

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220905

研究課題名(和文) データセントリック新世代光ネットワーキングの研究

研究課題名(英文) Development of new-generation data-centric optical networks

研究代表者

佐藤 健一 (Sato, Ken-ichi)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00377805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 154,500,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバ中の光信号を電気信号へ変換することなく直接経路制御を行う「フォトリックネットワーク」において、複数コアを有する光ファイバを活用する次世代空間多重伝送技術、スケーラブルな光ノードアーキテクチャ、光ファイバの周波数資源を極限まで利用する伝送技術、経路制御における信号劣化を低減し全国網・都市内ネットワーク全体を一体としてトランスペアレントに統合可能なネットワークアーキテクチャ、等を融合し、従来に無い超大容量・超低消費電力・ネットワークの大規模化を実現した。各技術の指標全てについて研究開始時に設定した目標値を達成することに成功し、総合的な性能指数を従来比で2400倍向上させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

増加率が年率+20～30% (6.2～13.8倍/10年)にも達する通信トラフィックを効率良く収容する次世代フォトリックネットワークが、現実的な装置コストおよび消費電力で構成できることを明らかにした。これにより将来にわたって発展可能な情報通信インフラストラクチャの実現可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Making the best use of cutting-edge technologies such as; next-generation spatial division multiplexing on multiple-core fibers, scalable node architectures, advanced optical transmission that can maximally utilize frequency resources of fibers, and network architectures that enable transparent and seamless operations of national-wide and metro-area networks where transmission impairment is substantially reduced, we have achieved substantial network capacity enhancement, high energy efficiency, and excellent frequency utilization in photonic networks where routing operations are effectively conducted in the optical domain. Metrics in each technology, i.e. spatial multiplexing degree, maximum number of nodes that can be traversed by an optical path, maximum fiber degree of node, and frequency utilization efficiency has been substantially expanded so that they exceed the original target values. The product of the metrics yields 2,400 times of the present product value.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：フォトリックネットワーク コヒーレント伝送 空間多重 光クロスコネクタ 光分岐挿入ノード 光パス

## 1. 研究開始当初の背景

**ネットワーク利用状況の変化:** 2010年にはGoogleの扱うトラフィック量は、グローバルインターネットトラフィック総量の6%を超えたとされている。近年のハイパージャイアントコンテンツホルダの出現によりインターネットトラフィックの交流状況は、旧来の複数の階層的ネットワーク構造に適したのからよりフラットなメッシュ的な交流へと大きく変化している。また、最近のSDNサービスの進展、並びに激甚災害耐力の拡大に対応できる、フレキシビリティが大幅に向上した次世代のフォトニックネットワークング技術の研究開発が求められている。

**フォトニック技術の進展:** デジタル信号処理技術の発展により、長い間経済的に利用出来なかったコヒーレント光通信技術が利用可能となり、光周波数の利用効率が格段に向上しつつある。また、光周波数間隔の標準が1990年代の半ばに国際標準化された固定グリッドから、2012年の新しい標準化勧告により、フレキシブルグリッドへと進化し、これらの技術を統合することで周波数軸上のフレキシビリティが最大限利用できるネットワークを創出できる環境が整いつつある。

**将来ネットワーク構築への課題:** 1990年代の初頭に提案され、2000年代の初頭から導入された波長ルーティングを用いた光パス技術により、それまでのノードでの光/電気、電気/光変換と電気処理によるルーティングから、光のまま、波長によるセルフルーティング（ビット当りの消費電力を2-3桁低減）が利用できる様になり、ノードの大容量化と経済化が進展しつつある。しかしながら、現在の光ノードは、デバイス並びにアーキテクチャの制約により利用できるファイバ数は8程度に限られ、また、フレキシブルに信号の分岐/挿入（add/drop）が出来ない。一方、スマートフォンの浸透に代表されるトラフィックの継続的な増加（無線トラフィックは世界的に年率60%以上の増加）により将来的にノード間には複数のファイバが必要となる。即ち収容ファイバ数の大幅な拡大並びに自由なadd/dropが可能な光ノードの実現が求められている。

本研究はこれらの課題を解決し、上記ネットワーク利用状況の変化に対応できる新たなパラダイムのネットワークの構築を目指す。具体的には、(1) フォトニック技術の進展（コヒーレント技術、フレキシブルグリッドを用いたエラスティック光パス）を最大限に活かせるフレキシブル大容量光ネットワークアーキテクチャ、(2) 光のままの多段ノードの転送並びに将来的にマルチコアファイバの利用を可能とする新たな光ノード/光部品構成、(3) それに適した高効率コヒーレント光伝達技術を開発する。光ノード、コヒーレント光伝送、エラスティックネットワークの個々の技術に関しては国内外で様々な研究開発が行なわれており、申請者らは各々それらを世界的に先導してきた。しかし、それらを有機的に統合し相互の最適化を図った新しい世代のネットワークング技術の研究開発は未だ行なわれていない。

## 2. 研究の目的

近年のハイパージャイアントコンテンツホルダ（Google, Facebook, Akamai等）の出現によるインターネットトラフィック交流状況の大きな変化、並びにSDN（Software Defined Network）の進展による光レイヤを含むネットワークのフレキシビリティの拡大要求に対応可能な、超大容量・低消費電力フォトニックネットワークング技術を開発する。本研究では、デジタル信号処理技術の進展により実用化が可能となったコヒーレント光通信技術、これまでの固定グリッドに代わり、2012年に勧告化（ITU-T）されたフレキシブル光周波数グリッド技術、革新的な超大容量光ノード構成技術、空間多重技術を有機的に統合し、周波数軸上の利用効率並びにフレキシビリティを最大化（3桁の性能向上を目標）する新しいパラダイムのフォトニックネットワークを創出する。

## 3. 研究の方法

下記の研究開発により、従来技術と比べ性能指数を3桁以上向上できるフォトニックネットワークを開発する（図1参照）。

### (1) フレキシブル超大容量光ノード構成技術:

a. 多ノード経路における光フィルタ機構による伝達特性劣化を最小化する新しい転送方式とノード構成の研究開発（メトロを含む最大20-40段（現状は最大16段）の超高密度トランスペアレントな光ノード転送を実現）。

b. 収容光ファイバ数160程度（現状は最大8）まで拡大可能で、フレキシブルなadd/dropを実現できる光ノードに必要なキーとなる各種光部品の研究開発（超小型チューナブル光フィルタ、ファイバ選択スイッチとの集積化光部品等）とそれを用いたノードシステムの実証を行なう。

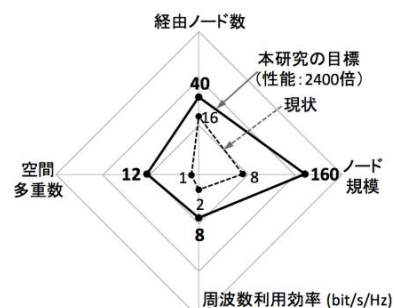


図1 本研究で目標とする性能

## (2) フレキシブルコヒーレント光伝送技術:

- コヒーレント光受信器を用いることにより、光フィルタを用いることなく、波長チャンネルを分離することができる。このような受信器の波長分離機能を用いた場合における、光スイッチングの新しい構成について検討する。
- コヒーレント変復調方式における、大規模光波長スイッチにおけるクロストークの影響に関して、定量的な評価を行なう。
- フレキシブルグリッドに送信用レーザ、局発用レーザの波長を固定する手法の研究を行い、周波数利用効率を極限まで向上させる（従来比4倍: 8bit/s/Hzの達成）。

## (3) エラスティック光パスネットワーク技術:

多様な光チャンネルを、自在に光周波数軸上に収容するエラスティック光ネットワークにおいて、光パスの物理的収容条件に応じて、転送距離と周波数利用効率を最適化するネットワーク方式を開拓する。また、光周波数軸に加え、時間軸、空間軸（多重数12倍）などの多次元の自由度を駆使したハイパーチャネル等の新しいコンセプトに基づく光ネットワークアーキテクチャと実現技術を考案し、有効性を検証する。

### 4. 研究成果

研究開発の結果、前述の目標値を全て満たす成果を得ている（図2）。得られた成果は互いに併用可能で有ることから、提案技術を織り込んだネットワークは、従来のネットワークに比べて飛躍的な性能向上が達成される。以下では各研究項目における困難な課題とその解決方針、並びに得られた成果を述べる。

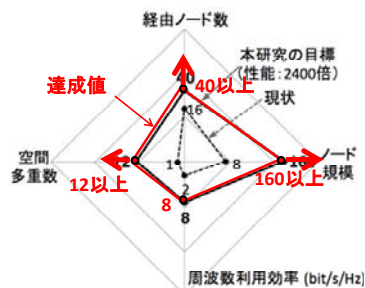


図2 本研究での達成値

### (1) フレキシブル超大容量光ノード構成技術:

#### [概要]

**(項目 a)** 光パスをグループ化し、グループ単位での経路制御を導入した新たなネットワークアーキテクチャを2種類提案した。グループ単位での経路制御は、原理的にはノード経路時のフィルタによる信号劣化を零とするため、ノード通過可能段数を飛躍的に増加させることができる。これにより目標値である40段を達成した。

**(項目 b)** ノードのファイバ次数で決まる大規模スイッチを用いた従来のノード構成法に代わり、小規模なスイッチを並列にノード内に配置する新たな構成法を考案した。従来はノードのファイバ次数に応じてハードウェア規模が非線形に増加する問題を解決し、任意次数への逐次的な増設が可能となった。ネットワーク全体をシミュレートする数値実験により、経路制御性能と優れた伝送特性、そして目標値であるノードのファイバ次数160を達成できることが明らかとなった。

以上の研究開発はその先進性が評価され、招待論文4編（うちIEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 3編・IEICE Transactions on Communications 1編）、および最高峰の国際会議 Optical Fiber Communication での Selected Paper 2編 (IEEE/OSA Journal of Journal of Optical Communications and Networking)、国際会議 Top Scoring Paper 3編 (IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 2編・IEEE Photonics Journal 1編) が出版されている。また、国際的な賞を4件 (Best Student Paper Award 1st Prize (OSA Advanced Photonics Congress 2018)・Optical Communications Best Technical Paper Award (SPIE Photonics West)・Semifinalist of Best Student Paper Award (ECOC2017)・Best Paper Award (IEEE International Conference on Photonics)) 受賞している。

#### [詳細]

**(項目 a)** データセンター間の通信を効率的に実現する、あるいは増加するトラフィック全般の効率的な処理を実現する上では、全国（コア）ネットワークと都市内（メトロ）ネットワークとを融合した効率的な運用が鍵となる。これらのネットワークは従来境界ノードで分離され、即ち境界ノードで光パスを常に終端することによりノード経路段数を低く抑えてきた。しかし融合された大規模なネットワークを実現するためには、可能な光パスのノード経路段数を飛躍的に増加させる必要が有る。ノードでは個々の光パスを分離するフィルタリングが経路制御に欠かせないが、フィルタリングに伴う信号劣化が段数を大きく制限する要因となっていた。

そこで光パス（チャンネル）をグループ化してのグループ単位でのフィルタリングと、グループ間に広い空き波長領域（ガードバンド）を挿入することで、フィルタリングによる信号劣化の影響をほぼ零とすることに成功した。雑音等の他の劣化要因を除けば、ほぼ無制限の経路ノード数が達成される。更にグループ化により光ファイバ内のガードバンド総量を小さくできるため、光ファイバの容量を実質的に3割程度増加させることができる。グループ単位でのルーティングは現行の波長選択スイッチ(Wavelength Selective Switch, WSS)のフィルタの設定を

制御することで実現でき、ハードウェアの変更は一切不要で有ることも大きな利点である。一方、グループ化によって発生するルーティング効率の低下を最小限とし、光ファイバ容量を最大限化するために、グループ化に関する論理的な構造を2種類 (Grouped Routing, Virtual Direct Link) 提案した。これらは共にグループ単位と光パス単位の経路制御を適切に混在させてグループ内を光パスで満たす (グループ毎の光パス収容効率を向上させる) 機能を有する。グループ化を導入したコア・メトロ融合型ネットワークの有効性を示すために、様々なネットワーク形状における広範囲な数値実験を行い、ネットワーク全体としての容量が従来比約3割向上することを明らかにした。

(項目 b) ノードでは、波長選択スイッチと呼ばれる周波数毎に独立に出力ポートを選択できるデバイスを用いる。典型的な出力ポート数は9或いは20であり、今後40程度までの増加が見込まれるが、周波数毎・出力ポート数毎の個体差の調整が必要であることからポート数の増加につれて極めて高コストとなり、また構造上一定以上のポート数の増加は困難である。従来ノードでは全ポート間を接続するためにWSS単体のポート数以上の場合は、WSSのカスケード接続が避けられず、膨大なWSSが必要となった。また、ノードを通過する光パスも、多くのWSSを通過することで大きな劣化を受けていた。

我々はネットワーク内の光ファイバ数が増加したとしてもネットワーク形状自体は不変であることから、従来実現されていたような、全入出力ポート間での任意のルーティングは不要との結論に至った。そこで我々はまず小規模ノードを相互接続した「サブシステム構成」を導入し、続いて「疎結線ノード」の性能評価を実施した。前者ではサブシステム単位、後者では1ポート単位での逐次増設が可能であり、また共にノード次数に比例してWSS数が増加する (非線形的に増加しない) 優れた特性を有する。即ち、ハードウェア規模の観点からは実質的に無制限の規模拡大が可能となった。多様なネットワーク形状及び様々なシナリオの下でこれらアーキテクチャの性能を検証しており、最大ファイバ次数160~180のノードを有するネットワークでの有効性を数値的に明らかにしている(IEEE/OSA JOCN 投稿論文)。

## (2) フレキシブルコヒーレント光伝送技術:

### [詳細]

(項目 a) コヒーレント受信器を用いた光電氣的波長多重分離技術を提案し、その有効性を実験により示した。高密度に波長分割多重された光信号を光領域で分離するためには極めて急峻なカットオフ特性を持つ光フィルタを要する。しかし、現実の光フィルタは数GHzのスロープを有しておりこの要求を満たさない。これを解決するために、光電氣的波長多重分離技術を提案し、その有効性を光デバイスの試作および伝送実験により確認した。試作した光フィルタにより非対象信号を減衰させた後に残留した信号成分をコヒーレント受信器の波長多重分離機能により除去する。このように光フィルタの役割を補助的役割に留め、コヒーレント受信器の多重分離機能により処理することで、超高密度波長分割多重信号をペナルティなく分離可能であることを示した。本成果に関して、OFC2017において口頭発表した。

(項目 b) コヒーレント通信において、レーザの周波数の時間経過に伴う変動がクロストークの主要因となる。レーザ周波数の周波数変動特性を定量的に評価する手法を考案し、その有効性をシミュレーションおよび実験により確認した。三つのレーザを相互に干渉させ、コヒーレント検波後に適切なデジタル信号処理を行うことで、各レーザの周波数変調雑音スペクトルを抽出することが可能となる。本成果に関して、CLEO-EUROPE2017、CLEO-PR2018において口頭発表した。また、本技術に関して特許出願 (国際・国内) を行った。

(項目 c) 送信用レーザと局発用レーザの波長の不一致により信号品質が劣化する。この問題を解決するため、受信器のデジタル信号処理により周波数不整合を補正する技術を提案し、その有効性を示した。従来、周波数不整合の補正と、送受信器の不完全性に由来するIQ不整合を同時に補償することは困難であった。一方、本提案技術は、周波数不整合補償フィルタとIQ不整合補償フィルタを相互補完的に結合することで、これらの補償の両立を実現している。本研究の成果は、IEICE General Conferenceにおいて発表したほか、本技術を用いて検証を行い、その成果をIEICE Communication Express, ECOC2018において発表した。

## (3) エラスティック光パスネットワーク技術:

### [概要]

本課題では、最終目標である光周波数軸と空間軸を駆使した新しいコンセプトに基づく光ネットワークアーキテクチャと実現技術の創出に向け、まず、光周波数軸の効率的活用方法 (具体的には、光パスの物理的収容条件に応じて、転送距離と周波数利用効率を最適化するネットワーク方式) の開拓に取り組み、これらの結果を、IEEE/OSA Journal of Lightwave Technologyの招待論文を含む査読付き論文 (3件)、ならびにECOC 2016の招待講演を含む査読付き国際会議発表 (3件) として発表した。これらの知見と空間分割多重 (SDM) 技術のネットワーク的検討結果をもとに、目標の空間多重数12を満足する、光周波数軸と空間軸を駆使した光ネットワークアーキテクチャを創出し、これを実現するための新たな光スイッチを考案して特許出

願するとともに、この光ネットワークが実現可能であることを解析的ならびに実験的手法により実証し、計画に掲げた目標を達成した。これらの成果は、2件の招待論文 (IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 電子情報通信学会 B 論文誌) を含む査読付き論文 (4件, 内発刊予定1件), ならびに2件の招待講演 (OECC/PSC 2019, NETWORKS 2019) を含む査読付き国際会議発表 (11件, 内発表予定3件, 投稿中1件) として発表した。また、国際会議 OECC/PSC 2019 にて Best Paper Award を受賞した。具体的な成果は以下の通りである。

#### [詳細]

光ネットワークの一層の容量拡大のため、SDM 技術を採用した新構造のファイバが研究されている。SDM ファイバとしては、単一モードコアをクラッド内に複数配置するマルチコアファイバ (MCF) と、MCF 内のコアを複数の空間モードが伝搬可能となるよう設計した複数モードマルチコアファイバ (FM-MCF) の研究開発が進行中である。本研究では、両者の研究開発トレンドを睨みながら、SDM ファイバを収容可能な光ネットワークアーキテクチャとして、(1) 波長軸と空間軸の2軸を混在運用する SDM×WDM フラット型アーキテクチャと、(2) 2軸を独立運用する SDM/WDM 階層型アーキテクチャの構築と実現技術の創出に取り組み、下記の成果を達成した。

SDM×WDM フラット型アーキテクチャについて、欧米の研究機関と共同で、チャンネル割り当て、リソース最適化、デフラグメンテーション、IP/オプティカルレイヤの最適化、仮想化など、多面的な検討を重ね、その成果を IEEE Communications Magazine の SDM 光ネットワーク特集号にて発表した。また、各種 SDM ファイバに共通して対応可能な集積化波長選択スイッチ (WSS) アーキテクチャを考案し、特許出願した。本 WSS は LCoS の分割とジョイントスイッチングの2つの機構に基づくものであり、既存の光デバイスの性能データに基づく解析により、例えば3モード8コア (空間多重数 24) の FM-MCF を伝搬する光信号を7方路へ部分ジョイントスイッチング可能であることを示した。考案した WSS アーキテクチャに基づき、各種 SDM ファイバの中で最も高い空間利用効率が期待される、FM-MCF (2空間モード3コア) に適用可能な1×2 WSS を実際に試作し、200 Gb/s 空間スーパーチャンネル一括スイッチングの基本動作を世界で初めて実証した (PSC 2018)。

一方、SDM/WDM 階層型アーキテクチャについては、これを構成する増設性と信頼性に優れた2種類の空間クロスコネクタ (SXC) アーキテクチャ (サブマトリクススイッチ SXC とコア選択スイッチ SXC) を新たに考案し、空間多重数 64 程度の MCF を収容する SXC を既存の光スイッチと MCF 用の空間多重分離デバイスを用いて構築可能であることを明らかにした。また、その低損失性により、空間バイパスする光信号の伝送可能距離を2倍以上に延伸できることを理論解析により示した。以上の成果を IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking の招待論文として発表した。また、4コア3バンドル MCF (空間多重数 12) と市販光スイッチを用いて SDM/WDM 階層型ネットワークテストベッドを構築し、1-Tb/s 級空間チャンネルを用いて、WDM/SDM 階層型ネットワークの実現性を世界で初めて実証した (ECOC 2019 投稿中)。さらに小型化・経済化が期待される空間光学型コア選択スイッチ SXC を考案し、特許出願するとともに、4コア MCF を用いた空間チャンネル切り替え実証実験に成功した (OECC 2019 発表予定)。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計29件)

うち招待論文7件

1. M. Jinno, “Spatial Channel Network (SCN): Opportunities and Challenges of Introducing Spatial Bypass Toward Massive SDM Era [Invited],” IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 11, pp.1-14, 2019. 査読有 (招待論文)
2. M. Niwa, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato, “Tipping point for the future scalable OXC: what size MxM WSS is needed?,” IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking 9, pp. A18-A25, Feb. 2017. 査読有 (招待論文)
3. K. Ueda, Y. Mori, H. Hasegawa, H. Matsuura, K. Ishii, H. Kuwatsuka, S. Namiki, T. Watanabe, and K. Sato, “Fast optical circuit switch for intra-datacenter networking,” IEICE Transactions on Communications E100-B, pp. 1740-1746, Oct. 2017. 査読有 (招待論文)
4. M. Jinno and Y. Mori, “Unified Architecture of an Integrated SDM-WSS Employing a PLC-Based Spatial Beam Transformer Array for Various Types of SDM Fibers,” IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 9, A198-A206, 2017. 査読有
5. K. Ueda, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato, “Large-Scale Optical-Switch Prototypes Utilizing Cyclic Arrayed-Waveguide Gratings for Datacenters,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 34, pp. 608-617, Jan. 2016. 査読有 (Top Scoring Paper)

〔学会発表〕（計 110 件）  
うち招待講演 27 件・国際会議発表 64 件

1. M. Jinno, “Spatial channel cross-connect (SXC) architectures and their enabling technologies for future spatial channel networks(SCNs),” *Photonic Networks and Devices (NETWORKS)* (2019). 査読有（国際会議・招待講演）
2. Y. Mori and K. Sato, “Large-Scale Optical Circuit Switch Architecture for Intra-Datacenter Networking,” OFC (2018). 査読有（国際会議・招待講演）
3. K. Sato, “Role of Grouped Routing in Creating Cost Effective and Bandwidth Abundant Networks,” *ICTON* (2017). 査読有（国際会議・招待講演）
4. H. Hasegawa and K. Sato, “Theory and progress of large-scale optical switching and elastically-hybrid optical switching,” *Photonics in Switching* (2017). 査読有（国際会議・招待講演）
5. M. Jinno, “Roles and benefits of elastic optical networks in beyond 100-Gb/s era,” 42nd European Conference on Optical Communication (2016). 査読有（国際会議・招待講演）

〔産業財産権〕  
○出願状況（計 4 件）  
内訳：国内 3 件・国際 1 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：菊池 和朗

ローマ字氏名：Kazuro Kikuchi

所属研究機関名：東京大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8 桁）： 50134458

研究分担者氏名：神野 正彦

ローマ字氏名：Masahiko Jinno

所属研究機関名：香川大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号（8 桁）： 10503550

研究分担者氏名：長谷川 浩

ローマ字氏名：Hiroshi Hasegawa

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）： 40323802

研究分担者氏名：森 洋二郎

ローマ字氏名：Yojiro Mori

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8 桁）： 10722100