

超高速・低消費電力ネットワーク技術の研究開発

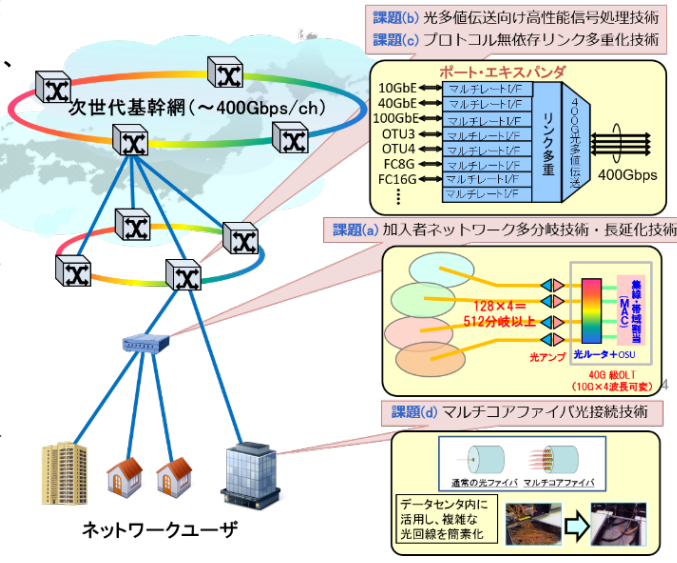
課題1 アクセスネットワーク（加入者・局舎ネットワーク）高速大容量化・低消費電力化技術

担当課室名：国際戦略局 技術政策課 研究推進室
研究開発期間：H24年度～H26年度

実施研究機関：日本電信電話(株)、沖電気工業(株)、(株)日立製作所
研究開発費：H24年9.8億円、H25年7.1億円、H26年2.3億円、計19.2億円

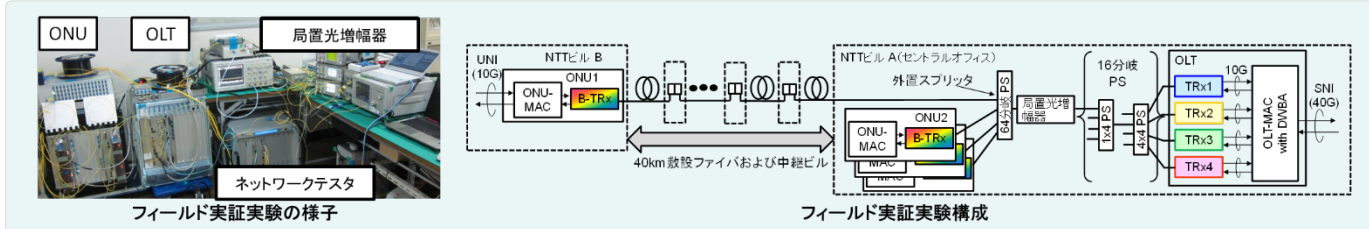
1. 研究開発概要

- ・ **目的**： ICT活用の拡大に伴う通信量及び消費電力の急激な増大に対応するため、伝送方式の高性能化や新型ファイバの導入等により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化、耐災害性の強化を同時に実現する技術を確認し、国民生活の利便向上と地球温暖化対策に貢献する。
- ・ **政策的位置づけ**： 「新成長戦略」(平成22年6月 閣議決定)、「科学技術基本計画」(平成23年8月 閣議決定)、「新たな情報通信技術戦略」(平成22年5月 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部決定)において、情報通信システムの低消費電力化を実現する新技術の開発を促進すること、世界的な成長が期待され、我が国の強みを有する技術分野として新世代・光ネットワーク技術が掲げられた。
- ・ **目標**： 従来の10倍の高速大容量伝送技術であって、ネットワーク全体としての消費電力量を従来よりも3割以上削減可能なものを確認することを目標とした。加入者ネットワークとして、収容局に収容する加入者数の16倍(512ユーザ)以上の拡大、伝送距離の2倍(40km)以上の拡張等を目標とした。



2. 研究開発成果概要

- ・ **課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術**： FTTHブロードバンドサービスを支える光アクセスネットワークの高速大容量・低消費電力化及び多分岐・長延化の実現を目指し、次世代光アクセスシステムとして期待されているWDM/TDM-PONシステムに係る研究開発を実施。40km級及び1024分岐を実現する40Gbps級WDM/TDM-PONのフィールド実証実験に成功し、波長切り替えによるプロテクションや省電力機能といったアクセスネットワーク高度化機能の実証に世界で初めて成功。また、試作システム構成をベースに消費電力を算出し、従来システムで収容した場合と比較して、局内装置の消費電力を最大39%削減できる見込みがあることを示した。これにより、収容可能ユーザ数512以上を有し、総伝送距離40km以上、局内装置の消費電力を30%以上削減(対10Gbps級装置比)可能な40Gbps級超高速・低消費電力光アクセスネットワークシステムを実証し、目標を達成。



- ・ **課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術**： 多値変調で1波長100Gbps伝送(従来の10倍)を実現するため、1波長1偏波100G光多値伝送技術及び送受信デバイスの設計・開発を行った。具体的には、1波長で100Gbps(25Gbaud16値)伝送が可能な小型・低消費電力光インタフェースとして、容積が従来の1/3、消費電力が従来の1/2の半導体IQ変調器/線形ドライバIC及びモジュールを試作し、28Gbaud/16QAM変調を達成。また、石英PLC技術を用いて位相復調部と強度復調部を備えた一体型の受信フロントエンドを試作し(下図・左上)、28Gbaud多値光受信を達成。さらに、半導体光変調器による変調歪をデジタル補償する高精度多値変調技術を開発し(下図・左下)、半導体変調器による64QAM伝送を世界で初めて実証。上記成果を組み合わせると4波長多重400G多値光送受信機を試作、実証し、目標を達成(下図・中央及び右)。

光送信IF評価ボード 一体集積型送信IF 受信FEの外観

課題c 多重化装置

デジタル補正による高精度64値変調

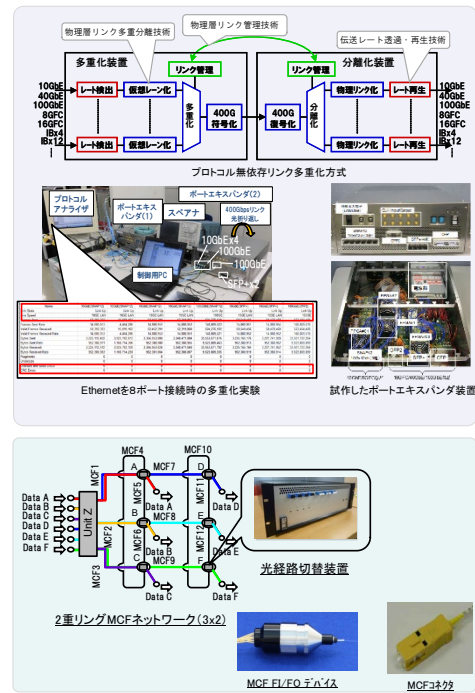
現場試験400G伝送系(112Gbpsx4波長)と符号誤り率特性(112Gbit/s 16APSK)

OSNR res. 0.1 nm
BER=1.1x10⁻³

16APSK信号

2. 研究開発成果概要 (続き)

- 課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術:** リンク層プロトコルに依存しない低遅延な多重化技術を実現するため、低遅延で多重化が可能なプロトコル無依存リンク多重化技術及び試作機を開発。具体的には、物理層リンク多重分離技術及び物理層リンク管理技術を確立し、2種以上のリンク速度、8本以上のデータリンクを低遅延(1 μ 秒以下)で多重分離する技術を実現。伝送レート透過・再生技術では、非同期データリンク(± 400 ppm)に追従し、多重/分離後に元のレート再生を実現。これらの有効性を検証するため、試作したポートエキスパンダ装置とフィールド敷設の光ファイバ(20km)を用いた伝送実験を実施し、長距離伝送でも多重分離可能であることを実証(右図・上)。
- 課題(d) マルチコアファイバ光接続技術:** 通信容量の大容量化に加えて、災害時等にも必要な通信機能を維持可能なネットワークを実現するため、マルチコアファイバ(MCF)と光経路切替装置を組み合わせた、大容量かつ災害時に迅速な復旧が可能なネットワークの構築に必要な技術を開発。具体的には、低接続損失(0.5dB以下)を有するMCF接続デバイス(FI/FOデバイスとMCFコネクタ)、高速(50ms以下)に信号復旧が可能なMCFネットワーク向け光経路切り替え装置を開発。これらの有効性を検証するため、2重リングMCFネットワークに光経路切替装置を適用し、複数線路障害発生時において、50msec以下の自動信号回復が可能なことを確認(右図・下)。



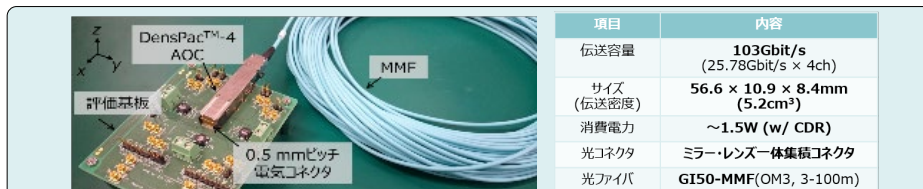
3. 成果から生み出された経済的・社会的な効果

<成果の社会展開に向けた取組状況>

- 課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術:** WDM/TDM-PONを主システムとするNG-PON2の普及を目的として2016年に設立されたNG-PON2フォーラムの活動をボードメンバとして推進(同フォーラムは、現在、NG-PON2カウンシルに改名し、ブロードバンドフォーラムに合流)。
- 課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術:** 「短距離伝送にも光多値利用」という市場動向等も踏まえ、技術の活用を推進。また、光インタフェース技術の開発を継続し、小型デジタルコヒーレント光インタフェースへの適用を推進。
- 課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術:** 「大規模・分散型データセンタ向け大容量・高信頼伝送技術を開発」として、研究成果及び実証実験結果を報道発表(2015年3月)、新聞等への掲載多数。データセンタ内ネットワークの大容量化に伴い、サーバやストレージ間向け伝送ケーブルの高速・大容量化のニーズが高まっているが、光ファイバを用いたアクティブ光ケーブルには小型・高密度化が要求されるため、複数リンクを収容可能な本技術の導入効果は高い。
- 課題(d) マルチコアファイバ光接続技術:** 実用化が進む時期を見据え、成果の技術を活用し、光技術関連会社にてMCF用光コネクタの製品化を準備中。また、これまでに開発したマルチコアファイバ接続技術を活用し、次世代のデータセンタ向け大容量伝送装置に適用可能な高密度光配線技術の開発を計画。今後、配線数の増大が予想され、高密度配線技術の必要性が高まるものと思料。

<新たな市場の形成、売上げの発生、国民生活水準の向上>

- 課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術:** 本研究開発の終了後も、主要な光通信関連の国際会議に継続して計8件の成果を投稿し、本研究開発の成果をタイムリーにアピールすることで、成果の社会展開に向けて更なる技術トレンドを形成。また、新たにモバイル市場への展開として、5Gモバイル網のフロントホール・バックホールへのPONシステム適用を想定し、モバイル装置との連携に係る装置インタフェース仕様を検討(WDM/TDM-PONの低遅延帯域制御に関する改良試作検証、国際標準化を実施)。更に、有無線連携による最適なネットワークを実現するため、総務省委託研究「IoT機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の開発」を活用したWDM/TDM-PONベースのPON仮想化技術の開発を推進。これらの活動により、VerizonをはじめとしたグローバルキャリアによるNG-PON2導入の期待が高まっており、今後、光ブロードバンドやモバイルバックホール等にNG-PON2が適用されることにより、ブロードバンド社会の更なる発展に大きく寄与するものと考えられる。
- 課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術:** 半導体変調器技術に関して、グループ会社に技術開示。特定顧客に向けた製品出荷開始(2015年1件)。加えて、1波長100G多値伝送方式に関して国内他社に技術支援を実施、400Gイーサ製品事業化を予定(2022年頃予定)。
- 課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術:** IEEE802.3標準の動向として、低速度(25Gbps)のチャネルを複数束ねて、大容量のリンク(50G、100G、200G、400G)に多重化する方式が採用されており、開発した物理層リンク多重分離技術を用いたデータセンタ内ネットワーク向け光アクティブケーブル製品に技術適用(2017年1件、下図)。



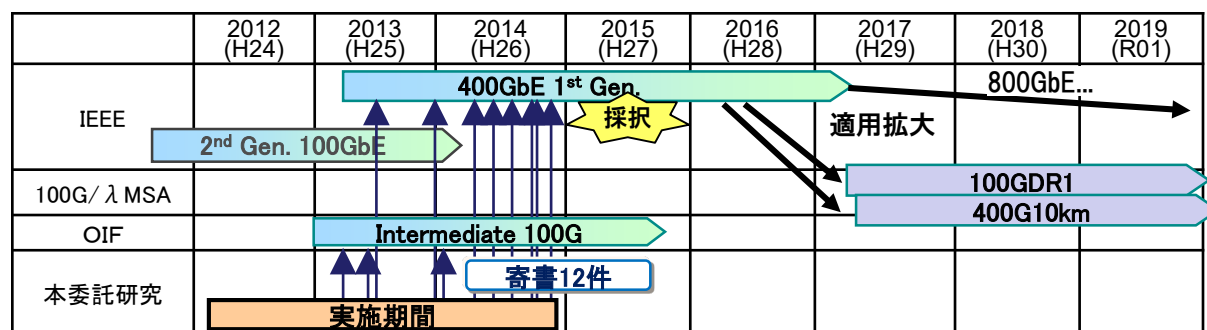
物理層リンク多重分離技術を適用したデータセンタ内ネットワーク向け光アクティブケーブル製品の仕様

3. 成果から生み出された経済的・社会的な効果（続き）

・ **課題(d) マルチコアファイバ光接続技術**: 新たな市場形成に向け、事業部門と一体となり、本研究開発の成果であるマルチコアファイバ接続技術の装置内・装置間での高密度光配線技術への適用性を検討し、マルチコアファイバ搭載光送受信器に関する技術開発を実施。また、装置内短距離光伝送応用には、実装可能なファイバ密度限界に加えて、光コネクタ密度限界があるため、光インターコネクション向けマルチコアファイバ搭載小型光送受信器の開発に向け、要素技術の開発に着手。特に、マルチコアファイバとマルチコア光導波路との光接続に関する開発を実施。

<知財や国際標準獲得等の推進>

- ・ **課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術**: ITU-Tの国際標準化会合に積極的に参画、波長帯域割当、設定プロトコルを提案し、国際標準勧告G.989シリーズ及びG.9802に採択。継続して当該標準化会合における議論(G.989シリーズ)をアソシエートレポート及びエディタとして推進し、2015年10月に標準化完了へ導いた。また、5Gモバイルのフロントホールへの適用を想定し、5G推進フォーラムやITU-TのFG IMT-2020への提案活動を行い、標準化の課題整理に貢献。5Gモバイルへの展開を想定したWDM/TDM-PONの仮想化における国際標準化活動を推進中。
- ・ **課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術**: 出願特許の登録を推進し、出願した国内7件、国外5件、計12件の権利化を完了。国際標準獲得の推進活動として、IEEE標準化会合に積極的に参画し、2015年7月にIEEE400GbEのベースライン方式が採択、2016年2月に標準化完了。その後、1波長100G-PAM4方式は、業界コンソーシアムMSAにおいて、100GMSA/400G 10kmMSAへの適用が議論され、IEEE800GbE等への適用についても議論が開始。
- ・ **課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術**: 伝送システム方法及び伝送方法の特許登録に向けた活動を推進し、出願した国内4件、国外4件、計8件全ての権利化を完了。国際標準獲得等の推進活動として、課題(b)と共同で、OIF、IEEEへの提案(物理リンク多重化技術: OIF PLL MLG(Multi-link Gearbox IA)の調査、400Gbps符号化技術: IEEE 802.3 400GbE SG/TFの調査及び提案(2013年7月))を実施。今後、データセンタ内には様々なリンク速度がより混在することになり、効率的な収容へのニーズが高まっているところ。
- ・ **課題(d) マルチコアファイバ光接続技術**: 出願特許の登録を推進し、出願した国内4件、国外2件、計6件の権利化を完了。



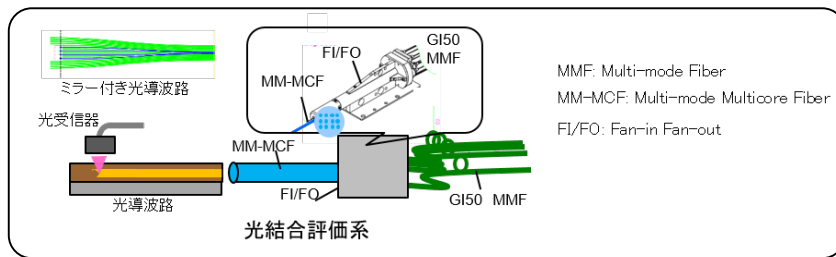
短距離光インタフェースの国際標準規格

4. 成果から生み出された科学的・技術的な効果

- ・ **課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術**: 本研究開発により、柔軟性が向上したWDM/TDM方式による光アクセスシステムの取組が誘引され、更なる柔軟性向上を目指したOFDM方式の検討や、WDM/TDM方式の更なる高速化、モバイルフロントホールへのWDM/TDM-PONの適用等、光アクセスシステムの研究開発が一層拡大。これらの動向を踏まえ、光アクセス関連の技術フォーラムFSAN(Full Service Access Network Initiative)では、2016年11月に新たな技術ロードマップを公表しており、そこでは、2021年以降、更なる研究開発成果を適用したFOAS(Future Optical Access System)の検討が必要となる旨が提示。現在、WDM/TDM-PONに適用する経済的な波長可変トランシーバ技術、また、同トランシーバを実現するための光波集積回路技術の研究開発が進展。5Gモバイルの本格導入においては、フロントホール・バックホールの配線数や通信容量が爆発的に増大することが想定され、低コストで効率的なRANシステムの必要性が高まっている。WDM/TDM-PONの波長切替を適用することで効率的な帯域割当が可能となることから、有無線連携により、End-to-Endのネットワークスライスをダイナミックに行う光アクセスの技術開発の取組も誘引。
- ・ **課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術**: 中短距離光インタフェースへの1波長・1偏波直接受信多値伝送の適用を研究し、特に短距離向けに1波長100G-PAM4伝送の検討を追加実施したことで、IEEE初のPAM4伝送の導入に貢献。本研究開発は、以降の短距離光IFにおいてPAM4伝送が広く採用されることも誘引。
- ・ **課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術**: 物理層リンク多重分離技術は、様々な低速リンクを検出し、1本の大容量リンクに多重化する技術。IEEE 802.3bsの標準化完了後は、次世代インタフェースの実用化が始まり、サーバ市場には様々な速度のポートが混在することになるため、本研究開発の成果の実用化による波及効果は大きい。また、データセンタ内ネットワークの大容量化に伴い、サーバやストレージ間向け伝送ケーブルの高速・大容量化のニーズが高まり、メタルケーブルの損失増加に伴い、光ファイバを用いたアクティブ光ケーブル(AOC)の適用が進展。AOCには小型・高密度化が求められていることから、複数リンクを収容可能な本技術の導入効果は大きい。

4. 成果から生み出された科学的・技術的な効果（続き）

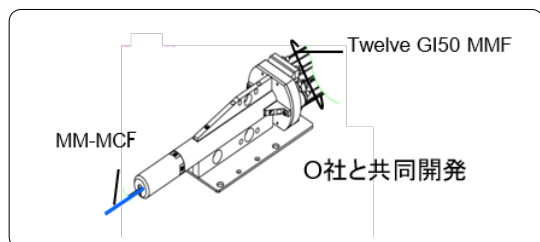
- ・ **課題(d) マルチコアファイバ光接続技術**: 光インターコネクションによる光伝送の更なる大容量化には、各伝送路の高速化に加えて、実装密度の増大化が必要。そのため、これまでに開発したマルチコアファイバ接続技術を展開し、新たにマルチモードマルチコアファイバ(MM-MCF)とマルチコア光導波路を用いた高密度実装が可能な光インターコネクション向け小型光送受信器の開発を目指し、MM-MCFとミラー付き単層マルチコアポリマー光導波路との低損失光結合技術、MM-MCFとミラー付き多層マルチコアポリマー光導波路との低損失光結合技術の要素技術をそれぞれ確立。



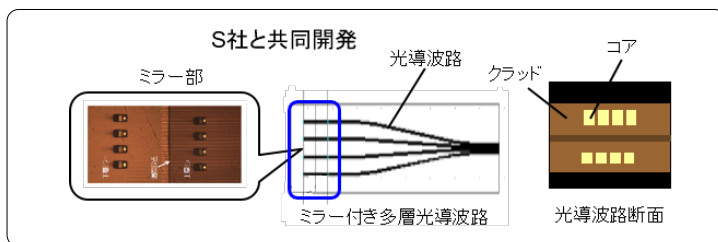
ミラー付き光動波管等

5. 副次的な波及効果

- ・ **課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術**: 本研究開発の波及効果として、モバイル通信分野との分野融合が進展。具体的には、モバイルフロントホールへのPON適用に関する研究開発が進展。WDM/TDM-PONシステムは、5G以降のスマートセルの効率的収容にあたり、大容量性と経済性が求められるモバイルフロントホールの実現に適している一方、低遅延性の実現に課題があり、低遅延化を図る研究開発が進められた。その一部は、総務省委託研究「第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発～超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～」にて実施。また、キャリア及びびメーカーの複数企業連携による、我が国の技術開発力の強化にもつながった。本研究開発に起因し、間接的な効果も含め、我が国において国際標準NG-PON2の研究開発力が強化された。更に、PONスライスや大容量化技術の国際的な議論を活性化し、国際標準化を通じて、グローバルで活躍する人材の育成にもつながった。
- ・ **課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術**: ベース技術の異なる2社(日立:伝送システム、NTT:デバイス)が連携して研究開発を推進することで、互いの理解を深めつつ、研究開発力の向上につながった。標準化提案でも我が国の得意技術である半導体変調器の利用を想定する等、国際競争力の向上にも有効であった。また、デバイスや送受信機試作に若手研究者が参画して経験を積む等で、若手研究者育成の貴重な機会となるとともに、研究開発期間中の若手研究者の社外表彰受賞等といった波及効果もあった。
- ・ **課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術**: IEEEやOIF等の国際標準化団体に対して成果に基づく提案を行う等、積極的に標準化を推進。標準化団体に参画した他企業との技術交流により、開発内容の方向性や仕様検討等に活用することにもつながった。また、これまで標準化活動の経験のない若手研究者が参画し、経験を積む等、国際標準化に係る貴重な人材育成の機会にもなった。本課題の研究開発期間中の活動により、学会からの招待講演、各種講演や解説記事の執筆等も積み重ねて、研究人材の育成につながった。
- ・ **課題(d) マルチコアファイバ光接続技術**: マルチモードマルチコアファイバを用いた高密度実装可能な光インターコネクション向け小型光送受信器の実現に向けた要素技術開発のため、下図のデバイスを他社(O社とS社)と共同開発。



マルチモードファイバのファインイン・ファンアウト (MM-MCF FI/FO) デバイス



ミラー付き多層ポリマー光導波路

6. その他研究開発終了後に実施した事項等

- ・課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術：本研究開発終了後も主要国際会議において8件の発表を行い、技術トレンドの形成に貢献。研究開発成果の活用として、モバイル適用を想定した低遅延帯域割当技術の開発、ネットワーク仮想化(End-to-Endネットワークスライス)を実現するWDM/TDM-PONベースのPON仮想化技術の開発、Beyond 5Gを想定したPONの大容量化技術(波長あたりの100Gbps)の開発等も推進。
- ・課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術：本研究開発終了後も技術開発を継続し、成果の拡大と実用化を推進するとともに、積極的に国内外の論文発表や口頭発表(計24件)を行い、成果の周知に努めた。
- ・課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術：本研究開発終了後も研究会で3件の口頭発表を実施し、研究成果の普及活動に努めた。研究会では試作したプロトコル無依存リンク多重化方式の検討結果と、試作した方式検証機によるフィールド実験結果を中心に報告し、開発した技術の有効性の周知に努めた。
- ・課題(d) マルチコアファイバ光接続技術：本研究開発終了後も、査読付き論文2件(国内1件、海外1件)、口頭発表2件を行うとともに、書籍「Extremely Advanced Optical Transmission (EXAT) Technologies Towards Exabit Era」(出版社Springer、出版時期未定)のマルチコアファイバに関する章の原稿最終版を提出完了。

表. 本課題の期間中・終了後成果数

括弧内はうち海外分

| 項目 | 課題 I (a) | | 課題 I (b) | | 課題 I (c) | | 課題 I (d) | |
|---------|----------|------|----------|-------|----------|------|----------|------|
| | 実施期間中 | 終了後 | 実施期間中 | 終了後 | 実施期間中 | 終了後 | 実施期間中 | 終了後 |
| 査読付論文 | 6(6) | 5(5) | 1(1) | 3(2) | 1(1) | 0 | 2(2) | 2(1) |
| 査読付口頭発表 | 19(19) | 3(3) | 11(11) | 12(6) | 1(1) | 0 | 5(5) | 0 |
| その他誌上发表 | 2(0) | 1(0) | 1(0) | 2(1) | 2(0) | 0 | 0 | 0 |
| 口頭発表 | 43(0) | 9(0) | 20(0) | 7(0) | 6(0) | 3(0) | 11(0) | 2(0) |
| 特許出願 | 27(3) | 5(0) | 14(4) | 0(0) | 8(4) | 0 | 10(4) | 0 |
| 特許取得 | 12(0) | 9(0) | 0(0) | 12(5) | 0(0) | 8(4) | 0(0) | 6(2) |
| 国際標準提案数 | 50(50) | 9(9) | 12(12) | 0 | 1(1) | 0 | 0 | 0 |
| 国際標準獲得数 | 0 | 0 | 0 | 1(1) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 受賞数 | 1(1) | 1(1) | 1(0) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 報道発表数 | 3(1) | 0 | 2(0) | 0 | 1(0) | 0 | 1(0) | 0 |
| 報道掲載数 | 24(0) | 0 | 5(0) | 0 | 6(0) | 0 | 4(0) | 0 |

7. 政策へのフィードバック

<国家プロジェクトとしての妥当性、プロジェクト設定の妥当性>

- ・課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術：研究開発成果の国際標準獲得に向けた取組や成果の普及に向けたフォーラム活動を継続し、主要国際会議発表を通じて技術トレンド形成に努めるとともに、モバイル通信分野との異分野融合研究を推進し、キャリアとメーカーの連携による技術開発力の強化を図る等、研究開発の発展状況や活用状況は十分。国際標準化で成果に関する提案が採択され、周知広報活動も十分行われている等、本研究開発は有意義かつ有益。
- ・課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術：IEEE400Gイーサ標準化に先駆けて短距離伝送への光多値伝送技術等の導入に着手し、国際標準化への貢献や製品化・事業化につながる成果を得ており、国家プロジェクトとして実施したことは妥当。
- ・課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術：適切な時期に先行的な技術開発に着手することができ、国家プロジェクトとしての課題設定は妥当。
- ・課題(d) マルチコアファイバ光接続技術：伝送方式の高度化や新型ファイバの導入等により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化、耐災害性の強化等の実現を図るためには、多くの関連する新技術の研究開発を総合的に推進する必要がある、こうした技術開発は国主導のプロジェクトとして妥当。

<プロジェクトの企画立案、実施支援、成果展開への取組み等に関する今後の政策へのフィードバック>

- ・課題(a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術：5G以降のスマートセルにおけるモバイルフロントホールの実現等においても有用な技術である一方、マーケットの立ち上がりが予想よりも遅れているため、今後適切なタイミングで更に成果を活用していくことが重要。
- ・課題(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術：適切なタイミングでの国主導の先行的研究開発は、我が国の技術優位性の維持・向上に有効。単独の民間企業で実現することが難しい場合も多いため、国家プロジェクトによる適切な支援も引き続き必要。
- ・課題(c) プロトコル無依存リンク多重化技術：技術の転換期においては、民間企業が単独で標準化提案等を行うのではなく、関係者が連携した取組が有効。そのような場合、国家プロジェクトとして幅広い関係者の連携を促す先行的な研究開発を推進することが、我が国の国際競争力の向上等に有効。
- ・課題(d) マルチコアファイバ光接続技術：マルチコアファイバの市場立ち上がりが現時点では不明であるため、ニーズをしっかりと把握し、それに合わせた研究開発を引き続き進めていくことが重要。また、市場の立ち上がりが遅く、研究開発を中断せざるを得ないような場合について、適切な継続支援方策の検討も望まれる。