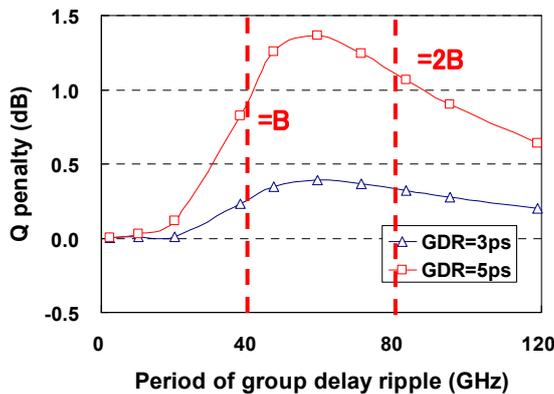


図 4-1-3-4 群遅延リップル、位相リップルの振幅、周期依存性

図 4-1-3-4 の伝送波形シミュレーション結果により、システム全体で許容される位相リップル振幅は、10 Gbit/s および 40 Gbit/s 信号光とも、 ± 180 mrad 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。また、デバイス透過段数がより多い 10 Gbit/s を考え、表 4-1-3-1 で想定されるネットワークでは、波長選択スイッチモジュールは最大 44 台（コア網 2 台 \times 7 ノード + メトロ網 1 台 \times 30 ノード）、波長分散補償モジュールは最大 7 台（コア網 1 台 \times 7 ノード）となる。波長選択スイッチモジュールはデバイス原理上、位相リップルが小さいことも考慮し、波長選択スイッチモジュール、波長分散補償モジュールへの許容位相リップルの目標特性を表 4-1-3-2 に示す通りとした。

表 4-1-3-2 位相リップル目標値の内訳

	1 台当たり 位相リップル	最大数	累積 位相リップル
波長選択スイッチモジュール	± 5 mrad	44	± 5 mrad $\times \sqrt{44} = \pm 33$ mrad
波長分散補償モジュール	± 55 mrad	7	± 55 mrad $\times \sqrt{7} = \pm 146$ mrad
合計			± 179 mrad

今回の位相リップルの見直しを行った各モジュールの目標特性を表 4-1-3-3、表 4-1-3-4 に示す。

表 4-1-3-3 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		
位相リップル	<+/-5 mrad	<+/- 5 mrad	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		

表 4-1-3-4 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に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	
位相リップル	< +/-55 mrad	< +/- 55 mrad	
応答速度	一括分散スロープ補償型の場合: 遅くて可(半固定) 個別チャネル補償型の場合: < 3 ms (制御時間含む)		

※偏波モード分散補償モジュールに関しては、昨年から変更無し。

4-1-4 まとめと今後の課題

今年度は、主に各モジュール伝送特性評価を行った。波長選択スイッチモジュールに関しては 10 Gbit/s 信号に対する方路切り替え実験を、偏波モード分散補償モジュールに関しては 40 Gbit/s 補償実験を行うことで、基本動作特性を検証した。波長分散補償モジュールに関しては、伝送波形シミュレーションにより、補償特性を確認した。

また、前年度までに提示した各モジュール目標特性の見直しを行った。具体的には、主に波長分散補償モジュールでの群遅延リップル規定に関して、リップル周期依存性を考慮した場合に、位相リップル規定の方が適していることを伝送波形シミュレーションで示した。

中間目標に対する達成状況としては、各機能モジュールの基本機能確立という目標に向けて、まず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。さらに、試作を進めている各モジュールの基本的な伝送特性の評価を行った。以上から、中間目標の90%を達成したと考える。

未達成の項目としては、波長分散補償モジュールに関して補償実験まで到らなかった点があり、モジュール試作が行われる H18 年度前半に行う予定である。

さらに、小型・低コストな光ハブサブシステム実現という最終目標に向けて、下記の開発を今後進める予定である。

(a) 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を継続し、各モジュール目標特性の実現性を見極め、各モジュール開発へのフィードバックを行う。特に、今年度までのモジュール単体での基礎的な伝送特性評価に加え、ビットレート 10 Gbit/s および 40 Gbit/s で、ループ実験系を用いたモジュール多段透過特性、高速応答性評価を行う。さらに、各モジュールを統合動

作させた場合の伝送特性を検証する。

(b) 統合モニタ・制御系開発

副課題ウと連係して波長分散補償モジュールのモニタ・制御方式を確立し、試作・評価によって特性確認を行う。さらに、各モジュールを連携させたモニタ・制御アルゴリズムの検討を行い、動作確認を行う

(c) 統合サブシステム開発

各モジュールを統合するサブシステムの構成を検討し、レベルダイヤ等を含めた具体的な設計を進める。光学特性、サイズ、コスト等の最適化を図りつつ、方路数拡張、チャンネル数拡張、ビットレート混載等のシステム要件に柔軟に対応可能な実現解を示す。

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年度に、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、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に決定し、適用する部品の仕様・構造を決定し、原理試作による動作確認をおこなった。17年度は決定した構造を元に、光学設計/光学部品選定の最適化、と実装/制御/駆動部を詳細検討したモジュール設計の完成度の向上をおこなった。

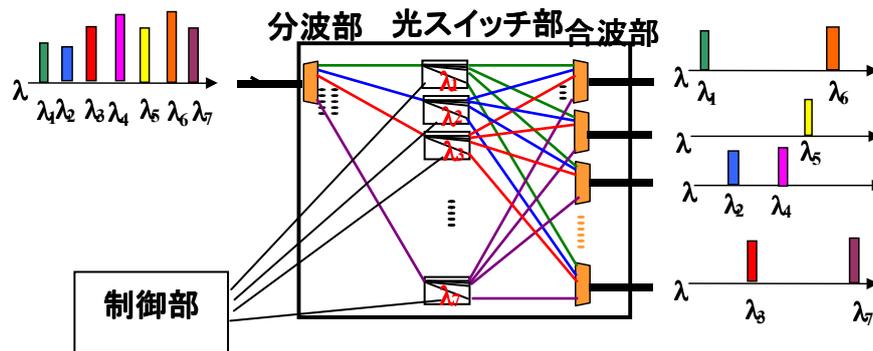


図 4-2-1-1 波長選択スイッチの機能ブロック

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×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×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。

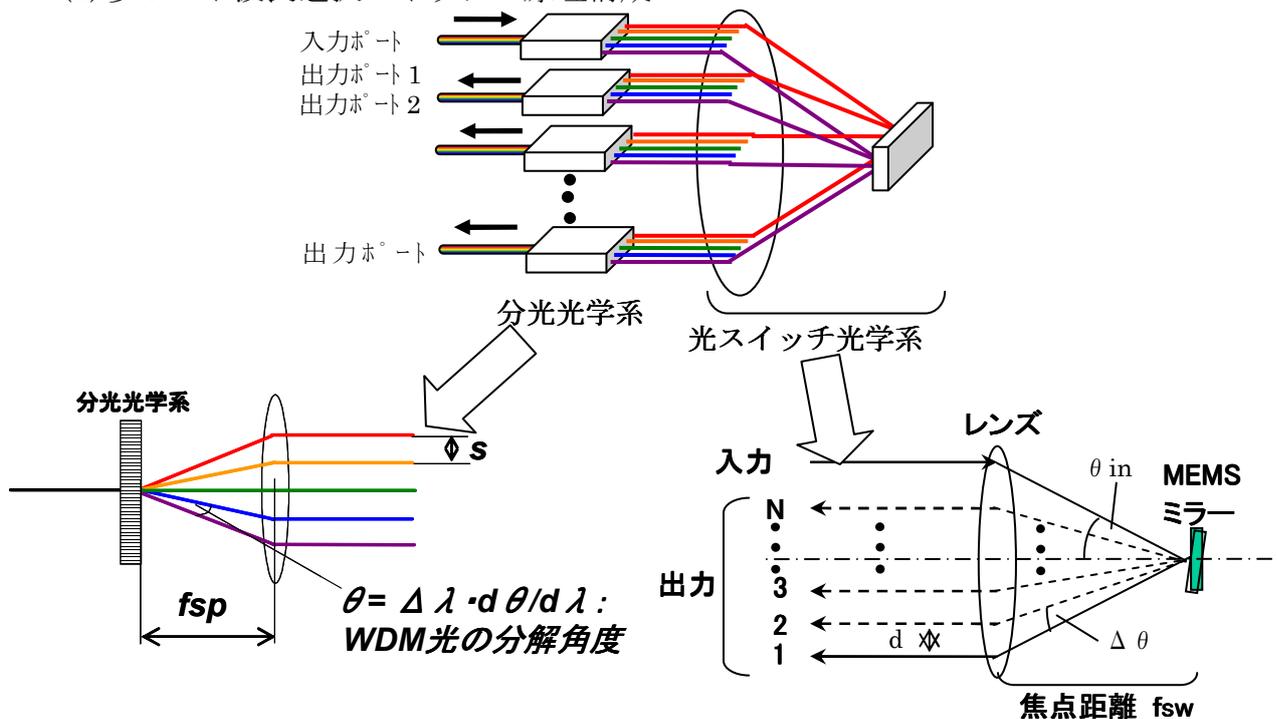
表 4-2-1-1 波長選択スイッチモジュール 目標特性

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		
位相リップル	< +/-5 mrad	< +/- 5 mrad	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		

4-2-1-2 波長選択スイッチの構成

波長選択スイッチの構成は、16年度に、回折格子を用いた分光部(図4-2-1-2 (b))と、MEMS ミラーとレンズからなる光スイッチング部(図4-2-1-2 (c))を組み合わせた形に決定した。分光部は、多ポート化の観点から-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、中でも0.18 deg/nmの分散能力を持ち、低損失と低PDL(偏波依存損失)特性を兼ね備える過型回折格子を選択した。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新規の櫛歯構造を持ち、動的なクロストークの回避策として横方向の回転も可能とする2軸駆動型のMEMSミラーを選択した。スイッチの原理構成を図4-2-1-3に、MEMSミラーの構成を図4-2-1-4に、特性例を図4-2-1-5示す。

(a) 多ポート波長選択スイッチの原理構成



(b) 空間型回折格子を用いた分光部の構成

(c) ミラーを用いた光スイッチ部の構成

図 4-2-1-2 多ポート波長選択スイッチの構成

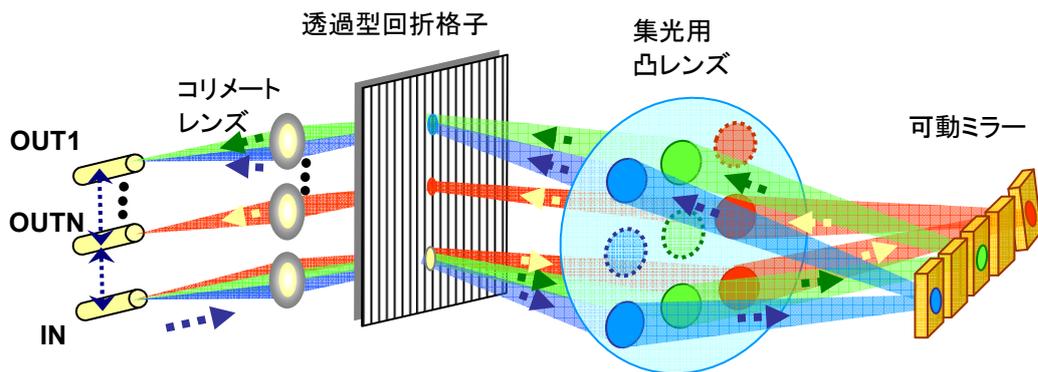


図 4-2-1-3 多ポート波長選択スイッチの構成

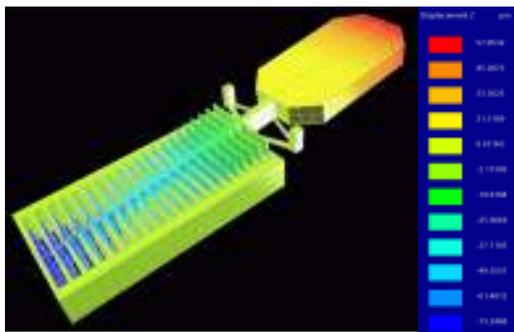


図 4-2-1-4 MEMS ミラー構成

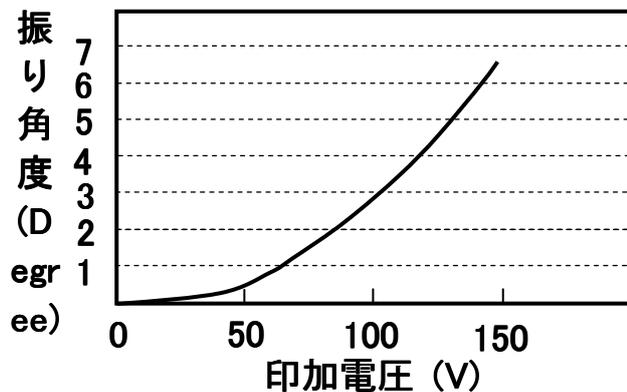


図 4-2-1-5 試作ミラーの評価結果

4-2-2 光学系技術の開発

決定した波長選択スイッチ構造に基づき、分光光学系と、スイッチ光学系の詳細検討を進め、最適化設計と、モジュール試作による検証をおこなった。

4-2-2-1 入出力光学系の開発

入出力光学系はファイバから空間に光を出射する部分と、ビームを楕円化するための拡大光学系より構成される。

波長選択スイッチでは、ファイバからの出射光を空間伝搬させ、その間に、波長成分ごとの分解 (DEMUX)、ポートの切り替え、波長の合成 (MUX) をおこない、出力側のファイバへ入力させる。実際のモジュールでは、ファイバから光が出射して、MEMS ミラーに当たるまで 30~40cm の、さらには出力ファイバへの往復で 60~70cm の空間伝搬がおこなわれる。MEMS ミラーアレイの間隔が 200~300 μm となるので、100GHz の波長選択スイッチの場合、1GHz 波長ずれに相当する MEMS ミラー上でのビーム位置のずれは 2~3 μm 程度であり、そのため、入出力部の光学系には高い精度が要求される。全体的なずれは個々の光部品の位置、角度

の調整で補う事ができるが、入出力部がアレイとなる多ポートの波長選択スイッチでは、アレイ内の補正が効かないため、相対的な精度が要求される。個別のポート間での相対的な精度を確保するため、コリメータ光学系の比較検討をおこなった。

①細径コリメータをアレイ状に並べる構成

細径のフェルールと、細径のレンズをスリーブに挿入した細径コリメータを試作し、実装フレームへの YAG 溶接した時に実現可能な精度の検討をおこなった結果、目標としている数m度の出射角精度を実現できないと判断した。構成を図 4-2-2-1(a)に示す。

②ファイバアレイにレンズアレイに固定する構成

現在量産可能なファイバアレイと、レンズアレイで実現可能な精度の調査をおこなった。波長選択スイッチとは別に、当社で開発を進めている 3D-MEMS スイッチの光部品を元に検討した結果、レンズアレイはプロセスで作成可能なため、nm オーダーの精度のピッチでアレイ化可能だが、ファイバ整列用の孔にファイバを挿入・固定する方法では、 $\pm 2 \sim 3 \mu\text{m}$ の精度となってしまう。この 2 つを組み合わせる方法では、数十ミリ度のばらつきが生じる事になり、この方法では対応不可能と判断した。構成を図 4-2-2-1(b)に示す。

③ファイバアレイに個別のマイクロレンズを固定する構成

マイクロレンズを個別に調整し、接着固定する方法で実際に試作をおこない、アレイ内の精度を評価した結果、数ミリ度の精度で作成可能との結果が得られた。構成を図 4-2-2-1(c)に示す。

④レンズアレイに個別のファイバを固定する構成

レンズアレイへの個別ファイバ固定は、接着による固定と、融着による固定を検討したが、ファイバが軽量であるため、応力変動の影響を受けやすい点、ファイバ固定部の信頼度の問題で不採用とした。構成を図 4-2-2-1(d)に示す。

以上の検討結果から、現状で最適のコリメータアレイの実現方法は、③ファイバアレイに個別のマイクロレンズを固定する構成と判断し、波長選択スイッチモジュールの採用する事とした。試作したコリメータアレイの特性例を図 4-2-2-2 に示す。

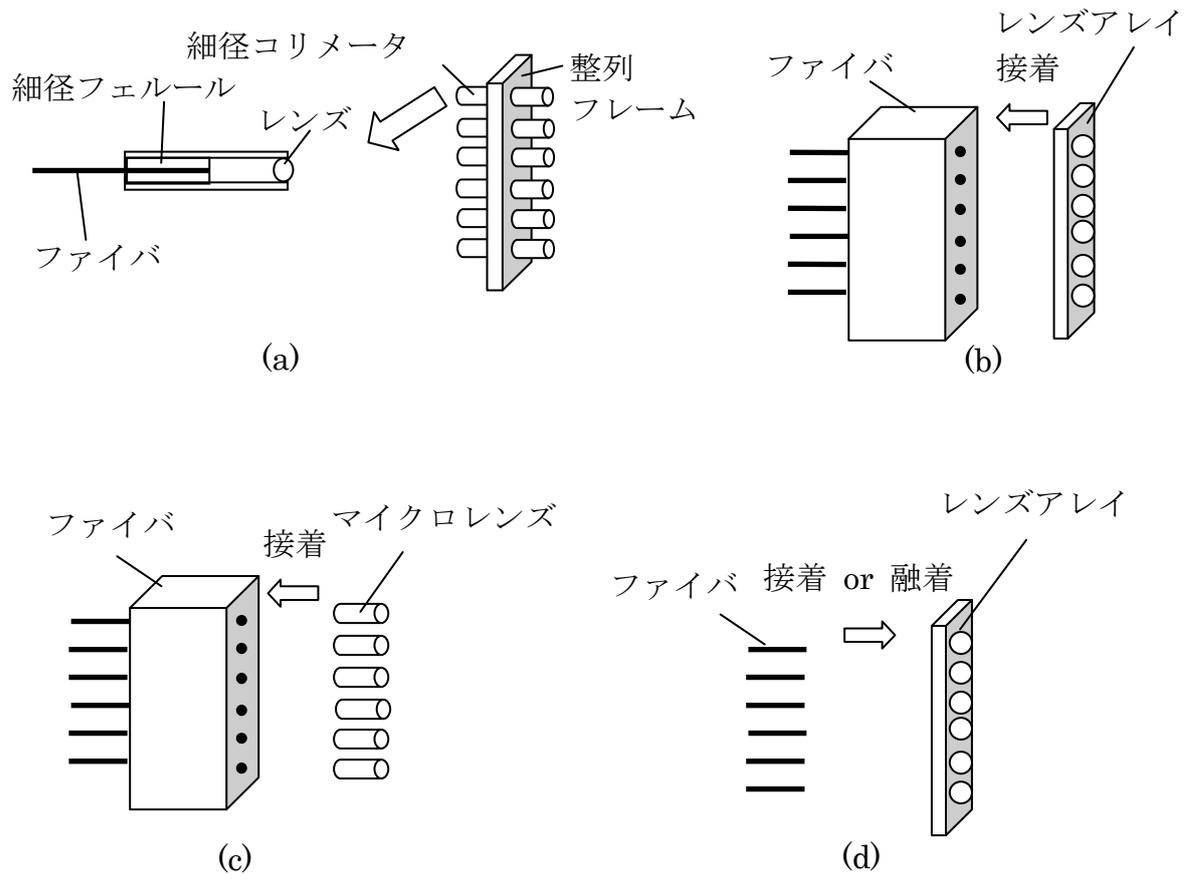


図 4-2-2-1 コリメータアレイの構造比較

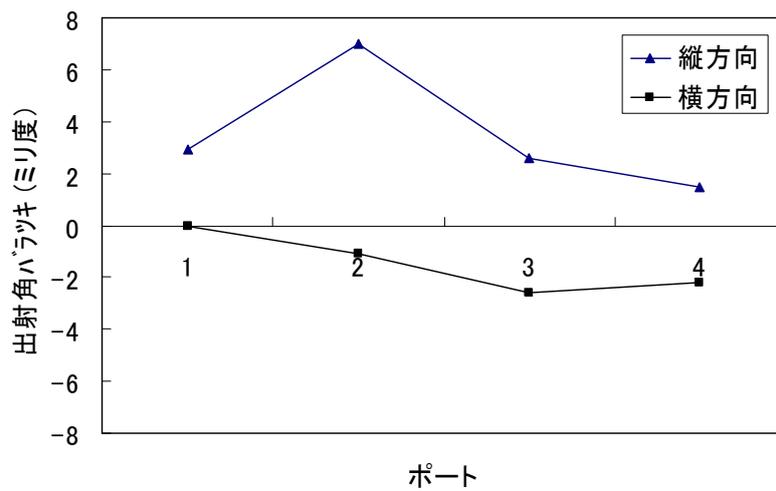


図 4-2-2-2 試作したコリメータアレイの特性

次に拡大光学系について、その実現手法の検討をおこなった。

拡大光学系は、次の二つの目的のために用いる。

- ・ビームの楕円化

MEMS ミラー上でのビームサイズは、横方向は透過波長帯域の確保のため、ミラーの幅に対する比率を小さくする必要があり、ビームの横径は小さくする必要がある。縦方向はポート間のクロストークを小さくするため、ビーム径を小さくし、散乱角を小さくする必要がある。横方向は短く、縦方向は長くと、逆方向の要求を満たすため、ビームの楕円化が必要である。

- ・回折格子入射時の面積の拡大

回折格子は、格子間隔に対し、ビームの幅を十分に大きく取るほど理想に近い特性を実現できる。そのため、横方向のビーム径拡大が必要である。

以上の結果から、拡大光学系は横方向のみのものを用いる事とした。採用する光部品としては、焦点距離の異なる2枚のシリンドリカル凸レンズを組み合わせる方式、シリンドリカル凸レンズとシリンドリカル凹レンズを組み合わせる方式、アナモルフィックプリズムペアを用いる方式の3種類を検討した。その結果、サイズとコストの点からアナモルフィックプリズムペアを用いる方法を採用する事とした。

4-2-2-2 小型分光光学系の開発

分光光学系は回折格子と集光レンズを組み合わせて構成される。

透過型回折格子を採用すると決定した分光光学系は、高波長分解能力を保ちつつ、低偏波依存損失(PDL)と低損失を実現できるよう最適化を図った。その結果、C-BANDの波長範囲でPDLを0.5dB以下とする事ができた。

集光レンズはすべてのポートから、分光後の全波長が入力する部品であり、上下左右の広い範囲を使用する。そのため、大面積での収差の小さいレンズ系が要求される。また、非常に長い空間光学系をコンパクトにまとめる光部品が要求される。次の二つの光学系を比較し、最適なものを選択する。

- ・凸レンズを用いる構成

透過型となるため集光レンズに対し、垂直に光を入射でき、収差の低減が可能であるが、レンズへの入射方向と出射方向が逆となるため、光学系のサイズが大きくなるなどの欠点がある。

- ・凹面鏡を用いる構成

反射型であり、鏡への入射と出射が同一方向となるため、光学系のサイズを小さくできるが、入射部と出射部を干渉させないため、凹面鏡への入射軸と出射軸をずらす必要がある。そのため、収差が大きくなる欠点がある。

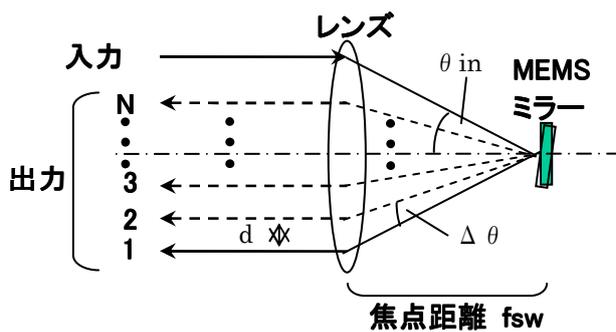
以上の点を考慮し、収差の観点からレンズを用いた集光光学系を採用する事とし、小型化に関しては折り返し型部を付加した構造とする事とした。

4-2-3 スイッチ光学系の開発

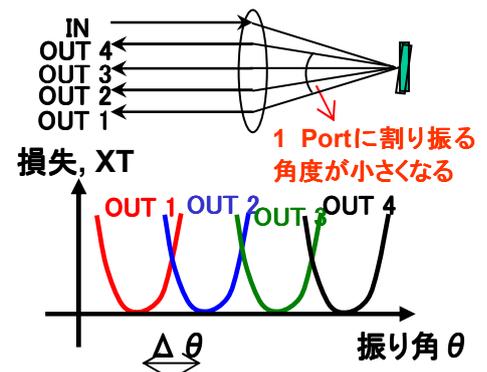
16年度のMEMSを用いたスイッチ光学系検討は、ポート数の拡大に向け、回転角を拡大可能なミラー構成の検討を進め、新規の櫛歯構造を開発し、目標の 6° 以上の回転角を実現した。また、ポート間を横断して切り替えをおこなった場合の動的なクロストークの回避策として、シャッタ機能を付加するため、横方向の回転も可能とする2軸駆動型のMEMSミラー構造の設計を進めた。今年度は、2軸駆動型のMEMSミラーの試作・動作検証と共に、技術の完成度の向上を目指し検討を進めた。

4-2-3-1 スイッチ光学系

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。この構成でポート数が3以上となる場合、ポートの切り替え時に、使用しないポートを横切る状態が発生し、ダイナミッククロストークの原因となる。1枚のミラーで切り替えている以上、この減少は避けられないものであり、解決手段として、各々のポートにシャッタを付加する方法が考えられる。しかし、波長毎にポート切り替えの状態が異なるため、波長毎にON/OFF可能なシャッタが必要となり、ポートへのシャッタ付加は非常に複雑な光学系を要求する。我々はその要求に対し、MEMSミラーを縦、横の2軸振れる構造とし、MEMSミラー自体にシャッタ機能を付加する方法を採用した。MEMSミラーは波長毎に準備されているため、波長毎のON/OFFを可能とする。2軸駆動のMEMSミラーについては次章で説明する。



(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

4-2-3-3 2軸動作ミラーの構成検討

当社で別途開発を進めている3D-MEMSスイッチは2軸駆動のMEMSミラーを用い、2次元の光信号切り替えをおこなっている[2-1]。図4-2-3-2に示すその構造を元に検討を進める。波長選択スイッチと3D-MEMSスイッチとの大きな相違は、次の2点である。

- ①波長選択スイッチ： ポート方向のみの1次元の光の切り替え
3D-MEMSスイッチ： 縦、横の2次元の光の切り替え
- ②波長選択スイッチ： 透過波長帯域の確保のため、ポートを切り替える方向と垂直な方向のMEMSミラーの稠密度を80~90%以上とる必要がある
3D-MEMSスイッチ： MEMSミラーの稠密度(ミラー幅ピッチに対する割合)に大きな制約は無い

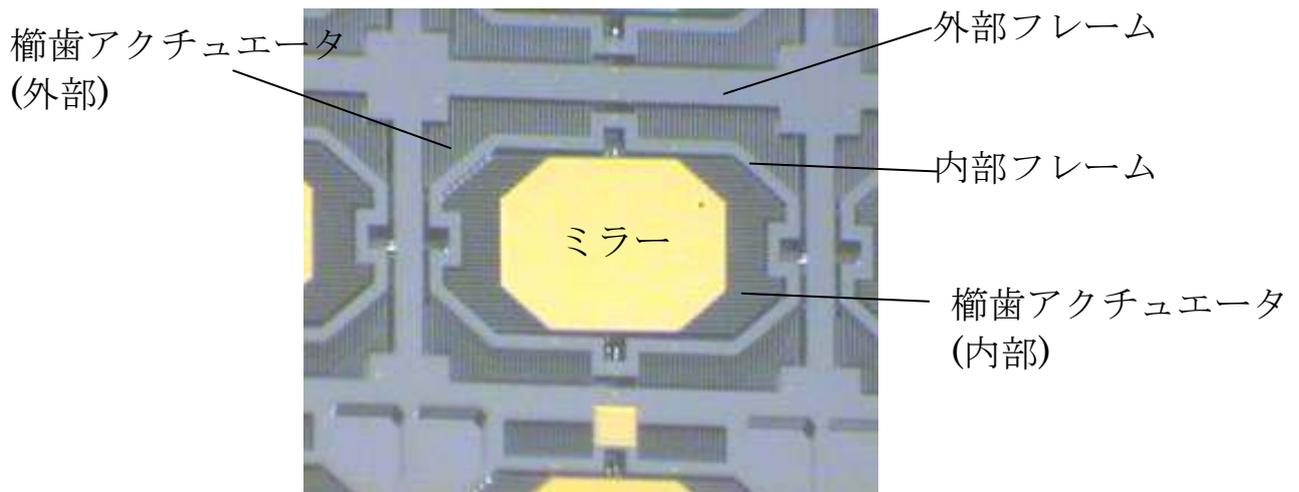


図 4-2-3-2 3D-MEMSミラーの構造

図 4-2-3-2 の構造で分かるよう、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。上述の②の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 4-2-3-3 に示す。

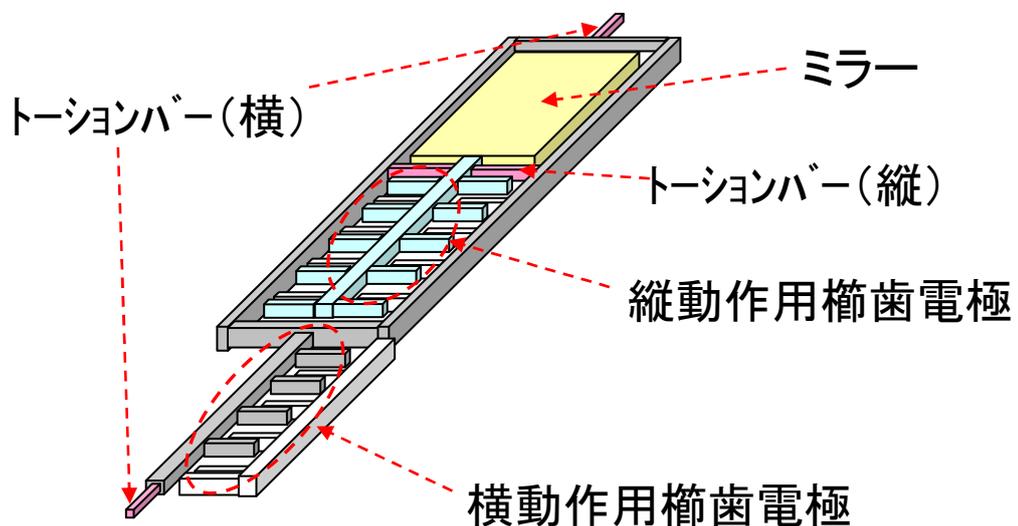


図 4-2-3-3 2軸駆動MEMSミラーの構造

4-2-3-3 試作ミラーの評価結果

試作したミラーを図 4-2-3-4 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 4-2-3-5 に示す)。

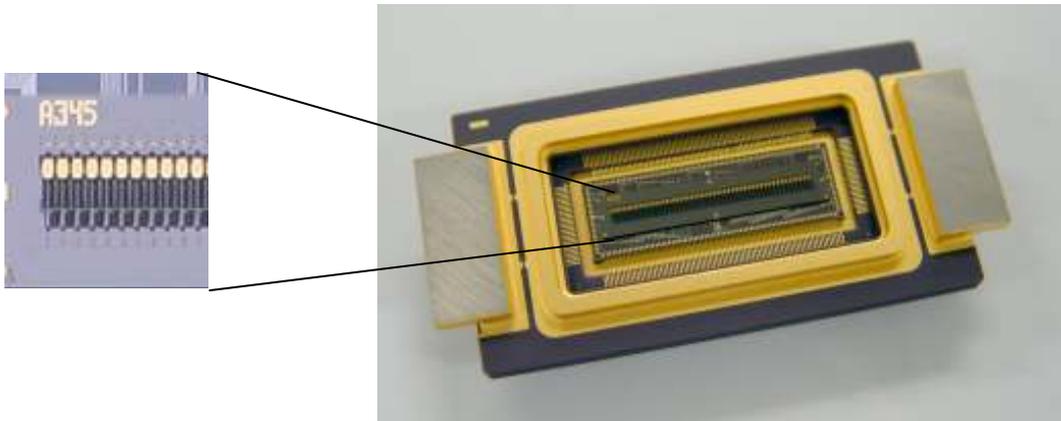


図 4-2-3-4 試作した2軸駆動MEMSミラー

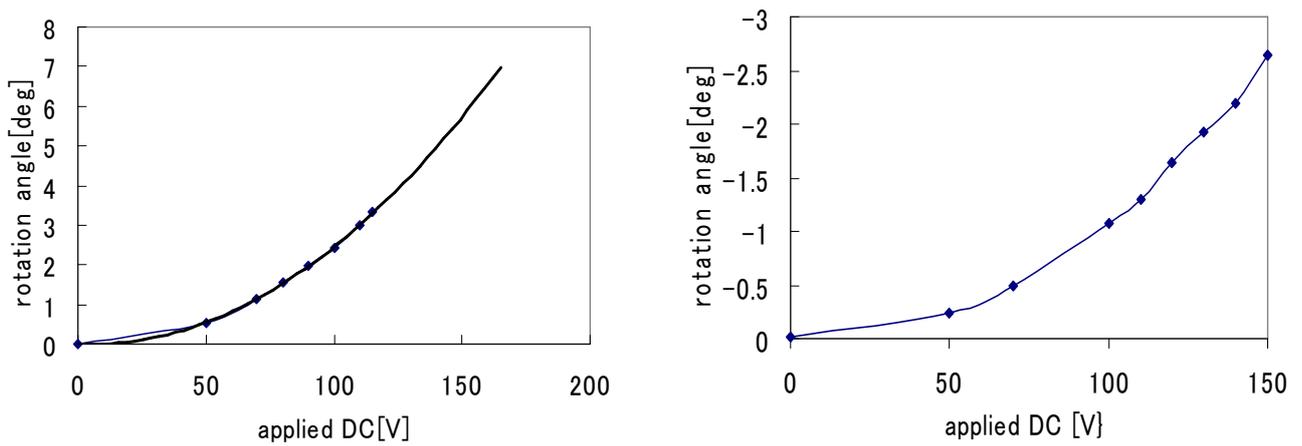


図 4-2-3-5 試作したMEMSミラーの動作

4-2-4 波長選択スイッチモジュールの試作・評価

16年度の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、光学解析ソフト(CODE V)による分光光学系とスイッチ光学系の最適設計ツールの立上げと、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。17年度は、2軸MEMSミラーを用いた1×4に波長選択スイッチの試作・評価をおこない、課題抽出を進めた。

4-2-4-1 制御部の試作

波長選択スイッチの制御部は、下記の部分で構成する。

- ①外部とのインターフェース
- 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
- ④制御部からの指示に従い、MEMSミラーに電圧を印加するD/Aコンバータ部

制御部は、FPGA(Field Programmable Gate Array)を、D/Aコンバータ部は高電圧アンプとD/Aコンバータを集積化したICを用いる事で回路の小型化を図っている。また、200Vの高電圧を印加するDC-DCコンバータを新規に開発し、搭載した。回路の概観を図4-2-4-1に示す。

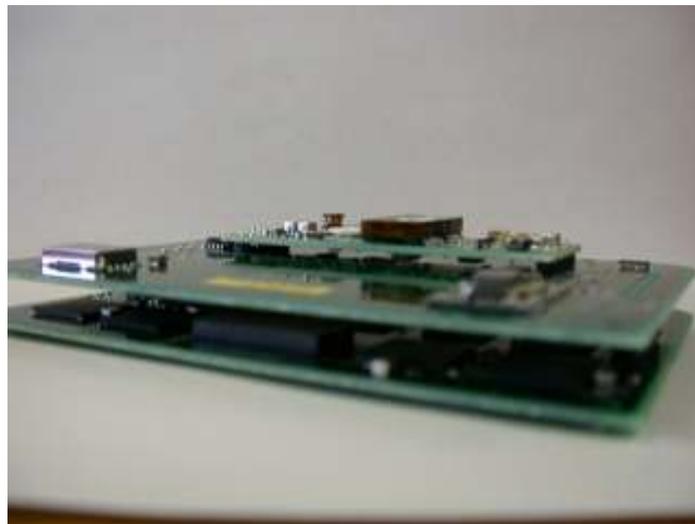


図 4-2-4-1 試作した制御回路

4-2-4-2 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概観を図4-2-4-2に、代表的な波長特性例を図4-2-4-3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4-2-4-4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 4-2-4-2 試作した波長選択スイッチモジュール制御回路

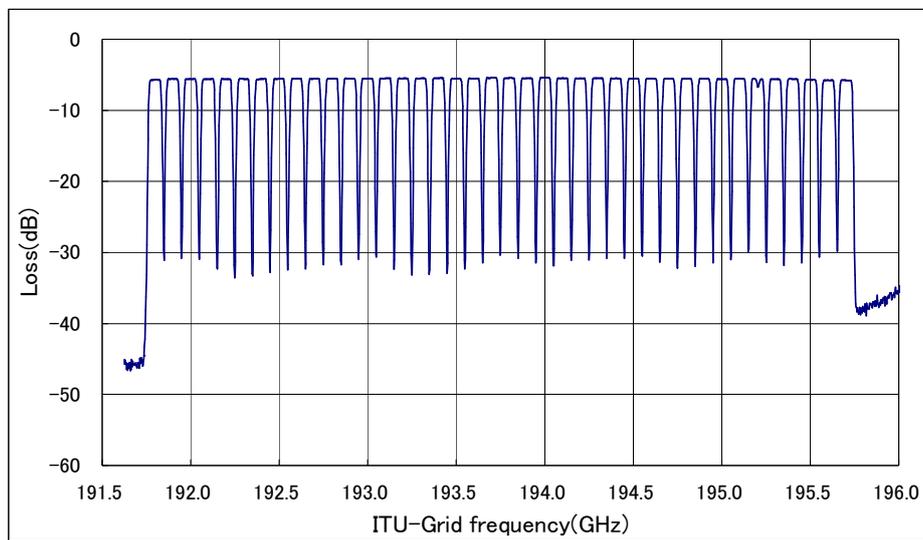


図 4-2-4-3 波長特性例

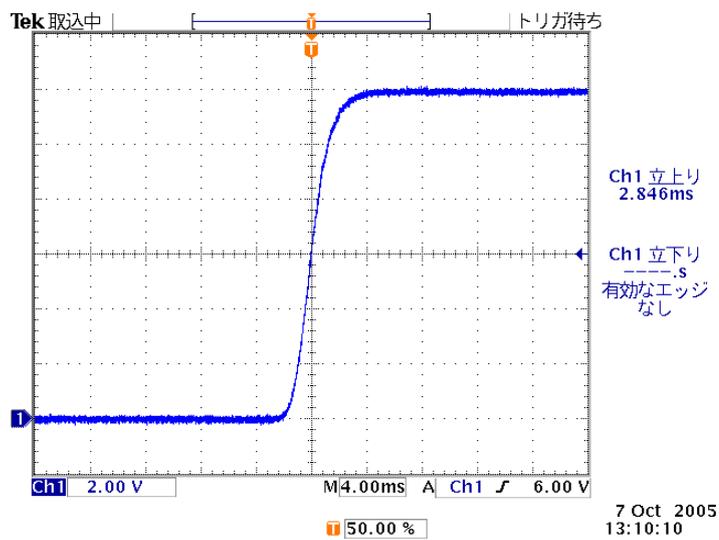


図 4-2-4-4 動特性例

4-2-5 まとめと今後の課題

17年度は中間目標の達成に向け、16年度に決定したスイッチ構造に従い、各光部品、制御部の開発を進めた。

入出力光学系では、新規に高精度コリメータアレイを開発し、目標である数m度の出射角バラツキを実現した。分光部では、透過型回折格子のパラメータ最適化を図り、0.18 deg/mm、損失 1dB、PDL0.3dB 以下の光学系を実現した。MEMSミラーは、波長毎のシャッタ機能追加のため、2軸駆動型ミラーの試作をおこない、縦方向 6° 、横方向 2.5° の特性を得た。

以上の部材と、新規に開発した制御回路を組合せた波長選択スイッチモジュール(波長間隔: 100GHz、 4×1)を試作し、特性の確認と、制御アルゴリズムの検討をおこない、50GHz以上の透過帯域、6dB以下の損失、5msの切り替え速度を確認した。本モジュールを課題アのサブシステムに組み込み評価をおこない、所望の特性が得られ、中間目標を達成した(達成度 100%)。

18年度は、中間評価での試作結果と抽出課題を受け、最終目標到達に向けた課題解決の検討を進めると共に、製品化に向けモジュールの完成度を向上させる。

(a)光学系の開発

最終目標の損失レベルの実現と、製品化時の特性向上、量産性向上に向け、光学系(特に実装系)の改善検討を進める。部材の特性ばらつきと、実装ばらつきを低減させる手法の検討と、トレランス拡大方法の検討、試作による検証を中心に進める。

(b)アナログ動作可能な光スイッチング部の開発

製品化に向け、波長選択スイッチモジュール全体での特性最適化のため、MEMS構造最適化を進める。合わせて継続的なMEMSプロセスの加工精度の向上に取り組み、一層の動作性能の均一性向上、低電圧化、歩留まり向上を目指す。

(c)モジュール化開発(防振技術、制御技術開発)

実装技術においては、実使用環境に対応するため、振動・衝撃性の向上をめざし、筐体構造の強化と、防振部の最適化を進める。

制御技術開発においては、最終目標の動作速度、安定性実現に向けた制御回路パラメータの最適化、制御時ノイズ低減をシミュレーション、試作を通して進める。

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

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の開発を目的とする。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	
位相リップル	< +/-55 mrad	< +/- 55 mrad	
応答速度	< 3 ms (制御時間含む)		

中間目標達成、事業化に向け、経済的な波長分散補償器として検討してきた構成（PLC型、エタロン型（今年度より開始）、MEMSを補償可変部に用いたMEMS+マイクロオプティクス型）の課題と目標に対する達成率（実現性）を整理した。

表 4-3-1-2 に上記 3 方式の達成状況を示す。中間目標の評価項目（分散スロープ補償幅、分散補償幅、動作速度）に対しては、試作による目標値の直接確認には至っていないが、原理試作等により達成方法（多段化、MEMSの振り角の波長選択スイッチ用MEMSレベルへの拡大等）が明確に判っており、実質80～90%の達成レベルである。

ただし、最終目標達成、今後の製品化に対しては、PLC型、MEMS+マイクロオプティクス型では損失低減が非常に大きな課題となっている。一方、エタロン型は、損失の問題を解決する可能性が高いが、チャンネル数の拡大が現状での課題である。今後、損失の改善をポイントに検討を進め、3構成から最終形態を選択する。

表 4-3-1-2 分散補償器 3 構成の中間目標達成状況、及び課題比較

	PLC型	エタロン型	MEMS+ マイクロオプティクス型
波長分散補償量方式	分散スロープ補償		個別チャンネル補償
分散スロープ補償幅	◎	◎	○
分散補償幅	◎	◎	○
動作速度	○	△	○
損失・損失傾斜	×損失傾斜大	○	×20~30dB
チャンネル間隔(FSR)	×:50GHz 以上困難	○	○
小型・低コスト	◎	△	×
主要課題	周回損失低減	チャンネル数拡大	損失低減

- ◎：試作により達成確認。 △：検討中
- ：原理実験、試作結果にもとづき、目標達成の見込み。
- ◎：シミュレーション、または計算にもとづき、目標達成の見込み。
- ×：実験、シミュレーションにおいて、達成が厳しい見込み。

4-3-2 小型化・低コスト化検討（過去提案した分散補償器の課題整理）

小型化、低コスト化検討の前提として、実現性の判断が必要であり、過去取り組んだ方式について、現状の問題点との解決の可能性を含め課題を整理し、必要に応じ新規方式を考案、検討する。

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。

副課題ウでは、双方の方式について、試作検討を進めた。

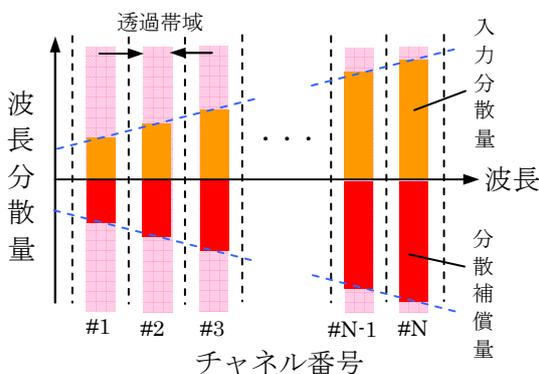


図 4-3-2-1 分散スロープ補償方式

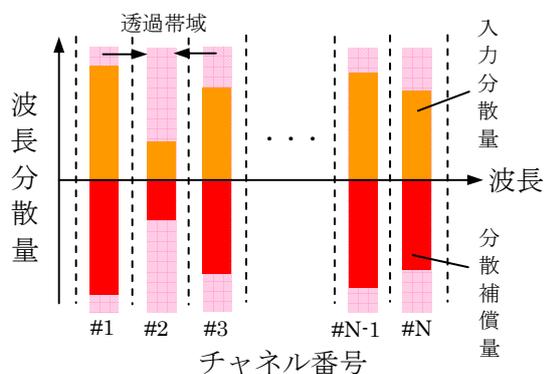


図 4-3-2-2 個別チャンネル補償方式

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。

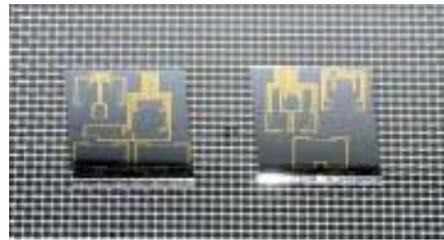
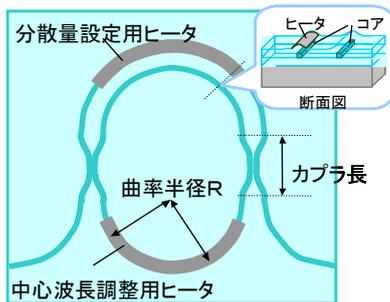


図 4-3-2-3 リング型 All-Pass フィルタ

図 4-3-2-4 試作チップ

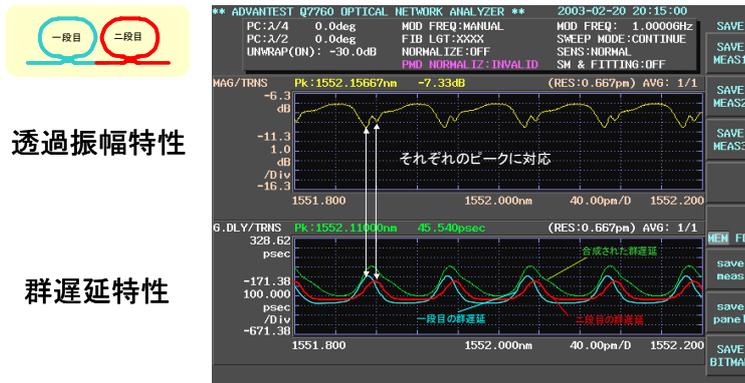


図 4-3-2-5 試作チップの透過振幅特性（上）と群遅延特性（下）

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。

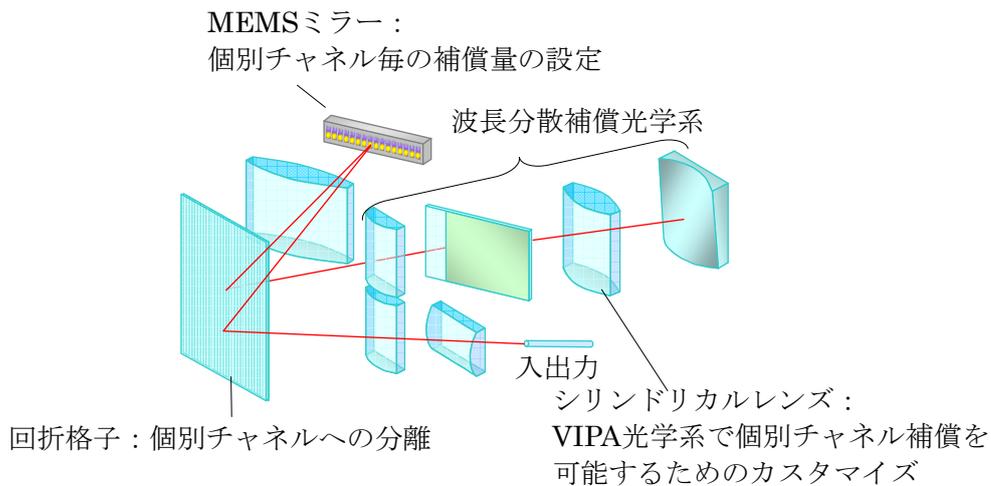


図 4-3-2-6 MEMS+マイクロオプティクス型個別チャンネル波長分散補償器

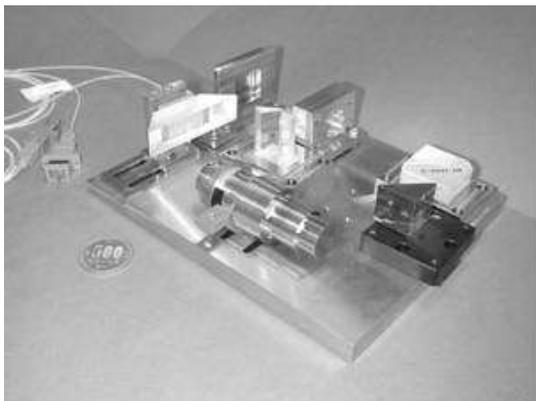


図 4-3-2-7 試作モジュール

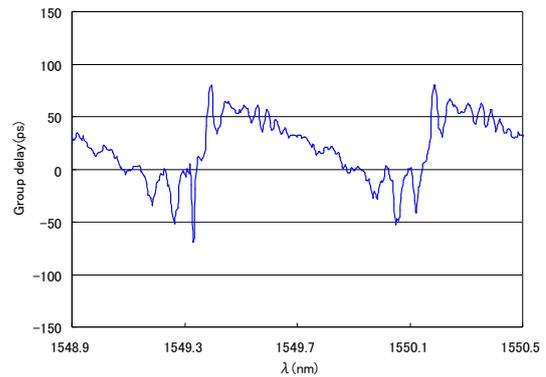


図 4-3-2-8 群遅延特性

4-3-2-4 エタロン型

エタロン型は一括スロープ補償方式の補償器として検討を開始した。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。そこで今回、新たに、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器を考案した。詳細を次節にて説明する。

4-3-3 光学特性の改善

実用的な損失値を得る可能性が高いと考えられるエタロンを用いた構成について詳細検討を進めた。

4-3-3-1 反射型エタロン基本動作

図 4-3-3-1 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。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。

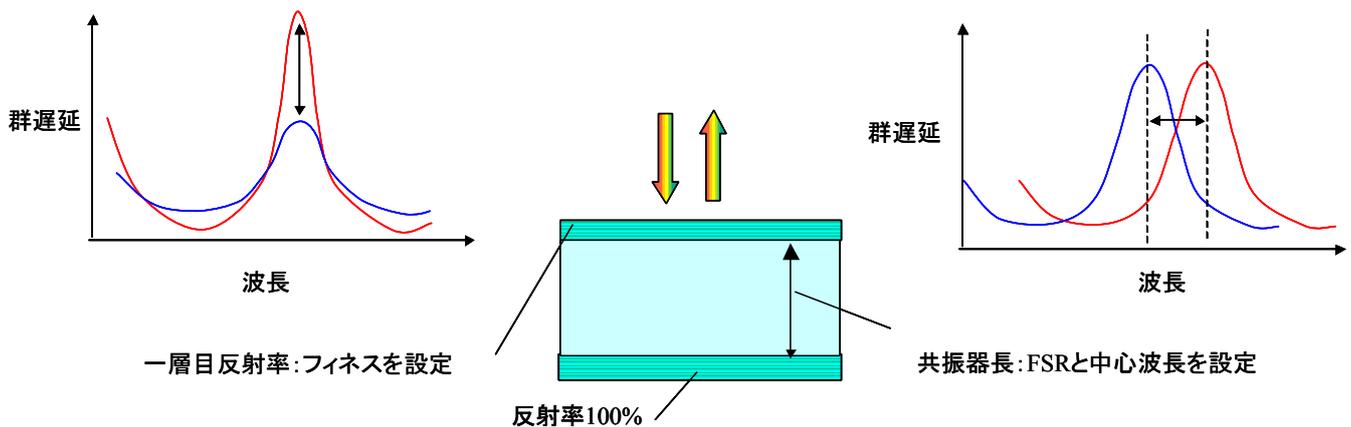


図 4-3-3-1 反射型エタロンのパラメータと特性との関係

4-3-3-2 量産性を考慮した補償量可変方法の考案

反射型エタロンを用いて補償量を可変とできるものが、特開2004-191521等に開示されている。これらは低い反射率の膜において、膜の反射率が一方向に変化する膜を用い入射位置を変化させることにより、分散量を可変としている。

しかしながら分布を持った膜は、図4-3-3-2左図に示すように反射コートの層数を一方向に連続的に変える必要がある。そのため蒸着材料を換える度にマスクの交換が必要、もしくは、基板の上下が必要である、さらにはマスク面への蒸着ソースの回りこみ等の対策が必要であり、生産性、均一性に課題がある。

そこで生産性のよい面分布の無い膜での可変方法として、使用波長範囲において、一層目の反射膜の反射率が入射角度によって異なるエタロンを用い、膜への入射角を、回転機構等をもちいて変化させることにより実現する構造を考案した。この構成により、生産性のよい面分布の無い膜で補償量を可変とすることができる。

図 4-3-3-3 は、その反射膜の特性例であり、入射角10度の違いにて1550nm付近で反射率が20%から75%まで変化する例である。このような膜の特性は、光バンドパスフィルタのエッジ部分を、使用波長範囲に設定することにより実現することができる。また変化率も膜の総数、厚みにて設定することができる。

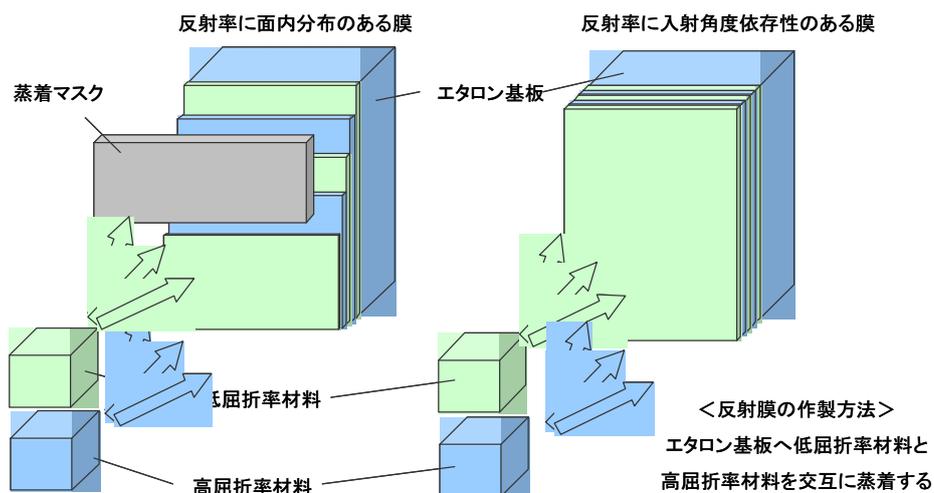


図 4-3-3-2 分布膜の製法（左）と一様分布膜の製法（右）

そこで生産性のよい面分布の無い膜での可変方法として、使用波長範囲において、一層目の反射膜の反射率が入射角度によって異なるエタロンを用い、膜への入射角を、回転機構等もちいて変化させることにより実現する構造を考案した。この構成により、生産性のよい面分布の無い膜で補償量を可変とすることができる。

図 4-3-3-3 は、その反射膜の特性例であり、入射角 10 度の違いにて 1550nm 付近で反射率が 20% から 75% まで変化する例である。このような膜の特性は、光バンドパスフィルタのエッジ部分を、使用波長範囲に設定することにより実現することができる。また変化率も膜の総数、厚みにて設定することができる。

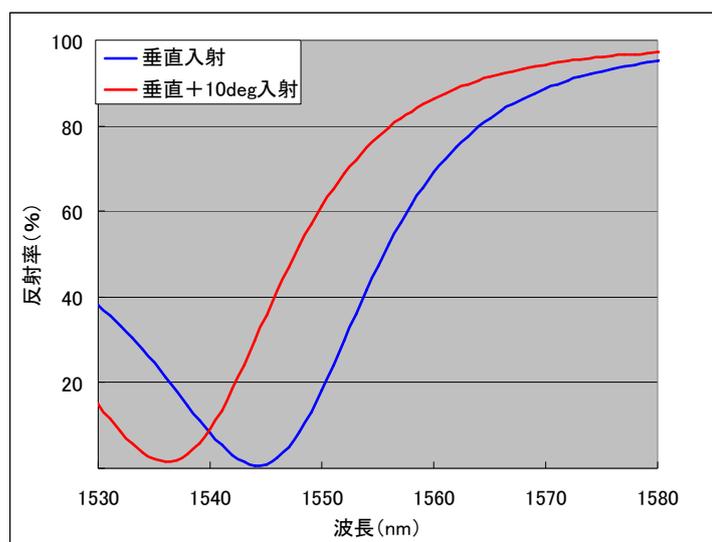


図 4-3-3-3 入射角度により反射率が異なる膜の特性例

図 4-3-3-3 に示す特性は、連続的な波長依存性があり、発生する群遅延量が波長毎に変化することを意味し、これより分散補償量の波長方向の連続的変化つまりスロープ特性を

得ることができる。

図4-3-3-4に図4-3-3-3の特性のエタロンを多段化した場合のスロープ補償特性（シミュレーション値）を示す。分散スロープ変化量は4chにおいて36ps/nm²以上（目標値クリア）である。透過特性においては、P L C型に比べ一回の反射損失が1/8程度まで低減され、3dB帯域確保の可能性が高いことが判った。設計上の課題は、入射角度変化によるチャンネル間隔の変化の低減と適用チャンネル数の拡大である。

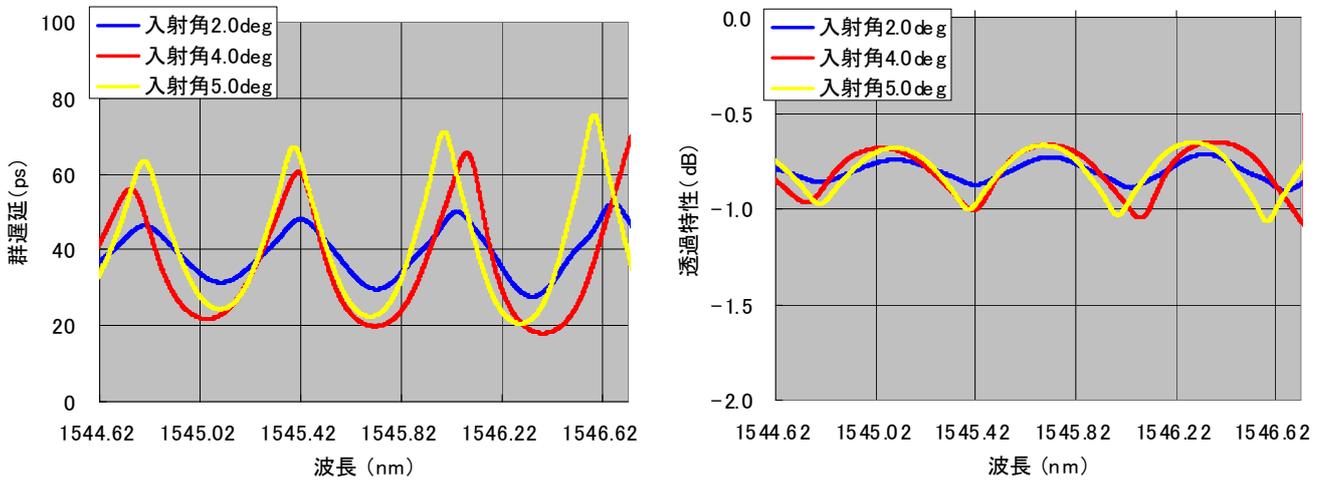


図 4-3-3-4 「図 4-3-3-3」の膜特性を多段化して得られる分散スロープ特性（Sims.値）

図4-3-3-5はこのようなエタロンに対する可変機構を有するモジュール構成案である。本構成では、エタロンを僅かに傾斜させ、対向させ多段化し、対向させたエタロンを一つの回転ステージに搭載し、ステージを押し出し機構にて回転させるものである。

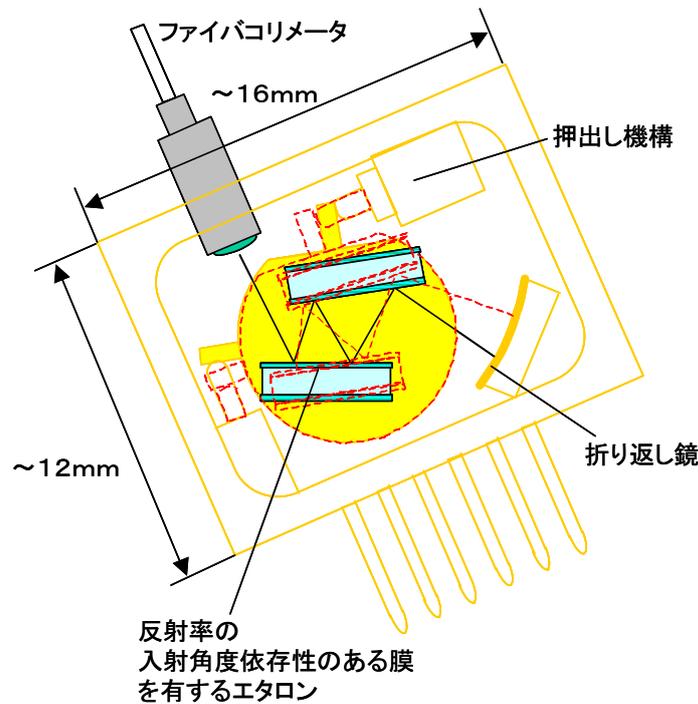


図 4-3-3-5 可変機構を有するモジュール構成案

4-3-3-3 原理実験

図 4-3-3-3 に示す反射率が入射角度依存性を有する特性を狙ってエタロンの試作を行った。エタロン型分散補償器の原理実験系を図 4-3-3-6 に示す。

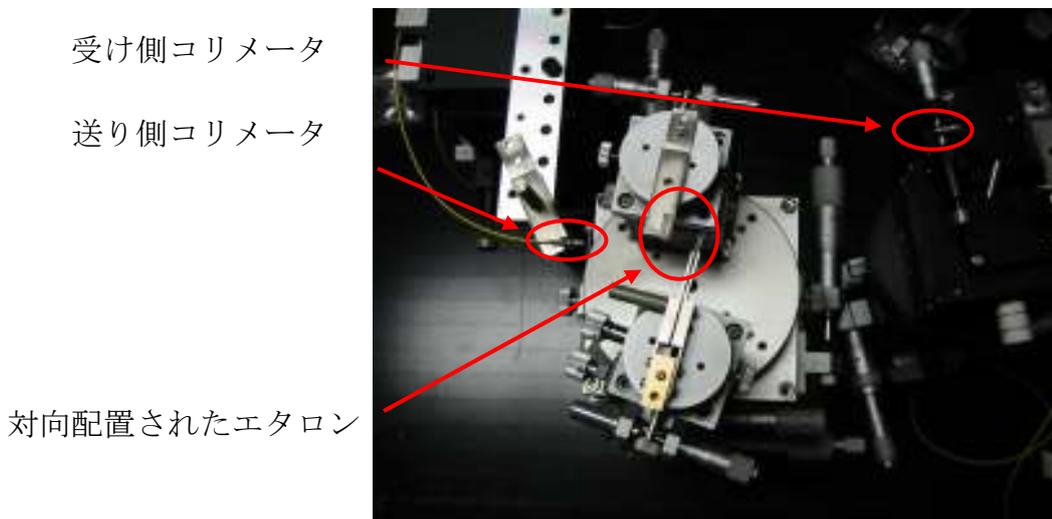


図 4-3-3-6 エタロン型分散補償器原理実験系

試作したエタロン一段での群遅延特性を図 4-3-3-7 に示す。入射角度を 0 度から 5 度まで変化させるに従って、群遅延のフィネスが設計通り変化することを確認した。

図 4-3-3-8 に多段化 (3 段) した場合の群遅延特性、図 4-3-3-9 にその透過特性を示す。多段化された群遅延特性において、帯域が拡大されること、多段化時においても分散スロープ特性が実現できることを確認した。透過特性については、シミュレーションの予想値よりも悪いが、最大 7 dB であり、過去検討の構造で最も低損失である。損失増加の原因としては、コリメータのビームの広がりと考えられ、今後の最適化が必要である。

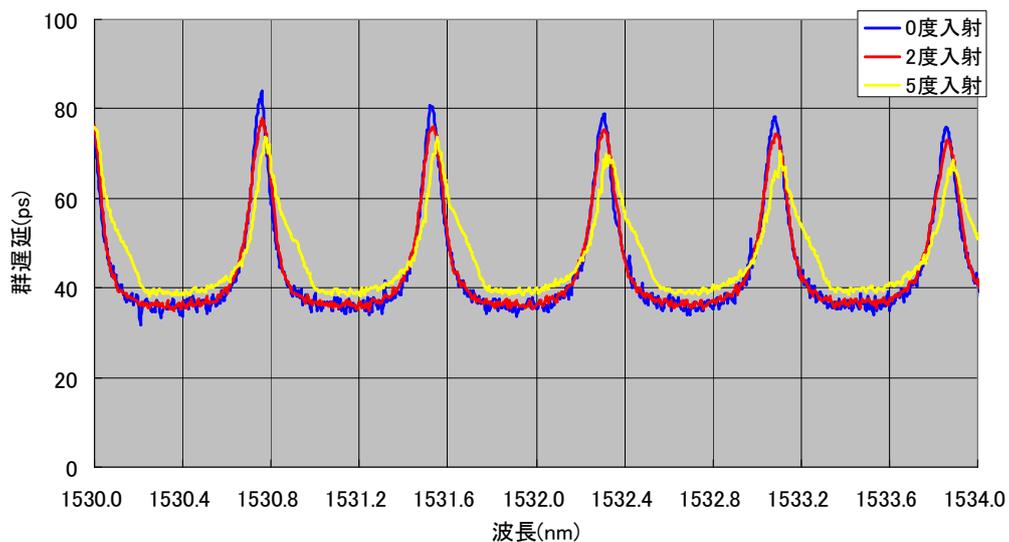


図 4-3-3-7 試作したエタロンの群遅延特性 (実測)

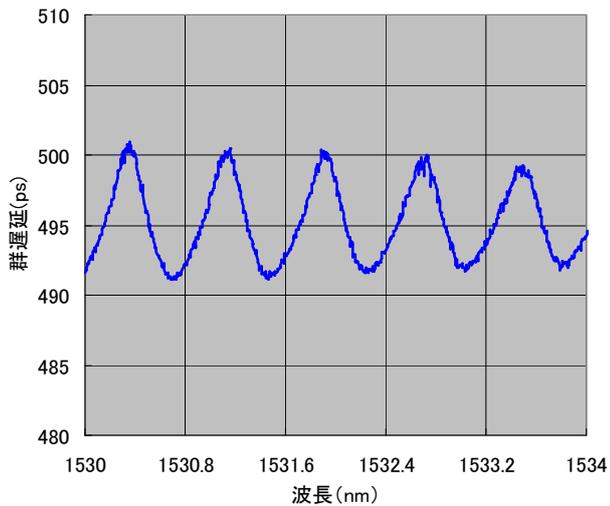


図 4-3-3-8 多段化時の群遅延特性 (実測)

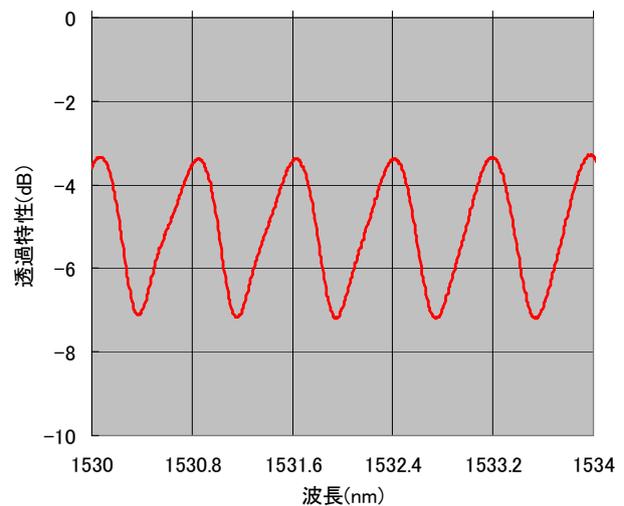


図 4-3-3-9 多段化時の透過特性 (実測)

4-3-4 制御技術の開発

エタロン型の制御機構は、本年度からの検討であり遅れている。来年度、早期に試作検証を進める予定である。

4-3-5 まとめと今後の課題

中間目標達成、事業化に向け検討してきた構成（PLC型、MEMSを補償可変部に用いたMEMS+マイクロオプティクス型）の課題と目標に対する達成率（実現性）を整理した。これらは中間目標の評価項目（分散スロープ補償幅、分散補償幅、動作速度）に対しては、原理試作等により達成方法が明確に判っており実質80～90%の達成レベルであるものの、最終目標達成、今後の製品化に対しては、損失低減が非常に大きな課題となっている。

そのため本年度は、この損失問題を解決する可能性の高いエタロン型スロープ補償器を新規に考案し、原理確認を行った。損失は従来の検討構造中で最も良好なことを確認した。

今後は、更なる低損失化とチャネル数の拡大、可変動作のモジュールでの確認が課題である。

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。

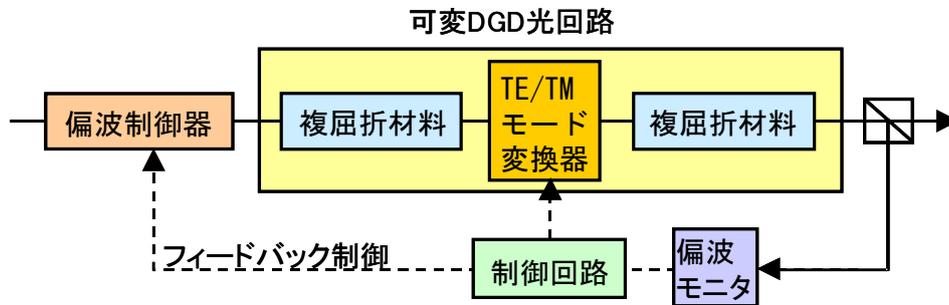


図 4-4-1-1 偏波モード分散補償モジュールの構成図

平成17年度は、平成16年度までに試作した各要素デバイスを用いて、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い、偏波モード分散補償モジュールを組上げる。また、その特性を評価し、1波長分について表 4-4-1-1 に示す目標特性で満足することを確認する。

さらに、最終目標である8波長以上の機能集積化、アレイ化に向けて、各要素デバイスの検討を進める。

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 偏波モード分散補償モジュール制御回路の開発

①制御回路構成

昨年度までに試作を行った各主要光デバイス（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。図 4-4-2-1 に制御回路の構成を、図 4-4-2-2 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示す。

制御回路系は、偏波モニタで得られる3つの偏光成分と光信号強度をトランスインピー

ダンスアンプ (I/V コンバータの役割も持つ) で増幅する。増幅された信号はローパスフィルタを介した後、A/D 変換を行い、FPGA で後述のアルゴリズムに従った演算処理を行い、制御信号を出力する。制御信号は、D/A 変換を行った後、ドライバーで所望の高電圧信号に増幅され、偏波制御器および可変 DGD に入力される。

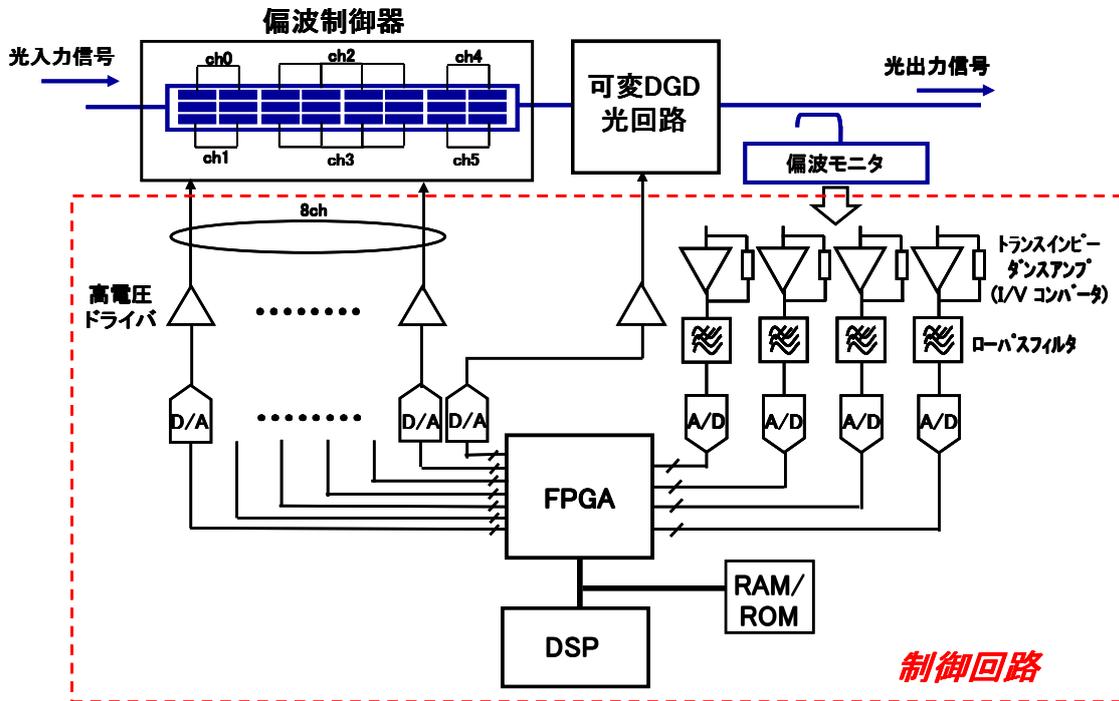


図 4-4-2-1 偏波モード分散補償モジュール制御回路の構成



図 4-4-2-2 偏波モード分散補償モジュール写真

②偏波制御器制御アルゴリズム

偏波モード分散補償モジュールの基本的な制御法は、モニタした偏光度 (DOP) が最大値になるように偏波制御器と可変 DGD 光回路をディザリング制御している。まず偏波制御器に関しては、偏波制御器を微小動作させて可変 DGD 光回路系への入射偏光状態を変化させながら DOP 値の測定を行い、DOP 値が最高値を返す偏光状態になるように偏波制御器を制御する。

具体的には図 4-4-2-3 に示すように、偏波制御器によって偏光状態を①、②、③の方向に変化させ、より DOP の高い偏波状態を探す。偏波制御器の制御フローチャートを図 4-4-2-4 に示す。

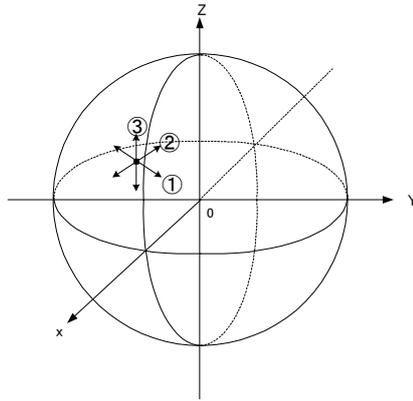


図 4-4-2-3 ポアンカレ球上の偏波変化

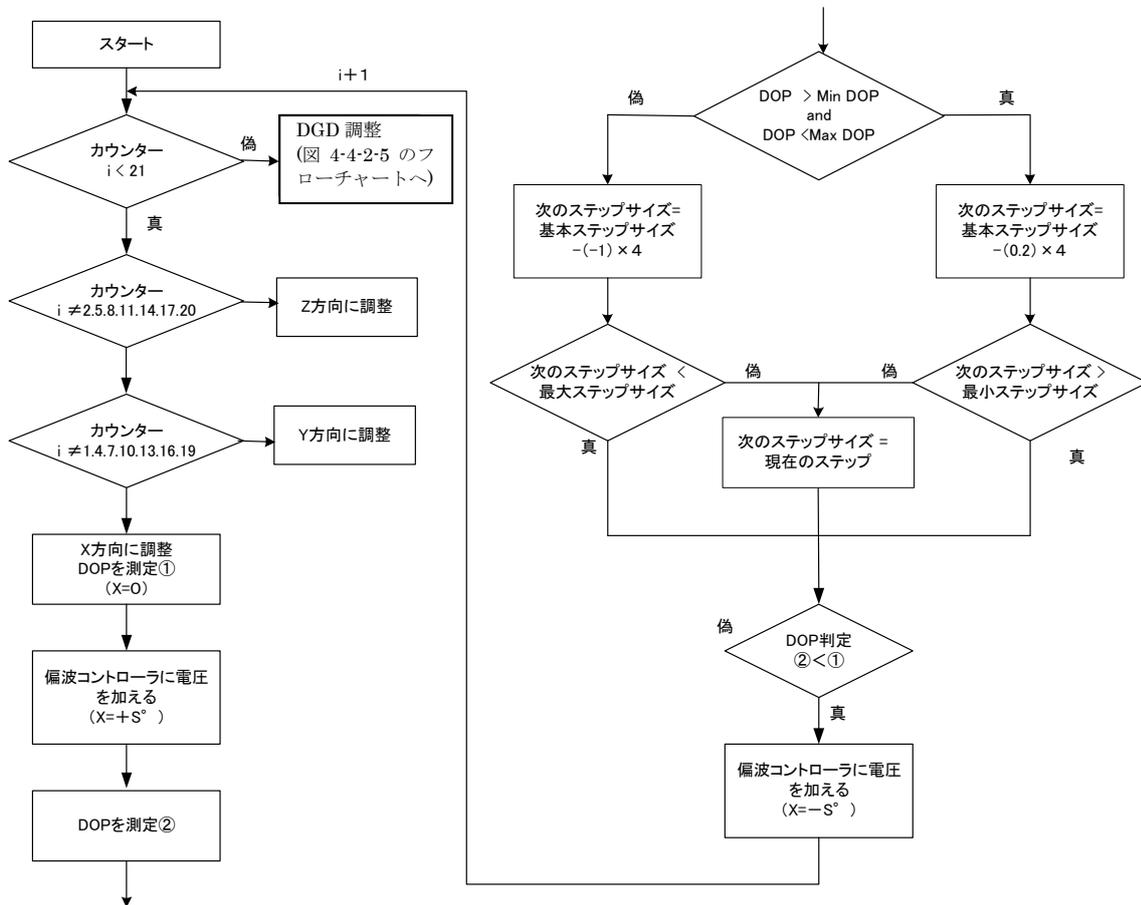


図 4-4-2-4 偏波制御器制御フローチャート

③可変 DGD 光回路制御アルゴリズム

光信号の DGD の変動は偏波変動より遅いため偏波制御器の制御を 20 回行った後に、可変 DGD 光回路の制御を 1 回行う。可変 DGD 光回路の制御は偏波制御器同様、内部の位相シフタ (E0 型の場合。M0 型の場合はファラデー回転子) の角度を変化させ、変化前後の DOP

の測定を行う。測定した DOP のうち、数値が高い方に位相シフタ（ファラデー回転子）を設定する。この制御を連続的に行い伝送路中の DGD 変化に追尾を行う。可変 DGD 光回路系制御フローチャートを図 4-4-2-5 に示す。

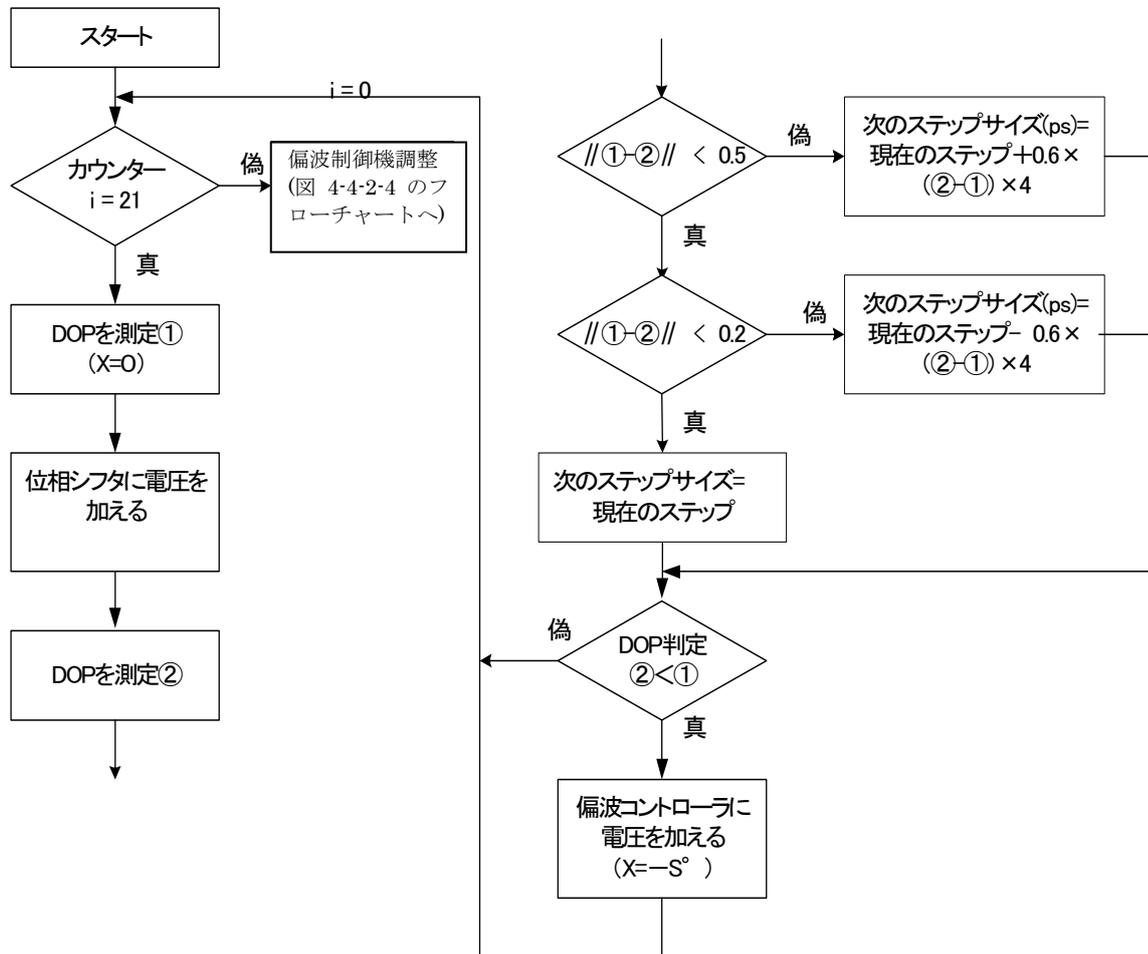


図 4-4-2-5 可変 DGD 光回路系制御フローチャート

④偏波モード分散モジュールの評価

副課題アに記載されているように PMD 補償実験に適用し、DGD 補償範囲として、28 ps と仕様を満足する良好な特性を得た。

4-4-3 アレイ化に向けた検討

最終目標である 8 チャンネルアレイ化に向けて、各要素デバイスの検討を行った。

偏波制御器について、アレイ化で課題となる点は、低電圧化、及び、電極との配線本数が増加することによる配線方法がある。今年度は、そのうち、低電圧化について検討を行った。図 4-4-3-1 に示すように、導波路をリッジ構造とした検討を行った。有限要素法を用いたシミュレーションにより図 4-4-3-2 に示すように 20%程度の低減が見込まれることがわかった。

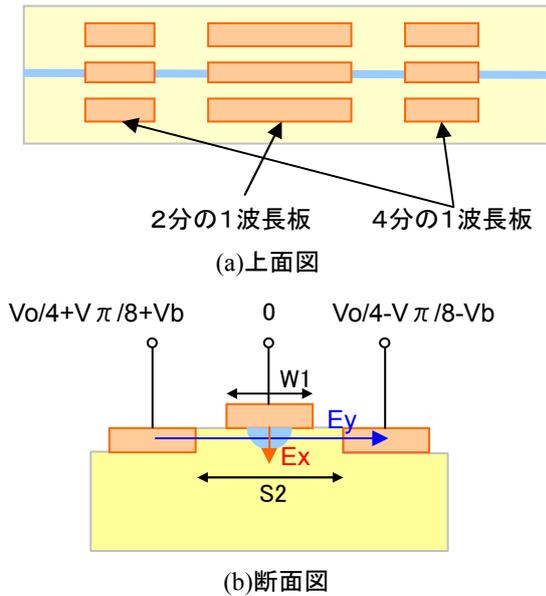


図4-4-3-1 X-cut Y伝播LiNbO3偏波制御器

次に、可変 DGD 光回路について、EO型、MO型の両タイプについて検討を進めた。EO型については、課題として、挿入損失の低減、及び、低電圧化が挙げられる。まず、低電圧化の為、偏波制御器と同様に図 4-4-3-3 に示すリッジ導波路構造の検討を行った。その結果、図 4-4-3-4 に示すように、リッジ構造とすることにより、約 20%の低減が可能であることがわかった。そこで、試作を行い、 $V\pi$ の低減を確認したところ、図 4-4-3-4 のリッジなし（赤印）からリッジあり（青印）となり、実験値でも 20%の低減を確認できた。

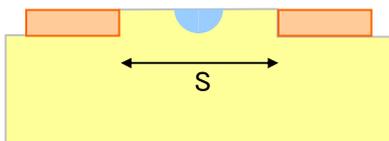


図4-4-3-3 EO型可変DGD光回路の位相シフト部の断面構

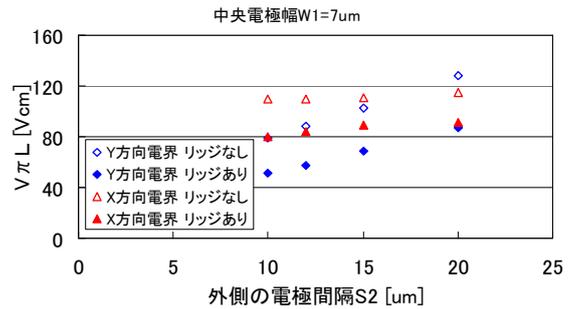


図4-4-3-2 リッジ導波路構造による偏波制御器の低電圧化

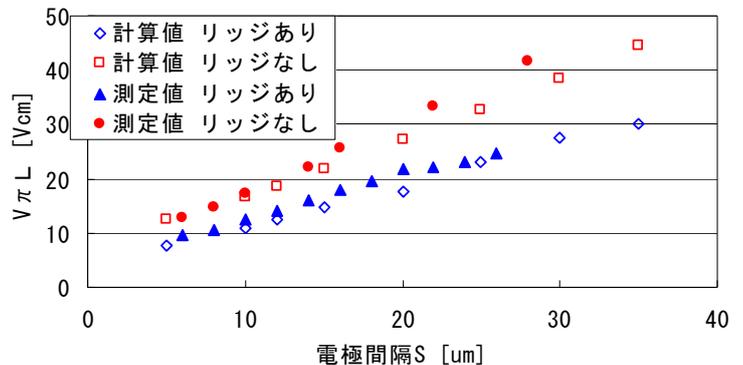


図4-4-3-4 EO型可変DGD光回路の低電圧

MO型については、課題としては、小型アレイ化が挙げられるが、前年度まで用いていたファラデー回転子は、電磁石が左右に 10mm 程度ずつある為、近接させることは困難な為、他の構造について検討を進めた。図 4-4-3-5（文献 4-1）に示す構造は、これまでとは異なって、多重反射を用いているので、光の進行方向に電磁石が配置される構造となるので、近接させることが可能と考えられ、小型化に適していると考えられる。今後、詳細に小型アレイ化の可否について検討を進め、EO型と比較して、優劣を判断・絞り込みを行う。

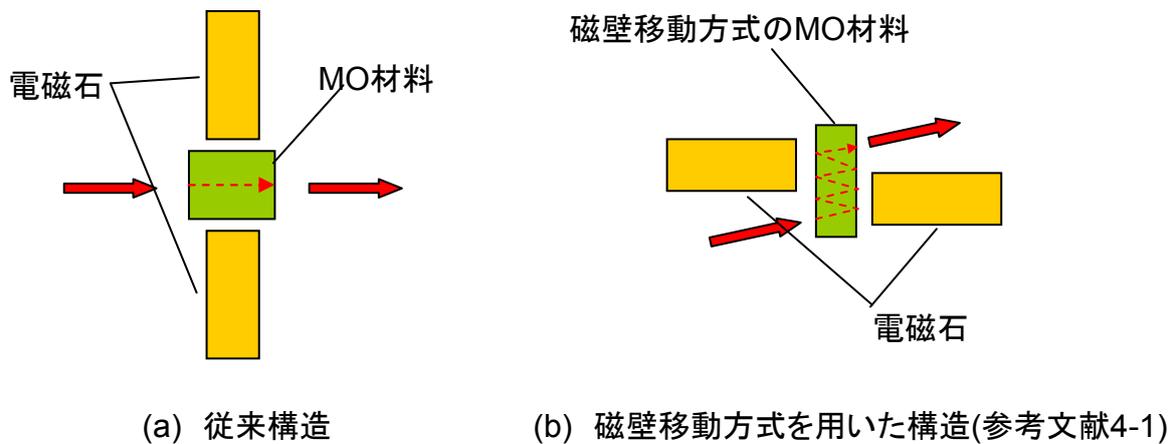


図4-4-3-5 ファラデー回転子

4-4-4 まとめ

昨年度までに試作した各要素デバイスの制御回路を試作し、偏波分散補償モジュールを組み上げた。そのモジュールを PMD 補償実験に適用し、良好な特性を得ることができ、中間目標を達成することができた。

また、最終目標に向けて、機能集積化、アレイ化の検討を進めた。偏波制御器について、リッジ導波路構造とすることにより約 20%の低電圧化の見通しを得た。もう一つの課題である配線手法については、来年度検討を行い、アレイ化モジュールを試作する予定である。

可変 DGD 光回路のアレイ化は、EO型については、偏波制御器と同様にリッジ構造とすることにより約 20%の低電圧化を実現した。低損失化については、来年度継続検討していく。また、MO型については、ファラデー回転子の小型化によるアレイ化の検討を行い可能性のある構成を抽出した。小型ファラデー回転子の入手可能性を含めて来年度検討を行い、EO型、MO型の絞込みを行う。

4-5 総括

17年度は中間目標である各モジュール(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)の基本機能の実現と、サブシステムとしての動作検証実験に向け、各副課題の検討を進めた。

副課題イでは、高精度コリメータアレイの新規開発と、パラメータを最適化した透過型回折格子、2軸駆動型のMEMSミラーを用い、波長選択スイッチモジュール(波長間隔: 100GHz、4×1)を試作し、特性の確認と、制御アルゴリズムの検討をおこなった。50GHz以上の透過帯域、6dB以下の損失、5msの切り替え速度を確認した。本モジュールを課題アのサブシステムに組み込み評価をおこない、所望の特性が得られ、中間目標を達成した(達成度 100%)。

副課題ウでは、過去検討の構造の課題を整理し、小型・低コスト化、十分な補償特性の改善の可能性を判断し、過去検討の構造の損失低減への限界から新規にエタロンを用いた補償構造を考案し、原理確認を行った。エタロン型の制御系開発は今期からのため遅れており、来年度、早期に試作検証を進める予定である。

副課題エでは、各要素デバイスの制御回路を試作し、偏波分散補償モジュールを組み上げた。そのモジュールを PMD 補償実験に適用し、良好な特性を得ることができ、中間目標

を達成した。また、最終目標に向けて、機能集積化、アレイ化の検討を進め、開発の指針を得た。

副課題アでは、以上で開発した各モジュールの伝送特性評価と、特性検証を中心に進めた。波長選択スイッチモジュールに関しては10 Gbit/s 信号に対する方路切り替え実験を、偏波モード分散補償モジュールに関しては40 Gbit/s 補償実験を行うことで、基本動作特性を検証した。波長分散補償モジュールに関しては、モジュール試作が間に合わなかったため、伝送波形シミュレーションにより、補償特性を確認した。中間目標に対する達成状況としては、各機能モジュールの基本機能確立という目標に向けて、まず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。各副課題と連携して、モニタ・制御系の試作を行った。さらに、試作を進めている各モジュールの基本的な伝送特性の評価を行った。以上から、中間目標の90%を達成したと考える。未達成の項目としては、波長分散補償モジュールに関して補償実験まで到らなかった点があり、モジュール試作が行われるH18年度前半に行う予定である。

以上、中間目標の達成に向け、試作・評価を進め、一部のモジュールでモジュール試作にまで至らなかった部分はあるが、全体としてはほぼ中間目標を達成できたと考えている(95%の達成度)。次年度は、遅延気味である波長分散モジュールの開発を加速すると共に、最終目標の達成に向け、各モジュール・サブシステムの開発を進める。

5 参考資料・参考文献

[1-1] H. Bissessur, C. Bastide, A. Hugbart, “Performance characterization of components with phase ripple for different 40Gb/s formats”, OFC 2006, OFN4, Anaheim, 2006.

[1-2] 吉見 英朗、多久島 裕一、小関 泰之、呉 志松、菊池 和朗、「群遅延リプルによるアイ開口ペナルティの最悪値推定法」、2002 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-123.

[2-1] 山本 毅、森 和行、赤司 保、坂井 良男、壺井 修、上田 知史、佐脇 一平、河合 正昭、「MEMS を用いた高速多チャンネル光スイッチ」2005 年信学技報 PN2005-21 等

[4-1] 岩塚、「磁壁移動方式を用いた多重反射可変ファラデー回転子」2005 年電子情報通信学会総合大会 C-3-44(2005)

5-1 研究発表・講演等一覧

無し