

超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発  
(課題Ⅱ 基幹ネットワーク高速大容量化・低消費電力化技術)

Research and Development of Ultra-high-speed and Low-power-consumption  
Optical Network Technologies

High-speed, Large Capacity and Power Efficient Technologies for Optical Backbone  
Networks

代表研究責任者 富澤 将人 日本電信電話株式会社 未来ねっと研究所  
研究開発期間 平成 24 年度～平成 26 年度

【Abstract】

This paper describes the results of the « Research and Development of Ultra-high-speed and Low-power-consumption Optical Network Technologies ». In this project, cutting-edge digital-coherent optical transmission technologies for 400Gbps-class capacity per channel were successfully developed. Adaptive schemes were employed in digital-coherent optical transmitter and receiver for adapting the varying transmission circumstances such as distance, chromatic dispersion, polarization mode dispersion and optical signal-to-noise ratio. In order to reduce the power consumption, digital signal processing circuit was optimally designed and successfully verified.

The following technologies were established for 400Gbps per channel transmission with low power consumption and for reducing the network power consumption to half of conventional one.

- (1) Adaptive modulation/demodulation technologies.
- (2) Adaptive liner equalization technologies.
- (3) Adaptive error correction and nonlinear compensation technologies.
- (4) Low power digital signal processing circuit technologies.

## 1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 富澤 将人 (日本電信電話株式会社 未来ねっと研究所)
- **研究分担者** 中村 祐一 (日本電気株式会社 グリーンプラットフォーム研究所)  
寺原 隆文 (富士通株式会社 ネットワークプロダクト事業本部)
- **研究開発期間** 平成 24 年度～平成 26 年度
- **研究開発予算** 総額 4,059 百万円

(内訳)

平成 24 年度	平成 25 年度 (平成 24 年度補正分)	平成 25 年度	平成 26 年度 (平成 25 年度補正分)
2,000 百万円	1,214 百万円	640 百万円	205 百万円

## 2 研究開発課題の目的および意義

我が国のインターネット通信量は大幅な伸びを続けており、今後も大幅な増加が予想されている。同時に、これまでの通信機器を単純に高速化した場合、伝送する情報量の増加に比例して通信機器の消費電力も大幅に増加することになる。そのため、大量の情報を高速かつ低消費電力で伝送できる通信方式や通信機器が求められている。

このようなネットワークに対する大容量化の要求と低消費電力化の要求を同時に満たすためには、これまでの延長線上の技術としての高速化と省電力化に加えて、トラフィック量や伝送距離・伝送路特性といった変動要因に適応的に対応できる機能が必要となる。

一方、衰えることを知らない大容量化への要求に応えるべく、デジタルコヒーレント技術を用いた100Gbps級光伝送技術が開発され、現在はシステム化に向けた実用化フェーズに入っている。しかしながら、今後益々伸びるであろうトラフィック需要を将来にわたり安定的に満たしていくためには、このタイミングでポスト100Gbpsを見据えた基盤技術の開発を始めることが求められる。

本研究課題では、1チャンネルあたり400Gbps級の容量を有し、トラフィック量や伝送距離・伝送特性といった変動要因に適応的に対応することが可能な適応伝送技術に関する様々な技術開発を実施する。これら技術の確立により、ネットワークの大容量化、効率化、低消費電力化を可能とし、国民生活の利便性向上、国際市場における我が国の競争力の確保を図るとともに、地球温暖化対策にも大きく貢献するものである。

## 3 研究開発成果

### 3.1 適応変復調伝送技術

最大16値の多値信号に対応し、伝送効率を従来技術の2倍以上に高めることができる伝送路推定アルゴリズム、及び、変復調方式選択アルゴリズムを開発し、1波長あたり400Gbpsのスループットを持つ信号処理技術を確立する。

#### ア) デジタルコヒーレントトレーニング信号処理技術

2値位相変調(BPSK)/4値位相変調(QPSK)/16値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能なトレーニング信号処理アルゴリズムに関して、最大400Gbps級のスループットを持つ超高速信号に対応可能なトレーニング信号系列フォーマット、および標準シングルモードファイバ60,000ps/nmの波長分散推定に適用可能な波長分散推定アルゴリズムを考案した。具体的には、400Gbps級のスループット対応に向けた送信信号フィルリングによるスペクトル狭窄化に対応したトレーニング信号系列フォーマットの確立、前記トレーニング信号系列に対応した波長分散推定アルゴリズムの確立を行った。また、考案手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。さらに、回路記述言語モデルの設計を進め、その正常動作および推定性能が高位言語モデルと同等になることを確認し、最大16QAMの多値信号に対して、波長分散60,000ps/nmまでの推定動作が可能な回路設計となっていることを確認した。前述の通り、回路記述言語レベルでの回路設計を完了し、推定動作の評価が可能な一次試作を実施した。さらに、試作回路を用いて期待通りの伝送路推定動作が可能であることを確認した。さらに、BPSK/QPSK/16QAMに加えて8値直交振幅変調(8QAM)の適応変復調方式に適用可能なトレーニング信号処理アルゴリズムに関して、推定値のズレが少なくPMD耐力が高いトレーニング系列の設計を行った。また、波長分散250,000ps/nm超の新設海底ケーブルシステムにおいて強力な差別化要素となる大規模波長分散推定技術として、周波数領域等化フィルタと組み合わせた2回推定技術を確立した。さ

らに上記技術を用いて、光伝送テストベッドにおいて、QPSK、8QAM、16QAM について最大 10,000km、5,600km、2,600km の伝送を行い、波長分散が期待通りの推定動作を示すことを図 1 の通り確認した。

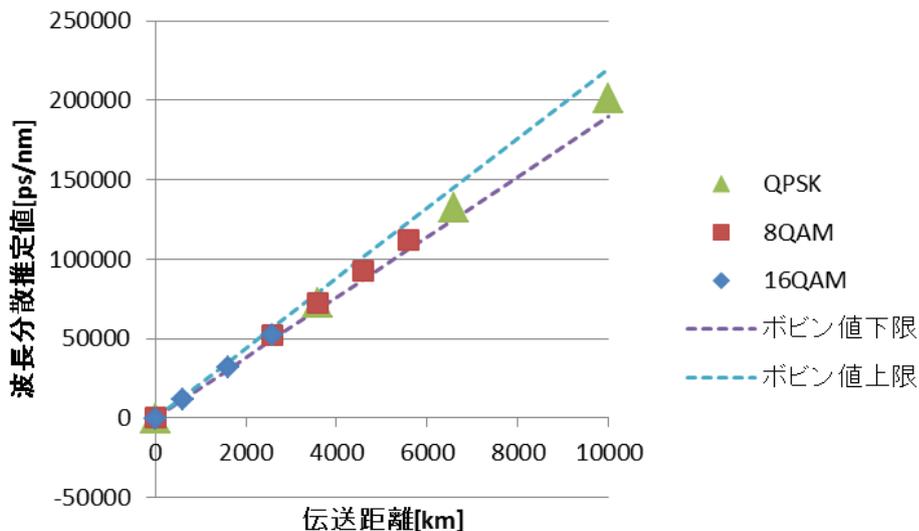


図 1 光伝送テストベッドにおける波長分散推定値の伝送距離依存性

#### イ) パイロットトーン信号処理技術

2 値位相変調(BPSK)/4 値位相変調(QPSK)/16 値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能な、パイロット信号を用いて光位相雑音を推定・補償するアルゴリズムに関して、周波数ドメインにてパイロットトーンを挿入するアプローチと、時間ドメインにてパイロットシンボルを挿入するアプローチを並行して検討し、両方式の性能を計算機シミュレーションを用いて比較し、高い性能を有する後者のアプローチを選択した。その結果、最大 16QAM の多値信号において位相雑音耐力を 2 倍以上に向上できることを確認した。そして、時間ドメイン方式のパイロット信号による位相雑音推定及び補償方式（以下、パイロット位相雑音補償）を包含したパイロット信号処理アルゴリズムの回路設計を完了した。その際、位相雑音耐力を 2 倍以上に向上するために必要な演算ビット幅パラメータを設定して、設計した。さらに、前記のアルゴリズム評価が可能な試作を実施した。さらに、回路試作を用いてパイロット信号処理アルゴリズム及び回路設計が期待通り動作することを確認した。BPSK/QPSK/16QAM および 8 値直交振幅変調(8QAM)の適応変復調方式に適用可能な、時間ドメイン方式のパイロット位相雑音補償を包含したパイロット信号処理アルゴリズムの回路設計に基づいた性能モデルに関して、性能検証を実施し、検証を完了した。また、他機能との連携動作を計算機シミュレーション及び実験により検証し、パイロット信号処理回路技術を確立した。前記技術を用いて、光伝送テストベッドにおいて伝送実験を実施し、期待通りの動作を示すことを図 2 の通り、確認した。

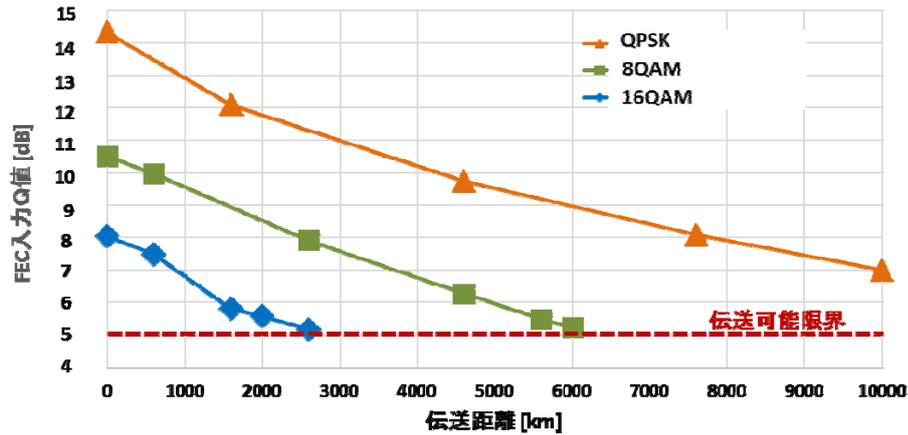


図2 光伝送テストベッドにおける伝送距離依存性

ウ) 受信フロントエンド技術

2 値位相変調(BPSK)/4 値位相変調(QPSK)/16 値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能な、受信フロントエンド技術の確立のために、最大 16 値の多値信号に対応可能な要求性能と設計技術を検討し、回路試作と評価により検証した。まず、既存の受信フロントエンドの 100G DP-QPSK による評価により、電気信号部の特性パラメータである周波数平坦度とトータルハーモニックディストーション (THD) が Q 値に与える影響を検討した。また、シミュレーションによる要求性能の課題抽出を行った。光伝送シミュレーションを行い、電気信号処理部の特性パラメータである周波数平坦度と THD が Q 値に与える影響を DP-QPSK 及び DP-16QAM の両者について調べた。その結果を踏まえ、多値信号に対応可能な電気信号処理部への目標性能を、周波数平坦度<1dB、THD<3%と設定した。さらに、偏波ビームスプリッタ、ビームスプリッタおよび 90 度ハイブリッドから成る光信号処理回路 (DPOH) チップをサブマウントに搭載し、ローカル光および光信号を入射する光ファイバが接続された DPOH サブアセンブリ、セラミック基板上にフリップチップ実装した PD チップ、DPOH と PD を光結合させる光学系、TIA チップ、バイパスコンデンサ等の PD/TIA の周辺回路部品、これらを搭載し高周波電気信号端子を有する小型パッケージから構成される光受信フロントエンドを試作し、本光フロントエンドの単体評価により、最小制御で 100mVpps 以下、最大制御で 600mVpps 以上の出力振幅が得られることを確認するとともに、当初目標 THD<3%について試作結果により検証した。また、課題(d)の試作回路との連携評価として、ADC TEG を用いて特性補償フィルタ前段までの THD を評価する先行検証を実施して課題抽出を行った。さらに、別の当初目標である周波数平坦度<1dB について、上記試作で抽出した課題に基づき受信フロントエンドの改良試作を行い、受信フロントエンドの単体特性に影響を与えるフォトダイオード (PD) とトランスインピーダンスアンプ (TIA) 間のワイヤ長を変えた受信フロントエンドを実際に試作して評価することにより、ワイヤ長と周波数レスポンスのピーク量の関係を明らかにした。この結果、当初目標である周波数平坦度 (ピーク量) <1dB にできる実装条件を見出し、高周波実装の最適化を図った。また、16QAM 信号による Q 値評価を行い、ピーク量 1dB 以下とした受信フロントエンドが、最大 16 値の多値信号を含む適応変調に適用可能であることを図3の通り検証した。

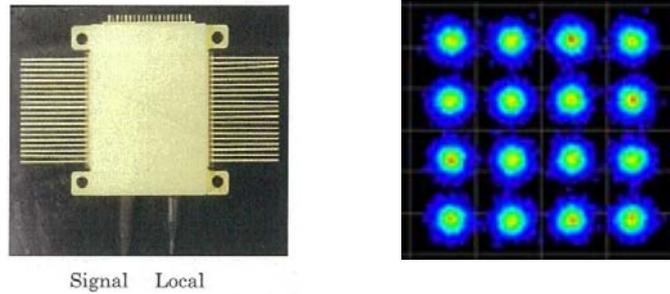


図3 32Gbaud 単一偏波 16QAM 受信時のコンスタレーション実機評価

### 3. 2 線形適応等化技術

最大1波長あたり 400Gbps 級の高速光信号において、課題 (b)、(c) の技術により、現状の技術 (100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合 (伝送距離 1000km)) と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍 (2000km) 程度の伝送距離を実現する。

#### ア) 送受信スペクトル整形技術

伝送距離拡大に向けて、多数の通信機器を通過する際に生じる周波数特性などの線形な伝送特性変化による品質劣化を周波数軸上で補償 (スペクトル整形) する技術、ならびに、サブキャリア多重により 400Gbps 級伝送実現する際に生じるクロストークを低減するスペクトル整形技術の開発を行った。さらに、伝送過程で生じる伝送劣化に応じてスペクトル整形を行うため最適なフィルタ形状を選択可能なフィルタ係数決定手法を確立した。具体的には、400Gbps 級伝送を実現するサブキャリア多重に必要な、ナイキストフィルタリングにより隣接チャネル干渉を抑える最適設定を見出すため、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを試作し、実光信号を用いて動作を確認した。37.5GHz 間隔の 400Gbps 級サブキャリア多重実光信号に対して、ナイキストフィルタをロールオフ率 0.1 としてかけることで、隣接チャネルの干渉の影響が大きいロールオフ率 0.5 の場合に比べて 1.7dB の Q 値改善効果が得られることを確認し 400Gbps 級スループットでの動作を実証した。また、ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) 機器通過に伴う帯域狭窄効果を補償するスペクトル整形機能を確認するため、QPSK 信号の 2,600km 伝送において、送信端周波数応答調整有無での特性比較を行った。通過帯域幅 30GHz の条件において、調整がない場合で生じた劣化を調整により 0.6dB まで小さく抑えた (図 1)。得られた結果に十分なマージンを含むため、3000km 級の伝送システムでの動作が十分に可能である。以上の結果より従来と比較して同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍を大きく超える伝送距離での動作を、実光信号を用いて確認完了した。

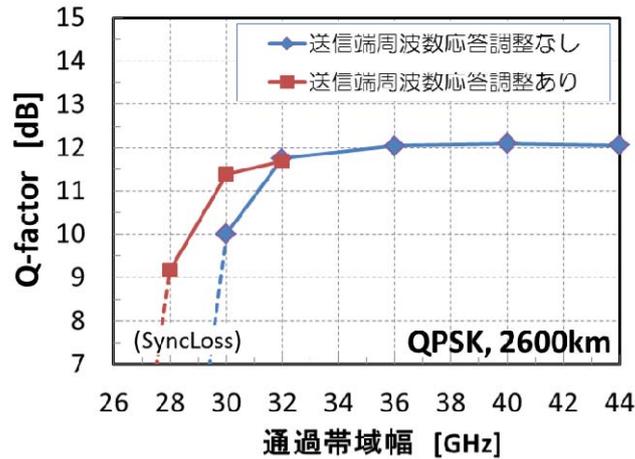


図1 通過帯域幅と Q 値の関係 (QPSK)

イ) 分割型波長分散補償技術

伝送距離拡大を実現するためには、非常に大きな複数の波長分散補償ブロックが非線形補償ブロック (課題(c)で開発) を挟んで複雑に連携して信号処理を行う必要がある。本課題では、超長距離の波長分散補償を実現するとともに、回路規模の増大を抑えながら非線形補償の効果を最大限に引き出す、最適な分散補償ブロックの分割手法を開発した。波長分散補償量の最適な分割分配機能確認のため、分割型波長分散補償技術を適用した回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを試作し、実光信号を用いた検証を行った。分割型波長分散補償機能は、非線形補償機能を挟んで連携する 3 つの周波数領域等化 (FDE) から成る。回路効率を考慮して、波長分散補償以外の機能を集約した FDE1 に大きな分散補償量を、FDE2 と FDE3 に小さな分散補償量を割り振る不均一分割 FDE 構成とした。システム検証では、伝送路を純シリカコアファイバとし、2 種の構成 (①128Gbps PM-QPSK 2,600 km, ②256Gbps, PM-16QAM, 1,600km) における、分散補償比率と FEC 入力 Q 値を測定した。詳細解析により非線形補償フィルタを最適化することで、採用した不均一分割 FDE により均等分割と同等レベルの Q 値改善が得られることを確認した。さらに、①の構成で 400Gbps 級伝送を実現する 4 サブキャリア多重を行うためナイキストフィルタをかけて伝送評価し、図 2 に示すように非線形補償により FEC 入力 Q 値が 0.3 dB 改善することを確認した。FEC 入力 Q 値が十分大きいことから、3,000 km 級の伝送と非線形補償による同程度の Q 値改善効果を得られる。②の構成でも 2 サブキャリア 400Gbps 伝送で 0.2 dB の Q 値改善が見られた。以上の結果より、不均一分割 FDE を用いた分割型波長分散補償技術について、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルにより実光信号を用いて実験的に確認し、最適な波長分散補償ブロックの分割手法を確立した。

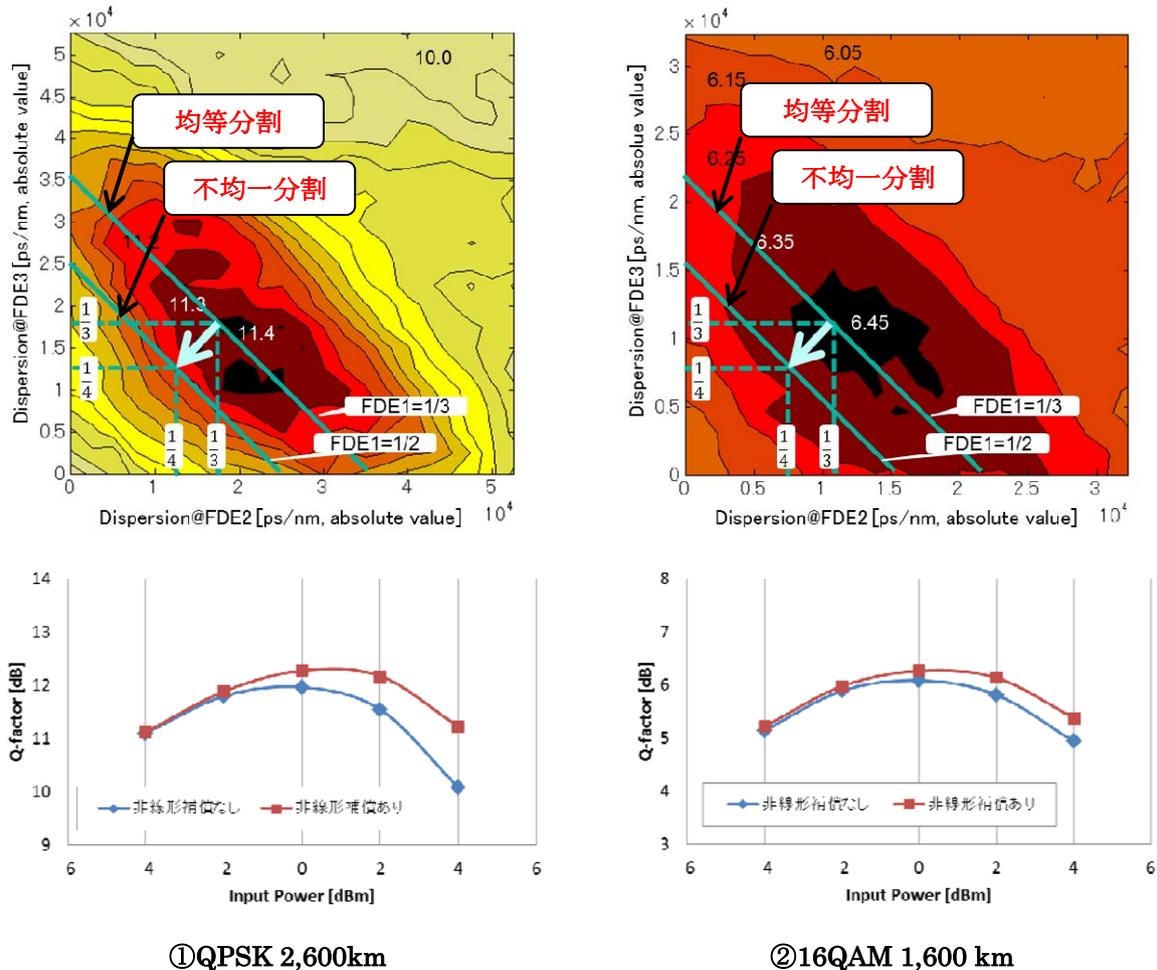


図2 不均一分散分割補償の最適化(上段)と最適波長分散補償分割を適用した伝送特性(下段)

### ウ) 線形等化フィルタ統合技術

本課題では、線形等化フィルタ集約化による制御性の向上と回路規模削減の実現に向けて、アナログフロントエンドデバイス特性補償等の波長分散補償以外の機能を集約した一つの FDE で統合して波形歪み補償する技術について開発を行った。さらに、課題ア) 送受信スペクトル整形技術とイ) 分割型波長分散補償技術を統合した統合機能モデルを試作し、実光信号を用いたシステム検証実験を実施し、開発した線形適応等化技術全体での特性検証を行った。まず、フロントエンド補償とのフィルタ統合動作確認のため、受信信号の I/Q 成分に故意に伝搬遅延差を設けて歪みを付与した信号 (IQ インバランス 3° 相当) を補償し、良好なコンスタレーションが得られることを確認した。次に、システム検証として、3 種類の WDM システム構成 (①112 波 100Gbps PM-QPSK、②112 波 150Gbps PM-8QAM、③112 波 200Gbps PM-16QAM) での受信コヒーレント検波信号を機能モデルで復調した際の Q 値を測定した。超長距離での波長分散補償性能確認のため、低損失・低非線形の伝送路を用いたところ、図 3 に示す通り、100Gbps PM-QPSK システムにおいて、伝送距離 10,000 km でも誤り訂正後エラーフリーとなる Q 値が得られた。また、すべての構成において補償回路による Q 値の改善を確認し、長距離対応波長分散補償と非線形補償の両立を確認した。さらに、ナイキストフィルタを用いた複数サブキャリア 400Gbps 伝送検証を行い、②の構成で 5,600 km、③の構成で 2,000 km まで伝送できることを確認した。以上の活動により、線形等化フィルタ統合したシステム評価において、10,000km 超長距離伝送での波長分散補償と 400Gbps 級スループット動作を確認完了した。

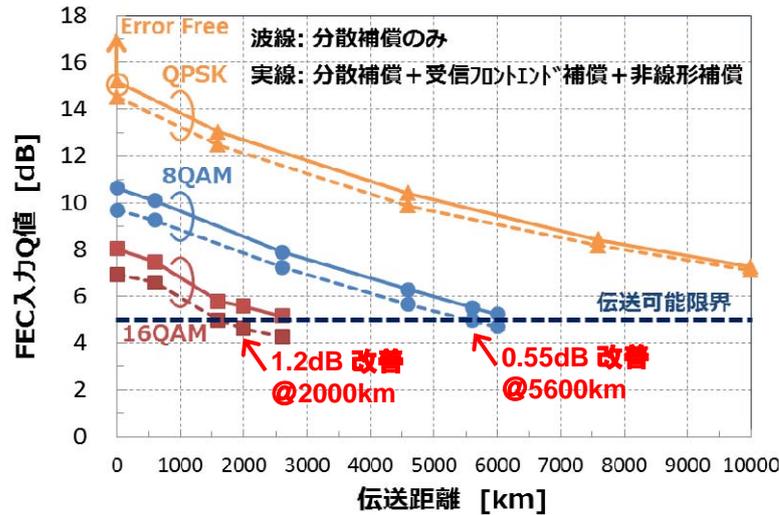


図3 112波 WDM ナイキスト QPSK/8QAM/16QAM 伝送特性

以上のように、線形適応等化技術について、送受信スペクトル整形技術、分割型波長分散補償技術、線形等化フィルタ統合技術の3つの課題に取り組み、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを用いて他課題との連携動作を考慮した検証を実施した。その結果、従来技術による伝送と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍を大きく超える3,000km級伝送での動作確認、ならびに、最大400Gbps級のスループットで動作確認を完了し、本課題の最終目標を100%達成した。

### 3.3 適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術

最大1波長あたり400Gbps級の高速光信号において、課題(b)、(c)の技術により、現状の技術(100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合(伝送距離1000km))と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍(2000km)程度の伝送距離を実現する。

#### ア) 伝送波形歪みに対応する適応非線形補償技術

試作する CMOS 電子回路を用いて、現状の技術(100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合(伝送距離1,000km))と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍(2,000km)以上の伝送実験を通じて実証した。また、400Gbpsの超高速信号伝送についても動作確認及び性能評価を実施し、適応非線形信号補償技術を確立した。

具体的には、本研究開発課題の成果として設計した非線形歪み補償回路機能と誤り訂正回路機能を搭載した試作 CMOS 回路を用いた場合、100Gbps 偏波多重 QPSK 信号に対し、従来の距離の3倍の伝送距離である3,000kmでの特性評価を行い、誤り訂正後にエラーフリーでの伝送が可能であることを、実ファイバ伝送実験を通じて実証した。また、400Gbps級の超高速信号に対応する偏波多重16値直交振幅変調(16QAM)信号に対しても、非線形歪み補償回路機能と誤り訂正回路機能の連携動作を確認し、エラーフリー伝送動作を確認した。以上の結果により、伝送波形歪みに対応する適応非線形補償技術を確立した。

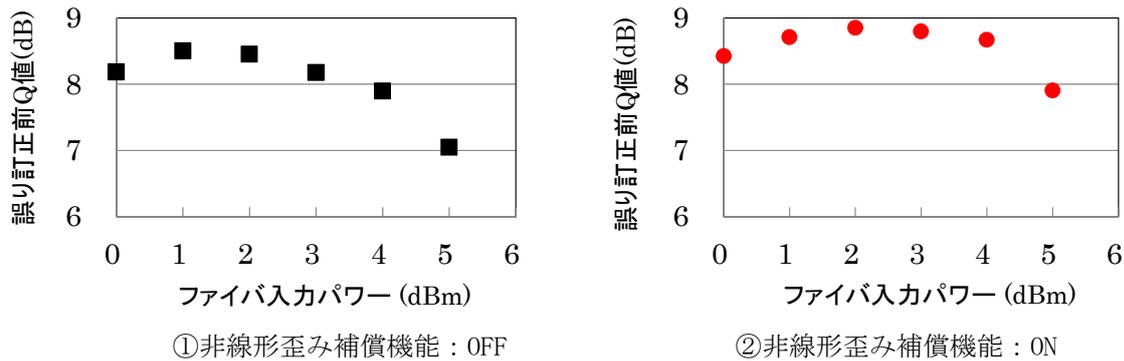


図1 100Gbps 偏波多重 QPSK 信号における非線形歪み補償機能の効果 (3,000km 伝送後)

#### イ) 適応誤り訂正・適応非線形補償の最適化技術

適応誤り訂正・適応非線形補償の各種動作パラメータを協調制御するためのインバンド制御信号重畳・検出を行う電子回路と、適応変復調に対応したサンプリング位相同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路を、評価系を用いて所期の特性を得られることを確認し、技術確立した。

具体的には、上記電子回路を適用した光送受信評価系を用い、周波数偏移変調方式によるインバンド制御信号の重畳・検出を行う電子回路技術を実現できることを実証した。また、適応変復調に対応したサンプリング位相同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路についてハードウェアエミュレーションを行い、所期の特性を得られることを確認した。以上により、インバンド制御信号重畳・検出を行う電子回路と、適応変復調に対応したサンプリング位相同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路技術を確立した。

#### ウ) フロントエンド評価・特性補正技術

最大 400Gbps 級の光信号伝送を実現すべく既存フロントエンドデバイスの特性評価、特性補正回路の性能検証を行い、特性補正を行う信号処理回路技術を確立した。

具体的には、偏波多重 16QAM 光信号で光送信器が出力する光信号品質の評価を行い、特性補正の適用により符号配置のばらつきが改善することを確認した。また、特性補正効果を定量的に確認するため光通信における基本的な性能指標である光信号対雑音比 (OSNR) の特性評価を行い、OSNR=32dB となる条件において 0.6dB の改善効果を確認した。これにより特性補正を行う電子回路技術を確立した。

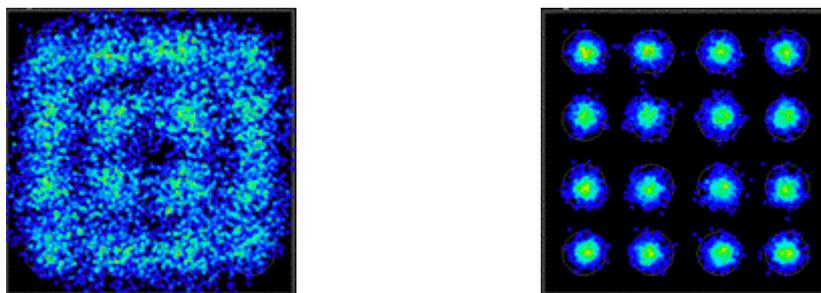


図2 送信フロントエンドデバイスの特性補正効果 (16QAM)  
(左: 特性補正前, 右: 特性補正後)

### 3. 4 低消費電力信号処理回路技術

#### ア) 適応変復調伝送回路技術

最大 400Gbps 級のスループットを実現可能な適応変復調伝送技術に関して、低消費電力信号処理統合検証に適用可能な変復調方式選択および伝送路品質推定を行う適応変復調伝送回路を実現する技術を確立する。

#### イ) 線形適応等化回路技術

最大 1 波長あたり 400Gbps 級の高速光信号において、課題 (b)、(c) の技術により、現状の技術 (100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合 (伝送距離 1000km)) と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍 (2000km) 程度に伝送距離を拡大する回路を実現する技術を確立する。

#### ウ) 適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術

最大 1 波長あたり 400Gbps 級の高速光信号において、課題 (b)、(c) の技術により、現状の技術 (100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合 (伝送距離 1000km)) と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍 (2000km) 程度に伝送距離を拡大するために必要な回路を実現する技術を確立する。

#### エ) 低消費電力信号処理統合検証技術

デジタルコヒーレント送受信部、光ノード、光伝送路のモデルを相互接続した統合検証技術を用いて最大 400Gbps 級の送受信信号処理回路のハードウェア実装の設計・試作を行い、動作・消費電力検証、および外部機能との適応的連携により、基幹ネットワークの消費電力を 1 波長あたり 100Gbps の伝送方式と比較して 1/2 以下 (「単位伝送速度×単位伝送距離」を単位として消費電力を比較した場合。) に削減可能であることを実証する。

#### ア) 適応変復調伝送回路技術

課題(a)で考案した波長分散推定方式およびパイロット信号による位相雑音推定・補償方式について、信号処理アルゴリズムを実現する為の回路構成を検討し、レジスタ設定によりパラメータを変更できる回路構成を 25MGate 以下の回路規模で実現できることを確認し、適応変復調伝送方式に関する回路実現技術を確立した。さらに検討を進め、回路全体としての性能評価を通して、当該ブロック回路の必要条件を明確化し、低消費電力化を図り、当初見積もり 25MGate を下回る回路規模にて実現する低消費電力回路設計を完了した。さらに、低消費電力化適用後の回路設計にて、必要性能を満たすことを確認し、設計技術を確立した。さらに、性能検証ならびに機能モデルとの一致性検証を通して、低消費電力化を適用した消費電力削減モデルにおいて、要求性能が実現できることを、シミュレーションおよび実験により確認した。上記に加え、適応変復調を実現する QPSK、16QAM、8QAM 方式のそれぞれについて、波長分散推定回路及びパイロット位相雑音補償回路が正常に動作することを確認することで、要求性能実現と消費電力抑圧を両立する適応変復調伝送回路技術を確立した。前記技術を用いた消費電力削減モデルでの光伝送テストベッドにおける伝送実験の評価結果(QPSK)を、図 1 に示す。

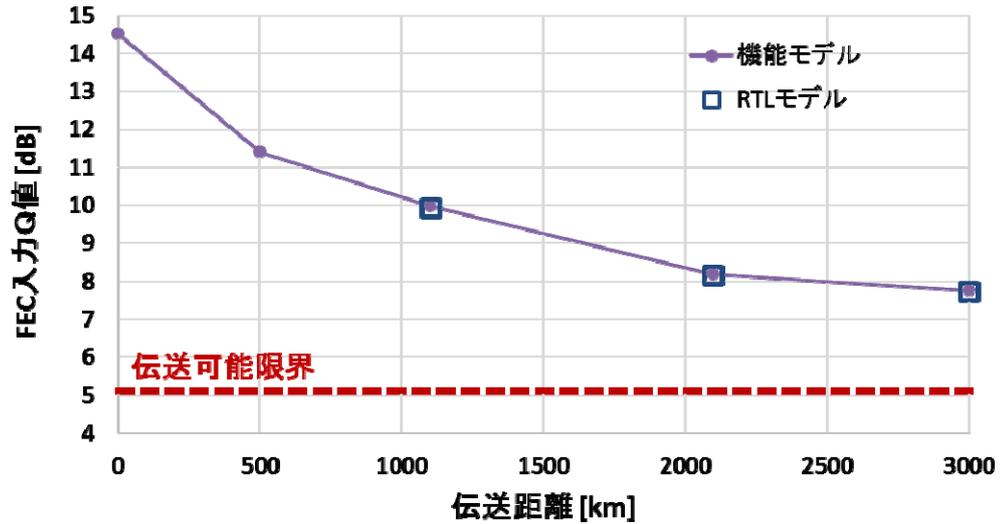


図1 消費電力削減モデルにおける QPSK 伝送特性評価

イ) 線形適応等化回路技術

400Gbps 級の高速光信号伝送に向けた線形等化回路方式について、伝送距離の拡大と消費電力の低減とを両立することが可能な信号処理回路技術を確認した。

具体的には、オーバーラップ FDE 方式を用いた線形適応等化回路において、伝送距離に応じて消費電力を最適化可能とする回路方式を検討し、その回路実装仕様を策定した。オーバーラップ FDE 方式では、オーバーラップ量がインパルス応答長程度必要となる特性を利用し、補償に必要なインパルス応答長に対して FFT フレームサイズを最適な値に適応的に変更できる構成とした (図 2)。その結果、伝送距離に応じて、最大 1/2 に消費電力を削減できることを確認した (図 3)。策定した回路仕様に基づき、高位言語 C により機能レベル回路記述を作成・評価・検証を実施した。さらに、RTL (Register Transfer Level: レジスタ転送レベル) 言語を用いた論理モデルの作成・シミュレーションにより動作確認、さらにはレイアウト工程まで実施したゲートレベル回路記述の部分設計を行い、伝送長距離化を実現する線形等化回路が実用的な回路規模、及び消費電力で実現可能であることを明らかにした。

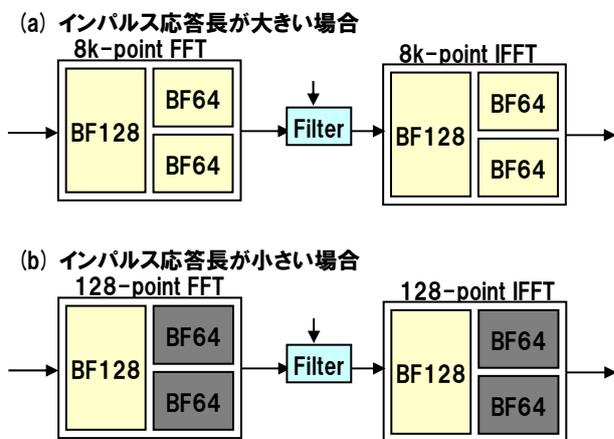


図2 線形適応等化回路の構成

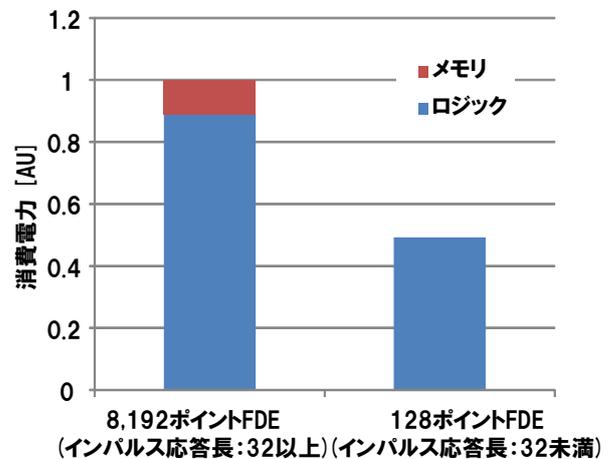


図3 消費電力最適化の効果

#### ウ) 適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術

受信端波形歪み補償・非線形偏波クロストーク除去・FEC復号を含む機能を実現する信号処理電子回路機能の設計を完了し、実用的な回路規模と消費電力で所定の機能・性能が得られることを確認することで、適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術を確立した。

具体的には、ハードウェア記述言語（RTL）で記述された回路モデルやフロントエンド回路を統合した環境の構築、およびエミュレータを用いた評価技術の確立によって、集積化された信号処理電子回路の性能が期待通りとなっていることを確認した。

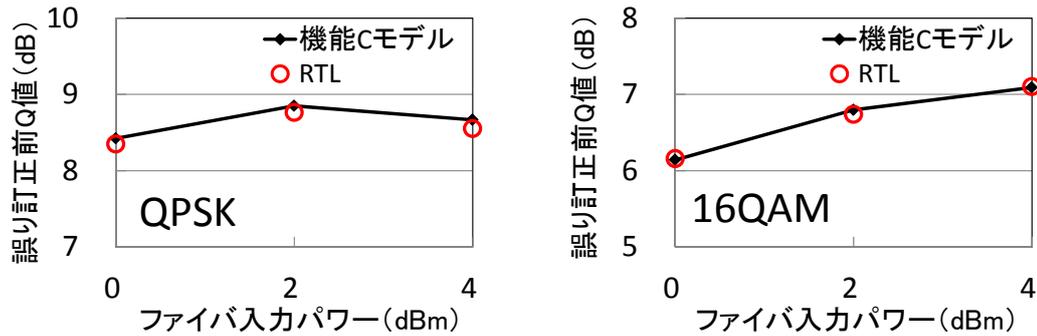


図4 RTL エミュレーションに基づく性能検証結果

#### エ) 低消費電力信号処理統合検証技術

平成 25 年度に確立した設計・評価手法を用いて統合設計・統合試作を行い、動作・消費電力評価により基幹ネットワークの消費電力を単位伝送速度 100Gbps の伝送方式と比較して 1/2 以下（「単位伝送速度×単位伝送距離」を単位として消費電力を比較した場合）に削減できることを確認し、低消費電力信号処理統合検証技術を確立した。

具体的には、開発した統合機能モデル、及び回路記述言語（RTL）レベルの統合検証プラットフォームを用いた詳細動作検証・性能検証の結果に基づき、設計・評価手法を最適化すると共に、フィードバックにより消費電力削減を検討及び実施し、改良した機能モデルおよび RTL レベルの機能ブロックの再設計・統合を行った。さらに RTL 統合検証を実施し、回路構成法及び回路アーキテクチャの評価を行った。その結果、従来の 100G-DSP に比べ、1 波長あたり最大 4 倍の伝送速度を達成しながら、電力の増加は約 1.4 倍まで抑えることが可能となった。また、伝送距離は、400G 対応 DSP は、100G モード（QPSK 変調方式）で 10000km まで可能であることを確認した。以上の結果から、3000km 伝送時のネットワーク消費電力は、従来の 100G-DSP の場合と比較して、1/2 以下の消費電力に削減できることを確認した。

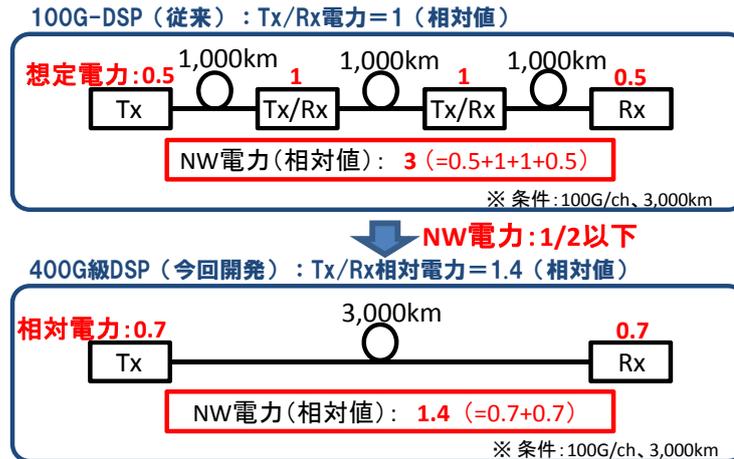


図5 ネットワーク消費電力の削減

## 4 研究開発成果の社会展開のための活動実績

本プロジェクトでは、国際標準化活動、成果発表会、アドバイザリ委員会、報道発表等を通じて本プロジェクトで得られた成果について積極的に発表し、技術トレンドを牽引してきた。以下、各項目において記載する。

### 4.1 標準化活動

Optical Internetworking Forum の Physical Link Layer の標準化審議に継続的に参加しており、次世代 100G コヒーレントモジュール、集積光部品、システムモデルに関して活動している。平成 25 年 10 月 29 日～10 月 31 日に香港で開催された会合及び平成 26 年 2 月 11 日～2 月 13 日 San Jose で開催された会合で NTT と富士通で協力して次世代 100G コヒーレントモジュール向けリニアドライバに関する寄書提案を行った。この提案に基づき、現在作成中の標準文書に線形性 (THD) 仕様が盛り込まれることが仮合意されており、平成 27 年度中に正式合意・発行される見込みとなっている。

ITU-T SG15 Q11/15 会合に継続的に参加しており、フレキシブルグリッド (ITU-T G.694.1 勧告 2012 年 2 月) における多様な変調方式 (BPSK、QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM) を考慮した B100G-OTN に対する要求条件 (2013/7/1～7/12 スイス、ジュネーブ)、ネットワークオペレータ観点でハードウェアモジュールとして考慮すべき要求条件 (2013/10/14～10/18 ドイツ、ニュルンベルク) に関する寄書提案を行った。2017 年度標準化勧告では 100G 粒度での B100G-OTN の標準化とし、フレキシブルグリッドへの拡張対応は継続議論のステータスとなっている。

### 4.2 成果発表会・展示

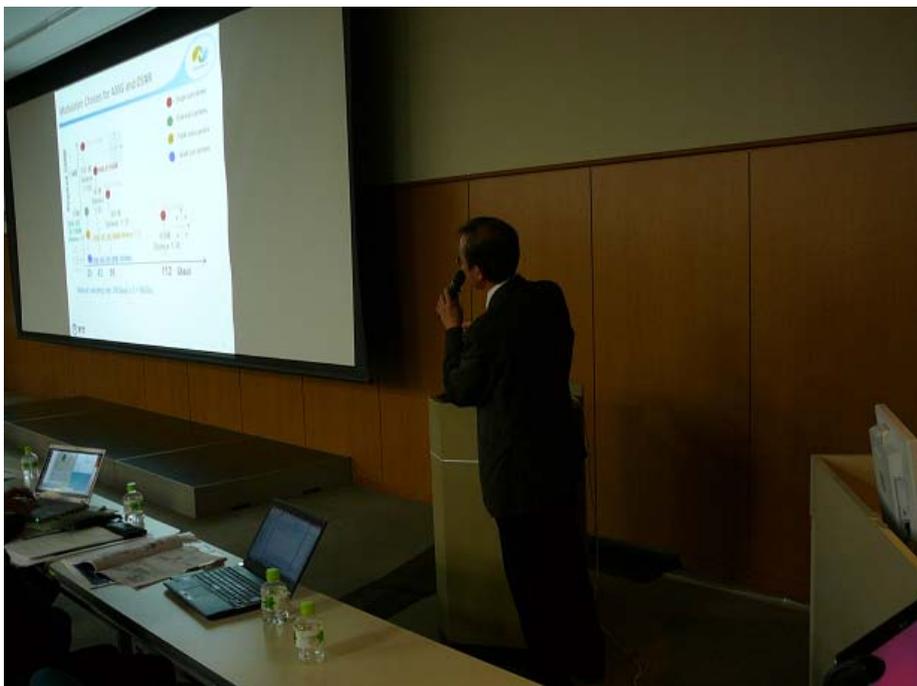
以下の国際会議や社内外の展示会、さらにはシンポジウム開催等を通して、受託各社の得られた成果とその意義について積極的に発表してきた。

- NTT R&D フォーラム 2013 (平成 25 年 2 月 14 日・15 日 NTT 武蔵野研究開発センタ)  
NTT が、お客様、事業会社、産学官関係者にむけ、成果発表パネル展示
- YRP フォトニックネットワークシンポジウム 2013 (平成 25 年 3 月 12 日 横須賀 YRP1 番館)  
受託 3 社が、シンポジウムで成果発表を行うとともに各展示ブースで得られた成果をパネル展示

- ・フォトニックネットワークシンポジウム 2014（平成 26 年 3 月 25 日 小金井 NICT）  
受託 3 社が、シンポジウムで成果発表を行うとともに成果を展示
- ・ビッグデータに関する研究開発シンポジウム（平成 26 年 3 月 26 日 ベルサール飯田橋）  
受託 3 社が、シンポジウムで成果発表を行うとともに各展示ブースで得られた成果をパネル展示
- ・フォトニックネットワークシンポジウム 2015（平成 27 年 3 月 6 日 小金井 NICT）  
受託 3 社が、シンポジウムで成果発表を行うとともに成果を展示
- ・サイエンスプラザ 2014（平成 26 年 11 月 21 日 NTT 厚木研究開発センタ）  
超 100G 次世代通信に向けた高速 IC 技術のパネル展示



フォトニックネットワークシンポジウム展示の様子



フォトニックネットワークシンポジウム発表の様子

### 4. 3 アドバイザリ委員会

適宜学識経験者、有識者による指導、意見を受けながら研究開発を推進するため、アドバイザリ委員会を設置し、初年度は1回、2年目以降は各年度2回開催した。

- ・平成24年度 第1回（平成25年1月17日 トラストシティカンファレンス・丸の内）
- ・平成25年度 第1回（平成25年9月3日 ステーションカンファレンス東京）
- ・平成25年度 第2回（平成26年2月3日 トラストシティカンファレンス・丸の内）
- ・平成26年度 第1回（平成26年7月17日 ステーションカンファレンス東京）
- ・平成26年度 第2回（平成27年1月8日 ステーションカンファレンス東京）

#### 【アドバイザリ委員】

- ・神谷 武志 名誉教授 東京大学 「超高速光デバイス技術」
- ・浅見 徹 教授 東京大学 「通信ネットワークとその応用技術」
- ・菊池 和朗 教授 東京大学 「デジタルコヒーレント光通信技術」
- ・北山 研一 教授 大阪大学 「フォトニックネットワーク技術・伝送劣化補償技術」
- ・中沢 正隆 教授 東北大学 「超高速光通信技術・変復調技術」
- ・松澤 昭 教授 東京工業大学 「超高速アナログ・デジタル変換回路技術」



アドバイザリ委員会の様子

### 4. 4 報道発表

得られた成果については、国内・海外にむけ各社からタイムリーにマスメディアを通して情報発信をし、日本の国際競争力のアピールを行った。

- ・「世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術実用化に向けた共同研究開発に着手～省電力と柔軟性を兼ね備える光ネットワークの実現へ～」平成24年12月11日（NTT、NEC、富士通）
- ・「世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術の実用化に目処～最大 10,000km の長距離・超高速光伝送実験に成功～」平成26年9月4日（NTT、NEC、富士通）

- ・「世界最高水準 400 ギガビット伝送のフィールドトライアルに成功 ～既設 100G 光伝送網で現行の 4 倍の高速通信を低コストで実現可能～」平成 27 年 3 月 19 日 (NTT、NTT コミュニケーションズ)

## 5 研究開発成果の社会展開のための計画

日本電信電話株式会社

本研究開発を通して得られた適応変復調伝送技術は、チャンネル当たり 400Gbps 級の高速信号伝送では必須の技術になることが期待される。波及効果としては、ネットワークの切り替え迅速な復旧を必要とする災害対応などにおいても本研究開発成果の活用が期待されるため、様々なアプリケーションへの成果展開に引き続き取り組んでいく。

国際標準化については、OIF(Optical Internetworking Forum)および ITU-T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)に本研究開発成果に関連する寄書提案を行ってきたが、今後も本研究開発成果の国際展開に向けて引き続き寄書提案等に取り組んでいく。

低消費電力信号処理回路技術については、適応変復調伝送回路を低消費電力で実現する回路設計技術を確認し、実際に回路実装可能な形で機能および性能が所望の特性を満足することを確認して DSP-LSI への実装を進めている。今後は本研究開発成果を搭載した DSP-LSI を商用化するために、リアルタイムでの動作検証および性能評価を実施する。

低消費電力信号処理統合検証技術については、適応変復調伝送回路技術、線形適応等化回路技術、適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術を統合し、統合した機能および性能を評価するための統合評価環境を構築して統合評価技術を確認したが、今後は確立した統合評価技術を発展させて DSP-LSI の商用化に向けてのリアルタイム評価に展開していく。

400G 級 DSP-LSI の商用化に向けては、100Gbps 級 DSP-LSI の顧客との関係を活用して引き続きグローバル展開を図っていく。また、本研究開発において、400Gbps 級信号のフィールドファイバでの 100Gbps 信号との混在伝送が可能であることを示したが、今後はシステムベンダと協力して技術の完成度を高めて、実際にネットワークを構築・運用する事業会社に対して本研究開発成果技術の利点と実現性を継続的にアピールし、数年内に実ネットワークへの導入を目指す。

日本電気株式会社

本研究開発を通して得られた線形適応等化技術は、400Gbps 級の高速信号を伝送距離や伝送路状態に応じて適応的に補償するアルゴリズムの効率的な実装が開発の中心であった。この成果の標準化展開においては、技術自体の標準化ではなく、それが実現する補償性能をシステム仕様のデファクト化とすることを通して広めることに引き続き取り組む。

成果の実用化および製品化に向けては、本研究開発の前身である「超高速光伝送システム技術の研究開発」「超高速光エッジノード技術の研究開発」の成果を適用して自社で開発した 100Gbps 級の光ファイバ通信システムおよびインターフェースモジュールに対して、本研究開発の成果を適用することにより 400Gbps 級の伝送容量の実現あるいは更なる伝送能力の向上の検討を進める。これらのシステムおよびモジュールの実導入に積極的に取り組み、開発技術の社会展開を図る。

本研究開発で得られた知財については、特許成立に向けたフォローを継続して進める。得られた権利は、重要技術について、ライセンスやデファクト化を通じた活用を検討し、通信産業分野における国際

競争力の向上を図る。

現在、400Gbps 級の光ファイバ通信システムの商用化は目前に迫っていると見られているが、伝送距離の制限等によりその適用領域が限定される恐れがある。本研究開発で得られた線形適応等化技術は、高速信号の高密度多重と伝送距離延伸に効果があることが確認されたことから、400Gbps 級、さらにはそれを上回る将来の超大容量光伝送システムにも基本技術として波及して効果を及ぼすものと期待され、今後も引き続き技術の発展的な高度化に取り組む。

#### 富士通株式会社

本委託研究の成果であるコヒーレントデジタル信号処理回路を搭載した 400G 光伝送装置の製品化を進めている。研究課題の成果である適応誤り訂正・適応非線形信号補償機能も実装し、平成 27 年度中に市場投入する予定である。今後複数の国内外通信事業者と 400G 光伝送のフィールド実験を計画中であり、特に、非線形補償機能を他社差異化技術として市場に訴求していく予定である。国際標準化については、OIF(Optical Internetworking Forum)に本委託研究期間に複数の寄書提案を行い、400G 光伝送トランシーバの規格策定に寄与してきた。提案内容が最終的な標準に反映されることをめざし、委託研究期間終了後も引き続き活動を継続していく。

最近の国際会議等での議論の中心は 400G 以上の光伝送方式の検討に移行している。また、欧米のシステムベンダやモジュールベンダからは、関連するデジタルコヒーレント技術の開発計画に関するアナウンスもなされている状況である。これらの活動に先行して日本の産業競争力を維持、発展させるには、継続的な技術開発が必須であり、オープンイノベーションによる 1T 超級の光伝送を早期に実現する技術開発を志向したい。

今後、クラウドコンピューティングの更なる普及により、大容量広帯域ネットワークを前提とした ICT の利活用の加速が予想される。当社は、サーバ、ストレージシステム製品やデータセンタの運営も手がけており、これらの部門との協業により総合 ICT 企業としてのシナジーを追求し、広帯域光ネットワークを前提とした ICT ビジネスの展開を図りたい。

## 6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1]Takahito Tanimura, Shoichiro Oda, Takeshi Hoshida, Yasuhiko Aoki, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen, “Co-operation of Digital Nonlinear Equalizers and Soft-Decision LDPC FEC in Nonlinear Transmission”, *Optics Express*, Vol. 21, Issue 26, pp.32393-32399 (平成 25 年 12 月 30 日)
- [2]Shoichiro Oda, Takahito Tanimura, Takeshi Hoshida, Yuichi Akiyama, Hisao Nakashima, Kyosuke Sone, Zhenning Tao, Jens C. RASMUSSEN, “Three Benefits Brought by Perturbation Back-Propagation Algorithm in 224 Gb/s DP-16QAM Transmission”, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E97-B, No. 7, pp.1342-1349 (平成 26 年 7 月 1 日)

## 7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1]Zhenning Tao, Liang Dou, Weizhen Yan, Yangyang Fan, Lei Li, Shoichiro Oda, Yuichi Akiyama, Hisao Nakashima, Takeshi Hoshida, Jens C. Rasmussen “Complexity-reduced digital nonlinear compensation for coherent optical systems”, *Photonics West 2013*, (San Francisco) (平成 25 年 2 月 6 日)
- [2]Satosi Koyama, Takeshi Hoshida, Hisao Nakashima, Chihiro Oshima, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen “Impact of Pulse Shaping and Transceiver Electrical Bandwidths on Nonlinear Compensated Transmission”, *OFC/NFOEC2013*, (Anaheim) (平成 25 年 3 月 21 日)
- [3]Takeshi Hoshida, Liang Dou, Weizhen Yan, Lei Li, Zhenning Tao, Shoichiro Oda, Hisao Nakashima, Chihiro Oshima, Satoshi Koyama, Jens C. Rasmussen “Advanced and Feasible Signal Processing Algorithm for Nonlinear Mitigation”, *OFC/NFOEC2013*, (Anaheim) (平成 25 年 3 月 21 日)
- [4]Yutaka Miyamoto, Masahito Tomizawa, “High-Capacity Scalable Optical Communication for Future Optical Transport Network”, *ISSCC* (San Francisco) (平成 25 年 2 月 10 日)
- [5]Shoichiro Oda, Takeshi Hoshida, Hisao Nakashima, Yasuhiko Aoki, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen, “Impact of Perturbation Back-propagation on Carrier Phase Recovery in 224 Gb/s DP-16QAM Transmission”, *OECC2013* (Kyoto), (平成 25 年 7 月 3 日)
- [6]Takahito Tanimura, Shoichiro Oda, Takeshi Hoshida, Yasuhiko Aoki, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen, “Co-operation of Digital Nonlinear Equalizers and Soft-Decision LDPC FEC in Nonlinear Transmission”, *ECOC2013* (London), (平成 25 年 9 月 23 日)
- [7]Meng Yan, Zhenning Tao, Takahito Tanimura, Shoichiro Oda, Yinwen Cao, Ying Zhao, Takeshi Hoshida, Jens C. Rasmussen, “Experimental Investigation of Training Sequence for Adaptive Equalizer Initialization in DP-16QAM System”, *ECOC2013* (London), (平成 25 年 9 月 24 日)
- [8]Hiroshi Onaka, “100G/400G Project in Japan”, *OFC2014* (San Francisco), (平成 26 年 3 月 13 日)
- [9]Wakako Maeda, Daisaku Ogasahara, Jun'ichi Abe, Toshiharu Ito, Manabu Arikawa, Hidemi Noguchi, Kiyoshi Fukuchi, “Simple Optimization Method for Nonlinear Compensation by Filtered Backpropagation-based Equalization Utilizing Intra-stage Dispersion”, *ECOC2013* (London) (平成 25 年 9 月 25 日)
- [10]Daisaku Ogasawara, Wakako Maeda, Manabu Arikawa, Toshiharu Ito, Hidemi Noguchi, Junichi Abe, Kiyoshi Fukuchi, “Optimum Design for Compensation Method of Intra-channel Nonlinear Distortions based on Digital Backpropagation assisted by Mitigation with CD pre-compensation”,

ECOC2013 (London) (平成 25 年 9 月 24 日)

[11]Kiyoshi Fukuchi, Atsufumi Shibayama, Kohei Hosokawa, Wakako Maeda, Hidemi Noguchi, Jun-ichi Abe, “Practical techniques for nonlinear compensation and mitigation”, OFC2015 (Los Angeles) (平成 27 年 3 月 24 日)

[12]Seiji Okamoto, Mitsuteru Yoshida, Kazushige Yonenaga, Tomoyoshi Kataoka, “Adaptive Pre-equalization using Bidirectional Pilot Sequences for Estimation and Feedback of Amplitude Transfer Function and Chromatic Dispersion”, OFC2015 (Los Angeles) (平成 27 年 3 月 26 日)

[13]Takahito Tanimura, Yangyang Fan, Shoichiro Oda, Takeshi Hoshida, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen, “LDPC SD-FEC Coding in the Nonlinear Domain”, SPPCom 2014, (California) (平成 26 年 7 月 15 日)

[14] Takahito Tanimura, Yohei Koganei, Hisao Nakashima, Takeshi Hoshida, Jens C. Rasmussen, “Soft Decision Forward Error Correction over Nonlinear Transmission of 1-Tb/s Superchannel”, ECOC2014, (Cannes) (平成 26 年 9 月 25 日)

[15]Wakako Maeda, Jun-ichi Abe, Hidemi Noguchi, Kiyoshi Fukuchi, “Optical-Electrical Hybrid Backpropagation for Hardware-efficient Digital Coherent Receiver with Nonlinear Compensation”, OECC (Melbourne, Australia) (平成 26 年 7 月 10 日)

## 8 その他の誌上発表リスト

[1]米永一茂, “世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術実用化に向けた共同研究開発に着手 – 省電力と柔軟性を兼ね備える光ネットワークの実現へ –”, NTT 技術ジャーナル 2013 Vol.25 No.2 pp71-72 (平成 25 年 2 月 1 日)

[2]Kazushige Yonenaga, “Report on Photonic Network Symposium 2013 -Post-100Gb/s Photonic Transport Technologies Supporting Reliable Infrastructure-”, IEICE Global Newsletter Vol.37 No.2 pp14-15 (平成 25 年 6 月 1 日)

[3]福知清, ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル, 松井淳一郎, 岡本健志, “100 ギガビット級の超高速光伝送システムをデジタルコヒーレント技術の開発で実現”, コンセンサス 2014 年 11-12 月号 NEC C&C システムユーザー会 (NUA) (平成 26 年 11 月 12 日)

[4]米永一茂, “世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術の実用化に目処 – 最大 1 万 km の長距離・超高速光伝送実験に成功”, NTT 技術ジャーナル 2014 Vol.26 No.12 pp50-51 (平成 26 年 12 月 1 日)

## 9 口頭発表リスト

[1]吉田光輝, 小林孝行, 佐野明秀, 宮本裕, “パイロットトーンを用いた位相雑音耐力向上技術の一検討”, 2013 年電子情報通信学会総合大会 (岐阜) (平成 25 年 3 月 20 日)

[2]Hiroshi Onaka, “100G/400G Project in Japan”, ON\*VECTOR2013 (平成 25 年 2 月 27 日)

[3]吉田光輝, 山崎悦史, 小林孝行, 佐野明秀, 宮本裕, “パイロットトーンによる位相雑音低減効果の解析”, 光通信システム研究会 (郡山市) (平成 25 年 6 月 20 日)

[4]富澤将人, “光通信の第 3 世代技術: デジタルコヒーレント通信”, IPDA 研究会 (横浜市) (平成 25 年 5 月 15 日)

[5]宮本裕, “400G/1Tbps に向けた超高速大容量光通信技術の最新動向 (基調講演)”, アジレント技術フォー

ーラム（横浜市）（平成 25 年 7 月 9 日）

[6]福山裕之、佐野公一、武藤美和、栗島賢二、柏尾典秀、井田実、野坂秀之、“InP HBT を用いた 100 Gbit/s 光受信用低群遅延偏差 TIA”、2014 年電子情報通信学会総合大会（新潟）（平成 25 年 3 月 18 日）

[7]富澤将人、“最新デジタルコヒーレント技術”、フォトニックネットワークシンポジウム 2014（小金井）（平成 26 年 3 月 25 日）

[8]富澤将人、“ビッグデータ社会を支える次世代光ブロードバンドインフラ~超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発、および国際競争力の展望~”、ビッグデータに関する研究開発シンポジウム（飯田橋）（平成 26 年 3 月 26 日）

[9]前田和佳子、小笠原大作、安部淳一、伊東俊治、有川学、野口栄実、福知清、“ステージ内分散補償量を利用した非線形補償フィルタ係数の最適化”、電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会（福岡市）、（平成 25 年 9 月 19 日）

[10]安部淳一、小笠原大作、前田和佳子、伊東俊治、有川学、野口栄実、福知清、“前置波長分散補償を用いた受信端非線形歪補償方式の最適化設計”、電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会（福岡市）、（平成 25 年 9 月 19 日）

[11]前田和佳子、安部淳一、野口栄実、福知清、“前置分散補償による光位相雑音起因分散補償ペナルティの緩和”、電子情報通信学会 2014 年総合大会（新潟市）、（平成 26 年 3 月 20 日）

[12]小金井洋平、星田剛司、山下昌、小島力、雨澤泰治、“8QAM シンボル座標の最適配置探索”、電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会（徳島市）、（平成 26 年 9 月 25 日）

[13]米永一茂、“400Gbps 級超高速・低消費電力デジタルコヒーレント光伝送技術”、2014 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会（徳島市）（平成 26 年 9 月 23 日）

[14]片岡智由、“400G デジタルコヒーレント伝送技術の最新動向”、電子情報通信学会講演会（東京・神保町）（平成 26 年 8 月 19 日）

[15]福山裕之、野坂秀之、“超 100G 次世代通信に向けた高速 IC 技術~高線形トランスインピーダンス増幅器~”、サイエンスプラザ 2014（NTT 厚木研究開発センタ）（平成 26 年 11 月 21 日）

[16]Kiyoshi Fukuchi, Emmanuel Le Taillandier de Gabory, “Transmission and DSP factors to consider for fruitful evaluations of WDM and SDM system performance”、ECOC2014 (Cannes, France)（平成 26 年 9 月 21 日）

[17]岡本聖司、吉田光輝、米永一茂、片岡智由、“Pilot-aided 適応送信端補償を用いた 16QAM 光伝送実験”、2015 年電子情報通信学会 総合大会（滋賀県・草津市）（平成 27 年 3 月 10 日）

[18]富澤将人、“100G 超級デジタルコヒーレント技術の最新動向”、フォトニックネットワークシンポジウム 2015（小金井）（平成 27 年 3 月 6 日）

## 10 出願特許リスト

[1]吉田光輝、山崎悦史、岡本聖司、堀越建吾、石原浩一、小林孝行、木坂由明、富澤将人、藤原直樹、片岡智由、米永一茂、「光受信装置および光受信方法」、日本、平成 25 年 3 月 28 日

[2]山崎悦史、石原浩一、木坂由明、富澤将人、米永一茂、「光送受信システム、送信器、受信器および光送受信方法」、日本、平成 25 年 3 月 22 日

[3]細川晃平、中村祐一、「周波数オフセット補償装置および周波数オフセット補償方法」、日本、平成 24 年 12 月 20 日

- [4]柴山充文、細川晃平、「高速フーリエ変換装置、高速フーリエ変換方法、及び高速フーリエ変換プログラム」、日本、平成 25 年 1 月 23 日
- [5]前田和佳子、「信号処理装置及び信号処理方法」、日本、平成 25 年 2 月 7 日
- [6]前田和佳子、安部淳一、小笠原大作、「非線形補償回路およびそれを用いたデジタルコヒーレント受信器」、日本、平成 25 年 3 月 27 日
- [7]前田和佳子、安部淳一、「信号処理装置及びフィルタ係数設定方法」、日本、平成 25 年 4 月 9 日
- [8]細川晃平、「信号処理装置及びフィルタ係数設定方法」、日本、平成 25 年 6 月 3 日
- [9]柴山充文、「デジタルフィルタ回路」、日本、平成 25 年 7 月 23 日
- [10]秋山祐一、星田剛司、赤司保、坂井良男、「光送信装置および変調光信号生成方法」、日本、平成 25 年 1 月 31 日
- [11]中島久雄、「周波数誤差推定装置及び方法、周波数誤差補償装置、並びに、光受信機」、日本、平成 25 年 3 月 12 日
- [12]星田剛司、「制御タイミング同期方法、光伝送システム及び光伝送装置」、日本、平成 25 年 3 月 15 日
- [13]川上広人、米山幹夫、片岡智由、光送信機及び制御方法、日本、平成 25 年 12 月 27 日
- [14]山崎悦史、石原浩一、木坂由明、富澤将人、光送受信システム、送信器、受信器および光送受信方法、PCT、平成 26 年 3 月 22 日
- [15]吉田光輝、山崎悦史、藤原直樹、岡本聖司、石原浩一、芝原光樹、小林孝行、木坂由明、片岡智由、米永一茂、富澤将人、位相補償装置、光受信機、光伝送システム、位相補償方法、日本、平成 26 年 3 月 28 日
- [16]桑原昭一郎、石原浩一、岡本聖司、山崎悦史、木坂由明、米永一茂、片岡智由、光送受信システムおよび光送受信方法、日本、平成 26 年 3 月 28 日
- [17]細谷英一、山崎悦史、木坂由明、米永一茂、片岡智由、16QAM マッピングの装置および方法 (予定)、日本、平成 26 年 3 月 28 日
- [18]野坂秀之、村田浩一、“コヒーレント光通信用増幅器”、日本、平成 26 年 3 月 27 日
- [19]野坂秀之、村田浩一、“差動増幅器”、日本、平成 26 年 3 月 27 日
- [20]前田和佳子、安部淳一、「信号処理装置及び信号処理方法」、日本、平成 25 年 4 月 9 日
- [21]前田和佳子、安部淳一、「信号処理装置及び信号処理方法」、PCT、平成 25 年 5 月 24 日
- [22]細川晃平、「デジタルフィルタ装置及び信号処理方法」、日本、平成 25 年 6 月 3 日
- [23]柴山充文、「デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ処理方法及びデジタルフィルタプログラム」、日本、平成 25 年 7 月 23 日
- [24]前田和佳子、「信号処理装置、光通信システム、及び信号処理方法」、PCT、平成 25 年 9 月 19 日
- [25]柴山充文、「デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ処理方法およびデジタルフィルタプログラム」、日本、平成 25 年 9 月 24 日
- [26]前田和佳子、安部淳一、「非線形歪補償器、それを用いた光受信器、および非線形歪補償方法」、日本、平成 25 年 11 月 19 日
- [27]細川晃平、中村祐一、「周波数オフセット補償装置および周波数オフセット補償方法」、PCT、平成 25 年 12 月 11 日
- [28]柴山充文、「高速フーリエ変換装置、高速フーリエ変換方法、及び高速フーリエ変換プログラム」、日本、平成 25 年 12 月 13 日
- [29]柴山充文、細川晃平、「高速フーリエ変換装置、高速フーリエ変換方法、及び高速フーリエ変換プログ

ラム記憶媒体」、PCT、平成 26 年 1 月 22 日

[30]前田和佳子、安部淳一、「信号処理装置及び信号処理方法」、PCT、平成 26 年 2 月 19 日

[31]秋山祐一・星田剛司、「光送信装置および変調光信号生成方法」、米国、平成 25 年 12 月 18 日

[32]秋山祐一・星田剛司、「光送信装置および変調光信号生成方法」、欧州、平成 25 年 12 月 18 日

[33]秋山祐一・星田剛司、「光送信装置および変調光信号生成方法」、中国、平成 26 年 1 月 17 日

[34]中島久雄、「周波数誤差推定装置及び方法、周波数誤差補償装置、並びに、光受信機」、米国、平成 26 年 1 月 30 日

[35]中島久雄、「周波数誤差推定装置及び方法、周波数誤差補償装置、並びに、光受信機」、欧州、平成 26 年 2 月 12 日

[36]中島久雄、「周波数誤差推定装置及び方法、周波数誤差補償装置、並びに、光受信機」、中国、平成 26 年 3 月 11 日

[37]星田剛司、「光送信器、光受信器、光ノード装置、ならびに光ネットワークの制御タイミング同期制御方法」、米国、平成 26 年 1 月 28 日

[38]星田剛司、「光送信器、光受信器、光ノード装置、ならびに光ネットワークの制御タイミング同期制御方法」、欧州、平成 26 年 1 月 30 日

[39]星田剛司、「光送信器、光受信器、光ノード装置、ならびに光ネットワークの制御タイミング同期制御方法」、中国、平成 26 年 3 月 14 日

[40]星田剛司、「デジタルコヒーレント受信器および受信方法」、日本、平成 26 年 4 月 7 日

[41]竹内理・星田剛司、「信号処理装置及び信号処理方法」、日本、平成 26 年 9 月 25 日

[42]秋山祐一、「光送信装置及び検出装置」、日本、平成 26 年 7 月 16 日

[43] 中島久雄、星田剛司、秋山祐一、「光送信器および光変調器のバイアスを制御する方法」、日本、平成 26 年 7 月 31 日

[44] 星田剛司、「デジタルコヒーレント受信器および受信方法」、米国、平成 27 年 3 月 18 日

[45]細川晃平、「デジタルフィルタ装置及び信号処理方法」、PCT、平成 26 年 6 月 2 日

[46]柴山充文、「デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ処理方法及びデジタルフィルタプログラムが記憶された記憶媒体」、PCT、平成 26 年 6 月 20 日

[47]柴山充文、「デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ処理方法およびプログラムを格納する記憶媒体」、PCT、平成 26 年 9 月 11 日

[48]前田和佳子、安部淳一、「非線形歪補償器、それを用いた光受信器、および非線形歪補償方法」、PCT、平成 26 年 11 月 10 日

[49]柴山充文、「高速フーリエ変換装置、高速フーリエ変換方法、及び高速フーリエ変換プログラムが記憶された記憶媒体」、PCT、平成 26 年 11 月 19 日

[50]柴山充文、安部淳一、細川晃平、「デジタルフィルタ回路、信号処理装置およびデジタルフィルタ処理方法」、日本、平成 27 年 2 月 10 日

## 1 1 取得特許リスト

[1]山崎悦史、石原浩一、木坂由明、富沢将人、光送受信システム、送信器、受信器および光送受信方法、日本、平成 25 年 3 月 22 日、平成 25 年 12 月 20 日、特許第 5438856 号

[2]川上広人、米山幹夫、片岡智由、光送信機及び制御方法、日本、平成 25 年 12 月 27 日、平成 26 年 12

月 26 日、特許第 5671130 号

[3]吉田光輝、山崎悦史、岡本聖司、堀越健吾、石原浩一、小林孝行、木坂由明、富澤将人、藤原直樹、片岡智由、米永一茂、光受信装置および光受信方法、日本、平成 25 年 3 月 28 日、平成 27 年 1 月 16 日、特許第 5681743 号

[4]野坂秀之、村田浩一、“コヒーレント光通信用増幅器”、日本、平成 26 年 3 月 27 日、平成 27 年 3 月 27 日、特許第 5719461 号

## 1 2 国際標準提案・獲得リスト

[1]Optical Internetworking Forum、oif2013.351.01、Input on Driver Amplifier Linearity Guideline for Coherent CFP2、平成 24 年 10 月 21 日

[2]Optical Internetworking Forum、oif2014.007.00、Drive Level and Linearity for CFP2-ACO Transceiver IA、平成 25 年 1 月 21 日

[3]Optical Internetworking Forum、oif2014.008.00、Digital interface for micro-ICR、平成 26 年 1 月 17 日

[4]Optical Internetworking Forum、oif2014.129.00、Comments on CFP2-ACO IA draft for class2/3 Tx RF interface、平成 26 年 5 月 20 日

## 1 3 参加国際標準会議リスト

[1]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、米国ニューオーリンズ、平成 25 年 1 月 15 日～1 月 17 日

[2]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、中国香港、平成 25 年 10 月 29 日～10 月 31 日

[3]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、米国サンノゼ、平成 26 年 2 月 11 日～2 月 13 日

[4]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、独国ベルリン、平成 26 年 5 月 20 日～5 月 22 日

[5]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、大阪、平成 26 年 10 月 21 日～10 月 23 日

[6]Optical Internetworking Forum・Technical and MA&E Committees Meeting、米国パームスプリングズ、平成 27 年 1 月 20 日～1 月 22 日

## 1 4 受賞リスト

## 1 5 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

[1]“世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術実用化に向けた共同研究開発に着手 -省電力と柔軟性を兼ね備える光ネットワークの実現へ-”、平成 24 年 12 月 11 日

[2]“世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術の実用化に目処～最大 10,000km の長距離・超高速光伝送実験に成功～”、平成 26 年 9 月 4 日

[3] “世界最高水準 400 ギガビット伝送のフィールドトライアルに成功～既設 100G 光伝送網で現行の 4 倍の高速通信を低コストで実現可能～”、平成 27 年 3 月 19 日

(2) 報道掲載実績

[1] “400 ギガビットの光伝送共同開発に着手”、フジサンケイビジネスアイ、平成 24 年 12 月 12 日

[2] “400 ギガ光伝送で共同開発プロ”、日刊工業新聞、平成 24 年 12 月 12 日

[3] “光通信速度 3 倍へ技術開発”、日本経済新聞、平成 24 年 12 月 12 日

[4] “光データ通信 3 倍速く NTT など着手 15 年実用化目標”、日経産業新聞、平成 24 年 12 月 12 日

[5] “NTT, NEC, Fujitsu complete 400Gbps optical transmission test”、telecompaper、平成 26 年 9 月 4 日

[6] “Success in test of ultra-high-speed optical transmission up to distances of 10,000km”、PHYS.ORG、平成 26 年 9 月 5 日

[7] “光データ通信 3 倍速く NTT など着手 15 年実用化目標”、日経産業新聞、平成 26 年 9 月 5 日

[8] “NTT・NEC・富士通、光伝送を大容量化―従来比 4 倍、毎秒 400 ギガビットにめど”、日刊工業新聞、平成 26 年 9 月 5 日

[9] “NTT・NEC・富士通、光伝送を大容量化―従来比 4 倍、毎秒 401 ギガビットにめど”、日刊工業新聞 BusinessLine、平成 26 年 9 月 5 日

[10] “400 ギガビット級光伝送技術実用化へ”、電波新聞、平成 26 年 9 月 5 日

[11] “BD100 枚分 1 秒で”、日経産業新聞、平成 26 年 9 月 5 日

[12] “NTT、NEC、富士通の 3 社、最大 10,000km の長距離・超高速光伝送実験に成功”、マイナビニュース、平成 26 年 9 月 5 日

[13] “400G ビット級光伝送技術の実用化にめど、NTT など 3 社が開発”、EETimes、平成 26 年 9 月 5 日

[14] “NTT、NEC、富士通、毎秒 400 ギガビット級の光伝送実験に成功”、INTERNET Watch、平成 26 年 9 月 5 日

[15] “NTT・NEC・富士通、超高速光伝送実験に成功……従来の光ファイバのまま伝送量 4 倍に”、RBBTODAY、平成 26 年 9 月 5 日

[16] “NTT など 3 社、400G ビット級のデジタルコヒーレント光伝送技術の長距離高速伝送実験に成功”、日経テクノロジーonline、平成 26 年 9 月 5 日

[17] “NTT ら、10,000km の 400Gb/s 級光ファイバ伝送を実証”、OPTRONICS online、平成 26 年 9 月 5 日

[18] “NTT tests 400Gbps optical technology for Internet backbone”、IDG、平成 26 年 9 月 5 日

[19] “NTT Tests 400G Coherent Transmission with NEC, Fujitsu”、Converge! Network digest、平成 26 年 9 月 6 日

[20] “世界最高水準の 400Gbps 級光伝送技術の実用化に目処”、Laser Focus World JAPAN、平成 26 年 9 月 8 日

[21] “世界最高水準を実現 毎秒 400 ギガ光伝送に成功”、通信興業新聞、平成 26 年 9 月 15 日

[22] “世界最高水準 400Gbps 級光伝送技術 最大 1 万キロメートルの長距離実験成功”、科学新聞、平成 26 年 9 月 19 日

[23] “既存の 100G 光伝送システムで 400G の伝送に成功―NTT”、EETimes、平成 27 年 3 月 20 日

[24] “NTT と NTT コム、400 ギガビット伝送のフィールドトライアルに成功”、マイナビニュース、平成 27 年 3 月 20 日

[25] “NTT、400Gbps 光伝送網の実証実験に成功～既設 100Gbps 伝送網への増設で現行比 4 倍の高速通

信に対応”、PCWatch、平成 27 年 3 月 20 日

[26] “NTT、既設 100 ギガビット光伝送網で 400 ギガビット高速通信に成功”、RBBTODY、平成 27 年 3 月 20 日

[27] “NTT と NTT Com、400 ギガビット伝送の実証実験に成功”、財経新聞、平成 27 年 3 月 20 日

[28] “世界最高水準 400Gbps 伝送のフィールドトライアルに成功”、Laser Focus World JAPAN、平成 27 年 3 月 20 日

[29] “NTT completes 400 Gbps transmission field trial”、telecompaper、平成 27 年 3 月 19 日

[30] “NTT、100G 光伝送網で 400G 光信号の安定伝送に成功”、OPTRONICS online、平成 27 年 3 月 20 日

[31] “東京オリンピック 4K/8K 映像配信にむけて既設の 100G 光伝送網で現行の 4 倍の高速通信を可能に、NTT ら”、インターネットコム、平成 27 年 3 月 20 日

[32] “光信号で送信速度 4 倍”、日経産業新聞、平成 27 年 3 月 24 日

[33] “既設の光伝送網活用 毎秒 400 ギガ伝送”、日刊工業新聞、平成 27 年 3 月 26 日

[34] “NTT など、既設の 100Gbps 光伝送網で 400Gbps 伝送に成功”、日刊工業新聞 BusinessLine、平成 27 年 3 月 26 日

## 研究開発による成果数

	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
査読付き誌上発表論文数	0 件 ( 0 件)	1 件 ( 1 件)	1 件 ( 1 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	3 件 ( 3 件)	7 件 ( 7 件)	5 件 ( 5 件)
その他の誌上発表数	1 件 ( 0 件)	1 件 ( 0 件)	2 件 ( 0 件)
口 頭 発 表 数	2 件 ( 1 件)	9 件 ( 0 件)	7 件 ( 1 件)
特 許 出 願 数	1 2 件 ( 0 件)	2 7 件 ( 1 5 件)	1 1 件 ( 6 件)
特 許 取 得 数	0 件 ( 0 件)	1 件 ( 0 件)	3 件 ( 0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 ( 0 件)	3 件 ( 3 件)	1 件 ( 1 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)	0 件 ( 0 件)	0 件 ( 0 件)
報 道 発 表 数	2 件 ( 1 件)	0 件 ( 0 件)	4 件 ( 2 件)
報 道 掲 載 数	4 件 ( 0 件)	0 件 ( 0 件)	3 0 件 ( 5 件)

	合計
査読付き誌上発表論文数	2 件 ( 2 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 5 件 ( 1 5 件)
その他の誌上発表数	4 件 ( 0 件)
口 頭 発 表 数	1 8 件 ( 2 件)
特 許 出 願 数	5 0 件 ( 2 1 件)
特 許 取 得 数	4 件 ( 0 件)
国 際 標 準 提 案 数	4 件 ( 4 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 ( 0 件)
受 賞 数	0 件 ( 0 件)
報 道 発 表 数	6 件 ( 3 件)
報 道 掲 載 数	3 4 件 ( 5 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。