

## 「第 24 回 独創性を拓く先端技術大賞」

### 次世代 PLZT 超高速光スイッチによる

### 10Gbps 光アクセスネットワークの研究開発

慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻  
修士課程 2 年 山中研究室 徳橋和将

## 序論・概要

昨年の 12 月, 日刊工業新聞に「家庭用光ファイバ通信サービス (FTTH: Fiber To The Home) に向け, 次世代の 10Gbps 光アクセスネットワークの研究開発」という記事が載った. これは, 大学院修士課程在籍時に, 慶應義塾大学と日立製作所が共同で行った研究成果で, 私は本プロジェクトに学生の代表として参加し, いわば私の学部, 大学院修士課程の集大成である.

これは 4 年前から慶應義塾大学と米国のベンチャ企業と共同で開発した 10nsPLZT 光スイッチを応用した, 世界で初めてアクティブデバイスである光スイッチを用いて通信事業者と各家庭との間を結ぶ光ファイバの分岐を行う光アクセス網 (ActiON:Active Optical Network) の研究開発である. ActiON では分岐にスイッチを用いることにより, 通信時の信号電力低下を抑制できるため, 現在の FTTH で用いられる通信方式 (PON:Passive Optical Network) と比較して, 2 倍の通信距離 (40km), 4 倍の収容 (128 加入者) が可能である. そして試作システムを用い, 通信距離 40km, 128 加入者を収容する環境において, 速度 10Gbps の通信を世界に先駆けて成功した. 本論文では私が携わった慶應側の研究であり, 提案システム実現のために必要不可欠な PLZT 超高速光スイッチおよびアクティブ型アーキテクチャに対応する新たな回線制御技術の研究開発について述べる.

そして慶應発のベンチャとして PLZT 光スイッチを PLZT 導波路技術の研究開発の実績を持つ EpiPhotonics 株式会社 (代表取締役社長/梨本恵一) [1]にライセンスし, 同社より PLZT 超高速光スイッチサブシステムの外販を開始, また昨年 12 月に報道発表を行った. さらに, 新たな回線制御・伝送技術については世界に先駆けた 10 ギガビット級光アクセスシステムの実用化に向け, 国際標準化も視野に入れ, 国内および国際特許申請を行った.

## 1. 現在の光アクセスネットワーク

日本において FTTH サービスは世界に先駆け 2001 年に開始され, 2009 年には加入者数が 1500 万世帯を超えた. 現在, 全ブロードバンドサービス (FTTH, ADSL, CATV) の加入者数では 3000 万世帯を超え, FTTH サービスは最も代表的なブロードバンドサービスである [2, 3].

以上のように、国内光アクセスシステムはFTTH技術の導入により多国に類を見ないブロードバンド化を実現したが、技術開発が進展することにより地域間での通信サービスの格差（デジタルデバイド）問題が発生している。またユビキタスネット社会を目指した通信のブロードバンド化やサービスの多様化が更に急速に展開しており、利用者が大容量の映像情報などを送信する要求の増大に対応する、10ギガビット級光アクセスシステムの実用化が急務である。諸問題を解決するために、現在FTTH技術として用いられるPONを基本とする光アクセスシステムの延長ではない、スイッチング機能を取り入れたアクティブ型の新たな光アクセスシステムActiONの研究を行った。

## 2. PONとActiONの比較

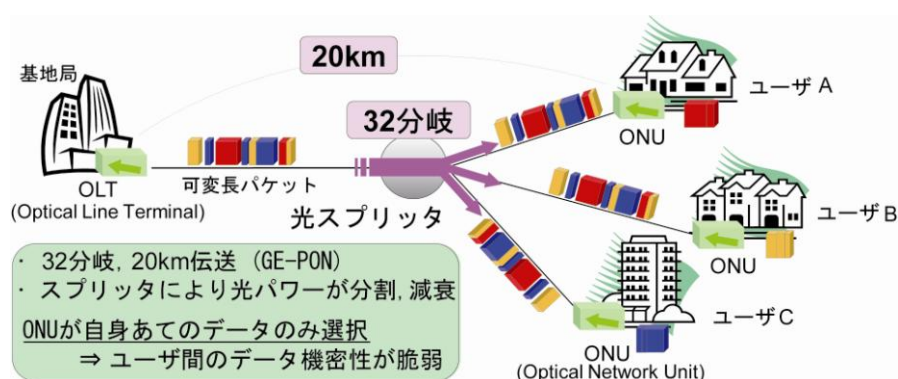


図1 PON (Passive Optical Network)

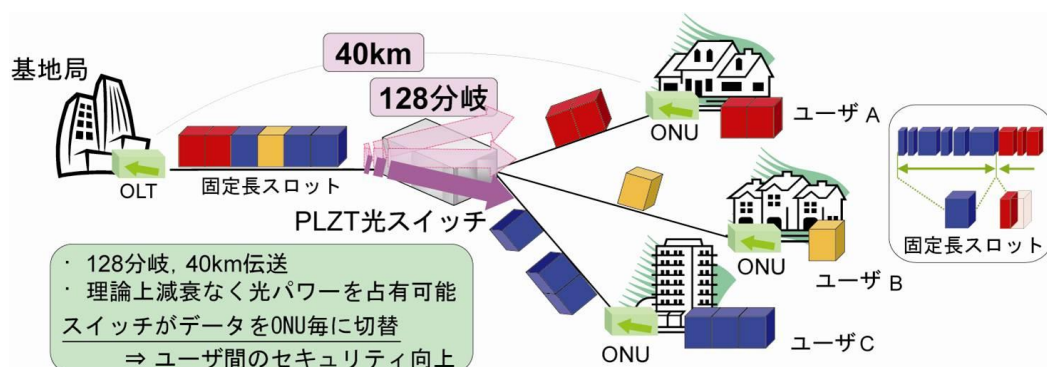


図2 ActiON (Active Optical Network)

図1に現在普及しているPON、図2に提案するActiONのアーキテクチャを示す。PONは局側装置である光回線終端装置(OLT:Optical Line Terminal)、加入者側装置である、光回線端末装置(ONU:Optical Network Unit)、光スプリッタから構成される。1台のOLTが複数のONUを収容するツリー型トポロジを構成する。現在広く普及しているGE-PON(Gigabit Ethernet-PON)では、通信速度1Gbps、収容加入者数32、伝送距離20kmまでを想定する。また、2009年9月には通信速度10Gbpsを実現する10GE-PON(IEEE 802.3av) [4]の標準化も完了した。PONの利点として、安価なパッシブデバイスである光スプリッタを用いるため、低コスト、電源不要であることが挙げられる。一方で、光スプリッタで光パワーを均等分

配するため、分岐した各 ONU への光パワーが弱まり、OLT の収容可能加入者数が 32、OLT-ONU 間の伝送距離が 20km までに制限され、拡張が困難である。また、OLT から送信されたすべての光信号が各 ONU に伝送されるため、加入者間の回線秘匿性に関して原理的限界がある。

一方 ActiON では、光スプリッタではなく光スイッチを用いて各 ONU へと分岐を行うことで、利用者単位で光信号の送受が可能なシステムとなる。そしてスイッチング動作により該当利用者以外には物理的に信号が届かないため、回線秘匿性は極めて高く、光信号の強度低下を抑え、伝送距離および収容加入者数の増加を可能にする（40km、128 加入者）。従来の PON では収容できなかったエリアをカバーし、デジタルデバインドなど地域格差の解消が期待できる。さらに、多くの ONU を同時収容し OLT 数を低減することで、PON と比較して、通信時の信号電力低下を抑制し、省エネへ貢献することも可能である。

次節からは提案システムを実現するために不可欠な、PLZT 超高速光スイッチ、双方向アクティブ回線制御技術について述べる。

### 3. PLZT 超高速光スイッチ

10Gbps 通信に対応可能な、10ns 以下での高速スイッチングを実現した埋め込み型 PLZT (Pb, La) (Zr, Ti)O<sub>3</sub> 導波路光スイッチを世界で初めて開発した。本研究では超高速光スイッチを 10Gbps ONU 単位で切替えるための、超高速光スイッチエレメントの基本構造設計を行った。具体的には、波長に対する屈折による放射損失や偏波特性、消光比といった光信号に関する特性と駆動電圧や応答時間、同期制御といった光スイッチドライバ開発に必要な要素を考慮し、(1) PLZT 光導波路の構造設計及び (2) 光スイッチの構造設計を行った。

#### 3.1 PLZT 光導波路の構造設計

PLZT 光導波路の構造設計における設計目標は、挿入損失 20dB 以下、スイッチング速度 10ns 以下である。最初に PLZT の組成の検討を行った。電気光学効果のモード依存性の小さい組成として、バッファ層として PLZT (9/65/35)、導波路層として PLZT (3/58/42) を選択し、実測値も期待通りの電気光学係数が得られることを確認した。

次に導波路構造の検討を行った。第一に、従来のリッジ型で生じるリッジ側壁部の電極による光吸収損失、および斜め電界成分による偏波依存を改善するため、電極と光電界の隔離、および上部電極斜め電界成分の低減を可能とする逆リッジ型構造(図 3)を採用した。PLZT バッファ層、PLZT 導波路層、PLZT クラッド層の屈折率を用い、スラブ導波路のモード計算を行うと、膜厚約 1.6 $\mu$ m 以下ではシングルモードが得られると予想される。光導波路との結合損失を低減するため、通常はこの範囲で導波路を厚くすることが望ましいが、ある程度以下に薄くすると閉じ込めが弱くなるために逆にモード径が広がり結合損失を低減することが可能である。

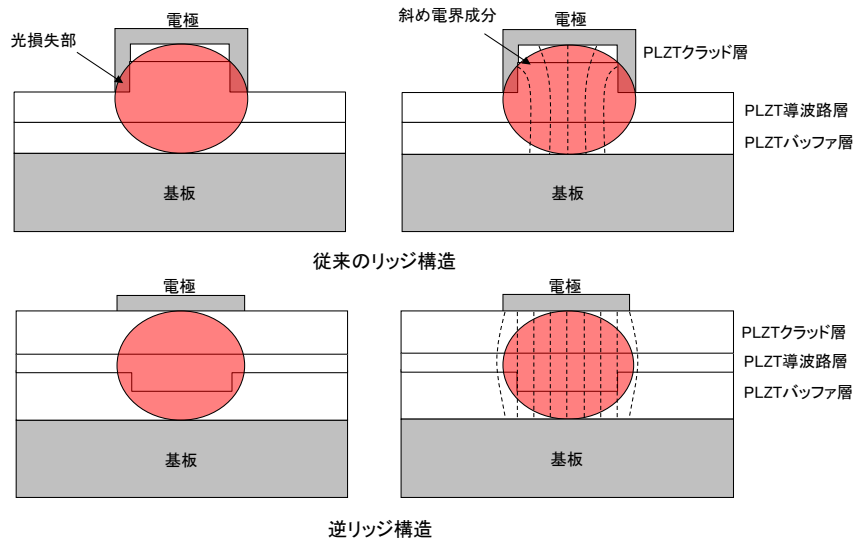


図3 リッジ型構造と逆リッジ型構造

しかしながら、逆リッジ型構造においても電極における損失が大きいという問題や不均一電場により偏波依存が生じ易いという問題がある。そこで次の段階として、PLZT 導波路層を PLZT クラッド層の内部に埋め込んだ、埋め込み型構造を提案した。PLZT 導波路層を埋め込んだことにより、電極による損失を排除することができ、電場も均一になるため偏波依存が発生しない。埋め込み型導波路を作製する上で、溶液層をリッジより厚くすることができないためにブロックされてしまうことが問題となるが、この問題を解決するための作製プロセスを確立した。この埋め込み型構造 (図4) を採用することにより、切換え速度 10ns 以下に加えて、従来のリッジ型の約 1/2 の挿入損失特性と偏波無依存性を達成することができた。

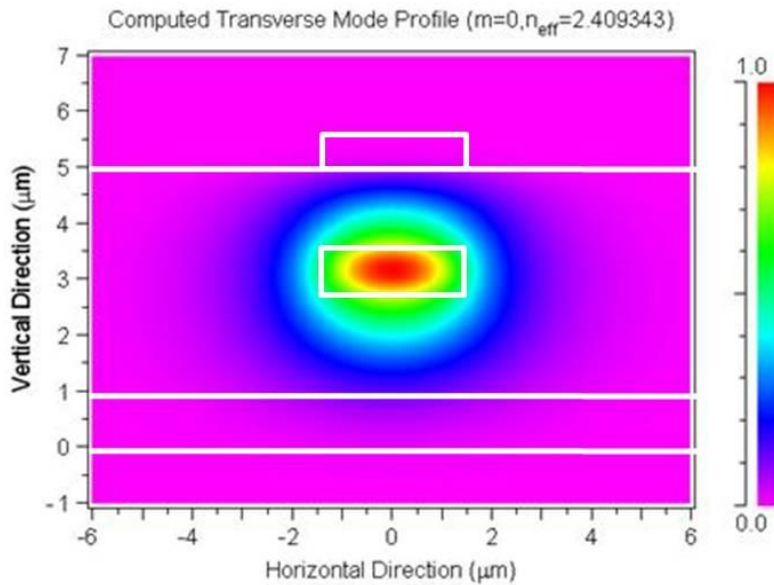


図4 埋め込み型構造

### 3.2 光スイッチの構造設計

スイッチの構造設計に関して、低電圧駆動で高速化でき、かつ高い消光比が得られる光スイッチの方式として、DC型とMZ型を比較検討した。その結果、MZ型は、電気光学効果を $21\text{pm/V}$ 、膜厚を $5.36\mu\text{m}$ とすると、駆動電圧は $9.2\text{V}$ となることが予想され、DC型の73%の電圧でスイッチングが可能となることが期待できる。また、電圧を $10\text{V}$ と固定した場合、スイッチングに必要な電極長はDC型の73%となり、RC時定数も同様に73%とすることが可能となることがわかった。この結果に基づき、MZ型を採用した $1\times 2$ 光スイッチエレメントの設計を行った。MZ型の場合、結合器/分配器に挟まれる位相変調器へ理想的には結合器/分配器に挟まれる位相変調器へ理想的には電極をひとつ設けることによってスイッチングが可能であるが、電極をふたつ設けることによって作製誤差補正を可能とする。結果として、図5に示すような $1\times 2$ 光スイッチエレメントの構造設計ができた。出力ポート間距離は約 $130\mu\text{m}$ 、エレメント幅は約 $7500\mu\text{m}$ となった。この $1\times 2$ 光スイッチエレメントを多段に接続することで $1\times 8$ 以上の光スイッチの開発を行うことができる。

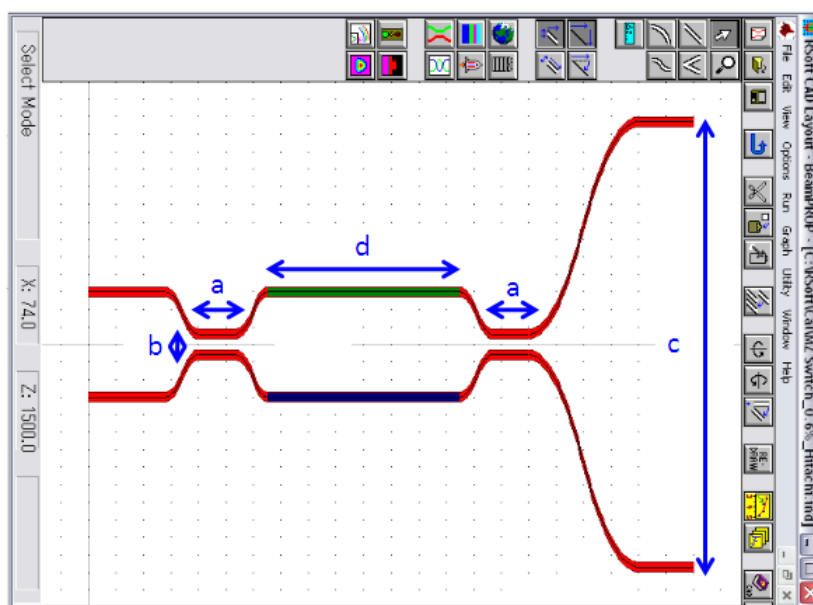


図5  $1\times 2$ 光スイッチエレメントの設計

上記の研究開発成果に基づき埋め込み型導波路を使用したMZ型の $1\times 8$ 光スイッチチップ（図6）及び光スイッチドライバ（図7）を開発し、光スイッチングサブシステムを試作した。以上、128利用者の分配を実現するための超高速光スイッチエレメント設計技術、超高速光スイッチングに必要とされるドライバ制御方式を確立することができた。

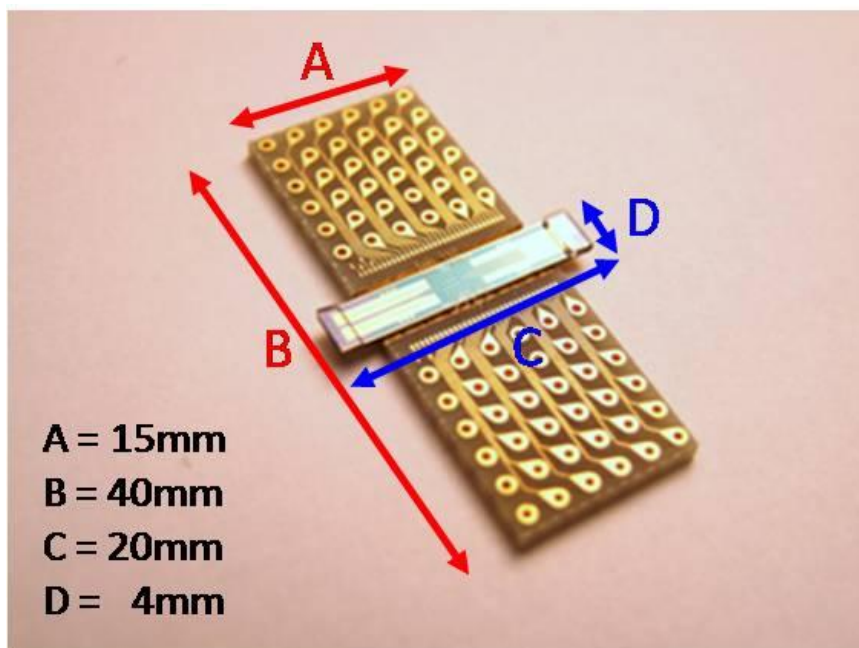


図 6 1×8 PLZT 導波路光スイッチのチップ



図 7 開発した PLZT 導波路光スイッチングサブシステム

## 4. 双方向アクティブ回線制御技術

ActiONでは、光スイッチの構造の単純化およびトランスペアレントな伝送の実現を狙い、フレーム毎ではなく、固定時間長のスロット単位での切替えを行う（図2）。光スイッチ部において電気変換処理によるフレームのあて先解析を行わずに、OLTはデータ転送に先立ち各ONUに対して使用するスロットを割当てて、そして光スイッチは割当スケジュール通りに自走して切替えを行う方式である。

信号送受の制御の機能としては、OLTと光スイッチ間での信号衝突の防止、またONU毎のスループットを動的に制御することである。これらの機能を実現するため、(1) リモートから光スイッチのスロット割当てを制御する方式、OLTと光スイッチ間での同期方式を提案する。またOLTと距離の異なる各ONU間で同期を行うディスカバリ・レジスト・レンジング処理（以下、ディスカバリ処理）に関して、(2) 光スイッチを介して回線を確立するための新たな手法を提案する。

### 4.1 PLZT スイッチシステムの制御方法

図8に光スイッチシステムの構成例を示す。リモートからの光スイッチのスロット割当てに関して、SA (Slot Allocation) メッセージによる制御法を考案する。Slot Allocation ModuleはRAMとFPGAを搭載し、SAメッセージのスロット割当て情報をRAMに書込み、RAMから適切なスイッチングシグナルをSwitch Driverへ送る。光スイッチは、その割当てに従ってスイッチの出力を切替える。SAメッセージには、1フレーム内の各スロットに対して切替え先を示したビットマップが格納される（図9）。1フレーム当たり256スロットに対応するために、PONで制御に使用される64byteのMPCP (Multi-Point Control Protocol) frame[5]を280byteに拡張した。各スロット用に8bitを割当て、0x00:切替え無し、0x01: ONU1に切替え、0x02: ONU2に切替え…0x80: ONU128に切替えとなる。また上下の各スイッチ用に、タイプを0x880Cと0x880Dと使い分ける。新たなビットマップを保持したSAメッセージをOLTから受信すると、それに合わせて光スイッチの切替え順序を更新する。再度SAメッセージを受信するまでは、設定されたスロット割当てスケジュールを繰り返す。以上のようにSAメッセージにより、光スイッチの切替え順序を動的に制御し、帯域割当てを実現することができる。スロット#0は次節で述べるディスカバリ手法で用いる。

OLTと光スイッチ間で同期を取るために、RESETおよびSYNCメッセージを用いる。OLTは起動時に光スイッチへRESETメッセージを送信し、光スイッチの切替え動作開始を指示する。光スイッチはRESETメッセージを受信した時間からスロット割当てスケジュールの切替えを開始し、ACKメッセージをOLTに送り同期を行う。また光スイッチは定期的にSYNCメッセージを送信し、OLTは同期時からのずれ $\Delta t$ を算出する。 $\Delta t$ が一定値を超える場合、OLTは再同期のためにRESETメッセージを再送信する。

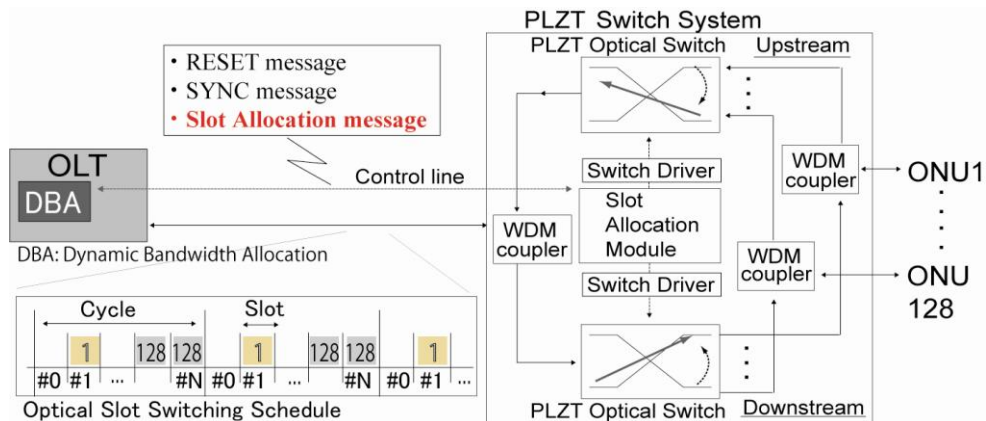


図8 光スイッチシステムの構成例

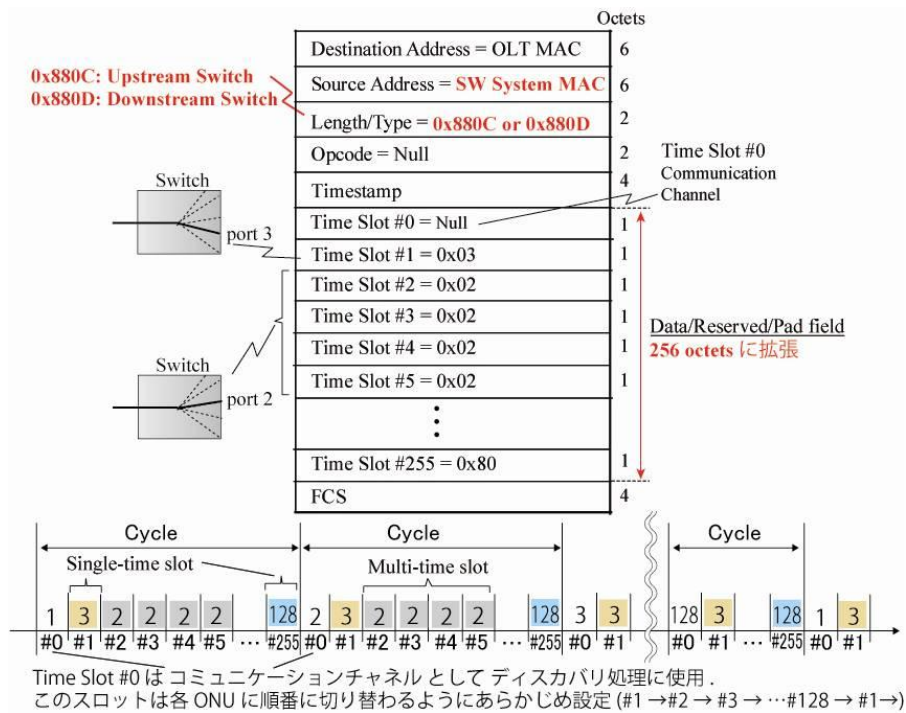


図9 Slot Allocation メッセージ

## 4.2 ディスカバリ処理

PONではOLTと距離の異なる各ONU間で通信前に同期を行うディスカバリ処理が必要になる。本処理により、OLTが各ONUとの距離を把握し、双方向回線を確立する。しかし光スイッチを用いたアクセス網においては、光スプリッタによるBroadcast転送を行わないため、MPCPにて定義されるPON方式のディスカバリ処理[5]を実行することは難しい。そこで光スイッチを介して回線を確立するための新たなディスカバリ手法を提案した。提案方式では、周期的にコミュニケーションチャンネルと呼ばれる区間を設け（図9）、ONU側からRegister Requestメッセージの連続送信を行い、自身のコミュニケーションチャンネルを把握する。こ



れにより、ONUからOLTへのメッセージ送信が実現し、回線を確立することが可能となる。

図10に具体的な提案ディスカバリの手順を示す。OLTはDiscovery Gateメッセージを下りコミュニケーションチャンネルに合わせて周期的に送出する（下り通信に関しては前述したRESETおよびSYNCメッセージによる光スイッチとの同期により、問題なくメッセージが通過する）。Discovery Gateメッセージを受信したONUは、PONではランダム時間後に一回Register Requestメッセージを送信するが、提案方式では即座にメッセージを連続送信する。連続送信により、いくつかのRegister Requestメッセージが光スイッチを通過しOLTに到達するため、光スイッチの切替タイミングに関わらずディスカバリ処理を行うことが可能となる。その後、RegisterメッセージによるONU登録フェーズへ移行する。

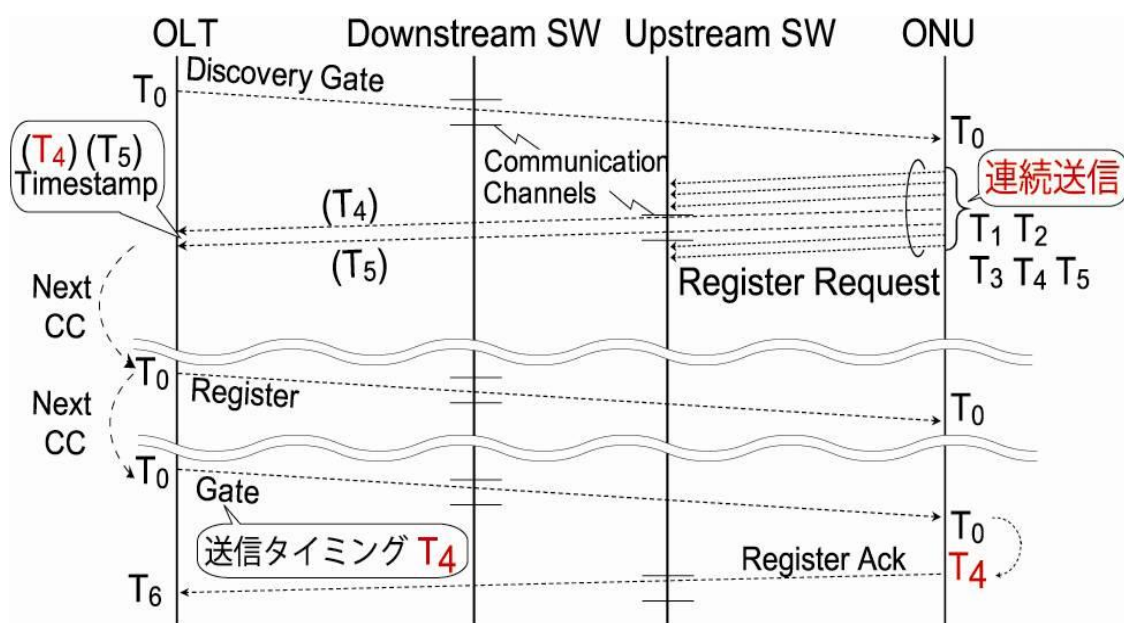


図 10 ActiON のためのディスカバリ手法

なおコミュニケーションチャンネルの位置をより正確に把握するために、連続送信開始のタイミングをPON方式における最小単位（16ns）でずらし、本プロセスを複数回繰り返す方式も提案した（図11）。OLTはディスカバリ処理毎に $T_1, T_1+1TQ, T_1+2TQ, T_1+3TQ \dots$ とRegister Requestメッセージの送信開始タイミングをずらすように、ONUへ指示を行う。図11より、ディスカバリ処理を複数回行うことで精度を改善可能であることが分かる。

また上記の提案プロトコルの動作検証を行うため、図12に示す実験系を構築し、ディスカバリからデータ送信までの一連の動作を確認した。映像ストリーミングサーバからユーザ端末へのUDP（一方向通信）によるストリーミング配信、ユーザ端末によるファイルサーバからのHTTP（双方向通信）によるコンテンツダウンロードが正しく実行でき、提案プロトコルの妥当性を確認することができた。

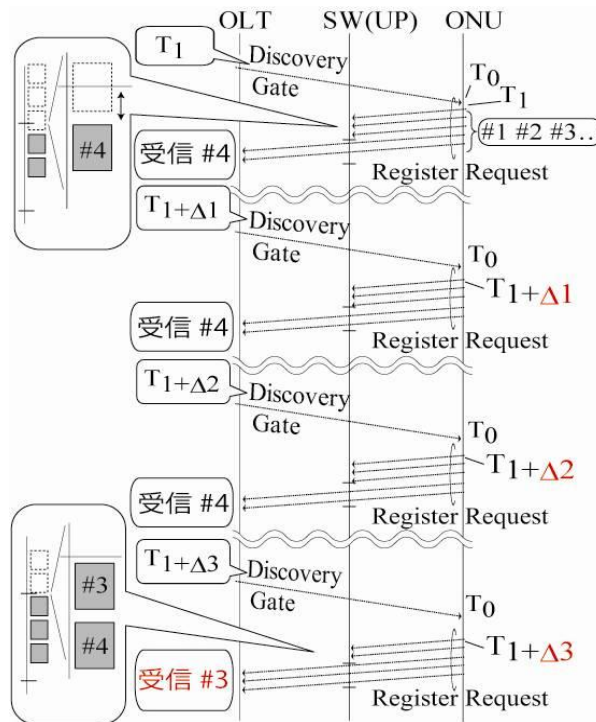


図 11 より高精度なディスカバリ処理

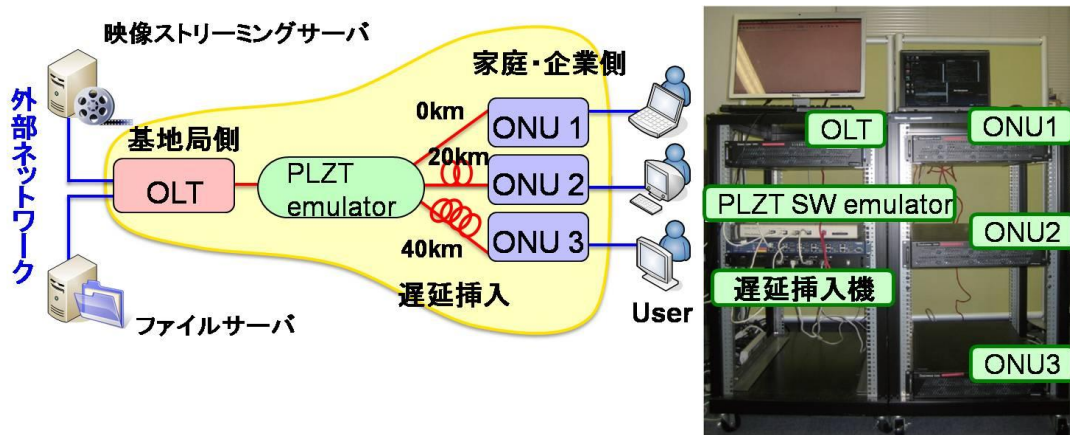


図 12 実験系と実験装置

## 5. 本研究の成果

PLZT 光スイッチについては、慶應大学発のベンチャとして EpiPhotonics 社に合流して PLZT 光スイッチサブシステム(図 7)を開発し外販を開始,そして報道発表を行った(図 13). さらに慶應テクノモール 2009 にて動態デモ展示(図 14)を行うことで開発した光スイッチの動作を実際に見てもらい,また PLZT 光スイッチの関連記事が複数社の新聞に掲載され様々な場で研究成果を広くアピールすることができた. 今後,本研究のターゲットであるアクセス系に限定せず,PLZT 光スイッチのメトロおよびコア系への適用も検討する.

またディスカバリ処理等の回線制御技術についても、提案プロトコルを実装した実験システムを国際会議 IPOPOP2009 (IP + Optical network) や慶應テクノモール 2009 において実演し、研究成果を広くアピールした。さらに国内および国際特許を出願し、世界に先駆けたアクティブ型光アクセス網の実現に向け、本手法の国際標準化への期待を高めることができた。私が携わった大学側の成果を表 1 に示す。そして共同研究先である日立製作所により、PLZT 光スイッチを用いた試作システムを開発し、通信距離 40km, 128 加入者を収容する環境において、速度 10 ギガビット/秒の光アクセス通信を実現した。

Figure 13 is a collage of images related to the development of PLZT optical switches. It features a technical data sheet for the EpiPhotonics EPP-01028 switch, a photograph of the physical device, and several newspaper clippings in Japanese. One clipping has the headline "電極損失を半減" (Halving electrode loss) and another says "「アクセス系 光通信」新スイッチで距離倍に" (New switch for access optical communication doubles distance).

EpiPhotonics	
1x2 程高集積光スイッチ: EPP-01028	
製品名	1x2 程高集積光スイッチ
品番	EPP-01028
製造年月	2009年11月
製造場所	東京都中央区
製造方法	半導体プロセス
パッケージ	1x2 程高集積光スイッチ
動作電圧	1.5V (V <sub>DD</sub> )
動作電流	100 μA (typ.)
動作温度	0°C to 70°C
寿命	> 10 <sup>10</sup> cycles
信頼性	100% (1000 cycles)
応答時間	10 ns
消費電力	15 mW (typ.)
寸法	10.0 mm (W) x 10.0 mm (D) x 2.0 mm (H)
重量	0.1 g (typ.)
材料	PLZT
製造会社	EpiPhotonics Inc.
お問い合わせ先	〒100-0001 東京都中央区本町1-1-1 EpiPhotonics Inc. 営業部
電話	03-5561-0700 (受付時間: 9:00~17:00)
ファクシール	03-5561-0701
ウェブサイト	http://www.epiphotonics.com
お問い合わせ先	〒100-0001 東京都中央区本町1-1-1 EpiPhotonics Inc. 営業部
電話	03-5561-0700 (受付時間: 9:00~17:00)
ファクシール	03-5561-0701
ウェブサイト	http://www.epiphotonics.com

図 13 PLZT 光スイッチ開発の成果

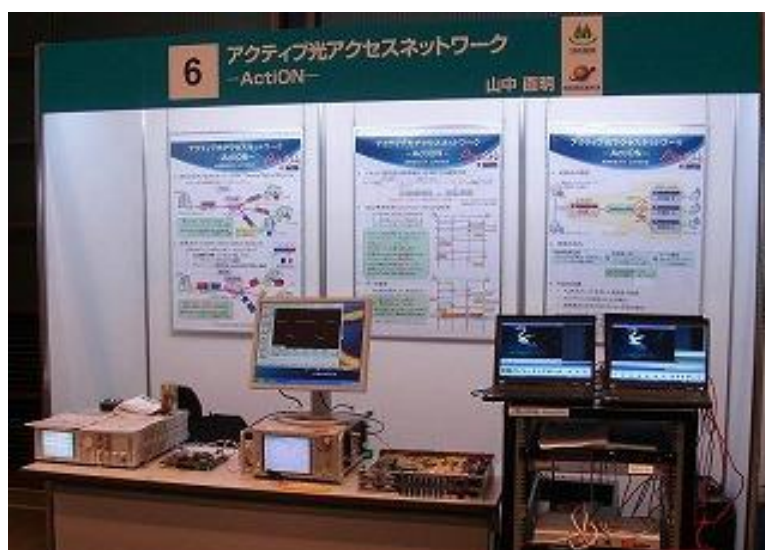


図 14 慶應テクノモール 2009 動態展示デモ

表 1 研究成果

特許出願（国内）	2
特許出願（国際）	1
研究論文	2
国際会議予稿等	4
研究会	3
報道発表	2
展示会（学外主催）	6
展示会（学内主催）	2

※投稿中含む

## 6. むすび

次世代の 10Gbps 光アクセス網の実現を目指し、現在の FTTH で用いられる通信方式 PON と比較して、2 倍の通信距離（40km）、4 倍の収容（128 加入者）を可能とするアクティブ型の 10Gbps 光アクセスシステムの研究開発を行った。

実現のためのキーデバイスである PLZT 導波路光スイッチを世界で初めて開発し、現在では EpiPhotonics 社にライセンスを行い、PLZT 超高速光スイッチサブシステムの外販を開始するまでに至った。

そしてアクティブ型アーキテクチャに対応する新たな回線制御・伝送技術を提案した。提案手法を実装した実験系による動作検証から、提案プロトコルの有効性を確認した。さらに国際標準化を視野に入れ、国内および国際特許申請を行った。

本研究により, アクティブ型の 10Gbps 光アクセスシステム実現可能性が高まり, 今後, 地域格差問題の解消やスイッチングによるセキュリティの向上から家庭向け以外のサービスへの適用等光ファイバ通信サービスの更なる普及に貢献することが期待できる.

私は修士課程修了後も, 引き続き博士課程に進学し, 本プロジェクトでの貴重な経験を生かして, 実用化に向け研究開発に従事していく. またそれだけではなく, PLZT 光スイッチを共同開発した EpiPhotonics 社等の最先端技術を扱う海外ベンチャー企業へのインターンシップや留学を通して, 海外での重要な経験を積みたいと考えているため, 今回の先端技術大賞の応募に至った. そして, 大賞を受賞したあかつきには, 是非とも, 頂いた研究奨励金により海外インターンシップおよび留学を実現し, 社会に貢献できるグローバルな知識, 能力を身につけたい.

## 謝辞

本発表内容は, 総務省が進めるフォトニックネットワークに関する研究の一環である, (独)情報通信研究機構の委託研究「集積化アクティブ光アクセスシステムの研究開発」の成果である.

## 参考文献

- [1] EpiPhotonics Corp. <http://epiphotonics.com/>
- [2] 株式会社 MM総研 News Release  
<http://www.m2ri.jp/newsreleases/main.php?id=010120091119500>
- [3] Paul W. Shumate, “Fiber-to-the-Home: 1977-2007,” JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY., pp.1093-1103, Vol. 26, No.9, May 1. 2008.
- [4] IEEE 802.3av 10G-EPON Task Force, [Online]. Available:  
<http://www.ieee802.org/3/av/index.html>
- [5] IEEE 802.3av, “Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, 77.3 Multipoint Control Protocol (MPCP),” Oct. 2009.
- [6] 徳橋和将, 菊田洸, 石井大介, 荒川豊, 岡本聡, 山中直明, “アクティブ光スイッチを用いた光アクセス網の一検討,” 信学技報, PN2008-22, pp. 49-53, August 2008.
- [7] Kazumasa Tokuhashi, Kunitaka Ashizawa, Daisuke Ishii, Yutaka Arakawa, Naoaki Yamanaka and Koji Wakayama, “Secure and Scalable Optical Access Network using PLZT High-speed Optical Switches,” HPSR (High Performance Switching and Routing) 2009, No. 6-2, June 2009.