

平成18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19年4月

情報通信研究機構

平成18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	光ハブ構成およびエタロン型波長分散補償モジュール目標特性検討	11
4-1-3	各モジュール伝送特性評価	17
4-1-4	まとめと今後の課題	20
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	25
4-2-4	モジュール化技術の開発	26
4-2-5	波長選択スイッチモジュールの試作	29
4-2-6	まとめと今後の課題	30
4-3	波長分散補償モジュールの研究開発	31
4-3-1	波長分散補償モジュール開発の概要	31
4-3-2	補償特性の改善	32
4-3-3	実装技術の開発	37
4-3-4	制御技術の開発	38
4-3-5	試作による設計検証	40
4-3-6	まとめと今後の課題	42
4-4	偏波モード分散補償モジュールの研究開発	43
4-4-1	偏波モード分散補償モジュール開発の概要	43
4-4-2	要素デバイスのアレイ化試作	43
4-4-3	まとめと今後の課題	48

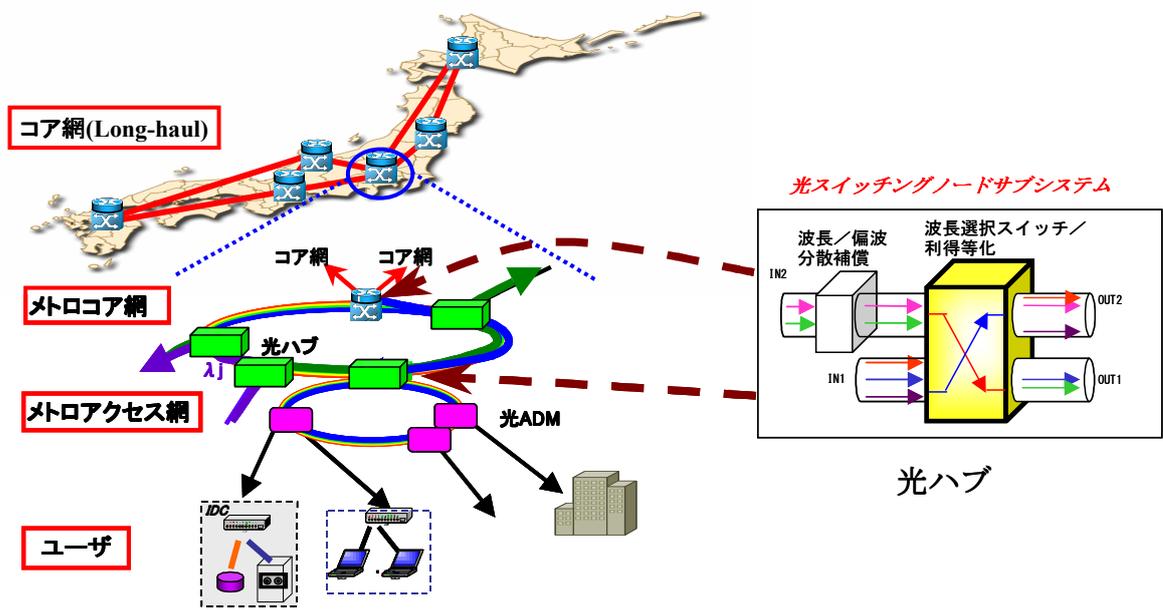
4-5 總括 49

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。



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。

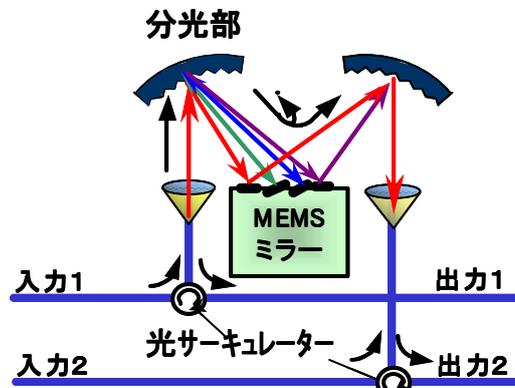


図 2-1：2入力2出力波長選択スイッチ基本構成図

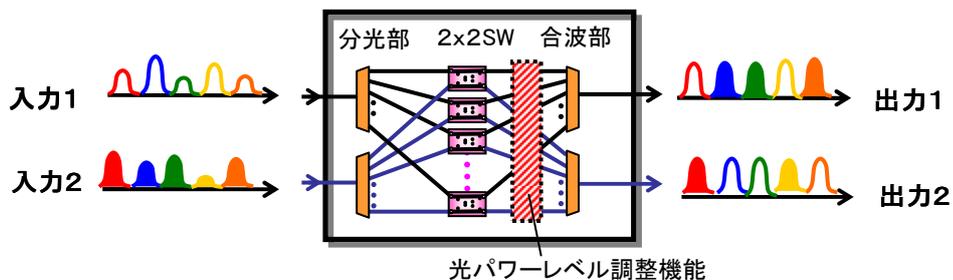


図 2-2：分光部とスイッチ部を一体化した波長選択スイッチの構成例

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。

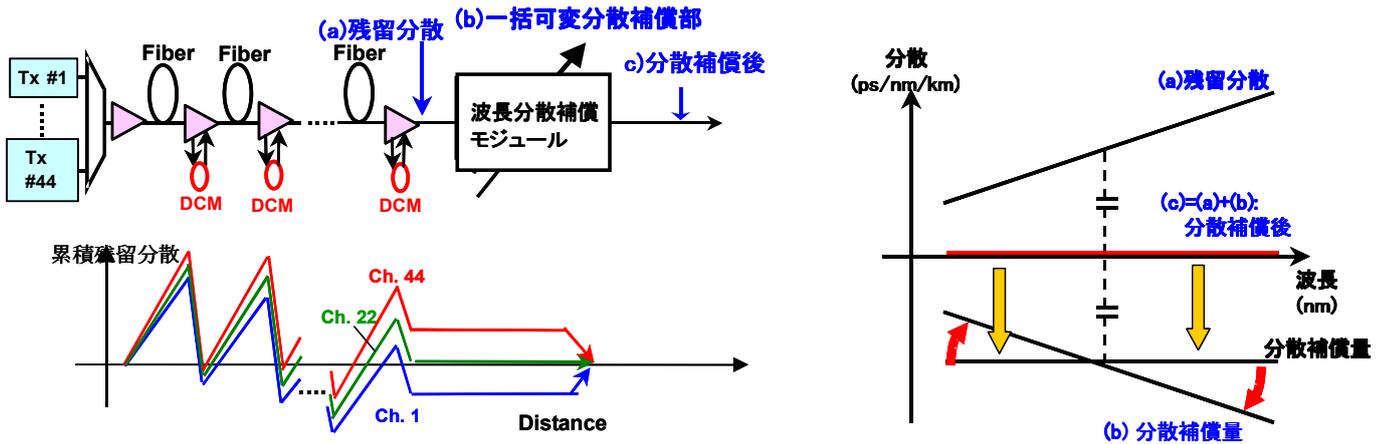


図 2-3 : 残留分散と波長分散補償モジュールの動作

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。

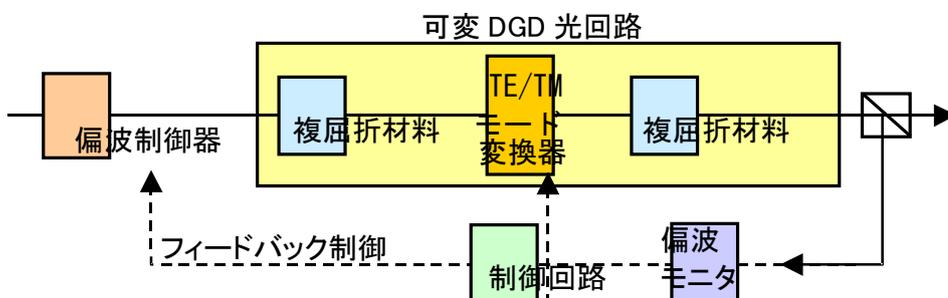


図 2-4 : 偏波モード分散補償モジュールの基本構成図

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-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

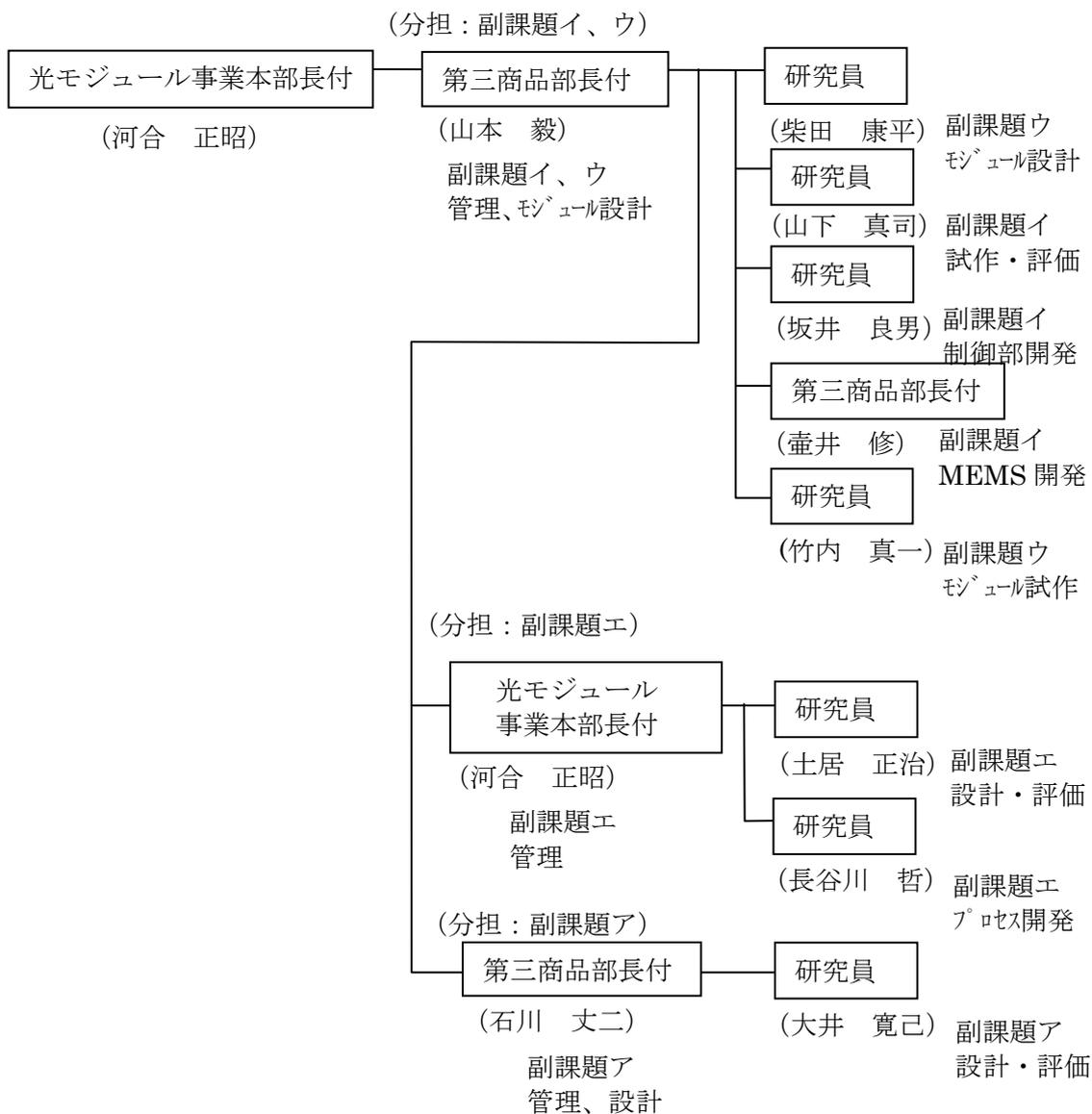
金額は非公表

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。

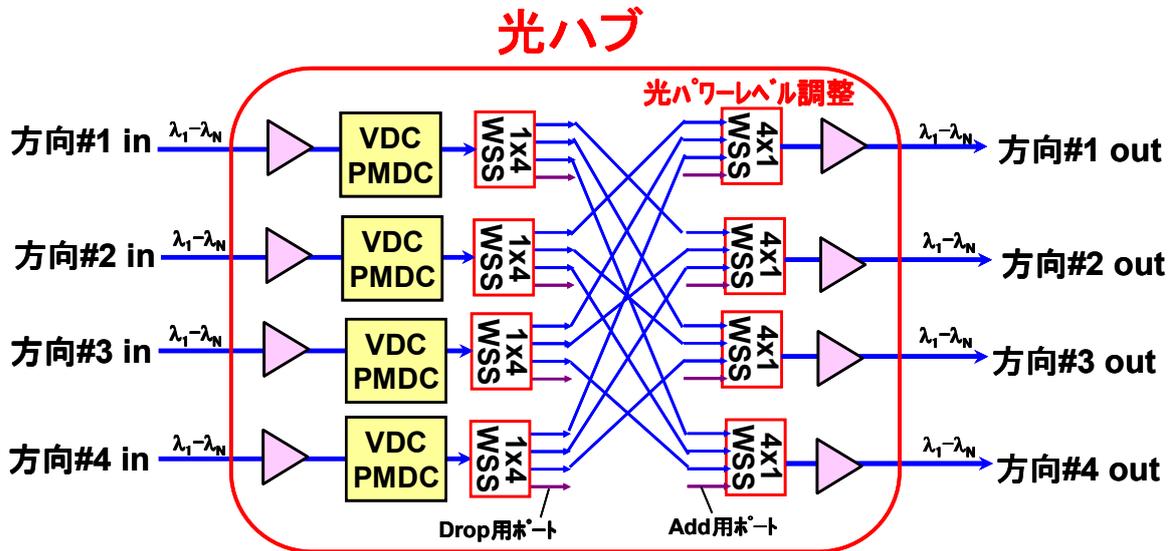


図 4-1-1-1 光ハブの基本構成

今年度は、下記の通り、来年度の統合サブシステム試作に向けた設計を進めるとともに、各モジュールの伝送特性の評価を行った。

(a) 光ハブ構成およびエタロン型波長分散補償モジュール目標特性検討

エタロン型波長分散補償モジュールの適用形態を決定するとともに、それを用いた光ハブ構成の内部構成の検討を行った。また、エタロン型波長分散補償モジュールの特徴を考慮した目標特性の見直しの検討を、伝送シミュレーションで行った。

(b) 各モジュール伝送特性評価

各モジュールの多段透過特性を評価するための短ループ周回伝送実験系を構築した上で、波長選択スイッチモジュールの多段透過特性（Passband narrowing, コヒーレントクロストーク）の評価を行った。さらに、波長分散補償モジュールについても、静特性を用いた伝送シミュレーションによって、多ノード透過時の分散補償特性の評価を行った。

4-1-2 光ハブ構成およびエタロン型波長分散補償モジュール目標特性検討

4-1-2-1 光ハブ構成検討

最終目標の小型・低コストの光ハブの構築を目指して、光ハブの内部構成の検討を進めた。

特に、波長分散補償モジュールに関して、この4年間のサブシステム・モジュールの検討の結果、下記の理由で、従来提案してきた1台のモジュールでの分散スロープ一括補償から、個別チャンネル補償に変更することとした。他のモジュールも含めて、光スイッチノードをトータルで見てコスト、サイズが最終目標を満足できるよう研究開発を進める。

- (a) 長距離伝送においては、伝送路ファイバおよび分散補償ファイバ (DCF) が持つ (分散スロープよりさらに高い次数の) 高次波長分散のばらつきの影響が無視できなくなり、一括分散スロープ補償よりさらに高精度かつ自由度の高い分散補償が必要であること
- (b) 本研究テーマでは、フルバンド (CあるいはLバンド) 40 波長を伝送するシステムを提案しているが、エタロン型波長分散補償モジュール (分散スロープ補償型) は、デバイス原理上、全チャンネル一括の分散スロープ補償を行うことが困難であること
- (c) エタロン型波長分散補償モジュールは、1 台当たりの小型化が可能であり、波長数分のモジュールを用意しても光ハブに内蔵できると考えられること

個別チャンネル補償型波長分散補償モジュールの採用を考慮し、各光ハブノード構成間の比較検討を行った結果、図 4-1-2-1 の構成を採用することとした。つまり、入力段でまず全波長を光 DEMUX (AWG 等) でチャンネル分離する。その後、PMD が大きい伝送路での 40 Gbit/s 伝送を行う場合には、8 チャンネル偏波モード分散補償モジュールアレイ (PMDC) を適用する。さらにエタロン型波長分散補償モジュール (VDC) をチャンネル毎に配置して、高精度な波長分散補償を行う。光波形の補償を行った後に、光 MUX (AWG 等) でチャンネル合波を行い、その後、 $1 \times N$ および $N \times 1$ ($N \geq 4$) の波長選択スイッチモジュール (WSS) の組合せによって、方路切替を行う。

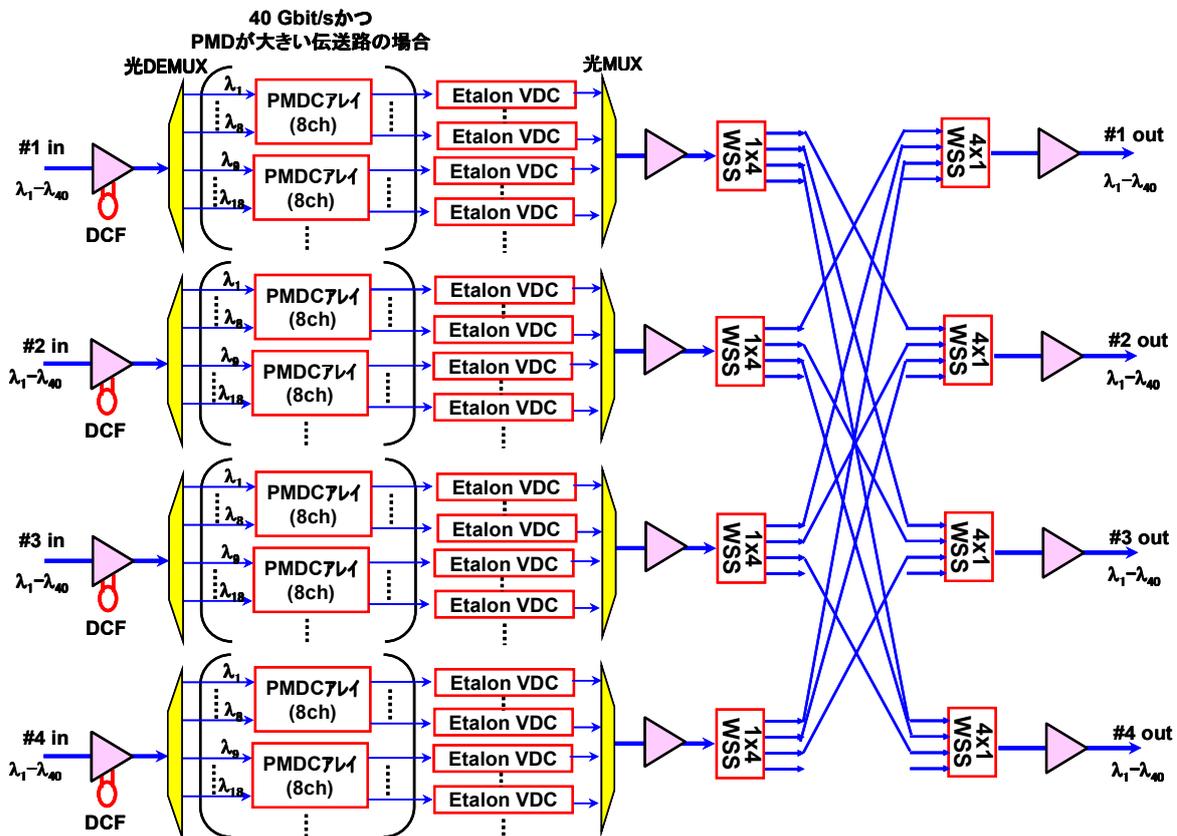


図 4-1-2-1 光ハブの内部構成 (4 方路の場合)

4-1-2-2 エタロン型波長分散補償モジュール目標特性検討

今回、個別チャンネル補償エタロン型波長分散補償モジュールの採用に当たり、同モジュールの特徴を考慮して、10 Gbit/s 伝送用に関して、昨年までに提示した目標特性の見直しを行った。

①透過(損失)帯域幅、損失傾斜

エタロン型波長分散補償モジュールは、デバイス原理的に、「周波数(波長) 対 光透過特(損失)性」が、信号光波長位置で傾斜を持つ。そのため、昨年度までのガウシアン形状を想定した目標特性では、デバイスの実力を正確に表すことができなかった。

今回、「周波数 対 光透過特性」を、ガウシアン形状成分と損失傾斜成分に分離することとした。つまり、波長分散補償モジュール 1 台当たりの光透過特性を下記のように表した。ここで、第一項目はガウシアン形状成分を、第二項は損失傾斜成分(直線近似)を表している。

$$T_1(f)[dB] = 10 \log \left(\exp \left(-2 \ln \sqrt{2} \left(\frac{|f|}{\Delta f_{3dB}/2} \right)^{2n} \right) \right) + k \times f \quad \dots\dots\dots \text{式 (4-1-2-1)}$$

Δf_{3dB} [dB]: 3dB 帯域幅

k [dB/GHz]: 損失傾斜

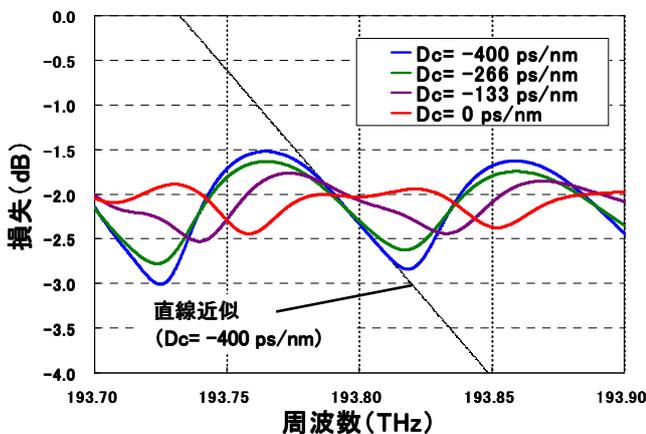
n : ガウシアンの次数

N段透過時のトータルでの光透過特性は下記のように表される。

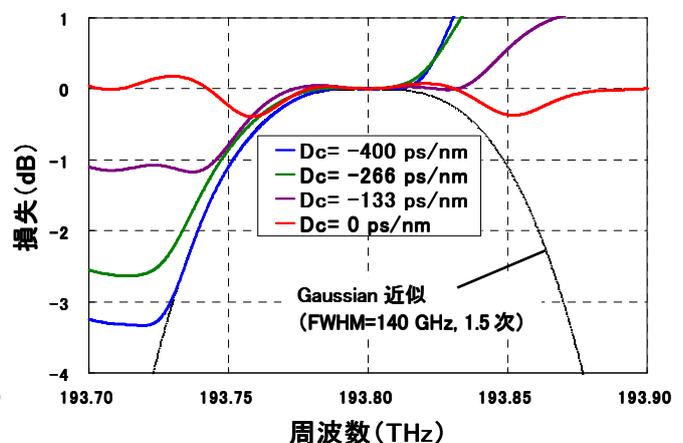
$$T_N(f)[dB] = N \cdot T_1 = 10 \log \left(\exp \left(-2 \ln \sqrt{2} \left(\frac{|f|}{(\Delta f_{3dB} \cdot N^{-1/2n})/2} \right)^{2n} \right) \right) + k \times f \times N \quad \dots\dots\dots \text{式 (4-1-2-2)}$$

つまり、Nノード透過時には、ガウシアン透過帯域幅が $N^{-1/2n}$ 倍に狭くなり、損失傾斜がN倍になることに相当する。

図 4-1-2-2 に、副課題ウにおいて、エタロン型波長分散補償モジュールの光学シミュレーションから求めた 1 台当たりの透過特性を示す。(a)での分散補償量(Dc) -400 ps/nm での例に示すように、まず、「周波数 対 光損失特性」に対して、信号光波長位置(光源波長



(a) 透過特性



(b) (a)一直線近似分(ガウシアン成分)

図 4-1-2-2 エタロン型波長分散補償モジュールの透過特性

の離調を考慮した ITU-T Grid $\pm 3\text{GHz}$ の範囲)において、直線近似を行う。(b)は(a)の透過特性から直線近似分を差し引いたもので、ガウシアン成分に相当する。ガウシアン関数のフィッティング結果から分かるように、各分散補償量に対して、1.5 次のガウシアン形状を示し、3dB 帯域全幅(FWHM) 140 GHz 以上が確保されていることが分かる。

次に、10 Gbit/s 伝送での波長分散補償モジュール(VDC)1 台当たりにより要求される透過帯域幅および損失傾斜を求めるため、伝送波形シミュレーションを行った。図 4-1-2-3 は、ガウシアン成分の透過帯域幅に対する依存性を示す。ここでは、昨年までのネットワークモデルの検討結果に基づき、波長選択スイッチモジュールは帯域幅 60 GHz (FWHM)、3 次のガウシアン形状の透過特性を有し、最大 44 段透過するとした。また、波長分散補償モジュールは、上記結果から 1.5 次のガウシアン形状の透過形状を持ち、最大 9 段透過するとした。(a)は、1 台当たりの VDC 透過帯域幅に対するトータル (WSS 44 段+VDC 9 段) の透過帯域幅を示す。(b)は、1 台当たりの VDC 透過帯域幅に対する Q ペナルティのシミュレーション結果を示す。ここで、信号光波長の離調量 (デチューニング) として、最大 $\pm 3\text{GHz}$ を考慮した。許容ペナルティを 0.5 dB として、波長分散補償モジュール 1 台当たりの透過帯域幅の目標特性を 40 GHz 以上 (FWHM) とした。

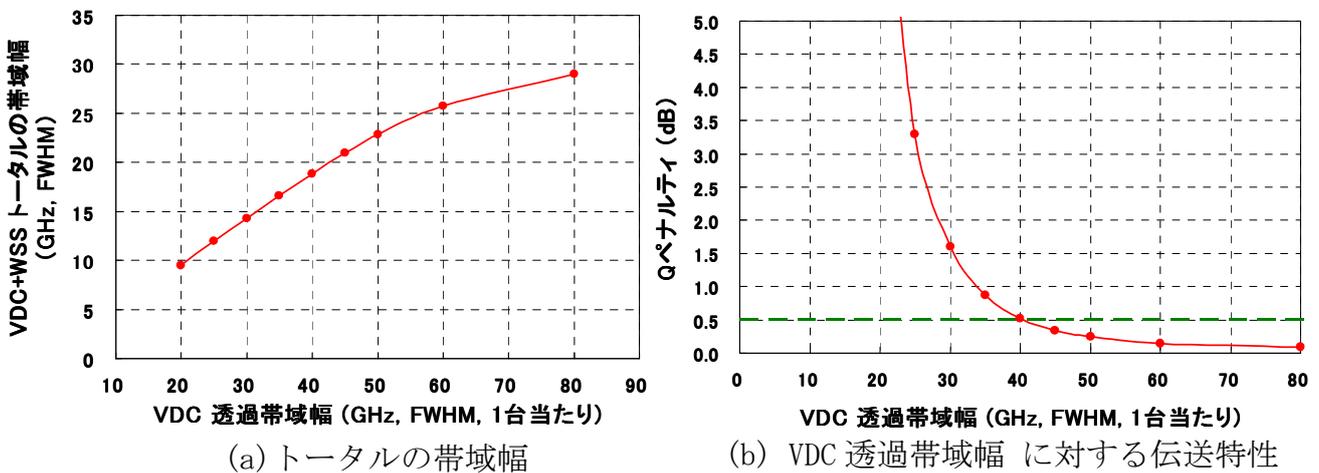


図 4-1-2-3 波長分散補償モジュール透過帯域幅依存性 (ガウシアン成分)

次に、図 4-1-2-4 に損失傾斜成分の依存性に関する伝送シミュレーション結果を示す。ここでは、透過形状として、直線形状 (台形) の透過特性を想定した。許容ペナルティを 0.1 dB として、トータル (VDC 9 台) での許容される損失傾斜の目標特性は $\pm 0.6\text{ dB/GHz}$ ($\pm 75\text{ dB/nm}$) 以下となる。そのため、波長分散補償モジュール 1 台当たりの損失傾斜の目標特性を $\pm 0.067\text{ dB/GHz}$ ($\pm 8.3\text{ dB/nm}$) 以下とした。

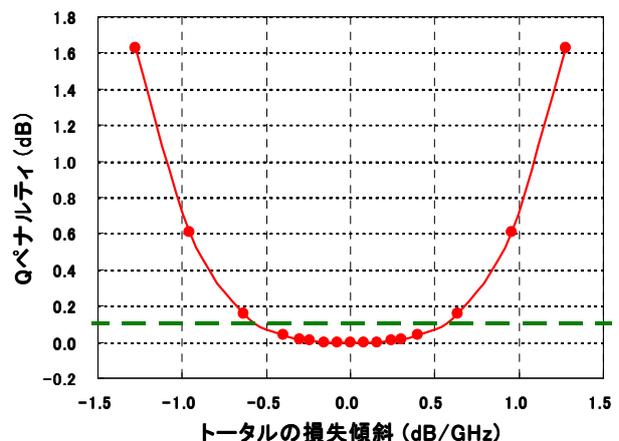
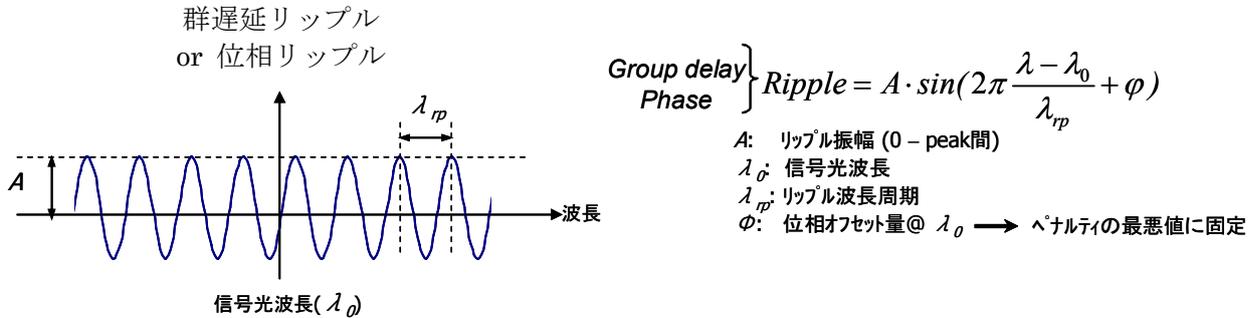


図 4-1-2-4 損失傾斜依存性

②位相リップル

昨年度報告したように、従来用いられてきた群遅延リップルという評価指標においては、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ったため、位相リップルという指標を採用した。図 4-1-2-5 に示すように、評価モデルとして、周波数(波長)に対して、三角関数形状の位相リップルを仮定した。「周波数 対 群遅延特性」を周波数積分することによって、「周波数 対 位相特性」が得られる。さらに位相リップルは同位相特性から、二次関数近似分を差し引くことによって得られる。



群遅延リップル

$$\tau_{GDR}(f) = \frac{\tau_{PP}}{2} \sin\left(\frac{2\pi f}{f_p} + \phi_0\right)$$

周波数積

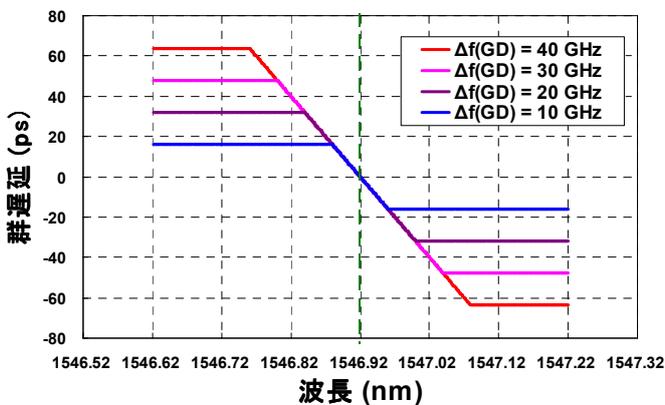
周波数微分

位相リップル

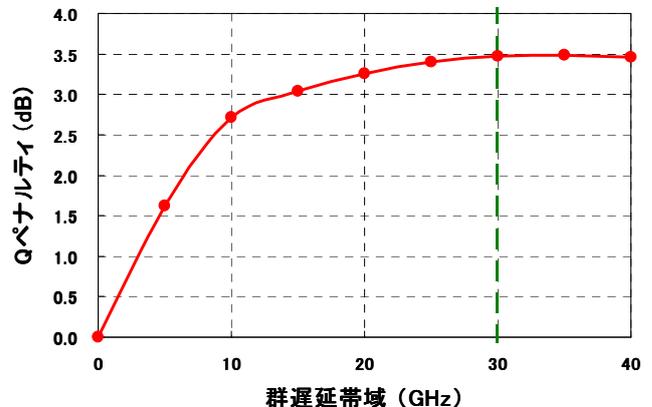
$$\Phi_{GDR}(f) = \frac{\tau_{PP}}{2} f_p \cos\left(\frac{2\pi f}{f_p} + \phi_0\right)$$

図 4-1-2-5 群遅延リップルと位相リップルの関係、評価モデル

まず、群遅延(位相)を規定する帯域幅について検討した。10 Gbit/s NRZ 信号の光スペクトル幅に対して、Qペナルティに影響を与える群遅延(位相)の周波数幅を「群遅延(位相)帯域幅」と定義し、伝送シミュレーションによりその値を求めた。図 4-1-2-6(a)に示す「波長 対 群遅延特性」のモデルのように、信号光波長(1546.92 nm)を中心に-400 ps/nm の波長分散(図の傾き)を与え、その周波数(波長)幅 Δf (GD)を変化させた。(b)のシミュレーション結果から分かるように、周波数幅 30 GHz 程度までの群遅延範囲がQペナルティに影響を与えていることが分かる。そのため、「群遅延(位相)帯域幅」を 30 GHz (全幅)とした。



(a) 群遅延モデル



(b) 帯域幅依存性

図 4-1-2-6 群遅延(位相)帯域幅の影響 (シミュレーション)

次に、図 4-1-2-7 に、副課題ウでエタロン型波長分散補償モジュールの光学シミュレーションから求めた 1 台当たりの群遅延特性を (a) に、それから求めた位相リップル特性を (b) に示す。エタロン型波長分散補償モジュールにおいては、周期 27 GHz の特徴的な位相リップルが表れ、位相リップル振幅の RMS 値 (二乗平均平方根) としては最大 31.8 mrad (分散補償量 $D_c = 0$ ps/nm) であった。

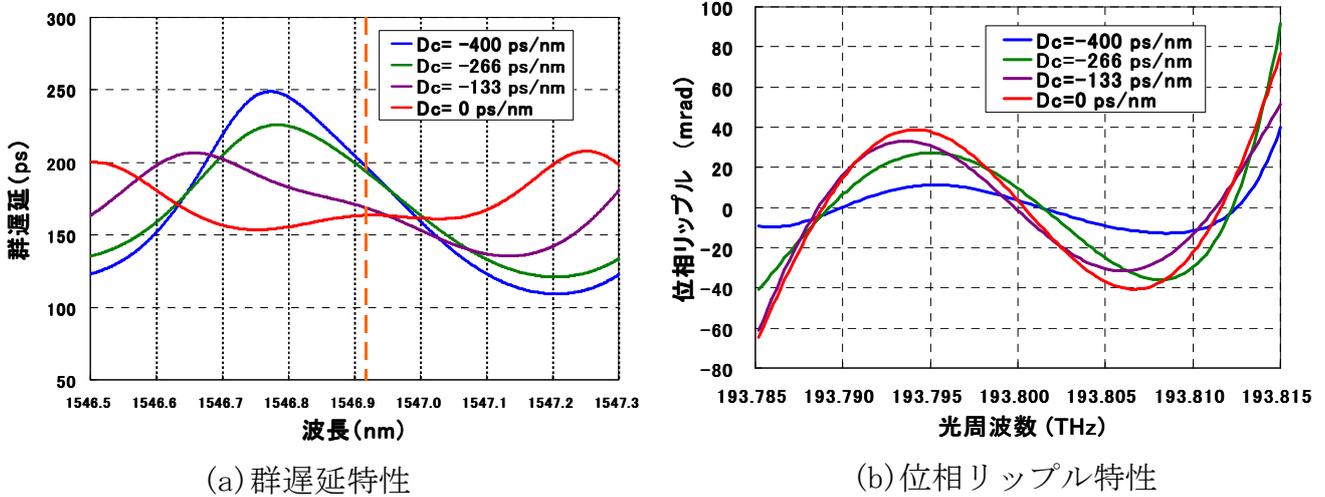


図 4-1-2-7 エタロン VDC モジュールの分散補償特性 (光学シミュレーション)

次に、図 4-1-2-8 に、位相リップル影響に関する伝送シミュレーション結果を示す。位相リップルの周期としては、上記結果より 27 GHz とした。許容ペナルティを 1 dB として、多段接続される波長分散補償モジュール 9 台合計で許容される位相リップルは 380 mrad (rms) となる。波長分散補償モジュールが多段接続される場合、位相リップルは単純加算されると考えられるため、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。

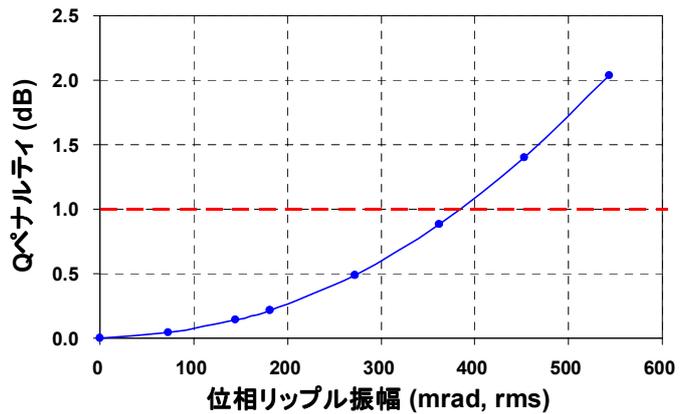


図 4-1-2-8 位相リップルの影響 (伝送シミュレーション)

以上より、エタロン型の特徴に合わせて見直しを行った、波長分散補償モジュールの 10 Gbit/s 目標特性を表 4-1-2-1 に示す。

なお、40 Gbit/s 用としては、モジュール設計の追加検討が必要であり、サブシステムとしての目標特性に関しても、40 Gbit/s 用エタロン型モジュールの特徴を踏まえた上で今後見直しを行う予定である。

表 4-1-2-1 波長分散補償モジュール 目標特性 (10 Gbit/s 用)

項目	目標値	備考
波長帯	Cバンドもしくは L-band	
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	
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)	

4-1-3 各モジュール伝送特性評価

4-1-3-1 波長選択スイッチモジュール多段透過特性評価

昨年度までに、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単体での特性評価を行った。特に、波長選択スイッチモジュール単体での実測評価では、各ポート、各波長、各アッテネーション量に対して、透過時の伝送劣化が無いことを確認した。さらに、本研究テーマで目標としている波長選択スイッチモジュールの多段接続時においては、トータルの透過帯域幅減少による光スペクトル狭窄 (Passband narrowing) および、コヒーレントクロストークの累積が問題になると考えられるため、これらの影響に関する伝送シミュレーション検討を行った。今年度は、その結果を検証するために、波長選択スイッチモジュールの多段透過特性の実測評価を行った。

① Passband narrowing 評価

図 4-1-3-1 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系を示す。本研究テーマでは、最大 44 段もの波長選択スイッチモジュールの多段透過を目標としており、それを少ない台数のサンプルで評価するために、周回伝送実験系を構築した。その際、多数の周回数を実現するためには、高い 1 周当たりの光信号対雑音比 (OSNR) を確保する必

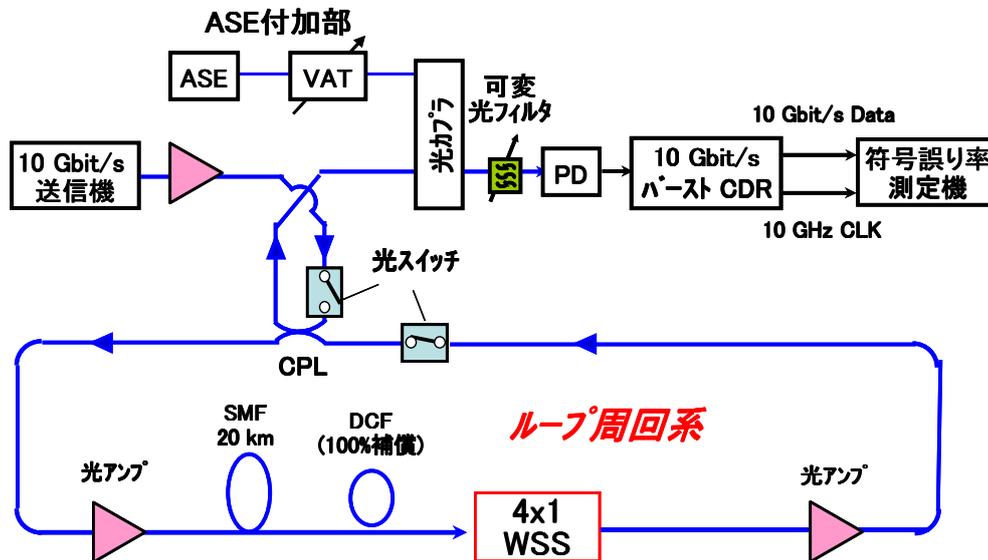
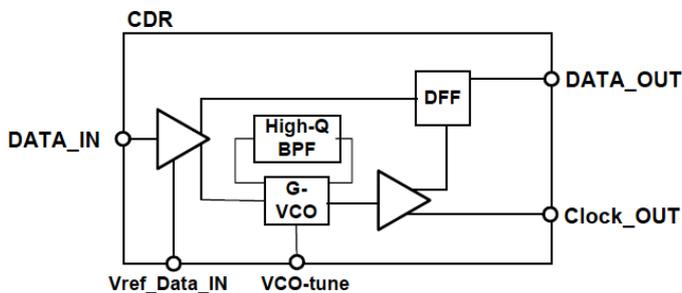


図 4-1-3-1 波長選択スイッチモジュール多段透過特性評価実験系



特徴

動作速度：10.7Gbps

入力：single

出力：DATA：差動、CLOCK：差動、モータ CLOCK：Single

高速同期：1ns 以内 (目標値)

同符号連続耐性：PRBS31 段相当 (目標値)



図 4-1-3-2 10G バーストモード CDR (NEL 社製) 構成、特性、外観

要があり、一周当たり 20 km という短いループ長に設定した。そのような短いループ長の場合、一周当たりのバースト信号長が短いため (約 100 μ sec)、符号誤り率の測定のためには、それより充分同期 (引き込み) 時間の早いクロック抽出回路が必要となる。図 4-1-3-2 には、今回導入した NEL 社製 10 Gbit/s バーストモード対応 CDR (クロック・データ・リカバリー) の構成と外観を示す。同機は、1 nsec 以下の高速同期時間を実現している。

上記周回伝送実験系を用いて、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 4-1-3-3 に赤丸で示す。また併せて、今回用いた波長選択スイッチモジュール (3dB 透過帯域幅 68.8 GHz) の「周波数 対 損失」特性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 4-1-3-4 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。

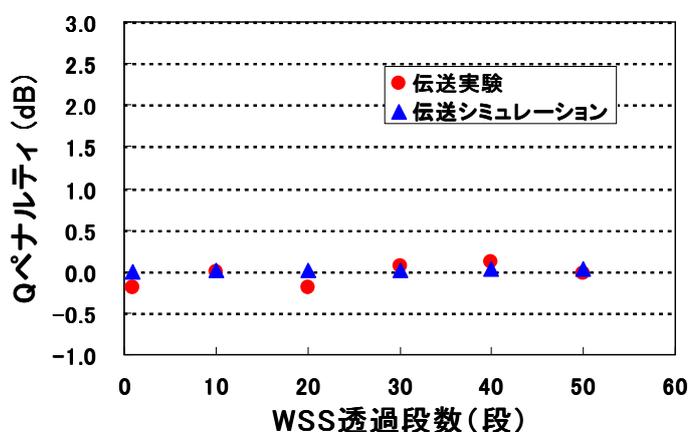


図 4-1-3-3 波長選択スイッチモジュール多段透過伝送特性

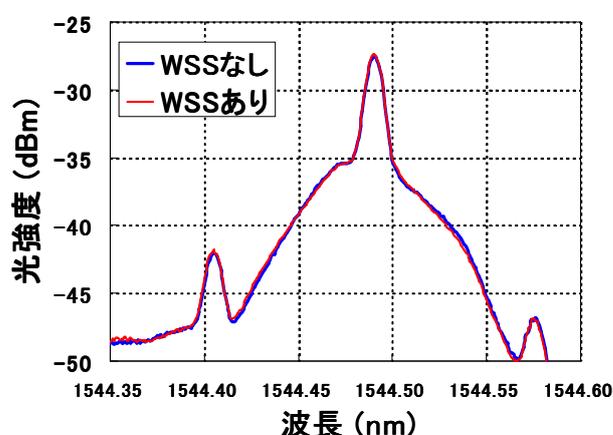


図 4-1-3-4 波長選択スイッチモジュール 40 段透過時光スペクトル

②コヒーレントクロストーク評価

コヒーレントクロストークは、合分波器のアイソレーション不足や迷光等の原因によって、信号光の一部が複数の経路を経て再び信号光に重畳される現象 (MPI = Multi-pass interference) である。同一波長によるクロストークであるために、主信号との間で光干渉による雑音を発生させる。昨年度までの報告でシミュレーション検討を行ったように、多段の波長選択スイッチモジュールを透過する場合、各段で発生するクロストークが累積し、信号劣化を増幅させる恐れがある。今回、コヒーレントクロストークの累積効果に関する多段周回伝送実験を行った。

図 4-1-3-5 にクロストーク評価実験系を示す。Passband narrowing の影響との分離のために、波長選択スイッチモジュールの代わりに、光カプラを用いてクロストーク光を合波して実験を行った。1 周当たりのクロストーク量を可変光アッテネータ (VAT) を用いて変化させた。さらに、クロストークによる伝送劣化が主信号・クロストーク信号間の偏波状態に依存するため、クロストーク信号側に偏波スクランブラを適用した。

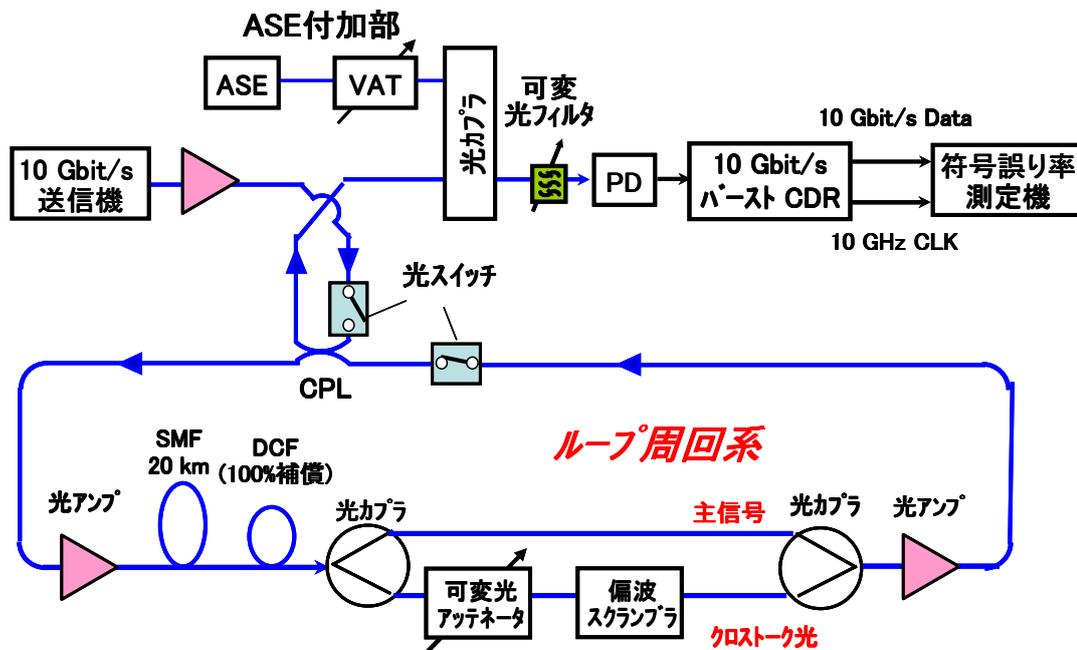


図 4-1-3-5 多段累積クロストーク評価実験系構成

図 4-1-3-6 に、「波長選択スイッチ 1 段当たりのクロストーク量 対 Q ペナルティ」の実験結果を示す。周回数が増えるに従って、急激に Q ペナルティが増大することが分かる。一方、波長選択スイッチモジュールのクロストーク量（消光比）としては、-50 dB 以下が確保できており、目標としている WSS 44 段透過時における Q ペナルティは 0.3 dB 以下となる。図 4-1-3-3 の波長選択スイッチモジュールを使用した評価結果でもクロストークによる Q ペナルティは観測されておらず、実力的にも同モジュールのクロストーク特性が充分確保できていることが分かる。

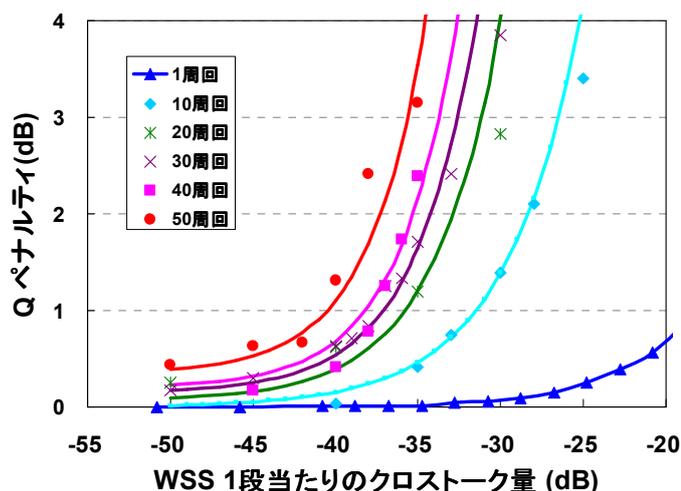


図 4-1-3-6 クロストーク多段累積時 伝送特性（実験結果）

4-1-3-2 波長分散補償モジュール多段補償特性評価

エタロン型波長分散補償モジュールに関して、図 4-1-2-2(a) の透過特性、図 4-1-2-7(a) の群遅延特性に示される光学設計による静特性データを用い、10 Gbit/s 信号のモジュール多段接続時の分散補償特性に関する伝送シミュレーションを行った。図 4-1-3-7 に各分散補償量における「VDC 透過段数 対 Q ペナルティ」の伝送シミュレーション結果を示す。各分散補償量において、それと逆分散のファイバ伝送路に対する分散補償を波長分散補償モジュールで行っている。本研究テーマで目標としている最大 9 段の多段接続時において、Q ペナルティ 0.6 dB 以下の良好な補償特性を持つことが分かる。今後、試作サンプルを用いて多段接続補償特性の実測検証を行う。

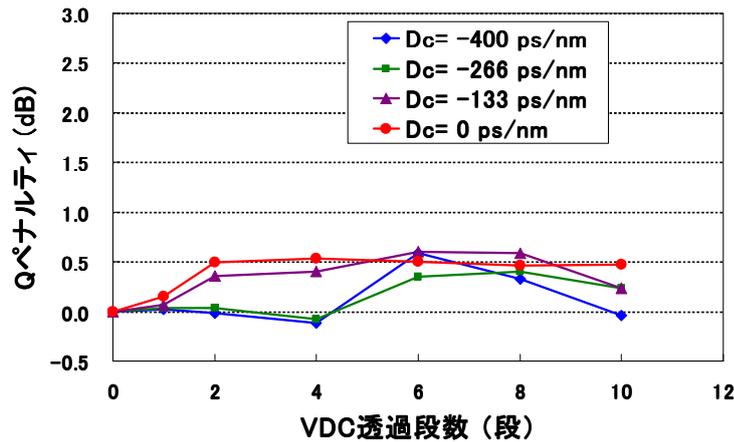


図 4-1-3-7 波長分散補償モジュール
多段接続分散補償特性 (シミュレーション)

4-1-4 まとめと今後の課題

今年度は、来年度の統合サブシステム試作に向けた設計を進めるとともに、各モジュールの伝送特性の評価を行った。各モジュールを統合動作させた場合の伝送特性評価を19年度に実施する予定であり、本年度の達成度は70%である。

具体的には、波長分散補償モジュールに関して、個別チャネル補償のエタロン型を採用し、同モジュールを用いた光ハブ構成の検討、および同モジュールの特徴を考慮した目標特性の見直しを行った。さらに、短ループ周回伝送実験系を構築した上で、波長選択スイッチモジュールの多段透過特性を評価し、Passband narrowing およびコヒーレントクロストークに関して、多段透過時に影響が殆ど無い良好な特性を有することを確認した。さらに、波長分散補償モジュールに関しても、静特性を用いた伝送シミュレーションを行い、多段接続時に良好な補償特性を確保できることを確認した。

19年度は、各モジュールを統合動作させた場合の光学特性検証、さらには統合サブシステム開発を中心に下記の検討を進める。副課題イ、ウ、エの各モジュール開発を受託期間前半に集中して行い、副課題アのサブシステム開発を後半に集中して行う計画のため、ほぼ予定通りの進捗である。19年度に統合動作の検証をおこない、100%の目標達成の見通しである。

(a) 各モジュール伝送実験評価

エタロン型波長分散補償モジュールの10 Gbit/s、40 Gbit/s 信号での可変波長分散補償特性の評価を行い、目標特性の実現性を見極める。また、今年度までに構築したループ周回伝送実験系を用い、各機能モジュール（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）を統合動作させた場合の伝送特性（多段透過特性、波形補償特性、高速応答特性等）を評価し、所要機能、目標特性の実現性を検証する。

(b) 統合サブシステム開発

所要機能、目標特性を満たしつつ、小型化・低コスト化を実現する統合サブシステムの構成、レベルダイヤ等の設計をし、試作を行う。製品化に向けて、統合サブシステムとしてさらに向上すべきポイントを明確化する。

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

4-2-1-1 システム要求の整理

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年度に、システム検討、モジュールの基礎検討から表 4-2-1-1 にまとめた機能・特性を目標として開発を進める事とした。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の決定、原理試作による動作確認を、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おこなってきた。18年度は、特性の安定化製造性の向上を図り、製品化に向けモジュールの完成度を向上させた。

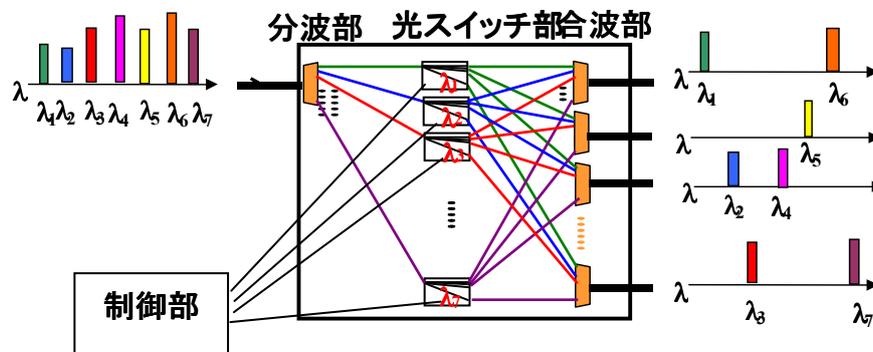


図 4-2-1-1 波長選択スイッチの機能ブロック

表 4-2-1-1 波長選択スイッチモジュール 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とこれまでに抽出された課題

波長選択スイッチの構成は、16、17年度に、高分散能力、低損失、低PDL(偏波依存損失)を合わせ持つ透過型回折格子を用いた分光部と、2軸駆動型のMEMSミラーとレンズからなる光スイッチング部を組み合わせた構成(図4-2-1-2)に決定し、モジュール設計、試作をおこなってきた。試作の過程、及びモジュールの評価結果より以下の課題が抽出された。今年度は最終目標到達に向け、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向上のための開発を進めた。

- 光学系の損失特性向上(バラツキの低減)
 - ⇒ レンズ系の収差、コリメータアレイの特性バラツキに起因して、ポート間、波長間で損失のバラツキが発生。
 - ⇒ 収差の低減と、コリメータアレイの組立方法改良により、対応を進める
- 量産性向上に向けた光学系(特に実装系)の改善
 - ⇒ 空間伝搬の経路上に多数の光部品が介在し、また40波長、4ポートの特性を同時に満たす必要があり、複雑な組立工程となっている。
 - ⇒ 実装ばらつきを低減させる手法、トレランス拡大方法の検討し対応を進める
- MEMSプロセスの加工精度の向上(均一性向上、低電圧化、歩留まり向上)
 - ⇒ 製品化に向け、歩留りの向上が必要。
 - ⇒ 構造、プロセスの改善により、対応を進める
- 振動・衝撃性の向上
 - ⇒ 往復で60cm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。
 - ⇒ 筐体構造の強化と防振部の最適化での対応を進める

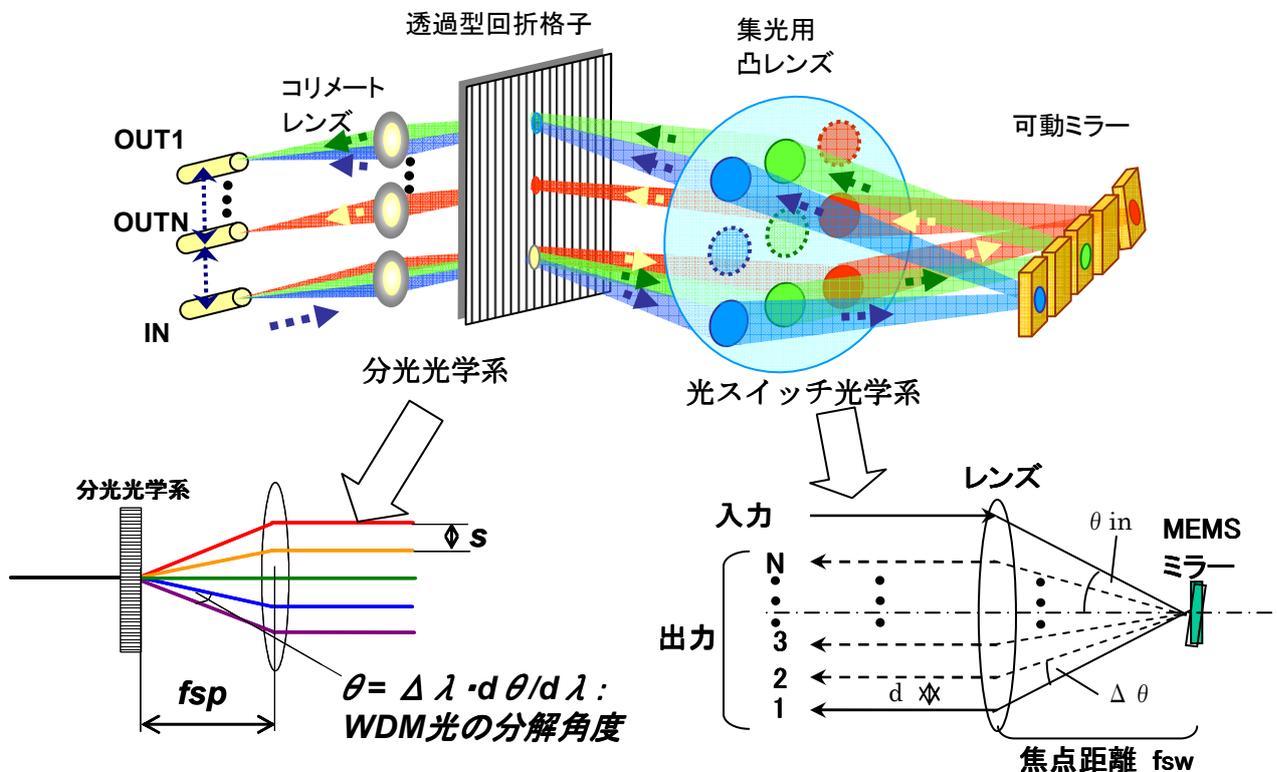


図4-2-1-2 多ポート波長選択スイッチの構成

4-2-2 光学系技術の開発

波長選択スイッチの光学系は、①ファイバから空間に光を入射する部分とビームを楕円化するための拡大光学系からなる入出力光学系と、②波長成分ごとの分解(DEMUX)/合成(MUX)をおこなう分光光学系と、③MEMSミラーで光路の切り替えをおこなう光スイッチ光学系より構成される。これらの系を通る間に往復で60~70cmの空間伝搬がおこなわれ、2~3 μ mの精度でMEMSミラーへ入射させて、さらにファイバへ戻して光結合を取る必要があるため、大元となるコリメータアレイには数ミリ度の出射角精度が求められる。前年度の検討で、ファイバアレイに個別のマイクロレンズを、アクティブアライメントする構成をとる事で所望の精度は実現できる見通しがつき、モジュール試作をおこなったが、損失特性のポート間・波長間バラツキが発生した。解析の結果、まだコリメータ出射角のポート間バラツキが所望の精度に達していない事、経路上に介在する多数の光部品の調整上の問題で収差によるビームウェストのずれが発生している事が原因と判明し、それらの解決をおこない、試作により検証した。

4-2-2-1 入出力光学系(コリメータアレイ)の精度向上の検討

コリメータアレイは図4-2-1-1に示すファイバアレイに単体のマイクロレンズを調整・固定する構造として、出射角精度の向上を図っている。ファイバアレイから出射された光を、所望の距離だけ離れた位置に配置した反射ミラーで180°折り返し、ファイバアレイに再入射させた時の結合効率が最大となるようにマイクロレンズの位置を調整するアクティブアライメントをおこなう。一つのポートからの出射光を基準として折り返しミラーの角度を調整し、そのミラーに合わせて残りのポートを調整する事でポート間の出射角バラツキを低減している。

上記の調整方法でコリメータアレイを作成し、波長選択スイッチモジュールの試作に適用して特性の評価をおこなった結果、挿入損失のポート間バラツキが発生した。コリメータの出射角バラツキと、損失のポート間バラツキを比較検討した結果、二つの間に相関があり、コリメータのバラツキが損失バラツキの原因である事が判明した。調整の基準としたコリメータから離れるにつれて、出射角がずれていき、それに伴い損失の劣化が発生している。この結果から、アレイの軸と折り返しミラーの軸がずれている事で出射角、損失のバラツキが発生したと結論づけた。対策として、両端のポートを基準として折り返しミラーを調整し、アレイの軸とミラーの軸を一致させる方法を考案した。コリメータの試作、モジュール試作により、損失のバラツキが低減している事を確認した(結果は4-2-2-4で説明する)。

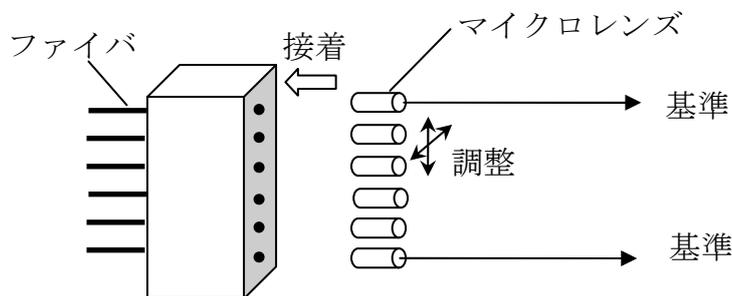


図4-2-2-1 コリメータアレイの構造

4-2-2-2 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る構成される。回折格子の分散能力が大きい程、MEMSミラーピッチ相当にWDM光を分解するために必要な距離を小さくできるため、光学系の小型化が可能となる。目標であるモジュールの小型化のため、高い分

散能力を持つ回折格子を中心に調査し、低偏波依存損失(PDL)と低損失を合わせ持つVPG (Volume Phase Grating; 屈折率の周期的分布による回折効果を用いたグレーティング)の採用を検討していたが、量産性、部材の入手製の点から、通常の透過型回折格子を2段組み合わせで分光能力を拡大する構造を検討した。回折格子を試作し、2段構成の特性を評価した結果、目標の特性を得る事ができたので採用する事とした。

4-2-2-3 量産性向上に向けた光学系（特に実装系）の改善

波長選択スイッチでは空間伝搬の経路上に多数の光部品が介在し、また40波長、4ポートの特性を同時に満たす必要があり、複雑な組立工程となっている。本テーマの最終目標である低コストの実現に向け、組立の簡易化の検討をおこなった。

波長選択スイッチの光学調整は下記の点に留意する必要がある、これら留意点に注意しながら、簡易化をおこなう。

- ① WDM光を分解した光の波長間の間隔と、MEMSミラーのピッチとのずれは波長スペクトルのグリッドからのずれとなるため、集光レンズ系の拡大率の高精度な調整が必要。
- ② MEMSミラーの上下方向のずれは損失、クロストークの増加の原因となるため、十分なトレランスの確保が必要。
- ③ 結合効率を最小にするため、また波長透過帯域を広くとるため、MEMSミラー上にビームウェストがくるようにする必要がある。
- ④ 経路上の多数の光部品(2枚の回折格子、集光レンズ、小型化のため光路を折り返すミラー)を空間上で3方向、3角度の計6軸の調整が必要。

光学系の調整は、コリメータアレイの出射光を基準としておこなう。この基準には高い精度が求められる。コリメータアレイ内の出射角バラツキは高精度化対策で対応し、絶対角の精度は小型化のための折り返しミラーを用いて出射光の角度を補正する事で確保する。①のグリッドずれは集光光学系の拡大率の問題であり、集光レンズの位置調整で補正可能であるが、③のビームウェストの位置調整との最適位置を一致させる必要がある、今回の開発では補正用のレンズを追加する事で対応する。②のMEMSミラー上の位置ずれは、最終的にはMEMSミラーの上下左右の位置を調整する事で精度を上げるが、調整量を減らすためにはMEMSミラーを長くする事が必要。④の調整軸の低減は、光学解析ツールであるCODE Vを用いて各光学軸のトレランスをシミュレーションし、トレランスの緩い部分の調整を省略する事を検討する。

4-2-2-4 光学部試作結果

以上で得られた結果を元にし、波長選択スイッチの光学部の試作をおこない、効果の検証をおこなった。昨年度試作では、コリメータアレイの出射角バラツキにより、15dB程度あったポート間・波長間の損失バラツキを2dBへと低減し、6dB以内の挿入損失に抑えられる事を確認した。その特性例を図4-2-2-2に示す。

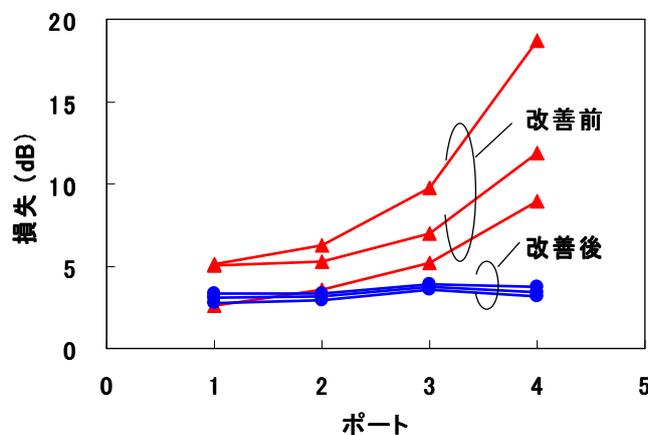


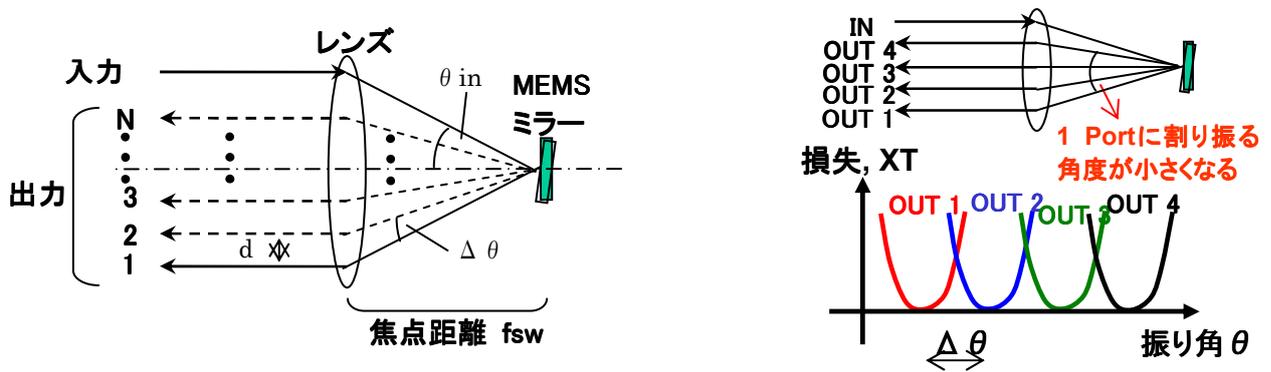
図4-2-2-2 ポート間の損失バラツキの改善

4-2-3 スイッチ光学系の開発

17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て回転角を拡大したMEMSミラー構造の製造性の向上を進めた。

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。ポートの切り替え時に、使用しないポートを横切る現象を回避するため、MEMSミラーを2軸駆動構造とし、波長毎にON/OFF可能なシャッタを集積化している。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楕歯アクチュエータを配置する事ができないため、図4-2-3-2に示すミラーの上下方向に楕歯アクチュエータを配置する構成を採用した。



(ア) スイッチ光学系の構成

(イ) ミラー回転角度の配分

図4-2-3-1 スイッチ光学系の構成

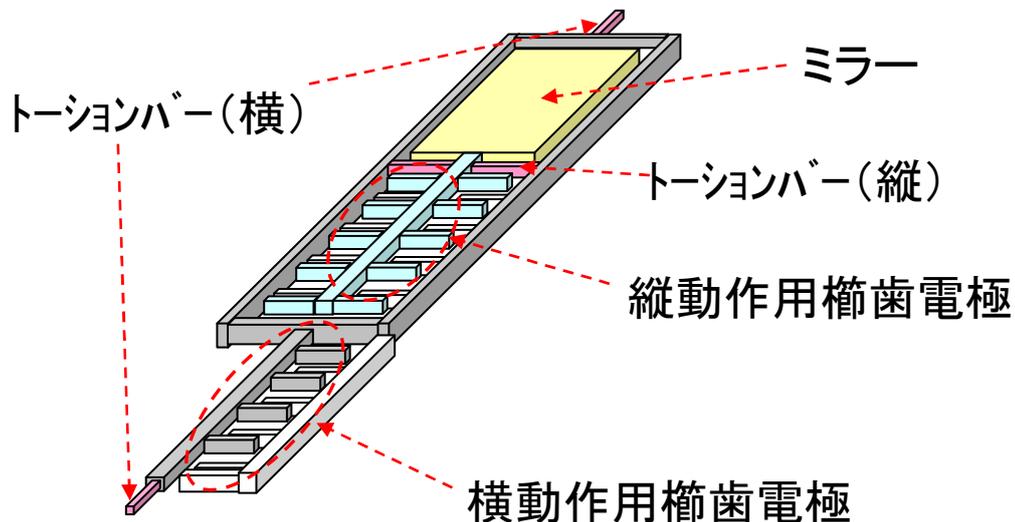


図4-2-3-2 2軸駆動MEMSミラーの構造

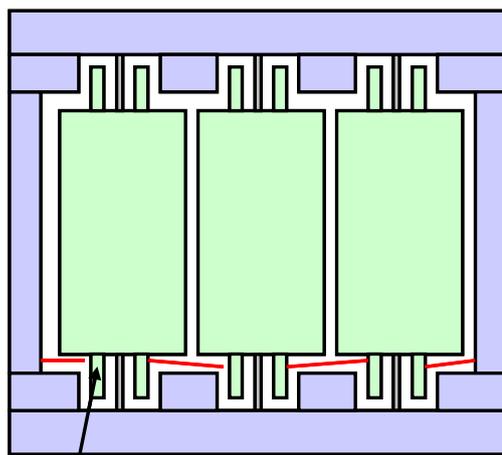
4-2-3-2 2軸動作ミラーの量産性改善

昨年度に2軸構造に変更したMEMSの開発を進めたが、楕歯、トーションバー、フレームの数が2倍となり、微細な構造の中にそれらの効率良い配置を検討し、MEMSミラーのミラー幅とピッチの比率を下げないようにしている。そのため、製品化をおこなうに

は、まだサンプルの取得率が低く量産性を取れていない。今年度は、サンプルの取得率改善のためにプロセスの改善と構造の最適化を中心に開発をおこなった。

まず、これまでの結果を整理し、欠陥の発生している箇所、工程の洗い出しをおこなった。その結果、最も大きなファクターはプロセス中に発生する異物によるエッチング不良、工程途中のトーションバーの破損であると判断した。

異物の影響に関しては、クリーニング工程を導入して対応した。トーションバーの折れに関しては、MEMSチップの構造を改良し、プロセス工程でのトーションバー部の破損防止を目的に、保護壁を開発した。図4-2-3-3に新規の構造を示す。改善策の適用により、サンプルの取得率の向上を図る事ができた。



保護壁

図4-2-3-3 改良したMEMS構造

4-2-4 モジュール化技術の開発

4-2-4-1 モジュール化での課題

昨年度の試作・及びその後の特性評価の結果から、モジュール化時の課題として下記のもの抽出された。

- 振動・衝撃性の向上
往復で60cm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、角度が変化すること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/試作

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・角度変動となり、特性変動の要因となる。そのためにどのような環境化においても歪、捻じれのないフレームの設計が必要となる。特に外部からの振動、衝撃に対して強固なフレームの設計が必要となる。振動設計に際しては、共振による利得を抑えるのは困難なため、実使用環境での振動の周波数成分を考慮し、振動成分のある周波数帯域内に共振点が無いような筐体の設計をおこなう。光学部の設計指針を明確化し、またその効果を見積もるために、有限要素法による構造解析シミュレーションをおこなった。まず問題となる光学部の変形モードを特定するために、固有振動シミュレーションをおこなった。光学フレームモデル（図4-2-4-1）で固有振動シミュレーションを行った（表4-2-4-1、図4-2-4-2 参照）。その結果、フレームが菱形に変形するのが基本モードと判明。この変形は波長方向ずれとなるため、低減するための構造検討をおこなった。シミュレーションの結果（図4-2-4-3）、ふた・底板追加の効果が最も高いとの結果を得、このモデルについて詳細検討した。シミュレーション上はフタを完全拘束すると板厚みは0.2~0.3mmの薄板でも効果があり、また薄板の共振変形が光学部品に干渉しないように中央部を穴あけしても効果があるが、実際の固定方法（数点をYAG溶接などで固定）を考慮すると効果が無いことが判明した。以上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った。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。今後の課題として、実使用環境に対応するため、振動・衝撃性のさらなる低減シミュレーションを行い、試作を通して改良を進める。

表 4-2-4-1 共振周波数解析結果

次数	フレーム厚 5mm
1次	521
2次	741
3次	862
4次	1742
5次	1742
6次	2079
7次	3704
8次	3717
9次	4444

(Hz)

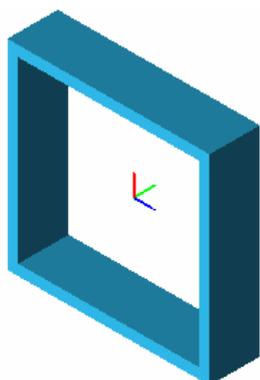


図 4-2-4-1 光学フレームモデル

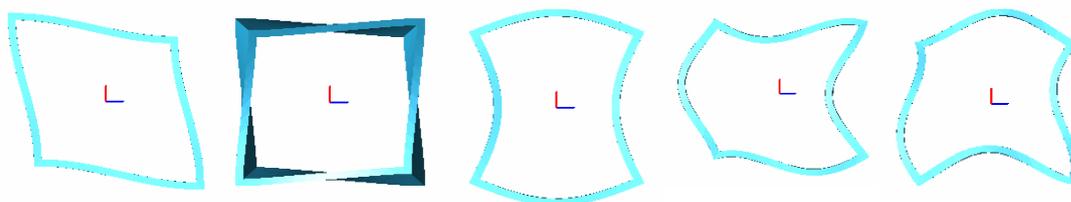


図 4-2-4-2 各モードでの変形

	a	b	c	d	e	F
1次	521	452	284	334	1742	704
2次	741	498	595	654	1815	1208
3次	862	763	680	714	2457	2062
4次	1742	1522	725	800	3861	2674
5次	1742	1522	800	917	4219	2755
6次	2079	1880	813	1274	4255	3003
7次	3704	2000	2564	1736	4505	3067
8次	3717	2481	1733	1739	4525	3236
9次	4444	2481	1739	2506	4566	3584

(Hz)

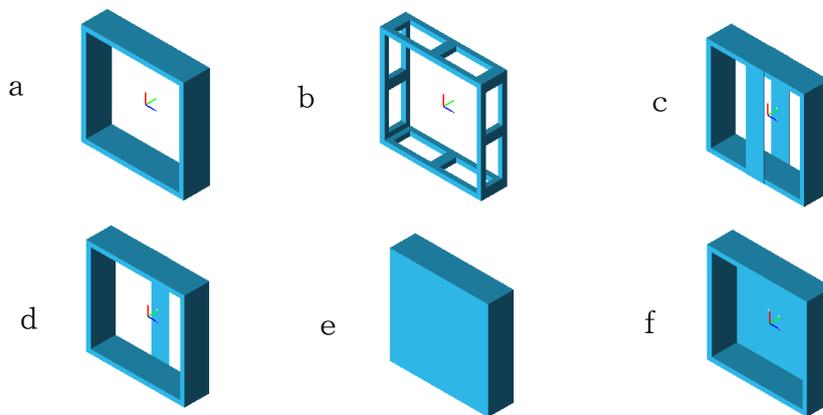


図 4-2-4-3 数種のフレーム形状振動解析結果

4-2-4-3 機構系の経時変動に関して

光学系の項目で光学部品の位置、角度ずれにより空間伝搬する光ビームの位置、角度が発生し、損失、波長特性等の光学特性に影響を与えると説明した。調整のみでなく、経時的に光学部品のずれによっても同様に特性変動が発生する。製品化に際しては、光通信の規格で決められた環境条件での動作保障が必要であり、その値を見積もるため、信頼性試験をおこなった。変動量を多数の光部品を用いているため、モジュールの信頼性評価からでは変動している箇所が見極められないため、個別の部品試験での評価による、経時変動の見積もりをおこなった。最も動く可能性のある箇所が光部品の接着部であると判断し、ホルダに光部品を接着したサンプルを作成し、高温高湿試験・熱サイクル試験をおこない、それらの位置・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。測定系を図 4-2-4-4 に示す。形状測定器はキーエンスの高精度レーザ測定器(L T - 9 0 1 0 M)を用いた。0.01 μ m の測定精度を有しており、目標としている精度を十分に満足する。本測定系を用いて、高温高湿試験・熱サイクル試験のサンプルの評価、経時変動の見積もりを開始した。



図 4-2-4-4 経時変動の評価

4-2-4-4 制御部の検討/試作検証

波長選択スイッチの制御部は、①外部とのインターフェース、②波長、ポート毎のMEMSミラーの駆動電圧を記憶する電圧テーブル部、③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、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駆動部から構成される。

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。

4-2-5 波長選択スイッチモジュールの試作

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。試作したモジュールの概観を図4-2-5-1に、代表的な損失特性例(4ポート、40波長)を図4-2-5-2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4-2-5-3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 4-2-5-1 波長選択スイッチモジュール外観

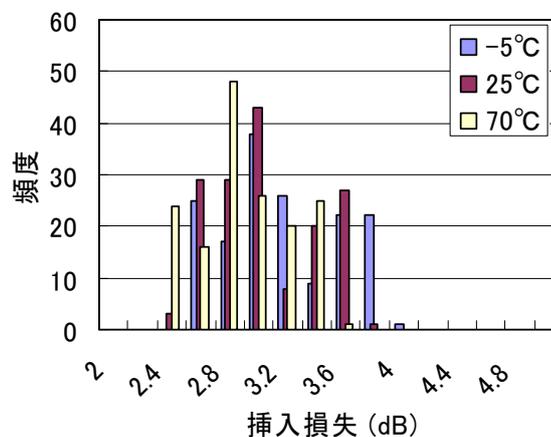


図 4-2-5-2 損失特性

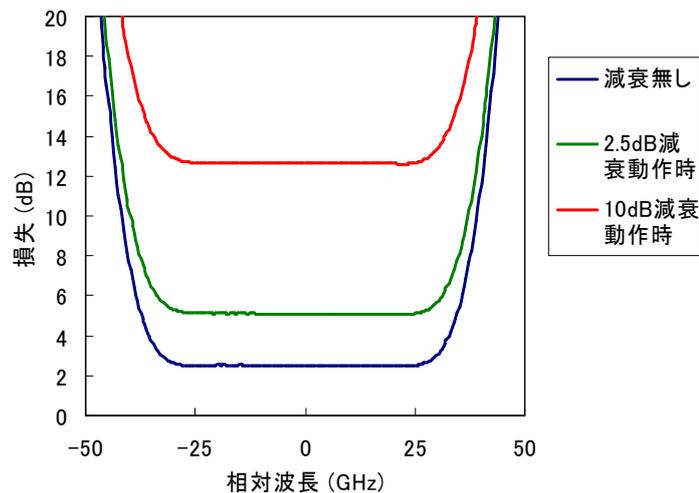


図 4-2-5-3 VOA動作

4-2-6 まとめと今後の課題

17年度の中間評価までに、試作した波長選択スイッチモジュールの、波長毎の経路切り替え動作の確認をおこなった。18年度はそれに加え、VOA動作の確認と、特性の安定化の検討を進めた。

光学系開発では、コリメータアレイの特性改善、調整方法の改善により、ポート間・波長間の損失バラツキの低減を図り、全ポート・波長で6 dB以下の特性を実現した。MEMSミラーは、欠陥の多い箇所の検証をおこない、プロセス、構造を改良し、課題であった量産性の向上をはかった。モジュール開発では、機構系、特に光学フレームの改良と、駆動電圧のテーブル作成方法の改善、制御回路のノイズ低減を図り、特性の安定化をおこなった。

以上の結果を元に改良モジュール(波長間隔: 100GHz、4×1)を試作し、特性改善の効果を検証した。また、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た。

今年度の目標に対しての達成度は100%であり、最終目標に向けた達成度は80%。19年度に下記の開発をおこない、製造性の向上等の製品化技術を確立する(100%の達成の見通し)。

(a) 光学系の開発

製品レベルの波長選択スイッチ光学系技術を確立すべく、量産時においても安定な(低ポート間、波長間バラツキ)損失特性を実現可能とする技術(光学トレランス拡大、容易に高精度を実現可能な調整方法)の開発、光学部(特に接着部)の長期信頼性の検証をおこなう。

(b) アナログ動作可能な光スイッチング部の開発

VOA精度の向上に向けた動作特性の安定化と、量産性の向上に向けた、MEMS構造の最適化とプロセスの改善(加工精度の向上)に取り組む。

(c) モジュール化開発(防振技術、制御技術開発)

環境変動(温度、振動等)に対して安定な特性を実現すべく、変動を考慮した補正制御技術、経時変動を考慮した防振部の検討をおこなう。

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。

これまでPLC型、エタロン型、MEMSを補償可変機構に用いたMEMS+マイクロオプティクス型を検討してきており、この中で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型について詳細検討を進めている。

今年度は、システム構成の柔軟性を向上するために、スロープ補償型エタロンから個別チャンネル補償型エタロンのへの設計変更を行った。この個別チャンネル補償型に対する目標値を表4-3-1-1に再掲する。

表 4-3-1-1 波長分散補償モジュール 目標特性 (10 Gbit/s 用)

項目	目標値	備考
波長帯	Cバンドもしくは L-band	
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	
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)	

今年度の試作により、最大可変補償量 700ps/nm を確保することができた。

掲記の目標値に対しては、いくつかの項目で不足しているが、システム評価にて可否判断する予定である。

今年度の技術開発内容はほぼ達成したが、エタロン再設計に予定より時間を要し、今年度予定のシステム実験用のモジュール化が遅延したため、達成度は 90%。

来年度早期に、システム評価を予定しており、遅延は挽回の見込みである。

4-3-2 補償特性の改善

前年度検討した、入射角度の変化で補償量を可変とするエタロンをベースに、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の再設計を行った。

4-3-2-1 光学系の課題と基本構成

下記の4つの課題に対する設計方針による構成を図4-3-2-1に示す。この構成では、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。

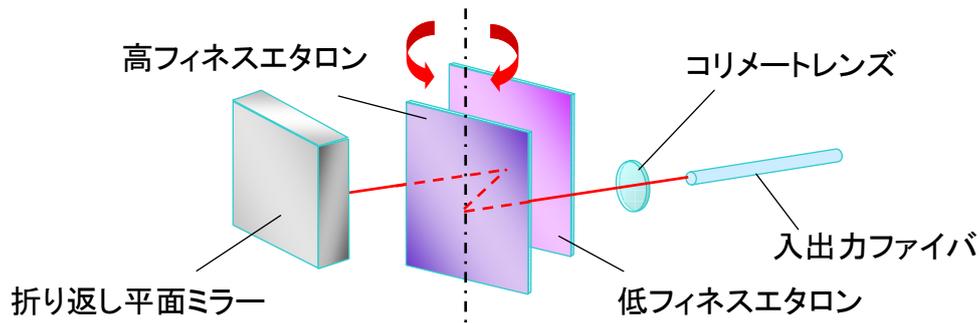


図 4-3-2-1 平行配置されたフィネスの異なるエタロン

<チャンネル間隔変化の低減>

前年度提案のエタロンは補償量を変化させるとき入射角度を変化させるため、エタロン共振器長 L が変化する。そのため、後述のように入射角度変化に応じてチャンネル間隔変化中心波長位置が変化する。これを防ぐためにエタロンの共振器長が一定とする温度制御を行う。その際、入射角の可変量と温度可変範囲との間にトレードオフを明確にし、現実的なパラメータ設定を行う。

<補償量0を含む可変範囲の確保>

前年の設計では、中心波長をずらし対向させ多段化しており、入射角度を変化させることのみでは対向したエタロンのフィネスを両方同時に0とすることができず、目標である補償量0を可変範囲に設定することができないという課題がある。

この課題に対して、補償量が多い領域はフィネスを調整できる入射角回転で補償量を可変し、補償量0を含む補償量の少ない領域は中心波長制御で可変する。このとき、中心波長の制御量に現実的な制限（温度可変範囲等）があるため、対向するエタロンは同温度でフィネスの異なるものを用い、かつ多補償時（入射角可変）の中心波長制御と、少補償時の中心波長制御の範囲が共有できるように入射角度増加で補償量増加する設計を指定する。

また前年是对向するエタロンはわずかに傾斜を持たせていたが、多段化により補償量を拡大する際の中心波長制御を考慮しエタロン間は平行とする。

<帯域確保>

上記の設計で、平行に対向したエタロン配置としたため、中心波長の異なる2つの群遅延特性で、帯域を確保しなければならないため、群遅延特性の線形性がよい「低補償量」で多段化する。

<損失低減 (K 値) >

前年度試作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、コリメータのビーム径をより大きなものとして、波長選択スイッチのパラメータを流用した。

4-3-2-2 反射型エタロン基本動作

図 4-3-2-1 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（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。

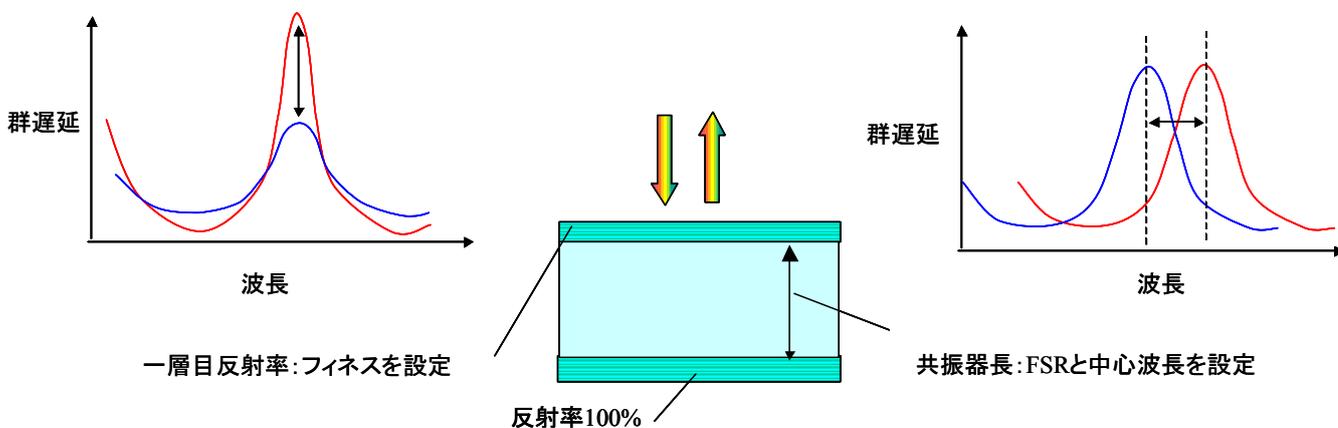


図 4-3-2-1 反射型エタロンのパラメータと特性との関係（再掲）

<膜反射率と群遅延との関係>

エタロンで発生する位相シフト $h(\lambda)$ はエタロン一回反射での光路長 L 、基板屈折率 n 及び入力波長 λ を用いて

$$h(\lambda) = \exp[-j2\pi \cdot L \cdot n / \lambda] \quad \dots (1) \text{式}$$

と表される。また光路長 L はエタロン基板厚み t 、入力光の入射角 θ 、基板屈折率 n で

$$L = 2 \cdot t / \sqrt{1 - (\sin \theta / n)^2} \quad \dots (2) \text{式}$$

で表される。この $h(\lambda)$ 、反射率 $R\%$ 、エタロン一回反射での減衰比率 A を用いて、反射型エタロンの伝達関数: $H(\lambda)$ は

$$H(\lambda) = \frac{A \cdot h(\lambda) - \sqrt{(R/100)}}{A \cdot h(\lambda) \cdot \sqrt{(R/100)} - 1} \quad \dots (3) \text{式}$$

と表される。伝達関数の位相部 $\arg H(\lambda)$ を $\omega (=2\pi c/\lambda)$ で微分することにより群遅延 $D(\lambda)$ が得られる。

$$D(\lambda) = -(\lambda^2/2\pi c) (d/d\lambda) (\arg H(\lambda)) \quad \dots (4) \text{ 式}$$

<チャンネル間隔、中心波長の設計パラメータ>

チャンネル間隔である群遅延の周期 (FSR) と L との関係は、(3) 式にて周期性を有する $h(\lambda)$ により決定し、この $h(\lambda)$ の要素 $L \cdot n/\lambda$ が整数倍になる λ の変化であり、以下の式で表される。

$$\text{FSR (Hz)} = c / (L \cdot n) \quad , \quad C \text{ は光速} \quad \dots (5) \text{ 式}$$

また、(2) 式より FSR、入射角度 θ を指定した場合の基板厚み t は次式で表される。

$$t = c / (2 \cdot n \cdot \text{FSR} \cdot \sqrt{1 - (\sin \theta / n)^2}) \quad \dots (6) \text{ 式}$$

中心波長は、初期に設定したエタロンの共振器長 ($L \cdot n$) で決定される。多補償領域では、入射角度を変化させるため、共振器長 L が変化する。そのため、多補償領域での中心波長位置を入射角度変化 δ に対して一定に保つために、エタロンの共振器長が一定とする制御を行う。入射角度 $\theta + \delta$ に対する L は次式で表される。

$$L(\theta + \delta) = 2 \cdot t / \sqrt{1 - (\sin(\theta + \delta) / n)^2} \quad \dots (7) \text{ 式}$$

(1) ~ (6) 式における基板屈折率 n と基板厚さ t は温度依存性があり、初期温度 T_0 、制御温度 T 、屈折率の温度変化 (dn/dT) NdT 、線膨張係数 α により以下のように表される。

$$n(T) = n_0 \cdot (1 + NdT(T - T_0)) \quad \dots (8) \text{ 式}$$

$$t(T) = t_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)) \quad \dots (9) \text{ 式}$$

これより $L \cdot n = \text{一定}$ という条件は次式となり、この条件を満たす温度 T にエタロン基板温度を設定する。

$$\begin{aligned} L(\theta) \cdot n_0 &= L(\theta + \delta) \cdot n(T) \\ &= \frac{2 \cdot t_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)) \cdot n_0 \cdot (1 + NdT(T - T_0))}{\sqrt{1 - \{\sin(\theta + \delta) / [n_0 \cdot (1 + NdT(T - T_0))]\}^2}} \quad \dots (10) \text{ 式} \end{aligned}$$

エタロン基板が石英の場合では、屈折率の温度変化は 9×10^{-6} @1550nm、 α は 5.5×10^{-7} あり、入射角度を増加させる場合には、温度を下げる方向の制御となる。

また、温度の変化を用いて少補償領域では、一方の中心波長を温度を他方と変える事により、 $L \cdot n$ を変化させ、中心波長位置を変化させる。

4-3-2-3 連続可変動作を可能にするパラメータ設計

今年度試作のエタロン設計を以下の手順で行った。

<手順1：補償量0の中心波長設計>

高フィネス側のエタロンと低フィネスのエタロンの中心波長差が波長周期間隔（FSR）の半分ずれたところで0とし、低フィネスのフィネスの中心波長を信号の中心波長とする。

<手順2：一段あたりの最大補償量の決定>

まず、2つのエタロンで可能な一段あたりの最大補償量を、目標とする群遅延帯域(30GHz:0.24nm以上)から決定する。(4)式を基にしたシミュレーションから、±50ps/nmを一段あたりの最大補償量とした(これより、目標可変量には8段化が必要である)。

<手順3：可変角度設計>

上記の状態でのエタロンのフィネスはやや大きく、このまま上記のように補償量0とすると0付近での群遅延特性が湾曲する。そのため、入射角度の変化によりそれぞれのフィネスを下げるようにする。

(10)式から、入射角と可変角と温度範囲の関係が求まり、現実的な温度可変範囲は最大50℃程度と設定した。また、温度調整による中心波長変化は1波長以内でないと制御が複雑で現実的である。石英エタロンにて、これらの要件を考慮し、エタロン対向を可能にするため入射角度を2度、可変角度は1.3度(最大入射角3.3度)程度とした。

昨年度の試作実績による膜の角度に対する反射率変化を基に、2度入射で-33.25ps/nmとなるフィネスで2つのエタロンの反射率を固定した。

<手順4：初期中心波長設計：使用温度設計>

上記の通り入射角度と補償量(2つのエタロンのフィネス)が決まったので、制御温度を(10)式を用いて決めることで、エタロンの仕様が決められることができる。このとき入射角度が増加すると反射率が上がるように膜の仕様を決め、多補償領域での温度制御範囲と少補償領域での温度制御範囲を共有し、現実的な温度範囲での使用を可能とする。さらに中心波長をシフトすることで、逆補償も可能である。この領域においても多(逆)補償では入射角度で変化を利用して可変を拡大できる。

以上のようにして決定した、制御パラメータを表4-3-2-1に示す。また、この時の群遅延特性のシミュレーション値を図4-3-2-2に示す。

表4-3-2-1 設計例

エタロン1段補償量	入射角	中心波長		温度	
		高Fエタロン	低Fエタロン	高Fエタロン	低Fエタロン
ps/nm	Deg	nm	nm	℃	℃
-50	3.3	1546.76	1546.92	20	20
-33.25	2	1546.76	1546.92	73	73
-16.63	2	1546.64	1546.92	64	73
0	2	1546.52	1546.92	57	73

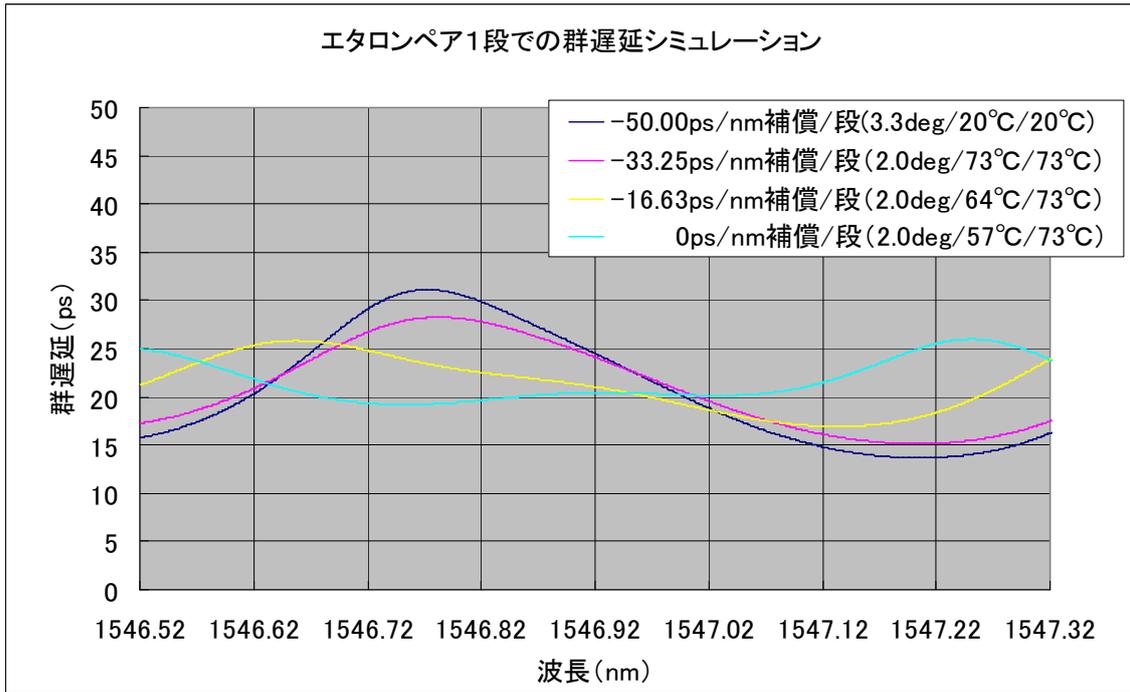


図 4-3-2-2 設計例の群遅延特性

<エタロン膜仕様>

昨年度試作の膜特性（角度変化と波長依存性）を参考にして求めた、上記設計に対応する2つのエタロン膜の反射率（20°C、1546.92nm 中心）の作製仕様を図 4-3-2-3、図 4-3-2-4 に示す。このような膜の特性は、光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。

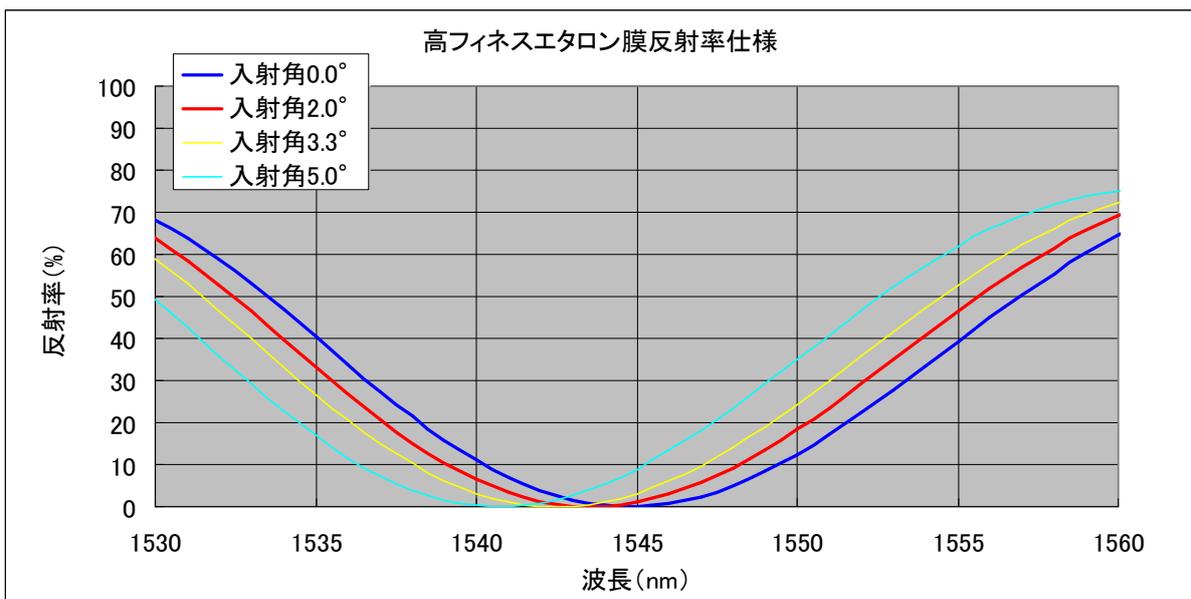


図 4-3-2-3 高フィネスエタロンの反射率仕様@ 20°C

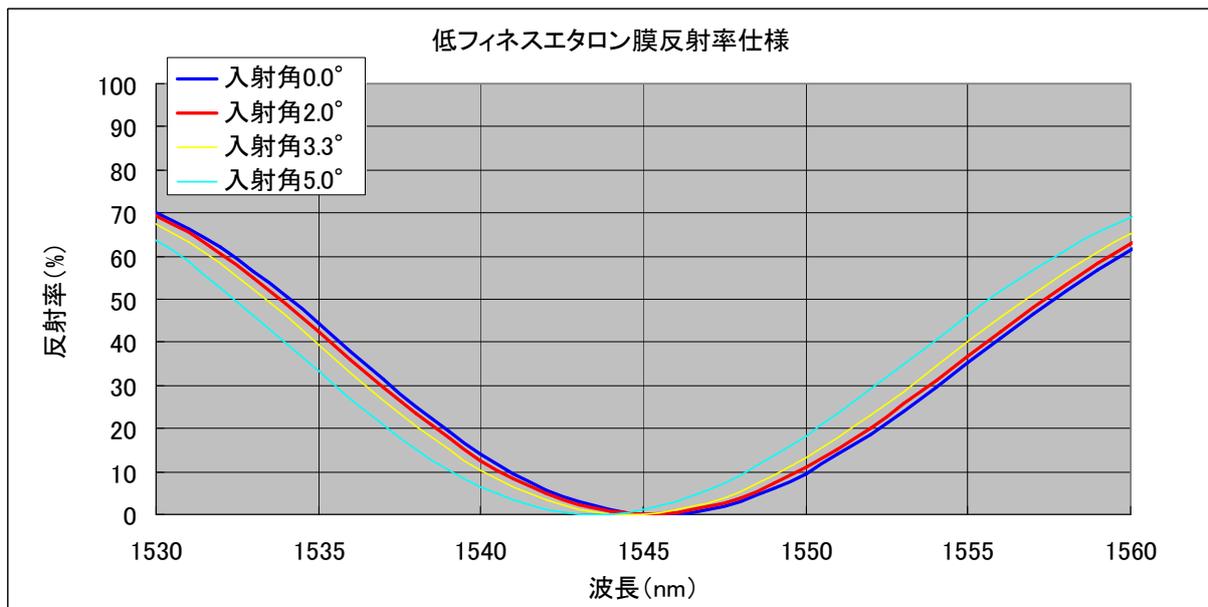


図 4-3-2-4 低フィネスエタロンの反射率仕様@ 20 °C

4-3-3 実装技術の開発

エタロンの温度制御と入射角度制御が可能なペルチェ及び回転ステージを用いた試作モジュールの機構設計を行った。

<回転動作に伴う平行移動の必要性（蹴られの問題）>

設計例のように一回のエタロンペアの通過（一段）では±50ps/nm程度の補償量であり、目標達成には8段化が必要である。そこで、エタロン間で多重反射させて段数を稼ぐことを考える。

このとき図4-3-3-1 に示すように、回転機構を有するエタロンペアでは、回転時に反射点間隔が変化し、エタロンのエッジと距離が変化する。この効果は多段化数が増えるほど顕著になり、エタロンのエッジと信号光との干渉が生じる。そこで図4-3-3-2 のように回転角に応じてエタロン間隔を調整することで回避できる。また、この制御に関わる角度と間隔は1対1対応のため1次元制御も可能である。

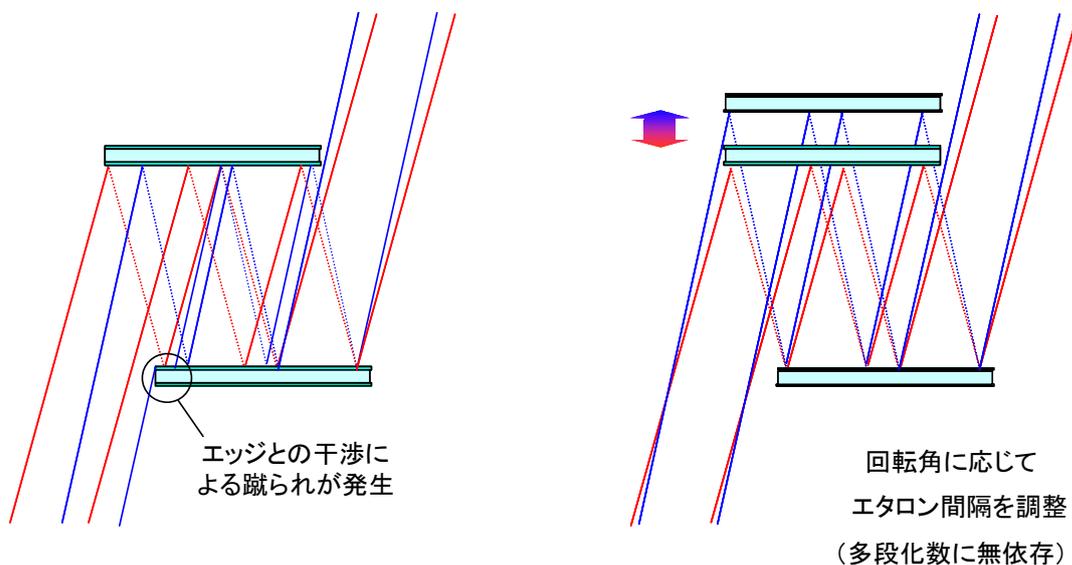


図 4-3-3-1 多段化による信号の蹴られ

図 4-3-3-2 エタロン間距離調整による解決

<試作モジュール構成>

図4-3-3-3 にエタロンの回転+平行移動機構を有するモジュール構成図を示す。本構成では、エタロンを平行に対向させ多段化し、対向させたエタロンを一つの回転ステージに搭載し、一方のエタロンを平行移動ステージに搭載している。またエタロンの温度調整用に、エタロン裏面側に小型のペルチェ素子と温度センサを実装している。後述の通り、回転量と平行移動量は1対1の関係にあるため、将来の製品化時には専用の一次元駆動の小型ステージで構成する。

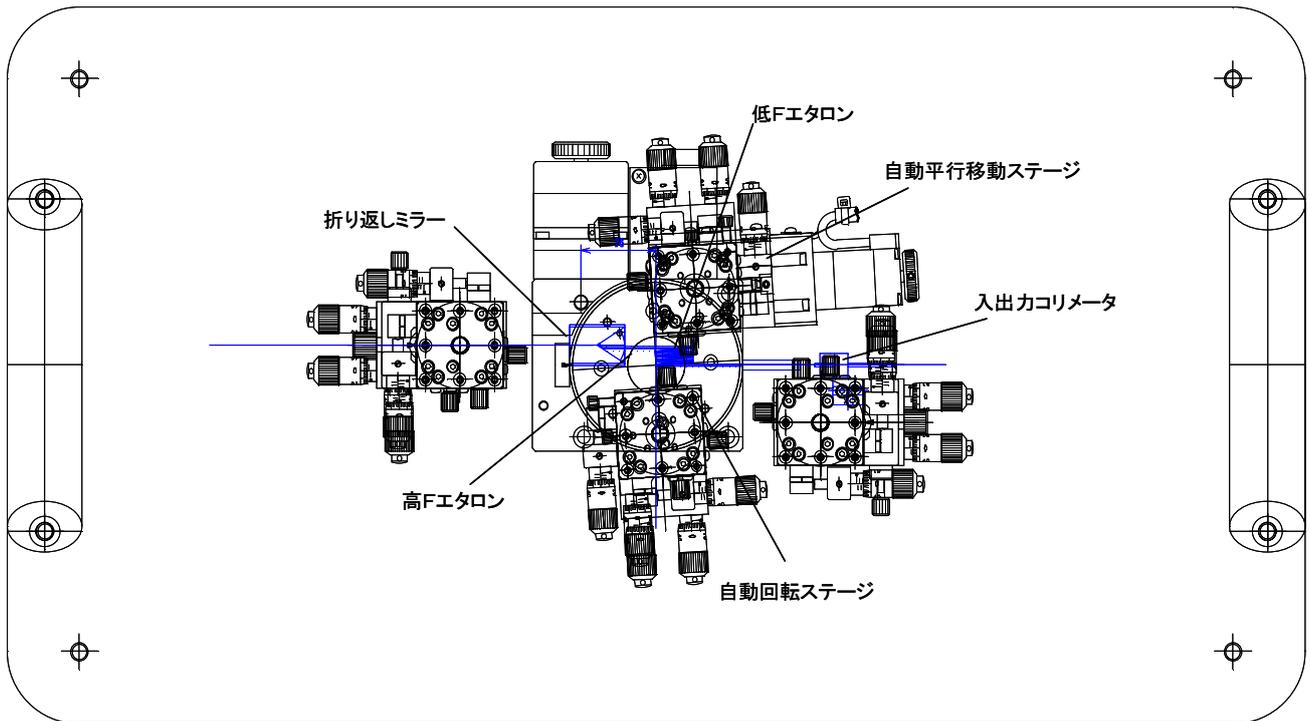


図 4-3-3-3 可変機構を有する試作モジュール構成

4-3-4 制御技術の開発

中心波長をエタロン基板温度で制御し、群遅延のフィネスをエタロン入射角で制御するという、2パラメータ制御プログラムを作成した。

<エタロンレイアウトの制御の関係式>

回転による信号の蹴られを防止する、エタロン間隔 W 、入射角 θ の関係を求める。

入射角度変化を δ 、同一のエタロン面での折り返される信号光間の距離を P とすると、これらは次式の関係にある。

$$P(\theta + \delta) = 2 \cdot W \cdot \tan(\theta + \delta) \quad \dots (11) \text{ 式}$$

$$P(\theta) = 2 \cdot W \cdot \tan(\theta) \quad \dots (12) \text{ 式}$$

これより、Wを次式のように制御することでPを一定とすることができる。

$$W(\delta) = P / 2 \tan(\theta) \quad \dots (13) \text{ 式}$$

<中心波長の制御の関係式>

中心波長は前述の通り、初期に設定したエタロンの光路長で決定される。多補償領域では中心波長位置を入射角度変化 δ に対して一定に保つために、エタロンの共振器長($L \cdot n$)が一定とする制御を行う。入射角度 $\theta + \delta$ に対する $L \cdot n = \text{一定}$ という条件は次式となり、この条件を満たす温度Tにエタロン基板温度を設定する。実際にはエタロン厚に作製公差があるため、Lがものにより異なり初期の中心波長と温度は個別対応としている。

$$L(\theta) \cdot n_0 = L(\theta + \delta) \cdot n(T)$$

$$= \frac{2 \cdot t_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)) \cdot n_0 \cdot (1 + NdT(T - T_0))}{\sqrt{(1 - \{\sin(\theta + \delta) / (n_0 \cdot (1 + NdT(T - T_0)))\}^2)}} \quad \dots (10) \text{ 式}$$

<制御プログラム>

制御プログラムは、補償量毎に4つのパラメータ（高フィネスエタロン温度、低フィネスエタロン温度、入射角度、エタロン間距離）を対応させ、自動ステージとペルチェコントローラをRS232Cで連動させている。将来の製品化時には専用制御ボードとファームウェアを開発する。

図4-3-4-1にVisual Basicで作成した制御画面を示す。右上のタブでパラメータファイルを読み込み、補償量タブで補償量を選択する。

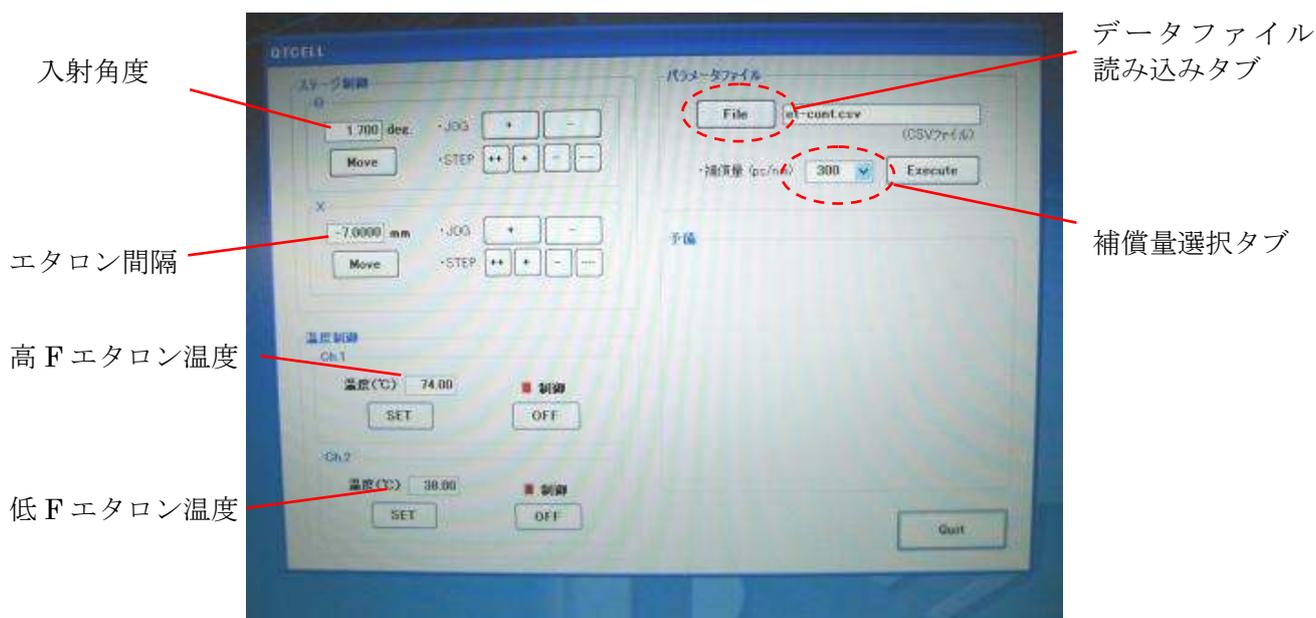


図 4-3-4-1 PC 上での制御画面

4-3-5 試作による設計検証

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。

<モジュール動作確認>

エタロン型分散補償器試作モジュールを図 4-3-5-1 に示す。前述のプログラムにより動作している図を図 4-3-4-2 に示す。所望の回転+平行移動及び、温度制御が行えていることを確認した。50ps/nm ステップでの可変における温度安定の制御時間は数秒である（目標特性では、可変に伴う制御時間は不問）。

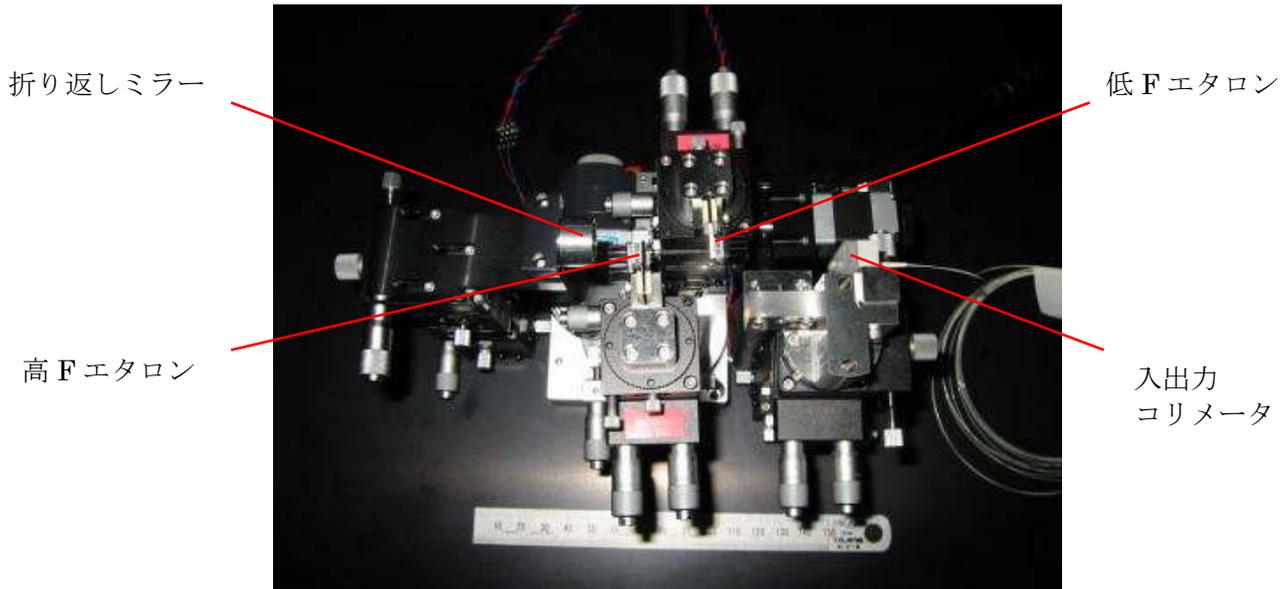


図 4-3-5-1 エタロン型分散補償器試作モジュール

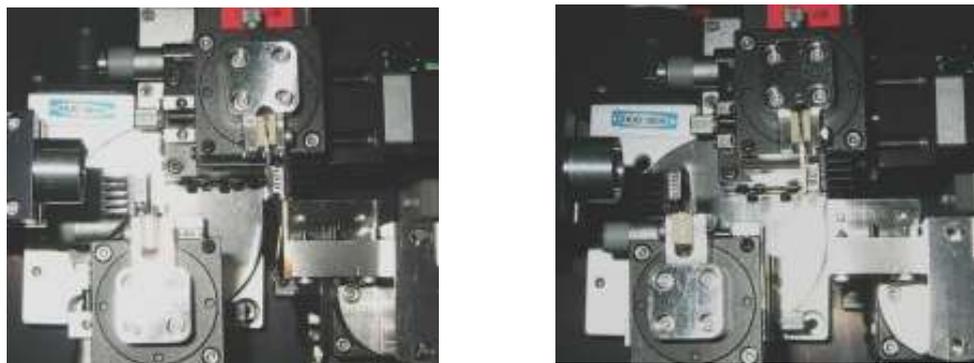


図 4-3-5-2 補償量によるエタロンレイアウトの自動調整
(左：少補償時、右：多補償時 エタロン間距離と入射角度が異なっている)

<補償特性の実測結果>

試作モジュール群遅延特性を図 4-3-5-3 に、透過特性を図 4-3-5-4 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、挿入損失は前年度に比べ 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られ、来年度機構系の温度特性改善の検討を進める。

群遅延特性、透過特性ともにリップルの発生が認められるが、これは多重反射の影響であり、実装状態の調整にて改善できる見込みである。

目標に比べ、可変補償量、挿入損失等が若干不足しているものの、程度問題として本モジュールを早期にシステムに引き渡し、システム評価をおこなう予定である。

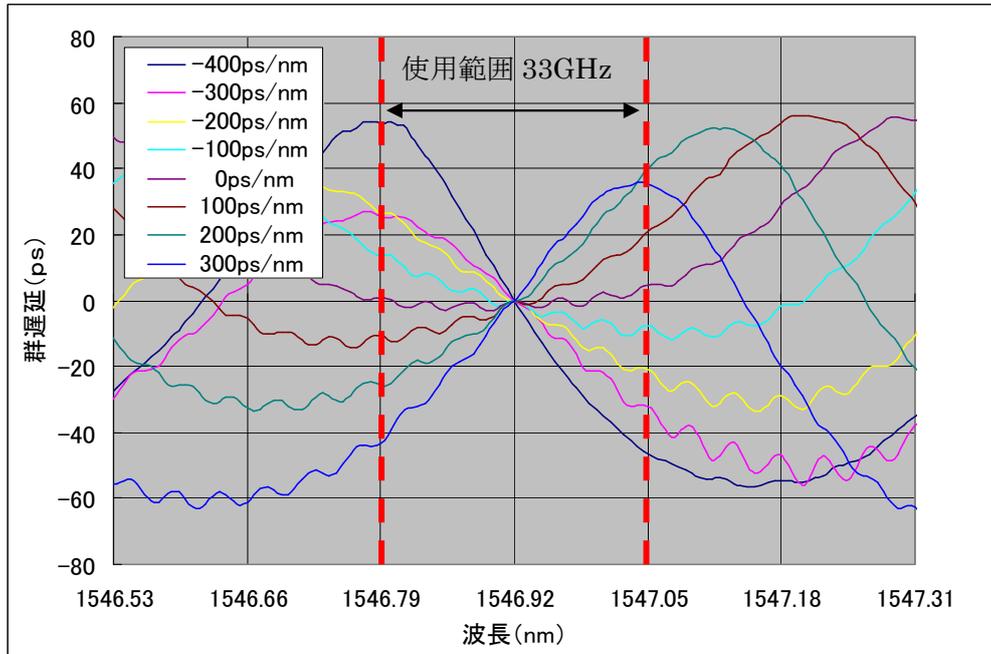


図 4-3-5-3 試作モジュールの群遅延特性（実測）

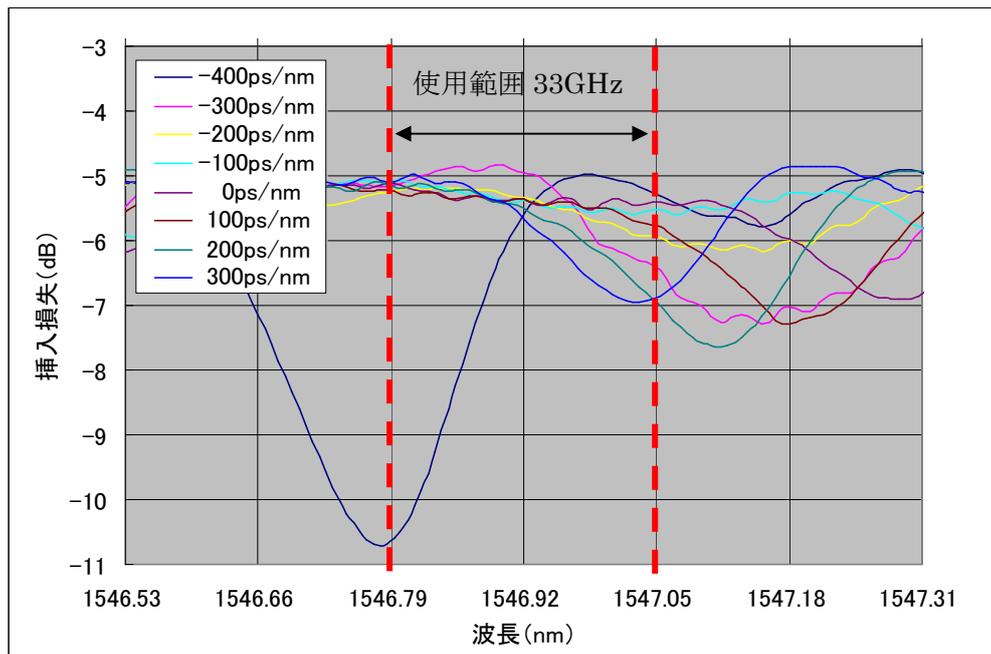


図 4-3-5-4 試作モジュールの透過特性（実測）

4-3-6 まとめと今後の課題

システム構成の柔軟性を向上するために、スロープ補償型エタロンから個別チャンネル補償型エタロンへの設計変更を行った。設計では補償量可変時のチャンネル間隔変化の低減（中心波長の安定）、可変量の確保をポイントとした。

試作により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以上を確認した。

今年度の技術開発内容は達成したが、エタロン再設計に予定より時間を要し、予定のシステム実験用のモジュール化が遅延したため、今年度の達成度は90%であり、最終目標に対しては、80%の達成度。来年度早期に引き渡し、システム評価をおこなう予定であり、遅延は挽回可能の見通し。

来年度は、以下の通り本年度の結果を基に温特の改善を進め、全体システム実験用のモジュール作製と、将来の量産に向けたモジュールの小型化の検討を行う。

(a) 多波長実験用エタロン設計

昨年度試作したエタロン設計をもとに、システム実験に必要な波長にあわせたパラメータ設計を行う。

(b) 多波長実験用モジュール作製

全体システム実験に組み込むためのモジュールを作製する。

(c) 小型化検討

可動機構設計、熱設計（温特改善を含む）を進めモジュール小型化を検討する。

(d) 40Gbit/s 用モジュールの設計の追加検討

副課題ア（サブシステム）と連携し、40 Gbit/s 用エタロン型モジュールの設計・検証を行う。

4-4 偏波モード分散補償モジュールの研究開発

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。

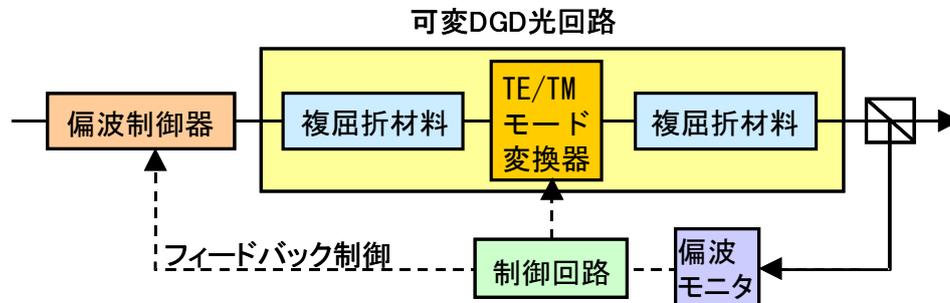


図 4-4-1-1 偏波モード分散補償モジュールの構成図

平成18年度は、平成17年度までに試作・検討した結果に基づいて、各要素デバイスの8波長以上の機能集積化・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、及び、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1/10以下の観点から検討を進める。さらに検討した結果に基づいて、各要素デバイスのアレイモジュールの1次試作・評価を行い、1チップモジュールと同等の特性が得られていることを確認する。

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
	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	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 要素デバイスのアレイ化試作

要素デバイスの内、偏波モニタについては、初年度に作製した以上の小型化は困難と考えられるので、偏波制御器、可変DGD回路について、アレイ化検討、試作を行った。

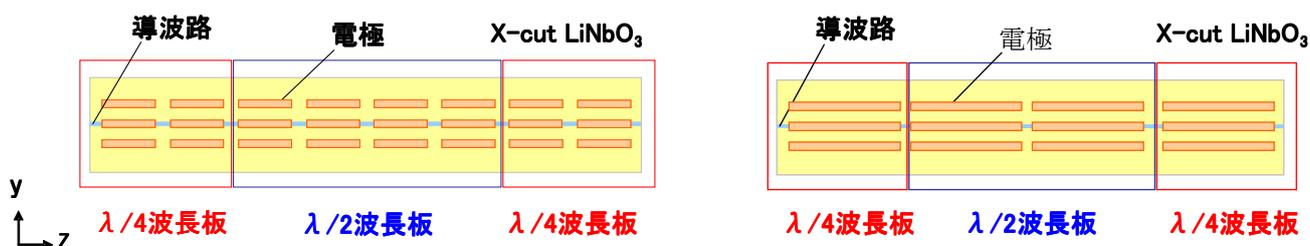
4-4-2-1 偏波制御器

(a)アレイ化の検討

偏波制御器のアレイ化に対する課題として電極配線数が挙げられる。構造は、図4-4-2-1(a)に示すように、1Chを8分割して、1分割毎に3個の電極が形成されており、1Ch

で 24 個配線が必要となり、8Ch にした場合、192 個の配線が必要となる。中央の接地電極を共通にしても、129 個必要である。入力 PIN を 2 列 1in.ピッチとした場合、横幅は 166 mm となり、チップ長が 90mm であるので、片側配置が非常に困難となる。

そこで、現状の制御方法について検討すると、8 分割電極の内、2 分割毎に同一電圧を印加して駆動させているが、問題ないことを確認している。そこで今回は、図 4-4-2-1(b)に示すように 4 分割電極で行うこととした。その場合、配線数は半分となり、接地電極を共通化することにより、65 個となる。入力 PIN を 2 列 1in.ピッチとした場合、横幅は 83 mm となる。チップ長は 90 mm である為、片側実装が可能となるので、この 4 分割で設計を行うこととした。



(a) 8 分割

(b) 4 分割

図 4-4-2-1 偏波制御器の分割構成

(b)アレイ試作

X-cut LiNbO₃ 基板に Z 伝搬で導波路を形成し、バッファ層、電極を形成した。歩留まりを考えて、10Ch を 1 チップとし、その内、特性の良い 8Ch を使用することとした。Ch 間隔は 800 μm とし、チップ幅は 8mm とした。各電極長は、20mm である。

試作したモジュールの写真を図 4-4-2-2 に示す。サイズは、154×24×13 mm³ である (PIN、ファイバ部分は除く)。



図 4-4-2-2 モジュール写真

(c)アレイモジュール特性

試作したモジュールの評価を行った。まず、挿入損失、PDL の評価を行い、図 4-4-2-4 に示す結果が得られた。若干のばらつきはあるものの挿入損失約 3 dB、PDL0.2 dB 程度が得られていることがわかる。

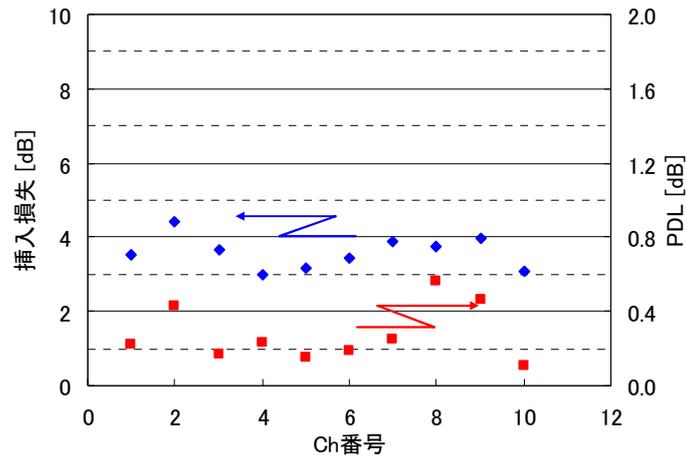


図 4-4-2-3 挿入損失、PDL

また、偏波制御器の偏波制御としての特性を評価した。なお、Ch.5 と Ch.9 は、電極不良の為評価できず、8Ch 分の評価を行った。偏波回転の状態の一例を図 4-4-2-4 に示す。ほぼ大円上を偏波回転しており、うまく偏波制御できていることがわかる。

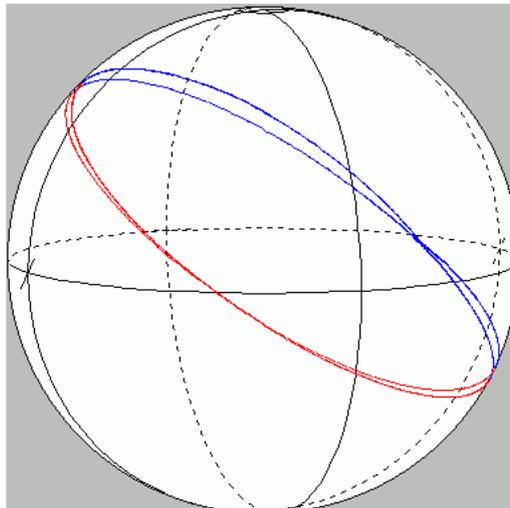


図 4-4-2-4 偏波回転の状態の一例

このときの $V_{\pi/2}$ の評価結果を図 4-4-2-5 に示す。20 V 前後ではほぼばらつきのない特性が得られていることがわかる。

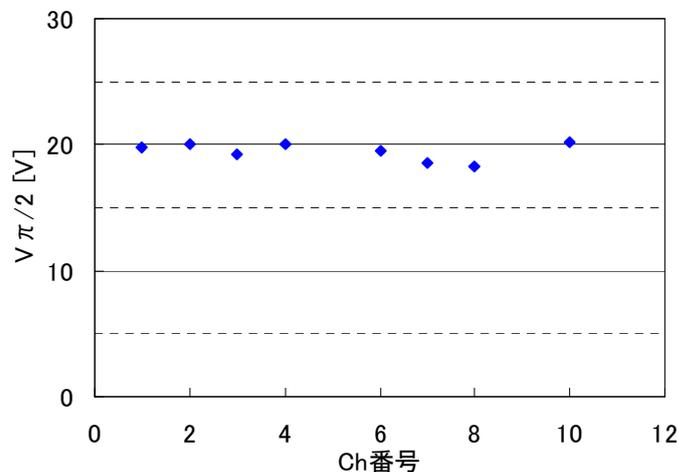


図 4-4-2-5 $V_{\pi/2}$ の評価結果

今後の課題としては、損失、PDL ばらつきの低減を行っていく。

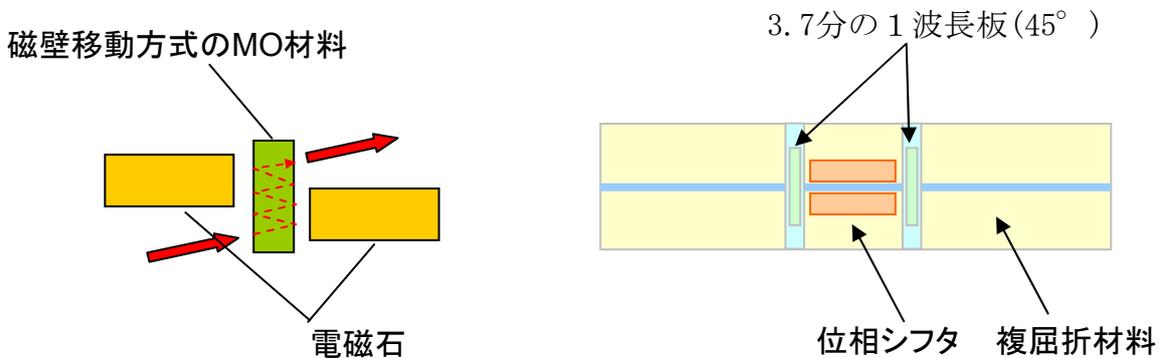
4-4-2-2 可変 DGD 光回路

(a)アレイ化の検討

まず、昨年度に引き続いて、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。

MO型について、昨年度提案した磁壁移動方式を用いた構造(図 4-4-2-1(a)、参考文献 4-1)による小型ファラディ回転子について検討を進めたが、ファラディ回転子は小型にはなるが、ファイバ接続を考えた場合、バルク型の為、1Ch ずつのファイバ接続となり、間隔を近づけることができず、幅方向が 80mm 程度になると考えられる。

一方、EO型は、8Ch の場合、1Ch に比べてチップ幅は 8 倍程度となるが、モジュールにした場合は、チップ以外に、ボンディングスペース等により 2 倍程度しか幅方向は増えず、20mm 以下とすることが可能である。



(a)MO型(磁壁移動方式を用いた構造)

(b)EO型

図 4-4-2-6 EO型可変DGD光回路の構成

以上の検討結果より、EO型は特性、特に挿入損失は若干劣るものの最終目標特性は満たす為、アレイ化による小型化が可能なEO型でアレイ化を行うこととした。

(b)アレイ試作

EO型の可変DGD光回路の8Chアレイの試作に当たって、歩留まり等を考慮して、チップとしては、10Chアレイで設計を行った。アレイ間隔は、ボンディングパッドのスペースを考慮して、800umとし、チップ幅は8.0mmとした。チップ長は、1年目に試作した1Chチップと同様に、TE/TMモード変換部を10mmとし、左右の複屈折材料部の長さをそれぞれ40mmとして、全長90mmの設計で行った。試作したサンプルに1/3.7波長板を挿入し、10芯ファイバアレイを用いて、接合を行った。試作したモジュールの写真を図 4-4-2-7 に示す。サイズは、154×18×13 mm³である(PIN、ファイバ部分は除く)。



図 4-4-2-7 モジュール写真

(c)アレイモジュール特性

試作したモジュールの評価を行った。なお、Ch1 と Ch6 は、電極が短絡していた為、評価はしていない。まず、挿入損失、PDL の評価を行い、図 4-4-2-8 に示す結果が得られた。

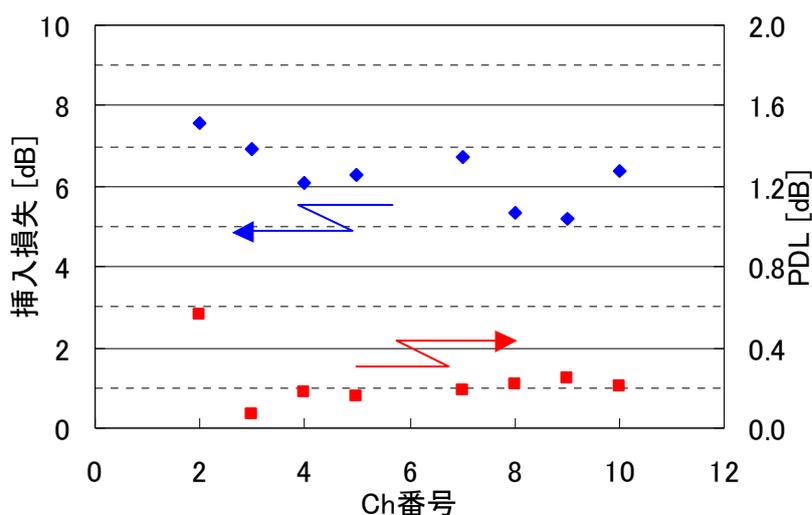


図 4-4-2-8 挿入損失、PDL

損失ばらつきは、若干生じているが、1Ch モジュールの 5.5dB とほぼ同様の値を得ることができた。また、PDL も Ch2 を除いて、約 0.2dB 以下と良好な結果が得られた。

次に、印加電圧に対する DGD 量の評価を行った。結果を図 4-4-2-9, -10 に示す。電圧に対する DGD 量は、各 Ch によって異なっているが、最大 DGD 量、最大-最小駆動電圧は、ほぼ同じ値であり、問題ないと考えられる。また、最小 DGD 量がほぼ 0ps 程度まで落ちており、1/4 でなく、1/3.7 波長板を用いた効果が全 Ch に現れていることが分かる。

今後の課題としては、損失、PDL ばらつきの低減を行っていく。

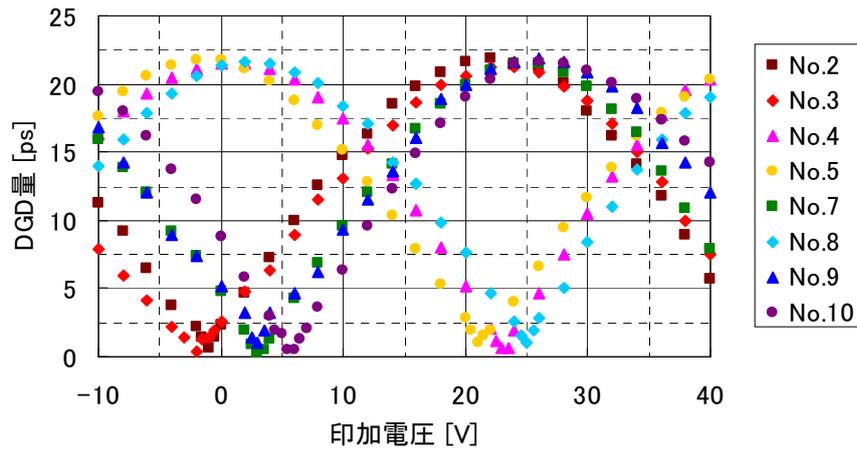


図 4-4-2-9 印加電圧に対する DGD 特性

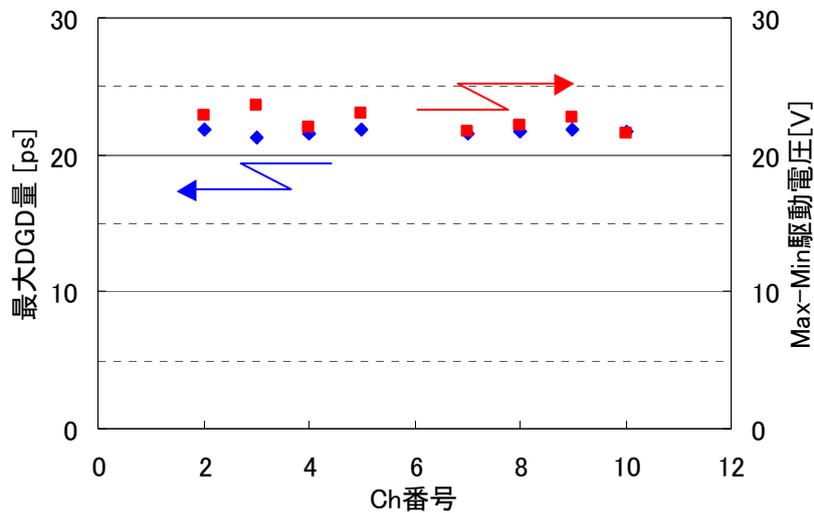


図 4-4-2-10 Ch に対する最大 DGD 量、駆動電圧特性

4-4-3 まとめと今後の課題

偏波モード分散補償モジュールを構成する要素デバイスの内、偏波制御器と可変 DGD 光回路の 8Ch アレイ化について最終目標特性の観点から検討を行った。

偏波制御器については、従来の 8 分割電極から 4 分割電極とすることにより、入力電気 PIN 本数を半減することができ、さらに 8Ch アレイでの片側電気入力とできることがわかった。その設計で 8Ch アレイモジュールを試作し、1 チップモジュールとほぼ同等の特性を得ることができた。

可変 DGD 光回路については、バルク型の為 8Ch 時の小型化に困難な MO と比較して、特性（特に挿入損失）は劣るものの最終目標特性を満たし、8Ch アレイでもそれほど大きさが変わらない導波路型である EO 型を最終的に採用することとした。EO 型でのアレイモジュールを試作し、1 チップモジュールとほぼ同等な結果が得られたことを確認した。

偏波制御器、可変 DGD 光回路の 8Ch アレイの 1 次試作を行い、基本特性を確認でき、実施計画に対して 100%達成することができた。今後、両デバイスとも、特性ばらつきの大きい挿入損失、PDL について、来年度改善を行い、最終目標を達成する見通しである。

今年度の目標に対して 100%の達成度であり、最終目標に向けての達成度は 80%。19 年度に、今年度試作のアレイモジュールの特性改善をおこない、100%の達成の見通し。

4-5 総括

18年度は昨年度の中間方向での課題を元に、最終目標に向けて各モジュール(波長選択スイッチモジュール、波長分散補償モジュール、偏波モード分散モジュール)の完成度の向上と、サブシステムとしての動作検証実験に向けた検討を進めた。

副課題アでは、来年度の統合サブシステム試作に向けた設計を進めるとともに、各モジュールの伝送特性の評価を行った。波長分散補償モジュールに関して、個別チャネル補償のエタロン型を採用することとし、同モジュールを用いた光ハブ構成の検討、および同モジュールの特徴を考慮した目標特性の見直しを行った。さらに、短ループ周回伝送実験系を構築した上で、波長選択スイッチモジュールの多段透過特性を評価し、Passband narrowing およびコヒーレントクロストークに関して、多段透過時に影響が殆ど無い良好な特性を有することを確認した。さらに、波長分散補償モジュールに関しても、静特性を用いた伝送シミュレーションを行い、多段接続時に良好な補償特性が確保できることを確認した。受託期間を通して、前半のデバイス開発のフェーズから後半のサブシステム開発のフェーズへシフトしている段階であり、最終目標に向けた達成度はほぼ予定通りの50%である。19年度に各モジュールを統合動作させた場合の光学特性検証をおこない、100%の目標達成の見通しである。

副課題イでは、コリメータアレイの特性改善によるポート間・波長間の損失バラツキ低減、MEMSミラーの量産性の向上、機構系の改良と、駆動電圧のテーブル作成方法の改善、制御回路のノイズ低減による特性の安定化を図り、製品可能なレベルへ近づけた。以上の結果を元に改良モジュール(波長間隔: 100GHz、4×1)を試作し、特性改善の効果を検証した。また、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た。最終目標に向けた達成度は80%。19年度に製造性の向上等の製品化技術を確立し、100%の達成の見通し。

副課題ウでは、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を考案し、シミュレーション、試作を進め、それぞれ基本動作を確認した。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ことが判り選定した。エタロン型の選定が遅れたため、モジュール化が遅れたが、原理試作により最終年度の全体システム実験は遅延なく可能な見込みである。最終目標に向けた達成度は80%。19年度に、モジュールの小型化の検討をおこない、100%の達成の見通し。

副課題エでは、偏波制御器と可変DGD光回路の8Chアレイ化について最終目標特性の観点から検討を行った。偏波制御器については、従来の8分割電極から4分割電極して、8Chアレイでも片側電気入力可能な事を確認し、8Chアレイモジュールの試作で検証した。可変DGD光回路については8Chアレイでもそれほど大きさが変わらない導波路型であるEO型を最終的に採用する事とし、アレイモジュールを試作し、1チップモジュールとほぼ同等な結果が得られたことを確認した。偏波制御器、可変DGD光回路の8Chアレイの1次試作を行い、基本特性を確認できた。最終目標に向けた達成度は80%であり、19年度に特性ばらつきの大きい挿入損失、PDLの改善をおこない、100%の達成の見通し。

以上、この4年間の検討でサブシステム・モジュールの詳細検討をおこない、ハブ構成・モジュールへの要求仕様の最適化、モジュールの試作・検証を進めた。一部のモジュール試作がずれ込み、サブシステムの全体検証まで到達できなかった点はあるが、全体としては75%の到達度である。システムとして提案時の目標値(伝送速度2.5~40Gbit/s、波長間隔で25~100GHzの環境下での確認)達成を目指して、製品に近い組合せからモジュールの試作・システム評価での動作検証をおこない、個別の要素実験の結果を元にしたシミュレーションと組合せ、総合評価・検証をおこなう(100%達成可能な見通し)。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧 無し