

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2025 年 4 月 30 日

氏名 森 洋二郎

所属 豊田工業大学

職位 教授

1. 申請研究の題目

データセンタに適するペタビット超級光スイッチネットワーク技術の創出

2. 研究の目的

本研究は、データセンタにおける急速な情報流通量の増加およびエネルギー消費の拡大に対応し、持続可能な情報通信社会の構築を支えることを目的として、革新的なペタビット超級光スイッチネットワーク技術の創出を目指すものである。

現代のデータセンタは、インターネット向けのサーバや通信設備、固定・携帯・IP 電話などの通信基盤を集約し、一元的に運用する建築物群を指す。近年、AI や機械学習技術の急速な進展に伴い、データセンタが処理する情報量は、インターネット全体を流通する情報量の数倍に達しており、今後も指数関数的な増加が見込まれている。加えて、5G/6G ネットワークの普及により、膨大なデータトラフィックの発生が確実視されており、それに伴いデータセンタの果たす役割は一層重要性を増している。一方で、データセンタの消費電力は憂慮すべき水準に達しつつある。低炭素社会戦略センターの調査によれば、2018 年における世界全体のデータセンタの電力消費量は 190 TWh と推定されており、技術革新が進まなければ、2030 年には 3,000 TWh、2050 年には 400,000 TWh に達すると予測されている。現在の世界の電力供給量が約 30,000 TWh であることを踏まえると、データセンタの省電力化は、情報通信社会の持続的発展に向けた喫緊の課題であることは明白である。

データセンタのネットワーク構成においては、伝送路には光ファイバが用いられている一方で、信号の方路制御には電気スイッチが用いられており、これに伴う光電気変換および電気光変換が多大な電力消費を招いている。この問題を根本的に解決するためには、信号を光領域のまま方路制御可能とする光スイッチ技術の導入が不可欠である。特に、数十万台規模のサーバを収容するデータセンタネットワークにおいては、大容量・多ポート・高拡張性を兼ね備えた光スイッチング技術の開発が強く求められている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、低消費電力・大容量性・高拡張性を同時に実現する光スイッチネットワーク技術の確立を目指し、データセンタにおけるエネルギー課題および通信容量拡大に対する革新的な解決策を提供することを目的とする。

3. 研究の内容

本研究では、データセンタネットワークにおける抜本的な省電力化とスケーラビリティの向上を同時に達成することを目的として、新たな三段構成の光スイッチアーキテクチャを提案し、その有効性の実証に取り組んだ。

従来のデータセンタネットワークでは、伝送には光ファイバが用いられているものの、スイッチング制御には電気スイッチが用いられており、そのたびに光電気変換および電気光変換が発生する構造となっている。この構造は、大量のエネルギー損失を不可避とし、ネットワーク全体の電

力消費増加の主要因となっていた。本研究では、これに対して信号を光領域のままスイッチングする光スイッチ技術を適用することで、変換損失の排除およびネットワークの省電力化を目指した。しかしながら、単純に光スイッチを導入するのみでは、データセンタの大規模化に伴う高ポート数・大容量といった要件を満たすことは困難である。従来の代表的な空間型スイッチである MEMS 光スイッチは、精密なミラー制御が必要であり、実現可能なスイッチポート数は概ね 300 程度にとどまっていた。この制約を克服するため、本研究では、空間次元と波長次元の二次元を活用した新たな光スイッチアーキテクチャを設計した。これは、過去に 3,000 ポート超の大規模スイッチングを実現した知見を基に、さらにそれを発展させるものであり、三段構成の新規アーキテクチャを提案するに至った。

提案アーキテクチャは、入力側空間スイッチ、波長ルーティングスイッチ、出力側空間スイッチを直列に構成するものであり、従来の二段構成と比較して光信号の品質に余裕を持たせる設計となっている。特に、空間スイッチの一部を光増幅器以降に配置することで、従来課題とされていた損失の集中を緩和し、より大規模なスイッチングネットワークの構築を可能とした。本アーキテクチャの有効性を、現実的なデバイス性能を前提とした詳細なシミュレーションにより検証した結果、12,288 ポート規模のスイッチ構成が実現可能であることを確認した。さらに、本研究ではこの設計指針に基づき、32 Gbaud の DP-16QAM 信号を 96 波長多重した超大容量信号を用いて、世界最高スループットとなる 17.2 Pbps を達成する $12,288 \times 12,288$ 構成の光スイッチプロトタイプを構築し、その動作を実証した。実験では、シミュレーション予測と良好な一致を示し、ターゲット信号およびクロストーク信号を含む厳しい条件下においても、すべての信号に対してビット誤り率が前方誤り訂正の閾値を十分に下回ることが確認された。

4. 研究の成果と結論、今後の課題

本研究においては、新たに提案した三段スイッチアーキテクチャの有効性を理論および実験の両面から検証し、データセンタ向け光スイッチ技術における飛躍的な進展を実現することができた。

まず、提案アーキテクチャのシミュレーション評価では、従来の二段スイッチ構成が最大 7,424 ポートに制限されるのに対し、12,288 ポート規模のスケラビリティが実現可能であることを示した。この成果は、空間スイッチと波長ルーティングスイッチの最適配置により信号損失の集中を抑制し、光増幅器への負荷を分散できたことに起因している。この設計により、従来の光スイッチアーキテクチャにおいて越えられなかったポート数の限界を打破することが可能となった。続いて実施した実証実験では、32 Gbaud DP-16QAM 信号を 96 波長で多重した超大容量信号を用いて、 $12,288 \times 12,288$ ポートの光スイッチ試作機の動作検証を行った。その結果、総スループットは 17.2 Pbps に達し、これは既存の光スイッチ技術の中で世界最高水準の性能と評価される。さらに、ターゲット信号およびクロストーク信号を考慮した厳しい条件下においても、全ての伝送路においてビット誤り率が前方誤り訂正の閾値を十分に下回ることが確認され、システムの高い信頼性が実証された。これらの結果は、シミュレーション予測とも良好な一致を示しており、提案アーキテクチャの妥当性を強く裏付けるものとなった。以上の成果により、本研究は単なる局所的な改良にとどまらず、データセンタネットワーク設計におけるパラダイム転換の可能性を明確に示した。従来型の電気スイッチネットワークから、完全光スイッチネットワークへの移行を技術的に可能とし、情報通信インフラの持続可能な発展に向けた実質的かつ構造的な貢献を果たしたと評価できる。

一方、今後の課題としては、より現実的な大規模データセンタ環境を想定した実証検証が必要である。特に、12,288 ポート全体をフルに活用した高負荷環境下での長時間連続運用試験を通じて、システムの耐久性および安定性を総合的に評価する必要がある。加えて、トラフィックパターンの動的変化に柔軟に対応するため、スイッチングパスの再構成時間のさらなる短縮や、パス切替時のスムーズな遷移を実現する制御アルゴリズムの最適化も不可欠である。さらに、装置モジュールの小型化と省電力化、システム全体の熱設計の最適化、多心ファイバや空間分割多重技術との有機的統合による拡張性の向上など、今後の研究開発に向けた技術的課題も明確と

なった。これらの課題に継続的に取り組むことで、本研究成果を基盤とする次世代型データセンタネットワークの実用化を一層加速できるものと期待される。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

本研究は、光スイッチアーキテクチャ設計における根本的な制約条件を打破し、空間・波長・段数という三つの次元を複合的に最適化する新たな設計指針を提示した点において、極めて高い学術的意義を有する。従来、光スイッチのスケラビリティ向上は、光損失および増幅器の設計上の限界によって制約されてきたが、本研究ではスイッチ内部の損失分布を再設計することにより、これらの制約を克服し、世界最大規模となる 12,288 ポートの光スイッチングを実現した。

また、提案アーキテクチャの有効性を、シミュレーションおよび実証実験の両面から明確に裏付けた点は、学術研究としての信頼性の観点から極めて高く評価されるべきである。これにより、今後の超大規模データセンタネットワーク設計において、本研究成果は理論および実装の両面で基盤的な指針を提供するものとなった。Beyond 5G/6G, AI 基盤システム、およびメタバース社会に向けた情報通信インフラの進化において、本研究で示された技術が重要な役割を果たすことが大いに期待される。

さらに、本研究成果に関連する知見は、国際的な発信にも積極的に取り組まれている。中核的学術誌である IEEE/Optica Journal of Lightwave Technology において論文が掲載されたほか、主要な国際会議である European Conference on Optical Communication (ECOC), Photonics West, IEEE Photonics Conference (IPC), および Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) においても関連成果を報告している。これらを通じて、本研究テーマが国際的にも高い関心を集めていることが裏付けられており、世界的な学術貢献としての意義を一層高めている。

5-2. 社会的価値

本研究は、今後ますます深刻化するデータセンタの電力消費問題に対し、具体的かつ実現可能な解決策を提示するものであり、その社会的意義は極めて大きい。現状の延長線上では、2030 年以降にデータセンタが世界の電力供給量の大部分を占めるとの予測も存在するが、本研究成果を活用することで、このような危機を回避し、持続可能な情報通信社会の構築に向けた基盤を提供できる。さらに、本研究で確立した光スイッチング技術は、5G/6G, AI, IoT, メタバースといった次世代社会インフラの発展を支える中核技術であり、社会全体の経済発展および利便性の向上に直接的な貢献をもたらす。また、日本発の先進的光通信技術として、国際的競争力の強化ならびに世界市場におけるプレゼンス向上にも寄与することが期待される。脱炭素社会の実現に向けた重要な柱として、情報通信分野から地球規模の課題解決に資する意義は極めて大きい。

本研究は、現代および将来の情報通信社会において不可避となるデータセンタの省電力化・高性能化という課題に対し、光スイッチネットワーキング技術の革新によって応えることを目指して遂行された。申請段階において提示した課題認識は、研究の遂行および成果において一貫して支持されており、むしろ現代社会における本研究の意義は一層明確となった。本研究が提示した設計指針および技術成果は、今後の超大規模データセンタ, AI プラットフォーム、そして Beyond 5G/6G 時代の情報通信インフラにおいて、持続可能性と性能向上を両立するための不可欠な要素となると期待される。一方で、全ポート稼働下での耐久性試験、高速パス再構成制御、小型・省電力モジュール設計など、今後解決すべき技術的課題も明確となった。これらの課題解決に向けて、本研究成果を出発点としつつ、さらに高度なスイッチングネットワーキング技術の発展を目指すことにより、情報通信社会の持続的成長と、脱炭素社会の実現に向けた貢献を着実に進めていきたいと考える。

6. 研究成果

学術雑誌論文

- [1] T. Mitsuya, R. Higuchi, T. Kuno, T. Ochiai, H. Yuasa, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Three-Stage Optical Circuit Switch Architectures for Intra-Datacenter Networking," *IEEE/Optica Journal of Lightwave Technology*, vol. 43, no. 2, pp. 400-407, January 2025. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3465208>

国際会議論文

- [1] T. Sekizuka, T. Kuno, R. Higuchi, R. Shiraki, Y. Mori, and H. Hasegawa, "EPPN Mitigation by Local Oscillator Phase Isolation with Dual Pilot Carriers," *SPIE Photonics West*, paper 13374-18, San Francisco, USA, January 2025. <https://doi.org/10.1117/12.3040642>
- [2] K. Kagawa, T. Kuno, R. Higuchi, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Laser-frequency Transition Measurement Using Coherent Receivers with Coded Local Oscillators," *IEEE Photonics Conference*, paper MD1.2, Rome, Italy, November 2024. <https://doi.org/10.1109/ipc60965.2024.10799719>
- [3] T. Sekizuka, T. Kuno, R. Higuchi, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Robustness of Adaptive Symbol Decision against Transmitter Impairments on GS-QAM Signals," *IEEE Photonics Conference*, paper TuF3.3, Rome, Italy, November 2024. <https://doi.org/10.1109/ipc60965.2024.10799689>
- [4] T. Kuno, Y. Mori, and H. Hasegawa, "11,520 × 11,520 Optical Circuit Switch for Intra- and Inter-datacenter Converged Networks," *IEEE Photonics Conference*, paper MD2.2, Rome, Italy, November 2024. <https://doi.org/10.1109/ipc60965.2024.10799666>
- [5] T. Kuno, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Demonstration of 12,288 × 12,288 Optical Circuit Switch with 17.2 Pbps Throughput for Intra-datacenter Networks," *European Conference on Optical Communication*, paper W2A.125, Frankfurt, Germany, September 2024.
- [6] T. Kuno, T. Mitsuya, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Demonstration of Low-complexity Digital Coherent Receivers for Intra-datacenter Networks," *IEEE Summer Topicals Meeting Series Co-Located with Photonics in Switching and Computing*, paper TuA2.4, Bridgetown, Barbados, July 2024. <https://doi.org/10.1109/sum60964.2024.10614568>
- [7] T. Sekizuka, T. Kuno, R. Higuchi, T. Ochiai, Y. Mori, and H. Hasegawa, "Experimental Demonstration of NN-based Symbol Decision to Mitigate Transmitter Impairments," *Opto-Electronics and Communications Conference*, paper MoB1-4, Melbourne, Australia, June 2024.

以上