

<異種材料集積光エレクトロニクスを用いた高効率・高速処理分散コンピューティングシステム技術開発について>

本研究開発は、地域的に分散した計算資源を低遅延かつ高効率に接続する分散コンピューティング基盤の実現を目的とし、異種材料集積光エレクトロニクスを用いた高効率・高速処理システムの構築を行った。生成 AI の普及に伴う計算需要の急増や、カーボンニュートラルの要請に対応するため、計算資源の効率的活用と低消費電力化を両立する技術が求められている。本研究では、多対多で通信帯域を動的に割り当て可能な多方路エラスティックネットワークアーキテクチャを提案するとともに、光電協調設計および III-V 族半導体とシリコンの異種材料集積技術を用いた低消費電力光トランシーバを開発した。さらに、分散処理に適した新たなリレーショナルデータベースを構築し、ネットワークと一体化した情報処理基盤を実現した。実証においては、提案した多方路エラスティック光ネットワークで複数拠点を接続し、開発した資源管理、動的帯域経路制御下での安定した分散処理性能を確認した。また、100 km 規模の拠点間においてもリアルタイムなデータベースのレプリケーションが可能なレベルの低遅延通信が実現できることを示した。これにより、ネットワーク全体のエネルギー効率を 100 倍以上向上させる可能性を示した。

<異種材料集積プラットフォーム技術を利用した大規模光集積デバイスの研究開発>

InP 小片/SOI ウェハ接合を用いた異種材料集積プラットフォーム技術の検討を行い、これをデジタルコヒーレント伝送向け光デバイスに適用した。光源となる波長可変レーザに関しては、設計の異なる二つの InP 系利得領域を 1 チップシリコン (Si) 光回路上に一体集積した素子を世界で初めて実現し、C 帯および L 帯をカバーする 100 nm を超える広い波長可変域で、単一モード動作および狭スペクトル線幅特性を実証した。光信号を生成するマッハツェンダ (MZ) 変調器に関しては、InP 系量子井戸の非線形効果を利用することで、高い変調効率と、70 GHz を超える広帯域動作が得られた。また、波長可変レーザと MZ 変調器を 1 チップ Si 光回路上に一体集積した素子を作製し、位相変調動作を実証した。光信号を電気信号に復調する受光器に関しては、Si フォトニクスから成る光ミキサ上に InP 系 pin 型フォトダイオードアレイを集積したことで、C 帯および L 帯の全域で、高い受光感度と、60 GHz を超える広帯域動作を実証した。信頼性に関しては、接合集積レーザの高温通電試験において、5,000 時間経過後も実使用条件で安定動作を示すことを確認した。以上から、実施計画の全ての目標特性を達成した。

<10 Tbps 級低消費電力光トランシーバ技術の研究開発>

本項目では、2030 年代に向け 10 Tbps 級大容量・低消費電力コヒーレント光トランシーバを実現する新しいトランシーバアーキテクチャを提案し、その構成技術について有用性と性能を示した。電子回路の機能の一部を光回路へオフロードし、低消費電力化を実現する光 DAC 送信器と TIA レス受信器について、それぞれ、400 Gbps 級コヒーレント信号に対する送受信動作を実証した。光 DAC 送信器では従来の約 2 倍となる 5.5 pJ/bit の電力効率、TIA レス受信器では 1~3 pJ/bit の低消費電力効果を示した。トランシーバ内での光周波数並列化を実現するシリコン光合分波器を開発し、独自の製造誤差補償アルゴリズムに対応した光回路と電子回路によって、2~4 ch 合分波器の自律制御動作による高品位な光フィルタ特性と複数 400 Gbps 信号の合分波を実証した。各技術を組み合わせて、さらに異種材料集積光デバイスを搭載した 400 Gbps×2 波長の並列トランシーバプロトタイプを構築し、実フィールドでの 70 km 伝送に成功。10 Tbps 級への道筋を示した。

<コンピューティング融合多方路エラスティックネットワーク技術の研究開発>

10 Tbps 級光トランシーバを分散コンピューティング環境で高効率に活用するため、多方路エラスティック光ネットワークアーキテクチャにおけるネットワークング技術および分散データベース向けミドルウェアのソフトウェア開発を行った。ネットワークング技術では、トランシーバ内の波長資源を波長単位で柔軟に割り当てる手法を提案し、評価により従来の一対一接続方式と比べ平均 4 倍以上のデータ転送効率向上の達成見込みを示した。さらに、コンポーネント単位で柔軟に光機器を管理制御可能な自動化統合フレームワークを開発し、プロトタイプにより光パス設定・削除を数秒から十数秒で実行可能であることを実証した。分散データベース向けミドルウェア技術開発では、分散処理技術の開発とオープンソースデータベース Tsurugi をベースにデータベースの低遅延・広帯域ネットワークに最適化したレプリケーション技術および分散トランザクション技術を開発した。さらに多様なアプリケーションでの実証を通し、次世代システムのプラットフォームとして有効であることを示した。

<光エレクトロニクス分散コンピューティング動作基盤の実証>

分散コンピューティング実証システムの全体構成および要求仕様を検討し、将来の 10 Tbps 級光トランシーバを見据えたプロトタイプの仕様検討、導入構成および運用形態の検証を行った。異種材料集積光デバイスと新アーキテクチャ技術の有効性を確認するため、異種材料集積光デバイスを搭載した光源・送信・受信ボードと、シリコン合分波器を搭載した MUX/DEMUX ボードを組み合わせ、1 波長当たり 400 Gbps の信号を 2 波長並列で一括送受信可能な光トランシーバプロトタイプを構築した。送信系では光 DAC 方式による 64 Gbaud 16QAM 信号生成を行い、受信系では異種材料集積波長可変レーザおよび受光器と商用 DSP を用いたコヒーレント受信により信号品質を評価した。本プロトタイプをエラスティック光ネットワークに収容し、商用トランシーバ信号との波長多重環境下において、70 km の実フィールド伝送および波長パス切替を含む動的リソース制御が可能であることを確認した。さらに、分散コンピューティングミドルウェア Tsurugi を用いたアプリケーション実証により、Tsurugi の高速データ処理性能への低遅延・広帯域ネットワークの有効性、エラスティック NW によるシステム運用の柔軟性を確認した。併せて、本プロジェクトでの成果と 2035 年までのテクノロジー進化を前提とした光トランシーバのエネルギー消費効率について、コンピューティング基盤としてのエネルギー効率を国プロ提案時よりも 100 倍向上させる可能性を示した。

<国際標準化の研究>

本研究開発の開発要素のうち、光トランシーバに関しては、市場ニーズに対応するための新たな技術・製品について、主として相互運用性（インターオペラビリティ）を重視しつつ、制御手順、消費電力、外形寸法等の多くの項目について国際標準が策定されている。本プロジェクトの成果を将来的に市場に販売する際には、国際標準を満たしている必要があることから、国際標準化を促進させるための次の活動を行った。1) 光トランシーバに関連する国際標準を策定している OIF 及び IEEE802.3 の審議に参画、2) OECC/PSC におけるワークショップの開催、3) 光トランシーバの市場動向予測、4) 本研究開発の成果が具体化するのは 3.2Tbps 以降になることから、3.2 Tbps 以降の光トランシーバの国際標準化活動に関する取組方針を提案した。

<10 Tbps 超光トランシーバ実現のための革新的研究開発>

研究開発項目 6 では、先の将来を見据えて 10 Tbps を超えるための光トランシーバの要素技術について研究開発を行った。変調器および受光器の高シンボルレート化に向けて、導波路構造そのものの寄生容量を低減することが高速動作の鍵であり、III-V 族半導体薄膜を用いたデバイスを検討した。多波長光源では、広帯域かつ温度特性に優れる量子ドットを波長 1.5 μm 帯に利得をもつ InAs/InP 系で作製することを検討した。また、SiN マイクロリングデバイスを用いた光コムによる多波長光の一括発生の高効率化を検討した。多波長化に向けては分散補償が必要となり、現状の DSP による電氣的な補償では消費電力の増大が懸念されるため、高分散なフォトニック結晶導波路による光レイヤでの分散補償素子を検討した。また、多波長素子をワンチップに集積する際の課題として、チップ内での多重散乱を抑制する低損失な集積型光アイソレータの作製を検討した。これらの技術を用いてモジュールのサイズや消費電力を抑制して実現する、多波長コヒーレント送受信器の新規構成を検討した。

<技術委員会・事業化推進委員会の開催、成果普及活動>

プロジェクトの各研究開発項目の進捗内容、および「異種材料集積光エレクトロニクスを用いた高効率・高速処理分散コンピューティングシステム」の基盤技術を実証するためのシステム（基盤実証システム）の仕様などを議論する場として技術委員会を設置した。技術委員会は、プロジェクト関係者に加え研究開発技術に対して高度な専門的知見を有する外部有識者 3 名を委員として招聘し、合計 11 回開催した。外部有識者委員からの客観的な評価とアドバイスを適宜フィードバックすることでプロジェクトを推進し、各研究開発項目において最終目標を達成することが出来た。また、基盤実証システムを構築して基盤技術を実証することが出来た。

また、研究開発技術の早期事業化を目指し、研究開発技術の事業化を担う企業の関係者、光トランシーバの国際標準化に関する関係者を委員として招聘した事業化推進委員会を 2023 年度に設置した。委員会を合計 6 回開催し、事業計画内容について確認および意見交換を行い、早期事業化に向けて計画内容および実施時期を確認した。

さらに、本プロジェクトの成果を普及させるために、国内外の展示会への出展、シンポジウム、最終成果報告会、セミナーなどの開催に加えて本プロジェクトの紹介ビデオを YouTube にて公開して、研究開発技術の優位性を最大限にアピールした。

<実用化・事業化の見通しおよび取り組みについて>

通信トラフィックの継続的な増大と AI 需要の拡大を背景に、データセンタ間(~100km)およびデータセンタ内の双方で、大容量かつ低消費電力な光通信技術への要求が一段と高まっている。特に AI 用途では近距離・高密度接続が増加しており、光通信機器の高効率化に加えて、柔軟なネットワーク制御や大量データを低遅延に処理する基盤技術の重要性も高まっている。

光チップ分野では、異種材料集積波長可変光源に加え、高速・低消費電力・小型という特長を有する異種材料集積変調器・受光器について、本プロジェクトでターゲットとしてきたデータセンタ間だけでなく、データセンタ内も見据えて、顧客ニーズを踏まえた実用化を目指す。

光トランシーバ分野では、3.2Tbps 級以降では従来アーキテクチャの延長による対応が困難と想定される。本プロジェクトで得られた光並列化・低消費電力化技術や新アーキテクチャ検討を活かし、市場要求に適合した次世代大容量トランシーバの実用化・事業化に取り組む。

ネットワーク制御・運用分野では、OSS(オープンソースソフトウェア)として公開した経路計算プログラム FBD_PF を核に、エラスティックネットワークに関する資源制御・最適化技術の研究開発を推

進する。加えて、チュートリアル公開等による情報発信や、標準化フォーラム・コミュニティ活動を通じたエコシステム形成に取り組む。

分散データベース向けミドルウェア技術分野では、本プロジェクトで得られた社会実装例での実証成果を基に、高い書き込み性能、データ分散、および AI 処理の同時実行性を必要とする多様な事業領域において、ソリューション・製品への組み込みを通じた事業化に取り組む。