

採択番号 00101

研究開発課題名：Beyond 5G 超大容量無線通信を支える次世代エッジクラウドコンピューティング
基盤の研究開発

研究開発項目 1) 高速大容量データ転送を実現する革新的ハードウェア技術の研究開発

研究開発項目 2) 多種多様なサービスに対応可能な高機能エッジクラウド情報処理基盤の研究開発

副題：Beyond 5G に向けた革新的高速大容量データ転送ハードウェア開発と高機能エッジクラウド
情報処理基盤の研究開発

(1) 研究開発の目的

日本の強みであるマルチコアファイバ技術を導入し、高速大容量データ転送を可能にする革新的ハードウェア技術を開発する。さらに、これら新たなハードウェア技術を基盤として、多種多様なサービスに対応可能な高機能エッジクラウド情報処理基盤の研究開発を行い、Beyond 5G 超大容量無線通信、高信頼・極低遅延、超大量端末を最大限に発揮した将来の Cyber-Physical System 実現に貢献する。

(2) 研究開発期間

令和 2 年度から令和 6 年度 (5 年間)

(3) 受託者

国立大学法人東京工業大学<代表研究者>
国立大学法人東海国立大学機構 岐阜大学
公立大学法人滋賀県立大学
富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社
古河電気工業株式会社
古河ネットワークソリューション株式会社
日本電気株式会社
国立大学法人大阪大学
国立大学法人東北大学
楽天モバイル株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 2 年度から令和 4 年度までの総額 2,003 百万円 (令和 4 年度 1,026 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1：高速大容量データ転送を実現する革新的ハードウェア技術の研究開発

1-a. マルチコアファイバを用いた Co-Packaged Optics (CPO) 超小型光トランシーバの研究
開発

1-a-1. CPO 光トランシーバのための VCSEL アレイの研究開発 (国立大学法人東京工業大学)

1-a-2. 高速・低電力・多チャンネル電気集積回路 (EIC) の研究開発

1-a-2-1. 高速・低電力・多チャンネル光送信用電気集積回路 (EIC) の研究開発 (国立大学法人
東海国立開発機構 岐阜大学)

1-a-2-2. 高速・低電力・多チャンネル光受信用電気集積回路 (EIC) の研究開発 (公立大学法人
滋賀県立大学)

1-a-3. CPO 超小型光トランシーバモジュールの研究開発 (富士通オプティカルコンポーネンツ
株式会社)

- 1-b. チップ間光接続を可能とする高密度光電インターフェイス技術の研究開発
- 1-b-1. 高密度光電インターフェイス技術の研究開発（古河電気工業株式会社）
- 1-b-2. チップ間光接続を実現するCPO ドータボードの開発（古河ネットワークソリューション株式会社）
- 1-c. CPO 光トランシーバを接続可能な小型大容量スイッチ装置の研究開発（古河ネットワークソリューション株式会社）

研究開発項目2：多種多様なサービスに対応可能な高機能エッジクラウド情報処理基盤の研究開発

- 2-a. マルチコアファイバを用いた極低遅延スイッチング技術の研究開発（古河ネットワークソリューション株式会社）
- 2-b. マルチコアファイバで連結したリソース分離型コンピューティング技術の研究開発（日本電気株式会社）
- 2-c. マルチコアファイバを用いたネットワークスライシング技術の研究開発（古河ネットワークソリューション株式会社）
- 2-d. エッジクラウドコンピューティングを活用した実証実験の実施
- 2-d-1. 高機能エッジクラウド情報処理基盤内 NW 構成・制御技術の開発と処理性能検証（国立大学法人大阪大学）
- 2-d-2. エッジクラウドによる電波有効利用の検証（国立大学法人東北大学）
- 2-d-3. エッジサーバ間の光スイッチング技術の開発（国立大学法人東京工業大学）
- 2-d-4. B5G とエッジクラウドコンピューティングを活用したスーパースマートタウンに関する研究開発
- 2-d-4-1. B5G エッジクラウドを活用した実証実験に関する研究開発（国立大学法人東京工業大学）
- 2-d-4-2. B5G 仮想化エッジクラウド基盤に関する研究開発（楽天モバイル株式会社）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	19	11
	外国出願	24	17
外部発表等	研究論文	9	7
	その他研究発表	120	68
	標準化提案・採択	2	2
	プレスリリース・報道	13	6
	展示会	12	12
	受賞・表彰	2	2

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：高速大容量データ転送を実現する革新的ハードウェア技術の研究開発

25Gbps NRZ×16ch CPO 光トランシーバを構成する各種部品の設計、試作を行い、部品レベルでの適用性を実証した。次に、CPO 光トランシーバと評価ステーションを作製し、25Gbps NRZ の光リンクの特性を評価した。また、CPO ドータボードとスイッチ装置を試作し、動作検証を行った。

- 1-a. マルチコアファイバを用いた Co-Packaged Optics (CPO) 超小型光トランシーバの研究開発
 - 1-a-1. CPO 光トランシーバのための VCSEL アレイの研究開発
- 1060nm 帯 CPO 実装可能な裏面出射型 16ch VCSEL アレイを実現し、結合共振器構造により変調帯域とモードフィールド拡大を両立し、室温で、変調速度 NRZ 50 Gbps、PAM4 90Gbps を達成、さらに、モードフィールド径 5 μ m~6 μ m での単一モード動作、MCF への結合効率 4dB 以下、0.15pJ/bit の低消費電力動作を実現した。

1-a-2. 高速・低電力・多チャンネル電気集積回路（EIC）の研究開発

1-a-2-1. 高速・低電力・多チャンネル光送信用電気集積回路（EIC）の研究開発

MCF に対応した 25 Gbps×16 ch 光送信用 EIC を設計・試作し、基本動作検証を行った。伝送速度 25 Gbps（NRZ 符号）の高速動作、サイズ 2.5 mm×2.5 mm の小型化、消費電力 2 W 以下の低電力特性を得ることができ、中間目標を達成した。さらに、試作 EIC 評価により、多チャンネル小型・低クロストーク設計基本技術を検証できた。

1-a-2-2. 高速・低電力・多チャンネル光受信用電気集積回路（EIC）の研究開発

MCF に対応した高速・低電力・多チャンネル光受信用 EIC の設計・試作し、基本動作検証を行った。伝送速度 25 Gbps（NRZ 符号）×16 ch、サイズ 2.5 mm × 2.5 mm、消費電力 1~2 W 以下の特性を得ることができ、中間目標を達成できた。さらに、試作 EIC 評価により、多チャンネル小型設計・クロストークノイズ低減手法の基本検討を行った。

1-a-3. CPO 超小型光トランシーバモジュールの研究開発

VCSEL アレイ、PD アレイおよび MCF を用いた 25Gbps NRZ×16ch 体積 1cm³以下の世界最小クラスの CPO 光トランシーバを試作。送信側 25Gbps NRZ の光変調波形、受信は基準測定器との対向で ≤-7dBm(OMA) の 2km 伝送に十分な受信感度と 0.3dB に抑制されたクロストーク、加えて送受合計の消費電力 約 5pJ/bit での低電力動作の実現性を確認した。

1-b. チップ間光接続を可能とする高密度光電インターフェイス技術の研究開発

1-b-1. 高密度光電インターフェイス技術の研究開発

世界最小 0.3mm ピッチのランドグリッドアレイを採用した高密度光電インターフェイスを設計、試作した。さらに、25Gbaud 用評価ステーションと 28Gbaud NRZ/PAM4 × 8ch 光トランシーバを設計、試作した。これらを組み合わせて評価した結果、25Gbaud の信号伝送に十分使用できることを実証した。また、8 連高密度光電インターフェイスを設計、試作し、CPO ドータボードに取付けて使用できることを実証した。

1-b-2. チップ間光接続を実現する CPO ドータボードの開発

10cm 角程度の CPO ドータボードに CPO 光トランシーバを 32 個搭載した FPGA 搭載 CPO ドータボードプロトタイプおよびスイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードプロトタイプの試作、動作確認および特性評価を実施した。また、50Gbps/チャンネル、100Gbps/チャンネルの開発、評価環境の整備を実施した。

1-c. CPO 光トランシーバを接続可能な小型大容量スイッチ装置の研究開発

スイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードを 4 個実装するスイッチ装置マザーボード、筐体、電源、FAN（放熱対策）の設計と試作、スイッチ ASIC 制御ソフトウェアの開発を行い、スイッチ装置の動作確認、実証検証を実施した。また、51.2T のスイッチ ASIC を想定した放熱機構の検討を行い、模擬システムにおいて水冷冷却システムを試作し、評価を実施した。

研究開発項目 2： 多種多様なサービスに対応可能な高機能エッジクラウド情報処理基盤の研究開発

極低遅延スイッチ・ネットワークスライシングの装置構成の基本設計を完了し、リソース分離に適したサービス実行技術によるリソース利用率向上の可能性を得た。解析では資源割り当て手法の有効性と NW 構成探索指標の提案・性能向上を示し、電波有効利用率最大化のための機械学習アルゴリズムの効果を示した。さらに光スイッチング制御方式の μ 秒レベルの遅延実証と 100 ナノ秒以下の構成提案、Silicon Photonics スイッチの集積度向上検討を進めるとともに、B5GNW のミリ波リピータによるカバレッジエリア拡張、画像伝送・物体認識の低遅延性、デジタルツインプラットフォームでの AR アプリ機能実現、総合実証実験のためのサービス検討を行った。

2-a. マルチコアファイバを用いた極低遅延スイッチング技術の研究開発

研究開発項目 1) で試作する CPO 光トランシーバとスイッチ ASIC を実装したスイッチ装置で、マルチコアファイバを用いた極低遅延スイッチングの原理実証を行うための FPGA 搭載 CPO ドータボードとスイッチ装置の装置構成を検討し、基本設計を完了した。マルチコアファイバの Fan-in/Fan-out を試作し、特性評価を実施した。

2-b. マルチコアファイバで連結したリソース分離型コンピューティング技術の研究開発

これまで提案した新しいリソース分離型コンピューティングアーキテクチャのうち、主にリソース分離に適した疎結合でスケーラブルなサービス実行技術を提案し試作により実機で検証した。結果をもとに μ データセンタを対象にリソース利用率を30%から80%に向上することが可能である見込みを得て、中間目標を達成した。

2-c. マルチコアファイバを用いたネットワークスライシング技術の研究開発

研究開発項目1)で試作するCPO 光トランシーバとスイッチ装置を用いて、4 スライス以上のネットワークスライシングが可能なることを実証するためのFPGA搭載CPOドータボードとスイッチ装置の装置構成を検討し、基本設計を完了した。

2-d. エッジクラウドコンピューティングを活用した実証実験の実施

2-d-1. 高性能エッジクラウド情報処理基盤内 NW 構成・制御技術の開発と処理性能検証

昨年度提案した情報処理基盤内で動作させるアプリケーションが要求する処理速度を確保しつつ、今後、追加するアプリケーションのためにまとまった資源を残すような資源割り当て手法について、数値評価を行い、有効性を検証した。また、資源割り当てを考慮して、適切な情報処理基盤内 NW 構成を探索するための指標を提案し、提案した資源割り当て手法と組み合わせた評価を行い、当該指標が優れているNW構成より多くのアプリケーションの収容が可能であることを示した。

2-d-2. エッジクラウドによる電波有効利用の検証

令和3年度に確立した数学的解析手法に基づく電波有効利用性の性能評価モデルに基づき、電波の有効利用性を最大化するための、端末で発生するデータの処理をエッジで行うか否かを判断する方法として、機械学習アルゴリズム(ランダムフォレスト及びニューラルネットワーク)を用いた手法を提案し、最大で電波の有効利用性を5倍に拡大できることを確認した。

2-d-3. エッジサーバ間の光スイッチング技術の開発

O-Node 低遅延転送実現のため、レイヤ2ラベルを用いた方式によるルックアップテーブル参照と、光スイッチ素子制御信号出力の方式提案・制御ボード試作による動作確認・2マイクロ秒以下の動作を実証し、100ナノ秒以下の低遅延化ラベル・パケット構成・転送方式の提案を行った。また2コア規模のSilicon Photonicsスイッチ素子の試作・モジュール化による入出力数増加構成の基本動作検証を行った。

2-d-4. B5G とエッジクラウドコンピューティングを活用したスーパースマートタウンに関する研究開発

2-d-4-1. B5G エッジクラウドを活用した実証実験に関する研究開発

令和3年度エリア構築したB5Gセルラネットワークの実証フィールドのカバレッジエリア拡張のためのミリ波リピータを用いた数値解析及び実機を用いた実証を行いカバレッジエリアが拡張されていることを確認した。また、B5Gエッジクラウドを画像伝送・物体認識により実証し、50msec以下の低遅延を実現した。更に、B5G無線伝搬環境を再現するデジタルツインプラットフォームにおいて物理空間情報の収集と地図へのマッピング機能を開発した。

2-d-4-2. B5G 仮想化エッジクラウド基盤に関する研究開発

エッジクラウド環境のEnd to Endでの評価およびロケーションの異なるサーバーとの比較検証を行った。また令和3年度に検討したユースケースを基に作成したデモストーリーに沿ったARアプリケーションを開発、エッジクラウド環境にデプロイしデモンストレーションを行った。更にB5Gスマートタウン総合実証実験に向けたサービスの検討を行った。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1：高速大容量データ転送を実現する革新的ハードウェア技術の研究開発

16コアMCFと光結合が可能な1060nm帯16ch VCSELアレイを作製し、50Gbps(NRZ)、100Gbps(PAM4)/chの高速動作を実現する。25Gbps光送受信用EICのさらなる超小型・超低電力化技術の開発、ならびに50Gbps(NRZ、PAM4符号)に対応する小型・高速光送受信用EIC基盤技術の開発を行う。これらの要素技術を統合して、400Gbps CPO光トランシーバの特性改善を行い、また800G/1.6Tbps超小型大容量CPO光トランシーバの実現性検証を行うとともに、超小型CPO光トランシーバサンプルモジュール製作を行う。CPO光トランシーバのための世界最小ピッチ0.3mmを採用したLGAを用

いて、50Gbaud に対応する電気プラグブルインターフェイスを設計、試作、評価する。多連電気プラグブルインターフェイスを用いた FPGA 搭載 CPO ドータボード並びに、多連電気プラグブルインターフェイスを用いたスイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードに CPO 光トランシーバを搭載し、動作実証を行う。ドータボードの 50Gbps/チャンネル、100Gbps/チャンネルに必要となる要素技術の開発を行う。また、スイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードプロトタイプを用いたスイッチ装置の動作実証を行う。

1-a. マルチコアファイバを用いた Co-Packaged Optics (CPO) 超小型光トランシーバの研究開発

1-a-1. CPO 光トランシーバのための VCSEL アレイの研究開発

令和 4 年度までの研究成果を基に、1060nm 帯 16ch VCSEL アレイの設計・製作を行うとともに、量産可能な製造プロセス基盤を確立する。結合共振器構造により変調帯域拡大とモードフィールド拡大を両立し、環境温度 55°C までの安定動作、単一モードコアへの結合効率 3dB 以下、変調速度 NRZ 50Gbps、PAM4 100Gbps 以上の可能性を検証する。

1-a-2. 高速・低電力・多チャンネル電気集積回路 (EIC) の研究開発

1-a-2-1. 高速・低電力・多チャンネル光送信用電気集積回路 (EIC) の研究開発

令和 4 年度までに試作・検証を行った 25 Gbps NRZ 符号対応 16 ch 光送信用 EIC 設計技術を基に、さらなる超小型・超低電力化技術の開発を行う。さらに、50 Gbps 高速化に向けた広帯域化技術、PAM4 符号大振幅に対応した波形品質向上技術の開発・検証を行う。また、超高速多チャンネル小型化のための低クロストーク設計技術の開発を行う。

1-a-2-2. 高速・低電力・多チャンネル光受信用電気集積回路 (EIC) の研究開発

令和 4 年度までに試作・検証を行った 25 Gbps 多チャンネル光受信用 EIC 設計技術を基に、さらなる超小型・超低電力化技術の開発を行う。さらに、50 Gbps 高速化に向けた帯域延伸技術、および PAM4 符号対応を可能とする要素回路設計技術を整備する。また、超高速・多チャンネル小型化のためのチャンネル間クロストークノイズ低減技術の開発を行う。

1-a-3. CPO 超小型光トランシーバモジュールの研究開発

令和 4 年度に開発した超小型 CPO 光トランシーバの特性改善を行い、研究開発項目 1-b の CPO ドータボード評価に向けサンプルモジュールの提供を行う。また、1 チャンネル当たりの伝送レート 50Gbaud (50Gbps NRZ および 100Gbps PAM4) への高速化に取り組み、800G/1.6Tbps 超小型大容量 CPO 光トランシーバの実現性を検証する。

1-b. チップ間光接続を可能とする高密度光電インターフェイス技術の研究開発

1-b-1. 高密度光電インターフェイス技術の研究開発

50Gbaud 用の高密度光電インターフェイス、評価ステーション、50Gbaud 評価用光トランシーバを設計、試作する。これらを組み合わせて、差動伝送線路の特性及び光リンク特性の特性を評価して、50Gbaud の信号伝送に適用できることを実証する。また、CPO ドータボードの水冷システムについてシミュレーション及び模擬システムを用いた実験により検討する。

1-b-2. チップ間光接続を実現する CPO ドータボードの開発

FPGA 搭載 CPO ドータボードプロトタイプおよびスイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードプロトタイプに CPO 光トランシーバを搭載して動作確認、評価を実施する。50Gbps/チャンネル、100Gbps/チャンネルのドータボードに必要となる要素技術の調査、試作、評価環境の整備を行う。

1-c. CPO 光トランシーバを接続可能な小型大容量スイッチ装置の研究開発

スイッチ ASIC 制御ソフトウェアの開発を継続し、スイッチ ASIC 搭載 CPO ドータボードを 4 個実装するスイッチ装置に CPO 光トランシーバを搭載して動作確認を行い、研究項目 2-a, 2-c の実証検証を実施する。

研究開発項目 2： 多種多様なサービスに対応可能な高機能エッジクラウド情報処理基盤の研究開発

CPO 光トランシーバとスイッチ ASIC を実装した極低遅延スイッチ装置の動作検証、研究開発項目 1 試作 CPO トランシーバ・スイッチ ASIC 実装スイッチ装置にて 4 スライス以上のネットワークスライシングの動作を検証する。リソース分離型コンピューティング技術の社会

実装ターゲットである μ データセンタの要件・課題を検討する。またシミュレーションにおいては資源割り当て手法においてアプリの需要変動に対応可能な拡張を行い、令和4年度検討のNW構成に対する指標を用いてNW構成・制御技術の有効性を示す。エッジクラウドによる電波資源有効利用に関して端末からエッジ経由してクラウドへデータ送信・処理のデータを収集し、令和4年度確立のエッジ使用判断手法の現実的な環境での有効性を明らかにする。光スイッチング技術のシステム統合と遅延時間の検討を進め、多入出力構成の拡張を検討する。B5Gエッジクラウドの総合実証実験に向けてミリ波帯エリア拡張、デジタルツイン活用のAR伝搬・伝送特性可視化システム開発と実証による評価、歩行者支援ナビゲーションシステムの実証を行い、開発してきたアプリと連携するMECプラットフォーム機能拡張、性能改善を検討する。

2-a. マルチコアファイバを用いた極低遅延スイッチング技術の研究開発

研究開発項目1)で試作するCPO光トランシーバとスイッチASICを実装したスイッチ装置で、マルチコアファイバを用いた極低遅延スイッチングの原理実証の動作検証を行う。

2-b. マルチコアファイバで連結したリソース分離型コンピューティング技術の研究開発

社会実装のターゲットである μ データセンタのユーザ要件と技術的要件と実用化課題を研究協力者(大阪大学CMC)とシステム検討する。 μ データセンタの試験導入へ向けて、歯学部病院などの部局の μ データセンタとCMCの計算機システム群との連携手法を検討する。ユースケースとしては研究DXシステム等の実際に用いられるシステムベースで検討する。

2-c. マルチコアファイバを用いたネットワークスライシング技術の研究開発

研究開発項目1)で試作するCPO光トランシーバとスイッチ装置を用いて、4スライス以上のネットワークスライシングが可能なることを実証するための動作検証を行う。

2-d. エッジクラウドコンピューティングを活用した実証実験の実施

2-d-1. 高機能エッジクラウド情報処理基盤内NW構成・制御技術の開発と処理性能検証

資源割り当て手法について、各アプリケーションの需要の変動に柔軟に対応可能とするような拡張を行うとともに、令和4年度に検討したNW構成に対する指標を用い、小規模から中規模なエッジマイクロデータセンタを構成し、シミュレーションにより、そのNW構成、制御技術の有効性を示すことを予定している。

2-d-2. エッジクラウドによる電波有効利用の検証

仮想環境内に構築したネットワーク環境、及び実ネットワーク環境を用いて、端末からエッジを経由しクラウドにデータを送信・処理を行う実験を行い、データ収集を行い、それを用いて、令和4年度に確立したエッジ使用判断手法の性能評価を行うことにより、手法の現実的な環境での有効性を明らかにし、電波の有効利用への寄与を評価する。

2-d-3. エッジサーバ間の光スイッチング技術の開発

システムの統合を検討・遅延時間の測定ならびに課題を抽出し、目標とするms以下の遅延動作と光スイッチ集積素子の4ポート入出力動作実現を目指す。多入出力光スイッチモジュールと低遅延ラベル処理・光スイッチ制御信号生成ボードの試作・連携を通して、目標達成の可能性を実証する。

2-d-4. B5Gとエッジクラウドコンピューティングを活用したスーパースマートタウンに関する研究開発

2-d-4-1. B5Gエッジクラウドを活用した実証実験に関する研究開発

総合実証実験に向けて、大岡山地区のB5Gヘテロジニアスセルラネットワークに中継局を導入し、特にミリ波帯のエリアを一様に拡張する。B5Gの基地局・中継局の置局・評価・運用の支援を目的として大岡山デジタルツインを活用したAR伝搬・伝送特性可視化システムの開発及び実証による評価を行う。またB5Gエッジクラウドの大容量・低遅延性を活用した総合実証実験として、歩行者支援ナビゲーションシステムの実証実験およびデモンストレーションを行う。

2-d-4-2. B5G仮想化エッジクラウド基盤に関する研究開発

性能低下に対してネットワーク連携による性能安定性を保てる設計の検討および検証を行う。また総合実証実験で開発するスマートシティに求められる機能を実装したアプリケーションと連携するMECプラットフォーム機能を拡張する。合わせてこれまでに構築したネットワークを活用して実証実験を行い、これより得られたフィードバックを基に改善を検討する。