

グリーン社会に資する先端光伝送技術の研究開発
10 テラビット級光伝送技術
The research and development of advanced optical transmission technology
for a green society
10 Tbps-class optical transmission technology

代表研究責任者 木坂 由明 NTT 株式会社 未来ねっと研究所
研究開発期間 令和4年度～令和7年度

【Abstract】

This project aimed to establish 10 Tbps-class optical transmission technology for a green society by combining ultra-high capacity with low power consumption. To increase per-wavelength capacity, approaches such as higher symbol rates, higher-order modulation, and parallel transmission technologies were investigated. Adaptive transceiver, forward error correction, and equalization technologies were developed to optimize performance under diverse traffic and transmission conditions. Static and dynamic signal equalization techniques were studied to compensate for impairments such as chromatic dispersion, polarization fluctuations, and bandwidth limitations. These technologies were evaluated under realistic high-speed transmission environments including 240-GBd-class and 16QAM-class operation. Low-power circuit design based on advanced CMOS processes was also investigated for major signal-processing functions. As a result, the fundamental technologies for flexible 10 Tbps-class optical transmission were successfully established. Integrated optimization of signal processing and circuit functions demonstrated power consumption as low as 1/27 that of conventional 100-Gb/s-class DSPs at the same communication speed. Overall, this research provides a foundation for energy-efficient optical transport systems for future backbone networks and data center interconnects.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 木坂 由明 (NTT 株式会社 未来ねっと研究所)
- **研究分担者** 大賀 正夫 (三菱電機株式会社)
細川 晃平 (日本電気株式会社)
小牧 浩輔 (1FINITY 株式会社)
- **総合ビジネスプロデューサ** 武井 和人 (NTT イノベーションデバイス)
- **ビジネスプロデューサ** 西沢 秀樹 (NTT 株式会社 未来ねっと研究所)
藤枝 亮 (三菱電機株式会社)
小熊 健史 (日本電気株式会社)
塩田 昌宏 (1FINITY 株式会社)

○ **研究開発期間** 令和4年度～令和7年度

○ **研究開発予算** 総額 3,580 百万円

(内訳)

令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
895 百万円	895 百万円	895 百万円	895 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

近年、AI、クラウド、IoT、5G/6G などのサービスの普及、それに伴うデータセンタの急激な増加に伴い、世界的に通信トラフィックが爆発的に増加しており、急速に進展するデジタル社会を支える情報通信インフラ基盤の整備が必須である。特に、AI の爆発的な普及により、社会全体で生成・流通するデータ量とそれを処理するための消費電力は今後飛躍的に拡大することが見込まれており、基幹網・メトロ網のみならず、データセンタ間接続（DCI）網への適用を想定した、情報通信インフラ基盤の超大容量化と低消費電力化を実現する光伝送基盤技術が求められる。これまでの研究開発において 5 テラビット級光伝送基本技術を確立したが、継続的な情報通信インフラ基盤の大容量化と低消費電力化を実現していくためには、さらに伝送ビットあたりの消費電力を低減しつつ、高速大容量化と柔軟で効率的な運用を可能とする光伝送基本技術が求められる。

このような社会的背景において、本研究開発では、高速化・変調多値化・多並列化による波長あたり伝送容量の向上、およびデジタル信号処理アルゴリズムの革新と最先端 CMOS プロセス（5～3 ナノメートル）を駆使した低消費電力化により、高速大容量かつ様々な通信トラフィックに柔軟に対応するチャンネル容量 10 テラビット級（運用単位）の光伝送システムを実現することを目的としている。

具体的には、通信トラフィック毎の要求に応じた適応的符号化パラメータ制御を実現する多並列光適応送受信符号化技術、および適応符号化に適した伝送信号歪み補償技術を開発し、10 テラビット級光伝送の基本技術を確立する。また、最先端 CMOS プロセスを駆使した低電力回路最適化設計技術、およびそれらを統合・最適化する信号処理統合最適化基本技術を開発し、既存 100 ギガビット級光伝送向けデジタル信号処理回路（DSP : Digital Signal Processor）と比較して、ビット毎秒あたり消費電力を 1/10 以下に低減可能な 10 テラビット級光伝送向け DSP の低電力回路設計の基本技術を確立する。

3 研究開発成果（アウトプット）

3. 1 ア) 多並列光適応送受信符号化技術

最大 10 テラビット級光伝送を実現し、通信トラフィックに応じて変調多値度、並列度、符号化等を適応的に制御する多並列光適応変復調アルゴリズムを確立する。

最大 10 テラビット級光伝送の実現と共に、通信トラフィックに応じて適応的に性能と電力を最適化し、伝送効率を向上させる誤り訂正処理アルゴリズムを確立する。

a) 多並列光適応送受信基本技術（NTT 株式会社）

最大 10 テラビット級光伝送を実現するため、伝送アプリケーションに応じて変調速度、並列度、情報量を柔軟に切り替え可能な多並列光適応送受信基本技術を確立した。令和4年度には、10 テラビット

級実現に必要な総変調速度、情報量、レーザ数の関係を整理し、伝送距離ごとに最適なデジタルサブキャリア数が存在することを明らかにするとともに、光送受信デバイス特性補償の候補方式としてマルチステップ推定方式と合成伝達関数分離方式を抽出した。令和 5 年度には、伝送距離・スループット・帯域制限を踏まえてシンボルレートの最低粒度を評価し、実装可能性を考慮した 3.125GHz 級の粒度が有効であることを示した。加えて、両補償方式の基本評価を進めた。令和 6 年度には、240GBd 級 16QAM 信号を対象に偏波変動および差動群遅延の単一負荷条件で性能評価を行い、適応等化器の等化時間幅と耐力の関係を定量化した。また、実機応答を模擬した環境で補償方式を比較し、高速動作時にも SNR ペナルティが小さい合成伝達関数分離方式を採用した。最終年度には、光雑音・波長分散・位相雑音等を含む複合負荷環境と送受信デバイス特性を統合した全体機能モデルを完成させ、他課題との連携を考慮した状態で動作確認を完了した。以上により、多並列光適応送受信方式および高度な送受信器特性補償技術を確立し、到達目標を達成した。

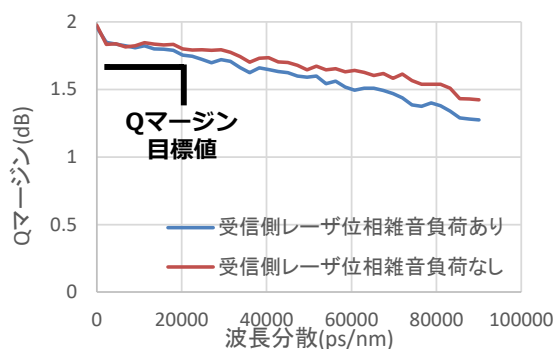


図 3.1-a-1 波長分散および受信側レーザ位相雑音の複合負荷環境における性能評価結果

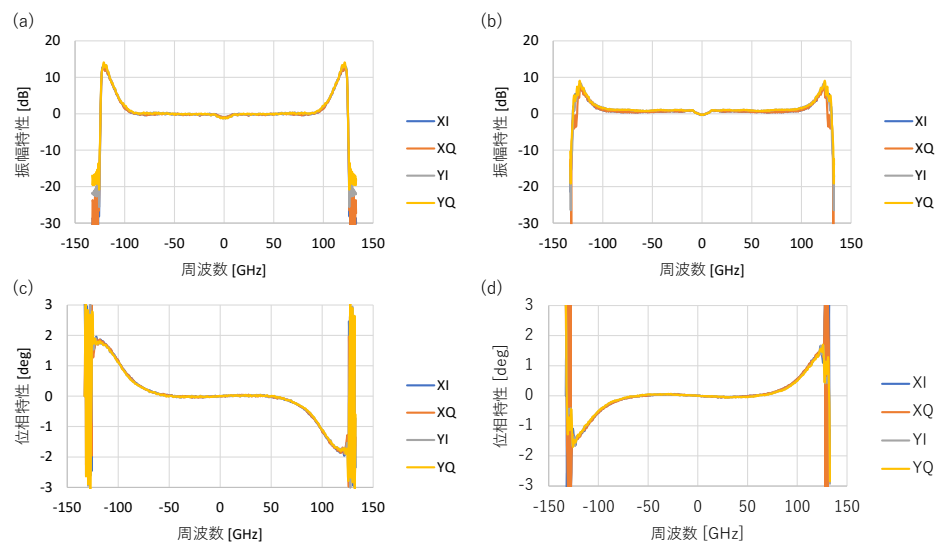


図 3.1-a-2 合成伝達関数分離方式により算出した送信機器および受信機器のデバイス特性補償特性結果。
(a) 送信側振幅特性。(b) 受信側振幅特性。(c) 送信側位相特性。(d) 受信側位相特性波長分散および受信側レーザ位相雑音の複合負荷環境における性能評価結果

b) 誤り訂正基本技術（三菱電機株式会社）

最大 10 テラビット級光伝送の実現と共に、アプリケーションに応じて適応的に性能と電力を最適化するために定められる並列度、高度多値変復調方式、光帯域等に対して、伝送効率を最大にできる、誤

り訂正処理アルゴリズムおよび冗度生成アルゴリズムの基本技術を確立した。

最大 10 テラビット級光伝送システムを実現する 1.6T/λ 光トランシーバ市場において、プラガブルモジュールの規格化が進んでいる。これを受け、本研究開発課題においても標準化の場で議論がなされている 240GBd 級/16QAM 伝送に整合させた形で低電力化を進める方針で、誤り訂正処理アルゴリズムを設計した。1.6T/λ の光伝送システム市場においては 15%冗長度の誤り訂正符号が標準的に使用されており、本検討においては標準符号とインタフェースを共有しつつ、訂正性能差別化を図るための冗長度 15%超の誤り訂正符号を検討し、簡易かつ効率的な構成で可変レートを実現可能な固定符号長可変レート誤り訂正アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムに基づく符号の性能評価ならびに課題ウ・b と合わせた電力評価により、提案アルゴリズムの妥当性を実証した。以上により、到達目標を達成した。

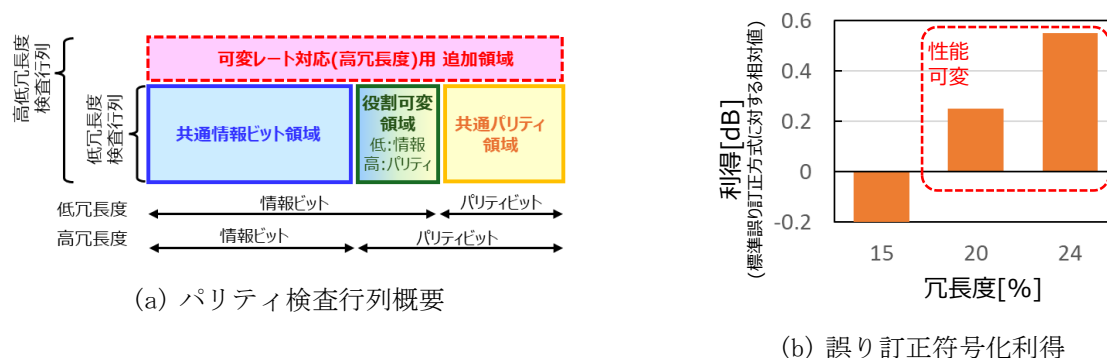


図 3.1-b 固定符号長可変レート誤り訂正符号設計結果

3. 2 イ) 伝送信号歪み補償技術

最大 10 テラビット級光伝送を実現する多並列光適応送受信に対応し、並列数・変復調方式等の変化に対して波長分散等により生じる静的波形歪みを補償し、性能・演算リソースの最適化レベルを向上する静的信号等化処理アルゴリズムを確立する。

最大 10 テラビット級光伝送を実現する多並列光適応送受信に対応して、光ファイバ伝送システムで生じる動的波形歪みを補償し、性能・演算リソースの最適化レベルを向上する動的信号等化処理アルゴリズムを確立する。

a) 静的信号等化基本技術（日本電気株式会社）

最大 10 テラビット級光伝送を実現する多並列光適応送受信における静的な伝送信号歪みに応じて信号歪みを補償する静的信号等化技術について、他の課題との連携を考慮した複合負荷環境を用いて、光伝送性能、演算・回路リソースの観点からの実環境に近い条件でのシミュレーション等による評価・比較検討を実施し、アルゴリズム候補の機能動作検証を完了し、静的信号等化基本技術を確立した。

具体的には、令和 4 年度に、最大 10 テラビット級光伝送を実現する多並列光適応送受信における静的な伝送信号歪みに応じて信号歪みを補償する静的信号等化技術について方式候補の洗い出しを行い、それぞれ仕様を策定した。令和 5 年度、および、令和 6 年度には、方式候補として、光伝送路上のデバイスの周波数応答を、受信側 DSP において強度・位相両成分を一括推定し、推定結果に基づき送受信 DSP で等化する送受信等化方式、および、同様に一括推定した結果に基づき送受信 DSP と光フィルタで等化する送受信等化+光補償方式について、様々な線形歪みを模擬するシステムシミュレーション環境を構築し、光伝送性能、演算リソース、ならびに回路リソースの観点から比較検討を行った上で、詳細機能評価を完了した。最終年度の令和 7 年度においては、より実環境に近い複合負荷を模擬するシステムシミュレーション環境を用いて 240GBd の変調速度や 16QAM 相当の偏波多重多値変調信号を使っ

た他の課題と連携を考慮した詳細動作検証を実施した。図 3.2-a は詳細動作検証の一例として、回路実装を考慮した演算ビット精度において、変調速度、情報量に対する波長分散スロープ、および、I-Q スキューに起因する信号品質劣化についての等化性能の比較検証を行った結果である。本動作検証結果により、10 テラビット級を 7ch で実現可能な 240GBd, 情報量 (IR) 3.2bit/sym. 偏波多重光信号において、性能・演算リソースの観点から評価を含めて静的信号等化処理アルゴリズムの機能動作検証を完了し、到達目標を達成した。

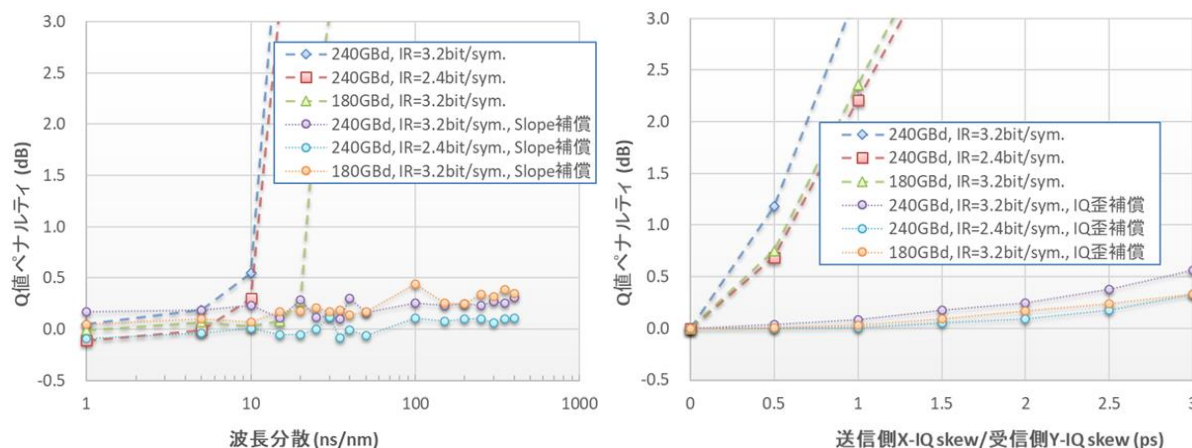


図 3.2-a 実環境に近い複合負荷条件下での静的信号等化連携動作検証結果
(左：波長分散スロープ補償 右：I-Q スキュー補償)

b) 動的信号等化基本技術 (1FINITY 株式会社)

本研究開発では、変調方式・符号化・並列度等のフレキシブルな変化に対応する最大 10 テラビット級光伝送を実現する多並列光適応送受信に対応して、光ファイバ伝送システムで生じる動的な波形歪みを歪み補償精度向上を実現しながら低演算量で補償する信号等化技術の研究開発を実施した。最初に高多値化、多並列化、高ボーレート化に起因する動的信号等化技術の性能と演算量に関する課題整理を行い、高ボーレート化を最優先課題として位置付けた。高ボーレート光伝送では、送受信光デバイスのアナログ帯域不足の影響を考慮し、従来の Nyquist 信号に加えて、アナログ帯域不足の影響に強い送信スペクトル整形技術の一種である THP (Tomlinson-Harashima Precoding) 信号に着目して、両信号が動作可能な動的信号等化処理のアルゴリズムを選定した。選定したアルゴリズムに基づいて、高安定で低演算な回路パラメータを持つ動的信号等化回路を搭載した機能モデルを開発し、回路実装性の評価、実用的な伝送条件で評価を行った。Uniform-16QAM、236GBd の Nyquist 信号と THP 信号に対して、偏波変動耐力・レーザ線幅耐力・偏波モード分散耐力の評価結果を図 3.2-b に示す。実用的な伝送条件を想定し、偏波変動耐力については光伝送中の落雷によって引き起こされる数百キロ kHz 以上の偏波変動に対する追従性を評価し、偏波モード分散は長距離伝送で一般的に想定される 100ps 程度までの耐力を評価した。またレーザ線幅耐力については、比較的安価なレーザの最大線幅である 500kHz 程度の線幅耐力を判断基準とした。それらの範囲内で Nyquist 信号と THP 信号に対して、動的信号等化処理方式の安定動作を確認することにより機能モデルの開発を完了し、最大 10 テラビット級の光伝送の実現が可能である動的信号等化処理方式の基本技術確立した。

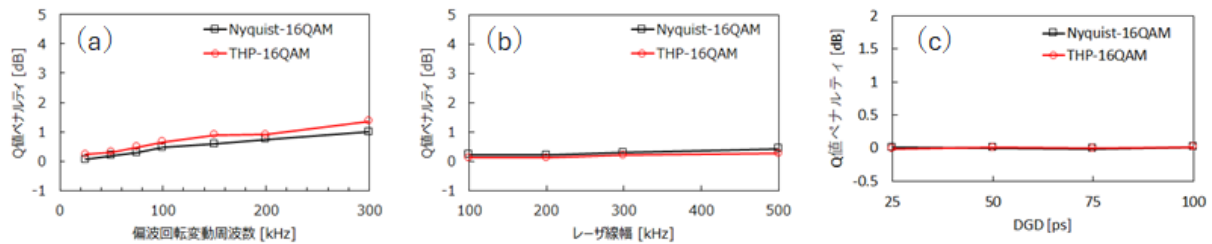


図 3.2-b 動的等化信号回路機能モデル性能評価結果

(a) 偏波変動耐力、(b) レーザ線幅耐力、(c) 偏波モード分散耐力

3. 3 ウ) 低電力回路最適化設計技術

ア) で検討した多並列光適応送受信技術及びそれに対応した誤り訂正符号化・復号回路技術について、回路規模と消費電力を最適化しながら回路として実現するための回路アーキテクチャを確立する。

イ) で検討した静的信号等化处理技術及び動的信号等化处理技術において、回路規模と消費電力を最適化する回路アーキテクチャを確立する。

a) 多並列光適応送受信回路基本技術 (NTT 株式会社)

課題ア・a で確立した多並列光適応送受信方式を、最先端 CMOS プロセスを前提に低消費電力で実装するための回路基本技術を確立した。令和 4 年度には、多並列光適応送受信符号化技術に対して、変調方式、符号化率、変調速度、並列度といった可変パラメータを整理し、シンプルで一貫したフレーム構成、DAC/ADC サンプリグレート範囲の低減、統一的な性能予測と機能検証を柱とする低電力回路最適化の進め方を定めた。令和 5 年度には、課題ア・a で導出した 3.125GHz 粒度のシンボルレート可変を効率よく実現するため、分数 OSR・整数 OSR・副 OSR から成る 3 段多段リサンプル回路アーキテクチャを設計し、22 種類の OSR を実現可能とした。これにより、細粒度な適応制御と回路規模・消費電力の両立に道筋を付けた。令和 6 年度には、ビット精度を組み込んだ機能評価モデルにより要求 OSNR と実回路時性能の整合を確認するとともに、伝送信号フレーム処理回路やリサンプル回路のハードウェア記述言語による基本設計とレジスタアクセス等の評価を進め、回路アーキテクチャの妥当性を検証した。令和 7 年度には、昨年度設計した回路モデルと機能モデルとの等価性評価を完了し、先端プロセスライブラリを用いた回路電力評価を通じて電力特性を定量把握した。加えて、送受信器特性推定補償技術の効率的実装として、主信号のリサンプル回路および受信周波数領域フィルタ回路はハードウェア演算で処理しつつ、Nyquist 整形係数生成、スキュー補償係数生成、およびフィルタ係数の畳み込み処理をファームウェアへオフロードする構成を明確化した。これにより、係数設定の柔軟性を確保するとともに、ハードウェア資源削減による消費電力低減の可能性を示した。以上により、適応的に動作する多並列光適応送受信機能の低電力回路最適化に向けた基本技術を確立した。

1.6Tbps短距離モード (複合負荷OSNR耐力)

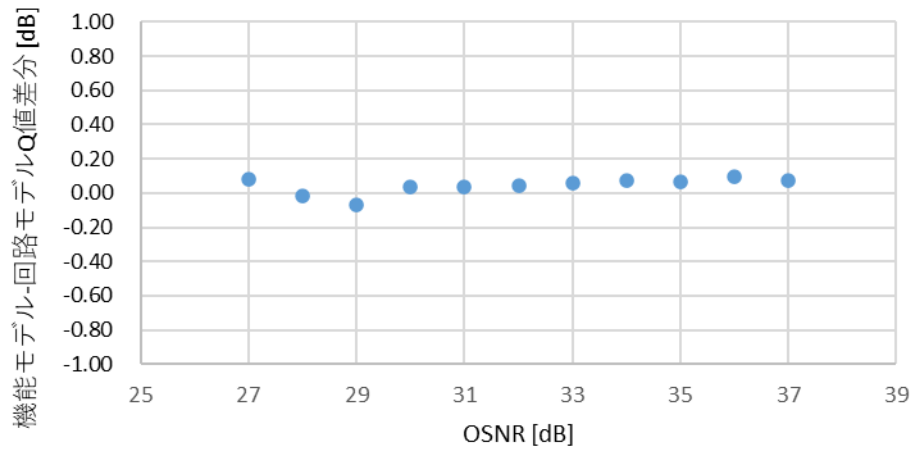


図 3.3-a-1 回路モデルと機能モデルの等価性評価結果

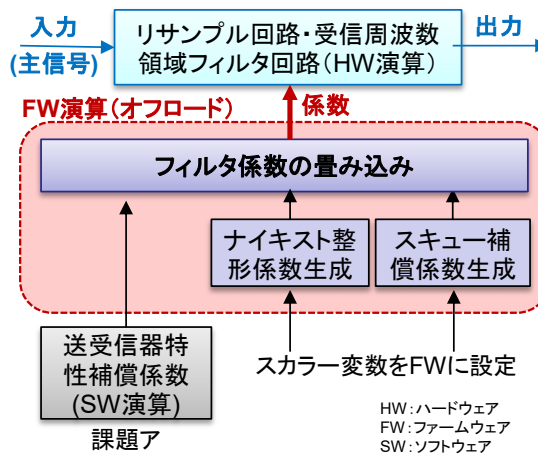


図 3.3-a-2 送受信器特性推定補償技術における FW オフロード構成

b) 誤り訂正回路基本技術 (三菱電機株式会社)

課題ア・b で検討した誤り訂正技術の符号化利得と消費電力とを最適化し、伝送容量や伝送品質に対して適応的に動作する多並列光適応送受信に対応した誤り訂正符号化・復号回路技術の最適回路設計に向けた基本技術を確立した。

具体的には軟判定 LDPC 復号回路を中心に配線性の問題を復号演算制御も織り込む形で詳細解析し、回路設計から合成・レイアウト予測、消費電力算出まで一貫する形で検証を行った。実装予測に特化したインプリ予測ツールを用い論理合成段階だけで見えない配線混雑やピン配置影響を早期に抽出し、反復的な設計改善を試行した。併せて、3nm プロセスの特性を鑑み、高速ではあるものの高電力なセルの使用率を削減するアーキテクチャの探索、漏洩電力の大きい機能アルゴリズムの精査等を実施した。結果として、10 テラビット級光伝送を実現する誤り訂正回路に関して最先端 CMOS プロセスの適用を前提として定めた目標消費電力に対し、96.3% (24%冗長度時) という消費電力が得られた。以上により、10 テラビット級光伝送を実現するための誤り訂正復号回路設計に向けた基本技術を確立することができた。

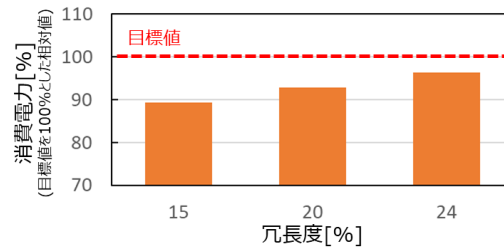


図 3.3-b 誤り訂正回路の消費電力

c) 静的信号等化回路基本技術（日本電気株式会社）

最大 10 テラビット級の通信処理速度に対応可能な静的信号等化处理回路において、回路規模や消費電力の観点から回路方式を最適化する際に回路構成の選択肢となる回路構成の候補を基にして、実用的な回路規模および消費電力で最適化構成を実現可能であること、および、検討した回路最適化の実現方式、効率的な最適化を実現する設計・検証効率化方式が有効であることを確認し、静的信号等化回路基本技術を確立した。

具体的には、静的信号等化回路の基本となる周波数領域等化（FDE : frequency domain equalizer）方式を用いた静的信号等化处理回路について、回路規模や消費電力の観点から最適化可能な回路構成とした最適化構成候補に対して基本仕様を策定し、ビット精度レベルの機能モデルである機能レベル回路記述を作成した。また、作成した機能レベル回路記述を参照して、RTL（Register Transfer Level: レジスタ転送レベル）言語を用いて論理回路レベル・シミュレーションを行い、基本機能の動作を確認した。さらに、最適化構成候補に関してゲートレベル回路記述を部分試作し、回路規模や消費電力の観点から静的信号等化処理の全体構成回路が実用的な回路規模かつ消費電力で実現可能であることを確認した。次に、具体的な全体回路構成の最適化として、動作シミュレーションから得た回路のトグル率をベースに消費電力の評価を実施した。図 3.3-c は伝送距離が異なる動作モード毎に専用回路構成を選定した場合と、回路パラメータ変更により動作モード変更可能な共有回路構成とした場合の消費電力評価の結果である。評価の結果、動作モード毎に専用構成を選定した方が、12%～13%の消費電力を低減できることを確認した。最後に、作成した論理レベル回路記述を実現性の観点で検証するため、最適化を適用した全体構成回路に対して、ゲートレベル回路記述を部分試作し、回路規模や消費電力の観点から評価を行い、実用的な回路規模かつ消費電力で実現可能であること、および、FDE 方式による静的信号等化処理回路の全体構成に係る基本機能について、回路最適化の実現方式、効率的な最適化を実現する設計・検証方式が有効であることを確認した。以上により、静的信号等化処理回路の最適化回路を実現する低電力回路最適化技術、および、低電力回路検証技術を確立し、到達目標を達成した。

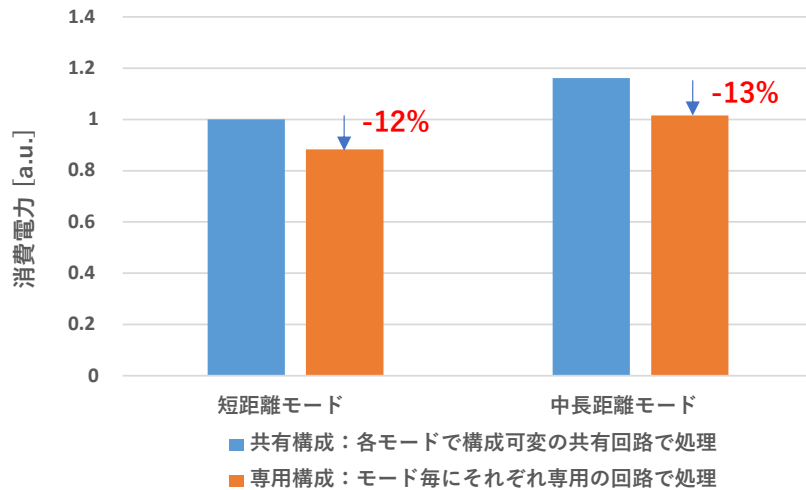


図 3.3-c 最適化全体構成回路の消費電力評価結果

d) 動的信号等化回路基本技術 (IFINITY 株式会社)

本研究開発では、最大 10 テラビット級の超高速光伝送を実現するため、課題イ・b で得られた動的信号等化アルゴリズムを最先端の CMOS 電子回路に実装し、他の機能と連携し、信号処理全体として既存 100 ギガビット級光伝送向け信号処理回路と比較して、同一通信速度で 1/10 以下の低消費電力化を実現する動的信号等化回路のアーキテクチャ検討を行った。検討を進めるにあたり、まずアーキテクチャ検討用モデルを作成し、低消費電力化の鍵となる多並列処理を効率良く行うための回路の分割実装や分割に伴うブロック間の連携制御の実現方法を検討した。続いて課題イ・b のアルゴリズムと最先端 CMOS 電子回路の特性を加味した検討を実施し、基本回路アーキテクチャを決定した。

基本回路アーキテクチャ決定後、240GBd-16QAM をターゲットとした回路構成の詳細検討を行い、回路規模と消費電力の両観点で現実的な最適解となるよう、並列処理数や回路動作速度などの回路構成を決定した。また、性能の観点でクリティカルパスとなる制御信号の低遅延化や主信号の整流化といったフロアプラン上の最適化により、既存回路に対して 100 ギガビットあたりの消費電力を 60%削減できることを確認し、ハードウェア記述言語による設計を完了した。次に、回路合成ツールにより物理的な配置・配線が考慮された回路を作成し、実運用で想定される様々な条件での回路規模・電力評価結果を踏まえてブロック間の入出力端子位置変更による配線長の短縮や適切なバッファ挿入等による電力削減を図り、最終結果として更に 10%の電力削減を完了した (図 3.3-d)。

以上により、信号処理全体として既存 100 ギガビット級光伝送向け信号処理回路と比較して同一通信速度で 1/10 以下の低消費電力化を実現する動的信号等化回路のアーキテクチャを確立した。

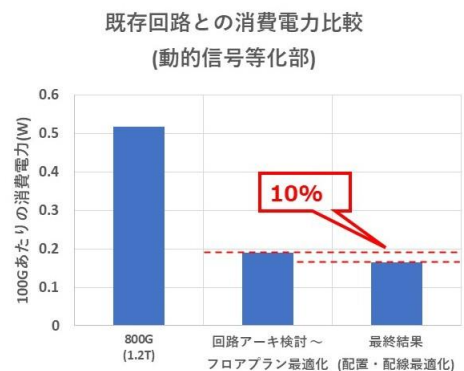
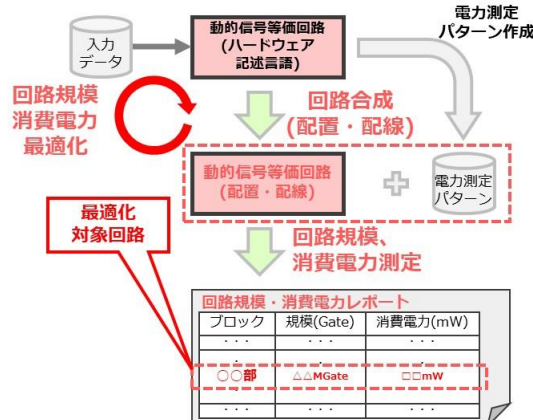


図 3.3-d 回路規模・電力評価、既存回路との消費電力比較

3. 4 エ) 信号処理統合最適化技術

ア)、イ)、ウ) で検討した各機能・回路等を統合するとともに、機能間及び回路間の連携動作の検証・最適化を実施することで、既存 100 ギガビット級光伝送向けデジタル信号処理回路と比較し、100 ギガビット当たり 1/10 以下の電力で動作可能とする信号処理統合最適化技術を確立する。

(NTT 株式会社)

課題ア、イ、ウで得られた各機能・回路を統合し、機能間および回路間の連携動作を最適化することで、信号処理全体として既存 100 ギガビット級 DSP に対して 100 ギガビット当たり 1/10 以下の消費電力で動作可能な信号処理統合最適化技術を確立した。令和 4 年度には、光送受信器や光伝送路の外部環境を模擬するための非線形応答モデルとして多項式モデルおよび WH モデルを評価し、外部環境モデル化の基礎を確立した。令和 5 年度には、Chromatic Dispersion (CD) と Laser Frequency Offset (LFO) を対象とした推定方式を具体化し、統合最適化のための要素アルゴリズムを拡充した。令和 6 年度には、課題ア、イで構築した各機能モデルを外部環境モデルとともに統合した「統合性能最適化プラットフォーム」を構築し、機能間連携動作の基本検証を開始した。あわせて、各機能を統合した回路モデルについてサブブロック単位で電力内訳を詳細化し、全体最適化に向けた回路モデル統合設計を進めた。最終年度には、各機能の機能モデルおよび外部環境を統合した統合機能モデル環境において、機能間の連携動作と性能評価を完了し、さらにハードウェア記述言語による回路モデル統合設計、波長分散・周波数オフセット推定を含む全体制御シーケンスの回路連携動作検証、各機能ブロックおよび DSP 全体の消費電力評価を完了した。その結果、既存 100 ギガビット級 DSP に対して、100 ギガビットあたりの消費電力を、長距離モードにおいて 1/18 まで、短距離モードにおいて 1/27 まで削減できることを確認し、目標を大きく上回る成果を得た。以上により、信号処理統合最適化技術を確立した。

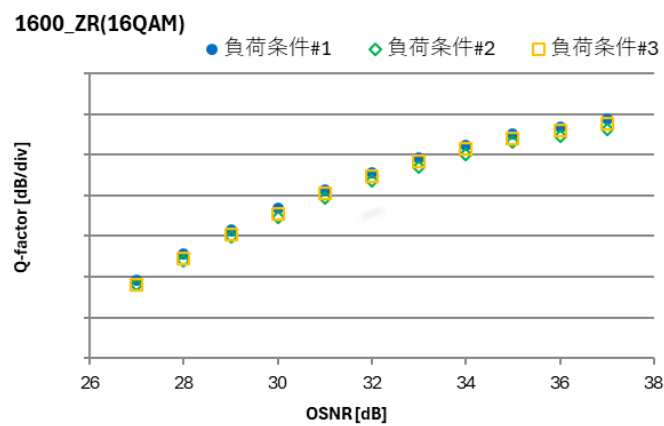


図 3.4-1 異なる負荷条件における回路間連携動作評価結果 (1600ZR)

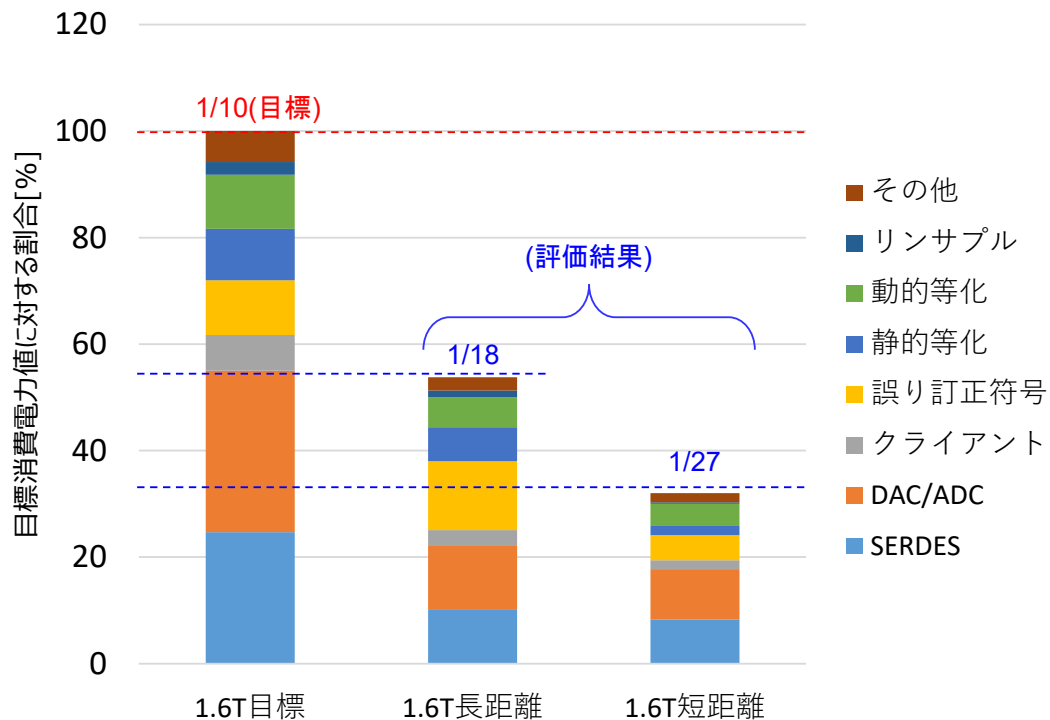


図 3.4-2 DSP 全体の消費電力評価結果

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

4. 1 実用化、事業化

アウトカム目標の達成に向けた取り組みとして、総合ビジネスプロデューサおよび各ビジネスプロデューサの統括のもと、研究開発成果の社会実装・事業化を見据えた実効的な研究開発マネジメントを推進した。具体的には、本研究開発で得られた研究開発成果を活用したプロダクトの市場展開を見据え、システム/モジュールベンダ、ネットワーク事業者、ハイパースケーラとの意見交換を通して、北米を含む市場動向、AI データセンタネットワークにおける要求条件、競合技術、国際標準化動向等の調査・分析を継続的に実施した。また、近年の AI データセンタ市場の急速な拡大に対応するため、北米に各社の拠点を置き、市場動向・技術動向などの情報収集を強化し、ハイパースケーラの要求条件や技術トレンドの把握を進めている。これらの調査結果を踏まえ、ビジネスプロデューサから研究開発チームに対して、性能目標・機能目標・スケジュール・標準化戦略等に関する具体的提言を行い、研究開発計画へ随時反映した。動向調査の結果、従来の光伝送装置では、性能優先のラインカード型光送受信器と小型・低消費電力優先のプラグブル光モジュールの両方で大容量化が進んでいたが、プラグブル光モジュールの大容量化が急速に進展し、1.6Tbps/λ 級光送受信器では導入初期からプラグブル光モジュールが市場に要求されることが判明した。市場動向および OIF で議論が開始された標準化の動向を踏まえて、本研究開発で検討する総変調速度と情報量の上限を標準方式に合わせて絞り込むことにより、当初の電力目標である従来比 1/10 と比較して、更なる低消費電力化（従来比 1/27）を達成した。これにより、市場で要求される小型プラグブル光モジュールに搭載が可能となり、市場競争力の向上につながる技術確立を達成した。

さらに、本研究開発では、各共同研究機関が各々強みとする技術、評価環境、知見を持ち寄って、密に連携して相互活用する研究開発を実施した。研究開発の役割分担と技術・知見の持ち寄りだけでなく、オープンイノベーション方式を深化させて、方式・アルゴリズム・回路アーキテクチャなどの検討初期か

ら共同研究機関の間で密に連携する体制を構築し、各担当機能だけでなく、デジタル信号処理回路全体で機能分担や性能・消費電力を最適化することで、単独機関では困難な、伝送方式・DSP・光デバイス・回路実装を統合した効率的な検討を実現した。本研究開発の成果を活用した実用化・事業化に向けて、下記のデジタル信号処理回路、光モジュール、光伝送装置の製品化や実用化開発を実施した。

- ・前回総務省委託研究成果、及び本研究成果の一部を適用した 800Gbps コヒーレント通信用デジタル信号処理回路 (DSP) を NTT イノベーティブデバイス社より製品化。(NTT)
- ・成果に基づいた光信号の収容に向けたシステムコンポーネントを試作 (三菱電機)
- ・前回総務省委託研究成果を適用したデジタル信号処理回路 (DSP) を搭載した光伝送装置 (SpectralWave WX-T) の 800G トランスポンダを 2023 年度に製品化。前回総務省委託研究成果、及び本研究成果の一部を適用した DSP を搭載した 800G プラガブル光モジュールを 2026 年度に製品化予定。(日本電気)
- ・前回総務省委託研究成果を適用したデジタル信号処理回路 (DSP) を搭載した光伝送装置として、1FINITY T900 を 2023 年 7 月に製品化、1FINITY T950 を 2024 年 6 月に製品化。前回総務省委託研究成果、及び本研究成果の一部を適用した DSP を搭載したプラガブル光モジュールとして、1FINITY P300 を 2026 年度に製品化予定。(1FINITY)
- ・本件研究成果を活用して、NICT B5G 助成事業にて DSP 回路実装技術の研究開発を推進中。1.6Tbps/ λ 低電力 DSP を 2026 年度に実用化予定。(NTT)
- ・1.6Tbps/ λ 低電力 DSP を搭載したプラガブル光モジュールを 2026 年度に実用化予定。(1FINITY)

4. 2 標準化活動

国際標準化活動については、OIF、OpenROADM、IEEE、ITU-T 等において光インタフェースの標準化を推進した。OIF では、各社から四半期ごとの会合に現地参加し、1600ZR/ZR+/CL に関する議論参加および寄書提案 12 件を通じて、研究開発成果や知見を DSP 仕様にタイムリーに反映した。寄書提案としては、1FINITY から等化強調位相雑音等に関する寄書提案や、NTT から光インタフェース仕様等に関する寄書提案がなされたほか、NTT と海外ベンダ各社により確率整形信号の生成方式に関する共同提案がなされ、三菱電機により考案された信号生成方式が標準規格として採用された。OpenROADM では、光通信業界における最大規模の国際会議の一つである OFC2025 において相互接続デモを実施し、相互接続性の検証と研究成果の可視化を進めた。また、ECOC2025 においてマルチベンダによるプラガブル光モジュール相互接続デモを実施するとともに、TIP Fyuz においてトランスポンダの動態展示を実施した。

4. 3 知財確保

知財権獲得は、国際競争力を確保する源泉として不可欠であると考えており、本研究開発の成果を含むコア技術ならびに周辺技術について、特許出願による権利化に取り組み、光送受信デバイス特性補償技術 (出願特許リスト[2, 10-11, 31])、誤り訂正技術 (出願特許リスト[5, 6, 16, 24, 27, 42]、取得特許リスト[1])、静的信号等化技術 (出願特許リスト[1, 3, 8-9, 11-12, 14-15, 17-20, 22-23, 26, 28-30, 33-39, 43-44]、取得特許リスト[2-3])、動的信号等化技術 (出願特許リスト[4, 13, 45]) 等の特許出願、特許取得を行った。結果として国内出願、国際出願ともに当初目標を大幅に上回った。また、開発・実装・検証により確立した技術に関しては、秘匿化・ライセンス化・オープン化からもっとも適切な形態を選択して活用し、周辺技術を含めたエコシステムを構築することにより通信産業分野における国際競争力の向上を目指している。国際標準に採用された特許は適正な条件で公開し、技術の普及にも貢献する。

4. 4 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、各年度2回開催した。

- ・2022年度 第1回（2022年10月14日 オンライン）
- ・2022年度 第2回（2023年2月10日 オンライン）
- ・2023年度 第1回（2023年9月22日 オンライン）
- ・2023年度 第2回（2024年2月8日 オンライン）
- ・2024年度 第1回（2024年7月9日 オンライン）
- ・2024年度 第2回（2024年12月26日 オンライン）
- ・2025年度 第1回（2025年7月9日 オンライン）
- ・2025年度 第2回（2025年12月4日 オンライン）

【アドバイザリ委員】

- ・神谷 武志 東京大学 名誉教授 「超高速光デバイス技術」
- ・北山 研一 大阪大学 名誉教授 「フォトリックネットワーク技術・伝送劣化補償技術」
- ・浅見 徹 国際電気通信基礎技術研究所 代表取締役社長 「通信ネットワークとその応用技術」
- ・中沢 正隆 東北大学災害科学国際研究所 特別名誉教授 「超高速光通信技術・変復調技術」
- ・松澤 昭 テックイデア 代表取締役社長 「超高速アナログ・デジタル変換回路技術」

4. 5 成果発表会・展示

以下の国際会議や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。

- ・OPTICS PHOTONICS International Exhibition 2022（横浜）
- ・OECC（2022 富山、2023 上海）
- ・電子情報通信学会ソサイエティ大会（2022 オンライン、2023 名古屋）
- ・光通信システムシンポジウム（2022 東京、2024 名古屋）
- ・電子情報通信学会 総合大会（2023 大宮、2024 広島、2025 東京、2026 福岡）
- ・OFC（2023 サンディエゴ、2024 サンディエゴ、2025 サンフランシスコ、2026 ロサンゼルス）
- ・フォトリックネットワークシンポジウム 2023（東京）
- ・Symposium on VLSI Technology and Circuits（京都）
- ・ECOC（2023 グラスゴー、2024 フランクフルト、2025 コペンハーゲン）
- ・ACP（2023 武漢）
- ・レーザー学会 学術講演会（第45回年次大会 広島、第46回年次大会 大阪）

4. 6 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。

- ・「世界最大容量1波長あたり1.2テラビット／秒の光伝送を実現するデジタルコヒーレント信号処理回路および光デバイスを開発 ～光ネットワークのさらなる大容量化、長距離化と省電力化を実現～」2022年9月5日（NTT）

- ・ “World's largest capacity of 1.2 Tbit/s per wavelength by newly developed digital coherent signal processing circuit and optical device - For larger capacity, longer transmission distances, and lower power consumption in optical networks -” 2022 年 9 月 5 日 (NTT)
- ・ 「光 1 波長あたり 1.2Tbps での世界最長 336km 伝送と世界最大容量 1Tbps 超のデータ転送に成功 先端科学技術研究の促進に不可欠な高速大容量学術通信ネットワークの実現に貢献」 2023 年 10 月 30 日 (NTT)
- ・ “Japanese joint research group achieves a world record of 1.2Tbps for optical signal transmission with over 1Tbps data transfer in field trial” 2023 年 10 月 30 日 (NTT)

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

アウトカム指標	目標年度	数値目標等	調査方法	終了条件
特許取得の活用状況			契約書に基づく報告書	特許権の消失
情報発信	令和 10 年	10 件	契約書に基づく報告書	数値目標 10 件を達成した時点
製品化事例	令和 11 年	4 件以上	ヒアリング調査等	適用事例 4 件以上を達成した時点、あるいは 10 年経過時点
国内外ネットワークへの適用事例	令和 12 年	2 件以上	ヒアリング調査等	適用事例 2 件以上を達成した時点、あるいは 10 年経過時点

【NTT 株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

国際標準化については、OIF、Open ROADM および ITU-T 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。10 テラビット級の光伝送を実現するデジタル信号処理 LSI の製品化に向けては、これまで製品化してきたデジタル信号処理 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。そこでは、NICT B5G 助成事業「1T 超級光トランスポート用 DSP 回路実装技術に関する研究開発プロジェクト」を活用して、波長あたり 1.6T デジタル信号処理 LSI の回路実装技術を確立する共に社会実装に取り組む。また、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。

○アウトカム以外に期待される波及効果

多並列光適応受信基本技術の検討では、本研究開発で確立したボーレート可変方式や多並列光伝送方式と 5T 級光伝送方式の研究開発で確立した確率的コンスタレーション成形方式を統合することで、伝送路条件に対して適応的に光信号の周波数利用効率を制御する事が可能となる。また、上記方式の回路最適化設計技術や、DSP 信号処理の統合最適化技術により回路の低消費電力化を実現した。上記のイノベーションにより、光ファイバ等のリソースを効率的に活用できるようになるため、ICT インフラのコスト効率

の改善を実現できる。また、信号処理装置の低消費電力化により、光伝送装置の小型化が可能になる。そのため、データセンタ向け装置など、従来の大容量バックボーンネットワークとは異なる領域への応用も期待できる。多並列光適応送受信方式の研究開発では、多数のパラメータを最適化する技術確立することになるため、その基本アルゴリズムや最適化に関する一般的知見は、他の分野でも有用な普遍的技術へと発展する可能性がある。

【三菱電機株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

これまでに進めた顧客マーケティング活動および OIF、ITU-T 等の標準化動向調査ならびに学会動向調査の継続に加え、IOWN Global Forum 等の国際的なコンソーシアムに参画し、ユースケースも見据えた上で動向調査に基づく社会展開に向けた戦略を検討する。特に、今後の市場規模拡大が確実視されるデータセンタの超大容量短距離高速通信領域の急速な進展を鑑み、本研究開発の成果を次世代ネットワークの構築に不可欠なキーコンポーネントとして位置づけ、市場や標準化の最新動向を適宜研究開発プロセスへフィードバックしていく。これにより、将来的な社会実装に向けた技術的完成度を高め、多様なインフラ基盤への適用を目指す。

○アウトカム以外に期待される波及効果

当社では、高度な信号処理技術や誤り訂正技術を専門とする研究者が従事し、本研究開発を推進してきた。計画立案の段階より社内関連部門と連携し、成果の実用化を前提とした研究開発を進めてきたが、今後は本プロジェクトで培った技術資産の広い共有・活用を模索する。本研究で得られた次世代ネットワーク向けの高度なアルゴリズムや低消費電力化技術を、様々な形で活用していくことで社会全体のデジタルインフラ高度化に寄与することが期待される。

【日本電気株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

10 テラビット級の光伝送装置や光モジュールを令和 10 年度までに製品化することを目指し、実用化に向けた技術開発を令和 8 年度から進める。これら装置や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る伝送容量増大あるいは更なる伝送能力向上を検討すると共に、これら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。

○アウトカム以外に期待される波及効果

本研究開発を通して得られた静的信号等化基本技術および静的信号等化回路基本技術は、多次元変調方式などの高度な変調方式や 240GBd 級の高速変調に対しても伝送特性の向上および消費電力低減に効果があることが確認された。従ってこれらの技術は、10 テラビット級およびそれを上回る超大容量伝送を実現する際の基本技術として波及すると考えられ、長距離大容量の基幹系光伝送システムのみならず、今後大幅な大容量化が求められるメトロ／アクセス系やデータセンタ間通信等にも展開されることが期待される。

【1FINITY 株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

今後は 10 テラビット級の伝送速度を実現する光伝送装置の製品化に向けた取り組みを進める。具体的には、令和 8 年度より商用化開発の検討および実用化に向けた研究開発を開始し、これと並行して国内外の市場要求の調査、競合情報の収集、標準化動向の調査を行う。これらの活動を基盤として光伝送装置の事

業化の検討を行い、令和 10 年度を目処に市場投入を行うことで、本研究開発成果の社会展開を図る。

○アウトカム以外に期待される波及効果

動的信号等化基本技術（課題イ・b）における高多値度かつ高ボーレートに対応可能な信号等化処理方式に関しては、より高効率な伝送を必要とされる無線通信分野における伝送容量向上や、より低コスト・低電力が求められる AI データセンタ内もしくは GPU サーバー間通信の伝送容量向上への寄与が期待される。

動的信号等化回路基本技術（課題ウ・d）における回路の低消費電力化に関しては、回路構成の全体最適化による低消費電力化技術などを無線通信分野や AI データセンタ内もしくは GPU サーバー間通信、衛星通信に応用することで、通信分野全体の低消費電力化に寄与する技術として期待される。

6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] 黄国秀、中村容、中島久雄、“240GBd-16QAM Single-Carrier Coherent Transmission beyond 130km SSMF for a Bandwidth Limited System with low power consumption DSP”、IEEE Journal of Lightwave Technology、Volume: 43, Issue: 4, Page(s): 1874 - 1880、2025 年 2 月 15 日
- [2] 濱岡福太郎、中村政則、小林孝行、宮本裕、山崎悦史、木坂由明、“Triple-Band WDM Transmission Beyond 100-Tb/s Capacity with 1-Tb/s/ λ -class Digital Coherent Channels”、IEEE Journal of Lightwave Technology、Volume: 43, Issue: 4, On Page(s): 1716-1724、2025 年 2 月 15 日
- [3] 山口修平、堀勇太、中村隆彦、亀谷聡一郎、“APEXIT analysis of belief propagation Polar decoder with approximated LLR”、IEICE Communications Express、Volume: 14, Issue: 8, Page(s): 330-333、2025 年 8 月 1 日

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] 佐藤 正規、有川 学、野口 栄実、松井 淳一郎、安部 淳一、ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル、“Inline Optical Compensation of Group Delay Ripple for Long-haul Transmission Using Offloaded 2×2 MIMO Filter”、Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2023)、San Diego、2022 年 3 月 8 日
- [2] 黄国秀、中島久雄、星田剛司、“1.73Tbps and 256-GBd Dual-carrier Faster than Nyquist Signal Transmission using Two Narrow-bandwidth Modulators and Single Coherent Receiver”、OFC2023、San Diego、2023 年 3 月 9 日
- [3] 笹井健生、曾根由明、山崎悦史、中村政則、木坂由明、“A Generalized Method for Fiber-longitudinal Power Profile Estimation”、The European Conference on Optical Communication 2023 (Glasgow, Scotland) 2023 年 10 月 3 日
- [4] 佐藤正規、有川学、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル、“On-Site Transceiver Calibration via Constrained Adaptive Multi-layer Filters with Separating Tx/Rx Frequency Responses”、ECOC2023、(Glasgow, Scotland) 2023 年 10 月 4 日
- [5] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル、“In-Service Transmitter Calibration via Offloaded 4×2 WL MIMO Equalizer with Compensating IQ Imbalance”、Optical Fiber Communication Conference 2024、(San Francisco, USA) 2023 年 10 月 4 日.
- [6] 黄国秀、中島久雄、“Low power consumption digital signal processing for bandwidth limited coherent optical system with Tomlinson-Harashima pre-coding”、ACP2023 (Wuhan, China)、2023 年 11 月 4 日
- [7] 中村容、黄国秀、中島久雄、星田剛司、“Clock Recovery of a 180 Gbaud Faster-than-Nyquist Signal Enabled by a Novel Adaptive Equalizer-Aided Algorithm”、OFC2024 (San Diego, California)、2024 年 3 月 24 日
- [8] 黄国秀、中村容、中島久雄、星田剛司、“240GBd-16QAM Single-Carrier Coherent Transmission over 120km SSMF for a Bandwidth Limited System with 1sps Speed and Simple DSP”、OFC2024 (San Diego, California)、2024 年 3 月 24 日
- [9] 吉田剛、工藤勇、石井健二、吉田英夫、清水秀徳、平野進、小西良明（三菱電機株式会社）、Magnus

Karlsson、Erik Agrell (Chalmers University of Technology)、“High-Speed Multilevel Coded Modulation and Soft Performance Monitoring in Optical Communications”、OFC2024 (San Diego, California)、2024 年 3 月 27 日

- [10] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、細川晃平、“In-Service Transceiver Calibration with Extracting IQ Difference via Offloaded Adaptive Multi-layer Filters”、50th The European Conference on Optical Communication (2024)、Frankfurt/Germany、2024 年 9 月 24 日
- [11] 黄国秀、中島久雄、星田剛司、“Single-Carrier High-Capacity Transmission in Bandwidth-Limited Systems”、OFC2025、2025 年 3 月 31 日
- [12] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、細川晃平、“Digital Subcarrier-Based Synthesis for On-Site Transceiver Calibration with Separate Tx/Rx Frequency Responses”、ECOC2025、Copenhagen、2025 年 10 月 2 日
- [13] 濱岡福太郎、中村政則、木村光佑、川上広人、清水新平、小林孝行、宮本裕、山崎悦史、“High-Symbol-Rate 192-GBaud Signal Transmission in S+C+L band over 2000 km with Net bitrate of 102.8 Tb/s”、OFC2026、Los Angeles、2026 年 3 月 18 日

8 その他の誌上発表リスト

9 口頭発表リスト

- [1] 木坂由明、“グリーン社会に資するデジタルコヒーレント光伝送技術”、フォトニックネットワークシンポジウム 2023、東京都小金井市、2023 年 2 月 21 日
- [2] 石井健二、吉田英夫、吉田剛、斧原聖史、“マルチレベル符号化システムにおける誤り訂正前性能推定の一検討”、2023 年電子情報通信学会 総合大会、芝浦工業大学、2023 年 3 月 8 日
- [3] 濱岡福太郎、“次世代光ネットワークシステムに向けた超広帯域 WDM 伝送技術”、光ネットワーク産業・技術研究会 第 1 回討論会（東京）2023 年 5 月 8 日
- [4] 濱岡福太郎、“Trends in Digital Coherent Technologies with DSP ASICs for Optical Communication Systems”、2023 Symposium on VLSI Technology and Circuits（京都）2023 年 6 月 12 日
- [5] 中村容、黄国秀、中島久雄、星田剛司、“Tomlinson-Harashima Precoding を用いた光送受信システムにおけるクロック再生方式”、電子情報通信学会ソサイエティ大会（名古屋）、2023 年 9 月 12 日
- [6] 松下明日香、岡本聖司、濱岡福太郎、山崎悦史、“[招待講演] 1Tbit/s 超級デジタルコヒーレント信号処理技術”、一般社団法人レーザー学会（東京）、2024 年 1 月 18 日
- [7] 村上佳江、須田祥生、青柳健一、青木佑奈（NTT ネットワークイノベーションセンタ）、山内智裕、大井寛己（富士通株式会社）、“波長帯変換技術を用いた 1Tbps/λ 光伝送フィールド実験”、2024 年電子情報通信学会総合大会（東広島）2024 年 3 月 7 日
- [8] 青木佑奈、須田祥生、青柳健一、臼井宗一郎、島崎 大作（NTT ネットワークイノベーションセンタ）、小牧浩輔、藤田武弘、遠藤明生（富士通）、栗本崇、山中顕次郎（国立情報学研究所）、“光 1 波長あたり 1.2Tbps での 336km 伝送と 1Tbps 超のデータ転送に関するフィールド実証実験”、電子情報通信学会 6 月研（長崎）、2024 年 6 月 6 日
- [9] 濱岡福太郎、“次世代光ネットワークに向けた超広帯域 WDM 伝送技術”、光産業技術振興協会マンスリーセミナー（オンライン）2024 年 6 月 18 日

- [10] 中島久雄、“Tomlinson-Harashima precoding を用いた Faster than Nyquist 技術による超高速光伝送”、第 38 回光通信システムシンポジウム（愛知県名古屋市）、2024 年 12 月 20 日
- [11] 黄国秀、中村容、中島久雄、“Tomlinson-Harashima-precoding for coherent system beyond 200GBaud with bandwidth limited transceivers”、レーザー学会 学術講演会第 45 回年次大会（広島）、2025 年 1 月 22 日
- [12] 山本秀人、谷口寛樹、中村政則、山崎悦史、“NGMI 向上のための簡易軟出力 MLSE を用いた IM-DD 伝送”、電子情報通信学会 総合大会（東京）、2025 年 3 月 25 日
- [13] 石井健二、吉田英夫、亀谷聡一郎、軟判定 BCH 復号処理における最小値探索の簡易化についての一検討、電子情報通信学会 総合大会（東京）、2025 年 3 月 25 日
- [14] 中村容、中島久雄、“テラビット級コヒーレント光伝送におけるレーザ位相雑音と EEPN の定量的評価および対策”、レーザー学会 学術講演会第 46 回年次大会（大阪）、2026 年 1 月 13 日
- [15] 中島雪暢、谷口寛樹、山本秀人、中村政則、山崎悦史、“デジタルコヒーレント受信機における並列信号処理を想定したブロック単位 MLSE の実現手法”、電子情報通信学会 OCS 研究会 1 月（北海道）、2026 年 1 月 15 日
- [16] 山口修平、吉田英夫、亀谷聡一郎、“硬判定復号を伴う Polar-TPC の復号性能評価”、電子情報通信学会 総合大会（福岡）、2026 年 3 月 9 日

10 出願特許リスト

- [1] 佐藤正規、“通信システム、受信機、補償量計算装置、及び歪み補償方法”、日本、2022 年 10 月 7 日
- [2] 黄国秀、中島久雄、“光送信機”、特願 2022-165969、2022 年 10 月 17 日
- [3] 柴山充文、“クロック信号分周装置、処理システム、処理装置及びクロック信号分周方法”、日本、2023 年 2 月 10 日
- [4] 中島久雄、小泉伸和、“受信器および適応等化処理方法”、特願 2023-030461、2023 年 2 月 28 日
- [5] 吉田英夫、石井健二、斧原聖史、誤り訂正装置、PCT、2023 年 3 月 14 日
- [6] 吉田英夫、石井健二、斧原聖史、誤り訂正装置、誤り訂正方法、制御回路および記憶媒体、PCT、2023 年 3 月 14 日
- [7] 蓑口恭、岡本聖司、木坂由明、“光信号対雑音比推定方式および回路”、PCT/JP2023/12293、2023 年 3 月 27 日
- [8] 佐藤正規、“歪み推定装置、受信機、通信システム、歪み推定方法、及びコンピュータ可読媒体”、PCT、2023 年 4 月 24 日
- [9] 柴山充文、“処理装置、処理システム及び処理方法”、日本、2023 年 7 月 21 日
- [10] 笹井健生、中村政則、山崎悦史、曾根 由明、木坂由明、“正則化による光パワー分布推定の性能向上手法”、PCT、2023 年 8 月 14 日
- [11] 佐藤正規、“COMMUNICATION SYSTEM, RECEIVER, COMPENSATION AMOUNT CALCULATION APPARATUS, DISTORTION COMPENSATION METHOD, AND NON-TRANSITORY COMPUTER READABLE MEDIUM”、米国、2023 年 9 月 29 日
- [12] 佐藤正規、“デジタル信号処理装置、通信システム、デジタル信号処理方法、及びプログラム”、PCT、2023 年 10 月 18 日
- [13] 中村容、中島久雄、黄国秀、“光受信装置及び光伝送システム”、特願 2023-192482、2023 年 11 月

10 日

- [14] 柴山充文、“CLOCK SIGNAL FREQUENCY DIVIDER, PROCESSING SYSTEM, PROCESSING DEVICE, AND CLOCK SIGNAL FREQUENCY DIVIDING METHOD”、米国、2024 年 1 月 23 日
- [15] 柴山充文、“信号処理装置及び方法”、日本、2024 年 1 月 26 日
- [16] 山口修平、“符号化装置、符号化方法、制御回路および記憶媒体”、PCT、2024 年 3 月 7 日
- [17] 佐藤正規、“デジタル信号処理装置、通信システム、デジタル信号処理方法、及びプログラム”、PCT、2024 年 4 月 23 日
- [18] 野口栄実、“光フィルタ制御装置、光受信装置、光伝送システム及び光受信方法”、日本、2024 年 5 月 27 日
- [19] 柴山充文、“PROCESSING DEVICE, PROCESSING SYSTEM, AND PROCESSING METHOD”、米国、2024 年 7 月 1 日
- [20] 佐藤正規、“歪み推定装置、受信機、通信システム、歪み推定方法、及びプログラム”、日本、2024 年 11 月 5 日
- [21] 中島久雄、黄国秀、中村容、“光伝送システム及び送信機”、日本、2024 年 11 月 15 日
- [22] 前田貴也、佐藤正規、“測定装置、送信装置、受信装置、測定方法、受信方法及びプログラム”、日本、2024 年 12 月 16 日
- [23] 柴山充文、“SIGNAL PROCESSING APPARATUS AND METHOD”、米国、2025 年 1 月 16 日
- [24] 石井健二、吉田英夫、中村隆彦、“誤り訂正復号回路、制御回路、記憶媒体および誤り訂正復号方法”、日本、2025 年 2 月 20 日
- [25] 菅原漱人、中村政則、川合暁、松下明日香、山崎悦史 “測定装置及び測定方法”、PCT、2025 年 3 月 3 日
- [26] 柴山充文、“信号処理装置と方法”、日本、2025 年 3 月 21 日
- [27] 石井健二、吉田英夫、中村隆彦、“誤り訂正復号回路、制御回路、記憶媒体および誤り訂正復号方法”、日本、2025 年 4 月 14 日
- [28] 佐藤正規、“歪み推定装置、受信機、通信システム、歪み推定方法、及びプログラム”、日本、2025 年 4 月 22 日
- [29] 野口栄実、“OPTICAL FILTER CONTROL APPARATUS, OPTICAL RECEPTION APPARATUS, AND OPTICAL RECEPTION METHOD”、米国、2025 年 5 月 9 日
- [30] 前田貴也、“測定装置、送信装置、受信装置、測定方法、受信方法及びプログラム”、日本、2025 年 5 月 21 日
- [31] 蓑口恭、岡本聖司、木坂由明 “光信号対雑音比推定方式および回路”、日本、2025 年 9 月 8 日
- [32] 蓑口恭、岡本聖司、木坂由明 “OPTICAL RECEIVING APPARATUS AND SIGNAL PROCESSING METHOD”、米国、2025 年 9 月 8 日
- [33] 佐藤正規 “DISTORTION ESTIMATION DEVICE, RECEIVER, AND DISTORTION ESTIMATION METHOD”、米国、2025 年 10 月 9 日
- [34] 佐藤正規 “歪み推定装置、受信機、通信システム、歪み推定方法、及びプログラム”、日本、2025 年 10 月 22 日
- [35] 佐藤正規 “DISTORTION ESTIMATION DEVICE, RECEIVER, AND DISTORTION ESTIMATION METHOD” 米国、2025 年 10 月 23 日

- [36] 佐藤正規 “等化信号処理回路、受信機、及び等化信号処理方法” 日本、2025 年 10 月 30 日
- [37] 前田貴也 “測定装置、通信システム、測定方法及びプログラム”、日本、2025 年 11 月 20 日
- [38] 前田貴也、佐藤正規 “MEASUREMENT DEVICE, TRANSMISSION DEVICE, AND MEASUREMENT METHOD”、米国、2025 年 11 月 26 日
- [39] 柴山充文 “信号処理装置と信号処理方法”、日本、2025 年 12 月 24 日
- [40] 笹井健生、中村政則、山崎悦史、曾根 由明、木坂由明 “APPARATUS FOR ESTIMATING CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION LINK” 米国、2026 年 2 月 11 日
- [41] 笹井健生、中村政則、山崎悦史、曾根 由明、木坂由明 “正則化による光パワー分布推定の性能向上手法” 日本、2026 年 2 月 13 日
- [42] 吉田英夫 “誤り訂正装置、制御回路、記憶媒体および誤り訂正方法”、日本、2026 年 2 月 26 日
- [43] 柴山充文 “SIGNAL PROCESSING APPARATUS AND METHOD”、米国、2026 年 3 月 12 日
- [44] 前田貴也 “測定装置、通信システム、測定方法及びプログラム”、日本、2026 年 3 月 30 日
- [45] 中島 久雄、中村 容 “光送受信装置および 性能劣化要因解析システム偏波変動補償および 適応等化処理ステップサイズ最適化制御”、日本、2026 年 3 月 31 日

1 1 取得特許リスト

- [1] 吉田英夫、石井健二、斧原聖史、誤り訂正装置、誤り訂正方法、制御回路および記憶媒体、日本、2023 年 3 月 14 日、2024 年 4 月 18 日、特許第 7475552
- [2] 佐藤正規、”COMMUNICATION SYSTEM, RECEIVER, COMPENSATION AMOUNT CALCULATION APPARATUS, DISTORTION COMPENSATION METHOD, AND NON-TRANSITORY COMPUTER READABLE MEDIUM”、米国、2023 年 9 月 29 日、2025 年 11 月 25 日、US12483337
- [3] 柴山充文、”PROCESSING DEVICE, PROCESSING SYSTEM, AND PROCESSING METHOD”、米国、2024 年 7 月 1 日、2025 年 12 月 16 日、US 2498753

1 2 国際標準提案・獲得リスト

1 3 参加国際標準会議リスト

- [1] OIF Q2 2024 Plenary meeting、Athens、2024 年 5 月 6 日～9 日
- [2] OIF Q3 2024 Plenary meeting、Ottawa、2024 年 8 月 5 日～8 日
- [3] OIF Q4 2024 Plenary meeting、Melbourne、2024 年 11 月 4 日～7 日
- [4] OIF Q1 2025 Plenary meeting、San Diego、2025 年 2 月 10 日～13 日
- [5] OIF Q2 2025 Plenary meeting、Tallinn、2025 年 5 月 5 日～9 日
- [6] OIF Q3 2025 Plenary meeting、Quebec City、2025 年 8 月 11 日～15 日
- [7] OpenROADM MSA, Plenary 会合、毎週オンラインで開催、42 回参加開催日：2023 年 11 月 2 日、9 日、16 日、30 日、12 月 7 日、14 日、21 日、2024 年 1 月 4 日、11 日、18 日、25 日、2 月 1 日、8 日、15 日、29 日、3 月 7 日、14 日、21 日、4 月 4 日、11 日、18 日、25 日、5 月 9 日、16 日、23 日、30 日、6 月 6 日、13 日、20 日、27 日、7 月 11 日、18 日、25 日、8 月 1 日、8 日、22 日、29 日、9 月 12 日、19 日、26 日、10 月 3 日、10 日

14 受賞リスト

- [1] 小牧浩輔、倉光浩一、小田祥一郎、“世界最高クラスの大容量長距離伝送を世界最小の消費電力で実現することで社会のカーボンニュートラル化を促進する光ネットワーク技術の開発”、公共財団法人 電気科学技術奨励会 第71回 電気科学技術奨励賞 文部科学大臣賞、2023年11月30日

15 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

- [1] “世界最大容量 1 波長あたり 1.2 テラビット/秒の光伝送を実現するデジタルコヒーレント信号処理回路および光デバイスを開発 ～光ネットワークのさらなる大容量化、長距離化と省電力化を実現～”、2022年9月5日
- [2] “World's largest capacity of 1.2 Tbit/s per wavelength by newly developed digital coherent signal processing circuit and optical device - For larger capacity, longer transmission distances, and lower power consumption in optical networks -”、2022年9月5日
- [3] “光 1 波長あたり 1.2Tbps での世界最長 336km 伝送と世界最大容量 1Tbps 超のデータ転送に成功 先端科学技術研究の促進に不可欠な高速大容量学術通信ネットワークの実現に貢献”、2023年10月30日
- [4] “Japanese joint research group achieves a world record of 1.2Tbps for optical signal transmission with over 1Tbps data transfer in field trial”、2023年10月30日

(2) 報道掲載実績

- [1] “NTT が世界最大容量の光伝送を実現するシステムを開発”、Forbesjapan、2022年9月5日
- [2] “NTT が 1 波長当たり光伝送で世界最大量の 1.2Tbps を実現、伝送距離の拡大も”、MONOist、2022年9月5日
- [3] “1 波長あたり 1.2 テラビット/秒の光伝送を実現する技術を開発、NTT”、マイナビニュース、2022年9月5日
- [4] “NTT、1 波長あたり 1.2 テラビット/秒の光伝送を十絃するデジタルコヒーレント信号処理回路および光デバイスを開発”、日本経済新聞電子版、2022年9月5日
- [5] “NTT が 1 波長あたり 1.2 テラビット/秒の世界最大容量となる光伝送を実現するデジタルコヒーレント信号処理回路および光デバイスを開発”、DIME、2022年9月15日
- [6] “国立情報学研と NTT など、光 1 波長あたり 1.2Tbps での 336km 伝送と 1Tbps 超のデータ転送フィールド実証に成功”、日本経済新聞電子版、2023年10月30日
- [7] “NII,NTT、富士通など 4 者、光一波長あたり 1.2Tbps での 336km 伝送と 1Tbps 超のデータ転送のフィールド実証に成功”、クラウド Watch、2023年10月30日
- [8] “NTT・NII・富士通が「光 1 波長 1.2Tbps」の世界最長 336km 伝送に成功”、business network.jp、2023年10月30日
- [9] “NTT・NII など 4 社、光 1 波長あたり 1.2Tbps での 336km 伝送と 1Tbps 超のデータ転送に成功”、ASCII、2023年10月31日
- [10] “国立情報学研究所ら、光 1 波長あたり 1.2Tbps の高速大容量光伝送を実証”、PCWatch、2023年10月31日
- [11] “NII、NTT、富士通らが光 1 波長あたり 1.2Tbps での正解最長 336km 伝送と世界最大容量 1Tbps

超のデータ転送のフィールド実証に成功”、DIME、2023 年 11 月 11 日

研究開発による成果数

	令和4年度	令和5年度	令和6年度
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	0件（0件）	2件（2件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	2件（2件）	7件（7件）	2件（2件）
その他の誌上発表数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
口頭発表数	2件（0件）	5件（0件）	6件（0件）
特許出願数	7件（2件）	9件（3件）	10件（3件）
特許取得数	0件（0件）	0件（0件）	1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	2件（1件）	2件（1件）	0件（0件）
報道掲載数	5件（0件）	6件（0件）	0件（0件）

	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件（1件）	3件（3件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	2件（2件）	13件（13件）
その他の誌上発表数	0件（0件）	0件（0件）
口頭発表数	3件（0件）	16件（0件）
特許出願数	19件（7件）	45件（15件）
特許取得数	2件（2件）	3件（2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	0件（0件）	1件（0件）
報道発表数	0件（0件）	4件（2件）
報道掲載数	0件（0件）	11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。