

新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発  
課題Ⅲ. 高効率光アクセスメトロ技術

The R&D of innovative optical network technologies for supporting new social infrastructure. PartⅢ. Highly efficient optical access-metro network technologies

代表研究責任者 山中 直明 学校法人慶應義塾 慶應義塾大学理工学部  
研究開発期間 平成 30 年度～令和 3 年度

**【Abstract】**

Due to the popularization of ultra-high-definition video and 5th generation wireless communication (5G), it is required to evolve optical network technologies that supports various network services as a social infrastructure is required to overcome the increase in traffic and power consumption of networks. Therefore, in this R&D program, we are conducting research and development with the aim of establishing innovative optical communication technology that realizes high efficiency in access and metro networks and contributing to the sustainable maintenance and development of information and communication infrastructure that supports Japan's social and economic activities. Main R&D activities are as following.

#1 : The capacity of the access network has been increased by 10 times or more compared to the TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network) system (10 Gbps x 4 waves). It is established 400 Gbps class high-speed, large-capacity optical access transmission technology.

#2 : Network monitoring / control infrastructure technologies based on optical signal characteristics are established. This solves the increasing complexity problem of monitoring / control due to the multi-vendor of optical transmission equipment.

#3 : We have established a 5x5 flexible optical switch platform technology that enables flexible changes in network topology and reduces power consumption to 1/17.

**1 研究開発体制**

- 代表研究責任者 山中 直明 (学校法人慶應義塾 慶應義塾大学理工学部)
- 研究分担者 鹿嶋 正幸 (沖電気工業株式会社 イノベーション推進センター)  
葛西 恵介 (国立大学法人東北大学 電気通信研究機構)  
ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニエル (日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所)  
釣谷 剛宏 (株式会社 KDDI 総合研究所)  
山中 直明 (学校法人慶應義塾 慶應義塾大学理工学部)  
梨本 恵一 (エピフォトニクス株式会社)

- **総合ビジネスプロデューサ** 櫻井 雅之 (株式会社リガーレ)
- **ビジネスプロデューサ** 佐々木 浩紀 (沖電気工業株式会社 イノベーション推進センター)  
八坂 洋 (国立大学法人東北大学 電気通信研究機構)  
小熊 健史 (日本電気株式会社 第一ネットワークソリューション事業部)  
鈴木 正敏 (株式会社 KDDI 総合研究所)  
山中 直明 (学校法人慶應義塾 慶應義塾大学理工学部)  
梨本 恵一 (エピフォトニクス株式会社)
- **研究開発期間** 平成 30 年度～令和 3 年度
- **研究開発予算** 総額 993 百万円

(内訳)

平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度 (令和 2 年度 3 次補正予算)
239 百万円	254 百万円	250 百万円	250 百万円

## 2 研究開発課題の目的および意義

超高精細映像や第 5 世代無線通信 (5G) の普及による通信トラフィック増大とそれにかかる消費電力増大に対応し、社会インフラとして様々なネットワークサービスを支える光通信網が必要とされている。そこで、アクセス網での高効率化を実現する革新的光通信技術を確立し、我が国の社会・経済活動を支える情報通信インフラの持続的な維持・発展に貢献することを目的とする。

超高精細映像の流通や IoT (Internet of Things)・ビッグデータ・AI (Artificial Intelligence)等の普及によって急速に増大する通信トラフィックに対応するため、光アクセスメトロ網においても、多様化する通信需要をより効率的に収容することが必要とされている。そこで、アクセスメトロ網の大容量化・高効率化に対応するため、TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network)システム (10 Gbps×4 波) の 10 倍以上の大容量化に対応した 400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術を確立するとともに、光伝送装置のマルチベンダ化に伴う監視・制御の複雑化に対応した光信号特性によるネットワーク監視・制御基盤技術等を確立する。加えて、大都市におけるトラフィック偏在化に対応するため、ネットワークトポロジーの柔軟な変更を可能とし、かつ消費電力を 1/2 以下にするフレキシブル光スイッチ基盤技術を確立する。これらの技術を確立することで、急速に増大する通信トラフィックに対応する高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与する。また、開発成果の国際標準化・市場展開を推進し、我が国の光ネットワーク技術の国際的な競争力を強化する。

## 3 研究開発成果 (アウトプット)

ア) 400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術を、サブ課題としてア-a: 低コスト多値光送受信技術、ア-b-1: 低コストバースト信号光位相同期技術、ア-b-2: バースト多値クロック抽出技術、と分割して研究開発を進めた。

イ) 光ネットワーク監視・制御基盤技術を、サブ課題としてイ-a：光ネットワーク監視・分析技術、イ-b：光ネットワーク制御プラットフォーム技術、イ-c：故障リスク増大に対応した高可用ルーティング技術、と分割して研究開発を進めた。

ウ) フレキシブル光スイッチ基盤技術の研究開発は、サブ課題への分割を行わずに研究開発を進めた。各サブ課題の到達目標達成状況を表 1 に示す。

表 1. 各サブ課題の目標達成状況

サブ課題	到達目標	状況	備考
ア-a	12.5 Gbps (symbol per sec) で 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)以上の偏波多重多値変調方式で最小パスロス 29 dB を実現	予定通り達成	12.5 Gbps-DP-16APSK (Dual Polarization 16 Amplitude and Phase Shift Keying)
ア-b-1	16QAM 以上のバースト信号からの瞬時クロック抽出を可能とする	上回って達成	簡便・低コストなデジタルコヒーレント双方向アクセスシステムを構築 1 $\mu$ s 以下での同期実現
ア-b-2	上りバースト信号に対応した光受信器の基本技術を確認し、400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術を実現	予定通り達成	基本計画書を上回る目標として設定し、実施していたシリコンフォトニクス光集積チップ試作は、COVID-19 の影響により 2022 年 8 月に達成見込み。
イ-a	光信号の特性変化に基づく監視・分析技術を確認し、運用工数を単一ベンダ時と同等以下にする	予定通り達成	2022 年 3 月 30 日報道発表
イ-b	ベンダ無依存制御プラットフォーム技術を確認し、運用工数を単一ベンダ時と同等以下にする	予定通り達成	2022 年 3 月 30 日報道発表
イ-c	高可用ルーティング技術を確認し、年間 1%故障率を許容可能なシステムを実現	予定通り達成	2021 年 12 月 6 日報道発表 2022 年 3 月 30 日報道発表
ウ	M×N 波長選択光スイッチ基盤技術を確認し、ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)構成時のスイッチ部消費電力 1/2 以下を実現 (M、N $\geq$ 4)	上回って達成	5×5 光スイッチサンプルの実現 1×9 光スイッチのパイプロダクト化を実現 2022 年 3 月 9 日報道発表

詳細は、「研究開発による成果数」の表に委ねるが、査読付き誌上発表論文数 11 件 (目標 8 件)、査読付き口頭発表論文数 21 件 (目標 19 件)、その他誌上発表数 1 件 (目標 0 件)、口頭発表数 51 件 (目標 30 件)、特許出願数 21 件 (目標 22 件) と出願準備中 3 件、特許取得数 3 件 (目標 5 件)、受賞数 2 件、報道発表数 3 件 (目標 7 件)、報道掲載数 7 件の成果が出ている。特許に関しては、総合ビジネスプロデューサとの協議の上で戦略的に出願を後ろ倒ししたため、研究開発期間内での出願数及び取得数は目標

には達しなかったが、着実に知財獲得は進んでいる。

各年度の予算配分を表 2 に示す。試作の必要な課題に重点的に配分を行い、年度間でも必要度に応じて増減を行うといった予算マネジメントを実施し、研究グループ全体としての費用帯効果を最大限に高められる施策を進めた。

表 2. 分担者毎の予算配分 (単位千円)

分担者	H30 年度	R 元年度	R2 年度	R3 年度	合計
沖電気	55,000	52,963	54,750	54,750	217,463
東北大学	14,999	15,715	17,510	17,513	65,737
NEC	69,998	68,248	70,738	70,735	279,719
KDDI 総合研究所	24,218	45,566	32,000	32,000	133,784
慶應大学	25,000	20,196	19,000	18,000	82,196
エピフオトニクス	49,882	50,925	56,001	57,002	213,810
合計	239,097	253,613	249,999	250,000	992,709

高効率光アクセスメトロ研究開発運営委員会（座長：京都大学大木教授、委員：大阪市立大学阿多教授、近畿大学今宿准教授、日本大学源田教授、東京都市大学塩本教授、千歳科学技術大学吉本教授）を計 11 回開催し、研究開発の進捗確認に加えて、技術の方向性及び総合ビジネスプロデューサも交えた技術切り出し（バイアウト）及び社会実装に向けた取組の議論を実施した。議論の結果として、知財獲得戦略及び研究開発成果のバイアウト計画を立案した。

以降、課題毎の成果を記載する。

### 3. 1 ア 400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術

- A) 低コスト多値光送受信技術：既存光デバイス（シンボルレート 12.5 Gsps）へ 16QAM 以上の偏波多重多値変調方式を組み合わせる光送受信技術および PON システム特有の信号劣化を補う DSP (Digital Signal Processor) の基本技術を確認することで、偏波多重多値変調においても ITU-T G.989.2 (TWDM-PON) で規定される最小パスロス 29 dB と同等以上のバジェットを実現する。
- b) バースト多値光受信器技術：PON システム特有の上りバースト信号に対応した光受信器の基本技術を確認することで、16QAM 以上の多値バースト信号からも瞬時にクロック抽出可能とし、a) と併せて 400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術を実現する。

#### 3. 1. 1 a) 低コスト多値光送受信技術（沖電気工業株式会社）

400 Gbps 級高速大容量光アクセスは、100 Gbps×4 波長の TWDM-PON を想定し、波長あたり 100 Gbps の上りバーストが可能な安価な多値光送受信を検討した。安価な DFB (Distributed Feedback) レーザを適用するため、広線幅によるコヒーレント処理を検討した。

- ① TWDM-PON の上りバーストを実現するためにトレーニング信号（プリアンブル）を短くする高速偏波分離・位相補償が可能な DP-16APSK を採用した 12.5 Gsps による 100 Gbps のデジタル信号処理技術を確認した。

- ② 上記のデジタル信号処理で -30 dBm 以下の受光感度を確認し、最小パスロス 29 dB を達成した。
- ③ シリアル処理では処理遅延が発生するためリアルタイム処理が行えず、受信処理の並列化を立案し、-24 dBm 以下の受光感度を確認した。この時、送信出力を+5 dBm とすることで最小パスロス 29 dB を達成できる見込みを得た。また、並列処理回路を FPGA (Field Programmable Gate Array) に実装し、動作できることを確認した。
- ④ b-1) の光位相同期技術と共同検証を行い、DP-16APSK の信号の送受信に光位相同期あり/なしの検証を行った結果、光位相同期を行うことで受光感度が 2 dB 改善することを確認した。

### 3. 1. 2 b-1) 低コストバースト信号光位相同期技術 (国立大学法人東北大学)

高速・大容量アクセスシステムを低コストで実現するため、光源を共通化した簡便な構成のデジタルコヒーレント多値アクセス伝送システムの開発を実施した。多値信号を高精度且つ低遅延に伝送するため、光注入同期法とデジタル位相補償法を組み合わせたハイブリッド光位相同期技術を確立し、上りバースト多値信号を 1  $\mu$ s 以下の遅延時間と 13.3 度以下の位相雑音で位相同期可能な高速光位相同期技術を確立することを目標とした。以下に研究開発成果を示す。

- ① 送信・局発両光源の役割を担わせた汎用半導体レーザを OLT (Optical Line Terminal) と ONU (Optical Network Unit) にそれぞれ 1 台ずつ配置した簡便な構成の双方向デジタルコヒーレント多値伝送システムを開発した。
- ② 線幅の広い、安価な DFB レーザを局発光源として用いた簡便な光注入同期回路を開発し、目標に対して 0.6 度の低い位相雑音でデータ信号と局発信号間の位相同期を実現した。応答帯域の広い DFB レーザを採用することにより、当初の目標を大幅に上回る低位相雑音特性を実現した。
- ③ 0.4~0.8 % と従来よりもおよそ 1/10 の長さのプリアンプルを用いたデジタル位相補償技術を確立し、目標に対して 650 ns の信号処理時間で高精度な光位相同期を実現した。
- ④ 開発したハイブリッド光位相同期回路を双方向デジタルコヒーレント多値伝送システムに適用し、従来の伝送速度の 10 倍となる 400 Gbps 信号 (4 ch-WDM、偏波多重 12.5 Gsps 16QAM) の 10 km 双方向伝送に成功した。これにより、次世代の高速 PON システムとしては十分な伝送距離を達成した。

### 3. 1. 3 b-2) バースト多値クロック抽出技術 (沖電気工業株式会社)

PON システム特有の上りバースト信号に対応した光受信器の基本技術を確認することで、16QAM 以上の多値バースト信号からも瞬時にクロック抽出可能とし、アー a) 低コスト多値光送受信技術と併せて 400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術を実現した。加えて、シリコンフォトニクス技術による光処理部の集積化を追加の目標として設定し、アー a) の成果と統合することで、400 Gbps 級に対応した光トランシーバの小型化・低消費電力化の検証を実現した。

- ① 1.2  $\mu$ s のプリアンプル (トレーニングシンボル: TS (Training Symbol)) を加えることで同期検出する方式を確立 (デジタルコヒーレント通信の同期は、通常数 10 ms 必要であり、数  $\mu$ s で同期できることで上り TDMA (Time Division Multiple Access) が実現可能) し、TIA (Transimpedance Amplifier) にて強度差吸収及び波形整形でクロック抽出ができることを確認し、16APSK で 10 Mrad/s の高速偏波分離・位相補償が可能なデジタル信号処理技術を確認した。
- ② TS を含む DSP (マップ、TS 検出、波形整形、位相補償など) を FPGA に実装し、動作を確認し

た。

- ③ ア-a、ア-b1、ア-b2 技術を利用することにより、DP-16APSK 信号を用いた 400 Gbps 級光アクセス信号伝送が可能であることを確認した。
- ④ 光処理部の集積化は受信部の部分検証ではあるがバランスド PD (Photodiode)の集積化を行い入出力の線形性や応答特性を評価し、強度多値信号を受信しても十分なアイ開口が得られる良好な動作を確認した。全体の集積化は COVID-19 の影響や製造装置故障等により 2022 年 3 月末までに完了せず、研究終了後も継続して実施し 2022 年 8 月に完了する見込みである。

### 3. 2 イ 光ネットワーク監視・制御基盤技術

- a) 光ネットワーク監視・分析技術：光信号の特性変化に基づく監視・分析技術を確立し、マルチベンダ化により増大する運用工数を単一ベンダ時と同等以下（従来技術に基づく 2 ベンダ装置の混在運用時と比べて 1/2 以下）にする。
- b) 光ネットワーク制御プラットフォーム技術：ベンダに依存しない制御プラットフォーム技術を確立し、a) と併せて、マルチベンダ化により増大する運用工数を単一ベンダ時と同等以下にする。
- c) 故障リスク増大に対応した高可用ルーティング技術：マルチベンダ化に伴うシステム全体としての故障率増大に対応した故障推定技術及び推定結果に基づく高可用ルーティング技術を確立することで、データセンター並（年間 1%）の故障率を許容可能なシステムを実現する。

#### 3. 2. 1 a) 光ネットワーク監視・分析技術（日本電気株式会社）

ベンダに非依存の光信号の特性変化に基づく監視・分析技術として、障害の主要因となる伝送路障害（ファイバ断線）、ノード障害（トランスポンダ出力異常）に着目し、以下の 2 項目の開発を実施した。

- ① ファイバ断線を検知する技術として、線路監視装置の試作を行い、性能実証を完了した。19 インチ 1U シェルフに最大 6 心線同時監視、線路損失 20 dB（双方向、80 km 以上）、警報検知時間 1 秒以下、分解能±25 m を達成し、要求される障害復旧時間 50 ms 以内への対応可能、電柱 1 スパン以内の断線箇所の特定期間等、実用上遜色のない特性が得られることを確認した。
- ② トランスポンダの異常出力を検出する技術として、簡易リアルタイムスペアナの試作を行い、性能評価を完了した。市販の光バンドパスフィルタ、フォトディテクタを組み合わせた簡易構成とし、独自の隣接波長間クロストーク抑制アルゴリズムを実装し、C 帯測定時間約 5 秒、最大推定誤差 0.26 dB を達成し、要求される測定誤差 1 dB 以下が可能となり、実用上遜色のない特性が得られることを確認した。

また、b) 光ネットワーク制御プラットフォーム技術（KDDI 総合研究所）が構築した異種ベンダ機器で構成するマルチベンダ光ネットワークのテストベッドに、開発した線路監視装置、及び簡易リアルタイムスペアナを組み込み、光ネットワーク制御プラットフォーム技術と組み合わせた連携検証を行い、ファイバ断線、トランスポンダ異常を想定通り検知することを実証するとともに、シングルベンダで構成した光ネットワークと同等の運用コストが達成できることを実証した。

#### 3. 2. 2 b) 光ネットワーク制御プラットフォーム技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

オープンソース制御プラットフォームである ONOS (Open Network Operating System)を活用し、国内外 5 ベンダ装置を制御・管理可能なマルチベンダ対応管理システムを開発した。Open ROADM モ

デルを用いて管理を共通化することにより、ベンダ差分を吸収しマルチベンダ化に伴う装置設定に関する運用工数の増加を抑制した。また、光パスの設計機能として GN (Gaussian Noise)モデルを用いた光信号品質推定機能を実装し、ベンダ固有の機能に依存していたこれまでの光信号品質保障技術をマルチベンダ対応の管理システム上に実現することにより、新たに増加する運用工数を削減した。さらに、5ベンダの装置で構築された光ネットワークテストベッドを用いて、光パスのプロビジョニング(経路の設計から装置の設定)動作を、単一ベンダ時と同等の運用工数(1 コマンドで完了)で可能であることを実証した。加えて、a) 光ネットワーク監視・分析技術の線路監視装置、及び簡易リアルタイムスペアナと連携することにより、障害時においても単一ベンダ時と同等の運用工数で障害検知から光パスの自動復旧まで実現可能であることを実証した。

### 3. 2. 3 c) 故障リスク増大に対応した高可用ルーティング技術 (学校法人慶應義塾)

マルチベンダ環境の監視制御を行う a) 光ネットワーク監視・制御分析技術 (NEC)、b) 光ネットワーク制御プラットフォーム技術 (KDDI 総合研究所) のシステムより取得可能な情報 (レーザの駆動電流、レーザ光出力、環境温度、稼働時間) をパラメータとして EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) に対する故障をモデル化し、故障分布曲線の誤差平方和を 10%に低減することに成功した。これは、開発した手法を適用することで、従来の事前知識として与えられるワイブル分布パラメータのみでの寿命推定による正解率を、例えば  $1\sigma$  範囲 (正解率 68%) から  $3\sigma$  範囲 (正解率 99.7%) に向上できる見込みを得たことを意味する。

本故障予測を取り入れた高可用ルーティング技術として、マルチパス経路転送手法である“転送容量期待値保証ルーティング (ECGR (Expected Capacity Guaranteed Routing))”を考案した。信頼性シミュレーションの結果として、年間 1%故障率の環境下で、NSF (National Science Foundation) ネットワークトポロジでの 99.9%以上の要求達成率実現を確認した。ECGR テストベッドを構築し、故障予測に基づいてマルチパス経路の切り替えが可能であることを実証した。

故障予測の考え方をエッジコンピューティングの計算機リソース及び通信リソース管理に適用し、将来のホワイトボックス機器の管理・制御部を計算機リソースとして利用する新しい“アクセスメトロエッジコンピューティング (AMec (Access and Metro Edge Computing))”技術を考案した。AMec テストベッドを構築し、コンセプトが実現可能であることを実証した。

a)、b) が構築したマルチベンダ光ネットワークと、c) で構築した ECGR テストベッド、AMec テストベッドを連携させ、b) が開発した制御プラットフォームから取得した情報に基づいて、両テストベッドが動作可能であることを実証した。

### 3. 3 ウ フレキシブル波長選択光スイッチ基盤技術 (エピフォトニクス株式会社)

波長選択光スイッチのポート入出力をソフトウェアで柔軟に切り替え可能なフレキシブル光スイッチ ( $M \times N$  型) 基盤技術を確立することで、新たな光スイッチを追加することなく柔軟なネットワークトポロジー変更を実現する。これにより、2 方路 ROADM を構成する際に、既存光スイッチ ( $1 \times N$  型、 $N \times 1$  型) を用いる場合と比較してスイッチ部に係る消費電力を  $1/2$  以下にする。

方路追加などのネットワークトポロジー変更の際に、新たな装置を追加することなく柔軟な変更を実現するためのポート入出力をソフトウェアで切替可能な波長選択光スイッチ (WSS (Wavelength Selective Switch)) 基盤技術についての研究開発を行った。なお、研究開発当初は、 $M, N \geq 4$  を想定し

ていたが、ROADM 以外の有力な WSS 適用マーケット候補であるデータセンタ内の全光型インターコネクション構成で利用される WSS の要求として 5 ポート以上が望ましいという情報を得たため、M、N  $\geq 5$  と目標を上方修正した。

WSS のポート入出力をソフトウェアで柔軟に切り替え可能なフレキシブル波長選択光スイッチ (M  $\times$  N 型) 基盤技術を確立することで、新たな光スイッチを追加することなく柔軟なネットワークポロジ変更を実現する。これにより、2 方路 ROADM (5  $\times$  5 型 WSS) を構成する際に、既存 WSS (1  $\times$  N 型、N  $\times$  1 型) を用いる場合と比較してスイッチ部に係る消費電力を 1/2 以下にするとともに、挿入損失については、既存 WSS と遜色のない目標損失 (8.5 dB 以下) を実現することを達成目標とした。

- ① LCOS (Liquid crystal on Silicon) の制御基板、およびそのファームウェアおよびソフトウェアを実装した 5  $\times$  5 型 WSS の評価結果を基に、改善を進めた。そして、挿入損失および消費電力の低減に向けた光学系や温度特性、擾乱防止制御、損失等価制御などへ対応した LCOS 描画パターンの更なる高度化のほか、小型化に必要となる制御基板の小型化試作などの改良をさらに進めた。これによって入出力ポートをソフトウェアで切り替え可能な M  $\times$  N 型フレキシブル波長選択スイッチ基盤技術を確立した。
- ② 5  $\times$  5 型 WSS をパッケージ実装したプロトタイプを改善し、RODAM ブレードへ実装可能なモジュール化の改良も進めた。このモジュールにおける LCOS の描画による温度特性補償により挿入損失変化を抑え、温度制御を無くすることにより、到達目標である「既存光スイッチのスイッチ部に係る消費電力を 1/2 以下」を上回る某社 1  $\times$  9 WSS の定常状態での消費電力 12 W  $\times$  10 台 (5  $\times$  5 相当) = 120 W に対して 7 W 程度 (1/17) を達成の見込みを得た。改善したモジュールにおいて損失・消費電力などの性能評価も進め、全帯域で目標を上回る 6.6 dB 以下の挿入損失を確認した。

早期の社会展開へ向け、バイプロダクトである当初計画した 1  $\times$  6 型 WSS を 1  $\times$  9 型 WSS へ上方修正し、フレキシブル波長選択光スイッチのサンプル版出荷を開始した。このサンプル版出荷へ向けた取り組みを経て、5  $\times$  5 型 WSS の開発へ必要な仕様等のフィードバックを行い、5  $\times$  5 型 WSS サンプルを実現した。

#### 4 政策目標 (アウトカム目標) の達成に向けた取組みの実施状況

高効率光アクセスメトロ研究開発運営委員会での議論及び、総合ビジネスプロデューサのビジネス化経験の知見に基づいて、各課題のバイプロダクト化を研究開発開始当初から探った。具体的には、ア：400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術においては、バースト多値光受信機のデータセンタへの適用の可能性、イ：光ネットワーク監視・制御基盤技術においては、開発した線路監視装置単体でのポテンシャルユーザへの売込みの可能性、及び制御プラットフォームの普及に向けた公開での相互接続実験の企画の可能性、ウ：フレキシブル波長選択光スイッチ基盤技術においては、小型 WSS の有償でのサンプル販売の可能性である。

- ① アにおいては、データセンタ間接続及びモバイル市場でのマーケット調査、及びオルタナティブな 400 Gbps モジュールとなる 400GE (Gigabit Ethernet) 向け光モジュールとの技術比較を実施した。また、ITU-T SG15 に参加し、会合の場での 400 Gbps PON の可能性を探る活動をポテンシャルメンバである AT&T、Google fiber 等に対して実施 (COVID-19 のため継続的なヒアリングはできなかった) した。結論としては、COVID-19 の影響を受けて遅延していた 100 Gbps 級 PON 標

準化（2021年9月合意）後の400 Gbps PON標準化開始に併せて提案を行うこととした。

- ② イにおいては、(1) 線路監視装置に関して、ポテンシャルユーザへのヒアリングを行い、一部ユーザからは、問い合わせ、見積依頼、購入検討を得ていた。早期販売のためには、保守・サポート体制の構築が必要となり、ある程度のマーケット確保が必要となることから、COVID-19の状況に鑑み、結論としては、想定するアクセス・メトロネットワークのオープン化動向、及びマルチベンダ対応の監視装置の需要動向を見ての販売タイミングを見極めることとした。(2) 制御プラットフォームに関しては、OSS (Open Source Software)の社内システムへの導入の可否を研究所と事業会社の間で行った。結論としては、ソフトウェア保守の体制を新規に立ち上げることが必要となることや当初想定より実光ネットワークのマルチベンダ化が進んでいないこと等から、事業へのインパクトの総合判断により本プロジェクト期間中の採用は時期尚早との判断に至った。しかし、当初想定より遅いものの光ネットワークのマルチベンダ化は着実に進んでいるとの認識であり、今後もONOSへの拡張部分のOSS化を早期に実現するなど研究開発を通してマルチベンダ化を促進するとともに、マルチベンダ化の進展を鑑みながら適宜導入見極めを行う。社外への普及活動として、線路監視装置と併せての公開での相互接続実験の可能性を、産総研サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアム (CPCC: 2020年度で活動終了)、けいはんな情報通信オープンラボ IoTネットワーク基盤分科会 オープン光ネットワーク基盤 WG (Working Group)、Open ROADMSA (Multi-source Agreement)、TIP (Telecom Infra Project)、ONF (Open Networking Foundation)をターゲットに探った。COVID-19の影響を大きく受けたため、Open ROADM、TIP、ONFへの提案には至らなかった。CPCCメンバとは意見交換を実施、けいはんな情報通信オープンラボにおいては、イの連携実験をビデオで公開

(<https://www.khn-openlab.jp/bunkakai-gw/network/news/index.html#n20220330>) した。

- ③ ウにおいては、フレキシブル波長選択光スイッチ基盤技術の早期の社会展開へ向け、5×5 WSS作成途中での小型 WSS の切り出しを計画し、1×6型 WSS の2020年度中のサンプル出荷を目指した。COVID-19の影響を受け、サプライチェーンの再構築等に時間を要したため、技術の進展に合わせて1×6から1×9へ規模を上方修正し、1×9 WSS のサンプル出荷を2021年度中に行うこととした。2022年3月9日に報道発表を行い、サンプル出荷を実現した。

知財の獲得に関しては、3. で述べたように、総合ビジネスプロデューサとの協議の上で戦略的に出願を後ろ倒しした。これによる、早期の出願がノウハウの公開に直結することを避けるために、慎重に出願内容の吟味を行うことを優先した。結果として、研究開発期間内での出願数は、目標22件に対して21件（追加での出願準備中3件）となり、取得数は目標5件に対して3件となっているが、着実に知財獲得は進んでいる。

成果の普及周知活動としては、学会での講演に加えて、KEIO TECHNOMALL（慶應大学理工学部が主体の技術交流の場）での展示（2018-2021）、けいはんな情報通信オープンラボシンポジウム（情報通信研究機構が主体の産学官連携による成果交流の場）での展示（2020）、電子情報通信学会光通信システムシンポジウム（国内の光技術研究者の技術交流の場）での展示（2020-2021）、国際会議 iPOP（国内開催される IP と光ネットワークや光ネットワーク相互接続に関する議論の場）での展示（2019-2021）、けいはんな情報通信オープンラボでのイの実験ビデオ公開（2022）を行った。特に、イに関してはオープンな光ネットワーク相互接続実験の実施による成果アピールの実現を目指して、けいはんな情報通信オープンラボ、国際会議 iPOP、電子情報通信学会を利用した仲間づくりを進め、Open

ROADMの相互接続実験をプロモートしているテキサス大ダラス校のAndrea教授とのコンタクトに成功した。なお、前述したように、COVID-19の影響により委託研究期間においては相互接続実験の実現には至らなかった。また報道発表を、イで2件(2021年12月6日、2022年3月30日)、ウで1件(2022年3月9日)行い、研究開発成果のアピールを行った。

人材育成に関しては、東北大学において、研究者の裾野を広げるための光通信技術に関する基礎ゼミ、及び創造工学研修を学部学生に対して実施し、光通信技術の基礎を学び、光通信の基本的な実験に参加することで、光通信技術に興味を持ってもらえるよう取組を行った。また、慶應義塾大学においては、研究室の学生に積極的にプロジェクトに関係してもらえよう、研究内容にホットトピックスの積極的な取り込みを実施した。具体的には、アクセスメトロエッジコンピューティングのアプリケーションとして、機械学習(自動運転サポート、人物追跡等)を取入れたほか、最新のコンピューティング技術の導入、最新のエッジデバイスでのPoC(Proof of Concept)の実装に取り組んだ等である。さらに、国際会議iPOPで実施される相互接続ショーケースに、技術開発に携わった学生を積極的に参加させ、学生が他組織の技術者と連携して活動する環境を構築することで育成を図った。

## 5 政策目標(アウトカム目標)の達成に向けた計画

図1に、委託研究期間終了後の標準化、実用化、製品化に向けた取組計画を示す。本研究開発の本格的な製品化ターゲットとしては、2027年以降を想定する。

400 Gbps級PONに関しては、ITU-T SG15 FOAS(Future Optical Access System)が2022年より開始されるため、400G-PON(100 Gbps×4波長のTWDM-PON)への研究開発技術適用の提案活動を開始する。具体的には、研究開発で得られた100 GbpsコヒーレントPONの内容整理を行い、ITU-T SG15のWP1(Working Party 1) Q2/15(Optical systems for fibre access networks)への提案を進める。さらに、2022年度より、400G-PONシステムの試作を開始し、2025年以降の5Gモバイルの本格導入が期待される2027年をターゲットとした商品化開発を実施する。あわせて、海外オペレータにおける検証や海外協業ベンダとのアライアンスを行うことで海外導入体制を構築する。さらには、2030年を目指した量産化開発を進め、本研究開発成果の知財権を標準必須特許とするライセンス収入も想定し、海外市場(FTTxやモバイル光配線で2兆円規模が予想される)で有力ベンダと市場をシェアすることから海外シェア10%獲得を目指す。

また、NTT等が進めているIOWN-GF(Innovative Optical and Wireless Network Global Forum)において(沖電気、東北大学、慶應大学参加済)調査を行った結果、WDM 100G/400G光トランシーバにおける“バースト対応”のニーズを確認できたため、関係のタスクフォースへの提案活動を推進し、IOWNの実用化ターゲットと整合ができるよう製品化を計画する。

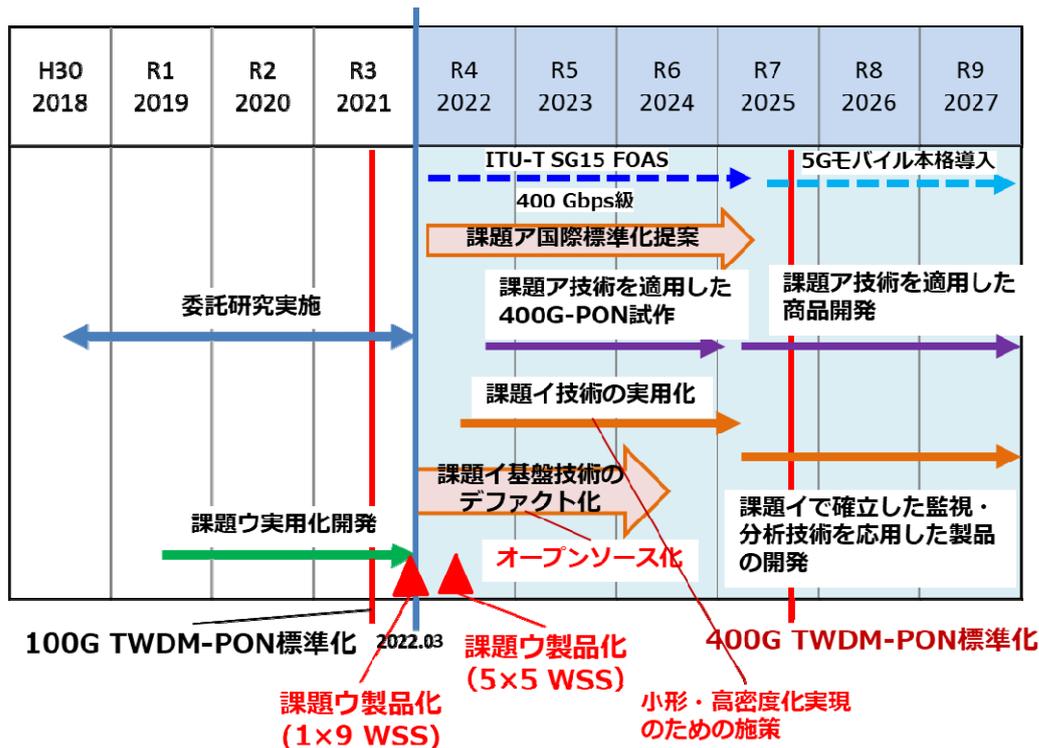


図1. 標準化、実用化、製品化に向けた取組計画

光ネットワーク監視・分析技術に関しては、試作した線路監視装置及び簡易リアルタイムスペアナに対して、ユーザヒアリングから得られた実用化のための技術開発を進める。具体的には、小形・高密度化実現のための施策であり、社内システムへの適用を経て、2027年度の社会実装を目指し、2025年度より監視・分析技術を活用した製品の開発を進めて行く。適用範囲は今後の市場動向を注視し、2030年度に想定するアクセス・メトロネットワークにおけるオープン・マルチベンダ対応の監視装置市場における世界シェアの10%を獲得することを目指す。

光ネットワーク制御プラットフォーム技術に関しては、試作したOSS制御プラットフォームであるONOSへの拡張部分のオープンソース化を早期に実現する。現在社内整理を進めているところであり、ONFへの提供を計画する。

WSSに関しては、早期の社会展開向け、バイプロダクトである当初計画した1×6型WSSを1×9型WSSへ上方修正し、フレキシブル波長選択光スイッチのサンプル版出荷を開始した。サンプル版出荷へ向けた取り組みを経て、5×5型WSSの開発へ必要な仕様等のフィードバックを行い、サンプルを実現している。2022年度中の5×5型フレキシブル波長選択光スイッチの製品化を計画している。そして、2024年度は各種WSSサンプル製品60台出荷、世界シェアは0.08%程度を想定する。その後、差別化優位性のあるWSS提供によって市場への浸透を急速に図り、毎年200%以上の売上成長を狙い2027年度には製品版の出荷1,370台、シェア1.2%、そしてBeyond 5Gの立ち上がりを想定する2030年度までに製造設備投資を行うことにより、出荷16,600台、シェア8%を達成することを目指す。

本研究開発の成果を受けて、2022年2月の総務省の情報通信技術の研究開発に係る提案公募「グリーン社会に資する先端光伝送技術の研究開発」課題Ⅱ大容量・高多重光アクセス網伝送技術において、「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発」の内容を踏まえ、同研究開発の受

託者と連携・協力し、研究開発を行うこと。”と明記され、成果を発展させるプロジェクトが令和4年度より開始されることとなった。

波及効果としては、IOWN 構想により、End-to-End の光直結の機運が高まってきたことへの対応があげられる。波長の高速切替に対応するためには、バースト対応が必須となるため、PON でのバースト対応技術が広くアクセス網のみならず、メトロ網及びコア網といった伝達網内で利用されることになる。本研究開発で培った WDM/バースト制御/コヒーレント技術が広く利用されることが期待される。

東北大学が確立した注入同期法を用いたデジタルコヒーレント方式は、光・電子集積化を行うことで小型化が期待できる。さらに安価な送信レーザを利用可能なため低コスト化も期待できる。さらに、アナログコヒーレントアクセス方式（フルコヒーレントアクセス）の開発へ発展させることで、双方向のアナログ処理による光受信部の A/D (Analog to Digital converter)、D/A (Digital to Analog converter)、デジタル信号処理回路の排除が期待でき、システムの低コスト化が期待される。

バンド無依存の光ネットワーク監視・分析は、メトロ領域のみならず、光コアネットワークや光海底ケーブルをはじめとする超長距離光ネットワークに活用し、光ネットワーク全体の運用・管理コストの低減へ寄与できる。

慶應義塾大学の転送期待値保証ルーティングは、故障率を高めた場合においてもサービスへの影響を最小限とするために、サービスの考え方を最大値保証から期待値保証へ転換するというコンセプトである。本コンセプト自体は、“今”のネットワークにおいては受け入れることが難しいため直ぐに世の中に受け入れられることはないと考えるが、Multi-path TCP (Transmission Control Protocol) や Multi-path QUIC (Quick UDP (User Datagram Protocol) Internet Connections) といった上位の転送技術と連携させることで「並列伝送」の世界への浸透が図れると予想する。

## 6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] 有川学、佐藤正規、林和則、“Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization”、Optics Express Vol. 28, Issue 2, pp. 1300-1315 (2020年1月6日) : <https://doi.org/10.1364/OE.383097>
- [2] 太縄陽介、岡山英彰、志村大輔、八重樫浩樹、佐々木浩紀、鹿嶋正幸、“Multimode based polarization independent WDM devices using different order modes for TE and TM polarizations”、Optics Express Vol.28, Iss.26, pp38456-39298 (2020年12月21日) : <https://doi.org/10.1364/OE.412069>
- [3] 石井紀代、徐蘇鋼、吉兼昇、竹房あつ子、釣谷剛宏、淡路 祥成、並木周、“Automatic Mapping between Real Hardware Composition and ROADM Model for Agile Node Updates”、Journal of Lightwave Technology vol.39, Issue 3, pp.821-832 (2021年2月1日) : <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3048424>
- [4] 吉田真人、管貴志、葛西恵介、廣岡俊彦、岩月勝美、中沢正隆、“10 Channel WDM 80 Gbit/s/ch, 256 QAM bi-directional coherent transmission as a high capacity next-generation mobile fronthaul”、Journal of Lightwave Technology vol.39, Issue 5, pp.1289-1295 (2021年3月1日) : <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3034417>
- [5] 山中直明、西村光弘、石黒正揮、岡崎義勝、川西哲也、釣谷剛宏、中尾彰宏、原井洋明、廣岡俊彦、古川英昭、宮澤雅典、山本直克、吉野修一、“Beyond 5G 時代のネットワークビジョン”、電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J104-B, No.3, pp.315-336 (2021年3月1日) :
- [6] 有川学、林和則、“Transmitter and receiver impairment monitoring using adaptive multi-layer linear and widely linear filter coefficients controlled by stochastic gradient descent”、Optics Express Vol. 29, Issue 8, pp. 11548-11561 (2021年3月31日) : <https://doi.org/10.1364/OE.416992>
- [7] Ricard Vilalta, Carlos Manso, 吉兼昇, Ramon Casellas, Ricardo Martinez, 釣谷剛宏, 森田逸郎, Raul Munoz, “Experimental evaluation of control and monitoring protocols for optical SDN networks and equipment [Invited Tutorial]”、Journal of Optical Communications and Networking Vol.13, No.8, pp.D1-D12 (2021年5月24日) : <http://doi.org/10.1364/JOCN.424631>
- [8] 川瀬涼太、奥村泰地、村上正樹、植松芳彦、栗本崇、岡本聡、山中直明、“Assessing service survivability under failure conditions in reliable multipath network testbed”、IEICE Communications Express Vol.10, No.8, pp.422-427 (2021年8月1日) : <https://doi.org/10.1587/comex.2021ETL0010>
- [9] Carlos Manso, Ricard Vilalta, Raul Munoz, 吉兼昇, Ramon Casellas, Ricardo Martinez, ワンツェン、フィリポスバラシス、釣谷剛宏、森田逸郎、“Scalability Analysis of Machine Learning QoT Estimators for Cloud-native SDN Controller on a WDM over SDM network”、Journal of Optical Communications and Networking Vol. 14, No. 4, pp. 257-266 (2022年2月25日) : <https://doi.org/10.1364/JOCN.449009>
- [10] 葛西恵介、管貴志、吉田真人、廣岡俊彦、中沢正隆、“Broadband injection-locked homodyne receiver for digital coherent transmission using a low Q Fabry-Perot LD”、Optics Express, Vol.30, No.8, pp.13345-13355 (2022年4月5日) : <https://doi.org/10.1364/OE.456327>
- [11] 中沢正隆、葛西恵介、吉田真人、廣岡俊彦、“次世代 RAN の実現に向けたフルコヒーレントアクセスシステム”、電子情報通信学会和文論文誌 C (※招待論文投稿中)

## 7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] 関川柊、岡本聡、山中直明、大木英司、“Expected Capacity Guaranteed Routing based on Dynamic Link Failure Prediction”、International Conference on Computing, Networking and Communication Workshop (CNC2019) CNC VII-5 (2019年2月18日)
- [2] 藤澤慎介、柳町成行、竹下仁士、井上貴則、稲田喜久、Emmanuel Le Taillandier de Gabory、“Simple Inline WDM Channel Power Estimation Method based on Crosstalk Suppression Algorithm in a Submarine Transmission Line”、SubOptic 2019, OP6-1 (2019年4月9日)
- [3] 葛西恵介、中沢正隆、“10GHz, 6.2ps transform-limited coherent optical pulse generation from a 1.55mm, self-injection gain-switched DFB-LD”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2020), Th2A.14 (2020年3月12日)
- [4] 山中直明、山本剛毅、岡本聡、Andrea Fumagalli、“Cyber-Physical System for Autonomous Driving Vehicle considering with Social Welfare”、21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2020), CTS I-2 (2020年7月22日)
- [5] 葛西恵介、中沢正隆、吉田真人、岩月勝美、廣岡俊彦、“Digital Coherent Optical Access Technologies for Beyond 5G Network”、IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, TH4A.2, (2020年9月4日).
- [6] 松野将大、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“PoC construction of Expected Capacity Guaranteed Routing (ECGR) based on k-shortest path for Various Network”、16th International Conference on IP+Optical Network (iPOP2020), T1-3 (2020年9月10日)
- [7] 奥村泰地、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“Applying Partial Key Grouping-based Multipath Routing to a Highly Reliable Core Network”、16th International Conference on IP+Optical Network (iPOP2020), T4-1 (2020年9月11日)
- [8] 川瀬涼太、奥村泰地、村上正樹、植松芳彦、栗本崇、岡本聡、山中直明、“Experimentation of service provisioning in reliable multipath network testbed”、2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2020), M1-2 (2020年12月2日)
- [9] 佐藤正規、野口栄実、石井直人、Emmanuel Le Taillandier de Gabory、“CNN Based Polarization Rotation Rate Estimation Using TIA Gain Monitoring in Integrated Coherent Receiver”、European Conference on Optical Communication (ECOC2020), We1H-6 (2020年12月6日)
- [10] Ricard Vilalta、Carlos Manso、吉兼昇、Raul Munoz、Ramon Casellas、Ricardo Martinez、釣谷剛宏、森田逸郎、“Telemetry-enabled Cloud-native Transport SDN Controller for Real-time Monitoring of Optical Transponders Using gNMI”、European Conference on Optical Communication (ECOC2020), Tu2K-4 (2020年12月8日)
- [11] Ricard Vilalta、吉兼昇、Ramon Casellas、釣谷剛宏、森田逸郎、Ricardo Martinez、Raul Munoz、“Controlling and Monitoring Optical Network Equipment in Optical SDN Networks”、European Conference on Optical Communication (ECOC2020), SC10 (2020年12月8日)
- [12] 葛西恵介、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“64 Gbit/s, 256 QAM coherently-linked optical and wireless transmission in 61 GHz band using novel injection-locked carrier frequency converter”、European Conference on Optical Communication (ECOC2020), Th1G-7 (2020年12月10日)
- [13] 葛西恵介、佐藤大晟、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“64 Gbit/s, 256 QAM Transmission Through

- Coherent Optical-Wireless Link at 61 GHz Using Simple and High OSNR Carrier Frequency converter”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2021), Tu6E.2 (2021年6月8日)
- [14] 徐蘇鋼、石井紀代、吉兼昇、釣谷剛宏、淡路祥成、並木周、“Blade Abstraction Interface for Diverse Blade Integration and Unified Control of Disaggregate/Legacy ROADMs”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2021), F1C.2 (2021年6月11日)
- [15] 管貴志、葛西恵介、吉田真人、廣岡俊彦、中沢正隆、“Broadband Dynamic Injection-Locking Performance of Fabry-Perot LD and Its Application to Coherent Homodyne Receiver”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2021), F2A.5 (2021年6月11日)
- [16] Carlos Manso、吉兼昇、Ricard Vilalta、Raul Munoz、Ramon Casellas、Ricardo Martinez、Cen Wang、Filippos Balasis、釣谷剛宏、森田逸郎、“First Scalable Machine Learning Based Architecture for Cloud-native Transport SDN Controller”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2021), F4H.6 (2021年6月11日)
- [17] 廣田悠介、中村慎也、塩本公平、杉山秀次、吉兼昇、岡本聡、村上正樹、平山孝弘、山ノ井聡、“End-to-End Management of All Optical Disaggregated Network and Applications with Cloud Native Environment for the Smart World Network Infrastructure”、The 26th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2021), M4.4 (2021年7月5日)
- [18] 湊直樹、神田祥宏、鹿嶋正幸、佐々木浩紀、“Demonstration of 100Gb/s 16APSK (4-Amplitude x 4-Phase) Coherent PON System Using a Few MHz-Linewidth LD”、The 26th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2021), W4A.2 (2021年7月7日)
- [19] 徐蘇鋼、石井紀代、吉兼昇、釣谷剛宏、淡路祥成、並木周、“Integration and Control of Heterogeneous Telecom and Data Center Optical Networks Aided by FBD and TAPI for Enhancing Large-scale Optical Path Services and Network Resiliency”、European Conference on Optical Communication (ECOC2021), Th2E.2 (2021年9月16日)
- [20] 葛西恵介、佐藤大晟、白幡晃一、吉田真人、廣岡俊彦、中沢正隆、“Performance comparison between injection-locked carrier frequency conversion and self-heterodyne detection methods in coherently-linked optical and wireless transmission for 6G”、2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2021), B1-3 (2021年12月1日)
- [21] 奥村泰地、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“Multi-Path-based Routing Method Applicable to Networks Consisting of Devices with High Failure Rates”、2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2021), C3-2 (2021年12月3日)

## 8 その他の誌上発表リスト

- [1] KDDI 総合研究所、慶應義塾大学、情報通信研究機構、OA 研究所、レッドハット、ユビキューブ、“End-to-End Management of All Optical Disaggregated Network and Applications with Cloud Native Environment”、iPOP2020 Showcase White Paper オンライン  
<https://www.pilab.jp/ipop2020/exhibition/whitepaper.html> (2020年11月25日)

## 9 口頭発表リスト

- [1] 山中直明、“故障予測に基づく通信容量が保証された光ネットワークを用いたデータセンタ基盤”、KEIO TECHNOMALL2018（東京都）（2018年12月14日）
- [2] 藤澤慎介、柳町成行、Emmanuel Le Taillandier de Gabory、“大洋横断級の大容量光海底ケーブル通信を 実現する光ファイバ伝送技術”、レーザー学会 第39回年次大会（神奈川県）（2019年1月13日）
- [3] 松野将大、関川柊、大木英司、岡本聡、山中直明、“個々のネットワーク機器の観測情報に基づいた故障確率推定”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（宮古市）（2019年3月14日）
- [4] 松本悠平、新谷和則、谷田部漠、小熊健史、“OPEN PHOTONICS NETWORK の実現に向けた、リアルタイム線路監視システムの提案”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（宮古市）（2019年3月14日）
- [5] 葛西恵介、岡本聖司、吉田真人、中沢正隆、“注入同期法を用いた 200 Gbit/s, 10 Gsymbol/s-1024 QAM 160 km デジタルコヒーレント光伝送”、電子情報通信学会総合大会（東京都）（2019年3月20日）
- [6] 関川柊、岡本聡、山中直明、“リンク故障率変動に対応した容量期待値保証型ルーティング”、電子情報通信学会総合大会（東京都）（2019年3月20日）
- [7] 山中直明、“Optical network with guaranteed communication capacity based on failure prediction”、15th International Conference on IP+Optical Network (iPOP2019)（川崎市）（2019年5月30日）
- [8] 柳町成行、野口栄実、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、“光伝送装置のオープン化動向と NEC の取り組み”、電子情報通信学会ソサイエティ大会（豊中市）（2019年9月10日）、BI-10-1
- [9] 岡本聡、松野将大、村上正樹、山中直明、“容量期待値保証型ルーティングの大規模網への適用性評価”、電子情報通信学会ソサイエティ大会（豊中市）（2019年9月10日）、B-12-3
- [10] 山中直明、“故障予測に基づく通信容量が保証された光ネットワーク”、KEIO TECHNOMALL2019（東京都）（2019年12月13日）
- [11] 釣谷剛宏、新谷和則、山中直明、“線路監視装置試作機、けいはんな情報通信オープンラボ研究推進協議会 IoT ネットワーク基盤分科会オープン光 NW 基盤ワーキンググループ”、けいはんな情報通信オープンラボ シンポジウム（大阪市）（2020年1月28日）
- [12] 松本悠平、新谷和則、谷田部漠、小熊健史、“OPEN PHOTONICS NETWORK の実現に向けた、リアルタイム線路監視システムの改善”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（奄美市）（2020年3月2日）、vol. 119, no. 442, PN2019-55, pp. 13-17
- [13] 奥村泰地、松野将大、杉浦叶典、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“マルチパスルーティングにおけるリンク故障耐性を高めるパケット振り分け手法”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（奄美市）（2020年3月2日）、vol. 119, no. 442, PN2019-62, pp. 59-64
- [14] 松野将大、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“容量期待値保証型ルーティングのトポロジー依存性評価”、電子情報通信学会総合大会（東広島市）（2020年3月17日）、B-12-3
- [15] 葛西恵介、中沢正隆、“自己注入同期型 1.5  $\mu$  m 帯利得スイッチング DFB-LD による 10 GHz, 6.2ps フーリエ限界コヒーレント光パルスの発生”、電子情報通信学会総合大会（東広島市）（2020年3月20日）、C-3/4-74
- [16] 山中直明、“Expected-Capacity Guaranteed Routing toward Reliable Access-Metro Edge Computing”、16th International Conference on IP+Optical Network (iPOP2020)（オンライン開催）

(2020年9月10日)

- [17] 湊直樹、神田祥宏、鹿嶋正幸、佐々木浩紀、“スター型 16 相 APSK 変復調を用いた光加入者網 100Gb/s デジタルコヒーレント伝送に関する検討” 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (オンライン開催) (2020年9月15日), B-10-23
- [18] 岡本聡、杉浦叶典、村上正樹、山中直明、“Block-stream as a Service を活用するアクセスメトロエッジコンピューティング技術の提案”、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (オンライン開催) (2020年9月17日), B-12-2
- [19] 吉兼昇、“NETCONF と gNMI を用いた光伝送装置の監視機能に関する比較検証”、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (オンライン開催) (2020年9月17日), B-12-5
- [20] 釣谷剛宏、“ネットワークインフラにおけるテストベッドの必要性と求められる機能”、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (オンライン開催) (2020年9月17日), BI-7-3
- [21] 松野将大、村上正樹、植松芳彦、栗本崇、岡本聡、山中直明、“OSPF Extension for Expected Capacity Guaranteed Routing with Multipath Transmission Based on Long-term Failure Prediction”、22nd Annual International Conference on Next Generation Internet and Related Technologies (Net-Centric 2020) (オンライン開催) (2020年12月4日), F1-2
- [22] 釣谷剛宏、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、山中直明、“けいはんな情報通信オープンラボ研究推進協議会・IoT ネットワーク基盤分科会・オープン光ネットワーク基盤 WG”、電子情報通信学会 光通信システム (OCS) 研究会主催 第 34 回 OCS シンポジウム (オンライン開催) (2020年12月15日)
- [23] 山中直明、“ネットワークとコンピューティングのリソース完全融合型アクセスメトロネットワークを目指して”、KEIO TECHNOMALL2020 (オンライン開催) (2020年12月18日)
- [24] 廣岡俊彦、葛西恵介、吉田真人、中沢正隆、“光・無線融合型フルコヒーレントアクセスネットワークの実現に向けて”、電子情報通信学会スマート無線研究会 (オンライン開催) (2021年1月25日), vol. 120, no. 341, SR2020-49, pp. 15-20
- [25] 葛西恵介、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“61 GHz 帯 8 Gbaud, 256 QAM 光・無線融合フルコヒーレント伝送”、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「光波とマイクロ波をシームレスに繋ぐフルコヒーレント通信・計測システムに関する研究」(オンライン開催) (2021年2月2日), 一般講演-1
- [26] 竹沢永訓、井出昌史、梨本恵一、“ソフトウェアでフレキシブルに  $M \times N$  ポート設定可能な波長選択スイッチの開発”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (オンライン開催) (2021年3月1日), vol. 120, no. 388, PN2020-41, pp. 1-4
- [27] 葛西恵介、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“注入同期キャリア周波数変換器を用いたフルコヒーレントアクセス伝送システム”、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「超広帯域通信のための次世代システムの創成に関する研究」(オンライン開催) (2021年3月4日), 一般講演-3
- [28] 川瀬涼太、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“特定人物搜索のためのエッジ間連携による人物追跡手法”、電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (オンライン開催) (2020年3月4日), vol. 120, no. 413, NS2020-125, pp. 13-18
- [29] 中沢正隆、“次世代 RAN の実現に向けたフルコヒーレントアクセスシステム”、電子情報通信学会総合大会 (オンライン開催) (2021年3月9日), CI-7-6

- [30] 鹿嶋正幸、湊直樹、神田祥宏、“400G-PON を実現する低コスト光トランシーバの一検討”、電子情報通信学会総合大会（オンライン開催）（2021年3月9日）、BI-10-1
- [31] 吉兼昇 “ウィズコロナ時代における外部連携とオープン API を活用した共同実験”、電子情報通信学会総合大会（オンライン）（2021年3月9日）、B-10-5
- [32] 湊直樹、神田祥宏、鹿嶋正幸、佐々木浩紀、“光加入者網 100Gb/s デジタルコヒーレント伝送におけるスター型 16 相 APSK 信号の誤り率特性評価”、電子情報通信学会総合大会（オンライン開催）（2021年3月11日）、B-10-32
- [33] 奥村泰地、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“高確率で故障するネットワーク条件下における耐障害性マルチパスルーティング”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（オンライン開催）（2021年6月24日）、vol. 121, no. 76, PN2021-10, pp. 33-39
- [34] 徐蘇鋼、石井紀代、吉兼昇、Sifat Ferdousi、白岩雅輝、廣田悠介、釣谷 剛宏、Massimo Tornatore、淡路祥成、和田尚也、並木周、Biswanath Mukherjee、“An Approach to Large-scale Disaster-Resilient Optical Networks with Openness and Disaggregation”、電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会（オンライン開催）（2021年9月9日）、vol. 121, no. 172, CS2021-46, pp. 27-32
- [35] 葛西恵介、菅貴志、吉田真人、廣岡俊彦、中沢正隆、“Fabry-Perot LD 及び ECLD を用いた光注入同期回路の性能比較”、電子情報通信学会ソサイエティ大会（オンライン開催）（2021年9月15日）、C-3/4-32
- [36] 佐藤大晟、葛西恵介、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“光注入同期型キャリヤ周波数変換回路を用いた 64 Gbit/s 256 QAM, 61 GHz 帯フルコヒーレント伝送”、電子情報通信学会ソサイエティ大会（オンライン開催）（2021年9月17日）、B-10-28
- [37] 葛西恵介、“Digital Coherent Optical Access Technology”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年9月30日）
- [38] 松本悠平、“Real-time Line monitoring System”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年9月30日）
- [39] 山中直明、岡本聡、“Massively parallel and fault tolerant photonic networks towards beyond 5G era”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年9月30日）
- [40] 梨本恵一、“Flexible and Low-Power Consumption WSS”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年9月30日）
- [41] 釣谷剛宏、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、山中直明、“Activities of Interoperability Working Group and Open Optical Network (O2N) Working Group”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年9月30日）
- [42] 石井大耀、川瀬涼太、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“RPC-based Distributed Processing on Access-Metro Edge Computing Testbed”、17th International Conference on IP/IoT\_& Processing+Optical Network (iPOP2021)（オンライン開催）（2021年10月1日）、G-2
- [43] 佐藤大晟、白幡晃一、葛西恵介、廣岡俊彦、吉田真人、中沢正隆、“注入同期型キャリヤ周波数変換回路とこれを用いた 61 GHz 帯フルコヒーレント伝送”、第二回 電子情報通信学会支部 CoE シンポジウム—中国支部—、ポスターセッション、（オンライン）、（2021年12月7日）
- [44] 山中直明、“Beyond 5G に向けた、新しい光ネットワークのコンセプト-故障予測による耐障害性向上

- ルーティング技術”、KEIO TECHNOMALL2021（オンライン開催）（2021年12月10日）
- [45] 釣谷剛宏、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、山中直明、“けいはんな情報通信オープンラボ研究推進協議会・IoTネットワーク基盤分科会・オープン光ネットワーク基盤WG”、電子情報通信学会 光通信システム（OCS）研究会主催 第35回OCSシンポジウム（オンライン開催）（2021年12月14日）
- [46] 葛西恵介、鹿嶋正幸、山中直明、岡本聡、釣谷剛宏、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、梨本恵一、“新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発 III.高効率光アクセスメトロ技術の研究開発”、電子情報通信学会 光通信システム（OCS）研究会主催 第35回OCSシンポジウム（オンライン開催）（2021年12月14日）
- [47] 佐藤 大晟、白幡 晃一、葛西 恵介、廣岡 俊彦、吉田 真人、中沢 正隆、“61 GHz 帯フルコヒーレント伝送における注入同期キャリア周波数変換法とセルフヘテロダイン法の性能比較”、電子情報通信学会光通信システム研究会（山口市/ハイブリッド開催）（2022年1月13日），vol. 121, no.320, OCS2021-34, pp.7-10
- [48] 佐藤 大晟、白幡 晃一、葛西 恵介、廣岡 俊彦、吉田 真人、中沢 正隆、“61 GHz 帯フルコヒーレント伝送における注入同期キャリア周波数変換法とセルフヘテロダイン法の性能比較”、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「コヒーレント光・マイクロ波融合通信・計測システムに関する研究」（2022年2月21日）
- [49] 葛西 恵介、菅貴志、吉田真人、廣岡 俊彦、中沢 正隆、“Fabry-Perot LD 及び ECLD を用いた光注入同期回路の性能比較”、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「広帯域通信のための次世代システムの創成に関する研究—光モード高度制御に関する研究開発—」（2022年2月28日）
- [50] 村松航希、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明、“リアルタイム動画画像処理における計算資源の利用可能確率に基づく実効レート期待値保証型分散処理割り当て手法”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（オンライン開催）（2022年3月2日），vol. 126, no. 386, PN2021-73, pp. 110-116
- [51] 佐藤 大晟、白幡 晃一、葛西 恵介、廣岡 俊彦、吉田 真人、中沢 正隆、“61 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送における注入同期型キャリア周波数変換法とセルフヘテロダイン検波法の性能比較”、電子情報通信学会総合大会（オンライン開催）（2022年3月17日），B-10-17

## 10 出願特許リスト

- [1] 湊直樹、“変調装置、復調装置、変調方法、復調方法及び伝送装置”、日本、2019年5月29日（特願2019-100634）
- [2] 神田祥宏、“信号変換装置、変調装置、信号逆変換装置、復調装置、変調方法、復調方法及び伝送装置”、日本、2019年9月30日（特願2019-179806）
- [3] 柳町成行、“ネットワーク監視装置およびネットワーク監視方法”、日本、2020年2月19日（特願2020-026129）
- [4] 神田祥宏、“受信機、光伝送装置、及び、ファイバ複屈折変動の補償方法”、日本、2020年3月30日（特願2020-059695）
- [5] 柳町成行、“光ネットワーク、ネットワーク管理装置及びネットワーク管理方法”、日本、2020年9月14日（特願2020-153426）
- [6] 有川学、“通信システム、受信機、歪み検出装置、方法、及びプログラム”、日本、2020年10月28日

日（特願 2020-180884）

- [7] 湊直樹、“伝送装置、受信側伝送装置及び伝送方法”、日本、2020年9月28日（特願 2020-158910）
- [8] 柳町成行、“NETWORK MONITORING DEVICE AND NETWORK MONITORING METHOD”、海外、2021年2月11日（17/173656）
- [9] 太縄陽介、“グレーティングフィルタ”、日本、2021年2月25日（特願 2021-028124）
- [10] 柳町成行、“光ネットワーク管理装置、光ネットワークシステム、光ネットワーク管理方法および光ネットワーク管理プログラム”、日本、2021年3月22日（特願 2021-047715）
- [11] 竹沢永訓、井出昌史、“光信号選択装置、および光信号選択方法”、日本、2021年3月30日（特願 2021-057533）
- [12] 井出昌史、竹沢永訓、“光信号選択装置、および光信号選択方法”、日本、2021年3月30日（特願 2021-057534）
- [13] 有川学、“通信システム、受信機、歪み検出装置、方法、及びコンピュータ可読媒体”、海外、2021年4月20日（PCT/JP2021/016026）
- [14] 長谷川洋平、“通信装置、通信制御方法、及び非一時的なコンピュータ可読媒体”、海外、2021年7月20日（PCT/JP2021/027203）
- [15] 柳町成行、“光ネットワーク、ネットワーク管理装置及びネットワーク管理方法”、海外、2021年8月20日（PCT/JP2021/030524）
- [16] 神田祥宏、“偏波分離回路及び偏波分離方法”、日本、2021年9月21日（特願 2021-153034）
- [17] ワンツェン、吉兼昇、釣谷剛宏、“通信装置”、日本、2021年12月6日（特願 2021-197833）
- [18] 湊直樹、“光変調装置、光変調プログラム、及び光変調方法”、日本、2022年1月13日（特願 2022-003524）
- [19] 竹沢永訓、井出昌史、“光信号選択装置、および光信号選択方法”、日本、2022年3月30日（特願 2022-0555693）
- [20] 井出昌史、“光信号選択装置および光信号選択装置の制御方法”、日本、2022年3月30日（特願 2022-0555694）
- [21] 角田聖也、“探索装置、システム、探索方法、およびプログラム”、日本、2022年3月30日（特願 2022-057447）

## 1 1 取得特許リスト

- [1] 湊直樹、“変調装置、復調装置、変調方法、復調方法及び伝送装置”、日本、2019年5月29日、2021年5月7日、第 6879333 号
- [2] 神田祥宏、“受信機、光伝送装置、及び、ファイバ複屈折変動の補償方法”、日本、2020年3月30日、2022年1月11日、第 7006716 号
- [3] 湊直樹、“伝送装置、受信側伝送装置及び伝送方法”、日本、2020年9月28日、2022年2月21日、第 7028295 号

## 1 2 国際標準提案・獲得リスト

なし

### 1 3 参加国際標準会議リスト

- [1] ITU-T Q2/SG15 (FSAN)、西安 (中国)、2019 年 4 月 8 日～12 日
- [2] ITU-T Q2/SG15 (FSAN)、デュッセルドルフ (ドイツ)、2019 年 10 月 21 日～25 日

### 1 4 受賞リスト

- [1] 松本悠平、新谷和則、谷田部漠、小熊健史、PN 研究会賞 2019 PN 研究賞、“OPEN PHOTONICS NETWORK の実現に向けたリアルタイム線路監視システムの提案”、2020 年 3 月 2 日
- [2] 葛西恵介、佐藤大晟、白幡晃一、吉田真人、廣岡俊彦、中沢正隆、ICETC2021 Best Paper Award、“Performance comparison between injection-locked carrier frequency conversion and self-heterodyne detection methods in coherently-linked optical and wireless transmission for 6G”、2021 年 12 月 2 日

### 1 5 報道発表リスト

#### (1) 報道発表実績

- [1] “Beyond 5G 時代に向けた、新しい光ネットワーク運用コンセプト実験に成功”、慶應義塾大学、2021 年 12 月 6 日
- [2] “低消費電力フレキシブル波長選択スイッチの外販を開始”、エピフォトニクス株式会社、2022 年 3 月 9 日
- [3] “オープン光ネットワークの監視・制御の課題解決に向けた共通の監視・管理制御技術の開発・実証に成功”、慶應義塾大学、NEC、KDDI 総合研究所、2022 年 3 月 30 日

#### (2) 報道掲載実績

- [1] “慶大、Beyond 5G 時代に向けた新しい光ネットワーク運用コンセプト実験に成功”、日本経済新聞オンライン版、2021 年 12 月 6 日、  
[https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP623115\\_W1A201C2000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP623115_W1A201C2000000/)
- [2] “慶大、次世代通信網向け耐障害性向上実験に成功”、OPTRONICS ONLINE、2021 年 12 月 6 日、  
<https://optronics-media.com/news/20211206/75475/>
- [3] “EpiPhotonics、低消費電力フレキシブル波長選択スイッチ外販開始”、Laser Focus World Japan、2022 年 3 月 14 日、  
<http://ex-press.jp/lfwj/lfwj-news/lfwj-products-app/46239/>
- [4] “慶大・NEC・KDDI 総研、オープン光ネットワークの監視・制御の課題解決に向け共通の監視・管理制御技術の開発・実証に成功”、日本経済新聞オンライン版、2022 年 3 月 30 日、  
[https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP629503\\_Q2A330C2000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP629503_Q2A330C2000000/)
- [5] “慶大ら、オープン光ネットワークの監視・管理を実証”、OPTRONICS ONLINE、2022 年 3 月 30 日、  
<https://optronics-media.com/news/20220330/76774/>
- [6] “オープン光ネットワークの共通の監視・管理技術開発 - 慶應大×NEC×KDDI 総研”、TECH+、2022 年 3 月 31 日、  
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220331-2308327/>
- [7] “慶大と NEC、KDDI 総合研究所 オープン光ネットワークの共通監視・制御を可能に”、電経新聞、2022 年 4 月 4 日、朝刊 2 面

### 研究開発による成果数

	平成30年度	令和元年度	令和2年度
査読付き誌上発表論文数	0件 ( 0件)	1件 ( 1件)	5件 ( 4件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1件 ( 1件)	2件 ( 2件)	9件 ( 6件)
その他の誌上発表数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	1件 ( 0件)
口頭発表数	6件 ( 0件)	9件 ( 0件)	17件 ( 1件)
特許出願数	0件 ( 0件)	4件 ( 0件)	8件 ( 1件)
特許取得数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
国際標準提案数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
国際標準獲得数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
受賞数	0件 ( 0件)	1件 ( 0件)	0件 ( 0件)
報道発表数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
報道掲載数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)

	令和3年度	合計
査読付き誌上発表論文数	5件 ( 3件)	11件 ( 8件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	9件 ( 7件)	21件 (16件)
その他の誌上発表数	0件 ( 0件)	1件 ( 0件)
口頭発表数	19件 ( 0件)	51件 ( 1件)
特許出願数	9件 ( 3件)	21件 ( 4件)
特許取得数	3件 ( 0件)	3件 ( 0件)
国際標準提案数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
国際標準獲得数	0件 ( 0件)	0件 ( 0件)
受賞数	1件 ( 0件)	2件 ( 0件)
報道発表数	3件 ( 0件)	3件 ( 0件)
報道掲載数	7件 ( 0件)	7件 ( 0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載され

た論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注5：PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。（何カ国への出願でも1件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しないこと。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しないこと。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。