

2.6.1 光通信

（1）研究開発領域の定義

光ファイバー上で光信号を送受信することで実現される通信技術である。広大な周波数領域による超大容量と、超低遅延・超低消費電力を実現する。無線通信技術との連携による大容量携帯電話通信の実現を含め、通信ネットワークの基盤技術として必要不可欠なものである。光通信技術自体はすでに社会で広く用いられているものであるが、情報通信社会の発展と共に通信量が急増し続けており、要求特性も厳しくなっていることから、これら社会の要請を満足させる通信ネットワークを実現する上での革新的な技術を創成し続ける必要がある。

（2）キーワード

光ファイバー、光通信ネットワーク、大容量伝送、低消費電力、フレキシブルグリッド、波長多重、空間多重、マルチバンド伝送、光ファイバー無線、Software Defined Networks、機械学習

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

光通信ネットワークは情報通信社会の基盤インフラの地位を占めており、普及・大容量化が進む携帯電話においても、端末と無線基地局間の無線通信以外の部分はおおむね光通信に依存している。情報通信社会の要であるデータセンターについても、その内部の通信量がインターネット全体の通信量に数倍¹⁾ するものになっており、光通信技術のさらなる導入が期待される。すなわち光通信技術は情報通信社会の至る所で使われる必須技術であり、その研究開発レベルを高めることが常に必要とされる。後述のBeyond 5G研究開発促進事業²⁾ やIOWN³⁾ 等の将来ネットワークの研究開発においてもEnd-to-Endのネットワークにおける低消費電力化やデータ伝送の高速化・大容量化は前提となっており、それらを担う光通信の基盤技術としての研究開発の意義は大きい。

【研究開発の動向】

光通信は光ファイバー上で超大容量、超低消費電力を実現する通信方式であり、大陸間の海底ケーブル、全国網から、家庭・オフィスへのアクセス網や5G携帯電話での基地局との通信に至る広範な領域で用いられる。光通信では、適用するネットワーク領域において「コスト」「通信速度」「通信距離」の指標に鑑みて、適用するその技術レベルが選択される。

通信路の限界容量は、使用する周波数帯域幅と信号・雑音の電力比によって規定される⁴⁾。光通信の超大容量は、光ファイバーで使用可能な広大な周波数帯域に起因している。その広大な周波数帯域のうち、伝送損失が少なく、かつ伝送損失を補償する増幅器として、エルビウムをドープしたファイバーを用いた最も一般的な光増幅器⁵⁾ が利用可能なC帯（波長1550nm近辺の領域）が一般的に用いられる。ただし、数メートル～数百メートル程度の増幅が不要な通信においてはより短波長（波長850nm,1300nm）が用いられる。全国網や都市内ネットワークでは、C帯に異なる周波数（波長）の信号を数十～百程度多重して1本の光ファイバーに収容している。光ファイバーに収容された信号は、電気信号に変換されることなく波長多重信号として一括増幅され、通信ノードにおいて、波長分離機能とスイッチ機能を兼ね備えた波長選択スイッチ⁶⁾⁻⁹⁾ により個別に経路制御される。光信号はその始点と終点とを直接結ぶ光パスとして扱われ、その容量は変調方式と占有帯域幅によりおおむね決定する。

光通信において光信号を交換する始点から終点までの伝送路を光パスと呼ぶ。光通信ネットワークでは、光パスあたりの容量と波長数とを高めることで光ファイバーの容量拡大を実現してきた。さらに光パスに割り当てる周波数帯域幅を可変としたフレキシブルグリッド¹⁰⁾ を用い、周波数利用効率を極限まで推し進めるエ

ラステック光パスネットワークの概念が広まった^{11), 12)}。2010年代には、フレキシブルグリッドの国際標準化を経て、可変周波数帯域に対応した送受信器¹³⁾⁻¹⁵⁾や波長選択スイッチの研究開発や商品化が進められてきた。しかし、伝送損失が最小となるC帯であっても必須である信号増幅では雑音が発生し、雑音の影響を受けやすい16QAM等の高次変調を用いて周波数利用効率を高めることは容易ではない。また、フレキシブルグリッドにより光パス間の周波数間隔を狭めて周波数利用効率を高めることができるようになったが、通信ノードでの経路制御時には個々の光パスを分離する光フィルタリング^{16), 17)}が必須であり、これに伴う帯域狭窄化を避けるために光パス間にガードバンドと呼ばれる空きを設ける必要があることから、この方法による周波数利用効率の向上にも限度がある。すなわちC帯に限定しての光ファイバー容量の向上は限界に達しており^{18), 19)}、2010年代半ば以降、マルチコア・モードファイバーを用いた空間多重伝送、そしてC帯以外の帯域も用いるマルチバンド伝送²⁰⁾⁻²³⁾が盛んに検討されるようになった。また、光通信ネットワークの接続関係や周波数割り当て等を動的に制御し、限られたネットワーク容量を通信トラフィック分布の変化に適応して最大限活用することを可能とするトランスポートSDN（Software Defined Network）の研究開発が進んだ^{24), 25)}。さらにOpenROADM^{26), 27)}をはじめとする光ノード装置のオープン化の流れは、装置の低廉化と、マルチベンダーでのネットワーク実現を推し進めようとしている。光ファイバー中の伝送技術においても、既にデジタル信号処理を最大限活用したデジタルコヒーレントが主流になっているが、そのプログラマビリティを最大限活用し、効率的に大容量化を可能とするための送信信号の最適化や受信側でのより高度なパラメータ推定や判定の検討が進んでいる²⁸⁾⁻³⁰⁾。

一方、光通信は第5世代や今後の無線通信でも重要な役割を占めている。既存周波数資源の枯渇と高速通信の要求に応えるために、無線通信ではより高い周波数へと移行しているが、高周波信号の有する直進性および高い減衰の観点から多数のアンテナを設置する必要がある。アンテナと基地局間を光ファイバーにより接続し、無線信号を光信号に変換して高速かつ効率的な通信を行う検討が進んでいる³¹⁾⁻³⁴⁾。今日の情報通信社会を支えるデータセンターにおいても、光通信のいっそうの導入による低消費電力化や大容量通信の実現、そして装置の低廉化を目指した研究開発が盛んに行われている。

以上、いくつかの研究領域を例示したが、個別の領域では状況は異なるものの、全体としてわが国の研究開発レベルは依然として高いと言える。例えば基礎研究に関してはECOC（The European Conference on Optical Communication）やOFC（Optical Fiber Communication Conference）をはじめとする主要国際会議において、わが国からの投稿数は一定数を維持しており、諸外国と比肩し得る位置にあると言える。現在も情報通信研究機構等による大規模な研究プロジェクト（Beyond 5G）が開始されるなど一定の研究支援が行われていることから、2～3年の短期でわが国の研究レベルが衰退する可能性は低いと考えられる。一方では、特に中国の研究レベルの向上が目覚ましく、主要論文誌IEEE/Optica JOCN, JLT等でも中国からの論文が目立つようになっている。

【論文や特許の動向】

本領域では、特許件数は着実に増加している一方、論文数については2017年よりいったん減少したが2020年より再び増加しており、堅調に研究開発が進められている。論文動向に関しては、日本からの論文発表数は2016年以降ほぼ増加しておらず、また米国・欧州からの論文発表数は減少傾向である。一方、中国からの発表論文数が着実に増えており、2021年には論文の数・シェアで欧州を抜いている。抜かれはしたものの、欧州の論文数は依然多く、企業との協業も盛んである。特許ファミリー件数のシェアに関しては、日本や米国が減少傾向にあり、また欧州が横ばいである一方、中国は大きく伸び続けており2018年以降はトップとなっている。Patent Asset Indexシェアについては、急伸している中国がトップの米国に追いついてきた一方、日本は大きく減少している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

空間多重・マルチバンド伝送

複数のコア（光信号が伝送される領域）を持つマルチコア光ファイバーの使用や、複数の伝播モードによるマルチモード伝送の利用、あるいは従来の単一コア・モードを持つ光ファイバーを多数並列使用する空間多重光ネットワークの検討が2010年代に急速に進んだ。マルチコア・マルチモード光ファイバーに加え、これら空間多重ネットワークの実現で課題となるネットワーク構成^{35)~37)}や、関連デバイスの研究開発が急速に進展した^{38)~40)}。特記すべきネットワーク構成としては香川大によるSpatial Channel Networks (SCNs) があり⁴¹⁾、10Tbpsクラスの超大容量光パスを視野に入れた構成となっている。また、光ネットワーク普及の原動力となった波長多重同様、複数コア・全波長に渡る光信号の一括スイッチングが香川大により、また一括増幅の実現がNECによってなされている^{39), 40)}。

伝送損失が小さく光増幅器や波長選択スイッチ等のデバイスの入手が容易なC帯に加え、他の帯域（E, S, L帯等）を用いて光ファイバー容量を増やす検討が進んでいる^{20)~23)}。NTT研究所が提唱するIOWN³⁾の中でもこのマルチバンド伝送に対応した光ノード装置が研究されている。またイタリアサンタナ大のグループも、複数帯域を用いた場合の利点と欠点について詳細な検討を行っている。マルチバンドへの対応を実現するには、C帯以外の帯域で機能する光増幅器、送受信器、光スイッチ等が必要であり、また帯域ごとに異なる伝送特性に対応する必要がある。

空間多重伝送・マルチバンド伝送のいずれにおいても、マルチコアファイバーにおけるコア間の干渉やマルチバンド伝送における不均一な伝送特性を適切に取り扱う必要がある。最近のエラスティック光パスネットワークでは、伝送特性に応じて変調方式を選択して光パスの伝送距離と占有帯域幅とのトレードオフを解決するが、これら不均一な伝送特性と合わせて全体最適を実現することは非常に難しい。ポーランド国立通信研究所や米国ジョージワシントン大学により準最適解を得るアルゴリズムが提案されているほか^{42)~45)}、波長多重・空間多重の階層化ネットワークにおいてKDDI研究所およびスペインCTTCがSDNによる動的制御を実現している²⁵⁾。NTT研究所においては、通信ノード内で全帯域をいったんC帯に変換し、C帯用送受信器や光スイッチを用いること、および光パスが経由する帯域をリンクごとに変えて伝送特性を平均化することでC帯以外の帯域の使用率を上げ、ネットワーク全体としての効率が高まるという検討結果²¹⁾も発表されており、帯域変換技術と全体最適化との連携により新世代のネットワークの実現性を示そうとしている。

機械学習の光通信制御への応用

昨今の急速な機械学習の発展に伴い、光通信においても各所で機械学習が取り入れられている⁴⁶⁾。機械学習の適用には、トレーニングのためのデータが十分に得られるか否かが鍵を握る。光通信においては、光ファイバー中のデータ伝送、状態推定（テレメトリ）、通信需要の変動予測、ネットワーク制御への応用に関する検討が進んでおり、特にデータ伝送の領域においては、光通信特有の高ボーレート（単位時間あたりに送信されるシンボル数）により大量の学習データが得られることから機械学習との親和性が高い。伝送路の状況に応じた変復調方式の最適化、すなわちシンボル位置の最適化や受信シンボルの判定に置いてその有効性が示されている^{47)~50)}。一方、ネットワーク制御のように比較的学習データの得にくい領域でも、問題の本質的な難しさ故に機械学習の応用による準最適解の導出が期待されている^{51), 52)}。各所での機械学習応用の進展および異なる領域で用いられる機械学習間の連携等、今後の発展が期待される。

光ファイバー無線

無線通信の容量増加に伴ってフロントホールでの超大容量実現が求められており、光通信技術のより広範な導入とその高度化が必要となっている。そこで、無線基地局の機能をアンテナと接続部に分離して、それらを光ファイバーで結んで無線信号を伝送する、Radio over Fiber技術の検討が進んでいる。無線信号をいっ

たんデジタル信号に変換するデジタルRoFと、無線信号を直接光信号に変換して伝送するアナログRoFがあり、アナログRoFではアンテナ側が簡素化される^{31), 33)}。また、周波数利用効率と消費電力の観点からも優れている。アナログRoFでは、光ファイバー上で波長多重信号を送受信し、各波長にアンテナ素子を対応付けるアレイアンテナも実現できる。5Gシステム上でアンテナの指向性を波長多重信号の送信タイミングにより制御する実装方法の検討も進められている³⁴⁾。

400Gbps超大容量光パスの実現

デジタルコヒーレント技術を本格的に使用した100Gbps光パスは、それ以前の10/40Gbpsと同一の占有周波数帯域幅と、日本国内をカバーするに十分な伝送距離を両立させて現在主流となっている。しかし、100Gbpsを超える光パスを実現するには、伝送距離を犠牲にして高度な変調方式を用いる、あるいはより広い占有周波数帯域幅を用いる⁵³⁾等、容量との何らかのトレードオフが存在している。一方でイーサネットでも400Gbpsを超える容量の検討が進んでおり^{54), 55)}、データセンター用400Gbps通信向けのチップ開発が進んでいる⁵⁶⁾。光通信ネットワーク側でも同等の容量を効率的に実現していく必要があるが、400Gbps超の容量が広範に利用される上では技術面およびコスト面での課題が解決される必要がある。超高ボーレートでの1Tbps級コヒーレント通信を可能にする送信器フロントエンドがNTT研究所より発表される⁵⁷⁾など個々の技術開発は進んでいるものの、現在のところ400Gbps伝送の初期のデモンストレーションが行われる段階であり^{58), 59)}、今後の研究開発の進展が期待される。

光通信ネットワークにおけるテレメトリの活用

フレキシブルグリッドによる周波数帯域の細分化と光パスへの必要十分な帯域幅の割り当てと、究極的な光パス数の増加を目指すナイキスト波長多重ネットワークの検討⁶⁰⁾⁻⁶⁵⁾、伝送マージンの削減⁶⁶⁾⁻⁶⁹⁾、光パスの動的運用を実現するトランスポートSDNのデモンストレーションは、光ファイバーの潜在的な容量を極限まで利用していこうという試みである。保守的な伝送マージンや周波数割り当て、光パスの固定的な運用をする場合と比べ、伝送特性が許容値から逸脱するリスクが増大する。そこで伝送特性を監視するテレメトリとその活用が検討されている^{70), 71)}。当該装置は相対的に低廉であり、ネットワーク内で多数使用可能である。ゆえにテレメトリを含む多くのデータを処理することで、光通信ネットワーク全体の性能や機能、付加価値を増していくことが期待される。

[注目すべき国内プロジェクト]

わが国では情報通信研究機構によるBeyond 5G研究開発促進事業²⁾が開始されており、通信キャリアや通信機器ベンダーによる先端技術開発が進んでいる。光ファイバー通信のみならず、無線通信まで含めた広範な技術領域における大規模なファンディングであり、今後数年で成果が示されると想定される。また、NTT研究所が推進するIOWN³⁾では、オールフォトニクスネットワークが構成要素とされており、光ファイバーから伝送装置・半導体、ネットワーク端末に至る経路に光通信システムを適用する方向性が示されている。ネットワークのエッジや膨大なデータを扱うデータセンターにおける適用を想定し、電気的な配線区間を極力短くして、電子デバイスと光デバイスの機能を一体化・集積化する「光電融合」デバイスの実現を目指した研究開発が進められている。光電融合デバイスとしては、2023年度にはネットワーク向けの小型/低電力デバイスを、2025年度以降にはコンピューティング領域でのボード接続用デバイスを、2029年度以降にボード内チップ間向けデバイスを、それぞれ商用化していく計画となっている。

[注目すべき米国のプロジェクト]

米国では広義の光通信として、衛星を光ノードとして用いる通信がDARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)の支援により研究開発されている⁷²⁾。衛星間の光通信だけでなく、衛星群によるネットワー

く内での通信を行い広範な領域をカバーする点が特徴と言える。また、日米間ではNSFおよび情報通信研究機構による2国間共同研究へのファンディングJUNO3（Japan-U.S. Network Opportunity 3）が開始されている⁷³⁾。

【注目すべき欧州のプロジェクト】

ヨーロッパにおいては光通信分野で顕著な成果のあるスペインCTTC（Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya）他によるONFIREプロジェクトが直近まで実施されており⁷⁴⁾、またわが国とEUとの共同研究へのファンディングEU-JP 2014-2017 “RAPID：Radio technologies for 5G using advanced photonic infrastructure for dense user environments”が実施されていた。当該ファンドの他にも、光通信および周辺を含めての研究が実施されていると想定される。なお、国際共同研究については、わが国および米国・ヨーロッパの有力研究機関との共著論文が出版されており、国際的な研究成果の実現に加え、国際協力関係の構築と促進が期待される。

（5）科学技術的課題

超低消費電力・超高ボーレート光通信技術

現在用いられている100Gbps光パスは、光信号の波形を高速にサンプリングして得られる大量のデジタル信号を、非常に高速なデジタル信号処理プロセッサにより処理している。その信号処理速度は一般的なプロセッサを1桁以上上回るものであり、消費電力が集積化を制約し、また光パス容量を決定する。超大容量光パスを実現する上では、デジタル信号処理技術のさらなる革新、あるいはアナログ信号処理技術の適用により高いボーレートを低い消費電力で実現していく技術の研究開発が必要である。また、研究開発の意義を高めるためには、100Gbpsデジタルコヒーレント用プロセッサ同様、日本企業が市場を確実に確保できるような支援が求められるであろう。

超低遅延・超大容量化と低コスト化の両立

通信量の急速な増大に応えるため、光ファイバー容量の究極的な使用、空間多重やマルチバンド伝送等、ネットワーク容量を増加させる試みがなされていることは上述した通りである。一方で、光ファイバー容量には理論上の限界があること、空間多重やマルチバンド伝送においては光ファイバーの敷設や不均一な伝送特性への対処等が必要であり導入は必ずしも容易ではないことから、従来型ネットワークをコスト面で上回るための方向性を見いだすこと、空間多重向け光ファイバーやマルチバンド伝送向けスイッチや増幅器といった必須デバイスを効率的に実現するための研究開発を実施することが必要と考えられる。そこではオープン化の流れを的確につかみつつ、所望の機能・能力を備えると同時に費用対効果に優れた光通信ネットワークを実現することが求められるであろう。また、第5世代あるいはそれ以降の携帯電話通信に求められる超低遅延を満たすことが必要である。現在各所で用いられ、遅延の要因となっている電氣的経路制御やデジタル信号処理の戦略的な配置や、これら処理を用いない低遅延デバイスの使用が有効な手段となり得る。

（6）その他の課題

光通信においては、光ファイバー伝送、そして光ファイバーを接続して構築される光ネットワークのすべての領域が互に関連しており、また各領域において昨今急速に発展を遂げている機械学習を含めた最適化手法が用いられている。領域の間の関連性が強いことから、光通信分野全体の飛躍的な進展を目指すには、特定の領域に限らない、全方位的な研究活動を相互に連携しながら実施していく必要がある。例えばある領域で生まれた革新的なアイデアを、いち早く他の領域で効果的に生かす研究環境と文化がわが国の中で醸成されることが理想である。また、世界全体とわが国の市場規模の差に鑑みれば、当該研究分野の研究開発および生産を、すべてわが国が単独で行うことはできない。しかも直近の十余年においては特に中国の研究開発

力の向上が目覚ましく、国際会議での影響力が急激に強まっている。このような状況下で、当該研究分野におけるわが国のプレゼンスを確たるものとする上ではまず国内外の研究者間の連携をさらに強固なものとして、およびわが国の研究成果の国際的な発信を強化していくことが望まれる。

本領域は、特定重要技術20分野の一つ「高度情報通信・ネットワーク技術」に位置付けられており、経済安全保障の視点が重要になってきている。超大容量・超低遅延・超低消費電力のデータ伝送が可能となることで、全く新しいサービスが生み出される可能性があり、経済成長や陣取りの糧として期待値が大きい。これらは、さまざまな用途システムの共通技術であり、ICTインフラとして利用されるという点で汎用性が高く、またインターネットをはじめとするネットワークは社会基盤として浸透しており、公共性が高いということから利便性・持続性・安全性への影響も非常に大きい。さらに、直接的な攻撃力および治安維持能力を有するわけではないものの、軍事応用を含むネットワークサービスの基盤ともなり得ることから、取り扱いには注意を要する。サプライチェーンという観点では、現状、装置のオープン化は進んでいるが光ファイバー等の製造は、同志国以外にもある程度依存せざるを得ない状況であり、他国から導入する技術や製品の検証を実施する能力を国内あるいは同志国に備えなくてはならない。また、一定の生産技術および研究開発能力をわが国の中に担保することが必須である。

(7) 国際比較

以下では、北米で開催される光通信の主要国際会議OFCにおける関連論文数を評価の一つのベンチマークとした。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	日本はCOVID-19の影響下においても、主要国際会議OFCでの投稿件数を維持している。情報通信研究機構によるBeyond 5G研究開発促進事業 ²⁾ による通信キャリアおよび機器ベンダーへの大規模なファンドが提供されている。
	応用研究・開発	○	↘	情報通信分野全体として研究費は減少傾向にある ⁷⁵⁾ 。光ファイバーやトランシーバー、光スイッチ等で日本企業が世界市場での一定の地位を占めている。
米国	基礎研究	◎	→	主要国際会議OFCでの関連論文数はやや減少傾向にあるが、国際共著論文が多いことから絶対数はEUに次ぐ。IEEE、Optica等の光通信分野の主要学会も米国に本拠を置き、依然として世界の研究の中心である。
	応用研究・開発	◎	→	30ポートを越える多ポート波長選択スイッチ等、高付加価値製品の研究開発および市販が続いている。光ファイバー等でも高いシェアを有する。
欧州	基礎研究	◎	→	光通信を直接の対象としたファンディングの他、空間多重伝送・マルチバンド伝送で先駆的な研究を実施するなど、研究活動が活発でありかつ他国への影響も強い。一方では、主要国際会議OFCでの論文数は急激に減少している。
	応用研究・開発	○	→	各国の通信キャリアおよび機器ベンダーによる研究開発は従前通り継続されている。
中国	基礎研究	◎	↗	大学・研究機関から有力論文誌への発表数が多く、国際会議運営や査読委員等、おのおのの研究者のプレゼンスも増大している。かねてより主要国際会議OFCでの投稿数も増加を続けていたが、最近は投稿数のみならず採択数・関連論文数が非常に多くなっている。これは研究費の増大だけによるものでなく、研究者の能力とテーマのレベルが飛躍的に向上しているためと言える。
	応用研究・開発	◎	↗	光ファイバー・デバイス等、あらゆる領域で研究開発が盛んに行われており、数年前から主要国際会議のエキシビションでも存在感を示している。広大な国土に光ファイバーを多数敷設し高速通信インフラを構築したとされ、国家全体での生産能力も大変優れている。

韓国	基礎研究	○	→	主要国際会議 OFC の関連論文数は少ないものの、一定数を維持している。
	応用研究・開発	△	→	顕著な活動・成果は見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) ○現状

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

×：活動・成果がほとんど見えていない

○：顕著な活動・成果が見えている

一：評価できない（公表する際には、表示しない）

△：顕著な活動・成果が見えていない

(註3) 近年（ここ1～2年）の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向 →：現状維持 ↘：下降傾向

2.6

俯瞰区分と研究開発領域
通信・ネットワーク

参考文献

- 1) Cisco Systems, Inc. 「Cisco Annual Internet Report (2018～2023年) ホワイトペーパー」
https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html, (2023年2月26日アクセス) .
- 2) 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) 「Beyond 5G 研究開発促進事業について」
<https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin.html>, (2023年2月26日アクセス) .
- 3) IOWN Global Forum, <https://iowngf.org>, (2023年2月26日アクセス) .
- 4) Claude E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal* 27, no. 3 (1948) : 379-423., <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
- 5) Emmanuel B. Desurvire, John L. Zyskind and C. Randy Giles, “Design optimization for efficient erbium-doped fiber amplifiers,” *Journal of Lightwave Technology* 8, no. 11 (1990) : 1730-1741., <https://doi.org/10.1109/50.60573>.
- 6) Jonathan Homa and Krishna Bala, “ROADM Architectures and Their Enabling WSS Technology,” *IEEE Communications Magazine* 46, no. 7 (2008) : 150-154., <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4557058>.
- 7) Keita Yamaguchi, et al., “M × N Wavelength Selective Switches Using Beam Splitting By Space Light Modulators,” *IEEE Photonics Journal* 8, no. 2 (2016) : 0600809.,
<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2527705>.
- 8) Lumentum Operations LLC, “ROADM Modules: TrueFlex Twin 1x35 Wavelength Selective Switch (Twin 1x35 WSS),” <https://www.lumentum.co.jp/ja/products/trueflex-twin-1x35-wavelength-selective-switch>, (2023年2月26日アクセス) .
- 9) InLC Technology, Inc., “TLC Series Flexible Grid WSS,” <https://web.archive.org/web/20190914025153/http://inlct.com/tlc-series-flexible-grid-wss/>, (2023年2月26日アクセス).
- 10) International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), “G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,”
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>, (2023年2月26日アクセス) .
- 11) Masahiko Jinno, et al., “Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies,” *IEEE Communication Magazine* 47, no. 11 (2009) : 66-73., <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5307468>.
- 12) Masahiko Jinno, et al., “Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced

- elastic optical path network [Topics in Optical Communications],” *IEEE Communication Magazine* 48, no. 8 (2010) : 138-145., <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5534599>.
- 13) Masahiko Jinno, et al., “Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking,” *IEEE Communications Magazine* 50, no. 5 (2012) : 56-65., <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6194383>.
 - 14) Víctor López, et al., “Finding the target cost for sliceable bandwidth variable transponders,” *Journal of Optical Communications and Networking* 6, no. 5 (2014) : 476-485., <https://doi.org/10.1364/JOCN.6.000476>.
 - 15) António Eira, et al., “Optimized client and line hardware for multiperiod traffic in optical networks with sliceable bandwidth-variable transponders [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 7, no. 12 (2015) : B212-B221., <https://doi.org/10.1364/JOCN.7.00B212>.
 - 16) Annalisa Morea, et al., “Impact of Reducing Channel Spacing from 50GHz to 37.5GHz in Fully Transparent Meshed Networks,” in *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference (OFC)* (Optica Publishing Group, 2014), Th1E.4., <https://doi.org/10.1364/OFC.2014.Th1E.4>.
 - 17) Thierry Zami, et al., “Growing impact of optical filtering in future WDM networks,” in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)* (Optica Publishing Group, 2019), M1A.6., <https://doi.org/10.1364/OFC.2019.M1A.6>.
 - 18) René-Jean Essiambre, et al., “Capacity Limits of Optical Fiber Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 28, no. 4 (2010) : 662-701., <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2039464>.
 - 19) René-Jean Essiambre and Robert W. Tkach, “Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 5 (2012) : 1035-1055., <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2182970>.
 - 20) Dimitris Uzunidis, et al., “Strategies for Upgrading an Operator’s Backbone Network Beyond the C-Band: Towards Multi-Band Optical Networks,” *IEEE Photonics Journal* 13, no. 2 (2021) : 7200118., <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3054849>.
 - 21) Abhijit Mitra, et al., “Effect of Channel Launch Power on Fill Margin in C+L Band Elastic Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 38, no. 5 (2020) : 1032-1040., <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2952876>.
 - 22) Nicola Sambo, et al., “Provisioning in Multi-Band Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 38, no. 9 (2020) : 2598-2605., <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2983227>.
 - 23) Masahiro Nakagawa, et al., “Adaptive Link-by-Link Band Allocation: A Novel Adaptation Scheme in Multi-Band Optical Networks,” in *Proceedings of 2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)* (IEEE, 2021), 1-6., <https://doi.org/10.23919/ONDM51796.2021.9492502>.
 - 24) C. Manso, et al., “TAPI-enabled SDN control for partially disaggregated multi-domain (OLS) and multi-layer (WDM over SDM) optical networks [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 13, no. 1 (2021) : A21-A33., <https://doi.org/10.1364/JOCN.402187>.
 - 25) Ramon Casellas, et al., “Advances in SDN control and telemetry for beyond 100G disaggregated optical networks [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 14, no. 6 (2022) : C23-C37., <https://doi.org/10.1364/JOCN.451516>.

- 26) Open ROADM Multi-Source Agreement (MSA), <http://openroadm.org>, (2023年2月26日アクセス) .
- 27) 原井洋明「DXを加速する将来ネットワークの実現とテストベッド利用、標準化の推進について (令和2年3月10日)」総務省, https://www.soumu.go.jp/main_content/000690744.pdf, (2023年2月26日アクセス) .
- 28) David S. Millar, et al., “Design of a 1 Tb/s Superchannel Coherent Receiver,” *Journal of Lightwave Technology* 34, no. 6 (2016) : 1453-1463., <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2519260>.
- 29) Hubert Dzielciol, et al., “Geometric Shaping of 2-D Constellations in the Presence of Laser Phase Noise,” *Journal of Lightwave Technology* 39, no.2 (2021) : 481-490., <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3031017>.
- 30) Xiang Zhou, et al., “Beyond 1 Tb/s Intra-Data Center Interconnect Technology: IM-DD OR Coherent?” *Journal of Lightwave Technology* 38, no. 2 (2020) : 475-484., <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2956779>.
- 31) 伊藤耕大, 他「アナログ RoF を活用した多様な高周波数帯無線システムの効率的収容」『NTT 技術ジャーナル』32 巻 3 号 (2020) : 15-17.
- 32) Hsuan-Yun Kao, et al., “End-to-End Demonstration based on hybrid IFoF and Analogue RoF/RoMMF links for 5G Access/In-Building Network System,” in *Proceedings of 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)* (IEEE, 2020), 1-4., <https://doi.org/10.1109/ECOC48923.2020.9333365>.
- 33) 菅野敦史, 他「光ファイバ無線技術：光・電波ネットワークのシームレスな融合に向けた波形伝送技術の研究開発」『情報通信研究機構研究報告』64 巻 2 号 (2018) : 57-66., https://doi.org/10.24812/nictkenkyuhouku.64.2_57.
- 34) Shinji Nimura, et al., “Photodiode-Integrated 8×8 Array-Antenna Module for Analog-RoF Supporting 40-GHz 5G Systems,” in *Proceedings of 2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)* (IEEE, 2022), 1-4., <https://doi.org/10.23919/OECC/PSC53152.2022.9849912>.
- 35) Dan M. Marom, et al., “Survey of photonic switching architectures and technologies in support of spatially and spectrally flexible optical networking [invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 9, no. 1 (2017) : 1-26., <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000001>.
- 36) Francisco-Javier Moreno-Muro, et al., “Evaluation of core-continuity-constrained ROADMs for flex-grid/MCF optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking* 9, no. 11 (2017) : 1041-1050., <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.001041>.
- 37) Behnam Shariati, et al., “Physical-layer-aware performance evaluation of SDM networks based on SMF bundles, MCFs, and FMFs,” *Journal of Optical Communications and Networking* 10, no. 9 (2018) : 712-722., <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000712> .
- 38) Kenya Suzuki, et al., “Wavelength selective switch for multi-core fiber based space division multiplexed network with core-by-core switching capability,” in *Proceedings of 2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)* (IEEE, 2016), 1-3.
- 39) Masahiko Jinno, Takahiro Kodama and Tsubasa Ishikawa, “Principle, Design, and Prototyping of Core Selective Switch Using Free-Space Optics for Spatial Channel Network,” *Journal of Lightwave*

Technology 38, no. 18 (2020) : 4895-4905., <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3000304>.

- 40) Hitoshi Takeshita, et al., “Configurations of Pump Injection and Reinjection for Improved Amplification Efficiency of Turbo Cladding Pumped MC-EDFA,” *Journal of Lightwave Technology* 38, no. 11 (2020) : 2922-2929., <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2974483>.
- 41) Masahiko Jinno, “Spatial channel network (SCN) : Opportunities and challenges of introducing spatial bypass toward the massive SDM era [invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 11, no. 3 (2019) : 1-14., <https://doi.org/10.1364/JOCN.11.000001>.
- 42) Krzysztof Walkowiak, Mirosław Klinkowski and Piotr Lechowicz, “Dynamic Routing in Spectrally Spatially Flexible Optical Networks with Back-to-Back Regeneration,” *Journal of Optical Communications and Networking* 10, no. 5 (2018) : 523-534., <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000523>.
- 43) Shrinivas Petale, Juzi Zhao and Suresh Subramaniam, “TRA: an efficient dynamic resource assignment algorithm for MCF-based SS-FONs,” *Journal of Optical Communications and Networking* 14, no. 7 (2022) : 511-523., <https://doi.org/10.1364/JOCN.455426>.
- 44) Mirosław Klinkowski and Grzegorz Zalewski, “Dynamic Crosstalk-Aware Lightpath Provisioning in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks,” *Journal of Optical Communications and Networking* 11, no. 5 (2019) : 213-225., <https://doi.org/10.1364/JOCN.11.000213>.
- 45) Farhad Arpanaei, et al., “QoT-aware performance evaluation of spectrally-spatially flexible optical networks over FM-MCFs,” *Journal of Optical Communications and Networking* 12, no. 8 (2020) : 288-300., <https://doi.org/10.1364/JOCN.393720>.
- 46) Francesco Musumeci, et al., “An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21, no. 2 (2019) : 1383-1408., <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2880039>.
- 47) Rasmus T. Jones, et al., “Deep Learning of Geometric Constellation Shaping Including Fiber Nonlinearities,” in *Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)* (IEEE, 2018), 1-3., <https://doi.org/10.1109/ECOC.2018.8535453>.
- 48) Laurent Schmalen, “Probabilistic Constellation Shaping: Challenges and Opportunities for Forward Error Correction,” in *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference (OFC)* (Optica Publishing Group, 2018), M3C.1., <https://doi.org/10.1364/OFC.2018.M3C.1>.
- 49) Junho Cho and Peter J. Winzer, “Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications,” *Journal of Lightwave Technology* 37, no. 6 (2019) : 1590-1607., <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2898855>.
- 50) Thierry Zami, et al., “Simple self-optimization of WDM networks based on probabilistic constellation shaping [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 12, no. 1 (2020) : A82-A94., <https://doi.org/10.1364/JOCN.12.000A82>.
- 51) Xiaoliang Chen, et al., “DeepRMSA: A Deep Reinforcement Learning Framework for Routing, Modulation and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 37, no. 16 (2019) : 4155-4163., <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2923615>.
- 52) Ryuta Shiraki, et al., “Dynamically Controlled Flexible-Grid Networks Based on Semi-Flexible Spectrum Assignment and Network-State-Value Evaluation,” in *Proceedings of 2020 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC)* (IEEE, 2020), 1-3.
- 53) Optical Internetworking Forum (OIF), “OIF-FD-FLEXCOH-DWDM-01.0: Flex Coherent DWDM

Transmission Framework Document, August 3rd, 2017,” <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-FD-FLEXCOH-DWDM-01.0-1.pdf>, (2023年2月26日アクセス)。

54) IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee, “IEEE 802.3 Beyond 400 Gb/s Ethernet Study Group,” <https://www.ieee802.org/3/B400G/>, (2023年2月26日アクセス)。

55) 曾根由明, 山本秀人「グローバルスタンダード最前線: IEEE802.3における400Gイーサネットおよび Beyond 400Gイーサネット標準化の最新動向」NTT技術ジャーナル, <https://journal.ntt.co.jp/article/14770>, (2023年2月26日アクセス)。

56) 三菱電機株式会社「広動作温度範囲CWDM 100Gbps (53Gbaud PAM4) EMLチップ サンプル提供開始: データセンターの400Gbps通信と光トランシーバーの低消費電力化、低コスト化に貢献」<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2021/1021-b.html>, (2023年2月26日アクセス)。

57) Munehiko Nagatani, et al., “A Beyond-1-Tb/s Coherent Optical Transmitter Front-End Based on 110-GHz-Bandwidth 2 : 1 Analog Multiplexer in 250-nm InP DHBT,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 55, no. 9 (2020) : 2301-2315., <https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.2989579>.

58) 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) 産業サイバーセキュリティセンター「世界初 超広帯域 400Gbps回線による複数組織間とのIP映像伝送及びペネトレーションテスト等に成功」IPA, https://www.ipa.go.jp/icscoe/news_all/news20220322.html, (2023年2月26日アクセス)。

59) 独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 総合テストベッド研究開発推進センター「超高精細映像を用いた広域映像配信実証実験/2022.2.2 (水) - 2.11 (金): 広域400G接続、NMOSマルチベンダ運用、EVPN over SR-MPLS実験に成功」NICT, <https://testbed.nict.go.jp/event/yukimatsuri2022-press.html>, (2023年2月26日アクセス)。

60) Rene Schmogrow, et al., “512QAM Nyquist sinc-pulse transmission at 54 Gbit/s in an optical bandwidth of 3 GHz,” *Optics Express* 20, no. 6 (2012) : 6439-6447., <https://doi.org/10.1364/OE.20.006439>.

61) Eleni Palkopoulou, et al., “Nyquist-WDM-Based Flexible Optical Networks: Exploring Physical Layer Design Parameters,” *Journal of Lightwave Technology* 31, no. 14 (2013) : 2332-2339., <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2265324>.

62) Pouria Sayyad Khodashenas, et al., “Investigation of Spectrum Granularity for Performance Optimization of Flexible Nyquist-WDM-Based Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 33, no. 23 (2015) : 4767-4774., <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2484077>.

63) Guo-Wei Lu, et al., “Optical subcarrier processing for Nyquist SCM signals via coherent spectrum overlapping in four-wave mixing with coherent multi-tone pump,” *Optics Express* 26, no. 2 (2018) : 1488-1496., <https://doi.org/10.1364/OE.26.001488>.

64) Ryuta Shiraki, et al., “Design and evaluation of quasi-Nyquist WDM networks utilizing widely deployed wavelength-selective switches,” *Optics Express* 27, no. 13 (2019) : 18549-18560., <https://doi.org/10.1364/OE.27.018549>.

65) Masataka Nakazawa, Masato Yoshida and Toshihiko Hirooka, “Recent progress and challenges toward ultrahigh-speed transmission beyond 10 Tbit/s with optical Nyquist pulses,” *IEICE Electronics Express* 18, no. 7 (2021) : 20212001., <https://doi.org/10.1587/elex.18.20212001>.

66) Yvan Pointurier, “Design of Low-Margin Optical Networks,” *Journal of Optical Communications and Networking* 9, no. 1 (2017) : A9-A17., <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.0000A9>.

67) Kaida Kaeval, et al., “QoT assessment of the optical spectrum as a service in disaggregated network scenarios,” *Journal of Optical Communications and Networking* 13, no. 10 (2021) :

2.6

俯瞰区分と研究開発領域 通信・ネットワーク

E1-E12., <https://doi.org/10.1364/JOCN.423530>.

- 68) Mark Filer, et al., “Low-margin optical networking at cloud scale [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking* 11, no. 10 (2019) : C94-C108., <https://doi.org/10.1364/JOCN.11.000C94>.
- 69) Emmanuel Seve, et al., “Learning Process for Reducing Uncertainties on Network Parameters and Design Margins,” *Journal of Optical Communications and Networking* 10, no. 2 (2018) : A298-A306., <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A298>.
- 70) Takafumi Tanaka, et al., “Field Demonstration of Real-time Optical Network Diagnosis Using Deep Neural Network and Telemetry,” in *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference (OFC) 2019* (Optica Publishing Group, 2019), Tu2E.5., <https://doi.org/10.1364/OFC.2019.Tu2E.5>.
- 71) Francesco Paolucci, et al., “Network Telemetry Streaming Services in SDN-Based Disaggregated Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology* 36, no. 15 (2018) : 3142-3149., <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2795345>.
- 72) Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), “DARPA Kicks Off Program to Develop Low-Earth Orbit Satellite ‘Translator’,” <https://www.darpa.mil/news-events/2022-08-10>, (2023年2月26日アクセス) .
- 73) National Science Foundation (NSF), “Japan-U.S. Network Opportunity 3 (JUNO3),” <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21624/nsf21624.htm>, (2023年2月26日アクセス) .
- 74) ONFIRE, <https://h2020-onfire.eu/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 75) 総務省「情報通信白書」 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>, (2023年2月26日アクセス) .

2.6

俯瞰区分と研究開発領域
通信・ネットワーク