

平成 30 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 技術政策課 研究推進室

評価年月：平成 30 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発

2 研究開発の概要等

(1) 研究開発の概要

・実施期間

平成 27 年度～平成 29 年度（3 か年）

・実施主体

日本電信電話株式会社

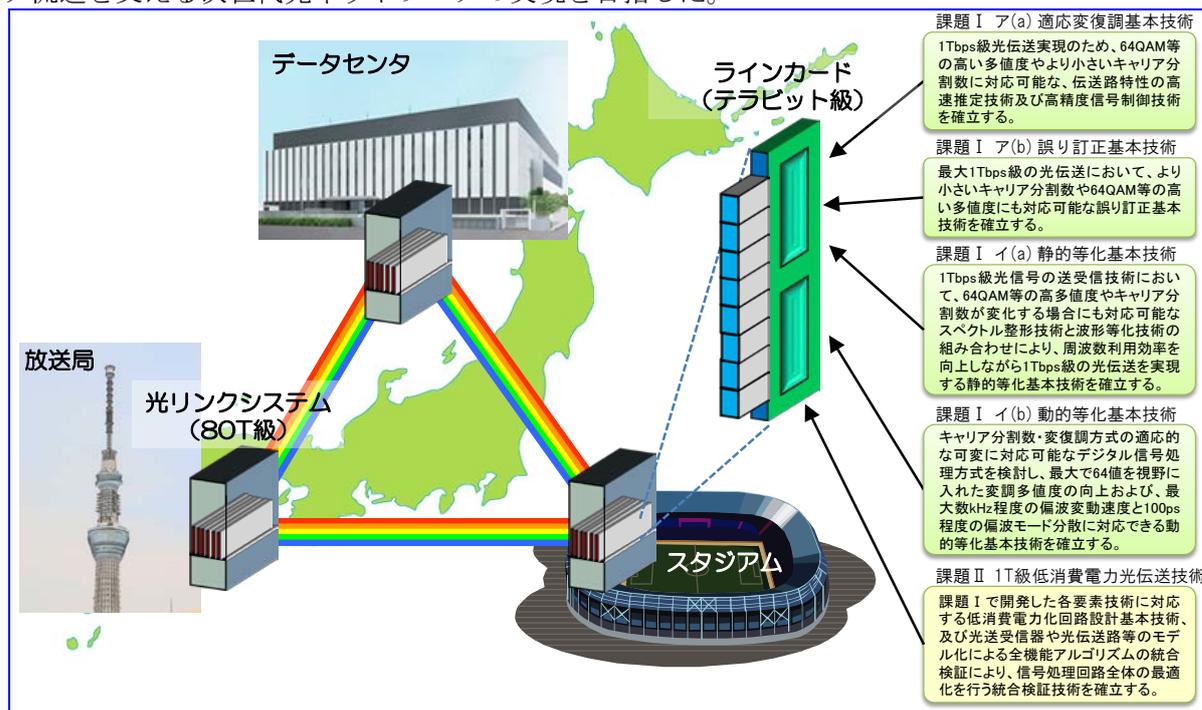
・総事業費

1,634 百万円

平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	総 額
598 百万円	537 百万円	499 百万円	1,634 百万円

・概 要

超高精細映像やビッグデータ等の流通、移動通信トラフィックの急激な増加や、機器同士、端末同士など人間が介在しない通信トラフィックの増加の本格化が想定されることなどから、我が国の通信トラフィック量は増加を続け、今後も基幹ネットワークを支える光ネットワークに要求される伝送容量はますます大きくなることが予想される。本研究開発は、基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式(*)において、より高度な光伝送技術や低電力デジタル信号処理技術を導入し、1 Tbps 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を確立し、これら技術を適用した送受信信号処理回路全体構成の最適化を行って、消費電力を従来比 1/4 に削減する技術を確立し、巨大データ流通を支える次世代光ネットワークの実現を目指した。



技術の種類	技術の概要
課題 I 1 テラビット級高速大容量光 伝送技術 (ア) 適応変調符号化技術 (a) 適応変復調基本技術	基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、伝送距離・伝送路の特性に応じて、常に伝送効率が最大となるようにキャリア分割数、変復調方式、信号処理方式等を適応的に変化させる技術の研究開発を行う。伝送距離・伝送路特性に応じて伝送効率が最大となるように、適応的に変復調方式を変化させるために必要な伝送路品質を高速に推定し、推定品質に従って適切な変復調方式を選択する技術、およびより小さいキャリア分割数に対応して高精度に信号点配置補正を実現する高精度信号制御技術の検討を行う。
課題 I 1 テラビット級高速大容量光 伝送技術 (ア) 適応変調符号化技術 (b) 誤り訂正基本技術	伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な誤り訂正処理を適応的に行う技術の研究開発を実施する。キャリア分割数や適用する変調方式等との親和性を考慮した誤り訂正処理方式の基本技術の検討を行う。
課題 I 1 テラビット級高速大容量光 伝送技術 (イ) 伝送システム内歪み補償技術 (a) 静的等化基本技術	光伝送システム内で生じた線形歪みの補正を最も少ない演算リソースで実現するための信号処理方式技術の研究開発を行う。並列な複数の処理を搭載しても高速・長距離伝送に必要な歪み補正ができるのに必要な線形等化処理方式の基本技術の検討を行う。
課題 I 1 テラビット級高速大容量光 伝送技術 (イ) 伝送システム内歪み補償技術 (b) 動的等化基本技術	光伝送システム内で生じる偏波変動、偏波モード分散、搬送波位相変動などの動的に生じる波形歪みについて、より多値度の高い変復調方式にも対応できる高精度な動的等化技術を確立するとともに、キャリア分割数や変復調方式の適応的な可変にも対応した信号処理回路を最も少ない演算規模で実現するための信号処理方式の検討を行う。
課題 II 1 テラビット級低消費電力光 伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (a) 適応変復調回路基本技術	基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、1 波長あたり最大 1 Tbps 級の伝送速度を実現する適応変復調回路基本技術の研究開発を行う。最先端の CMOS (*2) 技術の適用を前提として、規模・電力を削減するための信号処理方式の最適化手法の検討を行う。
課題 II 1 テラビット級低消費電力光 伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (b) 誤り訂正回路基本技術	基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、1 波長あたり最大 1 Tbps 級の伝送速度を実現する誤り訂正回路基本技術の研究開発を行う。最先端の CMOS 技術の適用を前提として、回路規模と消費電力とを最適化するための符号化回路・復号回路アーキテクチャ及び信号処理方式の検討を行う。
課題 II 1 テラビット級低消費電力光 伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (c) 静的等化回路基本技術	1 波長あたり最大 1 Tbps 級の伝送速度を実現する伝送システムにおいて、光伝送システム内で生じる歪みを補正するための線形等化回路基本技術の研究開発を行う。最先端の CMOS 技術の適用を前提として、増大する演算処理量を効率的な処理により抑えるデジタル信号処理回路技術の最適化手法の検討を行う。
課題 II 1 テラビット級低消費電力光 伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (d) 動的等化回路基本技術	光伝送システム内で生じる偏波変動、偏波モード分散、搬送波位相変動などの影響を補正するための動的な等化回路基本技術の研究開発を行う。1 波長あたり最大 1 Tbps の通信処理による電子回路規模と電力の増大に対処するため、最先端の CMOS 技術の適用を前提として信号処理回路技術の最適化手法の検討を行う。

課題 II 1 テラビット級低消費電力光 伝送技術 (イ) 低消費電力信号処理統合検証 技術	ア-a) ~d) で開発した各要素技術を統合するとともに光送受信器や光伝送路等のモデル化を行い、全機能アルゴリズムの統合検証を行うことで、信号処理回路全体の最適化を行う統合検証技術を確立する。
---	--

・スケジュール

技術の種類	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
課題 I 1 テラビット級高速大容量光伝送技術 (ア) 適応変調符号化技術 (a) 適応変復調基本技術			→
課題 I 1 テラビット級高速大容量光伝送技術 (ア) 適応変調符号化技術 (b) 誤り訂正基本技術			→
課題 I 1 テラビット級高速大容量光伝送技術 (イ) 伝送システム内歪み補償技術 (a) 静的等化基本技術			→
課題 I 1 テラビット級高速大容量光伝送技術 (イ) 伝送システム内歪み補償技術 (b) 動的等化基本技術			→
課題 II 1 テラビット級低消費電力光伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (a) 適応変復調回路基本技術			→
課題 II 1 テラビット級低消費電力光伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (b) 誤り訂正回路基本技術			→
課題 II 1 テラビット級低消費電力光伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (c) 静的等化回路基本技術			→
課題 II 1 テラビット級低消費電力光伝送技術 (ア) 信号処理回路最適設計技術 (d) 動的等化回路基本技術			→
課題 II 1 テラビット級低消費電力光伝送技術 (イ) 低消費電力信号処理統合検証技術			→

(2) 達成目標

本研究開発は、基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、より高度な光伝送技術や低電力デジタル信号処理技術を導入し、1 Tbps 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を確立し、これら技術を適用した送受信信号処理回路全体構成の最適化を行って、消費電力を従来比 1/4 に削減する技術を確立し、巨大データ流通を支える次世代光ネットワークの実現を目指す。

○関連する主要な政策

V. 情報通信 (ICT 政策) 政策 9 「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

○政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

名称 (年月日)	記載内容 (抜粋)
科学技術イノベーション総合戦略 2014 (平成 26 年 6 月 24 日改定 閣議決定)	政策課題解決における産業競争力強化策を実現するためのコア技術として、安心な情報管理や確実な認証を実現する「情報セキュリティ技術」、デバイス・装置・通信方法の革新や適切な伝送路の自動選択等により、高効率かつ低消費電力な大容量通信や、災害に強い柔軟性

	<p>を実現する「高度ネットワーク技術」、基礎科学やゲノム解析等に必要 な HPC の活用や、複雑な現象等を解明するためのデータ分析技術を含 む「ビッグデータ解析技術」、人の潜在的な認知情報から深層心理を読 み取り表層的な意識へフィードバックする「脳情報処理技術」を位置 づけ、検証環境の構築、技術開発段階からの国際標準化及び国際展開、 個人情報保護をはじめとした社会受容性向上や普及促進のための規 制・制度整備、多様なデータから価値を見だし、現実社会での意志 決定に活かす人材育成等も含め推進する（48 ページ）。</p>
<p>科学技術イノベーション総合戦略2016(平成28年5月24日 閣議決定)</p>	<p>様々な機器からの爆発的なデータ量をリアルタイムかつ的確に把握し高度な分析・判断を行うネットワークを構築することが必要である。リアルタイムの観点では、分析・判断を一部センサ技術やエッジコンピューティング技術に分担させるための研究開発も必要である。また、先端的なフォトニクス等を活用した大容量・高速通信技術も重要である（17 ページ）。</p>
<p>世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 26 年 6 月 24 日改定閣議決定）</p>	<p>世界最高水準の IT 社会を実現し、維持・発展させるために、情報通信社会の今後の動向を見据えた研究開発を推進するとともに、独創的な人材の活用も図りつつ、イノベーションにつながる様々な先端技術、例えば、世界先端の各分野の科学技術が世界最先端の研究コミュニティと連携するための、先端的な国際ネットワーク拠点の構築や超高速ネットワーク伝送技術、認識技術、データの加工・分析技術、ソフトウェアの開発技術、非破壊計測技術、デバイス技術、センサー技術やロボット技術等、また、言葉の壁をなくす多言語音声翻訳システムの高度化に向けた研究成果を、迅速かつ的確に IT 戦略と連携させることも必要である。このため、総合科学技術・イノベーション会議等とも連携を図りつつ、研究開発及び社会実装を推進するとともに、その成果が国際標準となり、世界でも幅広く受け入れられるよう取組を推進する（27 ページ）。</p>
<p>世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 28 年 5 月 20 日 閣議決定）</p>	<p>利用環境面では、ネットワークインフラ面の技術進歩とあいまって、事業者等を中心に組織内でのデータの利活用やデータ連携が進展するとともに（一部の業界内ではデータの標準化も行われている。）、クラウドサービスの登場に伴い、データの流通量は国内外を問わず増大している。また、個人レベルでも、平成 20 年頃から PC 並みの処理能力とメモリーを備えたスマートフォンが登場し、それに伴い、単なる電子メールや検索サイトでの検索、ブログといった利用から、SNS（Social Networking Service）や動画投稿サイト等を通じた個人の情報発信能力（画像や映像等を含む。）の向上とともに、最近のウェアラブル端末の普及により、個人レベルに関するデータ流通量も飛躍的に増大している（4 ページ）。</p>
<p>世界最先端 IT 国家創造宣言 工程表(平成28年5月20日 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部改定)</p>	<p>データ流通基盤を支えるネットワーク技術の研究開発等を推進する（27 ページ）。</p>
<p>日本再興戦略－JAPANESE BACK－（平成 25 年 6 月 閣議決定）</p>	<p>圧倒的に速く、限りなく安く、多様なサービスを提供可能でオープンな通信インフラを有線・無線の両面で我が国に整備することで、そのインフラを利用するあらゆる産業の競争力強化を図る（44 ページ）。</p>
<p>日本再興戦略 改訂2016－第 4 次産業革命に向けて－(平成28年6月2日 閣議決</p>	<p>IoT 時代のデータ流通を支える情報通信インフラの 2020 年までの整備に向けて、ネットワークの高度化等のために、ソフトウェア・仮想化技術等の活用によって膨大な IoT 機器等を迅速・効率的にネットワークに接続するための最適制御技術の実用化に向けた開発・実証実</p>

定)	験を来年度実施するとともに、これらの技術等を活用したネットワークの運用・管理に求められるスキルの明確化やその認定のあり方について検討を行う（66 ページ）。
----	--

(3) 目標の達成状況

光ネットワークの高速大容量化・低消費電力化を両立する革新的技術を確立し、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した本研究開発では、1.2Tbps の伝送容量を有し、消費電力を 100Gbps 動作で従来の 1/4 以下に削減可能な高速大容量・低消費電力光伝送技術の確立に成功しており、本研究開発は基本計画書における目標を大きく上回る成果をあげた。

技術の種類	技術の概要
課題 I 1 テラビット級 高速大容量光伝 送技術 (ア) 適応変調符号化 技術 (a) 適応変復調基本 技術	<p>本技術課題では最初に要素技術の基本機能を評価し、これに基づいた外部の伝送特性補償機能との連携動作を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、1 Tbps 級伝送における伝送路推定方式及び信号点制御方式を確立した。</p> <p>具体的には、伝送路推定方式に関しては、基本機能検討結果に基づき自己相関方式を最良方式として選択し、偏波状態、波長分散、偏波モード分散など様々な負荷条件において、同期感度、同期位置検出誤差、周波数オフセット誤差、波長分散推定精度などの基本性能を評価し、また、動作モード依存性も評価した。その結果、全ての負荷条件において動作モード全体に渡って正常な機能動作を確認した。信号点制御方式に関しては、平成 27 年度及び平成 28 年度に制御精度、回路規模、消費電力の観点から選定した方式について、伝送路推定方式の評価と同様に実用システムを模擬した様々な負荷条件における性能評価を行った。変調器消光比、IQ（強度、位相）振幅ずれ、IQ スキューずれ等の様々な負荷条件下で、外部の伝送特性補償機能との連携動作を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、1 Tbps 級伝送における信号点制御方式を確立し、到達目標を達成した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> </div> <p style="text-align: center;">図 1 信号点制御による送信器歪み補償効果評価結果</p>
課題 I 1 テラビット級 高速大容量光伝 送技術 (ア) 適応変調符号化 技術 (b) 誤り訂正基本技 術	<p>最大 1 Tbps 級を実現するために必要な様々なキャリア分割数や変調方式に対して、適応的に対応可能な符号化・復号処理アルゴリズム及び尤度生成アルゴリズムを開発、他の機能との連携を考慮した検証によりアルゴリズムの妥当性を実証し、誤り訂正基本技術を確立した。</p> <p>平成 27 年度に誤り訂正フレーム構成方法及び尤度生成方法の検討を行い、符号化・復号処理アルゴリズム及び尤度生成アルゴリズムの方式仕様を策定、平成 28 年度にそれに基づきハードウェア実装も視野に入れて方式を選定し、基本機能試作を行い、機能動作を確認した。</p> <p>平成 29 年度には、基本機能試作に基づき、フレーム構成や演算ビット精度、歪補償後の信号波形など、課題 I - (ア) - (a) 適応変復調基本技術及び課題 I - (イ) 伝送システム内歪み補償技術における各機能との連携を考慮した入力信号に対して、本課題の符号化・復号処理及び尤度生成の性能検証を行うことでアルゴリズムの妥当性を実証した。DP-QPSK (*3) (100Gbps/サブキャリア) から DP-64QAM (*4) (600Gbps/サブキャリア) まで総計 19 個、いずれのキャリア分割数と変調方式の組み合わせにおいても、所望の誤り訂正後 BER (ビット誤り率) の特性が得られた。以上より従来の 100Gbps 級光伝送技術に対し、送受信機あたり 10 倍の伝送容量を実現することを目的として、最大 1 Tbps 級光伝送を実現するために必要なキャリア数や適用する変調方式、信号品質等に対して、伝送効率を最大にできる誤り訂正基本技術を確立し、到達目標を達成した。</p>

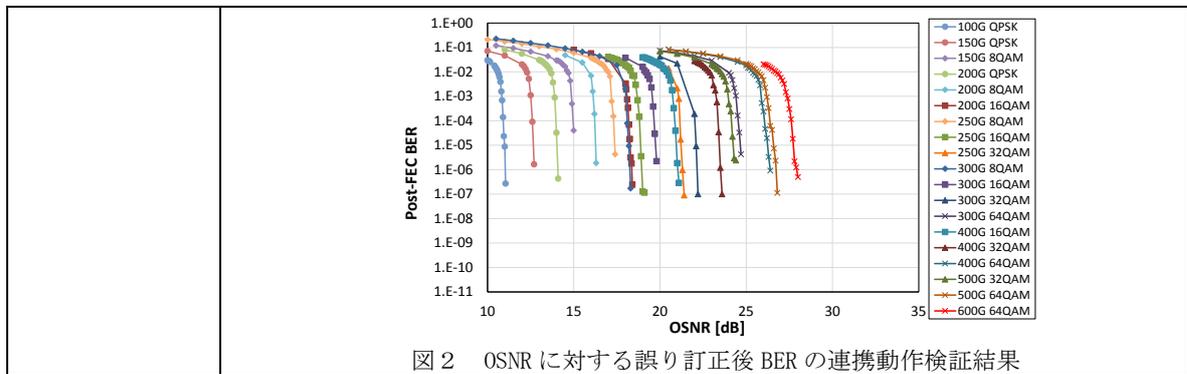


図2 OSNR に対する誤り訂正後 BER の連携動作検証結果

課題 I

1 テラビット級
高速大容量光伝
送技術

(イ)

伝送システム内
歪み補償技術

(a)

静的等化基本技
術

最大 1 Tbps となるキャリア成分の復調において、静的な線形歪みの補正を可能とするアルゴリズムの基本技術の検討を行い、64QAM 等の高多値度の変調方式やキャリア分割数が増える場合にも対応可能とした上で、従来技術（100Gbps 級光伝送技術）に比べて、同一多値度の変調方式に対して、周波数利用効率を 30%以上向上するサブキャリア多重・分離技術について、他の機能と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、静的等化基本技術を確立した。具体的には、シンボル間の符号間干渉を許容した上でナイキスト方式よりも更に信号帯域幅を狭窄化する狭帯域フィルタリングと MMSE (minimum mean square error) 規範に基づく高精度な線形等化の組み合わせにより、周波数利用効率を向上可能なスーパーナイキスト方式 (*5) について提案を行い、64Gbaud の高速信号、及び、64QAM 等の高多値度の変調方式において、商用周波数グリッドを考慮した際の機能モデル検証を実施した。検討した全変調方式において、NRZ (Non Return to Zero : 非ゼロ復帰) 波形を用いる従来方式に比べ、30%以上の周波数利用効率改善を確認した。さらに、提案方式の効果を検証するため、従来技術で実用化されている 32Gbaud の信号に対して、その 1.5 倍となる 48Gbaud の信号を用いて、光伝送オフライン実験評価系を構築し、回路実装レベルで記載した統合モデルを用いて信号生成及び受信信号の復調を行い、オフライン処理による実機特性評価を実施した。6.25GHz グリッドの波長多重システムを想定し、実際のシステムで必要になるサブキャリア多重間隔の周波数シフトバラつき 1 GHz を加味した評価を実施したところ、スーパーナイキスト方式では NRZ 方式に比べて最大 37.5%の改善効果が得られる事を実験的に確認した。以上の結果により、周波数利用効率を 30%以上向上するサブキャリア多重・分離技術について、他の機能と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、静的等化基本技術を確立し、到達目標を達成した。

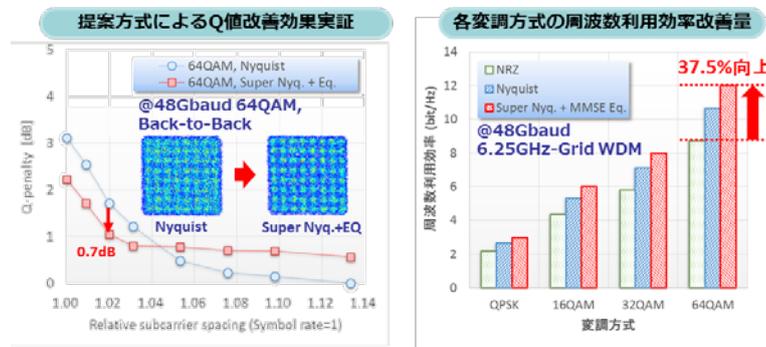


図3 静的基本等化技術によるオフライン実証結果

課題 I

1 テラビット級
高速大容量光伝
送技術

(イ)

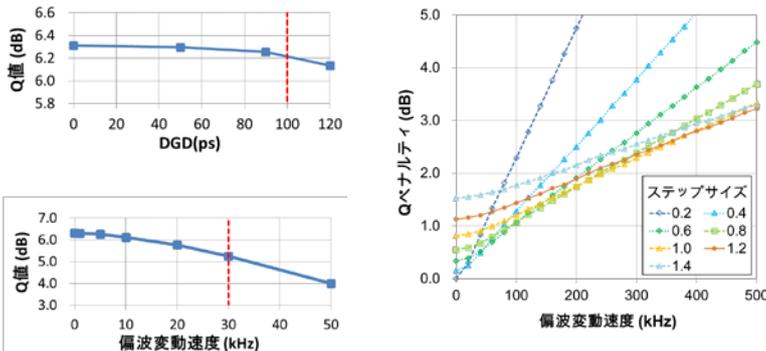
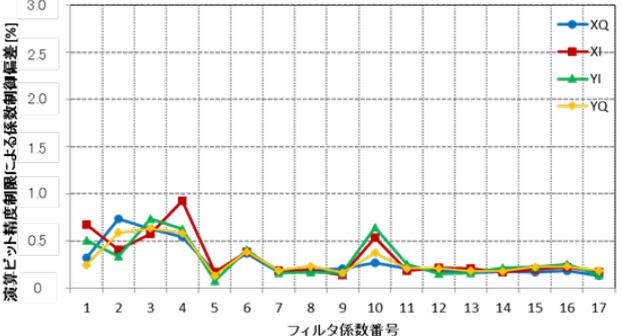
伝送システム内
歪み補償技術

(b)

動的等化基本技
術

最大 1 Tbps を実現し、最大 64QAM 等の高い多値度の変調方式まで、同一の信号処理回路で対応可能な方式を提案し、方式検討及び性能評価を行うための機能モデルの作成を完了した。この機能モデルを用いて、偏波変動、偏波モード分散を付加した評価条件において、複数の変調方式で動作確認を行い、偏波変動速度 30kHz 以上、100ps 程度の偏波モード分散に対応できる性能が得られることを確認し、動的等化基本技術を確立した。

具体的には、位相変調信号支援型の処理方式を提案・採用し、処理構成と制御パラメータの最適化を実施することで、64QAM の信号に対して 100ps 程度の偏波モード分散耐力 (図4)、100ps の偏波モード分散が存在する条件下において 30kHz 程度の偏波変動追従性が得られることを確認した (図5)。さらに、近年要求が高まっている数 100kHz 以上の非常に高速な偏波変動を想定して、高速な偏波変動に対する追従限界性能も評価し、偏波変動の追従・補償を行う適応等化の制御パラメータであるステップサイズを最

	<p>適化することで、高精度な偏波追従処理が必要な 64QAM の信号に対しても、数 100kHz の偏波変動に追従可能であることを確認し (図 6)、到達目標を達成した。</p>  <p>図 4 (左上) 400Gbps 64QAM 偏波モード分散耐力 図 5 (左下) 400Gbps 64QAM 偏波変動耐力 図 6 (右) 600Gbps 64QAM 偏波変動追従性</p>
<p>課題 II 1 テラビット級 低消費電力光伝 送技術 (ア) 信号処理回路最 適設計技術 (a) 適応変復調回路 基本技術</p>	<p>1 Tbps 級の適応変復調伝送を実現する伝送路推定方式及び信号点制御方式の検討において、ハードウェア記述言語及び性能評価モデルによる評価結果について等価性を評価し、消費電力・回路規模、そして推定・検出精度について最適化を実施し、適応変復調回路基本技術を確立した。</p> <p>具体的には、伝送路推定方式に関して、伝送路推定機能の性能評価モデルとハードウェア記述言語モデルの等価性を評価した。実用システムの運用時に非常に近い信号波形が入力される評価系において、クライアント容量 100Gbps~600Gbps、変調方式として QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM までの 5 変調方式を組合せた動作モードに対して評価を行い、全動作モード、及び全負荷条件において、特性差分がクライテリア (基準) に適合する結果を得られた。また、信号点制御方式に関して、ハードウェア記述言語モデルを作成し、性能評価モデルとの等価性を確認した。ハードウェア化の演算ビット精度制限による信号品質劣化、及び係数制御誤差が性能クライテリアを満たすことを確認した。最後に、伝送路推定方式及び信号点制御方式に関して、最先端 CMOS テクノロジライブラリを用いてハードウェア記述言語をハードウェアに合成して、CMOS 回路実装性を評価し、そのタイミング収束性、回路規模、消費電力を評価し、実回路へ実装可能であること、及び回路規模・消費電力が目標を満たしていることを確認した。これらを通じて、適応変復調回路基本技術の信号処理回路最適設計技術を確立し、到達目標を達成した。</p>  <p>図 7 ハードウェア演算ビット精度制限によるフィルタ係数制御誤差評価結果</p>
<p>課題 II 1 テラビット級 低消費電力光伝 送技術 (ア) 信号処理回路最 適設計技術 (b) 誤り訂正回路基 本技術</p>	<p>伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な処理を行う誤り訂正符号化機能及び軟判定誤り訂正復号機能について、設計した基本回路に基づき、最先端 CMOS 技術を適用した場合の回路規模と消費電力を合成ツール及びシミュレーションにより算定した。さらに符号化利得と消費電力とを最適化する電力スケールングの効果を確認し、誤り訂正回路基本技術を確立した。</p> <p>最大 1 Tbps 級を実現するためのキャリア分割数や多値度に対して最適な処理を行うための符号化回路・復号回路アーキテクチャとして、マルチコア誤り訂正演算制御方式を適用し伝送速度、キャリア分割数や多値度に応じて、誤り訂正符号の演算処理を複数の誤り訂正演算コアへ振り分けるとともに、演算回数を適応的に調整して処理することにより、誤り訂正機能として最適な処理を実現した。</p>

本研究成果による誤り訂正基本回路の 100Gbps 当たりの消費電力は、従来に比べて 75.6%低減されており、従来の 100Gbps 級光伝送技術における誤り訂正回路に対し同一通信処理速度と比較して 1/4 以下の消費電力を実現した。

また、符号化利得と消費電力とを最適化する電力スケーリングの効果を確認するため、入力 SNR (信号対雑音比) に対する軟判定 FEC (前方誤り訂正) デコーダの動作率を算出し、デコーダの繰り返し回数の制御により消費電力の抑制が実現可能であることを示した。

これらにより伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な処理を行う誤り訂正符号化機能及び軟判定誤り訂正復号機能の最適回路設計に向けた基本技術を確立し、到達目標を達成した。

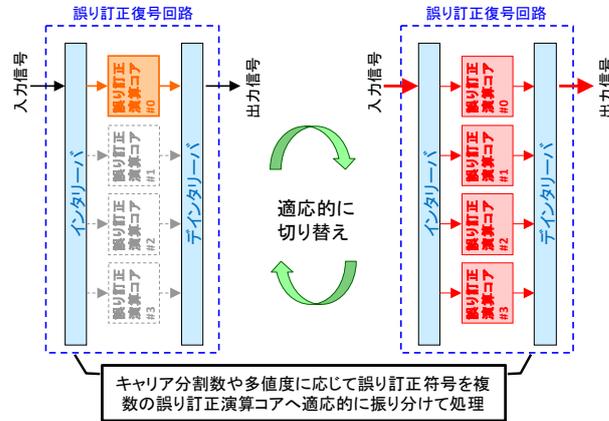


図8 マルチコア誤り訂正演算制御方式

課題 II
1 テラビット級
低消費電力光伝
送技術
(ア)
信号処理回路最
適設計技術
(c)
静的等化回路基
本技術

1 Tbps 級の通信処理速度を実現するための歪み補償処理に向けた静的等化回路について、適応的パラメータ制御 FDE (frequency domain equalization) 方式による線形適応等化回路に対して、演算精度、回路規模、消費電力の観点から回路最適化を実施した。具体的には、設計効率化方式による回路記述の自動生成環境を適用して生成した複数の回路バリエーションの回路記述から、適応的パラメータ制御 FDE 回路の回路記述を生成した。次に、検証容易化設計方式による期待値モデルの自動生成環境を適用して生成した複数の回路バリエーションの回路記述に対応する期待値モデルから、適応的パラメータ制御 FDE 回路の期待値モデルを生成した。これら回路記述と期待値モデルを用いて、回路規模や消費電力の観点で評価し、回路最適化を実施した。この際、回路最適化の方式として、データビット幅やパイプライン数、パイプライン位置の最適化などに加えて、データ符号化形式や線形歪補償フィルタ回路による IQ レーン個別補償機能及び周波数オフセット補償機能の動作制御の最適化による低電力化を図った。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評価した結果、これらの最適化により、最大 27.2% の電力削減が可能であることを確認した。さらに、回路記述の妥当性を確実なものとするため、レイアウト工程まで考慮したゲートレベル回路記述を部分試作した。この部分試作により、最先端の微細 CMOS プロセスの適用により、適応的パラメータ制御 FDE 回路が実用的な回路面積、及び消費電力で実現可能であることを確認した。以上の回路最適化の実施、及び評価により、静的等化回路基本技術を確立し、到達目標を達成した。

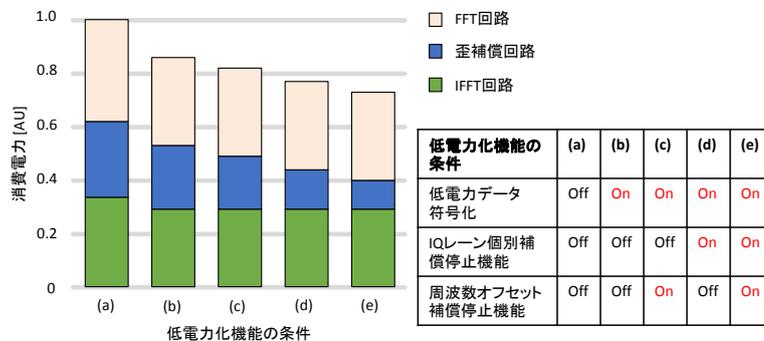
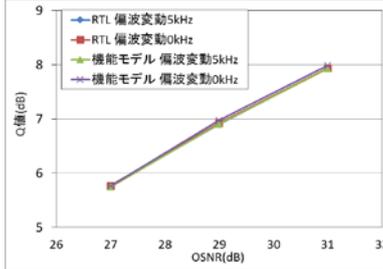
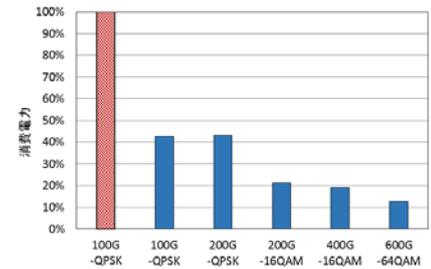
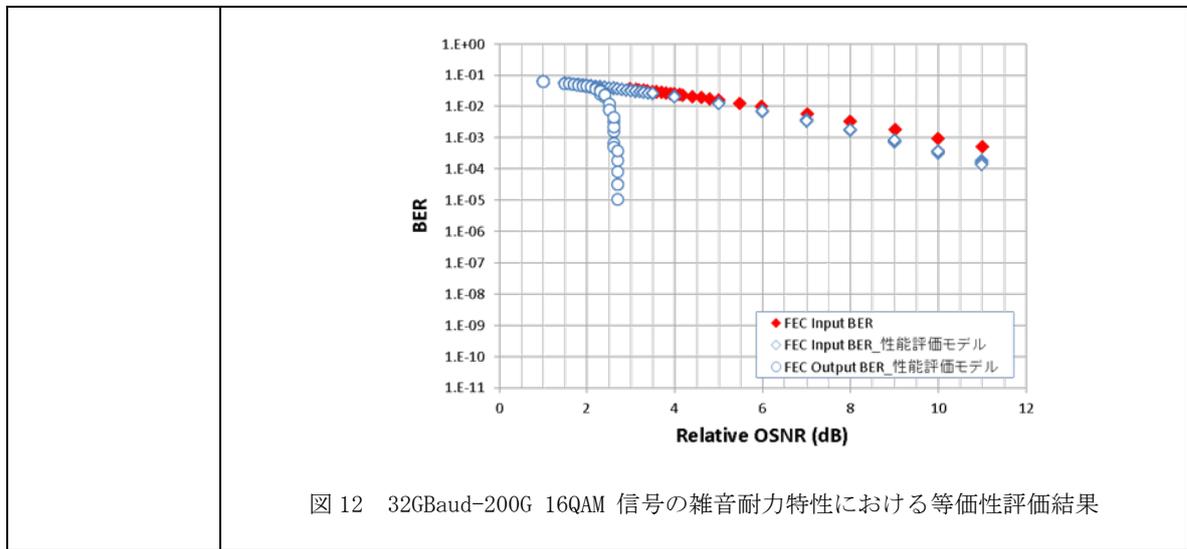


図9 適応的パラメータ制御による低電力化機能の評価結果

<p>課題 II 1 テラビット級 低消費電力光伝 送技術 (ア) 信号処理回路最 適設計技術 (d) 動的等化回路基 本技術</p>	<p>最大 1 Tbps を実現し、最大 64QAM 等の高い多値度に適応的に対応するために、複数の変調方式を実現可能な論理構造設計を行い、RTL (レジスタ転送レベル) を作成した。次に、機能モデルと RTL の等価性検証及び消費電力見積もりを実施し、動的等化回路の基本技術を確立した。</p> <p>具体的には、適用を想定する 16nm プロセス CMOS の伝播遅延特性及び電力特性から、500MHz~600MHz 動作が最適と判断して基本的な回路構成を決定し、複数の変調方式に対応した共通回路化を検討して論理構造の設計を行った。この設計結果を用いて System C による高位言語コーディングを行い、高位合成ツールを使用して RTL を作成した。次に、機能モデルと RTL の等価性検証を実施した。偏波変動追従、偏波モード分散補償、搬送波位相再生の諸性能について、伝送容量 100Gbps から 600Gbps、変調方式 QPSK から 64QAM までの組み合わせで機能モデルと RTL の等価性検証を実施し、雑音波形の統計揺らぎの範囲内ではほぼ完全に一致することを確認した。図 10 に、OSNR に対する受信 Q 値特性の偏波変動依存性の等価性検証結果を示す。さらに消費電力見積もりを実施し、適用する CMOS テクノロジーへの配置配線処理後の回路を元に消費電力値を算出した。100Gbps 当たりの消費電力は、600Gbps 64QAM 伝送において従来比 13%と大幅な削減を達成し (図 11)、到達目標を達成した。</p>   <p>図 10 機能モデルと RTL の一致結果 (600Gbps 64QAM) 図 11 従来回路との消費電力比較 (100Gbps 当たりの消費電力値)</p>
<p>課題 II 1 テラビット級 低消費電力光伝 送技術 (イ) 低消費電力信号 処理統合検証技 術</p>	<p>機能ブロック毎に作成した RTL レベルの回路モデルを統合し、統合検証プラットフォーム (検証エミュレーション環境) を開発した。この統合検証プラットフォームを用いた RTL レベルの統合検証により、基本回路動作及び消費電力評価を行い、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 1/4 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。</p> <p>具体的には、機能ブロック毎に作成した RTL レベルの回路モデルを統合した統合検証プラットフォームを開発し、光増幅器による雑音に対する耐力 (OSNR 耐力) 特性並びに FEC 耐力特性について 200G QPSK、300G 8QAM、400G 16QAM、500G 32QAM、600G 64QAM 信号モードに対して性能評価モデル統合検証プラットフォームとの等価性を評価し、両者がほぼ同等の特性となることを確認し、本回路設計手法の妥当性が確認できた。また、性能劣化を抑えつつ規模削減可能な内部ブロックへの構成変更、条件によって利用しない機能の制限等様々な電力削減施策を行い、機能及び回路の改良を行うことにより電力の削減を実施した。その結果、100Gbps 当たりの見積り消費電力は従来の 100G 伝送方式に比較して 1/4 以下を実現したことにより、低消費電力信号処理統合検証技術を確立した。さらに、一部機能を実装したプリプロトタイプの開発により、実機での機能動作検証を実施し、技術検証レベルを向上させた。高ボーレート動作の確認として、600G 64QAM 信号の信号疎通を確認し、適応等化・搬送波位相再生ブロックのロジック回路が正常動作していることを確認した。加えて、32Gbaud-100G QPSK 信号、65Gbaud-200G QPSK 信号、32Gbaud-200G 16QAM 信号並びに 65Gbaud-400G 16QAM 信号に対して信号疎通を確認し、ボーレート、変調方式に依らず動作することを確認した。また、32Gbaud-100G QPSK 信号、65Gbaud-200G QPSK 信号並びに 32Gbaud-200G 16QAM 信号においても、雑音環境下における性能評価モデルとの等価性を評価した。その結果、性能評価モデル統合検証プラットフォームで得られた結果と非常によく一致し、雑音付加時にもボーレート、変調方式に依らず、良好な動作が確認し、到達目標を達成した。</p>



3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、基本計画書に記載された目標指数の達成状況とともに、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（平成 30 年 6 月）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を確実に確立しており、また、ITU-T における寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	3 件 (2 件)	5 件 (5 件)	9 件 (8 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	2 件 (0 件)
口頭発表数	6 件 (1 件)	18 件 (2 件)	5 件 (1 件)	29 件 (4 件)
特許出願数	8 件 (3 件)	17 件 (8 件)	7 件 (3 件)	32 件 (14 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
国際標準提案数	2 件 (2 件)	3 件 (3 件)	3 件 (3 件)	8 件 (8 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	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)	0 件 (0 件)
報道発表数	4 件 (2 件)	2 件 (1 件)	4 件 (2 件)	10 件 (5 件)
報道掲載数	2 件 (0 件)	4 件 (1 件)	4 件 (0 件)	10 件 (1 件)

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>本研究開発では、「超高精細映像やビッグデータ等の流通によって急速に増大する通信トラフィック及び消費電力に対応するため、光ネットワークの高速大容量化・低消費電力化を両立する革新的技術を確立し、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（基本計画書抜粋）」を目的として、100Gbps 級光伝送技術に対し送受信機（実装サイズ）当たりの伝送容量を10倍にし、消費電力（同一通信処理速度で比較）を1/4にする高速大容量・低消費電力光伝送技術を確立することを目標として設定した。</p> <p>政策的位置付けとしては、「科学技術イノベーション総合戦略2014～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～」（平成26年6月24日改定 閣議決定）、及び「世界最先端IT国家創造宣言」及びその「工程表」（平成26年6月24日改定閣議決定）に情報機器等の消費電力を大幅に低減する光デバイス等の研究開発及びシステム化の推進によるエネルギー消費量の大幅削減や高効率かつ低消費電力な大容量通信の実現が掲げられている。</p> <p>本研究開発では上記目標を達成するため、以下の技術課題に取り組み、当初目標を達成できた。</p> <ol style="list-style-type: none"> （1） 適応変調符号化技術 （2） 伝送システム内歪み補償技術 （3） 信号処理回路最適設計技術 （4） 低消費電力信号処理統合検証技術 <p>以上により、本研究開発の目標設定は日本の政策的位置付け並びに基本計画書の目的に沿った適切なものであったとともに、現在、欧米企業においても1T級の光伝送方式が実用化に向けた研究開発段階に差し掛かっており、本研究開発の目標は日本の産業競争力を維持・発展させる上で極めてタイムリーかつ必要であったと考えられる。</p>
効率性	<p>複数社の保有する得意な技術を持ち寄り、オープンイノベーションによる研究開発体制をとることにより、国際競争に勝てる最先端技術を集積して、1社単独開発では難しい効率的かつ迅速な研究開発を可能とした。特に、技術アイデアは各社の境界をなくして自由な提案として枠組みを超えて最も優れた技術を採用する一方、設計・検証はきちんと分担を決めることにより、国際競争力の高いものを確実に進めていける体制を構築した。具体的には、少なくとも毎月、各社の代表研究者・実務担当者が集まってプロジェクト推進会議等を開催し、各社の進捗状況や課題を共有・調整して迅速に判断する体制の下で研究開発を推進した。また、年に2回程度、外部の6名の有識者と研究受託者から構成されるアドバイザー委員会を開催し、研究進捗や進め方に対して適切な助言・提言を頂くことにより、研究開発の効率的な運用を行った。</p> <p>本研究開発期間中に収集した諸外国企業の開発動向に関する競合情報に基づいて、国際競争状況の変化に対応すべく柔軟性のあるマネジメントを行った。研究開発スケジュールについても最適な市場投入タイミングに合わせるようにマネジメントしている。</p> <p>また、委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関する経理書類を提出させ、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。</p> <p>以上により、当初予算計画に対して、当初目標の仕様を大幅に上回る機能・性能を達成して、効率性の高い研究開発成果を創出できたと考えられる。</p>
有効性	<p>本研究開発では、政策目標の達成に向け、想定ユーザへの成果活用に関するヒアリングを含む市場動向調査、学会活動などを含む技術動向調査、国際標準化獲得に向けた戦略立案、有効な知的財産権獲得に関する戦略立案及び具体的事業化を視野に入れ且つ実効的計画立案に取り組んだ。国際標準化活動、成果発表会、報道発表等を通じて、得られた成果を積極的かつタイムリーに発表し、この分野における世界の技術トレンドを先導した。</p> <p>実用化、事業化においては、アウトカム目標の達成に向けた取り組みとして、ビジネスプロデューサの統括に基づき、事業化に向けて実効的な計画に取り組んだ。</p> <p>成果に基づいて製品化されたデジタル信号処理LSIを用いて、以下を製品化した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小型光トランシーバ（三菱電機） ・光伝送装置（DW7000）の小型ラインアップ（NEC） ・光伝送装置（トランスポンダ/マックスポンダ/イーサネットスイッチ） <p>上記1FINITY T300、1FINITY T310を、国内外ユーザが導入済み（富士通）</p> <p>標準化活動では、ITU-T SG15 Q11/15並びにQ6/15会合に継続的に参加しており、Q11では、100G-OTN（OTU4）、B100G-OTNにおけるEnhanced FECに対する要求条件（2016/6/6～6/11中国、深圳並び</p>

	<p>に 2016/9/18～9/30 スイス、ジュネーブ）に関する寄書提案を行い、100G-OTN の新規勧告（G. 709. otu4lr 2017/6/19～6/29 スイス、ジュネーブ）が標準化された。さらに同会議にて B100G-OTN に対する要求条件に関する寄書提案を行い、標準化に向けた議論を推進している。Q6 では、100G 物理リンクに対する OSNR 要求条件（2015/10/12～10/15 イタリア、トリノ並びに 2017/10/16～10/20 中国、杭州）に関する寄書提案を行い、100G 物理リンクの勧告化を推進中である。これらの寄書を参考に議論が進められ、2018/10 に開催される本会合にて、勧告化される予定である。</p> <p>知財権獲得に関しては、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国際競争力を確保する源泉として特許出願を中心として権利化に注力し、国内出願、国際出願ともに当初目標を大幅に上回る特許出願を行った。</p> <p>また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た。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・OFC（2016 アナハイム、2017 ロサンジェルス、2018 サンディエゴ） ・フォトニックネットワークシンポジウム（2016～2017 NICT 小金井） ・信学会総合大会（2016 九州大学、2017 名城大学、） ・信学会ソサイエティ大会（2016 札幌、2017 東京） ・OECC（2016 新潟、2017 シンガポール） ・ECOC（2016 デュッセルドルフ、2017 ヨーテンボリ） <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発では、基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、より高度な光伝送技術や低電力デジタル信号処理技術を導入し、1 Tbps 級の容量を有し、トラヒック量や伝送距離・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を確立し、これら技術を適用した送受信信号処理回路全体構成の最適化を行って、消費電力を従来比 1/4 に削減する技術を確立し、巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術を実現した。したがって本研究開発の成果は、広く国民の利益になるものである。</p> <p>また、支出先の選定に当たっては、実施希望者の公募を広く行い、研究提案について外部専門家から構成される評価会において最も優れた提案を採択する方式により、競争性を担保した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>超高精細映像やビッグデータ等の流通、移動通信トラヒックの急激な増加や、機器同士、端末同士など人間が介在しない通信トラヒックの増加の本格化が想定されることなどから、我が国の通信トラヒック量は増加を続け、今後も基幹ネットワークを支える光ネットワークに要求される伝送容量はますます大きくなることが予想される。現在、100Gbps 級の光伝送技術が普及しつつあり、これに続く 400Gbps 級光伝送技術の開発が進められているが、上述のとおりトラヒックの増加が加速することが予想され、さらなる高速大容量化と低消費電力化を進めた光伝送技術が要求されている。今後ますます伸びるであろうトラヒ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 400Gbps を見据えた基盤技術の開発を始めることが求められる。</p> <p>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、トラヒック量や伝送距離・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。</p> <p>本研究開発では、より高度な光伝送技術や低電力デジタル信号処理技術を導入し、1 Tbps 級の容量を有し、トラヒック量や伝送距離・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した。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。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

1 テラビット級の高速大容量・低消費電力光伝送技術の確立を目標とした本研究開発は、政策的位置付けや基本計画書の目的に沿った適切なものであり、欧米と競合する光ネットワーク技術分野

における我が国の国際競争力を維持・向上させる上で、国家関与が必要とされる研究開発であった。

研究開発の有効性としては、オープンイノベーションによる研究開発体制をさらにブラッシュアップし、緊密な連携を通じて効率的かつ迅速な研究開発を行った。また、諸外国の競合情報に基づいて研究開発のマネジメントを行い、アドバイザリ委員会の提言をもとに効率的な研究開発を行った。これらにより 1 Tbps を超える高速大容量伝送能力と 100Gbps の通信速度に換算して従来技術の 1/4 以下の消費電力に抑える方式を同時に実現する技術を確立し、目標上回る成果を達成できた。

加えて、成果に基づいて開発されたデジタル信号処理 LSI を実装した小型トランシーバや光伝送装置等を製品化し、光伝送装置については国内外のユーザが導入済みであること、また、標準化提案、論文発表、報道発表等、研究開発成果の国際展開や普及活動を積極的かつタイムリーに行い、光ネットワーク分野における世界の技術トレンドを先導してきたことは高く評価でき、国内特許、国外特許ともに当初目標を大幅に上回る特許出願を行ったことを含めて、アウトカム目標の達成に向けた取組みの実施状況は適切である。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

（日本電信電話）

国際標準化について OIF 及び 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。今後も本研究開発成果の国際展開に向けて寄書提案等に取り組んでいく。1 T 級デジタル信号処理 LSI の商用化に向けては、100Gbps 級デジタル信号処理 LSI の顧客との関係を活用してグローバル展開を図っていく。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。

（三菱電機）

これまでに進めた顧客マーケティング活動、標準化動向調査を元に実用化に向けた研究開発、商用化開発を行う。成果の実用化を前提として関連事業部との連携を図り、顧客との情報交換を積極的に実施した。今後、当社光伝送システムに本開発成果を搭載して社会展開を行うことで、1 Tbps 級光伝送技術により情報通信インフラの持続的・発展に寄与する。

（NEC）

1 Tbps 級の光伝送装置や光モジュールを平成 32 年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平成 30 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。

（富士通）

今後は 1 Tbps 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、平成 30 年度より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競合情報の収集、市場要求の動向の調査、標準化動向の調査を行う。これらの活動を元に光伝送装置の事業化の検討を行い、平成 32 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。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（平成 30 年 6 月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ 研究開発目標を上回る成果が、十分に高い費用対効果で得られた。
- ・ 活発な標準化活動や特許出願によって国際競争力の確保に努め、実用化・事業化を常に見据えて研究開発を行った。本研究開発の成果に基づいたデジタル信号処理 LSI を用いて、光トランシーバや光伝送装置を製品化した。
- ・ 海外のシステムベンダにも利用される製品が開発されることを期待する。
- ・ 光ネットワークの高速大容量化・低消費電力化を両立する革新的技術を確立し、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した本研究

開発では、1.2Tbps の伝送容量を有し、消費電力を 100Gbps 動作で従来の 1/4 以下に削減可能な高速大容量・低消費電力光伝送技術の確立に成功しており、本研究開発は基本計画書における目標を大きく上回る非常に有効かつ効率的なものであった。

- ・ 研究開発の目的、目標は高く設定され、オープンイノベーションによる研究開発体制の下、目標を全て達成し、加えて当初目標を上回る伝送容量技術の開発に成功し、国際標準化や製品化も順調に行われており、極めて高い研究成果をあげることができたプロジェクトであった。

7 評価に使用した資料等

- 世界最先端 IT 国家創造宣言 (平成 28 年 5 月 20 日閣議決定)
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/siryoul.pdf>
- 情報通信技術の情報通信技術の研究開発の評価について <一般>
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html

*1 : デジタルコヒーレント方式

デジタルコヒーレント方式とは、光通信にデジタル信号処理を積極的に取り入れ、光ファイバ伝送性能を飛躍的に向上する技術である。光の振幅と位相の変調に加えて 2 つの偏波にわたる伝送を利用した手法であり、従来と比べてはるかに多くの情報を伝送できる。また、コヒーレント光伝送は送信側と受信側の双方でデジタル信号処理を利用するため、ビットレートの向上、柔軟性の向上、光回線システムの簡素化、オプティカル・パフォーマンスの向上をもたらす。

*2 : CMOS

Complementary metal-oxide-semiconductor (相補型金属酸化膜半導体) のこと。トランジスタの形体の一つ。

*3 : DP-QPSK

Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying の略。デジタル信号の位相変調方式のひとつで、P 偏光、S 偏光のそれぞれについて、位相変調された 4 つの光位相 (0° 、 90° 、 180° 、 270°) に 2 ビットのデータを割り当てることのできる方式。

*4 : DP-64QAM

Dual Polarization-64 Quadrature Amplitude Modulation の略。64QAM とは、デジタル信号の変調方式である QAM (直角位相振幅変調) のうち、一度に 64 通りの値 (6 ビットのデータ) を送ることができる方式のことである。これを P 偏光、S 偏光のそれぞれに割り当ててさらに伝送データ量を増やしている。

*5 : スーパーナイキスト方式

従来のナイキスト方式よりも更に信号帯域幅を狭帯域化する狭帯域フィルタリングと MMSE (minimum mean square error : 最小平均二乗誤差) 規範に基づく高精度な線形等化の組み合わせにより、周波数利用効率を向上させた方式。