

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「情報システムの超低消費電力化を
目指した技術革新と統合化技術」
研究課題「超低消費電力光ルーティングネットワー
ク構成技術」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

研究代表者：佐藤 健一
(名古屋大学大学院工学研究科・教授)

§ 1 研究実施の概要

情報システムの低消費電力化は次世代ネットワーク構築における焦眉の課題となっている。この課題の解決に向けたブレークスルーをもたらす技術として、光ルーティング技術(フォトニックネットワーク技術)が有る。本技術では光のパッシブデバイスによるルーティングを用いる事により、通信ノードにおける電気レイヤの処理を大幅に削減し、通信ネットワーク全体での抜本的な低消費電力化を達成することができる。本研究では低消費電力化をネットワーク全体でとらえ、リンクとノードを構成要素とし、HAN (Home Area Network) / LAN (Local Area Network) から WAN (Wide Area Network、コア並びにメトロネットワーク)までのネットワーク全体をあたかも一つのサーキットボードとして、低消費電力化の観点から最適化を図る。フォトニックネットワーク技術における各種の通信方式(光ストリーム、光バースト等)が有する超低消費電力のポテンシャルを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャ、ネットワーク設計概念を明らかにするとともに、それを構成する超低消費電力ノードシステムの構成並びにその低消費電力性能を明らかにした。

特に、パッシブデバイスによる光領域でのルーティングを最大限に活かしつつ、スケーラブルに拡張出来るネットワークアーキテクチャ、ネットワーク設計手法を明らかにするとともに、ノードの構成法、キーとなる光デバイスに関する研究を推進した。ネットワークのスループット拡大の観点からストリームとして波長パスに加えて、複数波長を一括して制御する波長群パスを利用するネットワーク、およびその要素技術として波長群クロスコネク、波長群合分波器に関する研究開発を行い、その基盤技術を確立した。ネットワークアーキテクチャに関しては、メッシュ主体のネットワークに加え、メトロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して効率的なネットワーク設計法を開発するとともに、新しいノード構成を提案した。特に、波長群の導入による波長パスのブロック確率の詳細な性能評価を行い、僅か(−7.6%)なスループットの低下を許容することで、スイッチ規模を 70%程度縮小できる事を明らかにした。この成果に基づき、ノードシステム実現に必要なキー部品を試作し、各種光伝送特性を評価し良好な特性が得られる事を実験的に確認した。さらに、波長群クロスコネクノードの動作を実証するために、キー部品(波長群合分波器、マトリクススイッチ、波長合分波器など)を試作するとともに波長群クロスコネクノードプロトタイプ装置を作製し、その性能を総合的に評価した。また、横須賀地区に敷設された光ファイバを伝送路として用いた現場実験を行い、映像・データの伝送に関して、所期の性能が実現されていることを確認した。

さらに、数 10km 程度をターゲットとした近距離ネットワークに向けて、光スイッチを極限まで排除し、究極的に低消費電力性を追求した波長ルーティングシステムについて研究開発を行った。このような波長ルーティングシステムでは、光スイッチをも排除する代償として、使用できる波長パスが固定化するため、波長パス設定の柔軟性確保が課題となる。本研究においては、柔軟性を確保する技術開発に取り組み、パッシブな波長ルーティングデバイス内に、あらかじめ様々な太さの波長群パスを形成することで、波長パス設定の柔軟性を増すための手法を 3 種類開発し、広範囲な領域への適用が可能であることを示した。更に、波長ルータ部分で用いられるアレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed-Waveguide Grating) の設計に工夫を加えることで、2 つ以上のネットワークを相互接続して拡張する手法を提案し、その動作検証に成功した。

一方、上記の各種通信システムの実現には今までにない専用の光デバイスが必要不可欠であり、高度で最先端な光デバイスを石英系 PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術を駆使して実現した。これまでに開発した専用デバイスは 25 種類にのぼる。一方、光デバイス自身の低消費電力化も極めて重要なテーマであり、適用デバイスの中で唯一電力を消費している石英系 PLC 光スイッチにおいて、構造や材質の見直しを行い従来の 1/8 の低消費電力化を達成した。一方、基盤技術開発では、PLC 光スイッチの消費電力を 1/100 以下にすることを目指し、低損失な石英系導波路と電気光学効果を利用するニオブ酸リチウム(LiNbO₃) 導波路を組み合わせた光スイッチの検討を進め、駆動回路も含めた消費電力で評価し(電圧駆動のため光デバイス部分で電力をほとんど消費しない)、消費電力を 1/100 以下に低減することに成功した。

以上の検討を基に、コアネットワーク部におけるノードシステムとして、従来の電気ルータによる構成と比較して 1/100~1/10 の低消費電力化の見通しを得た。ここで前者は広範囲に Optical

FCS (Fast Circuit Switching)／バーストが導入された場合(終端トラフィックの 80%程度)、後者は終端トラフィックがパケット主体の場合である。また、数 10km 程度をターゲットとしたメトロ／LAN における波長ルーティングシステムにおいては、電力消費の大半を占める電気ルータ装置を、電力を消費しないパッシブな波長ルーティングデバイスに置き換える効果によって、従来のシステムと比較して 1/20 以下の低消費電力化を達成した。更に、光デバイスのレベルからは新しい構造と材料の適用を進め、従来に比べ 1/100 以下の低消費電力化を達成した。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

研究開始時に目指した目標

(1) コアネットワーク部におけるノードシステム

- ・通信ノードにおけるビット当りの消費電力を電気ルータ構成と比較して 1/100～1/10 を目指す。

(2) メトロ／LAN におけるノードシステム

- ・従来のノードシステムと比較して 1/10 以下を目指す

(3) 光ルーティング用 PLC スイッチ

- ・スイッチ素子(駆動回路を含む)当たり従来の 1/100 のスイッチング電力を目指す

目標の達成状況

(1) コアネットワーク部におけるノードシステム

- ・広範囲(終端トラフィックの 80%程度)に光バースト(2-way シグナリング)が導入された場合消費電力を～1/130 に低減する基礎技術を確立

- ・広範囲(終端トラフィックの 80%程度)に Optical FCS (Fast Circuit Switching)が導入された場合消費電力を～1/65 に低減する基盤技術を確立

- ・終端トラフィックがすべてパケットの場合

- 消費電力を～1/8 に低減する基盤技術を確立

(2) メトロ／LAN におけるノードシステム

波長割当変更可能な波長ルータを実現し、消費電力 1/20 の見通しを得た。

(3) 光ルーティング用 PLC スイッチ

石英ガラス系では 1/10 以下を達成。LiNbO₃との複合系で 1/100 以下を達成(駆動回路を含む)

5年間の研究計画・進め方の概要

年度毎の具体的な研究項目は次項、(3)達成状況 の項に記載してある。ここでは全体の進め方のポイント並びに概要を述べる。本課題以前のフォトニック通信技術・ネットワーク技術は増え続ける通信量の増大に対応するための個々の構成要素の低消費電力化を主眼として研究開発がなされて来た。本研究の独創性・新規性は、

(1) これ迄低消費電力化については、例えば装置のサーキットボードの低消費電力化(ひいては装置単体の低消費電力化)と言う視点で行われてきたが、本研究ではこれをネットワーク全体でとらえ、リンクとノードからなるネットワーク全体をあたかも一つのサーキットボードとして、低消費電力化の観点から最適化を図る手法と取った。フォトニックネットワーク技術における各種の通信方式(光ストリーム、光バースト等)が有する超低消費電力のポテンシャルを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャ、ネットワーク設計概念を明らかにするとともに、それを構成する超低消費電力ノードシステムの構成並びにその低消費電力性能を明らかにした。特に、パッシブデバイスによる光領域でのルーティングを最大限に活かしつつ、スケーラブルに拡張出来るネットワーク構成、ネットワーク設計手法を明らかにした。

この様な抜本的な低消費電力化の観点からのフォトニックネットワーク技術に関する研究は国内外を含めてそれ迄に無く、本研究がその後の世界各国での研究に先鞭をつけ、ネットワーク研究において、将来的に増々重要性を増しつつある低消費電力化に関するネットワーク研究の方向を示す役割を果たした。

(2) 上記に加え、パッシブデバイスによる光領域でのルーティングを用いたネットワークの超低消費電力性を最大限に活かす為に、これまでは無い新しいタイプの光システム並びにデバイスを開発した。特に、波長を複数束にして効率的にルーティング、スイッチングを行う新しい素子を複数発明し、日本が世界に誇る最先端の光集積回路技術を駆使して機能の集積化を計り素子を作製した。それらの素子を利用して各種デバイス・モジュールを試作し、これを用いて統合したプロトタイプシステムを実現し、現場実験を行うことにより、実際のシステムとしての適用性を実証した。

(3) 本研究の特長としては、局所的な最適化では無くトータルのシステムとしての最適化を実現するための革新性の高いシステムを目指したものであり、それに向けて産学連携を有効に活用できる研究体制を構築し、シナジー効果が最大限に得られる連携と役割分担を心がけた。上記のネットワーク全体の観点からのアーキテクチャの研究、ブレークスルーをもたらすシステム要求条件の明確化（大学）に従い、革新的なシステム・デバイスの実現に向けた研究（企業研究所）、先端製造技術を駆使したプロトタイプ研究試作による機能の実証（試作企業）迄を密接な連携の下で一貫して行なう事により、実用化を視野にいたれた目標達成への道筋を明確にして、本研究課題の戦略目標を達成した。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

提案者らはこれまで上記課題の研究を精力的に推進した結果、21年度末には世界で初めて“低消費電力多階層光クロスコネクタノード”プロトタイプ試作に成功し、報道発表を行うとともに、その内容は同分野で最も権威のある国際会議 OFC/NFOEC 2010 にポストデッドラインペーパーとして投稿し採択された。さらに、その内容は IEEE Journal of Lightwave Technology への招待論文として掲載された。これらの進展は、当初の予想を上回る物であり、本プロジェクトにおいては提案技術の完成度を当初の予想より高めることができた。例えば、将来の大規模ネットワークにおいては、光クロスコネクタノードの経由数は最大 10 ノード以上になると予想される。試作した低消費電力多階層光クロスコネクタノードの実現性を検証する為に、当初は想定していなかった 10 ノードのカスケードシステムの伝送実験を行うことができた。

§ 3 研究実施体制

(1)「名古屋大学」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
佐藤 健一	名古屋大学工学研究科	教授	H17.10～H.23.3
長谷川 浩	名古屋大学工学研究科	准教授	H17.10～H.23.3
西澤 典彦	名古屋大学工学研究科	准教授	H18.4～H.20.3
石井 紀代	名古屋大学工学研究科	D3	H18.4～H.23.3
Le Hai Chau	名古屋大学工学研究科	D2	H19.4～H.23.3
森田 康明	名古屋大学工学研究科	M2	H19.4～H21.3
岡田 将志	名古屋大学工学研究科	研究生	H19.4～H22.3
山田 祥之	名古屋大学工学研究科	D2	H19.4～H.23.3
伊藤 弘行	名古屋大学工学研究科	M2	H21.4～H.23.3
大野 高明	名古屋大学工学研究科	M2	H21.4～H.23.3
小川 貴弘	名古屋大学工学研究科	M2	H21.4～H.23.3
島田 康平	名古屋大学工学研究科	M2	H21.4～H.23.3
平光 亮介	名古屋大学工学研究科	M2	H21.4～H.23.3
遠藤 慎也	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
大野 寛明	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
佐藤 正和	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
高木 達己	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
成瀬 文覚	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
白 紅霞	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
沈 志舒	名古屋大学工学研究科	M1	H22.4～H.23.3
山本 卓也	名古屋大学工学研究科	M2	H19.4～H21.3
秋井 和貴	名古屋大学工学研究科	M2	H19.4～H21.3
平野 真彦	名古屋大学工学研究科	M2	H19.4～H21.3
三井 真一	名古屋大学工学研究科	M2	H20.4～H22.3
中川 雅弘	名古屋大学工学研究科	M2	H20.4～H22.3
小原 圭太	名古屋大学工学研究科	M2	H20.4～H22.3
本蔵 晋平	名古屋大学工学研究科	M1	H20.4～H21.3
中野 一輝	名古屋大学工学研究科	M2	H20.4～H22.3
川村 和恵	名古屋大学工学研究科	事務補佐員	H19.4～H.23.3
柳生 功	名古屋大学工学研究科	M2	H17.10～H19.3
杉村 浩史	名古屋大学工学研究科	M2	H17.10～H19.3
松末 直也	名古屋大学工学研究科	M2	H17.10～H19.3
蟹江 剛一	名古屋大学工学研究科	M2	H17.10～H19.3
梯 昌二	名古屋大学工学研究科	M2	H18.4～H20.3
長嶋 秀孝	名古屋大学工学研究科	M2	H18.4～H20.3
安田 謙二	名古屋大学工学研究科	M1	H18.4～H19.2
小西 悠介	名古屋大学工学研究科	M2	H18.4～H20.3
吉川 友啓	名古屋大学工学研究科	M2	H18.4～H20.3

② 研究項目

超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

- ・フレキシブル光クロスコネクトノードの設計
- ・超低消費電力光ネットワーク設計法の開発
- ・ラベルスイッチ並びに FCS ネットワーク実現法
- ・アダプティブ光ネットワークの設計法の開発
- ・ネットワーク実験

(2)「NTT フォトニクス研究所」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
高橋 浩	複合光デバイス研究部	グループリーダー	H18.4～H23.3
阪本 匡	複合光デバイス研究部	グループリーダー	H20.7～H23.3
野口 一人	複合光デバイス研究部	主任研究員	H20.7～H23.3
瀧口 浩一	複合光デバイス研究部	主任研究員	H17.10～H23.3
山田 貴	複合光デバイス研究部	主任研究員	H18.4～H23.3
鈴木 賢哉	複合光デバイス研究部	主任研究員	H17.10～H23.3
森脇 摂	複合光デバイス研究部	研究主任	H17.10～H22.1
亀井 新	複合光デバイス研究部	研究主任	H18.8～H21.3
岡田 顕	複合光デバイス研究部	グループリーダー	H19.8～H20.6
界 義久	複合光デバイス研究部	グループリーダー	H17.10～H19.7
橋詰 泰彰	複合光デバイス研究部	研究員	H17.10～H18.7
日比野善典	研究企画部	部長	H17.10～H18.3

②研究項目

超低消費電力光ネットワーク構成技術

- ・フレキシブル光クロスコネクトノード開発
- ・非対称波長ルーティング装置の開発
- ・光ラベル処理装置の開発
- ・アダプティブネットワークインターフェイスの開発

(3)「NTT エレクトロニクス」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大森 保治	フォトニクス事業本部	技師長	H17.10～
奥野 将之	技術開発センタ	部長	H17.10～
陣内 啓光	技術開発センタ	技術主任	H17.10～
相馬 俊一	技術開発センタ	主事	H22. 7～
鈴木 賢哉	技術開発センタ	主事	H20.8～H22. 6
前田 安	技術開発センタ	主事	H20.4～H21.3
首藤 啓三	技術開発センタ	主事	H17.10～H20.3
松永 和夫	技術開発センタ	主事	H18.10～H20.7

② 研究項目

- ・超低消費電力光ルーティングネットワークに必要な不可欠な専用 PLC デバイスの開発
- ・PLC 光スイッチの抜本的低消費電力化を実現する基盤技術の開発

§ 4 研究実施内容及び成果

4. 1 超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ(名古屋大学グループ)

(1)研究実施内容及び成果

① 超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

①-1 フレキシブル光クロスコネクトノードの設計

1階層並びに2階層光パスクロスとコネクトスイッチ規模の比較

波長群を用いる2階層ノードに関して、1階層光パスノードとSW規模を比較し、波長群を用いたノード構成が有用となる範囲・パラメータ領域を明らかにした。波長群とは複数本の波長パスを束ねたものであり、波長群単位でのルーティングを可能な限り行うことで、従来の波長単位のルーティングを行う一階層光パス網に比べ、ノードのスイッチ規模を大幅に削減することが出来る。図1に新しく開発した2階層光パスクロスコネク構成の例を示す。図2に1階層光パスクロスコネク構成と比較したスイッチ規模を示す。横軸は、ノードでの add/drop 可能な割合を示す。中継系ネットワークでの一般的な add/drop 率、0.3-0.5 において 50%程度以上のスイッチ規模削減が実現出来る事を明らかにした。本技術は、コア/メトロなどの比較的大規模なネットワークへの適合性が高い技術である。

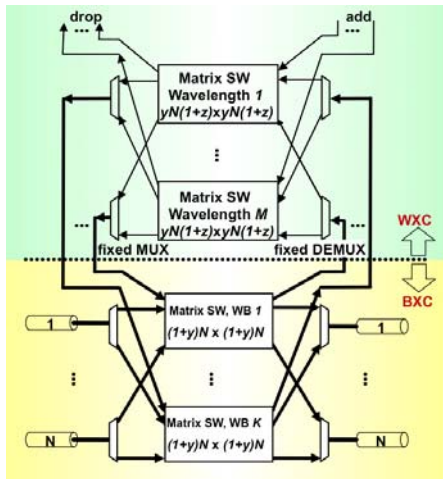


図1 光パスクロスコネク構成

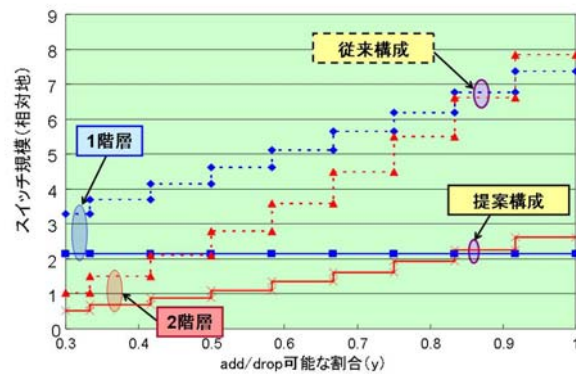


図2 1階層並びに2階層光パスクロスコネクトスイッチ規模の比較

新しい波長群クロスコネクトスイッチノード構成と波長群合分波器

波長群パス単位でクロスコネクが行えるこれ迄には無い新しい波長群クロスコネクトスイッチノード構成を提案した。また、キーとなる構成要素である新しい波長群合分波器を発明した。

多階層光パス網を実現する為の波長群合分波器として通常は誘電体多層膜フィルタが使用されている。しかし、所望の信号以外の波長帯域をシャープにカットすること、並びにエッジ付近での非線形の分散を小さく抑えることは困難であった。また、空間光学系を用いたWSS (Wavelength Selective Switch) を波長群合分波器として使用する事もできるが、コスト・大きさの点で課題があった。本研究では、波長毎の粒度の透過特性を維持した新たな波長群合分波器を提案した。提案合分波器は、波長周回性を有するアレイ導波路回折格子 (cyclic AWG) を利用し、二つの cyclic AWGの導波路間を接続することにより実現される。この双方のAWGの導波路間の接続方式は、波長群の配置により2種類に大別される。2種類の波長群の配置を図3示す。第一は、連続配置型波長群(図3(a))である。第二は、分散配置型波長群(図3(b))である。連続配置型波長群に対応する波長群合分波器を図4(a)に示す。構成要素AWGは導波路間を交差させることなく接続可能である。また、分散配置型波長群に対応する波長群合分波器を図4(b)に示す。第二の方式は、2つのAWG間の導波

路が交差するが，出力ポートの使用効率を最大化することできる．提案波長群合分波器は各々2つのAWGを接続することにより実現可能であるが，2つのAWGのポート間の接続関係を定式化したものを図5に示す．

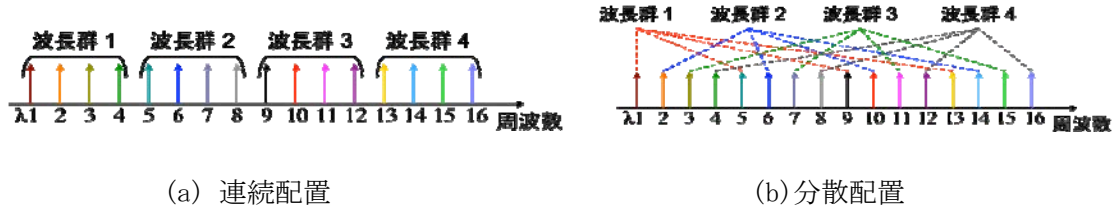


図3 波長群配置

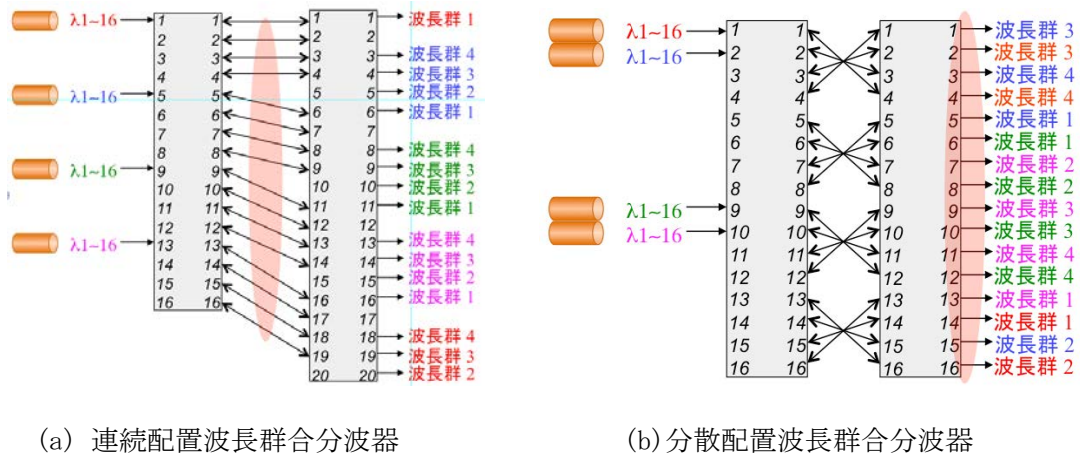
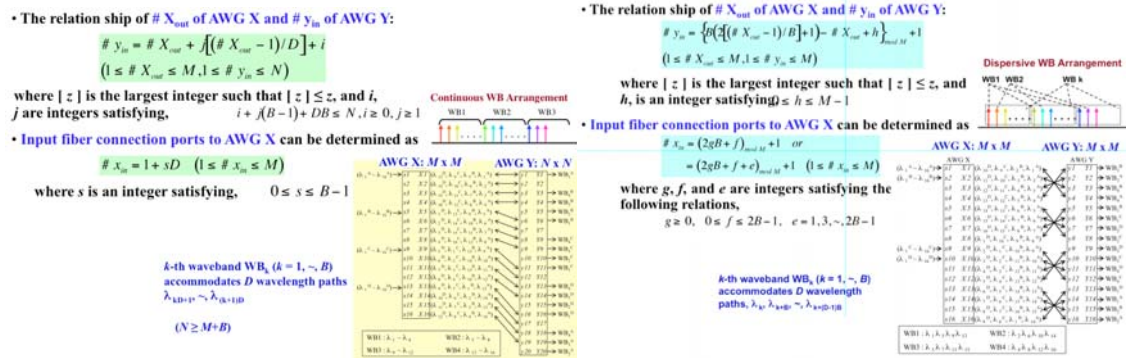


図4 提案波長群合分波器



(a) AWG接続関係 (連続配置波長群) (b) AWG接続関係 (分散配置波長群)

図5 提案波長群合分波器を構成するAWGのポート間接続関係

これら，提案合分波器の重要な特徴として，1素子に複数のファイバを収容することができる．図6に4本の入力（出力）ファイバで共用した波長群分（合）波器を利用した波長群クロスコネクトを示す．部品の共用化により，システムの小型化・経済化が達成される．提案波長群合分波器を実際に試作し，その特性を評価することにより，有効性を確認した．図7にPLC技術を用いて試作した，入力ファイバ6本（ファイバ当り：波長多重数＝40，波長群数＝5，波長群幅8）を収容する波長群合分波器を示す．平均透過損失は，3.6 dBと良好な値が実現された．

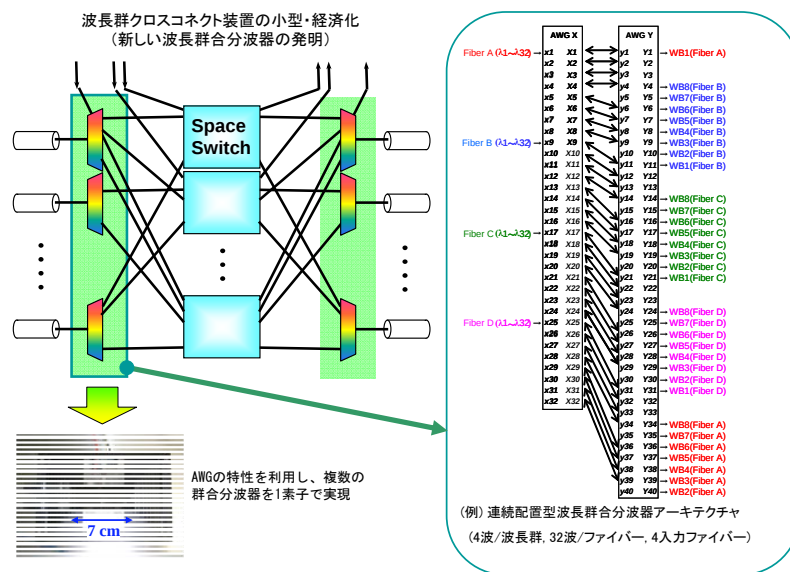


図6 複数の入／出力ファイバで共用した波長群分／合波器を利用した波長群クロスコネクト構成

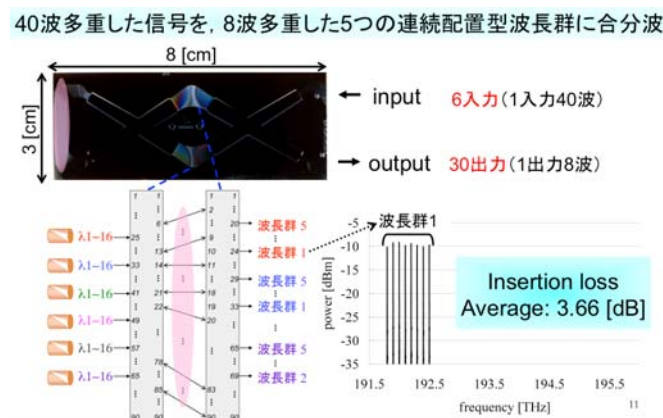
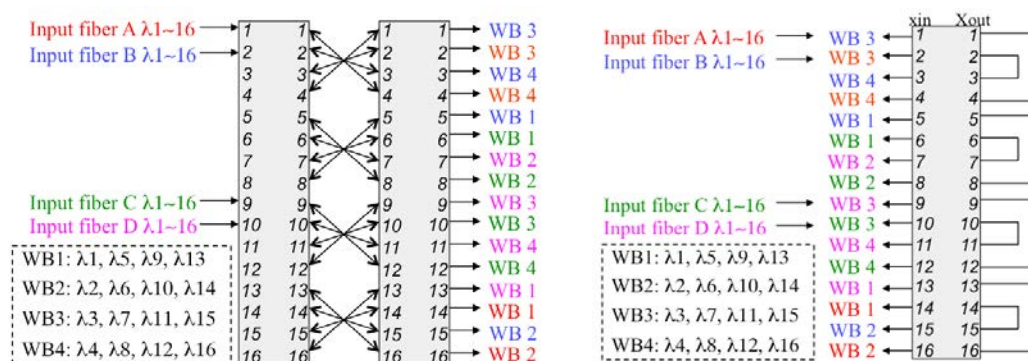


図7 6本の入／出力ファイバで共用できる連続配置型波長群分／合波器

折り返し導波路型波長群合分波器

これ迄に我々が提案してきた分散配置波長群合分波器においては、AWG 間の導波路の交差、2つの AWG の特性の一致の必要性、という課題が有った。これらの課題を同時に解消し、モノリシック製作に有効である新考案波長群合分波器の一例を図8に示す。AWG の出力を図のように折り返し接続することにより、16 波長の入力信号を 4 波長ずつの 4 波長群に分波し、異なるポートに出力可能である。1 素子に複数のファイバを収容可能であり、図 8 (b) の場合 4 本のファイバを同時に入力可能である。また、cyclic AWG を用いているが、通常の FSR (free spectra range) の広い AWG を用いることも可能である。提案構成は、導波路が交差することなく、更に、1つの AWG で構成可能なことから、モノリシック製作に有効である。しかし、入力信号と出力信号が双方向に伝送されるポート (図 8 (b) # Xin : 1, 2, 9, 10) が存在する為、それらのポートには、入力する光信号と逆向きの光信号を別のポートに出力する光サーキュレータを用いる必要がある。光サーキュレータを用いない場合は、1 素子に収容するファイバ数を制限する (図 8 (b) において Fiber A, C のみ接続する) 必要がある。



(a) 従来の分散配置型波長群合分波器 (b) 新提案分散配置型波長群合分波器
図8 新提案波長群合分波器

フレキシブル光クロスコネクトノード用波長群合分波器

分散配置波長群に基づく新しい波長群クロスコネクトノード構成を考案した。分散配置波長群の合分波器としては、従来よりCyclicなAWG (Arrayed Waveguide Grating)が利用できることを明らかにして来たが、同波長群合分波器はAWGの端に近い出力ほど過剰損失が大きく、それを各ノード当たり2段経由(分波器並びに合波器)するとその過剰損失が加算されて損失が増加する。本研究では、図9に示す様に、入力側波長群分波器と出力側波長群合波器の接続構成を工夫することにより、過剰損失を1/2程度に低減出来ることを考案し、波長群合分波器を試作しその特性を実証した。本構成を利用した波長群クロスコネクトシステムは、プロトタイプ階層化光パスクロスコネクト装置に使用され、現場実験によりその有効性が実証された。

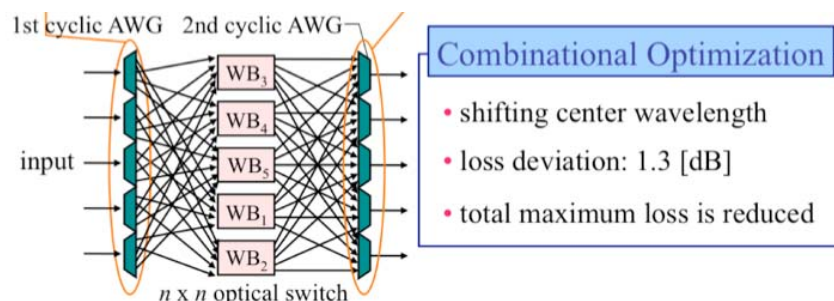


図9 入力側波長群分波器と出力側波長群合波器の新しい接続構成による低損失化

フレキシブル光クロスコネクトノード

階層化光パスネットワークを実現する上でキーとなる階層化光クロスコネクトノードに関して、マトリックススイッチをベースとする新しい光クロスコネクトの構成法を考案した。波長群パス用クロスコネクト(BXC: WB Cross-Connect), 波長パス用クロスコネクト(WXC: Wavelength Cross-Connect)をスタックして構成される多階層型光クロスコネクトでは、スイッチ規模を抑制する上で波長群クロスコネクトにおけるadd/drop可能なパスの割合を制限することが有効である。従来はスイッチ規模抑制効果を優先し、波長群毎にadd/drop率の上限を設定するHOXCが主に検討されてきた。しかし、与えられた通信要求に対し各パスを適切に配置する“ネットワーク設計”においては強い制約となる。一方、波長群の区別なく全入力/出力波長群パスに対するadd/drop 率を制限(colorless waveband add/drop restriction)する場合には、ネットワーク設計を工夫することにより、制限しない場合と同等の総光ポート数で実現可能であり、ノード規模削減と総ネットワークコスト最小化を両立できることが示されている。そこで、波長群パス全体に対してadd/drop 率に上限を設ける効率的なHOXC アーキテクチャを考案した。本アーキテクチャでは、WXC部に

において、異なる波長群に属する波長パスが同一スイッチを共用し、かつBXC部において波長群毎の出力方路切替及びadd/drop 機能を分離することにより、全体の光スイッチ部を極小化している。従来構成では、WXC 部を単一の大きなマトリクススイッチで構成していたが、提案構成（図10）では、異なる波長群パスに属する波長パスで共有可能な波長群MUX/DEMUXを用い（次項参照）、1 波長群パス内の最大波長パス数と同数の小型マトリクススイッチでWXC 部を構成している。また上に述べた様に、波長群のadd/drop 機能と方路切替機能を分離し、更なるスイッチ規模低減を実現している。従来構成と本構成によるスイッチ規模を比較したものを図11に示す。パラメータは、波長群のAdd/drop率=0.375、波長数64波／ファイバ、8波／波長群 である。本提案構成を用いることにより、従来構成に比べてスイッチ規模を 1/5 以下に削減できる事を実証した。

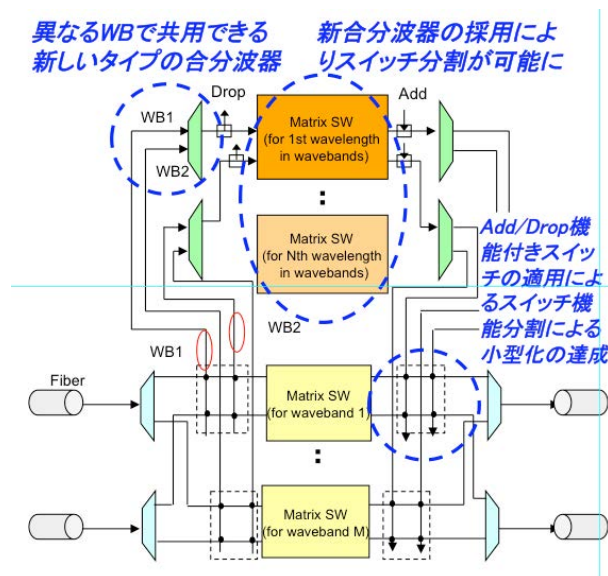


図10 新提案階層化光クロスコネクタノード構成

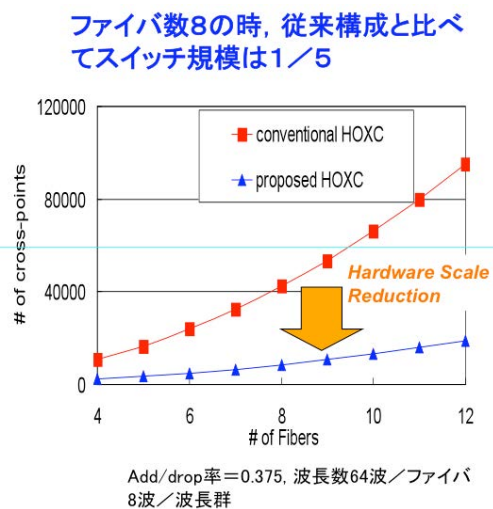


図11 スwitch規模縮小効果の評価

異なる波長群パスに属する波長パスで共有可能な波長群MUX/DEMUX

図10の波長パスクロスコネクタ部において、波長群パスクロスコネクタ部からdropされた波長群の各々から波長パスに分波する分波器として、異なる波長群が予め定められた異なる入力ポートに接続され、その異なる波長群毎の入力ポートに入力された波長群を波長チャネル数分の出力ポートに、波長群中の波長のインデックスに対応して分波できる波長分波器を考案した。図12に (a)連続配置型、(b)分散配置型、の波長群に対する構成例を示す。(a)の例ではWB 2をWB 1の入力ポートから3つ下にずらし、WB 3をWB 2の入力ポートから3つ下にずらして入力する。(b)の例では、WB 1の入力ポートの1つ下のポートにWB2を入力し、WB2の入力ポートの1つ下のポートにWB 3を入力する。これにより、出力されるポート群を共用することが可能となり、提案構成を実現できる。分散配置型の場合は連続配置型の場合と異なり、共用する出力ポート群は、各出力ポート間に2つ分のポートが空いているとびとびの集合となっている。

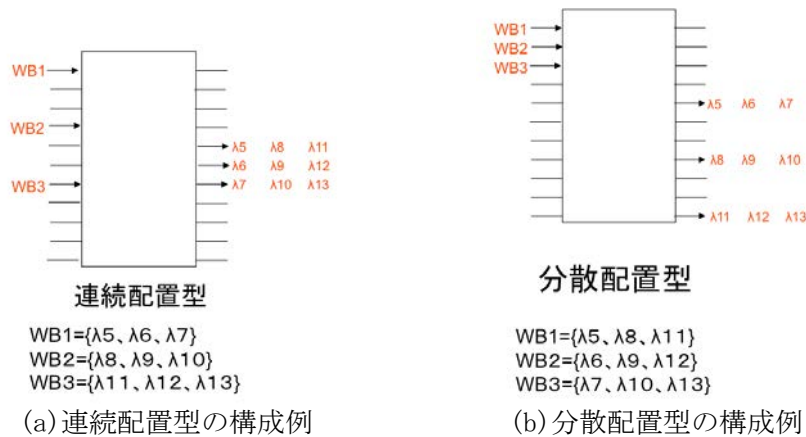


図12 異なる波長群パスに属する波長パスで共有可能な波長群MUX/DEMUX

接続リングノード装置の開発 (3機関共同)

次節に示す様に、本研究開発により、接続リングネットワークに波長群を導入し、僅かなルーティング能力の低下を許容することにより、接続ノードのスイッチ規模を大幅に縮小できることが明らかにした。この検討により、従来大規模なスイッチへの適用が困難であった PLC 型デバイスが接続リングノードのスイッチに適用できることが分かった。そこで必要なキーデバイスを開発し伝送実験により試作ノードシステムの光伝達特性を検証した。図 13 に PLC デバイスを用いたリング接続クロスコネクシステム構成と開発した主要光回路を示す。

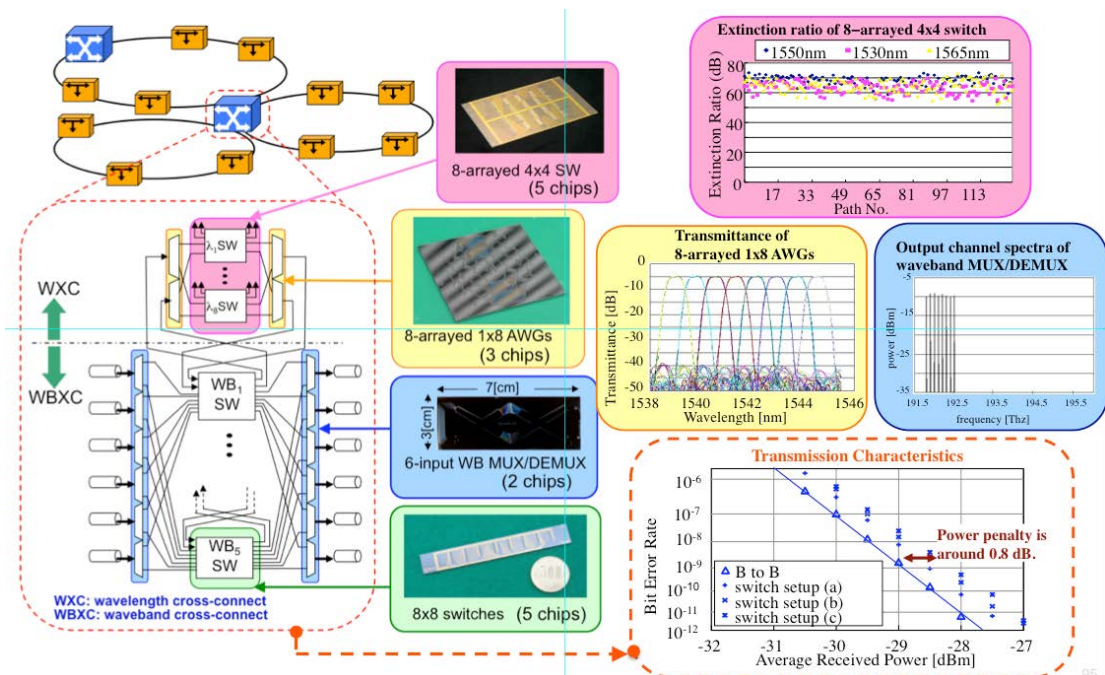


図 13 PLC デバイスを用いたリング接続クロスコネクシステム

図 14 に2-ファイバ双方向リングを3リング接続するリング間接続ノード光クロスコネクに必要な光回路の種類とその光集積回路チップの数を示す。少数の部品でノードを構成することが出来ることが分る。図 15 には開発した8アレイ 4x4 光スイッチの挿入損と消光比を示す。横軸の番号はスイッチパターンの 4x4x8=128 通りのパターンを示す。2.5 dB 以下の低ロス、-50 dB 以上の高消光比が達成されていることが分る。

Function	# of chips
6-output WB-MUX	1
6-input WB-DEMUX	1
8x8 switch	5
8-arrayed AWG (1x8)	3 (2.5)
8-arrayed 4x4 switch	5

図 14 2-ファイバ双方向3リングを接続するリング間光クロスコネクタノードに必要な光回路の種類と集積回路チップ数

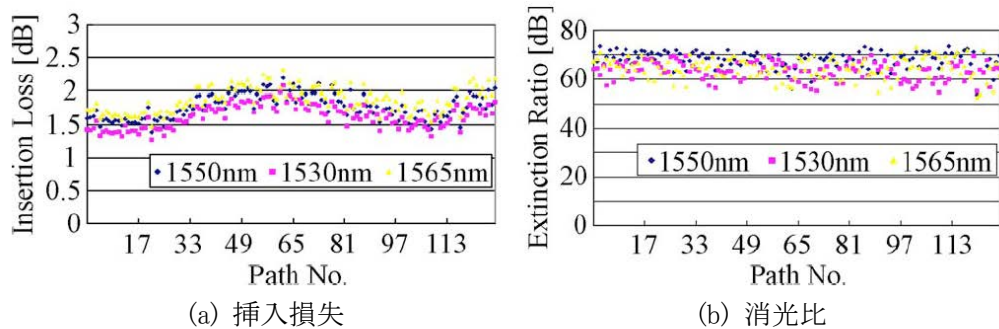


図 15 試作した8アレイ 4x4 光スイッチの挿入損と消光比

試作したプロトタイプシステムを用いて、伝送実験を行った。リング接続ノードで想定される様々なパス設定条件を図 16 に、各々の設定における光信号のパワーペナルティ (BER=10⁻⁹における) を測定した結果を図 17 に示す。光受信レベルの劣化は最悪でも 0.8 dB と小さく、PLC 型デバイスの適用により、極めて小型な接続リングノードが実現可能であることを初めて実証した。

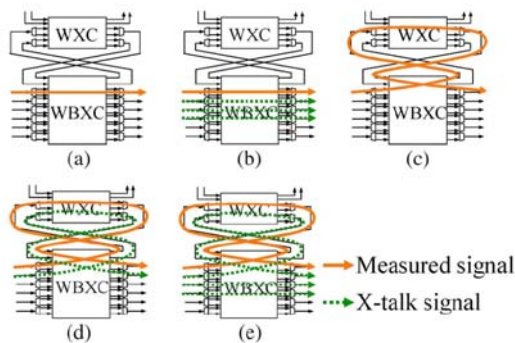


図16 リング接続ノードパス設定条件

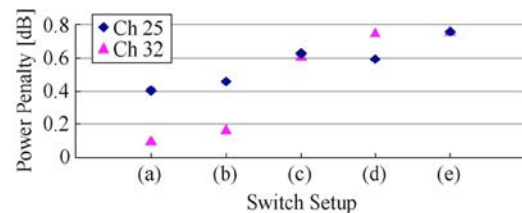


図17 光信号パワーペナルティ (BER=10⁻⁹)

①-2 フレキシブル光ネットワーク設計法の開発

波長群パス設定法

複雑な制約を有し設計の難易度が高い、波長群パスを用いるマルチレイヤフォトニックネットワークの効率的な設計法として、ノードペア間の距離とトラフィック需要を表現する「S-D直積空間 (Source-Destination Cartesian Product Space)」の概念を導入し(図18参照)、S-D直積空間での探索を用いた波長群パス設定法を開発しその有効性を確認した。多階層光パスネットワークの設計は一階層の場合と同様、経路・波長割当問題がNP 完全問題となるため、これ迄にいくつかの発見的設計法が提案されている。しかしながらこれらの設計においては、波長群パスとしての集約可能性を十分には考慮せずに各光パスの経路を予め決定するため、集約効率

の更なる向上の余地が残されていた．本研究開発では，スタティックなトラフィック需要において，効率的に光パスを波長群パスに集約するアルゴリズムを提案した．即ち，始点・終点が各々近接している光パス群を波長群パスに収容することにより，波長群パスの光パス収容効率の向上を目指した．波長群パスに収容すべき近接する光パス群を効率的に探索するため，近接する光パス需要を近接する点の集合として表現する直積空間を定式化する．この空間内で逐次的に近接する光パス群を探索することにより，波長群パスの配置と探索された光パス群を波長群パスに収容することで収容効率の高い波長群パスを設計する．開発した設計手法を用いて波長群パスを用いたネットワークが従来の1階層のネットワークと比べて有利となる条件を明らかにした．一例として，図19に波長群パスを用いた場合の規格化ネットワークコスト（1階層ネットワークコストとの比）を示す．従来手法であるS-D間に直通の波長群を設定するEnd-End法，光パス経路を予め決め経路に包含関係のある光パスを波長群パスにグループ化する従来から知られているBPHT法と比較して本提案手法がネットワークコストを大きく削減できることを示した．特にネットワークの光パス需要が低い場合において，提案手法が効果的であることが示された．

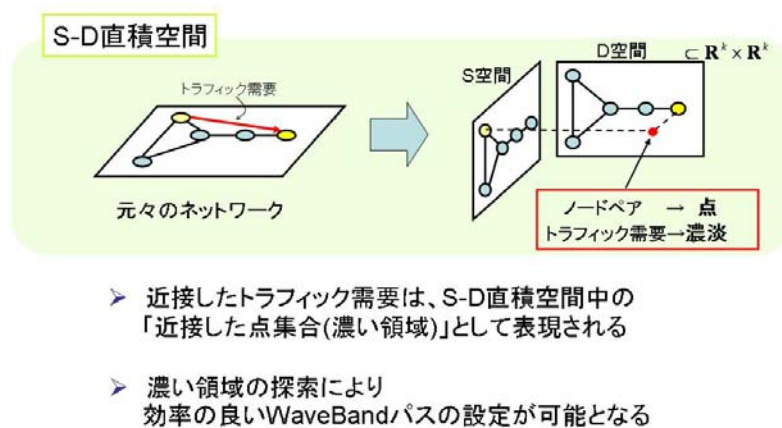
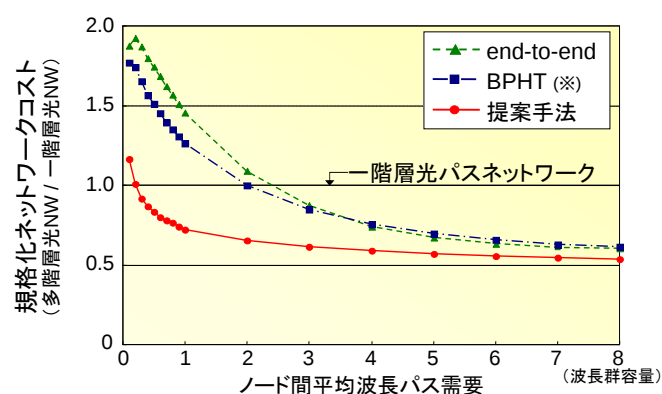


図 18 S-D 直積空間探索法の概要



※：X. Cao et al., IEEE J-SAC 2003

図 19 波長群パスを用いた場合の規格化ネットワークコスト

2-ファイバリング接続における必要最小波長数および最適波長割当法

フォトニックネットワークにおいて任意のパス設立要求に対し最適な波長経路割当を達成する事は、一般的なメッシュトポロジではNP 完全問題、単一リングトポロジにおいてもNP 困難問題である。そのため、従来提案されている波長経路割当アルゴリズムの多くはヒューリスティックなアルゴリズムを基にしており、最適割当が求められるのは限られた場合のみである。例えば、単一リングトポロジにおいて全ノードペア間の需要が等しい場合には、そのトポロジとデマンドの対称性から、使用波長数が最小となる最適波長割当が求められている。本研究では、2リングを接続した接続リングトポロジにおいて、全ノードペア間に1本の波長パスを設立するフルメッシュ接続要求に対し、接続リングにおける各リング内部の通信の対称性を用いつつ、リング間の非対称性を考慮した割当法を開発した。また、リング間接続のための光クロスコネクシステムの小規模実現については、接続リング特有の性質を用いる事で実現を計った。本研究ではまず第一に、リング間接続に特有なトラフィックパターン、即ち、パスの両端が同一リングに属するリング内トラフィックと、パスの両端が異なるリングに属するリング間トラフィックとの処理の分離により、大幅なスイッチ規模削減が成される事を示した。第二に、階層処理を部分的に取入れる事により更なるスイッチ規模削減が成される事を示した。第三に、故障復旧のためのスイッチング方式を指定する事により、更なるスイッチ規模削減が成される事を明らかにした。

本研究で提案したスイッチ規模削減法について図20にまとめる。以下重要な処理に関して説明する。

(1) リング内/リング間トラフィック処理分離

接続リングネットワークのトラフィックは、リング内トラフィックとリング間トラフィックとに大別される。この2種類のトラフィックの処理を分離する。全トラフィックに対するリング間トラフィックの割合を α と仮定する。すなわち、ファイバ中の波長多重数を L とする時、 αL 本の波長をリング間トラフィックに割当て、 $(1-\alpha)L$ 本の波長をリング内トラフィックに割当て、それぞれ使用波長をあらかじめ指定する。これにより、接続ノードのスイッチがリング内トラフィック専用のスイッチ（リング内用スイッチ）とリング間トラフィック専用のスイッチ（リング間用スイッチ）とに分割され、より小規模のスイッチで実現可能となる。このトラフィック処理分離によるスイッチ規模削減効果は非常に大きいので、次の2つの規模削減法もこの処理分離に基づいている。

(2) リング間トラフィックの階層処理

リング間トラフィックのルーティング処理を効率化するため、波長群を導入した階層型ノードアーキテクチャを利用する。提案接続ノードは、波長単位でルーティングを行うリング内用スイッチと、波長群単位でルーティングを行うリング間用スイッチ、およびリング間トラフィックについて波長群単位でのルーティングが不可能な場合に波長単位でのルーティングを行う波長レベルのリング間用スイッチとで構成される。

(3) 故障復旧切替方式の指定

光リング網における故障切替方式として、故障端切替やパス端切替などの方式が標準化に向け提案されている。ここでは、SONET/SDH リング網との共通性から故障端切替を既定の切替方式とするが、故障切替方式をパス端切替に指定する事で、更なるスイッチ規模削減が成される事を明らかにした。故障端切替において予備パスはloop back し、接続ノードにおいて自リング内へとルーティングされる。すなわち、接続ノードのリング間用スイッチは、隣接リングへのスイッチ機能と自リングへのスイッチ機能を必要とする。パス端切替による故障復旧はリング毎に独立に行われるため、切替を行うノードは故障が起こったリングに属するパスの端点、すなわち始点または終点ノードと接続ノードとなる。この時、予備パスはloop back せずそのまま隣接リングに渡るため、リング間用スイッチは自リングへのスイッチ機能が不要となり規模が削減される。

ファイバ中の波長数96、波長群中の波長数4における、提案方式と従来方式とのスイッチ規模の比較を図21に示す。縦軸は 1×2 スイッチ要素数に換算したスイッチ規模、横軸はリング間トラフィック割合 α である。リング内トラフィックとリング間トラフィックが1対1、すなわち $\alpha = 0.5$ において、トラフィック処理の分離によりスイッチ規模が1/2以

下に大幅に削減される。また、他の規模削減方法を合わせて適用する事により、最大で1/3にまで規模削減が達成される事が解る。

	構成1	構成2	構成3	構成4
処理分離	✓	✓	✓	✓
階層処理		✓		✓
バス端切替			✓	✓
新たに必要となる機能素子		群合分波器 群スイッチ		群合分波器 群スイッチ
制約	リング間トラフィック割合 α を満たすこと			
プロテクション強度	リング毎の単一故障を補償		接続リング全体で単一故障を補償	

図20 スイッチ規模削減法

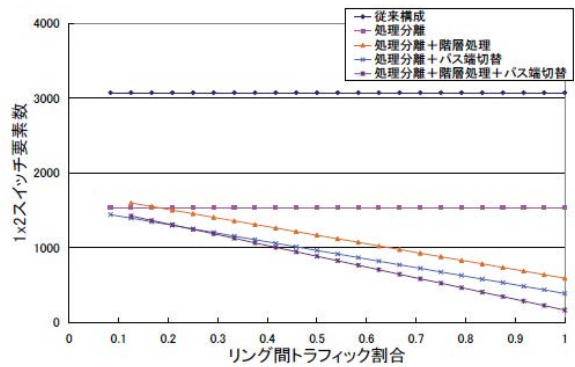


図21 スイッチ規模の比較

波長群を導入した複数接続 2-ファイバリングネットワークの性能評価

メトロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して、波長群の導入によりスイッチ規模を大幅に縮小できることを前節で述べた。その一方、波長群の導入により波長パスのブロッキング確率が上昇する。このトレードオフを定量的に評価する為に、整数線系計画問題（ILP: Integer Linear Programming)による定式化と性能評価を行った。今回、各種のパラメータを変化させ、スイッチ規模削減効果とルーティング能力低下のトレードオフを詳細に評価した。図 22 に示す様に、3リングを接続するノードにおいて、波長群の導入によるルーティング能力の僅かな低下（7.6 %）で、70 % 程度のスッチハードウェアを削減できることを初めて明らかにし、接続リングネットワークにおける波長群導入の有効性を実証した。比較に用いた単一レイヤと階層的な光クロスコネク ト構成を図 23 に示す。また、波長群幅とスイッチ規模削減効果の関係を図 24 に示す。図 24 より、重要なパラメータの一つである Add/Drop 率に関しては、その値が 1/2 で有れば（現用と予備が有るため、Add/Drop 率 1/2 は実質的に 100% 光パスがそのノードで終端出来ることを意味している）、波長群のバンド幅の増加に対するルーティング能力の低下は殆ど無いことが検証された。また、Add/drop 率が 1/3 の場合は、波長群幅が 8 程度で有ればルーティング能力の低下は 10% 程度以下に抑えられることが分った。

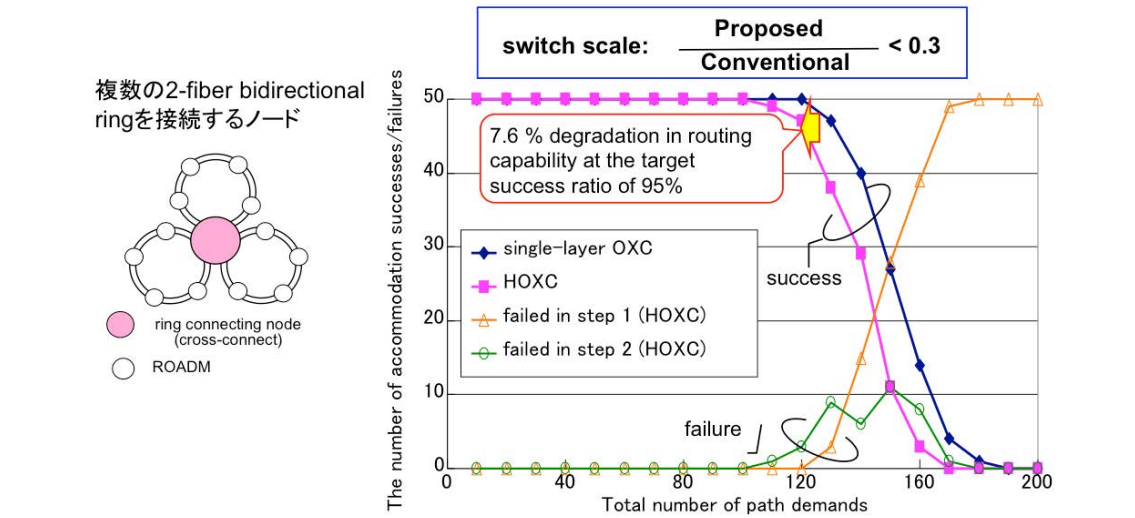


図 22 接続リングノードにおける波長群の導入によるルーティング能力の低下

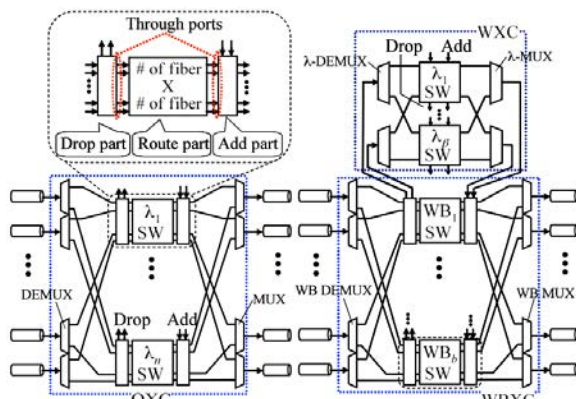


図 23 単一レイヤと階層的な光クロスコネクタ構成

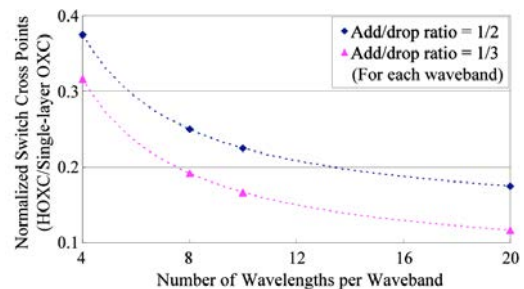


図 24 波長群幅とスイッチ規模

①-3 ラベルスイッチ並びに FCS ネットワーク実現法

FCS ネットワーク実現法

長い継続時間のバーストに対して高速光パス(回線)設定／解放手順を利用する Optical FCS(Fast Circuit Switching)を実現する為には、シグナリングの負荷を最小限にするアーキテクチャが必要となる。これは波長群クロスコネクタを導入する事により、光パス(回線)の途中のノードでの設定制御を不要とすることで解決出来る。このことを図 25 に説明する。波長群パスの導入により、波長パスに対するトンネルの実現が可能となる。

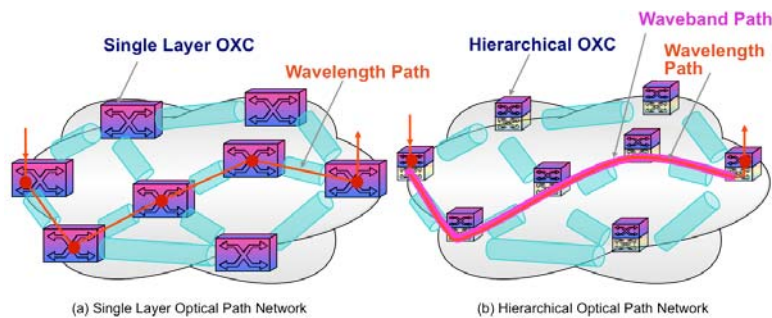


図 25 FCS における波長群クロスコネクタの機能

階層型光クロスコネクタを用いて構成されるFCSネットワークのパフォーマンスを評価する為の基本モデルを開発した。高精細映像配信、Grid-computing、レイヤ1光VPN等今後想定される大容量かつ高品質を要求される新たなサービスを収容していく上で、運用・管理・保守性に優れた全国網・地域網を統合したネットワークを実現する必要がある。本研究では、小規模なネットワーク(セグメント)同士を別の上位ネットワークで接続する、物理的な階層化構造を有するネットワークを提案しその性能を評価した。下位ネットワークにおいては波長パスを直接配置する一方で、セグメント間の通信が集約される上位ネットワークにおいては、波長パスを論理的に波長群パスに束ね一括伝達するアーキテクチャを用いた。本研究で想定する階層化ネットワークモデルを図26に示す。セグメント内に始点・終点ノードを持つ波長パス需要は、セグメント内でルーティングされ収容される。異なるセグメントに始点・終点ノードが含まれる波長パス需要は一旦各セグメントの中心ノードと始点・終点ノードを波長パスで接続し、上位レイヤにおいては2つの中心ノード間を直結するend-to-endの波長群パスに収容されて伝送される。本研究では経済性の観点よりセグメント内の光パスは波長変換を用いないが、中心ノードにおいて下位層・上位層間を移る際に波長変換を行い、波長経路割当を上位・下位ネットワーク毎に独立させる。各波長・波長

群毎にネットワークリソースの使用状況を考慮してリンクを重み付けし、ダイクストラ法を用いて最短経路を算出し、最小重みを達成する波長・波長群及び経路を選択する。

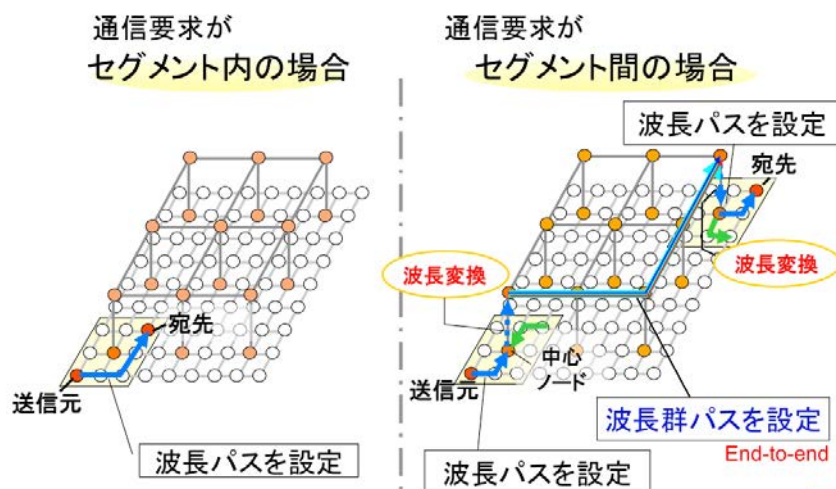


図 26 提案 FCS ネットワークにおける階層化ネットワークモデル

9x9=81 ノードで構成される正方格子型ネットワークにおいて、セグメント規模が3×3 ノード(9 セグメント)である階層型ネットワークと単一階層ネットワークのみとした場合の比較を行った。ファイバ一本当たりの容量は、下位層では最大波長パス数 64, 上位層の波長群パスは最大 8 本の波長パスを収容可能とした。まず均一なトラフィック分布の下で静的にパス配置を決定し、これを収容するのに必要十分なファイバ数を設定した。以上のネットワークを固定した上で、あらためて平均値が初期トラフィック分布と同一になる波長パス需要をポワソン分布に従い発生させ逐次波長パスの収容を行った。上位層のノード間距離は下位層のその 3 倍とした。提案手法のネットワークコストと、単一階層型のネットワークコストとの比を図 27 に示す。比較手法のネットワークコストを提案手法の静的設計時のネットワークコストと揃えた場合のブロッキング率を図 28 に示す。いずれの場合においても本研究の提案方式の有効性が確認された。

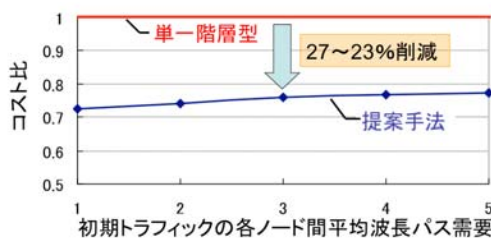


図 27 ネットワークコスト

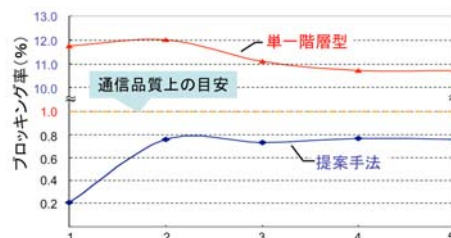


図 28 ブロッキング率

①-4 アダプティブ光ネットワークの設計法の開発

OBS ネットワークにおける効率的な光バッファ配置法

OBS (Optical Burst Switching) においてデータは光バーストとして、中継ノードで電気変換を経ることなく高速に転送される。使用経路および波長は転送時に逐次確保されるため、統計多重効果による通信路の利用率の向上が期待される。OBS では、同一リンク・波長で複数のバーストが同時に占有を試み、競合すると先行バースト以外はすべて破棄される (ブロッキング)。これを回避するための波長経路割当法(RWA)が研究されており、本研究では集中制御型OBSネットワークに対して、平均総ブロッキング時間に基づいた波長経路割当手法を提案し、さらに全リンクに光バッファが導入されたネットワークに対する提案手法の有効性を示した。また、バッファ数の削減の為に一部のリンクにのみ限定してバッファを配置す

る場合の配置法を提案した．トラフィック負荷が高いリンクにおいてブロッキングは頻発する．また，同リンクの各波長信号は光合分波器によりバッファを共有できる．そこで“仮想流量”に基づきトラフィック負荷を推定し，これを用いた光バッファ配置法を提案した．図29のパラメータの下で光バッファの効果を評価した．まず，バッファの配置によるブロッキング率低減効果を評価した．バッファ配置数は，総リンク数の半分である30 個とし，配置パターンは提案法の他にランダムに決定したものをを用いた．図30の結果より，平均ブロッキング率はバッファ配置パターンに大きく依存し，特にランダム配置では，半数のリンクに具備してもほとんど効果が表れないことが明らかになった．平均リンク占有率が0.05 のときのバッファ配置数に対するブロッキング率を評価した．結果を図31に示す．バッファ配置法として提案法を用いた場合，ある程度以上（本例では30-40程度）の導入数で高い効果を得られることを明らかにした．

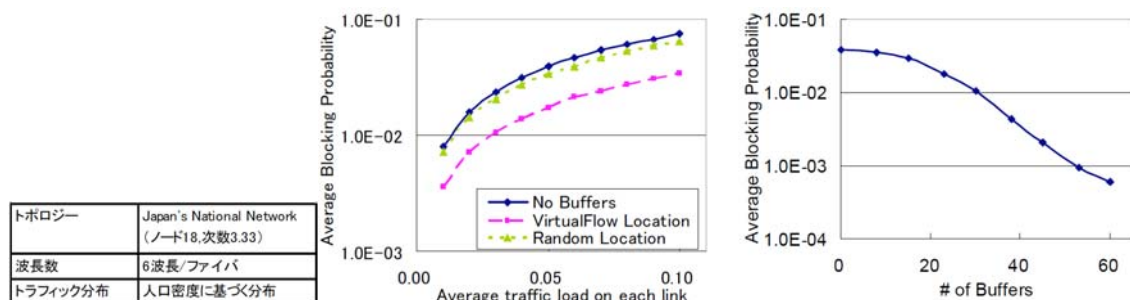


図29 実験パラメータ 図30 光バッファ配置パターンの評価 図31 光バッファ数とブロッキング率

①-5 ②-5 ネットワーク実験(3機関共同)

本項は，②-5 に纏めて記載する．

(2)研究成果の今後期待される効果

ICT の使用フェーズにおける消費電力のフットプリントについては各種の試算が有るが先進国では5-8%程度と見積もられている．日本においては2012年のICTの電力消費は570億kWhと予測され，その中で通信ネットワーク関連は約50%程度，全消費電力の約3%を占めると見積もられている．一方，ICTによる全エネルギー消費量削減効果は日本では2012年度に5%程度，2025年で約10%程度との試算も有る．即ちICT技術の進展が社会全体のエネルギー消費量の削減に大きく貢献する事が認識されている．一方，世界的に年率50%程度の継続的なトラフィックの増大が今後も続くとは仮定すると，ネットワークが消費するエネルギーも将来的に指数関数的に増加する．現状，ネットワークの消費電力の大半はアクセス系で消費されており，アクセス系では今後のブロードバンド加入者数の増加により消費電力の増加が考えられるが，実際は現行のxDSLからFTTxへ徐々に移行することによる大幅な消費電力の削減効果に相殺され，加入者系全体での消費電力はほぼ一定と見積もられている．ここで重要なポイントは，アクセス系に比べて将来はバックボーンとアグリゲーション（トラフィック集約）におけるレイヤ3/レイヤ2の転送機器（IPルータ/Ethernetスイッチ）による消費電力が大幅に増大することである．これに関する評価は各機関で行われており，メルボルン大学のJ. Baligaらの試算によると，現状の技術を用いた場合にアクセス速度10Mb/sで世界の人口の1/3がインターネットを利用するとその消費電力（大半がルータ部分）は現在の世界の総発電量の約6割に達すると見積もられている．日本においてもこのままトラフィックが増加し続けた場合，2020年までLSIの駆動電圧の低下が継続し，その時点での駆動電圧を0.8V，それ以降の低下を困難と仮定した場合，2035年にはルータの総消費電力が，2007年の日本の総発電量に達するという試算が産業技術総合研究所より示されている．即ち，今後も世界的に普及が拡大すると考えられるブロードバンドインターネットによる通信トラフィックの増加は，人口の増加，交通量の増加，その他の社会的な各種の拡大要因

のなかでも増加率が抜kindでており、現情では通信ネットワークが消費する電力は数パーセントであるものの、将来的には極めて大きな割合となり、言い換えれば抜本的な低消費電力化技術を導入しない限り、インターネットの規模拡大は将来的に限界に達すると考えられる。

この問題を解決することが本研究の目的であった。ルータの消費電力はそのアーキテクチャに依存するが、電源のロス並びに冷却に要するパワー（これは他が削減されれば自動的に小さくなる）を除けば、IP パケットのルーティング処理に必要な電力が全体の半分以上を占めている。このような状況で、ルータのコストと消費電力の観点から、ルータを低位レイヤの転送によりカットスルー（通過）する方式の導入が重要であり、現在、電気レイヤのパス（L2 スイッチや L1 の ODU(Optical Data Unit) クロスコネクタ等による）によりカットスルーする方式がコア/メトロネットワークにおいて導入され始めている。本研究では、L1 でのカットスルー技術として電気レイヤよりも 1 桁から 2 桁程度電力効率の良い光レイヤでの転送を実現する技術を開発した。さらにトラフィックのダイナミックな変動への適用を可能とするために、光パスの高速スイッチング技術（高速光パス/光回線交換）も併せて開発した。特にこれらを効率的に実現するキー技術として、現在の光パスレイヤ技術を進展させた、光パスを複数束ねてルーティングする波長群を導入した光パスレイヤ機能の拡張が有効であることを明らかにし、ネットワークアーキテクチャ、収容設計技術、ノードハードウェアなどに関する技術開発を世界に先駆けて行った。

本 CREST で取組んだ研究課題は、Green IT の重要性が世界的に広く認識される時代に先駆けて設定され、我々のチームがそれに参画できたことにより、世界をリードする技術開発が数多く達成できたと考えている。本研究課題に関する特許出願は国際特許 2 件を含め、18 件である。また、国際会議/国際ワークショップでのプレナリ/キーノート講演 6 件を含め、国際会議/国際ワークショップでの招待講演は 20 件を超える。ルータを中心とするレイヤ 3 の技術では米国主導であったが、日本の強みである光技術を最大限に利用し、本研究で得られた成果を今後さらに発展させることにより、CREST で開発した技術は将来“a game changer”となりうるものと考えている。引き続き研究開発により、科学技術並びに社会への波及効果は極めて大きいものと確信している。

4.2 超低消費電力光ネットワーク構成技術(NTT フォトニクス研究所グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究テーマでは、石英系ガラス光導波路を用いた平面光波回路(planar lightwave circuit, 以後PLCと略す)を用いて、低消費電力な光ネットワークを構築するのに必要なデバイスの研究を推進した。具体的には、

- ・フレキシブル光クロスコネクタノード開発(②-1)
- ・非対称波長ルーティング装置の開発(②-2)
- ・光ラベル処理装置の開発(②-3)
- ・アダプティブネットワークインターフェイスの開発(②-4)

の4項目である。以下、項目別に研究実施内容とその成果を説明する。また、3 機関で共同で行った

- ・ネットワーク実験 (②-5:3機関共同)

についても本項で説明する。

②-1:フレキシブル光クロスコネクタノード開発

本研究では、①-1に記載の「フレキシブル光クロスコネクタノード」を実際に試作しその動作検証実験を行うため、種々の PLC デバイスの考案、設計、評価、また、最終的に部品を集約しノードシステム装置を完成させた。なお、ノード内構成などの基本部分は名古屋大学、PLC デバイスの作製は NTT エレクトロニクスが担当し、3組織が連携して進めたものである。以下、具体的に項目別に説明する。

(i)全体概要

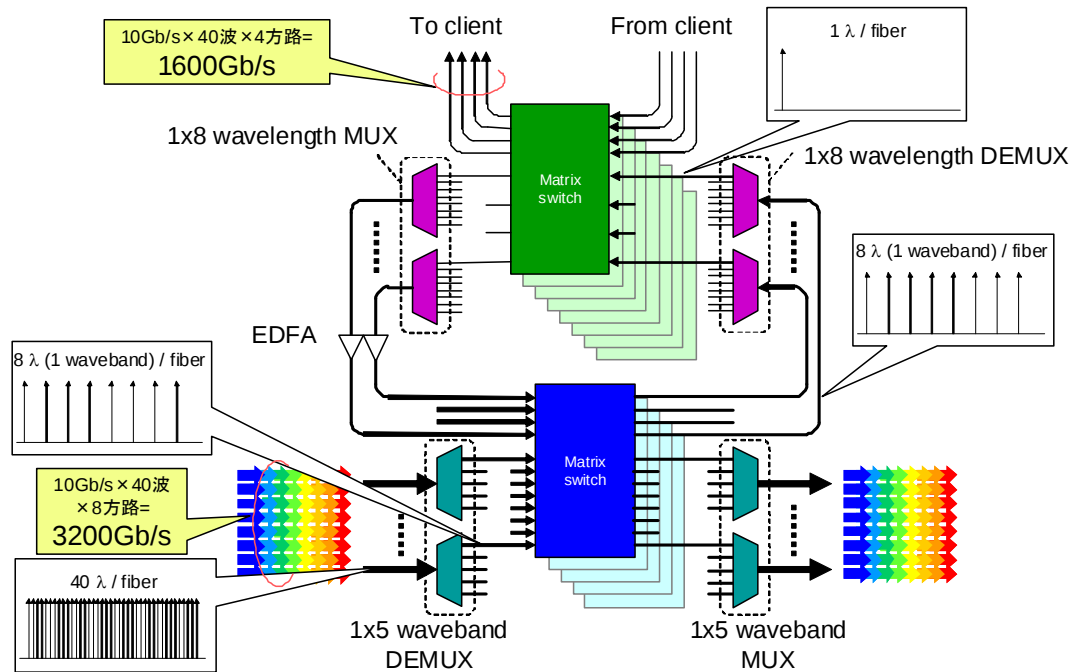


図 32 試作した多階層光クロスコネクタ装置の構成

図 32 に光クロスコネクタ装置の全体構成を示す。①-1で説明したように、本ノードは複数の方路からの波長多重信号を波長群に分割し波長群ごとの行き先の方路を切り替える波長群クロスコネクタスイッチ部と、特定の波長群内の特定の波長を送受信器に導くための波長クロスコネクタ部からなる多階層型クロスコネクタである。図上半分が波長クロスコネクタ部で、図下半分が波長群クロスコネクタ部である。波長クロスコネクタ部は波長群を複数の波長に分離する AWG (arrayed-waveguide grating: アレイ導波路回折格子) 型の光分波器、分離後の波長を切り替えるためのマトリックススイッチ、方路を入れ替えたのち、複数の波長を波長群にまとめるための AWG 型波長合波器からなる。また、波長群クロスコネクタ部では、各方路から来た波長多重信号を複数の波長群に分離する AWG 型波長群分波器、波長群ごとに方路を切り替えるマトリックススイッチ、複数の波長群を束ねて伝送路に送り出すための AWG 型波長群合波器からなる。実際に設計・作製した装置では、方路数8、1方路あたりの多重波長数40、波長群クロスコネクタから波長クロスコネクタに移行可能な波長数は 160 である。1波長あたりの伝送速度を 10Gb/s とした場合、入出力の総信号容量は 40 波長 $\times$ 8 方路 $\times$ 10Gb/s = 3200Gb/s、波長クロスコネクタ部での総信号容量は、10Gb/s $\times$ 160 = 1600Gb/s であり、システム全体のスループットは 4800Gb/s となっている。

(ii)波長群合分波器

本システムでは①-1で説明した分散配置型の波長群を利用しており、本合分波器では、40 波の波長多重信号を、図 33 のように分波(信号が左から右)、合波(右から左)する機能を有するものである。この機能の実現に当たっては AWG の周回性を用い、波長(周波数)間隔が 100GHz、FSR (free spectral range、AWG の周期のこと)が 500GHz に専用設計された AWG を開発した。AWG の波長と FSR は導波路材料である石英ガラスの屈折率で一意に決まるが、本デバイスの研究では、波長を ITU グリッドに合わせつつ、FSR を 500GHz に誤差なく合わせるために、導波路幅を変化させる特殊な設計手法を用いた。これにより、40 波すべての波長の通過中心波長が、ITU グリッドに合うようになっている。

図 32 に記載した様に、試作した多階層クロスコネクタ装置では、波長群合分波器が 8 方路 $\times$ 2 (合波と分波ペア) = 16 台必要であるが、PLC 技術の特徴である集積性を生かし、4 つの AWG 波長群合分波回路を1つのチップに集積化した。モジュール化後にボードに搭載した集積化波長群

合分波器の写真を図 33 に示す。

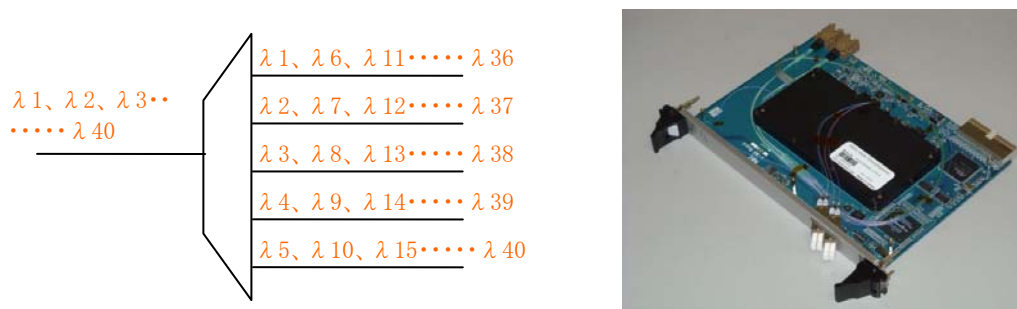


図 33 分散配置型波長群合分波器の動作と実装後の写真

(iii)波長合分波器

波長群クロスコネクタ部から送られてくる波長群信号を分波、あるいは、合波するためにここでも AWG を用いた。AWG の波長間隔は群中の波長間隔 500GHz に等しく、出力ポート数は 8 である。この値の合分波特性を有する AWG は、通常の 100GHz 間隔、40ch の AWG と比較すると非常に小さい。図 32 で示すようにこのシステムでは、1 波長群あたり 4 つの合波器と 4 つの分波器が必要であるので、AWG が小さいことを生かし、1 つのチップに 8 つの AWG と集積して、1 波長群を 1 台で処理するように設計してあるのが特徴である。また、波長間隔が 500GHz と広い温度変動による AWG の波長変化も無視できるため、通常必要とされる温調素子が不要で、消費電力はゼロである。

(iv)波長群クロスコネクタ用マトリクススイッチ

図 32 で示すように、波長群クロスコネクタ部では、8 方路からの波長群信号を相互に入れ替えるとともに、4 方路を波長クロスコネクタ部に接続するため、12×12 のマトリクススイッチが必要である。PLC 技術を用いたマトリクススイッチはすでに開発されていたので、本研究では、特殊な仕様である 12×12 への変更を行いボード実装を行った。

(v)波長クロスコネクタ用マトリクススイッチ

波長クロスコネクタ部では、4 方路間の入れ替えに加え、クライアント装置接続機能が必要であるため、アドドロップポート付の 4×4 マトリクススイッチを作製した(4.3、③-1 で詳細を記載)。
※なお、この多階層クロスコネクタ装置の特性評価およびデモ実験は②-5 で説明する。

②-2: 非対称波長ルーティング装置の開発

ローカルエリアネットワークに光伝送を取り入れ、ノード間での相互接続を実現する形態として、N×N 型の AWG を用いた波長ルーティングネットワークが知られている。これは AWG の波長分波出力ポートが、入力ポートごとにシフトする性質を利用したものであり、N 個のノードを N 波長で相互(フルメッシュ)に接続することが可能である(図 34)。しかも、光信号の行き先を決める AWG は単なる光学部品であり、温度安定化のための数ワットの電力を除けばルーティング機能の消費電力はゼロである。しかしながら、よく知られた電気の IP ルータのように動的に信号の行き先や信号容量を変えられないため、単なる多地点間の接続が可能な光伝送路インフラとして用いられることはあっても、ルーティングネットワークには適用されていなかった。

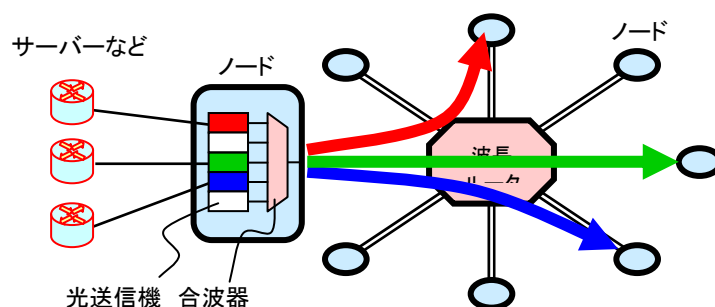


図 34 波長ルーティングを用いた LAN システムの概略図

本研究では、この波長ルーティングシステムの自由度を向上させることで、(粒度は低い) IP ルータのように信号ごとに行き先や容量を選べる形態を実現し、LAN 用ネットワークに適用されることを目指した。具体的には、

- (i) 通過帯域幅が方路によって異なる AWG 波長ルーティング
- (ii) 方路ごとに異なる数の波長チャンネルを割り当てることで、方路ごとに総合帯域幅が異なる AWG 波長ルーティング
- (iii) AWG の周回性に工夫をして光源波長を変えると行き先や容量が変わる AWG 波長ルーティング

の3つを検討した。以下、順に説明する。

(i) 通過帯域幅が方路によって異なる AWG 波長ルーティング

AWG は分光素子の一種であり、その受光部(出力導波路)の幅が通過帯域幅を決定する。そこで、図 35 に示すように、出力導波路の幅を出力ポートごとに異なる値にすることで、出力ポートごとに異なる通過帯域幅を有する機能を目指した。また、単純に導波路幅を拡大するとスペクトルが歪むので、幅の大きな導波路開口部から、通常の導波路幅に至るまでの部分の幅の変化に工夫をしてスペクトル形状の歪を低減させた。

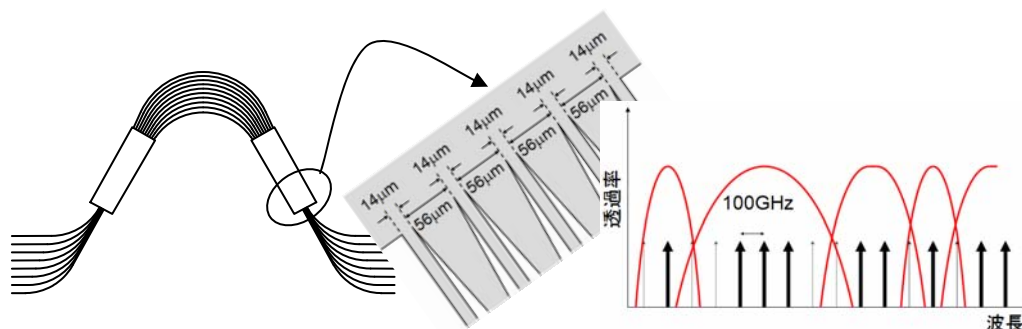


図 35 不均一帯域 AWG (右から、全体、導波路拡大、スペクトル)

(ii) 波長チャンネル割り当て数が可変な AWG 波長ルーティング

方路ごとに複数の波長チャンネルを割り当てて、波長割り当て数を変えることで、方路ごとの帯域幅を変化させる方法を提案した。図 36 に示すように、2つの AWG で1つの波長ルーティングとしている。8つの入力ポートからの波長多重光は第1AWG で分波されるが、方路ごとに入力位置が異なるため、出力ポートがずれている。出力ポートは第2AWGの入力に接続されているので、第1と第2のAWGを結ぶ導波路中に光スイッチを配置し、接続ポートを変えることで、第2AWGの出力ポートからの波長が変化する。図中にあるスペクトルは実験値であり、途中にあるスイッチの接続パターンを変えることで、各出力から得られる通過波長数に変化していることが確認できた。(スイッチ接続パターンと得られる波長割り当てパターンの詳細は文献に記載)。

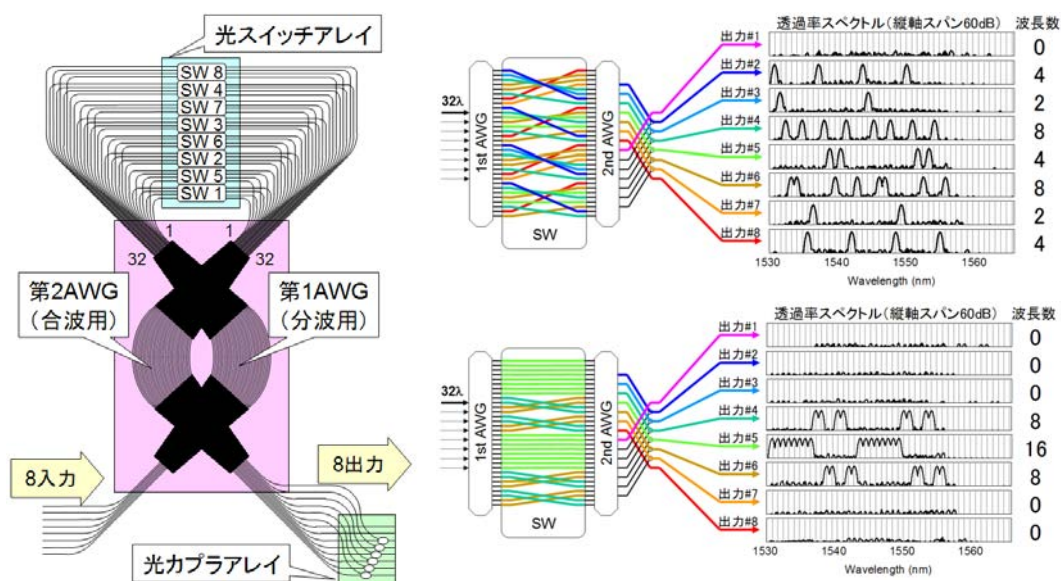


図 36 割り当て波長数可変な AWG 波長ルータ（構成と 2 つの波長割当て例）

(iii) 光源波長に応じ行き先や容量が変わる AWG 波長ルータ

ノード内に配置される複数の送信器からの信号を合波する合波器、およびネットワークの中央に配置される波長ルータに、周回性を有する AWG を用い、各方路ごとに複数波長を割り当てる波長ルーティングネットワークを考える (図 37)。合波器の周期と波長ルータの周期が互いに素となる整数 ((図では合波器が 5、ルータが 8) に設定することで、図に示すように、ノード 1 からの信号 (たとえば、赤字の波長番号 1,6,11,16,21,26,31,36) が重複することなく、ルータの異なるポートから出力されるという規則を見出した。たとえば、ノード 1 の第一送信機の波長が λ_6 の場合は、ノード 6 に伝送され、 λ_{11} の場合はノード 3 に伝送される。この周期性は送信ノードが 2~8 の場合も同様であるが、波長が 1 つづシフトしており、異なる送信ノードから同じ波長の光が重複して 1 つのルータ出力にできることはなく、問題なく使用できることを確認している。

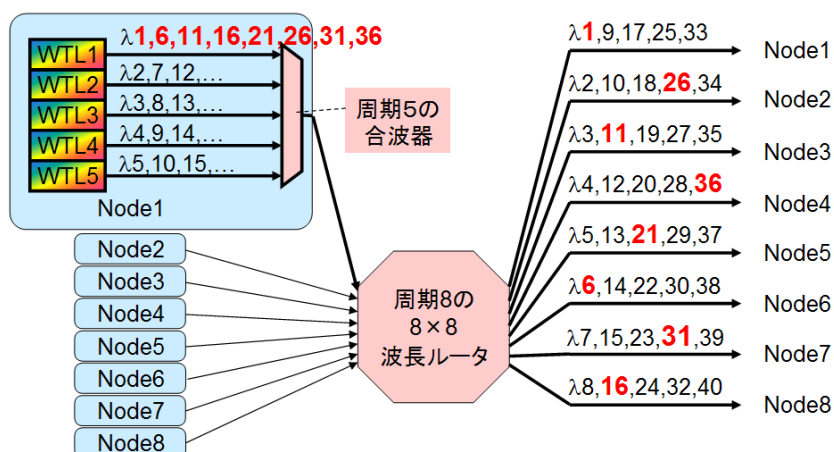


図 37 互いに素な周回性 AWG を用いた動的割り当て可変波長ルーティング NW

②-3: 光ラベル処理装置の開発

光通信網のアクセス系において低消費電力化を実現するに当たり、本研究では、パッシブ型のデバイスによる光信号のユーザ振り分けが重要と考えた。図 38 に示すように、現在、商用光アクセス系においては、時分割多重方式で複数のユーザ間で1つの光信号を共有している。そのため、例えば1ユーザあたりの平均伝送速度を1Gbps、ユーザ数32とした場合、32Gbpsで動作する光送受信器や周辺の電子回路が必要になる。電子回路の高速化は消費電力増加につながるため、将来の超高速アクセス系の実現には、異なるアプローチが必要となる。そこで、CDMA(code division multiple access)を光領域で実現する研究を進めた。

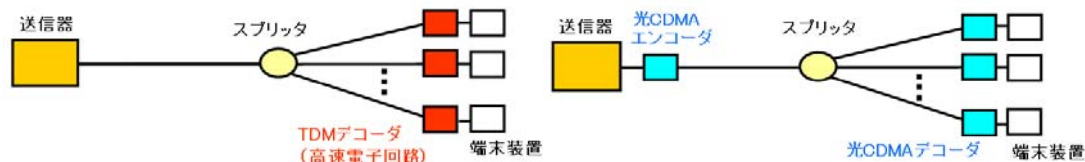


図 38 複数ユーザへのアクセス方法（左：時分割多重方式、右：CDMA 方式）

CDMA としては、波長領域あるいは時間領域によるコード化が知られているが、本研究では、直交するコード数(=ユーザ数)を多く取れる波長と時間の両方の領域でコード化する手法を採用した。

図 39 にその構成を示す。広帯域(短パルス)の信号を AWG で周波数領域に分割し、可変遅延線アレイで、周波数ごとの遅延時間を異なる値にして、パルスを時間軸上で散逸させ CDM 信号とする。可変遅延線はマッハツェンダー干渉計型光スイッチ間に長さの異なる2本の導波路を配置した構成で、スイッチを切り替えることで遅延時間をデジタルに調整可能である。これを PLC 技術で

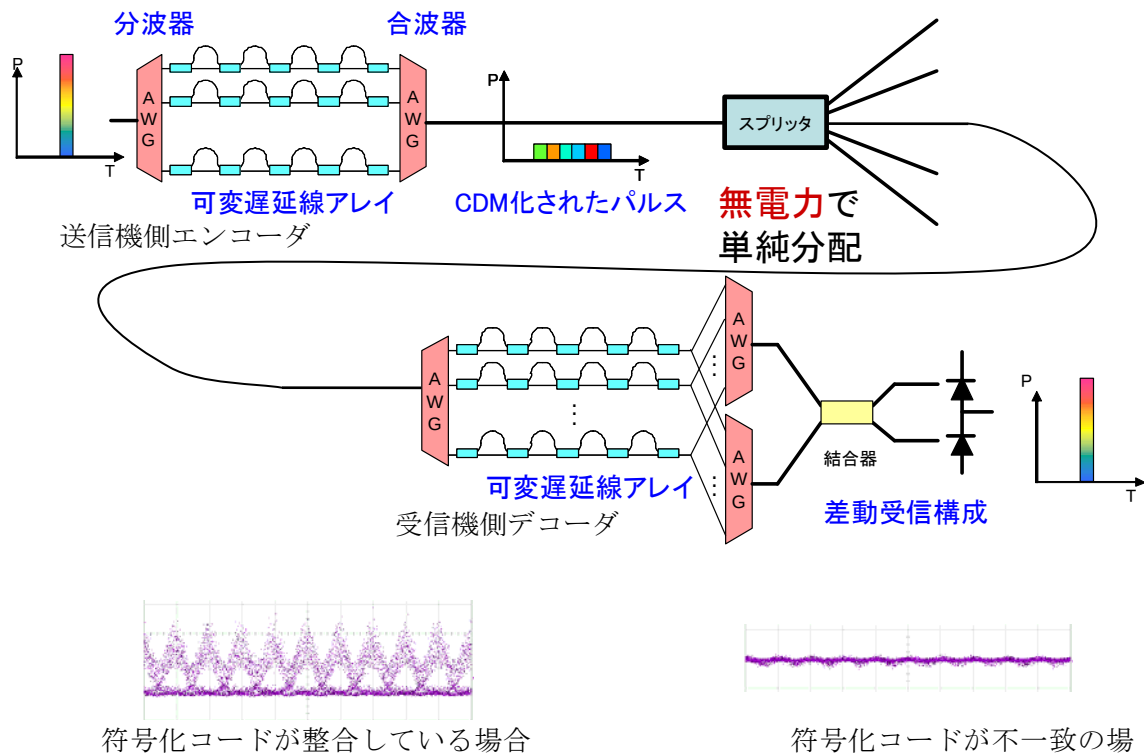


図 39 本研究で提案した CDMA 方式の構成と受信アイパターン

用いて、2つのAWGと一緒に1チップに集積化した。CDM符号化されたパルスはスプリッタで複数のユーザに振り分けられる。送信時の可変遅延線のパターンを知っているユーザは受信機内の可変遅延線を適切に設定することで、元のパルスを復元できる。一方、パターン設定が異なる受信機では散逸されたパルスは復元せず受信できない。

複数のユーザへの同時サービスを行うには図39の送信機およびエンコーダを複数用意しその光を混ぜて送信する。したがって、受信側では、復元されるパルス以外の信号も混ざっており、それは散逸したままであり、受信段でノイズとなる。この欠点を克服するため、差動受信方式を考案した。可変遅延線からの出力を2系統に分け差動受信することで、散逸した他者の信号はキャンセルされ、目的の信号のパルスのみが出現する。図中に、実際に測定したアイパターンを示す。コードが一致している場合のみ受信できていることが確認できた。

②-4: アダプティブネットワークインターフェースの開発

この研究項目では、光クロスコネクタや波長ルーティングネットワークなど種々の光通信ネットワークにおいて、波長を変えてバースト的に送信する機会が多いことを考え、無信号時間での消光特性を上げる検討を行った。通常は入力データ信号を変調器駆動回路に直接入力するが、本検討では、データがゼロが続く場合に光源側の電源を落とす方法を採用した。データを送信する場合には当然電源をオンする必要があるが、そのタイミング等を含め、入力信号に応じて、光源電源回路と変調器駆動回路を適切に連携させる回路により実現した。この光源は本受託研究における他の実験に使用した。

②-5: ネットワーク実験 (3機関共同)

本研究テーマでは、①-1、②-1、③-1 の成果を統合する形で、3機関が連携して、多階層光クロスコネクタの動作確認をするための伝送実験を行った。図40は試作したクロスコネクタ装置の外観写真である(内部構成は図32)。19インチの標準的なラックに各種光部品を搭載したボードが収容されている。ボード間の光接続には、多芯光コネクタおよびファイバ配線板からなる光バックプレーン技術を適用し図32に示す非常に複雑なファイバ配線を装置裏側でコンパクトに行っている。空きスロットには方路数、波長数の追加に応じて、AWG波長群合分波器ボードと、波長群クロスコネクタ用マトリクススイッチを挿入できる設計となっている。

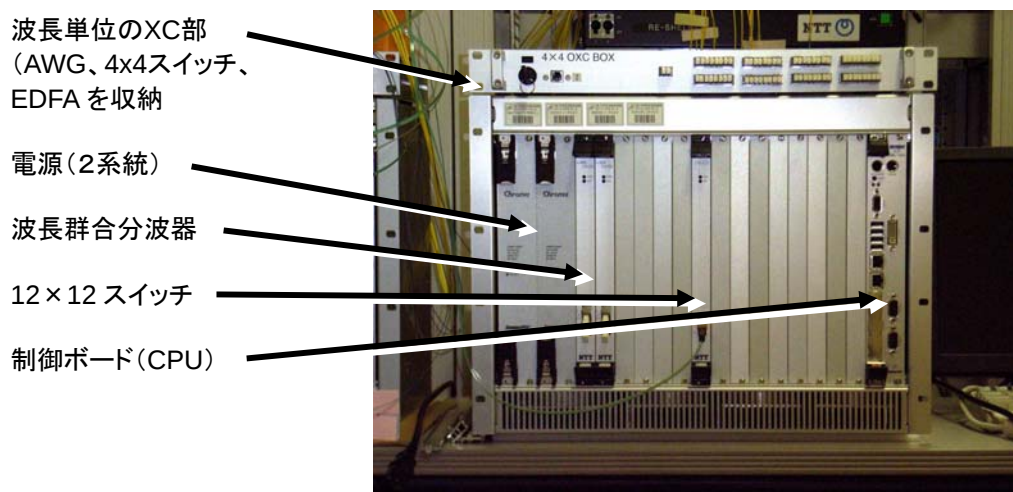


図40 試作した多階層光クロスコネクタ装置の外観写真

図41は、試作した装置(2台)をネットワークにおける2つのノードに見立てて、光信号の配信先を瞬時に切り替えるデモ実験の構成図である。送信ノードではHDビデオカメラからの映像信号を光デジタル信号に変換し、ダミーの波長多重信号に混ぜて送信した。途中のノードに映像を配信しない場合には波長群スイッチを通過状態とし、該当ノードに映像を配信する場合には、波長群スイ

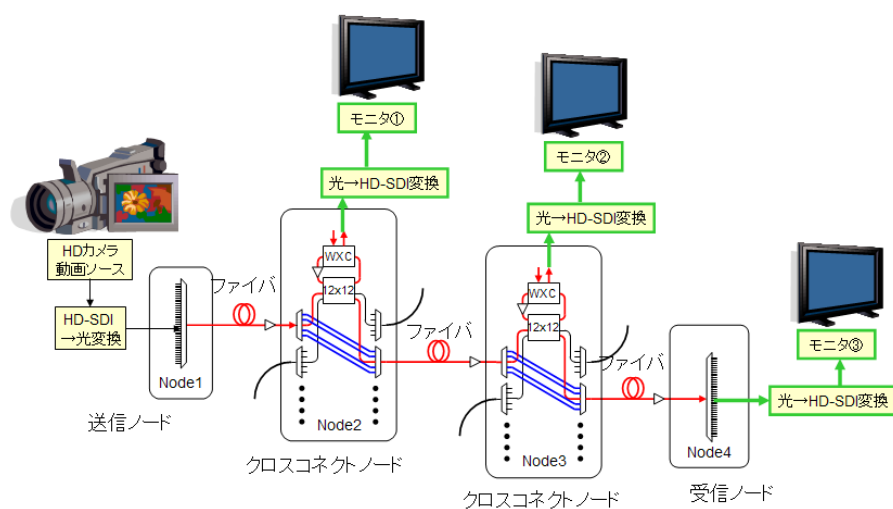


図 41 映像配信デモ実験の構成

ッチを波長クロスコネクタ部(図中の WXC)に送るよう切り替え、波長クロスコネクタ部では、この映像信号のみを取り出す状態にスイッチを切り替える。3台の受信器およびモニタを準備し、実際に切り替えを行い、どのモニタにおいても良好な映像配信を確認することができた。

次に伝送特性を定量的に評価するため、NTT 横須賀研究開発センタに試作した装置を設置し、センタと NTT 横須賀局との間(片道 8.8km)に敷設されたファイバを用いて、商用システムを模した状況で伝送試験を行った(図 42 参照)。また、送信ノードとノード 2 の間には 20km のファイバを設置した。したがって、最長ルート(ノード1→ノード4)では 55km の伝送距離である。

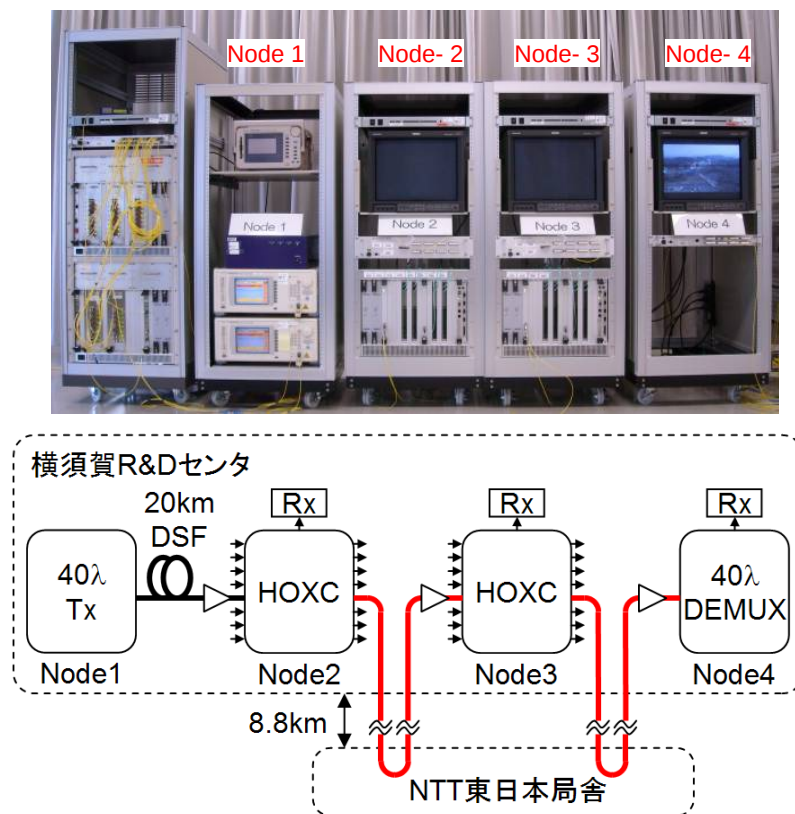


図 42 伝送実験時の装置写真と、実験伝送系の模式図

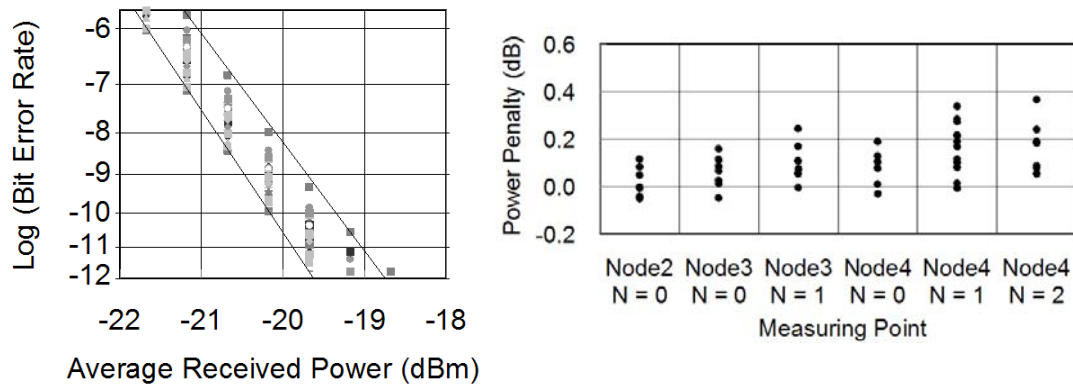


図 43 ノード通過後の誤り率とパワーペナルティの測定結果

図 43 に誤り率の測定結果を示す。なお、伝送信号は 10Gb/s (OC-192, PRBS²³¹-1) である。-20dBm の受信レベルにおいて 10^{-9} の誤り率が得られており、これは実験に使用した送受信器の標準的な値である。誤り率の結果から、ノード通過数とパワーペナルティの関係を図 43 の右図にプロットした。図中の N は多階層クロスコネク装置内において、波長群クロスコネク部から波長クロスコネク部に送られた回数であり、多いほど信号が劣化する。N=2 で、一番遠い第 4 ノードにおいてペナルティは約 0.4dB であり、伝送特性に問題のないことが確認された。

②-1' (追加項目): 小規模光クロスコネクノード開発

②-1 の多階層クロスコネク装置の開発は、コアネットワークなど方路数 N が大きいノードにおいて、波長群を導入することで装置規模を大幅に縮小し、クロスコネク装置の実現を図ったものである。装置において最も重要なマトリクススイッチ部のサイズは、N の自乗に比例するため、N が小さな小規模ネットワークに限れば、多階層化が不要な可能性がある。そこで、N が小さい場合 (N=4)

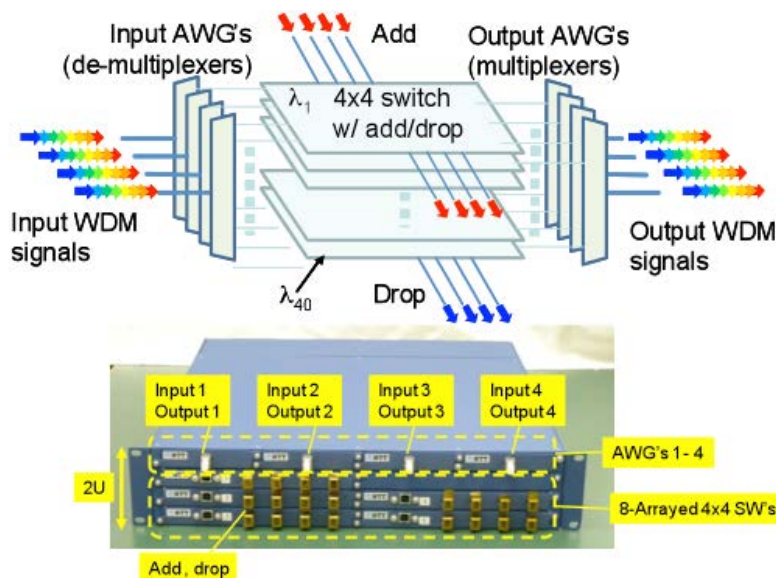


図 44 小規模クロスコネクの構成図と実装形態外観

について、1階層のクロスコネク装置を作製し評価を行った。図 44 にその構成図を示す。4方路からの波長多重信号は AWG によって分波され、波長ごとに 4×4 マトリクススイッチにより方路の入れ替えを行う。スイッチからの出力は 4 つの AWG によって合波され伝送路に送り出される。ここで用いたマトリクススイッチは③-1 のものと同一で、クライアント用のアドドロップポートも装備している。図中下の写真はこれらの PLC デバイスを 19 インチ幅のケースに収納して駆動回路等を含め装置

化したものである。動作確認および特性評価のための実験を行い、4 方路間の信号入れ替え動作を確認し、また小型スイッチを多数集積化したことによるチップ内クロストークなど懸念された問題はなく、想定通りの特性が得られた。

(2)研究成果の今後期待される効果

名古屋大学グループの報告にあるように光クロスコネクを用いた光ネットワークは電気ルータの規模およびその前後で用いられる光送受信器数を軽減することを通じてネットワーク全体の消費電力が劇的に小さい特徴を有している。クロスコネクトノード装置の実現可能性については、従来、空間光学系(鏡、レンズ等)を用いた技術でも論理上実現可能ではあったが、量産性、機械的安定性などの点で、実用的なサイズで実現することが難しかった。今回、PLC デバイスを用いて試作機を完成させその動作検証に成功したことは、PLC 技術の特徴である素子の集積性がこの装置に有用であることを確認しただけでなく、近い将来、光ネットワーク全体の消費電力を劇的に低減できる技術を世の中に提供できるという点で、社会全体から期待されるものと思われる。さらに、波長ルーティングもクロスコネクと同様の理由で、LAN の低消費電力化に貢献できる。また、CDMA は構成が複雑であるが、PLC 技術を用いれば実現が可能であることを示した。この研究で試作した PLC チップは過去最大級の集積度を有する集積光回路であり、CDMA の検証にとどまらず、高機能・省電力な大規模光回路の研究の先駆けとして、新たな研究を創出するような波及効果が期待できる。

PLC デバイス、例えば AWG 波長合分波器やスイッチは、90 年代後半に実用化され、現在多数の商用システムで使用されており、その製造技術はすでに確立されている。近い将来、クロスコネクが導入される際には問題なくデバイスを供給できる状況にあり、本研究成果は、通信インフラの大容量化を低電力で実現するのに直接貢献できると思われる。

4. 3 超低消費電力光ルーティングネットワーク用 PLC 光デバイス (NTT エレクトロニクス・グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

③ 光ルーティング用専用光デバイスの開発

本グループでは、新しいネットワークアーキテクチャやノード構成の適用により抜本的な低消費電力化を図る超低消費電力光ルーティングネットワークシステムの実現を目指し、それらのシステムに必要な専用光デバイスを他グループと密接な連携を取りながら、高性能・高機能で量産性や信頼性に優れ実用化が最も進んでいる石英系 PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術を駆使して実現してきた。小型・省スペース化による高効率化を図るために全てのデバイスにおいて高集積化を図ると共に、AWG の温度無依存化技術や新たに考案したスイッチ素子数を削減する光スイッチ構成の適用など、様々な低消費電力化を図る技術や工夫を取り入れた (③-1、③-2 に対応)。

一方、光デバイス自身の低消費電力化も重要な課題であり、PLC 回路で唯一電力を消費している PLC 型光スイッチの消費電力を 1/100 に削減するという極めて高い目標を掲げ、超低消費電力基盤技術の開発を進めた。PLC スwitchの構造や材質を見直すとともに、その形状を実現するための極限的な加工技術を適用し 1/8 の低消費電力化を達成した。しかし、加工技術の観点からそれ以上の改善が望めないことが明らかになったため、新たな試みとして、低損失な石英系 PLC 導波路と電気光学効果を利用するニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 導波路を組み合わせた光スイッチの開発を進めた (電圧駆動のためデバイスでの消費電力はゼロ)。異種材料を集積するための作製技術を開発すると共に、駆動回路の構成やそれに搭載する電子デバイスの検討を進め、駆動回路を含めた消費電力で 1/100 以下の超低消費電力化に成功した (③-3 に対応)。

③-1 フレキシブル光クロスコネクトノード用光デバイス開発

本委託研究の中で最重要研究テーマである“階層化波長群クロスコネクトノード”システ

ム（階層は波長群クロスコネク層（WBXC 層）と波長クロスコネク（WXC）層の二階層構成）の研究開発を他のグループと連携して進め、本システムの有用性を実証するためのフィールド実験装置（図 40 参照）や接続リングノード装置（図 13 参照）などに必要不可欠な光デバイスを実現した。試作した光モジュールは、9 種類 26 台、基礎データ取得用の光回路チップは 15 種類にのぼる。

WBXC 用光デバイス

波長群クロスコネク層（WBXC 層）には、システムの基幹部品であり波長群を生成する波長群合分波器と波長群をルーティングするマトリクススイッチが必要である。波長群合分波器は 2 種類の波長配置（①-1 参照）に対応した回路をそれぞれ実現した。連続配置型としては 100GHz40 波を 8 群として扱う 1x5WB 合分波器を 6 回路一体集積するために 100GHz90 x 90 規模の大規模 AWG フィルタを最適設計し、2 回路を 1 チップ上で接続することで 6 連 1x5WB 合分波器（図 6、図 7 参照）を実現した。一方、分散配置型では AWG が有する周回性を利用することで波長群の生成を実現しており、100GHz1x5 周回性 AWG を 4 回路一体集積した 4 連 1x5 波長合分波器を試作した。また、WBXC 層のルーティング用光スイッチには、小型で、且つ挿入損失の均一化を図った圧縮 PI-LOSS（Compact Path Independent LOSS: CPL）構成を有する 8x8 及び 16x16 マトリクススイッチを適用した。

WXC 用光デバイス

波長クロスコネク（WXC）層には、波長群を波長として扱うための波長合分波フィルタと各波長をルーティングするためのマトリクススイッチ、そして各波長をアドドロップするための 1x2 もしくは 2x2 スイッチが必要である。波長合分波フィルタは、連続配置用に 100GHz1x8AWG、分散配置用に波長間隔 500GHz の 1x8AWG を 8 個一体集積し、更にチップの温度を制御する必要のないアサーマル化技術を取り入れ、小型集積化と低消費電力化を図った。

一方、光スイッチは波長ルーティング用のマトリクススイッチに加えマトリクススイッチの各入出力ポートにそれぞれアドドロップ用のスイッチが必要であるが、スイッチ素子数やモジュール数が多くなるためスイッチの消費電力に加え、実装スペースの確保も課題であった。そこで、図 45 に示すように、マトリクススイッチに新たに入出力ポートを付加することでスイッチ素子数を増加させることなくアドドロップ機能とクロスコネク機能

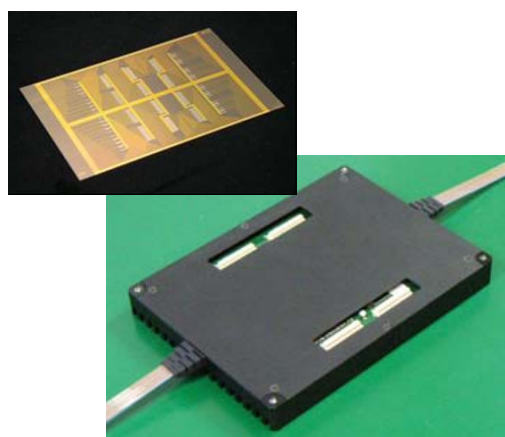
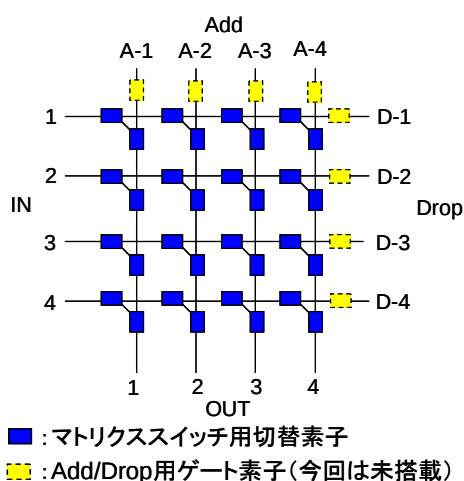


図 45 アドドロップ機能を有した CPL4x4 マトリクススイッチ

を併せ持ったマトリクススイッチ構成を考案した（Aは add ポート、Dは drop ポート）。実際の回路設計においては圧縮 PI-LOSS レイアウトを採用して回路面積を縮小し、8 つのマトリクススイッチを 1 チップに集積し、小型化で省電力なスイッチを実現した。

モノリシック集積 WBSS 回路

前記にある通り、波長群クロスコネクタノードは、各デバイスを高集積化することで非常にコンパクトな装置を実現した（図 40 参照）。一方、更なる小型・大容量化を実現するためには、よりいっそうの高集積化が必要であり、究極的には全ての機能を 1 チップに一体集積することが理想である。多くの時間を割いてきた専用デバイスの開発が、装置開発に先立って 2008 年度には完了し革新的な技術開発に挑戦出来る環境が整ったことから、WBXC 機能を一体集積したモノリシック WBSS (Wave-band Selective Switch) 回路の試作に挑戦した。2008 年度には、図 46 にある通り 100GHz1x5 周回性 AWG を 6 個と 1x5 光スイッチを 5 個一体集積した 100GHz40ch モノリシック 1x5WBSS モジュールの試作を行った。1stAWG と 2ndAWG を 2 チャンネルずらす構成（図 9 参照）を適用し損失の均一化を図ると共に、各素子の設計、製造パラメータや製造工程を一体集積化に適するように最適化することで良好な特性を実現し、波長群クロスコネクタノードの伝送実験に貢献した。また、2010 年度には、更なる高集積化を目指し、11 個の 50GHz 周回性 1x10AWG と 10 個の 1x16 光スイッチを一体集積した 50GHz80ch モノリシック 1x10WBSS モジュールの試作も行った。これは、集積度、スループット共に導波路型デバイスとして最大規模を誇るデバイスであり、伝送実験を通してその有用性を実証した。

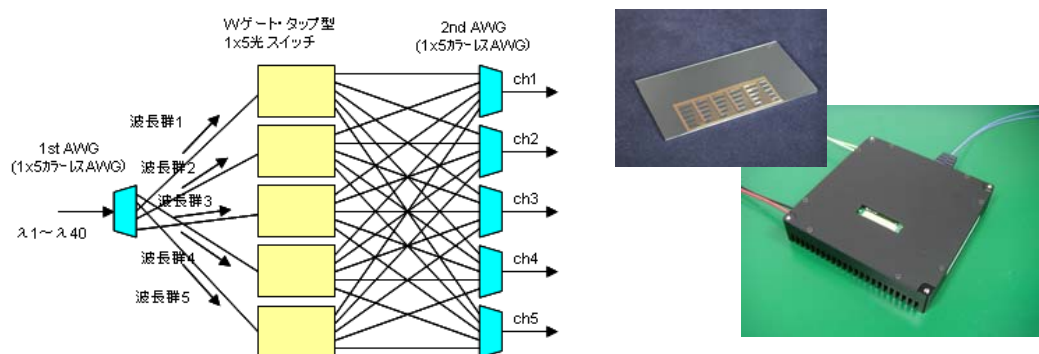


図 46 100GHz1x5 モノリシック WBSS 回路

③-2 ②-2 ②-3PLC 光フィルタ及び光ラベル処理回路の開発

不均一帯域波長ルータ用デバイス

ノード間のトラヒックに応じて最適な透過帯域を割り当てることで波長資源を有効利用しローカル網の低消費電力化を図る不均一帯域波長ルータを用いた最適化トランスパレントネットワークに必要な光デバイスの開発を、NTT フォトニクス研究所グループと連携して進めた。5 種類の波長帯域が不均一な AWG フィルタやループバック型 AWG フィルタなど特殊設計の光デバイスを試作し、光スイッチと組み合わせることで方路ごとの波長数を可変に出来ることを実証した。更に、ポート数が互いに素な周回性 AWG ルータを用いることで、光源の波長を変えるだけで電力を消費せずに行き先を切り替える通信方式についても検討し、その実証のために 6 種類の周回性 AWG を試作した。

光信号処理回路

光ラベルによるセルフルーティング機能や光バースト機能を用いた抜本的な低消費電力化の検討も NTT フォトニクス研究所グループと進めた。適用した光デバイスは、光のラベルを生成、識別するための CDMA 用エンコーダ・デコーダであり、生成する光ラベルも時間軸の光強度変調に加え波長軸も含めた 2 軸上のコードを取り扱える機能を有する。この機能を実現するために、2 つの AWG フィルタの間に多数の遅延線を設置し、どの遅延量にするかを光スイッチで選択出来る構成とした（図 39 参照）。正確な遅延量を確保するために全ての素子を 1 チップ上にモノリシック集積する必要がある、それまでに培ってきた回

路設計技術や導波路作製技術を駆使して、高機能なデバイスを実現した。試作したデバイスは3種類であり、この経験がモノリシック WBSS 回路の実現に生かされた。

③-3 PLC 光スイッチ超低消費電力基盤技術の開発

打抜き溝構造を有する石英基板熱光学 PLC スイッチ

光デバイス自身の低消費電力化も重要な課題であり、PLC 回路で唯一電力を消費している PLC 型光スイッチの消費電力を 1/100 以下に削減する基盤技術開発を進めた。石英系 PLC スイッチは Si 基板上に石英系ガラス導波路でマッハツェンダ干渉計 (MZI) を構成した光スイッチであり、光の切り替えはヒータ直下の導波路コアを所定の温度(ヒータ長 2mm で室温+40℃)まで暖めることで屈折率を変化させ、干渉条件を変えることで行う。コアの温度は放熱を行う基板底面とコアの間(アンダークラッド: UC)に生じる温度勾配で決まり、温度勾配が小さければ供給電力は小さくて済む。そこで基板を 1mm 厚の石英とすることで UC を厚くして温度勾配を小さくすることで低電力化を図った。また、ヒータから水平方向への熱の拡散を防ぐと共に暖めるガラスの熱容量を小さくするために断熱溝を形成した。1mm 厚の石英基板に精度良く深い溝を掘るためにサンドブラスト技術を PLC 用に改良し打ち抜き溝の形成に成功した(図 47 参照)。また、ヒータからの熱が加熱しない方の導波路まで回り込むのを防ぐために、溝の長さをヒータ長より長くする検討を行い(図 48 参照)、消費電力を 30mW まで低減できることを明らかにした。従来の消費電力(250mW)に比べ約 1/8 である。ただし、図 47 の模式図に示す理想的な断面構造でのシミュレーションでは 4mW という結果が得られており、大きな食い違いを見せている。これは、SEM 写真に示す通り断熱用打ち抜き溝が垂直に切れずリッジ形状が台形状となり熱容量が大きくなったためと推察されたため、サンドブラストの加工粒子のサイズや材質、そして吹きつけ条件等の見直しを進めたが加工形状に大きな改善が見られなかったため、本構造での低消費電力化の検討は中止した。

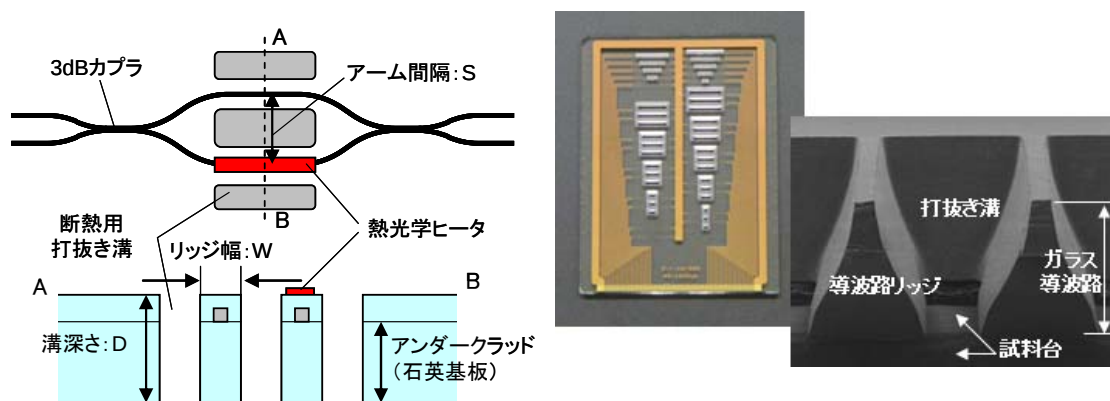


図 47 石英基板熱光学 PLC スイッチの回路構成とチップ写真

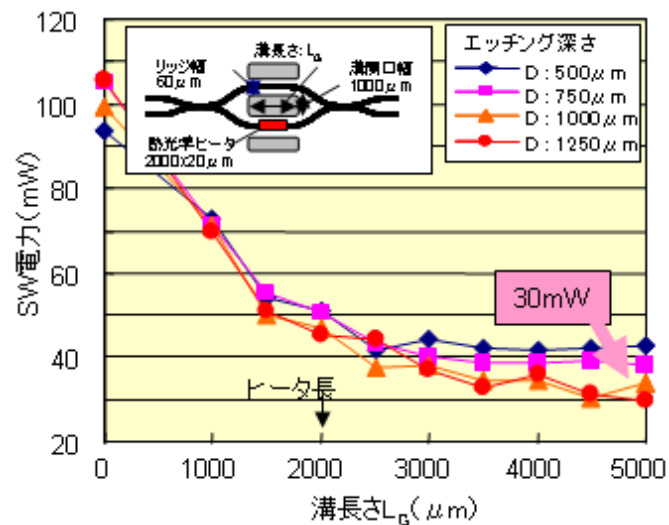


図 48 石英基板スイッチの断熱溝の長さに対する消費電力特性

PLC-LN スイッチによる超低消費電力化

前記の石英基板熱光学 PLC スイッチの結果を受け、抜本的な低消費電力化を目指し、電圧印加による電気光学効果（電流が流れないのでデバイスでの消費電力がほぼゼロ）を利用する光スイッチの研究開発を本格化させた。これは、低損失で且つ光ファイバとの接続性に優れ、複雑な回路が実現出来る石英系 PLC 回路と電気光学効果で駆動可能な LiNbO₃（以後 LN と略す）導波路位相シフタとを組み合わせた MZI 型光スイッチで、両者の特徴を生かした光デバイスである。なお、デバイス部分で電力を消費しないため、消費電力の評価は駆動回路を含んだ消費電力で比較することとした（駆動回路を含んだ従来型 PLC スイッチの消費電力：375mW）。デバイスの作製では、熱膨張係数が異なる異種材料を接続するため接続方法の最適化を進めると共に、屈折率の不整合による損失増加を極力抑えるために、接合部分にモードフィールド径を整合させるための SSC (spot size converter) を配置するなど、特性や信頼性などの向上を図る様々な工夫を行った。中でも最大の課題は LN 導波路に偏波依存性があることであった。これは PLC 導波路で様々な回路が実現出来る特徴を生かし、入出力側に偏波ビームスプリッタ (Polarization Beam Splitter : PBS) を配置した偏波ダイバーシティ回路を形成することで解決した。つまり、図 49 に示すように入力側に偏波ビームスプリッタ (PBS) により LN 位相シフタへの入力光を偏波分離し、分離した光信号のうち TE 偏波成分を $\lambda/2$ 波長板によって TM 偏波に変換することで TM 成分のみを LN 位相シフタに入力し、LN の偏波依存性を解消した。更に LN 位相シフタからの光信号は再び $\lambda/2$ 波長板と PBS により合波される。なお、PBS は PLC 上に構成された MZI の片アームにその複屈折軸が導波路偏波軸と一致した $\lambda/2$ 波長板を設置することで実現されている。この $\lambda/2$ 波長板を通過する光信号は TM、TE 偏波で π の位相差が生じるため、MZI の出力では TM、TE 偏波の干渉状態も π だけずれることになり出力偏波が分離される。このように LN チップと石英 PLC を直接接続することで、PLC の高い光回路レイアウトの柔軟性と LN 位相シフタの高速性、低消費電力性を利用することが可能になった。

試作した PBS 単体での偏波消光特性は、最大で 19.4 dB、1551~1571 nm の帯域に渡って 15 dB 以上の偏波消光比が得られた。従って、光スイッチ構成では光信号は偏波分離および合成のため PBS を 2 段通過するので、偏波ダイバーシティ回路全体での偏波消光比は 30 dB 以上である。また切り替え速度は 41 ps 以下、偏波依存性損失(PDL)は 0.2 dB 以下と良好な特性を得た。一方、消費電力は PLC-LN デバイスでは消費しないため、駆動回路に依存している。また、駆動回路は LN 位相シフタのバイアス電圧が時間と共に変化するため、それを最適にする機構を取り入れる必要がある。そこで、低消費電力化を視野に、電

圧保持機構とバイアス電圧の調整を常時行わず一定間隔で行う間欠動作との組合せや光レベルを一定にすることで電圧を調整する ALC (Automatic Level Control) 回路などを検討した。それらが低消費電力化に有用であることはシミュレーションで確認出来たが、安定性や実用性に不安があることから、最終的には最適電圧を自動で設定する ABC (Automatic Bias Control) 回路を組み込んだもので検討を進めた (図 50 参照)。使用する電子回路素子の最適化を進めることで最大でも 3.1mW で動作させられることを明らかにし、従来の 375mW に対し目標としていた 1/100 以下の超低消費電力化を達成した。

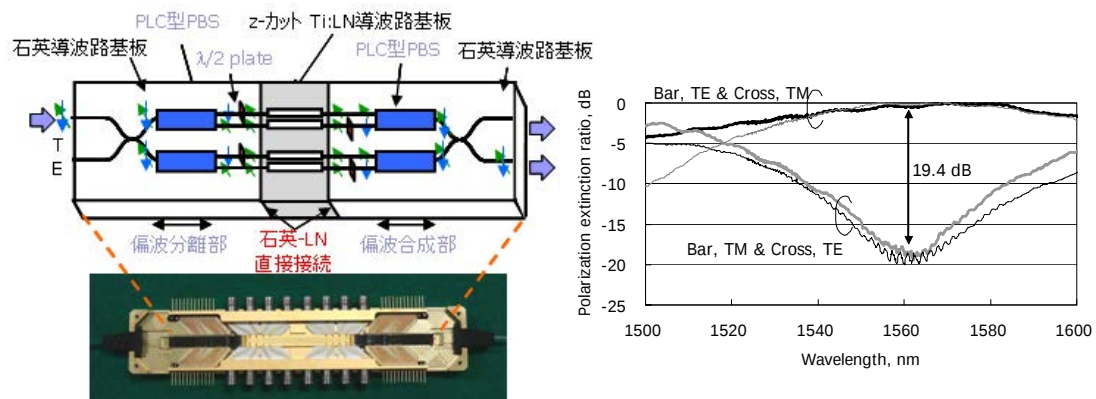


図 49 PLC-LN スwitchの構成と集積した PBS の偏波消光比特性

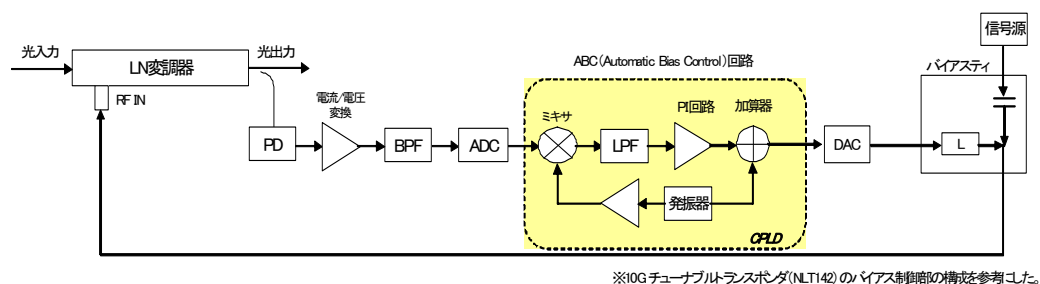


図 50 PLC-LN スwitch駆動用 ABC 回路構成

(2)研究成果の今後期待される効果

光デバイスの観点から今回の CREST 研究における成果の意義は、ネットワークの超低消費電力化の実現に有効なネットワークアーキテクチャやノードシステムの実現に高機能な光デバイスが有効であること、そして従来の光ネットワークでは使用されたことのなかった高機能・高集積な光デバイスに挑戦し、それが実現出来ることを実証したことが上げられる。特に、モノリシック WBSS 回路において、1 チップに 1 階層分のノード機能を集積出来ることを示したことは、光ノードの小型化の可能性を示唆しており、CREST 研究で進めた階層化波長群クロスコネクトノードシステムなどの超低消費電力ネットワークの実用性や有用性を高めることに貢献出来たと考えている。更に、光デバイスの消費電力を 1/100 にすると言う目標も、異種材料を組み合わせるなど新しいアイデアによって実現出来ることが実証出来たことは、光デバイス開発の一つの方向性を示しており、今後のデバイス開発への波及効果が期待出来る。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際(欧文)誌 22 件)

- (1) K.Sato, "Recent developments in and challenges of photonic networking technologies," IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, No. 3, March 2007, pp. 454-467.
- (2) O. Moriwaki, K. Suzuki, K. Takiguchi, Y. Sakai, "AWG-Based Wavelength Router With Nonuniform Number of Transmission Paths," IEEE Photonics Technology Letters, Volume 19, Issue 3, pp. 167 – 169, 2007.
- (3) K. Takiguchi, M. Okuno, H. Takahashi, O. Moriwaki, "Integrated photonic decoder with complementary code processing and balanced detection for two-dimensional optical code division multiple access," Optics Letters, Vol. 32, No.7, pp.784-786, 2007
- (4) 佐藤, "光ネットワーク技術の進展,"電子情報通信学通信ソサイエティマガジン, No. 1, 夏号、2007 年 6 月、pp. 76-88.
- (5) K. Sato and H. Hasegawa, "Prospects and challenges of multi-layer optical networks," IEICE Trans. Commun., Vol. E90-B, No. 8, pp. 1890-1902, 2007.
- (6) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, S. Kamei, Y. Jinnouchi, and M. Okuno, "Performance of Waveband MUX/DEMUX Using Concatenated AWGs, " IEEE Photonic Technology Letters, vol. 19, No. 16, August 2007, pp. 1197-1199.
- (7) O. Moriwaki, K. Suzuki, H. Takahashi, Y. Sakai, K.-I. Sato, S. Kakehashi, "Loop-Back AWG Router With Nonuniform Transmission Capacity," IEEE Photonics Technology Letters, Volume 19, Issue 17, pp. 1319 – 1321, 2007.
- (8) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato and O. Moriwaki, "Formulation of waveguide connection for waveband MUX/DEMUX using concatenated Arrayed-Waveguide Gratings," IEICE Trans. Commun. Letter, vol. E90-B, No. 10, October 2007, pp. 2950-2952.
- (9) K. Suzuki, T. Yamada, O. Moriwaki, H. Takahashi, M. Okuno, " Polarization-Insensitive Operation of LithiumNiobate Mach-Zehnder Interferometer with Silica PLC-Based Polarization Diversity Circuit", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, No. 10, May 15, 2008, pp. 773-775.
- (10) I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An efficient hierarchical optical path network design algorithm based on traffic demand expression in a Cartesian produce space," IEEE Journal of Selected Areas in Communications (J-SAC), Supplement on Optical Communications and Networking (OCN), vol. 26, No. 6, August 2008, pp. 22-31.
- (11) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, and S. Kamei, " Optical cross-connect switch architectures for hierarchical optical path networks," IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, No. 10, October 2008, pp. 3174-3184.
- (12) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, and S. Kamei, " Analysis and development of fixed and variable waveband MUX/DEMUX utilizing AWG routing functions," IEEE Journal of lightwave technology, vol. 27, No. 6, January 2009, pp. 30-40.
- (13) K. Sato and H. Hasegawa, "Optical networking technologies that will create future bandwidth abundant networks," to appear in OSA JON Special Issue on Optical Networks for Future Internet.
- (14) K. Takiguchi, H. Takahashi, and M. Okuno, "Integrated-optic digital-to-analogue converter for recognizing multi-wavelength pulse patterns" Electronics Letters, Vol. 45, No. 9, April 23, 2009, pp. 466-467
- (15) K. Sato and H. Hasegawa, "Optical networking technologies that will create future bandwidth abundant networks," Journal of Optical Communications and Networking, Special Issue on Optical Networks for Future Internet, invited, vol. 1, No. 2, July 2009, pp. A81-A93. A paper selected for Spotlight on Optics of OSA in July 2009.
- (16) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, S. Kamei, H. Takahashi, "Wavelength Path Reconfigurable AWG-STAR Employing Coprime-Channel-Cycle Arrayed-Waveguide Gratings," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No. 14, July 15, 2009, pp. 1005-1007.
- (17) K. Ishii, H. Hasegawa, and K. Sato, "Wavelength assignment for concatenated ROADM ring networks and switch scale reduction in a concatenating node," Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), vol. 2, No. 1, January 2010, pp. 67-79.

- (18) K. Ishii, O. Moriwaki, H. Hasegawa, and K. Sato, Y. Jinnouchi, M. Okuno, and H. Takahashi, "Development of hierarchical optical cross-connect system for ROADM-ring connection using PLC technologies," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 7, pp. 489-500, 2010.
- (19) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, H. Takahashi, "Full-mesh Wavelength Channel Assignments over Interconnected Star Shaped Networks Employing Coprime-Channel-Cycle Arrayed-Waveguide Gratings" to appear in IEEE Photonics Technology Letters.
- (20) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, and H. Takahashi "Ultra-compact waveband cross-connect module using waveband selective switches: development and performance verification," Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), vol. 2, No. 1, 2010, pp. 67-79.
- (21) O. Moriwaki, K. Noguchi, H. Takahashi, T. Sakamoto, K. Sato, H. Hasegawa, M. Okuno, and Y. Ohmori, "Development of Terabit-scale compact hierarchical optical cross-connect system using planar device integration," IEEE Journal of Lightwave Technology, 2010. (CREST, invited)
- (22) O. Moriwaki, K. Noguchi, H. Takahashi, T. Sakamoto, K. Sato, H. Hasegawa, M. Okuno, and Y. Ohmori, "Multi-hop signal transmission experiments employing PLC-based hierarchical optical cross-connect system," IEEE Photonic Technology Letters, vol. 22, No. 21, November 2010, pp. 1586-1588.
- (23) R. Hirako, H. Hasegawa, K. Sato, and M. Okuno, and O. Moriwaki, "Compact matrix-switch-based hierarchical optical path cross-connect with colorless waveband add/drop ratio restriction," IEICE Special Issue on Photonic Network Technologies in Terabit Network Era, 2011.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- (1) 佐藤, "グリーン ICT の実現に向けた光技術の役割," オプトロニクス, No. 337, 2010 年 1 月, pp. 136-138.
- (2) 佐藤, "持続的発展可能な情報通信ネットワークと光ネットワーク技術の役割," 電子情報通信学会誌, グリーン ICT に向けた光ネットワーク技術小特集, vol. 93, No. 8, pp. 654-658, 2010 年 8 月.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 12 件、国際会議 22 件)

- (1) K. Sato, "Broadband Access and its Impact on Future Networks," OpticsEast 2005(ITCom2005), Boston, Plenary Session, November 23-25, 2005.
- (2) 佐藤, "光 IP ネットワークのインパクトと課題," 第 19 回光通信システムシンポジウム、三島、2005 年 12 月 1-2 日、pp. 3-10.
- (3) K. Sato, "Advances and challenges of IP plus photonic networks," Optics East 2006(ITCom2006), Boston, October 2-4, 2006.
- (4) K. Sato, "Advances and challenges of photonic networking technologies," International Conference on Photonics in Switching 2006, Plenary, Herakleion (Crete), Greece, October 16-18, 2006.
- (5) K. Sato, "Development of hierarchical optical path network," KAIST International Workshop on "Harnessing Photonics for Future Applications," Seoul, Korea, September 2, 2006.
- (6) 佐藤, "超高速フォトリックネットワークの最新動向," 光産業技術マンスリーセミナー, (財) 光産業技術振興協会 (光協会)、東京、2006 年 4 月 18 日.
- (7) 佐藤, "光ネットワーク技術の今後," 電子情報通信学会 2007 年総合大会、BK-2-5、2007 年 3 月 22 日.
- (8) K. Sato, "Recent Developments in and Challenges of Photonic Networking Technologies," Plenary of COIN-ACOFT International Conference 2007, Melbourne, Australia, June 24-27, 2007.
- (9) K. Sato, "Recent advances and challenges of multi-granular optical path networks," 2007 Japan-Italy Bilateral Workshop on Photonics for Communication, July 5-6, Osaka, Japan.

- (10) K. Sato, "Multi-granular optical path networking technologies," Photonics in Switching 2007, WA4.2, San Francisco, August 19-22, 2007.
- (11) K. Sato, "Prospects and challenges of hierarchical optical networks," APOC 2007, Conference 6783-01, Wuhan, China, November 1-5, 2007.
- (12) 佐藤, "フォトリックネットワークの今後の展開," 電子情報通信学会 第一回集積光デバイス技術研究会, IPD07-01, p.1, 東京, 2007 年 7 月 20 日.
- (13) 佐藤, "光ネットワーク技術の進展と将来の通信網へのインパクト," 第 11 回光技術シンポジウム, 産業技術総合研究所, 東京, 2008 年 3 月 4 日.
- (14) K. Sato, "Key enabling photonic network technologies for future networks," The 17th Wireless and Optical Communications Conference, WOOC 2008, Taichung, Taiwan, April 23-24, 2008, pp. 81-82.
- (15) K. Sato, "Future directions of networking technologies," FISC 2008/AsiaFI (Future Internet Summer Camp 2008/First Asia Future Internet (AsiaFI) School on Architecture and Building Blocks), Jeju, Korea, August 25-29, 2008.
- (16) K. Sato, "The future of optical networks," ECOC 2008, We.3.A.1, Brussels, September 22-25, 2008.
- (17) 佐藤, "Issues of Electrical Power Consumption in Future Networks," IEICE ソサイエティ大会, 2008, CS-6-1, 9 月 16-19 日, 2008, 東京
- (18) 佐藤, "超低消費電力ネットワークの実現に向けて-フォトリックネットワーク技術の役割-, "光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点発足シンポジウム, 産業技術総合研究所, 東京, 2008 年 10 月 22 日.
- (19) K. Sato, "Advances in photonic networking technology and its impact on future networks," APOC 2008 (Asia-Pacific Optical Communications), SPIE Conference 7137, Session 8a, Hangzhou, China, October 26-30, 2008.
- (20) 佐藤, "光技術が可能にするネットワークの超省エネ化," 第 28 回光産業技術シンポジウム, (財) 光産業技術振興協会 (光協会), 東京, 2008 年 12 月 3 日.
- (21) K. Sato, "Future high-bandwidth demand services and network trend," OECC 2009 (14th Optoelectronics and Communications Conference), Workshop, Hong Kong, July 13, 2009.
- (22) K. Sato, "The Future optical network," IEEE Photonics Society Summer Topicals 2009, Newport Beach, California, July 20-22, 2009.
- (23) K. Sato, "Future directions of optical networking technology development -Optical fast circuit switching and multilevel optical routing," Photonics in Switching 2009, Pisa, Italy, September 16-19, 2009, WeII1-2.
- (24) K. Sato, "Role and opportunities of photonics in future networks," IEEE Photonics Society Winter Topicals 2010, Keynote, MC1.1, Majorca, Spain, January 11-13, 2010.
- (25) K. Sato, "Next generation transport network architecture," OFC/NFOEC 2010, OWR1, San Diego, March 21-25, 2010.
- (26) K. Sato, "Are all optical network manageable?" OFC/NFOEC 2010, Workshop OMF, San Diego, March 22, 2010.
- (27) 佐藤, "グリーンネットワークを実現するフォトリック技術," 電子情報通信学会東海支部平成 20 年度専門講習会, 名古屋, 2009 年 3 月 13 日.
- (28) 佐藤, "グリーン ICT ネットワーク構築に向けたフォトリック技術," 2010 年 (平成 22 年) 春季 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17p-A-1, 東海大学, 2010 年 3 月 17-20 日.
- (29) K. Sato, "The path to energy efficient optical networking," Photonics in Switching 2010, Plenary, JTuA2, Monterey, California, July 25-28, 2010.
- (30) K. Sato, "Optical technologies that enable Green networks," 12th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2010, Keynote, Mo.A.2, Munich, June 27-July 1, 2010.
- (31) 長谷川, 佐藤, 高橋, 奥野 "マトリクススイッチを用いたコンパクトな階層化光パスクロスコネクタノード," 電子情報通信会, 2010 年ソサイエティ大会, 大阪府立大学, BCI-1-4, 2010 年 9 月 16 日.
- (32) K. Sato, "The future transport node technologies," Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition 2010, ACP 2010, Shanghai, December 9-11, 2010.

- (33) K. Sato, "OOO switching –The role and technological advances," OFCNFOEC 2011, Los Angeles, March 6-10, 2011.
- (34) 佐藤, “グリーンネットワークと光技術,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会、北海道, 信学技報 vol. 110, No. 193, PN2010-18 (2010-09), pp. 37-42, 2010 年 9 月.

② 口頭発表 (国内会議 37 件、国際会議 26 件)

- (1) 梯、長谷川、佐藤, “階層化光パス網におけるノード構成の研究,” 電子情報通信学会 2006 年全国大会 B-12-19, 2006 年 3 月.
- (2) 柳生、長谷川、佐藤, “光パス需要密度の直積空間上表現と空間内探索に基づく多階層光パス網設計法,” 電子情報通信学会 2006 年全国大会 B-12-13, 2006 年 3 月.
- (3) 柳生、長谷川、佐藤, “多階層光パスネットワークにおける光パス需要密度の直積空間上表現と波長群パスの逐次設定法,” フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 vol. 106, No. 208, PN2006-12, pp. 13-17, 2006 年 8 月.
- (4) 梯、長谷川、佐藤, “多階層光パスネットワークノードの研究,” フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 vol. 106, No. 419, PN2006-41, pp. 9-12, 2006 年 12 月.
- (5) 長谷川、佐藤, “光通信ネットワーク技術の進展,” 平成 18 年度 日本光学会名古屋講演会, 2007 年 3 月 13 日.
- (6) 森脇 撰, 鈴木賢哉, 瀧口浩一, 界 義久, “対地パス数が不均一なフルメッシュ AWG 波長ルータ,” 電子情報通信学会 2006 年ソサイエティ大会, 金沢大学, B-12-2, 2006 年 9 月.
- (7) 森脇 撰, 鈴木 賢哉, 高橋 浩, 界 義久, 佐藤 健一, 梯 昌二, “ループバック構造を用いた対地パス数の不均一な AWG 波長ルータ,” 電子情報通信学会 2006 年全国大会, 名城大学, B-12-18, 2007 年 3 月.
- (8) 瀧口 浩一, 奥野 将之, 高橋 浩, 森脇 撰, “相補符号処理およびバランス受光を用いた 2 次元光 CDMA 用集積型デコーダ,” 電子情報通信学会 2006 年全国大会, 名城大学, C-3-70, 2007 年 3 月.
- (9) 奥野, 橋詰, 首藤, 陣内, 大森, “打ち抜き溝構造を有する石英基板熱光学 PLC スイッチ,” 2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-50, 2006 年 9 月
- (10) 陣内, 奥野, 首藤, 大森, “プラスト加工法による熱光学 PLC スイッチ断熱溝構造の作製,” 日本セラミックス協会 第 17 回フォトニクスミーティング, pp.1-2, 2007 年 1 月
- (11) 奥野, 首藤, 陣内, 大森, 高橋, “打抜き断熱溝を有する石英基板 PLC スイッチの低消費電力化,” 2007 年電子情報通信学会全国大会, C-3-8, 2007 年 3 月
- (12) S. Kakehashi, H. Hasegawa, and K. Sato, "Optical switch architectures for hierarchical optical path networks," Proc. SPIE, vol. 6388, OpticsEast 2006, Boston, October 2-4, 2006, pp. 638809-1 - 638809-9.
- (13) I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An Efficient Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm based on a Traffic Demand Expression in a Cartesian Product Space," ECOC 2006, Cannes, September 24-28, 2006, Tu.3.6.6.
- (14) O. Moriwaki, K. Suzuki, K. Takiguchi, Y. Sakai, “AWG Wavelength Routing System with Non-uniform Transmission Paths,” 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, Tu1.4.4, September 24-28, 2006
- (15) K. Takiguchi, H. Takahashi, O. Moriwaki, M. Okuno, “Integrated Photonic Decoder with Complementary Code Processing and Balanced Detection for Two-Dimensional OCDMA,” Optical Fiber Communication Conference & Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, OWV5, March 25-29, 2007
- (16) 石井紀代, 長谷川 浩, and 佐藤健一, "Wavelength Assignment for Concatenated ROADM Ring Networks and Simple Node Architecture," フォトニックネットワーク研究会, 信学技報, vol. 107, No. 90, PN2007-3, pp. 13-17, 2007 年 6 月.
- (17) 吉川友啓、長谷川 浩、佐藤健一, “光バッファを導入した集中制御型 OBS ネットワークにおける総ブロッキング率の繰返し最適化に基づく波長経路割当法,” フォトニッ

- クネットワーク研究会, 信学技報 vol. 107, No. 188, PN2007-14, pp. 27-32, 2007 年 8 月.
- (18) K. Ishii, H. Hasegawa, and K. Sato, "Simple node architectures for connection of two ROADM rings using hierarchical optical path routing," Photonics in Switching 2007, TuA2.3, San Francisco, August 19-22, 2007.
 - (19) 森脇 撰, 鈴木賢哉, 瀧口浩一, 界 義久, "伝送容量が不均一な AWG ルータの大規模化(15 ノード, 217 パス)," 電子情報通信学会 2007 年ソサイエティ大会, 鳥取大学, B-12-5, 2007 年 9 月 10 日.
 - (20) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K.-i. Sato, O. Moriwaki, M. Okuno, "Waveband Selective Switch Using Concatenated AWGs," 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007), Berlin, Germany, 2.5.3, Sep. 16-20, 2007.
 - (21) K. Ishii, H. Hasegawa, and K. Sato, "Simple node architectures for connection of ROADM rings," 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007), 10.5.2, Berlin, Germany, September 16-29, 2007.
 - (22) T. Yoshikawa, H. Nagashima, H. Hasegawa, and K. Sato, "An RWA algorithm for OBS networks based on iterative local optimization of total blocking probability," APOC 2007, Conference 6783-60, Wuhan, China, November 1-5, 2007.
 - (23) O. Moriwaki, K. Suzuki, H. Takahashi, K.-I. Sato, S. Kakehashi, "8x8 Wavelength Router with Transmission Channel Reallocation Capability," The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2008), San Diego, OWC5, Feb. 24-28, 2008.
 - (24) K. Suzuki, T. Yamada, O. Moriwaki, H. Takahashi, M. Okuno, "Polarization- insensitive MZI switch composed of an LN phase shifter array and silica-based PLC-integrated polarization beam splitter," The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2008), San Diego, OWI7, Feb. 24-28, 2008.
 - (25) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, "Interleaved waveband MUX/DEMUX developed on single arrayed-waveguide grating," The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2008), San Diego, OThE1, Feb. 24-28, 2008.
 - (26) 鈴木賢哉, 山田 貴, 森脇 撰, 高橋 浩, 奥野将之, "石英 PLC 集積偏波ダイバーシティ回路によるニオブ酸リチウム導波路マッハツェンダ干渉計の偏波無依存化," 電子情報通信学会 2008 年全国大会, 北九州学術研究都市 三大学, C-3-19, 2008 年 3 月 18 日.
 - (27) 梯 昌二, 長谷川 浩, 佐藤健一, 森脇 撰, "AWG の折り返し導波路構成を用いた分散配置型波長群合分波器," 電子情報通信学会 2008 年全国大会, 北九州学術研究都市 三大学, B-12-1, 2008 年 3 月 19 日.
 - (28) 森脇 撰, 鈴木賢哉, 高橋 浩, 佐藤健一, 梯 昌二, "波長割当が変更可能な AWG 波長ルータ," 電子情報通信学会 2008 年全国大会, 北九州学術研究都市 三大学, B-12-2, 2008 年 3 月 19 日.
 - (29) 奥野将之, 首藤啓三, 森脇 撰, 高橋 浩, "アドドロップ機能を有する石英系 PLC8 連 4x4 マトリクススイッチ," 電子情報通信学会 2008 年全国大会, 北九州学術研究都市 三大学, C-3-72, 2008 年 3 月 19 日.
 - (30) 吉川友啓, 長谷川 浩, 佐藤健一, "集中制御型 OBS ネットワークにおける光バッファ配置決定法及び配置の評価," 電子情報通信学会 2008 年全国大会, 北九州学術研究都市 三大学, B-7-74, 2008 年 3 月 21 日.
 - (31) 石井紀代, 長谷川浩, 佐藤健一, "接続光リングネットワークにおける最適波長割当とノードスイッチ規模削減法," 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 PN2008-3, pp. 13-18, 2008 年 6 月.
 - (32) 森脇 撰, 鈴木賢哉, 瀧口浩一, 高橋 浩, "AWG 波長ルータの透過帯域幅不均一化による AWG-STAR ネットワークの対地容量設定の柔軟化," フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 vol. 108, No. 84, PN2008-9, pp. 45-50, 2008 年 6 月.
 - (33) 瀧口浩一, 高橋 浩, 奥野将之, "多波長ラベル認識用集積型光 D/A 変換回路," 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, 明治大学, C-3-80, 2008 年 9 月.

- (34) 森脇 摂, 野口一人, 阪本 匡, 亀井 新, 高橋 浩, “波長パスを再構成可能な波長ルーティングシステム(R-AWG-STAR),” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, 愛媛大学, B-12-18, 2009 年 3 月.
- (35) 石井紀代, 長谷川浩, 佐藤健一, 森脇 摂, 亀井 新, 高橋 浩, 奥野将之, “AWG を用いた階層化光パスノード機能素子,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, 愛媛大学, C-3-28, 2009 年 3 月.
- (36) 平光亮介, 長谷川浩, 佐藤健一, “全波長群パスに対する add/drop 率を制約可能な多階層光パスクロスコネクトノード構成及び光スイッチ規模の評価,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, 愛媛大学, B-12-2, 2009 年 3 月.
- (37) 陣内啓光, 亀井 新, 高橋 浩, 奥野将之, 大森保治, “8 連 1×8 アサーマル AWG モジュールの開発,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, 愛媛大学, C-3-35, 2009 年 3 月.
- (38) 石井紀代, 長谷川浩, 佐藤健一, 亀井新, 高橋浩, 奥野将之, “Cyclic AWG を用いたモノリシック波長群選択スイッチ,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会 学生ワークショップ、与那国島, pp. 1-3, 2009 年 3 月.
- (39) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato Kamei, H. Takahashi, and M. Okuno, “Monolithically Integrated Waveband Selective Switch Using Cyclic AWGs,” ECOC 2008, Mo.4.C.5, Brussels, September 22-25, 2008.
- (40) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, S. Kamei, and H. Takahashi, "Wavelength path reconfigurable AWG-STAR employing coprime-channel-cycle arrayed-waveguide gratings," The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2009), San Diego, OMG4, Mar. 22-26, 2009.
- (41) 石井紀代, 長谷川浩, 佐藤健一, 亀井新, 奥野将之, 高橋浩, “Cyclic AWG を用いたモノリシック分散配置波長群選択スイッチ,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会、秋田, 信学技報 PN2009-16 (2009-8), pp. 31-35, 2009 年 8 月.
- (42) 山田、長谷川、佐藤、“波長群並びに波長パス切替によるプロテクション機能を有する高信頼化多階層光パスネットワーク,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会、秋田, 信学技報 PN2009-12 (2009-8), pp. 7-11, 2009 年 8 月.
- (43) 山田、長谷川、佐藤、“波長群並びに波長パス切替によるプロテクション機能を有する高信頼化多階層光パスネットワーク,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会、秋田, 信学技報 PN2009-12 (2009-8), pp. 7-11, 2009 年 8 月.
- (44) 石井紀代、長谷川浩、佐藤健一、亀井新、奥野将之、高橋浩, “Cyclic AWG を用いたモノリシック分散配置波長群選択スイッチ,” 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会、秋田, 信学技報 PN2009-16 (2009-8), pp. 31-35, 2009 年 8 月.
- (45) 森脇 摂, 野口一人, 阪本 匡, 高橋 浩, “連接スター型波長ルーティングネットワークでのフルメッシュ波長パス形成法,” 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会, 新潟大学, B-12-4, 2009 年 9 月.
- (46) 佐藤、“グリーン ICT ネットワーク構築に向けたフォトニック技術,” 2010 年(平成 22 年)春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、17p-A-1, 東海大学、2010 年 3 月 17-20 日.
- (47) 森脇、野口、高橋、佐藤、奥野、“PLC デバイスを用いた多階層光クロスコネクトノード装置,” 電子情報通信学会、2010 年全国大会, 東北大学, B-12-16, 2010 年 3 月 16-19 日.
- (48) 野口、森脇、阪本、高橋、長谷川、佐藤、奥野、大森、“PLC マトリックススイッチを用いた多階層光クロスコネクトノード装置伝送試験,” 電子情報通信学会、2010 年全国大会, 東北大学, B-12-17, 2010 年 3 月 16-19 日.
- (49) 平光, 長谷川, 佐藤, “階層化光パスネットワークノード用集積化カラーレス波長合分波器,” 電子情報通信会, 2010 年全国大会, 東北大学, B-12-18, 2010 年 3 月 16-19 日.
- (50) 大野、石井、長谷川, 佐藤, “可変フィルタを用いた接続リング間接続ノード構成,” 2010 年全国大会, 東北大学, B-12-19, 2010 年 3 月 16-19 日.
- (51) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, S. Kamei, and H. Takahashi, "An Ultra-compact Waveband Cross-connect Switch Module to Create Cost-effective Multi-degree Reconfigurable Optical Node," ECOC 2009 -35th European Conference on Optical Communication, Vienna,

Austria, September 20-24, 2009, 4.2.2.

- (52) K. Ishii, O. Moriwaki, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Jinnouchi, M. Okuno, and H. Takahashi, "Efficient ROADM-ring Connecting Node Switch Architecture that Utilizes Waveband Routing and its Realization with PLC Technologies," ECOC 2009 (35th European Conference on Optical Communication), Vienna, Austria, September 20-24, 2009, 5.3.1.
- (53) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, "Route and Wavelength/Waveband Assignment for Creation of Compact Hierarchical Optical Cross-Connect for Multi-Ring Connection," ECOC 2009 - 35th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Vienna, Austria, September 20-24, 2009, 4.6.2.
- (54) R. Hirako, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, and O. Moriwaki, "Hierarchical optical cross-connect architecture that implements colorless waveband Add/Drop ratio restriction utilizing a novel wavelength multi/demultiplexers," Photonics in Switching 2009, Pisa, Italy, September 16-19, 2009, FrII2-2.
- (55) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, "Impacts of waveband capacity and waveband add/drop ratio on the performance of ROADM-Ring connecting hierarchical optical path cross-connects," OFC/NFOEC 2010, NMD1, San Diego, March 21-25, 2010.
- (56) S. Mitsui, H. Hasegawa and K. Sato, S. Kamei, H. Takahashi, and M. Okuno, "Demonstration of compact hierarchical optical path cross-connect utilizing wavelength/waveband selective switches," OFC/NFOEC 2010, NThF4, San Diego, March 21-25, 2010.
- (57) O. Moriwaki, K. Noguchi, H. Takahashi, T. Sakamoto, K. Sato, H. Hasegawa, M. Okuno, and Y. Ohmori, "Terabit-scale compact hierarchical optical cross-connect system employing PLC devices and optical backplane," OFC/NFOEC 2010, Post Deadline Paper, PDPC9, San Diego, March 25, 2010.
- (58) K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, and H. Takahashi, "Performance test of ultra-compact waveband cross-connect module," COIN 2010 (9th International Conference on Optical Internet), July 11-14, 2010, Jeju, Korea.
- (59) R. Hirako, K. Ishii, H. Hasegawa, and K. Sato, "Development of compact hierarchical optical path cross-connect prototype utilizing integrated colorless multi/demultiplexers," ECOC 2010 - 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, We.8.A.5, Torino, September 19-23, 2010.
- (60) T. Oono, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, "Ring connecting node architecture employing variable filter," Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition 2010, ACP 2010, ThH4, Shanghai, December 9-11, 2010.
- (61) H. Hirako, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, "Switch scale evaluation for optical cross-connects considering add/drop ratio restriction," Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition 2010, ACP 2010, ThH3, Shanghai, December 9-11, 2010.
- (62) R. Hirako, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, H. Takahashi, and M. Okuno, "Flexible and compact hierarchical optical cross-connect node with waveband add/drop restriction," OFCNFOEC 2011, OTuE5, Los Angeles, March 6-10, 2011.
- (63) K. Noguchi, O. Moriwaki, H. Takahashi, T. Sakamoto, M. Okuno, and K. Sato, "PLC-based compact optical cross-connect node for roadm ring network connection," OFCNFOEC 2011, NThB2, Los Angeles, March 6-10, 2011.

ポスター発表 (国内会議 3 件、国際会議 5 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

- (1) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, and O. Moriwaki, "Waveband MUX/DEMUX Using Concatenated Arrayed-Waveguide Gratings," ECOC 2006, Cannes, September 24-28, We3.P.56, 2006.
- (2) S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, S. Kamei, Y. Jinnouchi, and M. Okuno, "Waveband MUX/DEMUX Using Concatenated AWGs -Formulation of Waveguide Connection and Fabrication," OFC 2007, JThA94, Anaheim, March 25-29, 2007.
- (3) O. Moriwaki, K. Suzuki, H. Takahashi, Y. Sakai, K. Sato, S. Kakehashi, "Loop-Back AWG Router with Non-Uniform Transmission Capacity," Optical Fiber Communication Conference & Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, JThA24, March 25-29, 2007

- (4) O. Moriwaki, K. Suzuki, K. Takiguchi, Y. Sakai, "Large-scale AWG Router (15 nodes, 217 paths) Providing Full-mesh and Nonuniform Transmission Capacities," 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007), Berlin, Germany, P103, Sep. 16-20, 2007.
- (5) "超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術," ULP 公開ワークショップ, 東京, 2008 年 12 月 8 日
- (6) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, H. Takahashi, "Full-mesh wavelength routing over interconnected AWG-STARs employing coprime-channel-cycle arrayed-waveguide gratings," 35th European Conference on Optical Communication, 2009 (ECOC '09), P3.09, Vienna, September 20-24, 2009.
- (7) 佐藤, 長谷川, "超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術," 名古屋大学テクノフェア, 2010 年 10 月.
- (8) "超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術," ULP 公開シンポジウム, 東京, 2010 年 11 月 26 日

(4)知財出願

①国内出願 (16 件)

- (1) 波長群光分波器および波長群光合波器 佐藤・長谷川・梯・森脇・界・鈴木 名古屋大学・日本電信電話(株) 2006/4/20 2006-117283
- (2) 波長群光分波器、波長群光合波器、および波長群選択スイッチ 佐藤・長谷川・梯・森脇・亀井・鈴木・界・瀧口 名古屋大学・日本電信電話(株) 2006/9/4 2006-239633
- (3) 光クロスコネクタ装置 森脇・界 日本電信電話(株) 2007/1/16 2007-006905
- (4) 光波長合成分波装置 森脇・鈴木・亀井・界 日本電信電話(株) 2007/3/16 2007-068980
- (5) 光通信ネットワーク用ノード装置のルーティング方法および光通信ネットワーク用ノード装置 佐藤・長谷川・石井 名古屋大学 2007/8/11 2007-210576
- (6) 光マトリクススイッチ 奥野・陣内・大森・高橋 NTT エレクトロニクス・日本電信電話(株) 2008/3/4 2008-053319
- (7) 光波長群合成分波回路 亀井・森脇 日本電信電話(株) 2008/3/21 2008-073935
- (8) 光波長群クロスコネクタ装置 亀井・森脇・佐藤・長谷川 日本電信電話(株)・名古屋大学 2008/3/31 2008-092267
- (9) 光信号処理回路 瀧口・森脇・鈴木 日本電信電話(株) 2008/7/24 2008-191145
- (10) 光波長合成分波装置 森脇・野口・亀井 日本電信電話(株) 2008/9/29 2008-250971
- (11) 光通信システム 森脇・野口・亀井 日本電信電話(株) 2008/9/29 2008-251245
- (12) 光通信システム 森脇・野口・亀井 日本電信電話(株) 2008/9/29 2008-251246
- (13) 光波長群合成分波回路 亀井・高橋 日本電信電話(株) 2009/1/8 2009-002854
- (14) 光パスネットワークの階層化光パスクロスコネクタ装置 佐藤・長谷川・石井・平光 名古屋大学 2009/3/16 2009-063674
- (15) 光パスネットワークの光パスクロスコネクタ装置および階層化光パスクロスコネクタ装置 佐藤・長谷川・石井・平光 名古屋大学 2009/3/16 2009-063675
- (16) 光リング間接続用光ノード装置 佐藤・長谷川・大野・石井 名古屋大学 2010/3/12 2010-056473

②海外出願 (2 件)

- (1) 波長群光分波器、波長群光合波器、および波長群光選択スイッチ 佐藤・長谷川・梯・森脇・亀井・鈴木・界・瀧口 名古屋大学・日本電信電話(株) 2007/4/18 PCT/JP2007/058447, Publication No. US-2009-0220234-A1
- (2) 光通信ネットワーク用ノード装置のルーティング方法および光通信ネットワーク用ノード装置 佐藤・長谷川・石井 名古屋大学 2008/3/6 PCT/JP2008/054076, U. S. Patent Application No. 12/733,070

(5)受賞・報道等

①受賞

- (1) 梯昌二, 平成 18 年度 電子情報通信学会東海支部 学生研究奨励賞, 平成 19 年 6 月 8 日
- (2) 平成 18 年度電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞 (Best Tutorial Paper Award)
K. Sato, "Recent developments in and challenges of photonic networking technologies," IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, No. 3, March 2007, pp. 454-467.
- (3) 平成 19 年度 電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞 (Best Tutorial Paper Award)
K. Sato and H. Hasegawa, "Prospects and challenges of multi-layer optical networks," Vol.E90-B, No.8, August 2007, pp.1890-1902.
- (4) 石井紀代, 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 第 3 回フォトニックネットワーク若手研究賞, 平成 20 年 6 月 12 日.
- (5) 石井紀代, 第 2 回フォトニックネットワーク研究会学生ワークショップ優秀賞, 平成 21 年 3 月 9 日.
- (6) 石井紀代, 電子情報通信学会東海支部平成 20 年度学生研究奨励賞, 平成 21 年 6 月 9 日
- (7) S. Mitsui, A semi-finalist in the 2010 Corning Outstanding Student Paper Competition,
Paper title: Demonstration of Compact Hierarchical Optical Path Cross-Connect Utilizing Wavelength/Waveband Selective Switches

②マスコミ(新聞・TV等)報道

◆報道発表

日時:2010 年 4 月 6 日 午後 3 時

場所:アーバンネット大手町ビル 13F、NTT コーポレートニューズルーム会見室

題目:“低消費電力多階層光クロスコネクトノードを開発 ～消費電力を電気ルータの約 1/20 に低減～”

概要:名古屋大学(以下 名古屋大学、愛知県名古屋市、総長:濱口道成)、日本電信電話株式会社(以下 NTT、東京都千代田区、代表取締役社長:三浦 惺)、NTT エレクトロニクス(以下 NEL、神奈川県横浜市、代表取締役社長:吉村 寛)は、独立法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(略称:CREST)からの受託研究により、通信ノードの消費電力を劇的に削減できる新しいネットワークアーキテクチャである「多階層光クロスコネクト技術」に基づいたプロトタイプ装置を試作しました。事業会社が商用として敷設している光ファイバで実証実験を行いました。その結果、本プロトタイプ装置では、電気ルータと比較し、同じスループット当りの消費電力を約 1/20 まで低減できることを世界で初めて実証しました。

掲載紙:

日経産業新聞	2010.4.7	朝刊 11 面
日刊工業新聞	2010.4.7	朝刊 23 面
フジサンケイビジネスアイ	2010.4.7	
中日新聞	2010.4.7	朝刊 3 面総合版
科学新聞	2010.4.16	

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

§ 7 結び

研究の目標から見た達成度

設定した目標に向かい研究を精力的に推進した結果、21 年度末には世界で初めて“低

消費電力多階層光クロスコネクトノード” プロトタイプ試作に成功し敷設ファイバを使用した現場実験を行い良好な特性を得た。その結果は報道発表を行うとともに、同分野で最も権威のある国際会議 OFC/NFOEC 2010 にポストデッドラインペーパーとして採択された。さらに、その内容は IEEE Journal of Lightwave Technology への招待論文として掲載された。これらの進展は、当初の予想を上回る物であり、提案技術の完成度を当初の予想より高めることができた。また、本研究課題に関する特許出願は国際特許 2 件を含め、18 件を出願した。予想を上回る達成度を得た。

得られた成果の意義等の自己評価

本研究課題「超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術」では、Green IT の重要性が世界的に広く認識される時代に先駆けて、産・学の密接な連携により研究を加速することが出来た。そのため、世界をリードする技術開発が数多く達成できたと考えている。また、国際会議／国際ワークショップでのプレナリー／キーノート講演 6 件を含め、国際会議／国際ワークショップでの招待講演数は 20 件を超える。ルータを中心とするレイヤ 3 の技術では米国主導であったが、日本がこれ迄国際的にも先導してきたフォトニックネットワーク技術を核として、本研究で得られた成果を今後さらに発展させることにより、新しい世代の通信機器開発の分野で世界を主導するための重要な技術開発になったと考えている。

研究代表者としてのプロジェクト運営について

日本が技術開発で先導的役割を果たしてきた光通信ネットワークの分野において、エコロジカルな観点からの革新的ネットワーク構想を世界に先駆けて示すことが出来たと考えるが、この種の研究はチャレンジングな内容を数多く含み、実用性を検証する上でも単一の組織で全てをカバー出来るものではない。その意味で産学連携により関連分野の優れた人的並びに設備的なリソースを結集し、短期的な収支に囚われずに検討を進めることができた意義は大きいと考えている。また、プロジェクトの運営も技術の課題に集中できたので、何の問題もなく効率的に進めることができた。研究期間中に開催された組織間での研究打合せは延べ 54 回であり、参加人数は延べ 535 人にのぼる。大学においても、本プロジェクトには延べ 30 名を超える大学院生が参加し、企業の第一線の研究者との議論を通じ、多くの者が著しい成長を遂げた。将来を担う人材の育成上も極めて効果的なプロジェクトで有った。

写真等

研究開始時メンバー(2005 年ミーティングにて) 多階層クロスコネクト伝送デモ実験(準備中)



多階層クロスコネクト伝送デモ実験(機器調整中)

