

1. 研究課題・実施機関・研究開発期間・研究開発予算

- ◆課題名 : エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究開発
- ◆個別課題名 : 課題イ エラスティック光メディアアクセス技術
- ◆副題 : 多様なサービス、多様なネットワーク構成を実現する伸縮自在光メディアアクセス技術
- ◆実施機関 : 日本電信電話株式会社 (代表研究者)、沖電気工業株式会社、株式会社日立製作所、学校法人慶應義塾
- ◆研究開発期間 : 平成24年度から平成28年度 (5年間)
- ◆研究開発予算 : 総額529百万円 (平成28年度93百万円)

2. 研究開発の目標

平成28年度末までに異なる性質のトラフィックを、伸縮自在(エラスティック)な帯域を有する光パスを駆使して、平時にはグリーン・効率性に優れ、災害時にも物理リソースを組み替えてライフライン維持に資する新しいメトロ・アクセス統合光ネットワークを実現する。

【課題イ:エラスティック光メディアアクセス技術】の研究開発課題と担当

課題イー1 距離・リンク数スケールフリーアグリゲーション技術の開発

課題イー1-1: OLT内動的帯域割当機能の高度化 (日本電信電話(株))

課題イー1-2: エラスティック光信号パラメータ制御方式の検討 (沖電気工業(株))

課題イー1-3: エラスティック光メディアアクセス統合リソース制御技術の開発 ((株)日立製作所)

課題イー1-4: OLT間動的帯域割当機能の検討 (慶應義塾)

課題イー2 マルチサービス・QoSアグリゲーション技術の開発

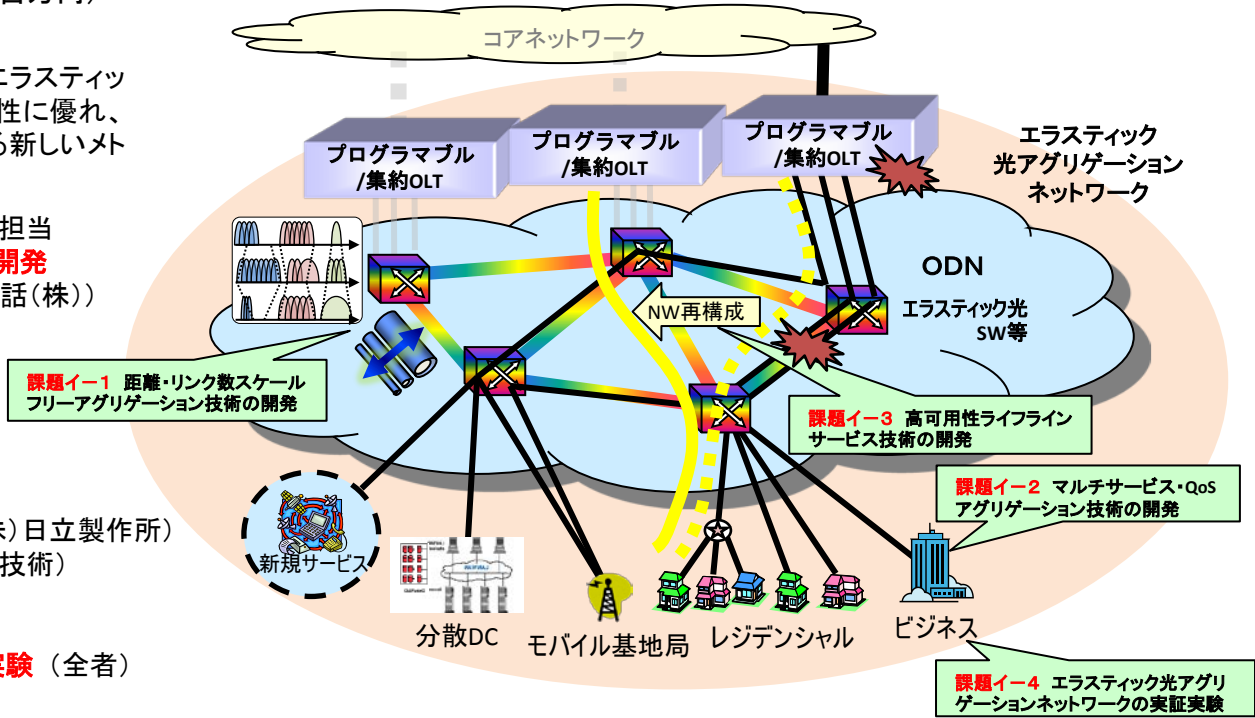
課題イー2-1: マルチサービス制御方式の検討、および実装 ((株)日立製作所)

課題イー2-2: マルチサービス収容アーキテクチャの検討 (慶應技術)

課題イー3 高可用性ライフラインサービス技術の開発

課題イー3-1: 高可用アグリゲーション網の構築 (慶應義塾)

課題イー4 エラスティック光アグリゲーションネットワークの実証実験 (全者)



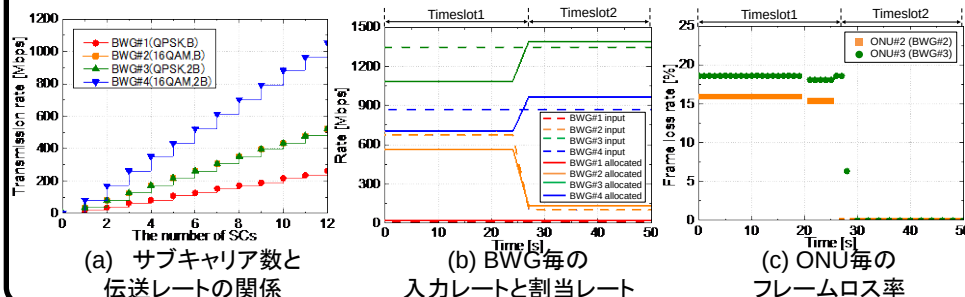
3. 研究開発の成果

- 【イー1-1】 考案した動的帯域割当アルゴリズムをハードウェア実装し、伝送パラメータが異なる複数ONU間でフレームロス率の公平制御動作を実現した。
- 【イー1-2】 ユーザの要求帯域や距離に応じて伝送パラメータを制御するアルゴリズムを提案。従来方式と比べ、帯域利用効率が2割以上改善することを確認。
- 【イー1-3】 下りOFDM方式、上りWDM/TDM方式の光アクセスシステムにおいて、ONU初期接続時の光パラメータ設定動作、グループ毎伝送容量切替動作を実証した。
- 【イー1-4】 論理OLT256台・論理ONU65,536台に対応可能な網構成、および論理OLTマイグレーション機能を用いた省電力OLT間動的帯域割り当て機能を確立した。
- 【イー2-1】 下りOFDM方式、上りWDM/TDM方式の光アクセスシステムにおいて、マルチサービス収容動作、容量可変な光パスでのフレームロス無し通信を実証した。
- 【イー2-2】 サービスアダプテーションレイヤ、MACフレーム、通信チャネル、OAM機能、ONU Discovery手法を決定し、マルチサービス収容技術を確立した。
- 【イー3-1】 災害時等における通信路確保手法として、TDMA型サービス救済および光アドホック方式の2種類を策定し、実験および理論的評価により有効性を検証した。
- 【イー4】 課題アと連携して構築したエラスティック光アグリゲーションネットワークの実機検証系により、OLT故障発生時の冗長系への動的切替動作の検証に成功した。

イ-1-1 OLT内動的帯域割当機能の高度化

研究開発成果: 動的帯域割当アルゴリズムと波長切替プロトコルの実機検証
課題イ-1-3と連携して、考案アルゴリズムをハードウェア実装し、エラストティックOFDM-PONを用いた実機検証を行い、最終目標を達成した。また、波長切替プロトコルについては、目標通りWDM/TDM-PONにて実現した。

- 異なる伝送パラメータ(多値度とシンボルレート)に設定された帯域幅グループ(BWG)毎に割当サブキャリア(SC)数を変更した場合に、割当SC数に比例して伝送レートが変化することを確認した。(図a)
- BWG毎に割当レートを動的に制御することで、異なるBWGに所属する複数ONU間のフレームロス率の公平制御を確認した。(図b,c)



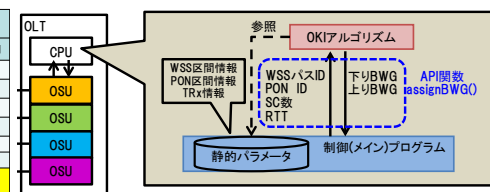
イ-1-2 エラストティック光信号パラメータ制御方式の検討

研究開発成果: 伝送パラメータを適応的に制御する方式を策定

ユーザの要求帯域や距離に応じて伝送パラメータを制御するアルゴリズムを開発。

- モデルネットワークに本アルゴリズムを適用した際の改善効果を試算。パラメータ固定の従来方式と比べ、帯域利用効率が2割以上改善することを確認。
- アルゴリズムを最終実証実験系に即した形に実装。APIを策定。ハードウェア上で実行した際の計算処理時間は210.4μsであることを確認。

パラメータ	WDM (固定パラメータ)		EAAN (可変パラメータ)		アルゴリズム計算結果		
	帯域幅	MAX 距離	帯域幅	MAX 距離	帯域改善率	距離改善率	計算時間
QPSK/32SC	3.2 nm	40km	1.9 nm	40km	39.5%	0 km	4.6ms
QPSK/64SC	6.9 nm	40km	4.0 nm	40km	41.5%	0 km	4.8ms
QPSK/128SC	12.4 nm	40km	9.0 nm	40km	27.6%	0 km	5.8ms
16QAM/32SC	4.0 nm	30km	3.4 nm	40km	15.4%	10 km	5.32ms
16QAM/64SC	6.7 nm	20km	6.4 nm	40km	5.6%	20 km	5.24ms
16QAM/128SC	12.3 nm	10km	11.6 nm	40km	6.0%	30 km	7.2ms
Average	15.01 nm	30 km	12.11 nm	40km	22.6%	10 km	5.49ms



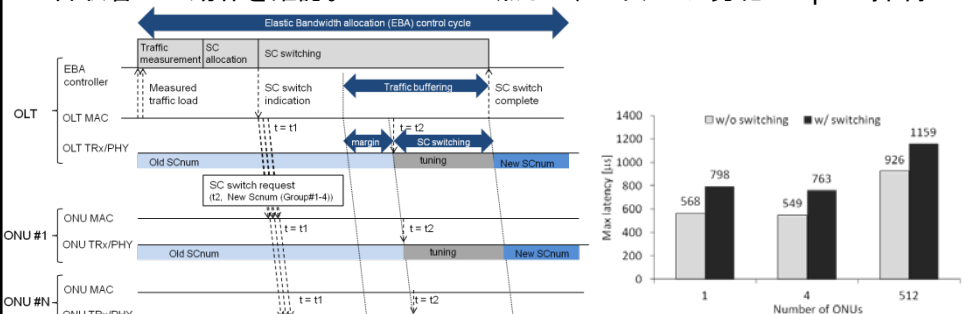
改善効果試算結果

本アルゴリズム実装形態

イ-1-3 エラストティック光メディアアクセス統合リソース制御技術の開発

研究開発成果: ONUのエラストティック光パラメータ設定・切替動作を実証
下りOFDM方式、上りWDM/TDM方式の光アクセスシステムにおいて、ONU初期接続時のパラメータ設定、グループ毎伝送容量切替動作を実証

- ONUが利用する波長、サブキャリア総数、多値数・シンボルレートを自動設定するシグナリングを提案。最大伝送距離40kmの環境での初期登録を実証
- フレームロス無しでのグループ毎サブキャリア数切替動作を実証。ONU512台収容での動作を確認。フレームロス無しで、レイテンシ劣化200μsへ抑制



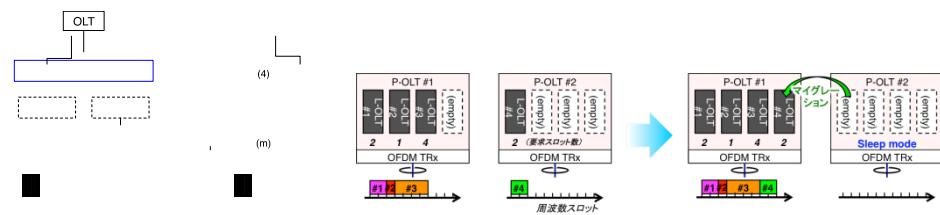
サブキャリア数切替有無での通信特性

イ-1-4 OLT間動的帯域割り当て機能の検討

研究開発成果: スケーラブルなOLT間動的帯域割り当て機能の確立

論理OLT256台・論理ONU65,536台に対応可能な光分配網(ODN)構成、および論理OLTマイグレーション機能を用いた省電力OLT間動的帯域割り当てアルゴリズムを確立した。

- 256 × 65,536構成への拡張も容易な、空間スイッチ型ODN構成を策定
- 省電力OLT間動的帯域割り当て手法について、線形計画法により計算モデルを策定し、ミリ秒程度で求解可能なヒューリスティックアルゴリズムを確立
→ 模擬実験系において、論理OLTマイグレーション機能および課題ア-4・課題イ-1-3における成果装置と連携した動作を確認



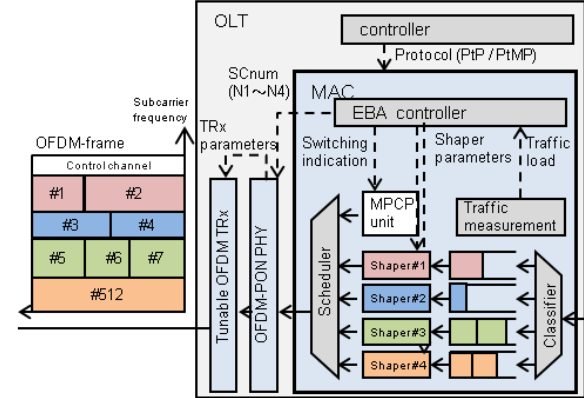
空間スイッチ型ODN構成

省電力OLT間動的帯域割り当て手法

イ-2-1 マルチサービス制御方式の検討、および実装

研究開発成果: マルチサービス収容、容量可変な光パスでの導通を実証
下りOFDM方式、上りWDM/TDM方式の光アクセスシステムにおいて、
マルチサービス収容動作、容量可変な光パスでの通信動作を実証

- 複数プロトコル(PtP/PtMP)での通信によるマルチサービス収容を実証
- グループ毎サブキャリア数が可変な光パスでフレームロス無し導通を実証



容量可変な光パスを実現するOLT構成

各プロトコルでの通信特性

Selected Protocol	PtP	PtMP
US max latency [μs]	75	2021
DS max latency [μs]	570	570

グループ毎サブキャリア数切替
有無での通信特性

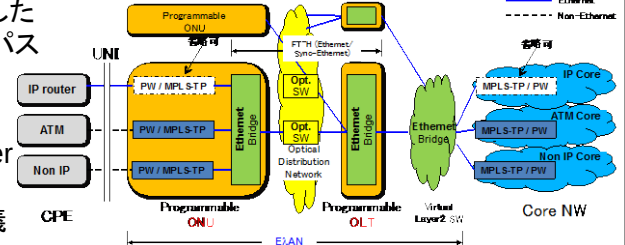
Subcarrier switching	Frame loss ratio	DS Latency [μs]		
		Max	Min	Avg
w/o	0	587	317	431
w/	0	778	293	426

イ-2-2 マルチサービス収容アーキテクチャの検討

研究開発成果: マルチサービス収容に必要な技術の確立

IP、Ethernet、MPLS、ATM、SDHといった各種サービスを、Ethernet-PONをベースとしたシステムに収容するためのアーキテクチャおよびフレームフォーマット等を確立した。

- 各種サービスを収容するためのアーキテクチャとして、**Pseudo Wire (PW) over MPLS-TP over Ethernet** 方式の採用を決定
- ONUからサービスに適した論理OLTへのサービスパス設定を要求するための**Control-Tree**を策定
- PW over MPLS-TP over Ethernet 方式に対する**OAM管理ポイント**を定義
- プログラマブルONU制御用**通信チャネル実現技術**を策定

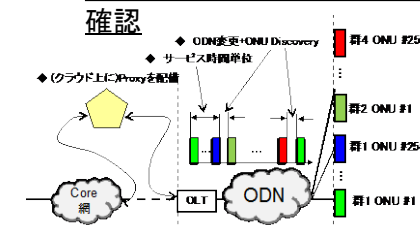


イ-3-1 高可用性ライフラインサービス技術の開発

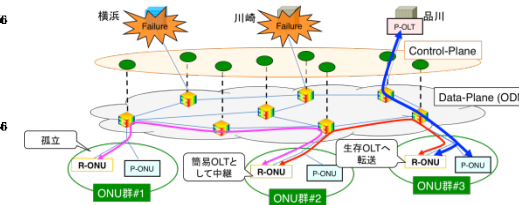
研究開発成果: 大規模災害時における通信路確保技術の確立

リストラクションを超える耐障害性向上手法として、1)TDMA型サービス救済 2)光アドホック方式の2種類について方式を策定し、有効性を検証した。

- 1) 1台のOLTが、収容可能ONU数(256を想定)を超えるONUに対して、**通信時間をTDMAによりONU群毎に割り当てる**ことで、通信路を確保する方式を確立
→ 模擬実験系を構築し、Mbps級のスループット確保が可能であることを確認
- 2) 災害発生時に通信不能となったONU間で**アドホック的に通信路を確立し、バケツリレー方式で生存OLTまでの通信路を確保する**方式を確立
→ シミュレーションにより、OLT連続故障時にもONUを救済可能であることを確認



1) TDMA型サービス救済



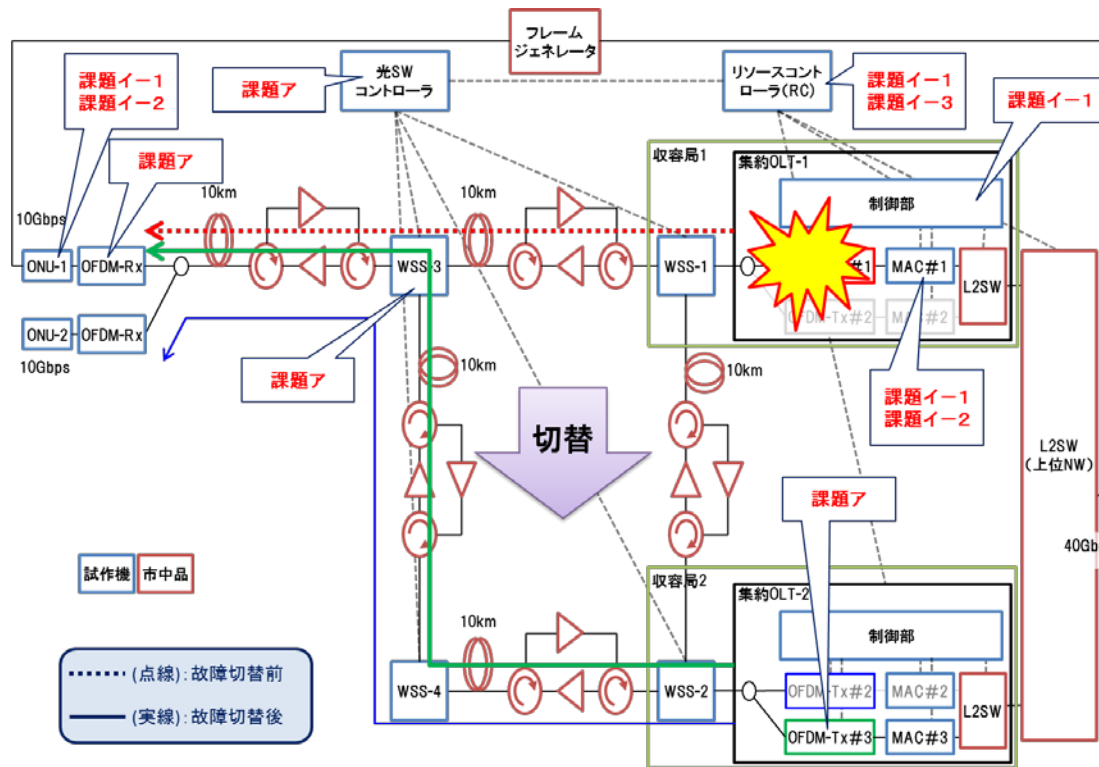
2) 光アドホック方式

イ-4 エラスティック光アグリゲーションネットワークの実証実験

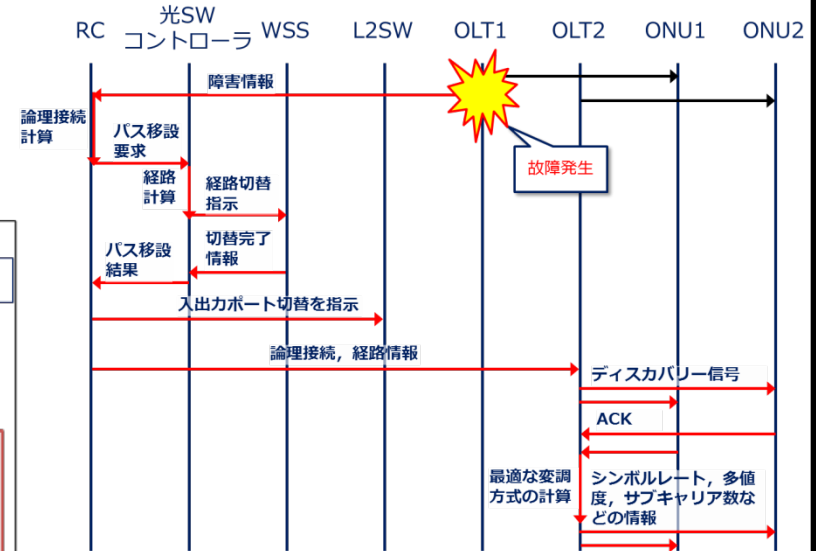
研究開発成果:故障発生時の冗長光経路切替の実機検証

課題イ-1、イ-2、イ-3および課題アの要素技術を組み合わせて構築した実機検証系により、OLT故障発生時の冗長系への動的切替動作を実現し、災害時のライフライン維持に資するメトロ・アクセス統合エラスティックアグリゲーションネットワークの開発に目標通り成功した。

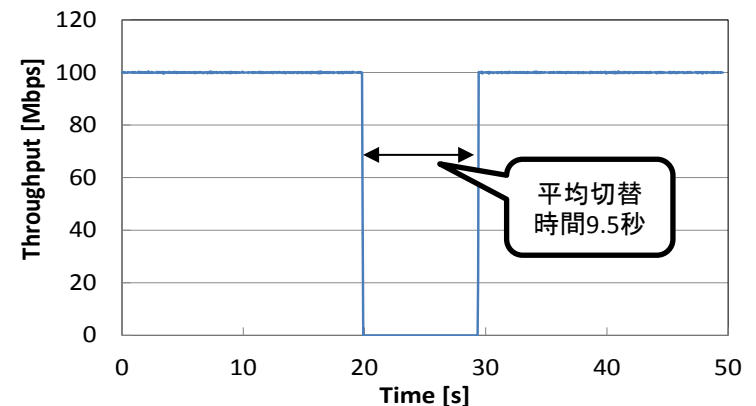
- エラスティックOFDM-PONを実装した実機検証により、伝送距離40 km以上の統合メトロ・アクセスネットワークシステムの構築が可能であることを確認した。
- OLT故障発生を想定した冗長系への切替動作シーケンスを提案し、実機による検証を行った。
- 冗長系への切替動作における平均切替時間は9.5秒であった。これは、システムの動作条件から想定された値とほぼ等しい結果である。



OLT故障発生時の冗長系切替動作の実験構成



OLT故障発生時の冗長系切替動作の動作シーケンス



OLT故障発生時の冗長系切替動作時のトラフィックの経時変化

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース 報道	展示会	標準化提案
エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究開発	27 (3)	3 (0)	8 (2)	90 (20)	8 (0)	33 (11)	3 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 学会発表・国際会議

今年度は、下記国際会議において研究成果の展示を行った。

- 国際会議 IEEE HPSR2016ラボツアー(2016年6月14日@慶應義塾大学新川崎タウンキャンパス)... 研究成果および試作機を展示
(NTT、沖電気工業、日立製作所、慶應義塾大学による共同出展)
- 国際会議 iPOP (2016年6月15-17日@慶應義塾大学日吉キャンパス)... 動態デモンストレーション(慶應義塾大学)
ポスター展示(NTT、沖電気工業、日立製作所、慶應義塾大学による共同出展)
- 国際会議 Net-Centric (2016年10月16-19日@ワシントンDC)... ポスターおよびビデオ展示(慶應義塾大学)

(2) 展示会・報道発表

今年度は、下記展示会において研究成果の展示を行った。

- KEIO TECHNO-MALL (2016年12月16日@東京国際フォーラム)... ポスター展示(慶應義塾大学)
- PIF/PN研究会共催ナショナルプロジェクト一般公開デモ(2017年3月9日@慶應義塾大学新川崎タウンキャンパス)... 動態デモンストレーション
(NTT、沖電気工業、日立製作所、慶應義塾大学による共同出展)
- NICTフットニックネットワークシンポジウム(2017年3月10日@NICT本部)... ポスター展示
(NTT、沖電気工業、日立製作所、慶應義塾大学による共同出展)

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- ・将来光アクセスシステム標準化においてOFDM方式が採用された際には、本研究の成果である帯域割当アルゴリズムを標準化提案する予定(NTT)。
- ・本研究で開発したエラスティック光信号パラメータ制御技術を、2020年以降の第5世代モバイル通信のインフラ用製品へ適用する予定(沖電気工業)。
- ・多様な通信パラメータを動的制御する通信制御技術を他の研究や事業(IoT向け通信制御等)への活用も検討していく(日立製作所)。
- ・本研究の成果であるプログラマブルOLT/ONU管理技術およびネットワーク制御技術を発展させ、光アグリゲーション型ネットワークとクラウド/エッジコンピューティングを組み合わせた、光M2M(Machine to Machine)サービスプラットフォームの研究へ展開を行う(慶應義塾大学)。